

文章编号: 1001-4675(2011)06-1025-06

祁连山北坡天然草地根冠比与气候因子的关系^{*1}

黄德青^{1,2}, 于兰³, 张耀生¹, 赵新全¹

(1. 中国科学院西北高原生物研究所 高原生物适应与进化重点实验室, 青海 西宁 810001;

2. 桂林师范高等专科学校 化工系, 广西 桂林 541002; 3. 桂林医学院 基础医学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 利用祁连山北坡5类天然草地上/地下生物量和同期的气象资料,分析5类草地的根冠比(R/S)与气候因子的关系。结果表明:5类草地生物量为山地草甸>山地草原>山地草甸草原>高寒草原>山地荒漠草原,除高寒草原、山地草甸草原和山地草原的生物量之间无显著差异外,其余各类之间差异显著($P<0.05$);高寒草原、山地草甸、山地草甸草原、山地草原和山地荒漠草原的 R/S 分别为9.3,8.7,5.1,7.0和7.1;5类草地 R/S 的季节变化均呈反抛物线型,但变化不尽相同;高寒草原的月 R/S 随上月土壤含水量的增加而显著降低,山地草甸草原和山地草原的月 R/S 随上月潜在蒸散量的增加也呈显著降低趋势,而山地草甸和山地荒漠草原的月 R/S 与前期的水热因子无显著相关关系。

关键词: 天然草地; 生态系统; 生物量; 根冠比; 气候因子; 祁连山

中图分类号: Q948.11 **文献标识码:** A

草地植被生物量的80%以上都分布于地下^[1],地下生物量是草地植被碳蓄积的重要组成部分,准确测定草地地下生物量是确定草地植被源汇功能的基础^[2]。然而,由于地下部分一直缺乏较好的研究方法,因此人们对地下生物量的认识相对薄弱,致使目前对草地生态系统植被碳储量及其随时间变化的估计还存在很大的不确定性^[2-3]。

由于根冠比(R/S ,即植物地下部分和地上部分生物量的比值)不仅能反映植物体光合作用产物的分配比例,而且对地下生物量和植被碳储量的估算也具有十分重要的价值^[2,4]。朴世龙等^[5]根据地下生物量与地上生物量的比例关系,分析了中国草地地下部分的生物量及其空间分布格局;李克让等^[6]依据植被、土壤和大气碳交换(CEVSA)模型,采用叶、茎和根之间的分配,按固定分配参数估算了中国植被的碳储量,因此利用 R/S 估算地下生物量和碳储量是比较实际有效的方法。

目前,有关草地生物量与气象因子关系的研究多有报道^[3-11],尽管如此, R/S 数据仍然较为缺乏^[3,5];在祁连山区,天然草地生物量方面的相关资料甚少^[12-13],尤其是该区天然草地 R/S 与气候因子的关系。本研究采用祁连山北坡5类天然草地

2004年生长季的地上/地下生物量与当地同期气象资料,分析了草地生物量、 R/S 、季节动态及其与气象因子的关系,这对估算该区天然草地地下生物量和碳储量、预测草地生态系统与全球变化的动态关系,以及草地资源的管理和合理利用具有非常重要的价值。

1 研究区概况

研究区位于黑河上游的甘肃省肃南裕固族自治县,地处祁连山北坡中段,位于 $97^{\circ}20' \sim 102^{\circ}13' E$, $37^{\circ}28' \sim 39^{\circ}49' N$,属大陆性高寒半干旱气候。本研究以占肃南县草地总面积63.2%的5种主要的天然草地类型,即高寒草原、山地草甸、山地草甸草原、山地草原和山地荒漠草原为研究对象,在各草地类型设立相应观测点,各草地类型立地条件的基本概况和群落主要植物分别见表1和表2。

2 研究方法

2.1 生物量调查

为了揭示气象因子与天然草地 R/S 的关系,试

* 收稿日期: 2010-09-22; 修订日期: 2011-05-27

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2009BAC61B03-1,2006BAC01A02);中国科学院西部行动计划项目(KZCX2XB20601);中国科学院知识创新工程重大项目(kzcx1-09-01);中国科学院西北高原生物研究所知识创新重点研究领域项目(cjc020144)

作者简介: 黄德青(1980-),男,山东定陶人,讲师,主要从事植物系统进化和生态适应方面的研究. E-mail: huangdeqing2008@163.com

通讯作者: 张耀生. E-mail: zys@nwipb.ac.cn

验样地均选择相对开阔和人为干扰相对较少的天然草地群落。于2004年5月牧草返青至2004年10月下旬生长末期,每月下旬在所选样地内随机设置面积0.25 m × 0.25 m的样方5个,每次每区共计15个样方。采用收获法(齐地刈割)^[14]测定各样方的地上生物量,然后带回室内在80℃恒温下烘干称重(精度0.01 g);同时,在收割后的样方内采用挖

土块法^[15]取样,测深为30 cm,每10 cm一层,样品按层装入布袋中,将带根的土样置于沙网(0.5 mm)中,用水冲洗后带回室内,在80℃恒温下烘干称重(精度0.01 g)。本文的地下生物量指地表以下的全部生物量(包括植物的活根和死根)。每个样地所有小样方地下/地上生物量比例的平均值作为样地的R/S。

表1 5个观测点的基本概况

Tab.1 Basic information about the five observation stations

草地类型	经纬度	海拔/m	土壤类型	年均降水量/mm	年均气温/℃
高寒草原	98°14' E, 39°06' N	3 445	高山草原土	252	-3.1
山地草甸	99°48' E, 38°46' N	3 134	亚高山灌丛草甸土	300~500	0~-5.4
山地草甸草原	99°49' E, 38°48' N	2 950	山地暗栗钙土	370~450	0
山地草原	99°54' E, 38°49' N	2 785	山地栗钙土	260~491	0.2~2.1
山地荒漠草原	98°00' E, 39°11' N	2 861	山地棕钙土	254	≥3.6

注:年均降水量和年均气温引自《甘肃省肃南裕固族自治县牧业区划报告汇编》

表2 5种草地的主要植物种组成

Tab.2 Main plant species in five types of grasslands

草地类型	主要植物种
高寒草原	紫花针茅 <i>Stipa purpurea</i> 、异针茅 <i>S. aliena</i> 、薹草 <i>Carex</i> spp.、早熟禾 <i>Poa annua</i> 、芨芨草 <i>Achnatherum splendens</i> 、二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i> 、垂穗披碱草 <i>Elymus nutans</i>
山地草甸	金露梅 <i>P. fruticosa</i> 、线叶嵩草 <i>Kobresia capillifolia</i> 、黑褐穗苔草 <i>C. atrofusca</i> subsp. <i>minor</i> 、二裂委陵菜 <i>P. bifurca</i> 、珠芽蓼 <i>Polygonum viviparum</i> 、直梗唐松草 <i>Thalictrum przewalskii</i> 、紫花地丁 <i>Viola philippica</i> 、紫菀 <i>Aster tataricus</i> 、凤毛菊 <i>Saussurea japonica</i> 、火绒草 <i>Leontopodium leontopodioides</i>
山地草甸草原	大针茅 <i>S. grandis</i> 、赖草 <i>Leymus secalinus</i> 、垂穗披碱草 <i>E. nutans</i> 、早熟禾 <i>P. annua</i> 、扁穗冰草 <i>Agropyron cristatum</i> 、狼毒 <i>Stellera chamaejasme</i> 、长柱灯心草 <i>Juncus przewalskii</i> 、乳白香青 <i>Anaphalis lactea</i> 、醉马草 <i>A. incobrans</i>
山地草原	西北针茅 <i>S. sareptana</i> var. <i>krylovii</i> 、短花针茅 <i>S. breviflora</i> 、多茎委陵菜 <i>P. multicaulis</i> 、扁穗冰草 <i>A. cristatum</i> 、野决明 <i>Thermopsis lupinoides</i> 、紫菀 <i>A. tataricus</i> 、早熟禾 <i>P. annua</i> 、天山鸢尾 <i>Iris toczki</i> 、赖草 <i>A. dasystachys</i> 、碱韭 <i>Allium polyrhizum</i>
山地荒漠草原	米蒿 <i>Artemisia dalai-lamae</i> 、新麦草 <i>Psathyrostachys juncea</i> 、芨芨草 <i>A. splendens</i> 、赖草 <i>A. dasystachys</i> 、松叶猪毛菜 <i>Salsola lasiocarpa</i>

2.2 土壤水分测定

与生物量同时测定。每月下旬测定1次,采用土钻法^[15]分层取样。为了便于探讨R/S比与土壤含水量之间的关系,土壤水分的取样深度与地下生物量取样深度一致,即每10 cm一层,测深为30 cm,共3个层次,每层重复取样5次,然后用烘干法(105℃)烘干称重,取其平均值为该层的土壤水分含量。土壤含水量的计算公式为:

$$\text{土壤含水量} = \frac{(\text{土壤湿重} - \text{土壤干重})}{\text{土壤干重}} \times 100\% \quad (1)$$

2.3 气象要素观测

在5类天然草地定位实验区设立小型自动气象站和降水量观测点,按照地面气象观测规范的要求和试验研究的需要进行各气象要素的观测。观测包括气温、土壤温度、相对湿度、气压、太阳辐射、风速、

降水量等,观测步长为30 min,观测方法是小气候自动观测系统自动记录。提取2004年的观测数据,取其平均值用于数据分析。

降水量采用气象站常规雨量筒测定。

本文选取标准化、统一化后FAO推荐的P-M公式^[16]来计算祁连山北坡天然草地生长季的潜在蒸散量:

$$LE = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \frac{C_n \cdot \gamma \cdot \mu_s \cdot (e_s - e_a)}{(T + 273)}}{\Delta + \gamma(1 + C_d \cdot \mu_s)} \quad (2)$$

式中:L为汽化潜热(MJ/kg);E为蒸散量(mm/h);Δ为饱和水汽压曲线对温度的斜率(kPa/℃);R_n为净辐射[MJ/(m²·h)];G为地热通量[MJ/(m²·h)];γ为干湿表常数(kPa/℃);C_n和C_d分别以小时

和一天为步长的彭曼公式设置常数; μ_s 为风速 (m/s); e_s 和 e_a 分别为饱和水汽压和实际水汽压。

2.4 数据处理

用 Excel 进行数据的初步处理和作图;用 SPSS 17.0 统计分析软件,对 R/S 与各气象因子进行相关分析和差异性检验,并进行回归分析;潜在蒸散量的计算通过 SAS 8.1 统计软件进行。

3 结果与分析

3.1 生物量与根冠比

在 5 类草地群落中,除高寒草原、山地草甸草原和山地草原的生物量之间无显著差异外,其余各类之间均存在显著差异 ($P < 0.05$)。5 类草地中,山地草甸的地上、地下生物量最大(表 3),分别为 78.1 g/m^2 和 848.1 g/m^2 。山地荒漠草原的地上、地下生物量最小,分别为 11.0 g/m^2 和 119.3 g/m^2 。各类草地的生物量绝大部分分布于地下,地下生物量约为地上生物量的 10 倍。巨大的地下生物量是草地植被碳蓄积的重要组成部分。准确测定地下生物量是确定草地植被源汇功能的基础^[3]。

表 3 5 类草地上生物量 (AGB)、地下生物量 (BGB) 和根冠比 (R/S)

Tab. 3 Aboveground and underground biomasses and the root-shoot ratios of five types of grasslands

草地类型	样本量	AGB/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	BGB/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	R/S	
		平均值(标准差)	平均值(标准差)	中值	范围
高寒草原	30	31.7(17.8)	379.9(102.0)	9.3	7.5~141.2
山地草甸	25	78.1(17.6)	848.1(208.7)	8.7	8.2~15.5
山地草甸草原	30	46.7(20.9)	430.1(152.5)	5.1	3.7~40.6
山地草原	30	42.8(24.5)	464.3(140.1)	7.0	5.9~111.6
山地荒漠草原	30	11.0(8.0)	119.3(27.0)	7.1	5.3~78.0

由表 3 得知,5 类草地除山地草甸 R/S (8.2 ~ 15.5) 变化较小外,其他各类草地 R/S 变化较大。5 类草地 R/S 的分布区域在 6 ~ 9 和 9 ~ 12(图 1),中值为 10。

由于 R/S 属于非正态分布,平均值比中值偏高,中值更适合反映祁连山北坡天然草地生物量的分配^[1]。在研究范围内,高寒草原与山地草甸的 R/S 较高,且两者差异不明显,中值分别为 9.3 和 8.7,其生物量格局把较多的干物质分配到地下,可能是低温胁迫所致,植物光合能力有限,地上部生长受到限制,通过其根部贮藏物质保证其正常生长,这也是高海拔地区植物长期适应恶劣生境的结果。这

与已有的研究结果一致^[4]。而在山地草甸草原(R/S 中值 5.1)有显著不同,因为这里的水热条件相对较好,植被类型以高株型为主,加之发育较好的暗栗钙土,生境条件有利于地上部分生长,因而分配到地下的光合产物就相对较少。但在山地草原(R/S 中值 7.0),因为水分条件没有草甸草原好,限制了地上部增长,植株较矮小,偏向于地下部生长,所以其 R/S 比草甸草原高。山地荒漠草原的 R/S 中值为 7.1,与马文红等^[3] 在内蒙古荒漠草原测定的 R/S (中值为 6.7) 基本接近,其取样深度为 30 ~ 60 cm,而本试验的取样深度较浅(0 ~ 30 cm),其原因可能与不同地区的草地植被组成和群落结构的差异有关。

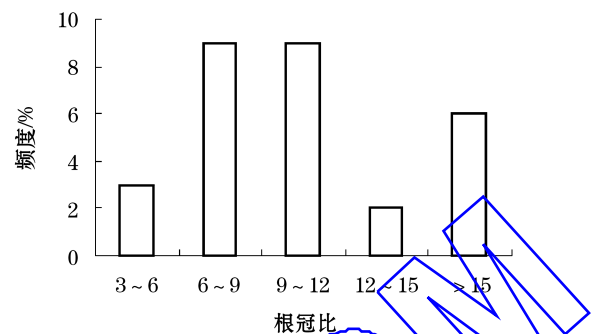


图 1 5 类天然草地根冠比的频率分布

Fig. 1 Frequency distribution of root-shoot ratios in five types of grasslands

3.2 根冠比的季节变化

从图 2 可以看出,5 类草地 R/S 的季节变化变幅较大,大致呈反抛物线型。在生长季内,各草地群落 R/S 均表现为越接近于生长的初期和末期其值越大,除山地草甸的 R/S 在 9 月下旬达最小值外,其余均出现在 8 月下旬。 F 检验表明,除山地草甸与山地草甸草原、山地草原和山地荒漠草原之间不显著外,其余各类草地之间差异显著 ($P < 0.05$)。

植物生长具有一定的节律性,在生长季始末两者同时增长和衰退,在生长中后期两者互为消长关系^[17-18]。本研究中, R/S 在生长季初期都比较大,主要因为此时牧草刚刚返青,其生物量积累较少,而地下部却是多年生长的累计值,所以 R/S 较大。但随着植物生长发育节律、气温的回升和降水量的增加,土壤温度亦随之升高,为植物的生长发育提供了有利条件,虽然地下部根系也开始加快生长,但此时地上部成为主要生长中心,其持续快速的生长,使其生成生物量占总体生物量的比例逐渐增大;同时,地上部生长消耗大量地下部贮存的营养和能量,导致

地下生物量持续减少, R/S 呈现持续减小趋势。在 5 类草地群落中, 从 5 月下旬至 8 月下旬(山地草甸在 9 月下旬) R/S 都在降低, 说明此期植物的生长偏向于地上。而到生长季末期, 牧草因受低温的影响进入枯黄期, 地上部营养和能量向地下转移进行能量储存, 从而使 R/S 又逐渐增大, 这也有利于植物

的越冬和翌年植物萌发生长。但由于各草地群落的生境条件、种类组成以及优势种植物的差异性较大, 其 R/S 的季节变化也不尽相同, 如在山地草甸草原、山地草原和山地荒漠草原, 在生殖生长完成后, 地上部分继续维持生长, 这就是 10 月下旬的 R/S 比 9 月下旬低的缘故。

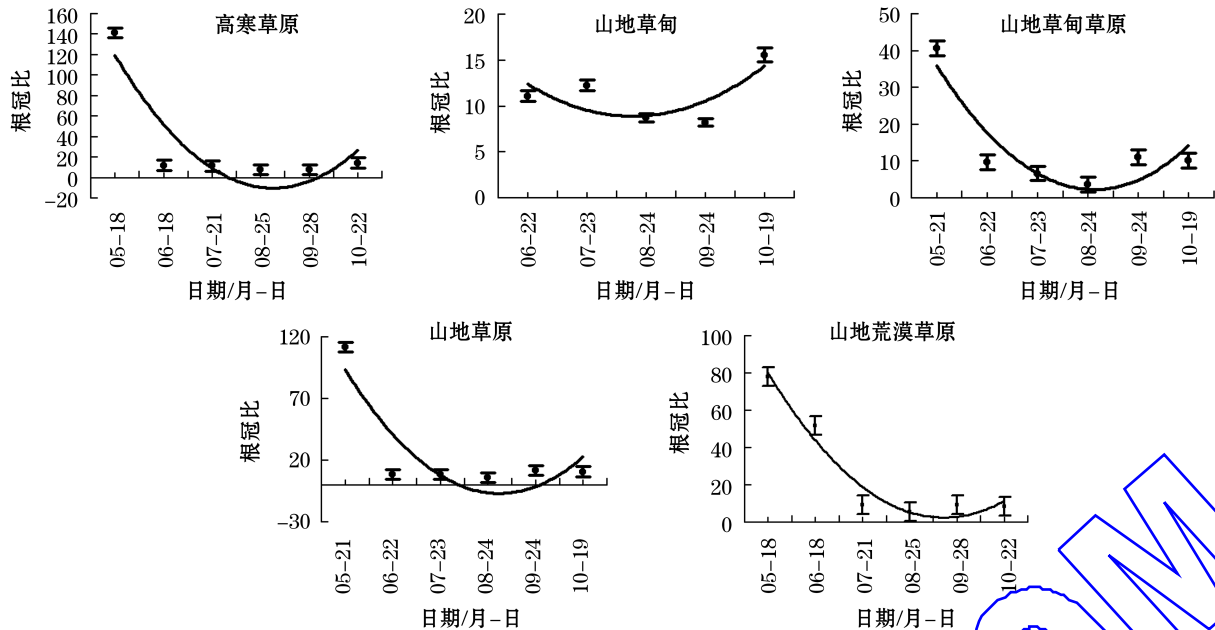


图2 5类草地生长季 R/S 的季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of root-shoot ratios of five types of grasslands in growing season

3.3 根冠比与气象因子的关系

植物在每一个生境条件下, 其生长和生物量分配均与环境因子具有一定的相关性^[4,8]。利用相关分析法分析了 R/S 与水分(降水量、土壤含水量和相对湿度)、温度(气温和土壤温度)和潜在蒸散量的关系, 发现当月的 R/S 与同期的各气象因子之间没有显著的相关关系, 考虑到草地群落生物量相对于水热条件具有一定的滞后性^[8], 采用当月的 R/S 与前期的水热条件分析, 结果发现: 高寒草原的 R/S 与上月土壤含水量 ($r = -0.929, P < 0.05$) 呈显著负相关, 而与其他气象因子的关系均不显著, 说明随着上月土壤含水量的增加, 其 R/S 显著降低, 其回归方程为: $\hat{Y} = 21.352 - 0.731X$ (式中: \hat{Y} 为根冠比, X 为上月土壤含水量); 山地草甸草原和山地草原的 R/S 与上月潜在蒸散量均呈显著负相关, 相关系数分别为 $r = -0.948, r = -0.926$, 说明两类草地的 R/S 随着上月潜在蒸散量的增加均显著降低, 其回归方程分别为 $\hat{Y} = 23.666 - 2.150X, \hat{Y} = 21.056 - 1.526X$ (式中: \hat{Y} 为根冠比, X 为上月潜在蒸散量),

其他气象因子对两类草地 R/S 的影响均不显著; 而在山地草甸和山地荒漠草原, 其 R/S 与前期各气象因子均没有显著的相关关系, 说明温度和水分不是影响山地草甸和山地荒漠草原 R/S 的主要因素。

4 结论与讨论

总体来看, 祁连山北坡 5 类天然草地生物量大小依次为: 山地草甸(地上/地下: $78.1/848.1 \text{ g/m}^2$) > 山地草原 ($42.8/464.3 \text{ g/m}^2$) > 山地草甸草原 ($46.7/430.1 \text{ g/m}^2$) > 高寒草原 ($31.7/379.9 \text{ g/m}^2$) > 山地荒漠草原 ($11.0/119.3 \text{ g/m}^2$)。与其他地区的研究相比^[3], 该区 5 类草地地上/地下生物量普遍偏低。这可能与祁连山区的干旱气候、植被的物种组成、长期的人类活动等有关。

祁连山北坡天然草地 R/S 主要分布区域在 6 ~ 9 和 9 ~ 12, 这比王妮等^[4]研究的我国北方天然草地的 R/S 偏高, 可能与祁连山北坡草地的生境条件(如高海拔、低温、干旱等)有关, 因为在胁迫的生境条件下, 植物能够分配更多的干物质到地下。在 5

类草地中,高寒草原(R/S 中值为 9.3)和山地草甸(8.7)之间、山地草原(7.0)和荒漠草原(7.1)之间的 R/S 差异不明显,而山地草甸草原(5.1)与各类草地的 R/S 有明显差异。关于荒漠草原,一般认为在干旱胁迫的生长条件下 R/S 较高^[19-20],如王妮等^[4]研究的荒漠草原的 R/S 中值为 12.6,与之相比,本试验测定的结果明显偏低,这可能与取样深度较浅(0~30 cm)有关,因此,在荒漠草原以 0~30 cm 地下根系生物量来估算的 R/S ,可能比实际值偏低。

5 类草地 R/S 的季节变化变幅较大,大致呈反抛物线型,愈接近生长季始末其值愈大, R/S 的最小值均出现在 8 月或 9 月下旬,这与耿浩林和张娜等的研究结论是一致的^[8,21]。本研究表明,植物的生长节律会主导生长季内 R/S 的变化,因为地上部生长易受水热条件的影响,其季节变化较大,而地下部往往都是多年的累计值,相对比较稳定,所以地上部生长对 R/S 的季节变化贡献要比地下部大。

R/S 可能受草地类型、生境和气候等多重因素的影响^[3],但在本研究中,祁连山北坡天然草地的 R/S 与同期各气象因子之间的关系均不显著,表明 R/S 不受同期气象因子的影响,这与 Wang 和 马文红等^[2-3]在内蒙古温带草原的研究结果相似;也有研究表明, R/S 受温度和降水影响,如 Mokany 等^[1]的研究发现,在全球尺度上,草地和灌丛的 R/S 随温度、降水的增加呈减少趋势,王妮等^[4]对我国北方天然草地研究时发现, R/S 随年降水量增加而显著降低。在本研究中,若考虑水热条件的滞后效应,结果发现高寒草原的 R/S 随着上月土壤含水量的增加而显著降低、山地草甸草原和山地草原的 R/S 随着上月潜在蒸散量的增加也呈显著降低趋势,而山地草甸和山地荒漠草原的 R/S 不受前期水热条件的影响。

植物地上部分和地下部分之间是相互依赖又相互制约、协调平衡的关系,当环境条件改变时,必然对植物地上部和地下部生长同时产生影响,并表现出一定的复杂性,所以在探讨 R/S 与环境条件的关系时,除了分析气象因子外,还应分析不同草地类型植被的组成、植物生长特性、地上/地下生物量长期动态、土壤性质、放牧等因素对 R/S 的影响。

参考文献(References):

[1] Mokany K, Raison R J, Prokushkin A S. Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes [J]. *Global Change Biology*,

2006, 12: 84 - 96.

- [2] Wang Liang, Niu Kechang, Yang Yuanhe, et al. Patterns of above- and belowground biomass allocation in China's grasslands: Evidence from individual-level observations [J]. *Science China: Life Sciences*, 2010, 53(7): 851 - 857.
- [3] 马文红, 方精云. 内蒙古温带草原的根冠比及其影响因素 [J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2006, 42(6): 774 - 778. [Ma Wenhong, Fang Jingyun. R/S ratios of temperate steppe and the environmental controls in Inner Mongolia [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2006, 42(6): 774 - 778.]
- [4] 王妮, 彭书时, 方精云. 中国北方天然草地的生物量分配及其对气候的响应 [J]. *干旱区研究*, 2008, 25(1): 90 - 97. [Wang Wei, Peng Shushi, Fang Jingyun. Biomass distribution of natural grasslands and its response to climate change in north China [J]. *Arid Zone Research*, 2008, 25(1): 90 - 97.]
- [5] 朴世龙, 方精云, 贺金生, 等. 中国草地植被生物量及其空间分布格局 [J]. *植物生态学报*, 2004, 28(4): 491 - 498. [Piao Shilong, Fang Jingyun, He Jinsheng, et al. Spatial distribution of grassland biomass in China [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(4): 491 - 498.]
- [6] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳储量 [J]. *中国科学: D 辑*, 2003, 33(1): 72 - 80. [Li Kerang, Wang Shaoqiang, Cao Mingkui. The vegetation and soil carbon storage in China [J]. *Science in China: Series D*, 2003, 33(1): 72 - 80.]
- [7] 马文红, 杨元合, 贺金生, 等. 内蒙古温带草地生物量及其与环境因子的关系 [J]. *中国科学: C 辑*, 2008, 38(1): 84 - 92. [Ma Wenhong, Yang Yuanhe, He Jinsheng, et al. Relation of temperate grassland and the environmental factor in Inner Mongolia [J]. *Science in China: Series C*, 2008, 38(1): 84 - 92.]
- [8] 耿浩林, 王玉辉, 王凤玉, 等. 恢复状态下羊草 (*Leymus chinensis*) 草原植被根冠比动态及影响因素 [J]. *生态学报*, 2008, 28(10): 4 629 - 4 634. [Geng Haolin, Wang Yuhui, Wang Fengyu, et al. The dynamics of root:shoot ratio and its environmental effective factors of recovering *Leymus chinensis* steppe vegetation in Inner Mongolia [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10): 4 629 - 4 634.]
- [9] Fan J W, Wang X, Harris W, et al. Allocation of vegetation biomass across a climate-related gradient in the grasslands of Inner Mongolia [J]. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73: 521 - 528.
- [10] Yang Y H, Fang J Y, Ma W H, et al. Large-scale pattern of biomass partitioning across China's grasslands [J]. *Global Ecology Biogeography*, 2010, 19: 268 - 277.
- [11] Yang Y H, Fang J Y, Ji C J, et al. Above- and belowground biomass allocation in Tibetan grasslands [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2009, 20(1): 177 - 184.
- [12] 胡自治, 孙吉雄, 李洋, 等. 甘肃天祝主要高山草地的生物量及光能转化率 [J]. *植物生态学报*, 1994, 18(2): 121 - 131. [Hu Zizhi, Sun Jixiong, Li Yang, et al. The characteristics of biomass and conversion efficiency of solar radiation for principal types of alpine grasslands in Tianzhu, Gansu Province [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1994, 18(2): 121 - 131.]
- [13] 沈禹颖, 阎顺国, 朱兴运, 等. 河西走廊几种盐化草地第一性生产力的研究 I. 地上生物量与地下生物量季节动态及分配 [J]. *草业学报*, 1995, 4(2): 44 - 50. [Shen Yuying, Yan Shunguo, Zhu Xingyun, et al. The primary productivity of saline pastures in Hexi Corridor I. the seasonal dynamics of above and underground biomass [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 1995, 4(2): 44 -