

•综述•

青藏高原高寒草地生物多样性与生态系统功能的关系

张中华^{1,6} 周华坤^{1,2*} 赵新全^{1,2*} 姚步青¹ 马真¹
董全民³ 张振华¹ 王文颖⁴ 杨元武⁵

1 (中国科学院西北高原生物研究所青海省寒区恢复生态学重点实验室, 西宁 810008)

2 (青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 西宁 810016)

3 (青海省畜牧兽医科学院, 西宁 810016)

4 (青海师范大学生命与地理科学学院, 西宁 810008)

5 (青海大学农牧学院, 西宁 810016)

6 (中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 生物多样性和生态系统功能(BEF)之间的关系是目前陆地生态系统生态学研究热点, 对于生态系统的高效利用与管理意义重大, 而且对于退化生态系统功能的恢复及生物多样性的保护有重要的指导作用。高寒草地是青藏高原生态系统的主体, 近年来, 在气候变化与人为干扰等因素的驱动下, 高寒草地生态系统功能严重衰退。为此, 本文在综述物种多样性和生态系统功能及其相互关系研究进展的基础上, 首先从地下生态学过程研究、全球变化对生态系统多功能性的影响等方面解析了目前关于草地生物多样性和生态系统功能研究中存在的问题。继而, 从不同草地类型、草地退化程度、放牧、模拟气候变化、刈割、施肥、封育和补播等干扰利用方式对高寒草地物种多样性与生态系统功能的影响进行了全面的评述。并指出了高寒草地BEF研究中存在的不足, 今后应基于物种功能多样性开展高寒草地BEF研究, 全面且综合地考虑非生物因子(养分资源、外界干扰、环境波动等)对生物多样性与生态系统功能之间关系的影响, 关注尺度效应和要素耦合在全球气候变化对高寒草地BEF研究中的作用。最后, 以高寒草地BEF研究进展和结论为支撑依据, 综合提出了高寒草地资源利用和生物多样性保护的措施与建议: 加强放牧管理, 保护生物多样性; 治理退化草地, 维持生物多样性功能; 加强创新保护理念, 增强生态系统功能。

关键词: 高寒草地; 生物多样性; 生态系统功能; 生产力; 气候变暖; 放牧; 土地利用; 保护策略

Relationship between biodiversity and ecosystem functioning in alpine meadows of the Qinghai-Tibet Plateau

Zhonghua Zhang^{1,6}, Huakun Zhou^{1,2*}, Xinquan Zhao^{1,2*}, Buqing Yao¹, Zhen Ma¹, Quanmin Dong³, Zhenhua Zhang¹, Wenyang Wang⁴, Yuanwu Yang⁵

1 Key Laboratory of Cold Regions Restoration Ecology, Qinghai Province, Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008

2 The Co-constructing State Key Laboratory of Three Rivers Sources Ecology and Plateau Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016

3 Qinghai Academy of Animal and Veterinary Sciences, Xining 810016

4 College of Life and Geography Science, Qinghai Normal University, Xining 810008

5 College of Agricultural and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016

6 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: The study of the relationship between biodiversity and ecosystem functioning (BEF) is a hot topic in the field of terrestrial ecosystem ecology, and is of great significance for the efficient use and management

收稿日期: 2017-01-23; 接受日期: 2017-07-15

基金项目: 青海省自然科学基金(2016-ZJ-910)、青海省创新平台建设专项(2017-ZJ-Y20)、省部共建三江源生态和高原农牧业国家重点实验室开放研究项目(2017-KF-02)、国家重点研发计划(2016YFC0501901)、国家自然科学基金(31672475, 31472135)和青海省科技厅项目(2016-ZJ-Y01)

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mails: hkzhou@nwipb.cas.cn; xqzhao@nwipb.cas.cn

of ecosystems. Furthermore, it plays an important role in the restoration of degraded ecosystems and biodiversity conservation. Alpine grassland is the main ecosystem type found in the Qinghai-Tibet Plateau. In recent years, progress has been made on species diversity and ecosystem functioning and their mutual relationship in alpine grasslands. This paper analyzes existing problems in the research of grassland biodiversity and ecosystem functioning in terms of the study of underlying ecological processes and the impacts on ecosystem multi-functionality under global change. The effects of different grassland types, grassland degradation, grazing disturbance, simulated climate change, mowing, fertilization, enclosure, and replanting on the relationship between biodiversity and ecosystem functioning in alpine grasslands are also thoroughly reviewed in this paper. Moreover, deficiencies and future research directions of alpine grassland BEF are identified: carrying on the BEF research of alpine grasslands based on the functional diversity of species, comprehensively considering the effects of abiotic factors such as resource supply levels, disturbance intensity and scale, and environmental fluctuation on the relationship between species diversity and ecosystem functioning, and paying attention to the effect of scale and element coupling on BEF research of alpine grasslands under global climate change. Finally, based on research progress and conclusions of BEF in alpine grasslands, we put forward suggestions to improve the utilization rate of alpine grassland resources and biodiversity conservation, including strengthening grazing management, protecting biodiversity, improving governance of degraded grasslands, maintaining biodiversity function, strengthening innovation and protection concepts and enhancing ecosystem functioning that has been seriously weakened by climate change and human disturbance.

Key words: alpine meadow; biodiversity; ecosystem function; productivity; climate warming; grazing; land use; protection strategy

生物多样性既是人类生存发展的根本和基础,又反映了许多作用于不同时空尺度上的生态的、进化的和人类起源的过程(徐炜等, 2016)。作为联系生物与人类福祉的重要纽带,生态系统功能必然受到生物多样性变化的影响,进而影响人类从生态系统获得产品服务的质与量,因而探究生物多样性和生态系统功能(biodiversity and ecosystem functioning, BEF)之间的关系显得极其重要。生物多样性和生态系统功能之间关系的明确,可以为高效利用或者管理生态系统功能以求达到生态系统服务的最大化和最优化提供基础,还可以在生态系统和生物多样性的恢复方面提供理论支持。人类社会和经济发展所引起的动植物栖息地丧失与破碎化、对动植物资源的过度利用、气候变化、环境污染、生物入侵以及动物疫病等是导致生物多样性丧失和生态系统功能衰退的主要因素。研究表明,人类活动叠加全球气候变化,已在不同水平影响了生物多样性和生态系统生产力等生态系统功能及其互作关系,未来将会有更多的物种逐渐消失,生态系统功能受到影响或衰退(Bellard et al, 2012; 魏辅文等, 2014; 杨玉盛, 2017), 青藏高原高寒草地也不例外(秦大河, 2014; 周华坤等, 2016)。

青藏高原位于我国西南部, 总面积 $2.5 \times 10^6 \text{ km}^2$,

平均海拔4,000–5,000 m, 有“世界屋脊”和“第三极”之称。该地区独特的环境、丰富的野生动植物及其对周边地区气候和环境的深刻影响一直为科学界所瞩目, 在未来仍将是国际上生物多样性、人与环境协调可持续发展的研究热点和关键区域。青藏高原的天然草地面积约占全国草地面积的1/3, 是我国天然草地分布面积最大的一个区(董世魁等, 2016)。草地占青藏高原面积的70%, 主要有6种类型: 高寒草甸、高寒草原、高寒荒漠草原、高寒草甸草原、低地草甸和温带草原, 分别占青藏高原草地面积的47.05%、30.98%、7.41%、4.21%、6.74%和3.61% (Tian et al, 2014)。

高寒草地作为青藏高原生态系统的主体, 是高寒生态系统物种及遗传基因最丰富和最集中的地区之一, 在全球高寒生物多样性保护中具有十分重要的地位(秦大河, 2014; 董世魁等, 2016)。然而近年来, 在全球变化和人为干扰等多重因素的影响下, 该地区的生物多样性发生了急剧的变化(赵新全等, 2011), 亟需加强对该生态系统生物多样性保护的研究。分析在气候变化和人类活动双重影响下的高寒草地物种多样性、生产力的响应规律及其之间的相互关系, 对于青藏高原高寒草地的生物多样性保护和草地合理利用显得尤为重要。

1 物种多样性和生态系统功能及其相互关系

近半个世纪以来, 全球气候变暖、氮沉降、生物入侵以及人类活动的强烈干扰, 直接或间接导致了生物多样性的锐减, 改变了生态系统的群落结构, 严重影响了生态系统的服务价值功能(Chapin et al, 2000; Tilman, 2000; Wan et al, 2007), 导致植被生产力和土壤质量下降, 干旱洪涝等极端天气频现, 病虫害和瘟疫增加等一系列生态环境问题。然而, 生物多样性丧失或者群落结构的变化究竟怎样影响生态系统功能和过程? 反过来, 这些受影响的生态系统又如何反馈于生物多样性的丧失? 陆地生态系统结构和功能会对全球变化做出怎样的响应及表现出的程度有多大? 长期以来, 这些问题都存在很大争议(Loreau et al, 2001; 贺金生等, 2003; Giller et al, 2004; Hooper et al, 2005; Balvanera et al, 2006; Hector & Bagchi, 2007), 是当今生态学研究热点, 也是人类应对全球环境变化的关键所在。

大量研究表明: 生物多样性是生态系统功能过程的决定者(Tilman & Downing, 1994; Hector et al, 1999; Tilman et al, 2001; Hooper et al, 2012), 更高的多样性可以产生更高的生态系统功能水平, 例如更高的群落生产力、更高的系统稳定性和更高的抗入侵能力, 以及更多的碳储存和更快的养分周转率(Tilman et al, 1997; van der Heijden et al, 1998; Bai et al, 2010; de Deyn et al, 2005)。陆地生态系统中物种多样性与生态系统的稳定性、恢复力和生产力等生态系统功能呈正相关(Hector et al, 1999; Loreau et al, 2001; Tilman et al, 2001)。有研究表明, 在受控实验中, BEF之间呈正相关(Tilman & Downing, 1994; Hector et al, 1999; Tilman et al, 2001; Cardinale et al, 2007); 也有研究表明, 这两者之间没有明显的相关关系; 极少研究发现两者呈负相关关系(贺金生等, 2003; Hillebrand et al, 2008)。基于野外观测的生物多样性与生态系统生产力的关系比较复杂, 大体上有5类: 钟型曲线、正相关、负相关、U型和没有明显关系(Waide et al, 1999)。贺金生等(2003)认为野外观测和受控实验中植物的密度、均匀度和土壤营养条件的差异可能是BEF之间关系有较大差异的重要原因。而且随着近些年的发展, 由传统的BEF研究转到气候变化和人工干扰下的BEF研究, 其实验结果之间的差异性将变得更加复杂。

2 青藏高原高寒草地物种多样性与生态系统功能的特点

作为欧亚板块最大的草地区域, 青藏高原高寒草地由于气候寒冷而相对湿润。因其独特的地理环境和生态构造, 高寒草地对气候变化以及放牧等人为干扰十分敏感, 气候系统的微小波动都会使草地生态系统产生强烈的响应和反馈, 进而导致群落结构、生物多样性和生态系统功能都发生很大的改变(赵新全等, 2009)。随着全球气候变化的加剧, 1960–2006年期间, 青藏高原年平均气温升高约0.03, 年平均降水没有发生显著变化(Piao et al, 2010)。也有研究表明, 1971–2010年, 青藏高原年平均气温升高约0.05, 年平均降水没有发生显著变化, 但年平均降水格局呈现显著的时空差异: 一些地区的降水显著增加, 而另一些地区显著减少。由于青藏高原的脆弱性、对气候变化的敏感性以及不断加剧的人类活动, 该地区的高寒草地面临严峻的退化演替形势(赵新全等, 2011; 周华坤等, 2012, 2016), 是研究BEF的理想场所。未来气候变暖、区域性降水格局改变势必影响青藏高原本身的水热条件, 在日益加剧的人类干扰背景下, 必将导致高寒草地退化、高寒湿地萎缩, 并出现严重的生物多样性丧失(秦大河, 2014)。

青藏高原的很多研究都涉及BEF问题。如Wang等(2012)在青海海北高寒草甸、王根绪等(2010)在唐古拉地区高寒草原、石福孙等(2008)在川西北高寒灌丛开展的增温和放牧控制研究, 王长庭等(2004a)对青海高寒草甸不同草地类型功能群的多样性与生产力关系的研究, Chen等(2013)在川西北高寒湿地的研究, Shang等(2013)在青海省三江源区对退化草地结构和功能的研究, 牛克昌等(2006)、Niu等(2009)、Yang等(2012)和Shi等(2014)在甘肃甘南玛曲站施肥样地的研究等。生态系统的结构和功能、生物多样性与生产力的关系是近年来群落生态学研究的核心问题, 其中生态系统生产力是其功能的重要表现形式。目前, 随着研究手段的日新月异、研究水平的日益提高以及研究认识的不断深入, 研究涉及的草地区域不断扩大, 类型也逐渐增多, 高寒草地BEF研究在不同层面、不同区域和不同尺度都取得了一些进展。

2.1 不同草地类型中的高寒草地生物多样性和生态系统功能

目前有关高寒草甸植物群落结构特征及物种多样性研究的报道较多(王启基等, 1998; 周兴民等, 2001; 杜国祯等, 2003; 张涛等, 2015); 但是生态系统生产力等功能对物种多样性的响应是怎样的? 相关的报道还比较少。王长庭等(2005b)基于高寒草甸4种不同草地类型对植物多样性和初级生产力的关系进行了探讨, 初步阐明了高寒草甸生物多样性和生态系统功能之间的作用模式。他们发现: 矮嵩草(*Kobresia humilis*)草甸、小嵩草(*K. pygmaea*)草甸和金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛群落中物种多样性与生产力呈线性增加的关系, 而藏嵩草(*K. tibetica*)沼泽化草甸群落中的这种线性增加关系不显著, 这表明高寒草甸群落生产力受到物种多样性、物种本身特征和环境资源的共同影响, 且环境资源的异质性与群落结构特征及物种多样性分布格局的差异有关。对不同类型草地土壤的养分有效性与多样性-生产力之间的关系进一步分析后发现, 多样性-生产力受到资源供给率等因素的影响, 不同类型高寒草地地上生物量的分布与环境资源供给的变化相一致, 但是不同类型的草地之间存在差异: 在矮嵩草草甸、小嵩草草甸和金露梅灌丛中, 多样性与土壤养分呈正相关; 而在藏嵩草沼泽化草甸中, 多样性随土壤养分增加而减少(王长庭等, 2008a)。杜国祯等(2003)从时间和空间的角度研究了青藏高原东部地区3种典型高寒草甸群落中物种丰富度与生物量关系的基本模式, 发现两者呈对数线性增加的关系, 这是在大尺度(时间和空间)上由时间和空间相互作用而形成的高寒草甸植物群落中物种丰富度与生产力关系的模式趋势; 物种丰富度与生产力的关系受到研究的时间和空间尺度的影响而发生改变, 但相对来说空间尺度影响更为显著。

结合目前针对青藏高原高寒草地不同植物群落的相关研究(安尼瓦尔·买买提等, 2006; Wang et al, 2007; 段敏杰等, 2011; Sa et al, 2012), 王长庭等(2004b)和刘哲等(2015)发现, 在不同海拔梯度上高寒草地生态系统(涵盖了高寒藏嵩草草甸、矮嵩草草甸、高寒金露梅灌丛和流石坡高寒植被等)中的物种丰富度与地上生物量呈S型曲线关系, 表现为Logistic模型。当物种丰富度低于12种时, 地上生物量随物种丰富度的增加增长缓慢; 当物种丰富度在

12-19种时, 地上生物量随物种丰富度的增加快速增加; 当物种丰富度大于26种时, 地上生物量(生产力)逐渐趋于稳定。这就回答了为什么前人关于青藏高原高寒草甸植物群落物种多样性与生产力之间关系的研究中结果不一致的问题(杜国祯等, 2003; 李凯辉等, 2007a)。当物种丰富度大于某一值时, 群落地上生物量(生产力)趋于稳定(周华坤等, 2006)。这也进一步表明, 高寒草地生态系统功能更多地受到物种组成及其生物学特征等因素的控制(王长庭等, 2005a)。高寒草地类型沿海拔梯度发生变化, 因草地类型而异的不同物种组成被认为是生态系统稳定性、生产力、营养动态等功能的重要决定因子(Bengtsson, 1998; 王长庭等, 2005b; 安尼瓦尔·买买提等, 2006; 周华坤等, 2016)。

另外, 时间和空间尺度可能是影响高寒草地BEF研究结果的重要因素。董世魁等(2016)开展的野外调查表明, 与物种多样性相比, 功能多样性对生态系统功能(如初级生产力)的影响更大。因此, 对于青藏高原不同类型高寒草地来说, 要更加关注与生态系统功能密切相关的功能多样性, 才能全面且深入地揭示高寒草地BEF关系和调控机制。

2.2 草地退化下的高寒草地生物多样性和生态系统功能

相关学者除了紧密围绕退化草地种类组成变化、群落时空结构变化、生物生产力下降和生物间关系的改变等方面开展了较多的研究(陈灵芝和陈伟烈, 1995; 周华坤等, 2003; 赵新全等, 2011)外, 对草地退化过程中的BEF关系和规律也进行了相关性分析和机制解释。周华坤等(2012)对不同退化程度的高寒草原进行研究发现, 随着高寒草原退化的加剧, 植被盖度和草地质量指数逐渐减少、毒杂草比例逐渐增加, 植物群落多样性指数和均匀度指数的拟合曲线呈驼峰式变化规律, 而物种多样性与生物量关系的拟合曲线呈“V”型, 随着退化趋势的加大, 物种丰富度与生产力从明显的正相关关系变为负相关关系。对高寒草甸的研究也发现了类似规律(周华坤等, 2005; 王文颖等, 2007; 李里和刘伟, 2011)。进一步研究发现群落的多样性指数和均匀度指数在中度退化阶段是最高的, 总体呈现单峰曲线的变化规律, 地上生物量随退化程度加深逐渐降低, 分布在各层的植物根系量随草原的退化越来越少, 根系有向浅层化发展的特点。说明随着高寒草地退

化的加剧, 生物多样性和生产力等功能特征不仅响应明显, 它们之间的关系也发生了明显变化(武高林和杜国祯, 2007; Wang et al, 2014, 2015)。

2.3 放牧处理下的高寒草地生物多样性和生态系统功能

越来越多的研究表明, 草地生态系统生物多样性和生产力受土地利用方式和管理策略的影响显著。放牧是对高寒草地影响最为广泛也是最常见的土地利用方式(周华坤等, 2002; 付伟等, 2013; 张春花, 2014)。由于受植被凋落物、群落结构和气候等多因素的影响, 放牧方式和强度对高寒草地植被生产力的影响比较复杂, 可以通过多种途径对其产生正面或负面的影响(邹婧汝和赵新全, 2015)。放牧强度可以直接影响植物营养器官被牲畜取食的频率和强度, 进而影响生态系统的演替趋势和能量流动方向(Gillen et al, 2000), 是一种典型的动植物之间的关系。放牧改变了群落中植物组成和土壤的养分组成, 进而影响生物量的产生, 也改变了资源有效性-植物多样性-生产力之间的关系。而且通过在青藏高原上实施的放牧实验可以看出(表1), 放牧导致植物群落结构简单化, 高大禾草减少, 阔叶类杂草逐渐占据优势地位(周华坤等, 2004); 总生物量减少, 不过不同功能群植物的响应并不相同(赵彬彬等, 2009; 董全民等, 2012); 生物多样性呈现单峰曲线变化, 即中等放牧强度下生物多样性最高(刘伟等, 1999; 江小蕾等, 2003; 周华坤等, 2004; 仁青吉

等, 2009; 陈钊等, 2015)。根据中度干扰假说, 由于在低干扰强度下, 群落可以演替到顶极阶段, 此时只有少数竞争优势物种在群落中占据主导地位, 因此物种多样性较低; 而如果干扰频率过高, 只有少数生命力和繁殖力强的物种才能生存下来, 群落处于演替的初级阶段, 物种多样性也较低; 而中等程度的干扰既能刺激物种竞争, 同时又不会因为干扰过于激烈而致使物种不能共存, 因而此时具有较高的物种多样性和生态系统生力(图1)。所以适度的

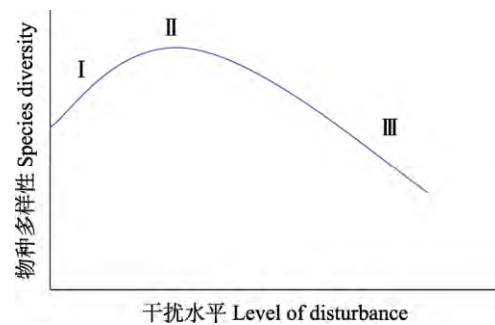


图1 物种多样性与干扰水平的关系。I: 低干扰水平下, 物种多样性由于竞争排斥作用处于较低水平; II: 中等干扰水平下, 由于演替阶段早期和晚期的物种可以共存, 所以物种多样性最大; III: 在高水平的扰动下, 物种丰富度由于扰动的增加而减少。

Fig. 1 Relationship between species diversity and level of disturbance. I, At low level of disturbance, species diversity is at a lower level due to competitive exclusion; II, At moderate level of disturbance, species diversity can be greatest due to the coexistence of species in the early and late stages of succession; III, At high level of disturbance, species richness decreases due to increased disturbance.

表1 放牧处理对高寒草地生物多样性和生态系统功能关系的影响

Table 1 Effect of grazing on the relationship between biodiversity and ecosystem functioning in alpine grassland

	实验期限 Experimental period (year)	高度 Height	盖度 Coverage	生物多样性 Biodiversity	地下生物量 Underground biomass	地上生物量 Above ground biomass	总生物量 Total biomass	参考文献 Reference
高寒草原 Alpine grassland	3	-	-	驼峰曲线 Hump	-	-	-	Chen et al, 2015
高寒草甸 Alpine meadow	6	-	-	-	-	*	- *	Zhao et al, 2009
小嵩草草甸 Kobresia pygmae meadow	2	*	*	驼峰曲线 Hump	-	-	-	Dong et al, 2012
金露梅灌丛 Potentilla fruticosa shrubs	18	-	-	驼峰曲线 Hump	-	*	-	Zhou et al, 2004
高寒草甸 Alpine meadow	自然放牧 Natural grazing	-	-	驼峰曲线 Hump	-	-	-	Jiang et al, 2003
金露梅灌丛 Potentilla fruticosa shrubs	1	-	-	正相关 Positive	-	-	-	Liu et al, 1999
高寒草甸 Alpine meadow	自然放牧 Natural grazing	-	-	驼峰曲线 Hump	-	-	-	Ren et al, 2009

- 表示减少; *表示效应复杂, 不同物种或功能群有不同响应。

- means decrease; * means effect is complex, different species or different functional groups have different response.

放牧干扰可以使草地植物群落具备较高的物种多样性,而且由于植物补偿性生长效应的存在,放牧可改善相对竞争劣势物种的光照条件和养分获取,增加群落的光合速率和生长效率,从而促进植物生长,增加草地的地上净初级生产力(赵新全等, 2011; 周华坤等, 2016)。相反,长期禁牧和过度放牧不仅降低物种多样性和群落生产力,而且影响草地植物群落的演替(杨正礼和杨改河, 2000; 周华坤等, 2002, 2016; 赵新全和周华坤, 2005; Firincioglu et al, 2007)。例如,较大的放牧压力会导致群落中适口性差、耐牧的杂类草植物逐渐增加;而在更大的放牧压力下,群落逐步被耐牧的小丛生禾草、旱生小薹草(*Carex parva*)、毒杂草、小灌木和灌木等杂草和劣质牧草所替代,群落结构趋于简单,初级生产力趋于下降,根系分布浅层化(绝大部分根系集中在 0–20 cm 土层)(Huntly, 1991; Greenwood & Hutchinson, 1998; Pakeman, 2004; 周华坤等, 2004, 2005)。因此,放牧对高寒草地植物群落的物种组成、多样性格局及系统功能等均会产生显著影响,放牧管理是高寒草地生物多样性恢复与维持的关键(周华坤等, 2002; Díaz et al, 2007; 赵新全等, 2011)。

那么对于不同的草地生态系统,如何确定适宜的放牧水平呢?李文龙等(2007)通过对高寒草地不同生境下植物生态位适宜度与系统生产力(地上生物量)以及物种多样性(Shannon多样性指数)关系的研究表明:适宜度与生产力和多样性之间均呈正的线性关系,牧草生长的适宜度决定着生产力和多样性。随着放牧强度的增加,适宜度呈下降趋势,其生产力和多样性均有显著减少;在不放牧、轻牧、中牧和重牧4种处理中,以轻牧效果最好,具有推广应用价值。这为高寒草地的保护和放牧利用提供了理论与定量依据。

研究草地植物多样性和生产力对放牧的响应,最重要的是对于机理的探索。王常顺等(2014)在探究草地生态系统生产力和物种多样性的关系时绘制了关于资源有效性、生态系统生产力、物种多样性和放牧四者关系的基本假设图(在此不再赘述),我们认为这同样也适用于高寒草地。并由此推断如果人为管理和外界干扰适当,提高资源有效性和适度放牧干扰并行,物种多样性和生态系统生产力水

平可以同时维持在一个理想水平。

2.4 气候变化背景下的高寒草地生物多样性和生态系统功能

2.4.1 气候变暖的影响

预计到本世纪中期,温度和降水格局的变化将成为生物多样性丧失的主要驱动力(Sala et al, 2000),且不同生态系统类型的生产力、生物量和群落结构对环境变化的响应是不同的。

温度升高可以直接影响植物生长的外界物理环境、土壤微生物的生长和矿化速率、土壤酶的活性及群落物种组成,从而形成更为复杂的动物、植物、微生物和矿物质营养循环关系,物种多样性和生产力等生态系统功能的关系也将会受到很大影响。在青藏高原上气温升高前后生物多样性和生态系统功能之间的关系有什么样的变化?目前关于这方面的研究还不多,我们只能从气温升高分别对生物多样性和生产力的影响中来推测一二。

众所周知,沿着纬度梯度的增加,温度对生物生存的重要性愈加突出,随着气温升高,植物群落组成和生长能力发生改变(Zhou et al, 1999)。所以从理论上讲,在气候变化情景下,植物群落将迁向与其生活环境相似的地区,环境变化将导致群落中一些物种的丰富度下降甚至绝灭,而另一些物种增加,其结果是生态系统类型发生改变(杨玉盛, 2017)。只有那些适应力强的物种才能生存,而许多在适应力上具有很强保守性的物种将濒临灭绝(魏辅文等, 2014)。

对于生物多样性来说,实验表明气温升高总体上是使其减少或者趋于减少的。随着气候变暖,青藏公路124道班的华扁穗草(*Blysmus sinocompresus*)群落被适应干旱环境的矮嵩草群落替代,而原先的矮嵩草群落则慢慢变成高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)群落,在进一步的干旱化以后会形成沙生薹草(*Carex praeclar*)群落(赵新全等, 2009)。青藏高原气温的升高将导致高寒草地物种丰富度降低26–36%(Klein et al, 2004)。增温对不同类型高寒草地的群落结构的影响也不同。利用开顶式增温气室(open top chamber, OTC)的方法对亚高山草甸群落进行短期增温处理后,OTC内部和外部对照样地的物种组成并未产生明显变化,而群落中各物种的地位、比重发生了改变。在高寒草甸中禾草和莎草(*Cyperus rotundus*)的盖度减少,杂草所占比例上升;而沼泽

草甸群落的变化正好相反,且增温幅度越大,这种变化趋势越大(李娜等,2011)。在海北高寒草甸进行的模拟增温实验发现,植物物种多样性随着增温时间的推移呈先增加后减少的趋势,其中草甸群落物种数减少7%,灌丛群落的物种数减少30%(周华坤等,2000;赵艳艳等,2015)。在青藏高原腹地对典型高寒草甸和沼泽草甸模拟不同增温梯度的研究表明,适度增温导致3个物种的重要值上升,5个物种的重要值下降,过度增温使温室内物种更趋于单一化(李娜等,2011)。

对于生产力来说,增温状况下生产力增加、减少或不变都是有例为证的。Rustad等(2001)利用meta分析研究发现,增温显著增加了植被净初级生产力(19%)。尤其是在高寒草地地区,温度增加延长了生长季,促进了植物的生长,进而显著增加了植被的净初级生产力,促进了生态系统的碳吸收(Dormann & Woodin, 2002; Wu et al, 2011; Wang et al, 2012)。李英年等(2004)对高寒草甸连续5年的OTC增温实验发现,草甸群落地上部分生物量呈逐渐上升的趋势。徐振峰等(2009)用类似方法对川西北亚高山草地进行研究,建群种糙野青茅(*Deyeuxia scabrescens*)和牛尾蒿(*Artemisia roxburghiana*)的地上生物量均显著增加,伴生种中华羊茅(*Festuca sinensis*)的地上生物量却有所减少,地上总生物量增加。短期增温以后群落的总生物量变化不明显,而各物种的反应有所不同,其中禾草生物量显著增加,杂类草生物量的变化正好相反(周华坤等,

2000)。分析原因可能是在高寒草地少量的增温使得植物的生长季延长,生产积累的生物量增加,且植物生理代谢和生长发育速率加快,导致杂类草提前成熟,缩短了生长发育的时期,加上OTC增温设施的存在使暖室内外空气交流缓慢,减少了OTC内部的温度波动,干物质积累受到限制,最终导致杂类草生物量减少。气候变暖伴随着干旱化也可导致植被明显退化,造成高寒草甸禾本科生物量或多或少地下降(王谋等,2004)。在青藏线上用红外灯照射增温方法进行的模拟实验表明,增温导致浅层土壤湿度对生物量分配产生影响,使生物量更多地分配到地上部分,而冻土融化致使深层土壤水分对生物量产生影响(徐满厚等,2016a)。根系生物量略有增加,但在生长季不同月份其增加的程度不同,致使年际间的增幅出现差异(徐满厚等,2016b)。

在高寒草甸,增温前期植物初级生产量有明显增加趋势(赵新全等,2009),年平均总初级生产力增加了34.3%,增幅较大(元伟伟等,2012)。增温后期(连续增温16年),矮嵩草草甸群落地上生物量减少23.6%,金露梅灌丛群落地上生物量增加15.1%(赵艳艳等,2015),矮嵩草草甸地下生物量显著减少,矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸的地下生物量分配明显向深层转移(余欣超等,2015)。

由此可见,增温对植物生物量和生产力的影响并没有一致的定论(权国玲和尚占环,2015),因地点和生态系统的不同而存在差异,还有待进一步的研究(表2)。尽管多数研究结果显示增温提高了草地植

表2 高寒草地生物量和群落生产力对气候变暖的响应

Table 2 Response of biomass and community productivity to climate warming in alpine grassland

草地类型 Grassland types	生物量和群落生产力 Biomass and community productivity	文献 References
川西北亚高山草地 Subalpine grassland in Northwest Sichuan Province	糙野青茅、牛尾草、发草生物量增加 The biomass of <i>Deyeuxia scabrescens</i> , <i>Festuca elatior</i> and <i>Deschampsia caespitosa</i> increase	Shi et al, 2008; Xu et al, 2009
高寒草甸 Alpine meadow	禾本科牧草生物量下降 Biomass of gramineous forage decreased	Li et al, 2011
青藏铁路沿线高寒草甸 Alpine meadow along the Qinghai-Tibet Railway	增温使生物量更多分配到地上部分,而冻土融化致使深层土壤水分对生物量产生影响。根系生物量略有增加,但在生长季不同月份其增加的程度不同,致使年际间的增幅出现差异。 Warming makes more biomass allocation to aboveground parts, and the melting of frozen soil leads to the effect of soil moisture on biomass. The root biomass increased slightly, but the degree of increase was different in different months of growing season, resulting in a difference in inter-annual growth.	Xu et al, 2016a
青海海北矮嵩草草甸 <i>Kobresia humilis</i> meadow in Haibei, Qinghai	禾草生物量增加,杂草生物量下降;提高地上生产力40%以上。 Grasses biomass increased, weeds biomass decreased, and aboveground productivity increased by over 40%.	Zhou et al, 2000; Li et al, 2004; Wang et al, 2012
新疆天山高寒草原 Alpine grassland in Tianshan Mountain, Xinjiang Province	生物量先增加后减少 Biomass increased first and then decreased	Li et al, 2007b

物生产力(王常顺等, 2014), 但其机制和途径还有待进一步研究和总结。

所以, 由增温分别对生物多样性和生态系统功能(生产力)的影响可以推断, 增温后, BEF关系曲线将向多样性小、生产力高的方向移动(极大可能), 或者向多样性小、生产力低的方向移动(有可能), 甚至不变(小概率)(图2)。

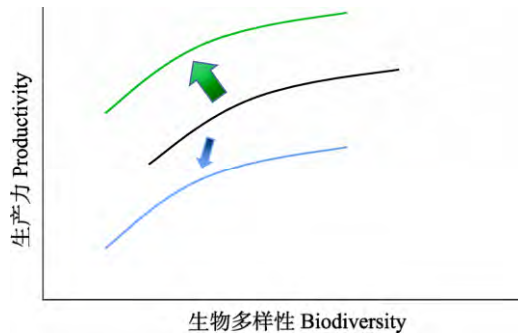


图2 增温前后生物多样性和生态系统功能关系曲线的变化。为方便理解, 假设生物多样性和生态系统功能关系曲线是对数曲线(部分实验可以支持此曲线模型)。箭头大小表示可能性大小。

Fig. 2 Changes in the curve of relationship between biodiversity and ecosystem function (BEF) before and after warming. To facilitate understanding, it is assumed BEF curve as log-linear curve (some experimental results supports the model). Arrow size indicates size of the possibility.

2.4.2 降水格局变化的影响

气候变暖引起地面变干并导致大气中水汽压增大(Karl & Trenberth, 2003), 前者增加了干旱的影响范围和程度, 后者则增加了强降水事件发生的概率(Trenberth et al, 2003)。青藏高原海拔较高, 对气候变化最为敏感, 轻微的气候变化就可能引起显著的反应且反应具有超前性。虽然目前的研究表明, 全球变化背景下, 青藏高原整体的降水呈增加的趋势, 但时间格局和空间格局存在差别, 即存在丰水年和干旱年份的区别, 而且高原北部和南部呈相反变化, 北部降水呈波动增加, 南部降水呈波动减小(段克勤等, 2008)。

水是生物生命活动必须的物质, 青藏高原之所以存在大面积的草地, 就是由于水分的限制不适合大面积的森林生长。降水通过影响土壤水分和土壤生物活动间接影响植物群落生长, 具有一定的滞后效应, 而且降水对植物群落生长的影响是一个累积效应(Niu et al, 2008)。降水格局的改变会引起群落

结构发生适应性的变化, 对生态系统结构、功能(群落组成、生物多样性、物种之间的关系等)的影响有显著性。例如增加降水使优势物种的相对重要值有所降低, 但某些物种的重要值提高, 其中灌木和阔叶杂草增加明显(干珠扎布等, 2015); 在水分资源不利(如减少雨量)的干扰下, 植物敏感性表现为杂类草大于禾草类, 莎草类最小(沈振西等, 2002)。在西藏对典型草地地上生物量的季节变化研究结果显示, 总体上草地地上生物量与降水之间显著相关, 而与温度关系较弱(除多等, 2013)。其相关关系表现为地上生物量、物种丰富度、多样性和均匀度与降水呈指数型增长关系, 降水增加有利于群落结构优化并提高群落地上生物量, 物种丰富度和生产力关系呈现单调递增, 未出现单调递减区是由于物种生产力低于单峰模式的峰值(武建双等, 2012)。而且地下生物量和土壤含水量也有显著的正相关关系(马星星等, 2016)。在三江源地区的实验更进一步地把每个月影响牧草生长的主要限制因子表现出来: 该地区降水对高寒天然草地牧草产量的影响正效应为4月上中旬、5月下旬至7月上旬和8月下旬3个阶段, 降水量每增加1 mm, 牧草产量最大分别增加138.2, 80.1, 53.8 kg/ha; 负效应为4月下旬至5月中旬和7月中旬至8月中旬2个阶段, 降水量每增加1 mm, 牧草产量相应最多减少23.1和43.7 kg/ha(刘剑霞, 2010)。杨元合等(2004)在青藏高原进行了大范围的群落调查, 发现影响物种丰富度空间分布格局的生态因子主要是生长季降水和温暖指数, 通过回归分析发现生长季降水对物种丰富度分布格局的贡献大于温暖指数, 而且生物量增加时物种丰富度随之增加, 并没有出现驼峰型关系中的下降部分, 这可能是由于在高寒草地中, 物种间还是共生关系, 或者说物种之间的竞争作用不够强烈, 从而使得群落生物量高的同时依然保持较高的物种丰富度, 即未达到驼峰的峰值。但是也有部分实验显示浇水对于植物性状和生产力作用微弱(李晓刚等, 2011; 李长斌等, 2016), 这可能是由于实验区域和时间尺度的差别所致, 毕竟在大气候变化背景下, 每个区域都有微气候的差别。这也是以后研究中要注意的地方。

2.5 其他管理措施下的高寒草地生物多样性和生态系统功能

在高寒草地中, 除了放牧和气候变化两种主要的人为和自然干扰方式外, 还有诸如刈割、施肥、

封育、补播、退化草地治理等干扰利用方式, 这些均对物种多样性和生产力等草地生态系统的功能产生影响。

(1)刈割。高寒草甸中刈割能增加物种多样性和稳定性, 并降低净初级生产力, 这与群落中全部物种的多样性变化受刈割影响较大, 而影响生态系统功能的关键物种的多样性变化受其他因子(如资源可获得性)影响较大有关。这表明高寒草甸生态系统地上净初级生产力主要由少数影响生产力的作用物种的多样性决定, 而稳定性则由大量共有物种的多样性所掌控。高寒草地中刈割状态下禾草和莎草每分蘖的地上生物量以及每分株分蘖数在不同的恢复时间里均无明显差异; 刈割部分的地上生物量和每分株分蘖数在不同的刈割处理间差异不显著(朱志红等, 2002)。如果刈割强度不大, 由于牧草的超补偿生长作用, 草地的总生产量反而会增加(赵新全等, 2011)。

(2)施肥。从维持草地生态系统养分平衡及促进退化草地恢复的角度出发, 根据草场氮素基础水平施肥可以显著增加植物生物量, 减少放牧导致的群落生物量损失, 从而平衡土壤碳素水平。在国际上畜牧业发达的国家, 施肥已成为草地管理常用的措施(Unlu et al, 1999)。施肥能解除土壤养分缺乏的限制作用, 植物由养分竞争变为光竞争, 此时群落多样性格局、植物性状和初级生产力会有所改变。在青藏高原高寒草地的研究也显示出施肥后物种多样性减少, 群落生物量增加, 而且不同的施肥处理对不同物种有不同的影响效果(王长庭等, 2013; 杨月娟等, 2014)。施肥导致物种多样性的减少是由于施肥降低了土壤养分的限制, 导致在群落中处于竞争优势地位的禾草显著增长(杨元武等, 2017), 进而导致水分和光照成为限制杂草生长的因子, 所以杂草的生物量变化不显著, 甚至部分杂草消亡。更重要的是, 长期施肥会导致土壤酸化, 生物多样性降低, 生产力下降。

(3)封育。刘晓琴等(2016)研究了封育2年、7年和17年的高寒矮嵩草草甸的群落组分和物种多样性变化特征, 并探讨了不同封育年限影响物种多样性的可能原因。结果发现虽然物种丰富度指数随封育年限的延长没有变化, 但物种均匀度和多样性指数均降低, 且封育前期对物种多样性的影响大于后期。证明就物种多样性而言, 该高寒草甸不宜进行

长期封育。赵亮等(2014)通过对2011–2013年青海省三江源区玛沁县大武滩围封4年的中度退化草地、围封建植6年的人工草地和黑土滩退化草地的调查发现, 围封6年的中度退化草地使系统土壤0–40 cm有机碳增加4.5%左右, 而物种多样性和生产力的变化却不太明显。贾宏涛(2007)研究发现, 新疆山地草原、亚高山草原和高山草甸、亚高山草甸在围封休牧处理下土壤有机碳容量可提高120.66%, 而物种多样性和草地生产力却有所下降。单从固碳角度来说, 长时间围封有利于生态系统碳汇功能的增强。孙庚等(2005)发现川西北地区天然放牧草地土壤有机质含量在围封前后差异明显, 草地围封使土壤有机质含量与放牧相比提高61%, 而物种丰富度和草地生产力则下降20–60%不等。

(4)补播。补播是投资少、见效快、简单易行的退化草地改良措施, 是采用人工撒播或免耕播种机进行浅耕播种作业建植半人工草地, 主要适用于中度退化草地的恢复。补播可增加草地群落物种丰富度、盖度、优质牧草比例, 大幅度提高草地产草量和牧草品质(石锋等, 2009; 郑华平等, 2009; 魏学红等, 2010), 也是植物地下碳输送的重要来源。补播加上围封禁牧措施减少了牲畜对土壤的践踏和人为扰动, 使得草地土壤肥力得到恢复, 增加了补播种子的有效性, 地上生物量自然得到了提高(Zhou et al, 2005; 都耀庭和张东杰, 2007; 刘兵等, 2007)。石锋等(2009)通过meta分析研究了补播对土壤有机质和群落生产力等的影响, 发现补播不仅增加了牧草产量, 还增加了高寒草地土壤有机碳(126 g/m^2), 但短期内对群落物种多样性的影响不明显。

(5)恢复。Zhang等(2005)对自然恢复群落的研究发现, 物种多样性和丰富度指数随演替时间增长而呈增加趋势。王发刚等(2007)对人工恢复前后草地植物群落结构及物种多样性的研究发现, 经过多年的封育或轻耙补播后退化草地逐渐恢复, 而人工草地则逐步变得与自然草地相似, 生产力下降而物种多样性和功能群多样性增加。赵新全等(2011)对不同高寒草地的适应性恢复模式研究发现, 高寒草地植物群落的物种数量增加, 群落多样性得以提高。江小蕾等(2003)、张春花(2014)、潘石玉等(2015)的研究也发现施肥使草地植物群落物种组成贫乏, 群落结构趋于简单, 物种多样性减少; 而轻度干扰的围封草地, 群落由少数优势种所控制, 多样性变化

不显著。草地群落的生活型功能群均由多年生禾草、多年生杂类草和莎草类组成,但不同群落中各功能群所占的比例及功能群内所含物种数有较大差异。说明施加不同干扰,草地植物群落的物种组成、生物多样性和生态系统功能会发生不同的变化。

自然状况下的高寒草地利用受到多种因素共同作用,所以模拟多因素影响下的BEF关系具有实际意义。李晓刚等(2011)在高寒矮高草草甸进行了刈割、施肥和浇水3种因素的交互实验,发现刈割和施肥显著影响植物性状和生产力,而浇水作用微弱,刈割对物种多样性无影响,施肥降低了物种多样性,浇水仅对物种丰富度有微弱影响。而且他们还发现物种多样性与初级生产力的关系可表现为正相关、负相关和不相关,两者关系是性状依赖的,并受生境资源状况和刈割扰动的影响,所以在考虑生物多样性对生态系统功能的影响时,应更加注重对植物功能属性变化的研究。沈振西等(2002)在矮高草草甸研究了夏季增减雨量和冬季增雪以及施肥的相互作用对植物生长的影响,结果表明冬季增雪对植物类群的影响大于夏季增雨,而施肥对物种多样性和丰富度的影响显著,水肥两种扰动的叠加效应更加显著。沈景林等(2000)对高寒草地进行围栏封育、施肥、补播3种改良措施,结果表明,3种措施均改善了草地群落的植物特征和生物量。其中施肥可使牧草产量增加45.9–191.1%;围栏封育使牧草产量增加60.5–158.3%;补播使牧草产量增加32.7–113.9%。

由此可见,施肥和围栏封育是草地改良的有效途径。在高寒草地不同区域的实验都表明,施肥提高了生产力,但是降低了物种多样性并且使得群落小生境发生改变,造成植被特征的显著差异(邱波等, 2004; 杨月娟等, 2014; 杨元武等, 2017),如果叠加其他干扰因素, BEF关系则会发生相应的变化。

2.6 问题和展望

到目前为止,国内外已发表的关于草地BEF研究的文章,均提出了关于BEF研究需要注意的问题和未来发展的方向,例如实验类型(贺金生等, 2003)、时空尺度(张全国和张大勇, 2003)、种群功能特征(徐炜等, 2016)、群落的多功能特征及地上、地下功能之间的互作(Jing et al, 2015)等。从目前已有的高寒草地相关研究可以看出,关于上述问题已经有了较大改善和进步,但是部分可能影响生物多样性和生态系统功能之间关系的因素依然没有得

到足够的重视。

目前国内外关于植物功能多样性和物种多样性关系的研究多集中在热带和温带森林生态系统(Bu et al, 2014; Hu et al, 2014),而对草地生态系统特别是青藏高原高寒草地生态系统相关研究的报道甚少。即使目前对青藏高原地区进行的植物多样性研究也多聚焦于物种或功能多样性的单一维度(杨元合等, 2004; 王长庭等, 2005a; 李晓刚等, 2011),对多维度的功能多样性进行的研究很少报道。结果造成了高寒草地生物多样性保护只是基于物种的数量状况,而没有深入考虑物种的功能性状及其对生态系统功能的重要性。因此,基于物种功能多样性开展青藏高原高寒草地植物物种多样性与功能多样性的关系研究尤为迫切和必要。

近年来,人为干扰、气候变化、资源有效性等因素对高寒草地物种多样性和生态系统功能之间关系的综合影响越来越受到生态学家的关注,并且已经开展了一些相关的模拟控制实验(王长庭, 2005b; 赵新全等, 2009, 2011)。生物多样性受到多种因素的调控,在后续的研究中,应全面考虑生物因素(物种多样性、物种生物学特征)和非生物因素(资源养分供给、外来人为干扰、气候环境波动等)对物种多样性和生态系统功能之间关系的影响(王长庭等, 2005b; 徐炜等, 2016)。在注重提高资源利用率的同时,不仅要关注高寒草地生物多样性的丧失,更应关注高寒草地生态系统的过程变化和反馈。在放牧等人为干扰和气候变化的双重影响下如何维持和提高高寒草地生产力,如何加快退化草地生态系统的恢复并保护生物多样性,进而协调统筹好生态文明建设和社会经济发展,这是当前青藏高原高寒草地BEF研究中亟需解决的理论和现实问题(王常顺等, 2014)。

生态系统能同时提供多个功能,并且多个功能间存在着权衡,即一个功能的增加可能伴随着另一个功能的降低,所以,权衡作用限制了大多数功能达到较高水平。而且多功能的维持需要更高水平的生物多样性(徐炜等, 2016)。多功能之间的权衡导致了多功能的冗余,而冗余度决定着生态系统整体功能对物种丧失的响应(徐炜等, 2016),且多功能冗余具有很强的环境依赖性(Srivastava et al, 2012)。目前的草地研究只考虑了单个生态系统功能,容易忽略多功能权衡和多功能冗余对环境极强的依赖性。一

个生态系统即使其生物多样性没有改变,但它在不同的环境条件或发育阶段提供的功能是有差别的,这可能导致了现在对于生物多样性和生态系统功能之间关系认识的不确定性。徐炜等(2016)建立了BEF研究中现在及未来应当考虑的不同维度多样性与多功能性关系的研究框架,指出未来BEF的研究要在全球变化的大背景下,通过物种多样性、功能多样性和谱系多样性三个水平的生物多样性,研究其与生态系统多功能性(生产力、养分循环、资源获取等)的关系。目前,这在青藏高原高寒草地方面已经取得了明显的进展,利用大范围野外调查取样,结合室内高通量测序等技术,已经初步揭示了青藏高原地上与地下生物多样性对生态系统多功能性的协同作用(Jing et al, 2015)。

同时要注意开展全球气候变化对高寒草地生物多样性和生产力等影响研究时的尺度效应和要素耦合。基于长期的增温实验发现,长期增温导致高寒草甸生态系统生物多样性降低(赵艳艳等, 2015),而在短期增温实验中却没有发现这个现象。这也表明以后在青藏高原的BEF实验中要注意研究的时间尺度。另外,在受水分限制的高寒地区,如高寒草原等,气候变化导致降水模式的改变可能对本地区生物群落结构组成、生物多样性以及生态系统功能服务等产生深远的影响(Peng et al, 2009)。所以在开展气候变化背景下高寒草地的BEF研究时,要把温度和降水变化甚至人为干扰(放牧、施肥等)等因素综合考虑。由于不同季节的增温和增水效应存在差异,放牧方式也会发生变化,所以对于不同地区不同季节要明确其温度、降水和放牧的影响权重。

3 高寒草地资源利用和生物多样性保护的措施

3.1 加强放牧管理,保护生物多样性

在高寒草地进行的大多数研究均表明,施加一定的人为干扰对于维持高寒草地物种多样性大有裨益:干扰为其他物种的定殖创造了机会,从而提高或维持了生物多样性(李自珍等, 2002; 赵新全等, 2009)。

放牧是草地生态系统最常见的人为干扰方式。在青藏高原的草地生态系统中,放牧直接改变草地植物群落的结构特征。目前多数研究表明,放牧强度和物种丰富度的关系表现为单峰曲线变化(即适

度放牧时物种多样性最大)(江小蕾等, 2003; 王长庭等, 2008b; 仁青吉等, 2009),当草地生态系统处于中等(轻度或中度)放牧强度时,物种丰富度和地上生物量同时达到理想的水平,生态系统处于稳定状态,对人类来说最为有利。因此为了保护高寒草地,应该在草地放牧中施加中等水平的放牧强度。这也是目前很多研究提倡适度(轻度或中度)放牧、“取半留半”放牧原则的原因所在。所以,基于中度干扰假说的理论指导,加强放牧管理,合理摄取草地牧草资源,对于生物多样性保护和生态系统功能的可持续发展意义重大。

3.2 治理退化草地,维持生物多样性功能

要改善高寒草地草场质量、提高草场生产力,不仅要保护物种多样性,还要提高物种空间分布的均匀性、减少环境异质性(赵陆强和王刚, 2009),在实施退化草地治理措施时要注意这一原则。基于前面论述的不同干扰和利用方式下的高寒草地物种多样性和生态系统功能的关系及其影响机制,对不同演替阶段的草地,提出以下管理措施和建议。

(1)天然草地。对于未退化天然草地要进行适度放牧,遵循“取半留半”的放牧原理,一般采取分区轮牧管理措施,草地利用率在45-50%左右,以保护物种多样性,维持碳汇功能,保持生态-生产稳定性。而围栏封育管理措施应该遵循适应性管理原则,即加强高寒草地生态系统的适应性监控并对系统健康状况实时评估,以及及时采取相应措施对草地实施保护性利用。

有研究表明,本地物种对高寒草地生态系统的稳定往往起决定作用(赵新全等, 2011)。本地物种的丧失将严重影响生态系统结构、功能及其提供的服务,使得整个生态系统面临巨大压力,特别是对于青藏高原来说,应引起足够的重视并制定科学的管理措施,合理利用天然草地资源,加强高寒草地生态系统内物种多样性的保护。

(2)轻中度退化草地。对于轻、中度退化草地遵循“保原增多”的草地治理原则(赵亮等, 2013),一般采取围封和补播措施,即保持原有物种,增加牧用型物种,提高其物种多样性,增强生态系统的光利用效率,亦可增加生态系统的生产力。

(3)“黑土滩”重度退化草地。根据草地和土壤退化程度以及当地气候和地形等条件,遵循分类治理原则(赵新全等, 2011; 赵亮等, 2013; 周华坤等,

2016), 保持较好的生产-生态功能稳定性。(a)在土层厚度15 cm 以上且坡度小于25°的黑土滩退化草地上建植“放牧型”人工植被; (b)在土层厚度在15 cm以下且坡度小于25°的黑土滩退化草地和坡度大于25°的黑土滩退化草地上建植“保育型”人工植被; (c)在冬季草场土层厚度在20 cm以上, 坡度小于7°的黑土滩退化草地上建植“刈用型”人工草地(赵新全等, 2011)。

3.3 加强创新保护理念, 增强生态系统服务功能

利用三江源国家公园体制建立的契机, 创新保护理念, 加强自然科学和社会科学的结合, 完善生物多样性和生态系统服务的调查、监测、评估体系, 推进数字化、标准化、信息化的管理和保护建设体系。

具体而言: 充分发挥青藏高原生态系统提供的文化旅游服务, 建立青藏高原特色的生态旅游体系, 以参与式保护机制创新发展模式。青藏高原高寒草地分布区种质资源丰富, 特有种多, 对揭示生物多样性形成机制, 研究生物多样性重建具有重要价值, 建立特色植物园为应对环境变化, 进行生态恢复提供重要种质资源。

生物多样性保护工作要立足于生态系统, 通过保护物种的途径保护生态, 从多学科、多角度的方向考虑保护, 创建青藏高原经济发展和生态保护双优的发展模式, 实现青藏高原草地的可持续利用与生物多样性保护的发展目标。

参考文献

- Anwar M, Yang YH, Guo ZD, Fang JY, Pan BR, Hu YK (2006) Relationship between the species richness and the productivity of alpine steppes in Bayanbulak, Xinjiang. *Arid Zone Research*, 23, 289–294. (in Chinese with English abstract) [安尼瓦尔·买买提, 杨元合, 郭兆迪, 方精云, 潘伯荣, 胡玉昆 (2006) 新疆巴音布鲁克高山草地物种丰富度与生产力的关系. *干旱区研究*, 23, 289–294.]
- Bai YF, Wu JG, Clark CM, Naeem S, Pan QM, Huang JH, Zhang LX, Han XG (2010) Tradeoffs and thresholds in the effects of nitrogen addition on biodiversity and ecosystem functioning: Evidence from Inner Mongolia grasslands. *Global Change Biology*, 16, 358–372.
- Balvanera P, Pfisterer AB, Buchmann N, He JS, Nakashizuka T, Raffaelli D, Schmid B (2006) Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. *Ecology Letters*, 9, 1146–1156.
- Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P, Thuiller W, Courchamp F (2012) Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 15, 365–377.
- Bengtsson J (1998) Which species? What kind of diversity? Which ecosystem function? Some problems in studies of relations between biodiversity and ecosystem function. *Applied Soil Ecology*, 10, 191–199.
- Bu WS, Zang RG, Ding Y (2014) Functional diversity increases with species diversity along successional gradient in a secondary tropical lowland rainforest. *Tropical Ecology*, 55, 393–401.
- Cardinale BJ, Wright JP, Cadotte MW, Carroll IT, Hector A, Srivastava DS, Loreau M, Weis JJ (2007) Impacts of plant diversity on biomass production increase through time because of species complementarity. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 104, 18123–18128.
- Chapin FS III, Zavaleta ES, Eviner VT, Naylor RL, Vitousek PM, Reynolds HL, Hooper DU, Lavorel S, Sala OE, Hobbie SE, Mack MC, Díaz S (2000) Consequences of changing biodiversity. *Nature*, 405, 234–242.
- Chen H, Zhu QA, Peng CH, Wu N, Wang YF, Fang XQ, Gao YH, Zhu D, Yang G, Tian JQ, Kang XM, Piao SL, Yang HO, Xiang WH, Luo ZB, Jiang H, Song XZ, Zhang Y, Yu GR, Zhao XQ, Gong P, Yao TD, Wu JH (2013) The impacts of climate change and human activities on biogeochemical cycles on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 19, 2940–2955.
- Chen LZ, Chen WL (1995) Study on degraded ecosystem in China. Science and Technology of China Press, Beijing. (in Chinese) [陈灵芝, 陈伟烈 (1995) 中国退化生态系统研究. 中国科学技术出版社, 北京.]
- Chen Z, Liang XP, Hou FJ, Tian MM, Zhang HR, Yu Y, Guan YZ, Wang CZ, Yan XB (2015) Genetic diversity of *Elymus nutans* under different grazing intensities. *Acta Prataculturae Sinica*, 24, 159–165. (in Chinese with English abstract) [陈钊, 梁新平, 侯扶江, 田苗苗, 张红瑞, 余莹, 管永卓, 王成章, 严学兵 (2015) 不同放牧强度下垂穗披碱草遗传多样性分析. *草业学报*, 24, 159–165.]
- Chu D, Pubuciren, Dejiyangzong, Ji QM, Tang H (2013) Seasonal variation of typical grassland biomass in Tibet. *Grassland Science*, 30, 1071–1081. (in Chinese with English abstract) [除多, 普布次仁, 德吉央宗, 姬秋梅, 唐洪 (2013) 西藏典型草地地生物量季节变化特征. *草业科学*, 30, 1071–1081.]
- de Deyn GB, van der Putten WH (2005) Linking aboveground and belowground diversity. *Trends in Ecology & Evolution*, 20, 625–633.
- Díaz S, Lavorel S, Ntyres S, Falczuk V, Casanoves F, Milchunas DG, Skarpe C, Rusch G, Sternberg M, Noy-Meir I, Landsberg J, Zhang W, Clark H, Campbell BD (2007) Plant trait responses to grazing—A global synthesis. *Global Change Biology*, 13, 313–341.
- Dong QM, Zhao XQ, Ma YS, Shi JJ, Wang YL, Li SX, Yang SH, Wang LY, Sheng L (2012) Influence of grazing on biomass, growth ratio and compensatory effect of different plant groups in *Kobresia parva* meadow. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 2640–2650. (in Chinese with English abstract) [董全民, 赵新全, 马玉寿, 施建军, 王彦龙, 李世雄, 杨时海, 王柳英, 盛丽 (2012) 放牧对小嵩草草甸生物量及不同植物类群生长率和补偿效应的影响. *生态学报*, 32,

- 2640–2650.]
- Dong SK, Tang L, Zhang XF, Liu SL, Liu QR, Su XK, Zhang Y, Wu XY, Zhao ZZ, Li Y, Sha W (2016) Relationship between plant species diversity and functional diversity in alpine grasslands. *Acta Ecologica Sinica*, 37, 1472–1483. (in Chinese with English abstract) [董世魁, 汤琳, 张相锋, 刘世梁, 刘全儒, 苏旭坤, 张勇, 武晓宇, 赵珍珍, 李钰, 沙威 (2016) 高寒草地植物物种多样性与功能多样性的关系. *生态学报*, 37, 1472–1483.]
- Dormann CF, Woodin SJ (2002) Climate change in the Arctic: Using plant functional types in a meta-analysis of field experiments. *Functional Ecology*, 16, 4–17.
- Du GZ, Qin GL, Li ZZ, Liu ZH, Dong GS (2003) Relationship between species richness and productivity in an alpine meadow plant community. *Acta Phytocologica Sinica*, 27, 125–132. (in Chinese with English abstract) [杜国祯, 覃光莲, 李自珍, 刘正恒, 董高生 (2003) 高寒草甸植物群落中物种丰富度与生产力的关系研究. *植物生态学报*, 27, 125–132.]
- Du YT, Zhang DJ (2007) The effect of fencing measures for improving degraded grassland in alpine region. *Pratacultural Science*, 24, 22–24. (in Chinese with English abstract) [都耀庭, 张东杰 (2007) 禁牧封育措施改良高寒地区退化草地的效果. *草业科学*, 24, 22–24.]
- Duan KQ, Yao TD, Wang NL, Tian LD, Xu BQ (2008) The difference in precipitation variability between the north and south Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 30, 726–732. (in Chinese with English abstract) [段克勤, 姚檀栋, 王宁练, 田立德, 徐柏青 (2008) 青藏高原南北降水变化差异研究. *冰川冻土*, 30, 726–732.]
- Duan MJ, Gao QZ, Guo YQ, Wan YF, Li YE, Ganzhu Zhabu, Danjiu Luobu, Wei LT, Xirao Zhuoma (2011) Species diversity distribution pattern of alpine grassland communities along an altitudinal gradient in the northern Tibet. *Pratacultural Science*, 28, 1845–1850. (in Chinese with English abstract) [段敏杰, 高清竹, 郭亚奇, 万运帆, 李玉娥, 干珠扎布, 旦久罗布, 韦兰亭, 西饶卓玛 (2011) 藏北高寒草地植物群落物种多样性沿海拔梯度的分布格局. *草业科学*, 28, 1845–1850.]
- Firincioğlu HK, Seefeldt SS, Sahin B (2007) The effect of long-term grazing enclosures on range plants in the central Anatolian Region of Turkey. *Environmental Management*, 39, 326–337.
- Fu W, Zhao JQ, Du GZ (2013) Study on sustainable development of grazing ecosystem in alpine grassland of Qinghai-Tibetan Plateau. *Grassland and Turf*, 33(1), 84–88. (in Chinese with English abstract) [付伟, 赵俊权, 杜国祯 (2013) 青藏高原高寒草地放牧生态系统可持续发展研究. *草原与草坪*, 33(1), 84–88.]
- Ganzhuzhabu, Duan MJ, Guo YQ, Zhang WN, Liang Y, Gao QZ, Danjiuluobu, Baimayuzhen, Xiraozhuoma (2015) Effects of irrigation on alpine grassland Northern Tibet. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 7485–7493. (in Chinese with English abstract) [干珠扎布, 段敏杰, 郭亚奇, 张伟娜, 梁艳, 高青竹, 旦久罗布, 白玛玉珍, 西绕卓玛 (2015) 喷灌对藏北高寒草地生产力和物种多样性的影响. *生态学报*, 35, 7485–7493.]
- Gillen RL, Eckroat JA, Mccollum FT (2000) Vegetation response to stocking rate in southern mixed-grass prairie. *Journal of Range Management*, 53, 471–478.
- Giller PS, Hillebrand H, Berninger UG, Gessner MO, Hawkins S, Inchausti P, Inglis C, Leslie H, Malmqvist B, Monaghan MT, Morin PJ, O'Mullan G (2004) Biodiversity effects on ecosystem functioning: Emerging issues and their experimental test in aquatic environments. *Oikos*, 104, 423–436.
- Greenwood KL, Hutchinson KJ (1998) Root characteristics of temperate pasture in New South Wales after grazing at three stocking rates for 30 years. *Grass and Forage Science*, 53, 120–128.
- He JS, Fang JY, Ma KP, Huang JH (2003) Biodiversity and ecosystem productivity: Why is there a discrepancy in the relationship between experimental and natural ecosystems? *Acta Phytocologica Sinica*, 27, 835–843. (in Chinese with English abstract) [贺金生, 方精云, 马克平, 黄建辉 (2003) 生物多样性与生态系统生产力: 为什么野外观测和受控实验结果不一致? *植物生态学报*, 27, 835–843.]
- Hector A, Bagchi R (2007) Biodiversity and ecosystem multifunctionality. *Nature*, 448, 188–190.
- Hector A, Schmid B, Beierkuhnlein C, Caldeira M, Diemer M, Dimitrakopoulos P, Finn J, Freitas H, Giller P, Good J, Harris R, Höglberg P, Huss-Danell K, Joshi J, Jumpponen A, Körner C, Leadley PW, Loreau M, Minns A, Mulder CPH, O'Donovan G, Otway SJ, Pereira JS, Prinz A, Read DJ, Scherer-Lorenzen M, Schulze ED, Siamantziouras ASD, Spehn EM, Terry AC, Troumbis AY, Woodward FI, Yachi S, Lawton JH (1999) Plant diversity and productivity experiments in European grasslands. *Science*, 286, 1123–1127.
- Hillebrand H, Bennett DM, Cadotte MW (2008) Consequences of dominance: A review of evenness effects on local and regional ecosystem processes. *Ecology*, 89, 1510–1520.
- Hooper DU, Adair EC, Cardinale BJ, Byrnes JE, Hungate BA, Matulich KL, Gonzalez A, Duffy JE, Gamfeldt L, O'Connor MI (2012) A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change. *Nature*, 486, 105–108.
- Hooper DU, Chapin FS III, Ewel J, Hector A, Inchausti P, Lavorel S, Lawton J, Lodge D, Loreau M, Naeem S (2005) Effects of biodiversity on ecosystem functioning: A consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*, 75, 3–35.
- Hu G, Jin Y, Liu J, Yu M (2014) Functional diversity versus species diversity: Relationships with habitat heterogeneity at multiple scales in a subtropical evergreen broad-leaved forest. *Ecological Research*, 29, 897–903.
- Huntly NJ (1991) Herbivores and the dynamics of communities and ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 22, 477–503.
- Jia HT (2007) Analysis on ecological effect of enclosure in degraded grassland of Xinjiang. PhD dissertation, Xinjiang Agricultural University, Urumqi. (in Chinese with English abstract) [贾宏涛 (2007) 新疆退化草地围封的生态效应分析. 博士学位论文, 新疆农业大学, 乌鲁木齐.]
- Jiang XL, Zhang WG, Yang ZY, Wang G (2003) The influence of disturbance on community structure and plant diversity of

- alpine meadow. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 23, 1479–1485. (in Chinese with English abstract) [江小蕾, 张卫国, 杨振宇, 王刚 (2003) 不同干扰类型对高寒草甸群落结构和植物多样性的影响. *西北植物学报*, 23, 1479–1485.]
- Jing X, Sanders NJ, Shi Y, Chu HY, Classen AT, Zhao K, Chen LT, Shi Y, Jiang YX, He JS (2015) The links between ecosystem multifunctionality and above- and below-ground biodiversity are mediated by climate. *Nature Communications*, 6, 8159.
- Karl TR, Trenberth KE (2003) Modern global climate change. *Science*, 302, 1719–1723.
- Klein JA, Harte J, Zhao XQ (2004) Experimental warming causes large and rapid species loss, dampened by simulated grazing, on the Tibetan Plateau. *Ecology Letters*, 7, 1170–1179.
- Li CB, Peng YF, Zhao DZ, Ning Y, Zhou GY (2016) Effects of precipitation change and nitrogen addition on community structure and plant diversity in an alpine steppe on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 23, 185–191. (in Chinese with English abstract) [李长斌, 彭云峰, 赵殿智, 宁祎, 周国英 (2016) 降水变化和氮素添加对青藏高原高寒草原群落结构和物种多样性的影响. *水土保持研究*, 23, 185–191.]
- Li KH, Hu YK, Adeli M, Yu JM, Gao GG (2007a) Species diversity and above-ground biomass of alpine grassland on the southern slope of Tianshan Mountain. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 21, 155–159. (in Chinese with English abstract) [李凯辉, 胡玉昆, 阿德力·麦地, 于建梅, 高国刚 (2007a) 天山南坡高寒草地物种多样性及地上生物量研究. *干旱区资源与环境*, 21, 155–159.]
- Li KH, Hu YK, Wang X, Fan YG, Wu-Maier W (2007b) Relationship between aboveground biomass and environmental factors along an altitude gradient of alpine grassland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 18, 2019–2024. (in Chinese with English abstract) [李凯辉, 胡玉昆, 王鑫, 范永刚, 吾买尔·吾守 (2007b) 不同海拔梯度高寒草地上生物量与环境因子关系. *应用生态学报*, 18, 2019–2024.]
- Li L, Liu W (2011) Relationship between plant functional groups, species richness and community's productivity in degraded grassland. *Acta Agrestia Sinica*, 19, 917–921. (in Chinese with English abstract) [李里, 刘伟 (2011) 退化草地植物功能群和物种丰富度与群落生产力关系的研究. *草地学报*, 19, 917–921.]
- Li N, Wang GX, Yang Y, Gao YH, Liu LA, Liu GS (2011) Short-term effects of temperature enhancement on community structure and biomass of alpine meadow in the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 895–905. (in Chinese with English abstract) [李娜, 王根绪, 杨燕, 高永恒, 柳林安, 刘光生 (2011) 短期增温对青藏高原高寒草甸植物群落结构和生物量的影响. *生态学报*, 31, 895–905.]
- Li WL, Zhang YY, Li ZZ, Du GZ, Huang L (2007) The relationships between niche fitness and the productivity, diversity in alpine meadow and its responses to grazing. *Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition)*, 43(2), 53–57. (in Chinese with English abstract) [李文龙, 张彦宇, 李自珍, 杜国祯, 黄磊 (2007) 高寒草地植物生态位适宜度与生产力和多样性的关系及其对放牧的响应. *兰州大学学报(自然科学版)*, 43(2), 53–57.]
- Li XG, Zhu ZH, Zhou XS, Yuan FR, Fan RJ, Xu ML (2011) Effects of clipping, fertilizing and watering on the relationship between species diversity, functional diversity and primary productivity in alpine meadow of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 1136–1147. (in Chinese with English abstract) [李晓刚, 朱志红, 周晓松, 袁芙蓉, 樊瑞俭, 许曼丽 (2011) 刈割、施肥和浇水对高寒草甸物种多样性、功能多样性与初级生产力关系的影响. *植物生态学报*, 35, 1136–1147.]
- Li YN, Zhao L, Zhao XQ, Zhou HK (2004) Effects of a 5-year mimic temperature increase to the structure and productivity of *Kobresia humilis* meadow. *Acta Agrestia Sinica*, 12, 236–239. (in Chinese with English abstract) [李英年, 赵亮, 赵全新, 周华坤 (2004) 5年模拟增温后矮高草草甸群落结构及生产量的变化. *草地学报*, 12, 236–239.]
- Li ZZ, Du GZ, Hui C, Yue DX (2002) The optimal control model of the stocking farm management of alpine meadow in southern Gansu and research on a strategy for sustained utilization. *Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition)*, 38(4), 85–89. (in Chinese with English abstract) [李自珍, 杜国祯, 惠苍, 岳东霞 (2002) 甘南高寒草地牧场管理的最优控制模型及可持续利用对策研究. *兰州大学学报(自然科学版)*, 38(4), 85–89.]
- Liu B, Wu N, Luo P, Tao YP (2007) Characteristics of soil nutrient distribution in high-altitude meadow ecosystems with different management and degradation scenarios. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 15(4), 45–48. (in Chinese with English abstract) [刘兵, 吴宁, 罗鹏, 陶豫萍 (2007) 草场管理措施及退化程度对土壤养分含量变化的影响. *中国生态农业学报*, 15(4), 45–48.]
- Liu JX, Wang J, Hu XL (2010) Regressive analysis of the effect of precipitation on yield of pasture at high and cold area Tongde County. *Animal Husbandry and Feed Science*, 31(1), 83–84. (in Chinese with English abstract) [刘剑霞, 王军, 胡小玲 (2010) 降水对青海同德高寒草地牧草产量影响的积分回归分析. *畜牧与饲料科学*, 31(1), 83–84.]
- Liu W, Zhou L, Wang X (1999) Responses of plant and rodents to different grazing intensity. *Acta Ecologica Sinica*, 19, 376–382. (in Chinese with English abstract) [刘伟, 周立, 王溪 (1999) 不同放牧强度对植物及啮齿动物作用的研究. *生态学报*, 19, 376–382.]
- Liu XQ, Zhang X, Zhang LF, Li YN, Zhao L, Xu SX, Li HQ, Ma RR, Niu B, Gao YB, Gu S (2016) Effects of enclosure duration on the community structure and species diversity of an alpine meadow in the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 5150–5162. (in Chinese with English abstract) [刘晓琴, 张翔, 张立锋, 李英年, 赵亮, 徐世晓, 李红琴, 马荣荣, 牛犇, 高玉葆, 古松 (2016) 封育年限对高寒草甸群落组分和物种多样性的影响. *生态学报*, 36, 5150–5162.]
- Liu Z, Li Q, Chen DD, Zhai WT, Zhao L, Xu SX, Zhao XQ (2015) Patterns of plant species diversity along an altitudinal

- gradient and its effect on above-ground biomass in alpine meadows in Qinghai-Tibet Plateau. *Biodiversity Science*, 23, 451–462. (in Chinese with English abstract) [刘哲, 李奇, 陈懂懂, 翟文婷, 赵亮, 徐世晓, 赵新全 (2015) 青藏高原高寒草甸物种多样性的海拔梯度分布格局及对地上生物量的影响. *生物多样性*, 23, 451–462.]
- Loreau M, Naeem S, Inchausti P, Bengtsson J, Grime JP, Hector A, Hooper DU, Huston MA, Raffaelli D, Schmid B, Tilman D, Wardle DA (2001) Biodiversity and ecosystem functioning: Current knowledge and future challenges. *Science*, 294, 804–808.
- Ma XX, Yan Y, Lu XY, Wang XD (2016) Dynamics of belowground biomass and its relationship with soil moisture in alpine grassland on the North Tibetan Plateau. *Ecology and Environmental Sciences*, 25, 189–195. (in Chinese with English abstract) [马星星, 鄢燕, 鲁旭阳, 王小丹 (2016) 藏北高寒草地地下生物量特征及其与土壤水分的关系. *生态环境学报*, 25, 189–195.]
- Niu KC, Choler P, Zhao BB, Du GZ (2009) The allometry of reproductive biomass in response to land use in Tibetan alpine grasslands. *Functional Ecology*, 23, 274–283.
- Niu KC, Zhao ZG, Luo YJ, Du GZ (2006) Fertilization effects on species reproductive allocation in an alpine meadow plant community. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 30, 817–826. (in Chinese with English abstract) [牛克昌, 赵志刚, 罗燕江, 杜国祯 (2006) 施肥对高寒草甸植物群落主要组分繁殖分配的影响. *植物生态学报*, 30, 817–826.]
- Niu SL, Wu MY, Han Y, Xia JY, Li LH, Wan SQ (2008) Water-mediated responses of ecosystem carbon fluxes to climatic change in a temperate steppe. *New Phytologist*, 177, 209–219.
- Pakeman RJ (2004) Consistency of plant species and trait responses to grazing along a productivity gradient: A multi-site analysis. *Journal of Ecology*, 92, 893–905.
- Pan SY, Kong BB, Yao TH, Wei XH, Li YN, Zhu ZH (2015) Effects of clipping and fertilizing on the relationship between functional diversity and aboveground net primary productivity in an alpine meadow. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 867–877. (in Chinese with English abstract) [潘石玉, 孔彬彬, 姚天华, 卫欣华, 李英年, 朱志红 (2015) 刈割和施肥对高寒草甸功能多样性与地上净初级生产力关系的影响. *植物生态学报*, 39, 867–877.]
- Peng SS, Piao SL, Wang T, Sun JY, Shen ZH (2009) Temperature sensitivity of soil respiration in different ecosystems in China. *Soil Biology & Biochemistry*, 41, 1008–1014.
- Piao SL, Ciais P, Huang Y, Shen ZH, Peng SS, Li JS, Zhou LP, Liu HY, Ma YC, Ding YH, Friedlingstein P, Liu CZ, Tan K, Yu YQ, Zhang TY, Fang JY (2010) The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 467, 43–51.
- Qi WW, Niu HS, Wang SP, Liu YJ, Zhang LR (2012) Simulation of effects of warming on carbon budget in alpine meadow ecosystem on the Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 1713–1722. (in Chinese with English abstract) [齐伟伟, 牛海山, 汪诗平, 刘艳杰, 张立荣 (2012) 增温对青藏高原高寒草甸生态系统固碳通量影响的模拟研究. *生态学报*, 32, 1713–1722.]
- Qin DH (2014) *Ecological Protection and Sustainable Development in the Three-River Headwaters Region*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [秦大河 (2014) 三江源区生态保护与可持续发展. 科学出版社, 北京.]
- Qiu B, Luo YJ, Du GZ (2004) The effect of fertilizer gradients on vegetation characteristics in alpine meadow. *Acta Prataculturae Sinica*, 13(6), 65–68. (in Chinese with English abstract) [邱波, 罗燕江, 杜国祯 (2004) 施肥梯度对甘南高寒草甸植被特征的影响. *草业学报*, 13(6), 65–68.]
- Quan GL, Shang ZH (2015) A comprehensive review of warming experiments of grassland ecosystem in China. *Chinese Journal of Ecology*, 34, 1166–1173. (in Chinese with English abstract) [权国玲, 尚占环 (2015) 中国草地生态系统模拟增温实验的综合比较. *生态学杂志*, 34, 1166–1173.]
- Ren QJ, Wu GL, Ren GH (2009) Effect of grazing intensity on characteristics of alpine meadow communities in the eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 18, 256–261. (in Chinese with English abstract) [仁青吉, 武高林, 任国华 (2009) 放牧强度对青藏高原东部高寒草甸植物群落特征的影响. *草业学报*, 18, 256–261.]
- Rustad LE, Campbell JL, Marion GM, Norby RJ, Mitchell MJ, Hartley AE, Cornelissen JHC, Gurevitch J, GCTE-NEWS (2001) A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia*, 126, 543–562.
- Sa WJ, An LZ, Wei S (2012) Changes in plant community diversity and aboveground biomass along with altitude within an alpine meadow on the Three-River Source region. *Chinese Science Bulletin*, 57, 3573–3577.
- Sala OE, Chapin FS III, Armesto JJ, Berlow E, Bloomfield J, Dirzo R, Huber-Sanwald E, Huenneke LF, Jackson RB, Kinzig A, Leemans R, Lodge DM, Mooney HA, Oesterheld M, Poff NL, Sykes MT, Walker BH, Walker M, Wall DH (2000) Biodiversity: Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 287, 1770–1774.
- Shang ZH, Deng B, Ding LM, Ren GH, Xin GS, Liu ZY, Wang YL, Long RJ (2013) The effect of three years of fencing enclosure on soil seed banks and the relationship with above-ground vegetation of degraded alpine grasslands of the Tibetan Plateau. *Plant and Soil*, 364, 229–244.
- Shen JL, Tan G, Qiao HL, Zhang JH, Meng Y (2000) Study on effect of grassland improvement on alpine degraded grassland vegetation. *Grassland of China*, (5), 49–54. (in Chinese with English abstract) [沈景林, 谭刚, 乔海龙, 张娟华, 孟杨 (2000) 草地改良对高寒退化草地植被影响的研究. *中国草地*, (5), 49–54.]
- Shen ZX, Zhou XM, Chen ZZ, Zhou HK (2002) Response of plant groups to simulated rainfall and nitrogen supply in alpine *Kobresia humilis* meadow. *Acta Phytocologica Sinica*, 26, 288–294. (in Chinese with English abstract) [沈振西, 周兴民, 陈佐忠, 周华坤 (2002) 高寒矮嵩草草甸植物类群对模拟降水和施氮的响应. *植物生态学报*, 26,

- 288–294.]
- Shi F, Li YE, Gao QZ, Wan YF, Qin XB, Jin L, Liu YT, Wu YJ (2009) Effects of managements on soil organic carbon of grassland in China. *Pratacultural Science*, 26(3), 9–15. (in Chinese with English abstract) [石锋, 李玉娥, 高清竹, 万运帆, 秦晓波, 金琳, 刘运通, 武艳娟 (2009) 管理措施对我国草地土壤有机碳的影响. *草业科学*, 26(3), 9–15.]
- Shi FS, Wu N, Luo P (2008) Effect of temperature enhancement on community structure and biomass of subalpine meadow in northwestern Sichuan. *Acta Ecologica Sinica*, 28, 5286–5293. (in Chinese with English abstract) [石福孙, 吴宁, 罗鹏 (2008) 川西北亚高山草甸植物群落结构及生物量对温度升高的响应. *生态学报*, 28, 5286–5293.]
- Shi GX, Liu YJ, Johnson NC, Olsson PA, Mao L, Cheng G, Jiang SJ, An LZ, Du GZ, Feng HY (2014) Interactive effects of light intensity and soil fertility on root-associated arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil*, 378, 173–188.
- Srivastava DS, Cadotte MW, MacDonald AA, Marushia RG, Mirotchnick N (2012) Phylogenetic diversity and the functioning of ecosystems. *Ecology Letters*, 15, 637–648.
- Sun G, Wu N, Luo P (2005) Characteristics of soil nitrogen and carbon of pastures under different management in northwestern Sichuan. *Acta Phytocologica Sinica*, 29, 304–310. (in Chinese with English abstract) [孙庚, 吴宁, 罗鹏 (2005) 不同管理措施对川西北草地土壤氮和碳特征的影响. *植物生态学报*, 29, 304–310.]
- Tian L, Zhang Y, Zhu J (2014) Decreased surface albedo driven by denser vegetation on the Tibetan Plateau. *Environmental Research Letters*, 9, 104001.
- Tilman D (2000) Causes, consequences and ethics of biodiversity. *Nature*, 405, 208–211.
- Tilman D, Downing JA (1994) Biodiversity and stability in grasslands. *Nature*, 367, 363–365.
- Tilman D, Knops J, Wedin D, Reich P, Ritchie M, Siemann E (1997) The influence of functional diversity and composition on ecosystem processes. *Science*, 277, 1300–1302.
- Tilman D, Reich PB, Knops J, Wedin D, Mielke T, Lehman C (2001) Diversity and productivity in a long-term grassland experiment. *Science*, 294, 843–845.
- Trenberth KE, Dai A, Rasmussen RM, Parsons DB (2003) The changing character of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84, 1205–1217.
- Unlu K, Ozenirler G, Yurteri C (1999) Nitrogen fertilizer leaching from cropped and irrigated sandy soil in Central Turkey. *European Journal of Soil Science*, 50, 609–620.
- van der Heijden MGA, Klironomos JN, Ursic M, Moutoglou P, Streitwolf-Engel R, Boller T, Wiemken A, Sanders IR (1998) Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature*, 396, 69–72.
- Waide RB, Willig MR, Steiner CF, Mittelbach G, Gough L, Dodson SI, Juday GP, Parmenter R (1999) The relationship between productivity and species richness. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 30, 257–300.
- Wan SQ, Norby RJ, Ledford J, Weltzin JF (2007) Responses of soil respiration to elevated CO₂, air warming, and changing soil water availability in a model old-field grassland. *Global Change Biology*, 13, 2411–2424.
- Wang CS, Meng FD, Li XE, Jiang LL, Wang SP (2014) Factors affecting plant primary productivity of grasslands: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 4125–4132. (in Chinese with English abstract) [王常顺, 孟凡栋, 李新娥, 姜丽丽, 汪诗平 (2014) 草地植物生产力主要影响因素研究综述. *生态学报*, 34, 4125–4132.]
- Wang CT, Long RJ, Cao GM, Wang QL, Jing ZC, Shi JJ (2008a) The relationship between soil nutrients and species diversity productivity of different type grasslands in alpine meadow. *Chinese Journal of Soil Science*, 39, 1–8. (in Chinese with English abstract) [王长庭, 龙瑞军, 曹广民, 王启兰, 景增春, 施建军 (2008a) 高寒草甸不同类型草地土壤养分与物种多样性-生产力关系. *土壤通报*, 39, 1–8.]
- Wang CT, Long RJ, Ding LM (2004a) The effects of differences in functional group diversity and composition on plant community productivity in four types of alpine meadow communities. *Biodiversity Science*, 12, 403–409. (in Chinese with English abstract) [王长庭, 龙瑞军, 丁路明 (2004a) 高寒草甸不同草地类型功能群多样性及组成对植物群落生产力的影响. *生物多样性*, 12, 403–409.]
- Wang CT, Long RJ, Ding LM, Lai DZ, Li YF (2005a) Species diversity, community stability and ecosystem function: Extension of the continuous views. *Pratacultural Science*, 22, 1–7. (in Chinese with English abstract) [王长庭, 龙瑞军, 丁路明, 来德珍, 李有福 (2005a) 草地生态系统中物种多样性、群落稳定性和生态系统功能的关系. *草业科学*, 22, 1–7.]
- Wang CT, Long RJ, Wang QL, Cao GM, Shi JJ, Du YG (2008b) Response of plant diversity and productivity to soil resources changing under grazing disturbance on an alpine meadow. *Acta Ecologica Sinica*, 28, 4144–4152. (in Chinese with English abstract) [王长庭, 龙瑞军, 王启兰, 曹广民, 施建军, 杜岩功 (2008b) 放牧扰动下高寒草甸植物多样性、生产力对土壤养分条件变化的响应. *生态学报*, 28, 4144–4152.]
- Wang CT, Long RJ, Wang QJ, Ding LM, Wang MP (2007) Effects of altitude on plant-species diversity and productivity in an alpine meadow, Qinghai-Tibetan Plateau. *Australian Journal of Botany*, 55, 110–117.
- Wang CT, Long RJ, Wang QJ, Jing ZC, Ding LM (2005b) Relationship between species diversity and productivity in four types of alpine meadow plant communities. *Chinese Journal of Ecology*, 24, 483–487. (in Chinese with English abstract) [王长庭, 龙瑞军, 王启基, 景增春, 丁路明 (2005b) 高寒草甸不同草地群落物种多样性与生产力关系研究. *生态学杂志*, 24, 483–487.]
- Wang CT, Long RJ, Wang QJ, Jing ZC, Shi HL (2004b) Changes in plant species diversity and productivity along an elevation gradient in an alpine meadow. *Acta Phytocologica Sinica*, 28, 240–245. (in Chinese with English abstract) [王长庭, 王启基, 龙瑞军, 景增春, 史惠兰 (2004b) 高寒草甸群落植物多样性和初级生产力海拔梯度变化的研究. *植物生态学报*, 28, 240–245.]
- Wang CT, Wang GX, Liu W, Wang QL (2013) Effects of

- fertilization gradients on plant community structure and soil characteristics in alpine meadow. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 3103–3113. (in Chinese with English abstract) [王长庭, 王根绪, 刘伟, 王启兰 (2013) 施肥梯度对高寒草甸群落结构、功能和土壤质量的影响. *生态学报*, 33, 3103–3113.]
- Wang FG, Wang WY, Chen Z, Wang QJ (2007) Effects of changes in land use on plant community structure and species diversity in alpine meadows. *Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition)*, 43(3), 58–63. (in Chinese with English abstract) [王发刚, 王文颖, 陈志, 王启基 (2007) 土地利用变化对高寒草甸植物群落结构及物种多样性的影响. *兰州大学学报(自然科学版)*, 43(3), 58–63.]
- Wang GX, Li YS, Wang YB (2010) Surface Processes and Environmental Changes in the Region of Yellow River source in the Tibetan Plateau. Science Press, Beijing. (in Chinese) [王根绪, 李元寿, 王一博 (2010) 青藏高原河源区地表过程与环境变化. 科学出版社, 北京.]
- Wang M, Li Y, Bai XZ, Huang RQ (2004) The impact of global warming on vegetation resources in the hinterland of the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Natural Resources*, 19, 331–336. (in Chinese with English abstract) [王谋, 李勇, 白宪洲, 黄润秋 (2004) 全球变暖对青藏高原腹地草地资源的影响. *自然资源学报*, 19, 331–336.]
- Wang QJ, Wang WY, Deng ZF (1998) The dynamics of biomass and the allocation of energy in alpine *Kobresia* meadow communities, Haibei region of Qinghai Province. *Acta Phytocologica Sinica*, 22, 222–230. (in Chinese with English abstract) [王启基, 王文颖, 邓自发 (1998) 青海海北地区高山嵩草草甸植物群落生物量动态及能量分配. *植物生态学报*, 22, 222–230.]
- Wang SP, Duan JC, Xu GP, Wang YF, Zhang ZH, Rui YC, Luo CY, Xu B, Zhu XX, Chang XF, Cui XY, Niu HS, Zhao XQ, Wang WY (2012) Effects of warming and grazing on soil N availability, species composition and ANPP in alpine meadow. *Ecology*, 93, 2365–2376.
- Wang WY, Wang QJ, Wang G, Jing ZC (2007) Effects of land degradation and rehabilitation on vegetation carbon and nitrogen content of alpine meadow in China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 31, 1073–1078. (in Chinese with English abstract) [王文颖, 王启基, 王刚, 景增春 (2007) 高寒草甸土地退化及其恢复重建对植被碳、氮含量的影响. *植物生态学报*, 31, 1073–1078.]
- Wang XX, Dong SK, Yang B, Li YY, Su XK (2014) The effects of grassland degradation on plant diversity, primary productivity and soil fertility in the alpine region of Asia's headwaters. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186, 6903–6917.
- Wang XX, Dong SK, Sherman R, Liu QR, Liu SL, Li YY, Wu Y (2015) A comparison of biodiversity-ecosystem function relationships in alpine grasslands across a degradation gradient on the Qinghai-Tibetan Plateau. *The Rangeland Journal*, 37, 45–55.
- Wei FW, Nie YG, Miao HX, Lu H, Hu YB (2014) Advancements of the researches on biodiversity loss mechanisms. *Chinese Science Bulletin*, 59, 430–437. (in Chinese with English abstract) [魏辅文, 聂永刚, 苗海霞, 路浩, 胡义波 (2014) 生物多样性丧失机制研究进展. *科学通报*, 59, 430–437.]
- Wei XH, Yang FY, Sun L (2010) Effects of reseeding and fertilization on the vegetation recovery of degraded grassland in North Tibet. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 38, 18155–18156. (in Chinese with English abstract) [魏学红, 杨富裕, 孙磊 (2010) 补播和施肥对藏北高寒退化草地的改良效果. *安徽农业科学*, 38, 18155–18156.]
- Wu GL, Du GZ (2007) Discussion on ecological construction and sustainable development of degraded alpine grassland ecosystem of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Nature*, 29, 160–164. (in Chinese with English abstract) [武高林, 杜国祯 (2007) 青藏高原退化高寒草地生态系统恢复和可持续发展探讨. *自然杂志*, 29, 160–164.]
- Wu JS, Li XJ, Shen ZX, Zhang XZ, Shi PL, Yu CQ, Wang JS, Zhou YT (2012) Species diversity distribution pattern of alpine grasslands communities along a precipitation gradient across Northern Tibet Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 21, 17–25. (in Chinese with English abstract) [武建双, 李晓佳, 沈振西, 张宪洲, 石培礼, 余成群, 王景升, 周宇庭 (2012) 藏北高寒草地样带物种多样性沿降水梯度的分布格局. *草业学报*, 21, 17–25.]
- Wu ZT, Dijkstra P, Koch GW, Peñuelas J, Hungate BA (2011) Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: A meta-analysis of experimental manipulation. *Global Change Biology*, 17, 927–942.
- Xu MH, Liu M, Zhai DT, Xue X, Peng F, You QG (2016a) Effects of experimental warming on the root biomass of an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 6812–6822. (in Chinese with English abstract) [徐满厚, 刘敏, 翟大彤, 薛嫻, 彭飞, 尤全刚 (2016a) 模拟增温对青藏高原高寒草甸根系生物量的影响. *生态学报*, 36, 6812–6822.]
- Xu MH, Liu M, Zhai DT, Xue X, Peng F, You QG (2016b) Dynamic changes in biomass and its relationship with environmental factors in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau, based on simulated warming experiments. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 5759–5767. (in Chinese with English abstract) [徐满厚, 刘敏, 翟大彤, 薛嫻, 彭飞, 尤全刚 (2016b) 青藏高原高寒草甸生物量动态变化及与环境因子的关系——基于模拟增温实验. *生态学报*, 36, 5759–5767.]
- Xu W, Ma ZY, Jing X, He JS (2016) Biodiversity and ecosystem multifunctionality: Advances and perspectives. *Biodiversity Science*, 24, 55–71. (in Chinese with English abstract) [徐炜, 马志远, 井新, 贺金生 (2016) 生物多样性与生态系统多功能性: 进展与展望. *生物多样性*, 24, 55–71.]
- Xu ZF, Hu TX, Li XY, Zhang YB, Xian JR, Wang KY (2009) Short-term responses of grass community in clear-cutting land of sub-alpine regions simulated global warming, Western Sichuan. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 2089–2095. (in Chinese with English abstract) [徐振峰, 胡庭兴, 李小艳, 张远彬, 鲜骏仁, 王开运 (2009) 川西亚高山采迹地草坡群落对模拟增温的短期响应. *生态学报*, 29,

- 2089–2095.]
- Yang YH, Rao S, Hu HF, Chen AP, Ji CJ, Zhu B, Zuo WY, Li XR, Shen HH, Wang ZH, Tang YH, Fang JY (2004) Plant species richness of alpine grasslands in relation to environmental factors and biomass on the Tibetan Plateau. *Chinese Biodiversity*, 12, 200–205. (in Chinese with English abstract) [杨元合, 饶胜, 胡会峰, 陈安平, 吉成均, 朱彪, 左闻韵, 李轩然, 沈海花, 王志恒, 唐艳鸿, 方精云 (2004) 青藏高原高寒草地植物物种丰富度及其与环境因子和生物量的关系. *生物多样性*, 12, 200–205.]
- Yang YJ, Zhou HK, Ye X, Yao BQ, Wang WY, Zhao XQ, Zhang H (2014) Short-term responses of plant community structure and function to nitrogen, phosphorus and potassium additions in an alpine meadow of Qinghai-Xizang Plateau. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 34, 2317–2323. (in Chinese with English abstract) [杨月娟, 周华坤, 叶鑫, 姚步青, 王文颖, 赵新全, 张灏 (2014) 青藏高原高寒草甸植物群落结构和功能对氮、磷、钾添加的短期响应. *西北植物学报*, 34, 2317–2323.]
- Yang YS (2017) The impacts of global environmental changes on typical ecosystem: Status, challenges and trends. *Acta Ecologica Sinica*, 37, 1–11. (in Chinese with English abstract) [杨玉盛 (2017) 全球环境变化对典型生态系统的影响研究: 现状, 挑战与发展趋势. *生态学报*, 37, 1–11.]
- Yang YW, Zhou HK, Li XL, Zhao XQ, Ye X (2017) Initial response of species diversity and productivity to nutrient addition on alpine meadow. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 26, 159–166. (in Chinese with English abstract) [杨元武, 周华坤, 李希来, 赵新全, 叶鑫 (2017) 高寒草甸物种多样性和生产力对养分添加的初期响应. *西北农业学报*, 26, 159–166.]
- Yang ZL, Yang GH (2000) Potential productivity and livestock carrying capacity of high-frigid grassland in China. *Resources Science*, 22, 73–77. (in Chinese with English abstract) [杨正礼, 杨改河 (2000) 中国高寒草地生产潜力与载畜量研究. *资源科学*, 22, 73–77.]
- Yang ZL, Powell JR, Zhang CH, Du GZ (2012) The effect of environmental and phylogenetic drivers on community assembly in an alpine meadow community. *Ecology*, 93, 2321–2328.
- Yu XC, Yao BQ, Zhou HK, Jin YX, Yang YJ, Wang WY, Dong SK, Zhao XQ (2015) Variable responses to long-term simulated warming of underground biomass and carbon allocations of two alpine meadows on the Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 60, 379–388. (in Chinese with English abstract) [余欣超, 姚步青, 周华坤, 金艳霞, 杨月娟, 王文颖, 董世魁, 赵新全 (2015) 青藏高原两种高寒草甸地下生物量及其碳分配对长期增温的响应差异. *科学通报*, 60, 379–388.]
- Zhang CH (2014) Effects of grazing and fertilization on community productivity and species richness in eastern alpine meadow of Tibetan Plateau. *Pratacultural Science*, 31, 2293–2300. (in Chinese with English abstract) [张春花 (2014) 放牧方式和施肥梯度对高寒草甸群落生产力和物种丰富度的影响. *草业科学*, 31, 2293–2300.]
- Zhang J, Zhao H, Zhang T, Zhao X, Drake S (2005) Community succession along a chronosequence of vegetation restoration on sand dunes in Horqin sandy land. *Journal of Arid Environments*, 62, 555–566.
- Zhang QG, Zhang DY (2003) Biodiversity and ecosystem functioning: Recent advances and trends. *Biodiversity Science*, 11, 351–363. (in Chinese with English abstract) [张全国, 张大勇 (2003) 生物多样性与生态系统功能: 最新的进展与动向. *生物多样性*, 11, 351–363.]
- Zhang T, Chen XP, Zhao JX, Wang XM, Zhang R, Bai YF, Li YF, Guo RY, Shang ZH (2015) Effects of carbon and nitrogen additions on species diversity and biomass of alpine meadow plant communities. *Ecology and Environmental Sciences*, 24, 1604–1610. (in Chinese with English abstract) [张涛, 陈晓鹏, 赵景学, 王喜明, 张蕊, 白彦福, 李银凤, 郭瑞英, 尚占环 (2015) 碳、氮添加对高寒草甸植物群落物种多样性和生物量的影响. *生态环境学报*, 24, 1604–1610.]
- Zhao BB, Niu KC, Du GZ (2009) The effect of grazing on above-ground biomass allocation of 27 plant species in an alpine meadow plant community in Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 1596–1606. (in Chinese with English abstract) [赵彬彬, 牛克昌, 杜国祯 (2009) 放牧对青藏高原东缘高寒草甸群落27种植物地上生物量分配的影响. *生态学报*, 29, 1596–1606.]
- Zhao L, Xu SX, Zhou HK, Dong QM, Zhao XQ (2013) *Alpine Grassland Management Manual*. Sichuan Science and Technology Press, Chengdu. (in Chinese) [赵亮, 徐世晓, 周华坤, 董全民, 赵新全 (2013) 高寒草地管理手册. 四川科技出版社, 成都.]
- Zhao L, Li Q, Chen DD, Xu SX, Zhou HK, Wang SP, Zhao XQ (2014) Principles of alpine grassland ecosystems carbon sequestration and management practices on Sanjiangyuan regions, Qinghai-Tibetan Plateau. *Quaternary Sciences*, 34, 795–802. (in Chinese with English abstract) [赵亮, 李奇, 陈懂懂, 徐世晓, 周华坤, 汪诗平, 赵新全 (2014) 三江源区高寒草地碳流失原因、增汇原理及管理实践. 第四纪研究, 34, 795–802.]
- Zhao LQ, Wang G (2009) Relationship between species diversity and productivity of alpine meadow in Gannan Prefecture. *Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition)*, 45(6), 82–86. (in Chinese with English abstract) [赵陆强, 王刚 (2009) 甘南高寒草甸物种多样性与生产力的关系. *兰州大学学报(自然科学版)*, 45(6), 82–86.]
- Zhao XQ, Cao GM, Li YN (2009) *Alpine Meadow Ecosystem and Global Change*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [赵新全, 曹广民, 李英年 (2009) 高寒草甸生态系统与全球变化. 科学出版社, 北京.]
- Zhao XQ, Chen SL, Cao GM, Shi SB, Xu SX, Wang QL (2003) Study on interacting mechanisms of alpine meadow ecosystem with global change in Tibetan Plateau. *Science Technology and Industrial*, 3(8), 51–59. (in Chinese) [赵新全, 陈世龙, 曹广民, 师生波, 徐世晓, 王启兰 (2003) 青藏高原高寒草甸生态系统与全球气候变化的相互作用

- 机理研究. 科技与产业, 3(8), 51–59.]
- Zhao XQ, Ma YS, Zhou HK (2011) Restoration and Sustainable Management of Degraded Ecosystem in the Three-River Headwaters Region. Science Press, Beijing. (in Chinese) [赵新全, 马玉寿, 周华坤 (2011) 三江源区退化生态系统恢复及可持续管理化. 科学出版社, 北京.]
- Zhao XQ, Zhou HK (2005) Eco-environment degradation, vegetation restoration and sustainable development in the Headwaters of Three Rivers on Tibetan Plateau. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 20, 471–476. (in Chinese with English abstract) [赵新全, 周华坤 (2005) 三江源生态环境退化、恢复治理及其可持续发展. 中国科学院院刊, 20, 471–476.]
- Zhao YY, Zhou HK, Yao BQ, Wang WY, Dong SK, Zhao XQ (2015) The influence of long-term simulating warming to the plant community and soil nutrient of alpine meadow. Acta Agrestia Sinica, 23, 665–671. (in Chinese with English abstract) [赵艳艳, 周华坤, 姚步青, 王文颖, 董世魁, 赵新全 (2015) 长期增温对高寒草甸植物群落和土壤养分的影响. 草地学报, 23, 665–671.]
- Zheng HP, Chen ZX, Niu JY, Gao YH (2009) Effects of inter-seeding on plant diversity and productivity in Maqu alpine desertified meadow. Acta Prataculture Sinica, 18, 28–33. (in Chinese with English abstract) [郑华平, 陈子萱, 牛俊义, 高玉红 (2009) 补播禾草对玛曲高寒沙化草地植物多样性和生产力的影响. 草业学报, 18, 28–33.]
- Zhou GS, Wang YH, Zhang XS (1999) China's vegetation/ecosystem response to global change: Research progress and prospects. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 13, 158–165.
- Zhou HK, Yao BQ, Yu L, Zhao XQ (2016) Degraded Succession and Ecological Restoration of Alpine Grassland in the Three-River Headwaters Region. Science Press, Beijing. (in Chinese) [周华坤, 姚步青, 于龙, 赵新全 (2016) 三江源区高寒草地退化演替与生态恢复. 科学出版社, 北京.]
- Zhou HK, Zhao XQ, Tang YH, Zhou L (2005) Alpine grassland degradation and its control in the source regions of Yangtze and Yellow rivers. China Grassland Science, 51, 191–203.
- Zhou HK, Zhao XQ, Tang YH, Zhou L, Liu W, Yu L (2004) Effect of long-term grazing on alpine shrub vegetation in Qinghai-Tibet Plateau. Grassland of China, 26, 1–11. (in Chinese with English abstract) [周华坤, 赵新全, 唐艳鸿, 周立, 刘伟, 于龙 (2004) 长期放牧对青藏高原高寒灌丛植被的影响. 中国草地, 26, 1–11.]
- Zhou HK, Zhao XQ, Wen J, Chen Z, Yao BQ, Yang YW, Xu WX, Duan JC (2012) The characteristics of soil and vegetation of degenerated alpine steppe in the Yellow River Source Region. Acta Prataculture Sinica, 21, 1–11. (in Chinese with English abstract) [周华坤, 赵新全, 温军, 陈哲, 姚步青, 杨元武, 徐维新, 段吉闯 (2012) 黄河源区高寒草原的植被退化与土壤退化特征. 草业学报, 21, 1–11.]
- Zhou HK, Zhao XQ, Zhou L, Liu W, Li YN, Tang YH (2005) A study on correlations between vegetation degradation and soil degradation in the “Alpine Meadow” of the Qinghai-Tibetan Plateau. Acta Prataculture Sinica, 14(3), 31–40. (in Chinese with English abstract) [周华坤, 赵新全, 周立, 刘伟, 李英年, 唐艳鸿 (2005) 青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究. 草业学报, 14(3), 31–40.]
- Zhou HK, Zhou L, Zhao XQ, Liu W, Li YN, Gu S, Zhou XM (2006) Stability of alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau. Chinese Science Bulletin, 51, 320–327. (in Chinese with English abstract) [周华坤, 周立, 赵新全, 刘伟, 李英年, 古松, 周兴民 (2006) 青藏高原高寒草甸生态系统稳定性研究. 科学通报, 51, 63–69.]
- Zhou HK, Zhou L, Zhao XQ, Liu W, Yan ZL, Shi Y (2003) Degradation process and integrated treatment of “black soil beach” grassland in the source regions of Yangtze and Yellow rivers. Chinese Journal of Ecology, 22, 51–55. (in Chinese with English abstract) [周华坤, 周立, 赵新全, 刘伟, 严作良, 师燕 (2003) 江河源区“黑土滩”型退化草场的形成过程与综合治理. 生态学杂志, 22, 51–55.]
- Zhou HK, Zhou L, Zhao XQ, Yan ZL, Liu W, Shi Y (2002) Influence of grazing disturbance on alpine grassland. Grassland of China, 24, 53–61. (in Chinese with English abstract) [周华坤, 周立, 赵新全, 严作良, 刘伟, 师燕 (2002) 放牧干扰对高寒草场的影响. 中国草地, 24, 53–61.]
- Zhou HK, Zhou XM, Zhao XQ (2000) A preliminary study of the influence of simulated greenhouse effect on a *Kobresia humilis* meadow. Acta Phytoecologica Sinica, 24, 547–553. (in Chinese with English abstract) [周华坤, 周兴民, 赵新全 (2000) 模拟增温效应对矮嵩草草甸影响的初步研究. 植物生态学报, 24, 547–553.]
- Zhou XM, Wang QJ, Zhao XQ (2001) Chinese *Kobresia* Meadow. Science Press, Beijing. (in Chinese) [周兴民, 王启基, 赵新全 (2001) 中国嵩草草甸. 科学出版社, 北京.]
- Zhu ZH, Li XL, Liu W, Qiao YM, Xu ZW (2002) Studies on responses of *Kobresia humilis* to simulated grazing. Prataculture Science, 19, 42–44. (in Chinese with English abstract) [朱志红, 李希来, 刘伟, 乔有明, 徐志伟 (2002) 矮嵩草对模拟放牧反应的研究. 草业科学, 19, 42–44.]
- Zou JR, Zhao XQ (2015) Effects of livestock enclosure and grazing on carbon sequestration in grassland ecosystem. Prataculture Science, 32, 1748–1756. (in Chinese with English abstract) [邹婧汝, 赵新全 (2015) 围栏禁牧与放牧对草地生态系统固碳能力的影响. 草业科学, 32, 1748–1756.]

(责任编辑: 白永飞 责任编辑: 黄祥忠)