

# 青藏高原高寒草甸初级生产力及其主要影响因素

布仁巴音<sup>1,4</sup>, 徐广平<sup>2</sup>, 段吉闯<sup>1,4</sup>, 常小峰<sup>1,4</sup>, 张振华<sup>1,4</sup>, 汪诗平<sup>3\*</sup>

(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, 西宁 810008; 2. 广西壮族自治区 广西植物研究所, 中国科学院 广西 桂林 541006; 3. 中国科学院 青藏高原研究所, 北京 100085; 4. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 青藏高原有各类天然草地  $14 \times 10^8 \text{ hm}^2$ , 其中高寒草甸和高寒灌丛约占青藏高原天然草地面积的 50%, 占全国草地总面积的 16.2%。嵩草草甸是高寒草甸的主体, 包括矮嵩草草甸、金露梅灌丛草甸、藏嵩草草甸、小嵩草草甸和高山嵩草草甸等, 这 5 类高寒草甸平均地上生物量分别为 354.2、422.4、445.1、227.3 和 368.5  $\text{g/m}^2$ , 地下生物量分别为 3 389.6、3 548.3、11 922.7、4 439.3 和 5 604.8  $\text{g/m}^2$ , 地下与地上生物量的比例分别为 10.55、10.15、27.82、14.82 和 15.21, 远大于 IPCC(2006) 报告中地下/地上生物量比例的默认值 ( $2.8 \pm 95\%$ )。地下生物量对气候变化和放牧的反应比地上生物量更敏感, 干旱和重度放牧均降低了地下/地上生物量的比例。在极度退化状态下地下/地上生物量的比例  $< 2$ 。对于轻度和中度退化的高寒草甸应以围封禁牧为主要恢复措施, 但如果结合补播和施肥, 则恢复速率会加快; 对于重度和极度退化的高寒草甸, 由于草地植物群落中优良牧草的比例极低, 仅靠自然恢复很难进行恢复或需要的年限很长, 所以必须采用人工重建的措施, 并结合毒杂草防除和施肥等措施进行恢复, 通过建立人工或半人工草地的措施予以重建。

**关键词:** 高寒草甸; 初级生产力; 放牧; 气候变化; 退化草甸恢复

**中图分类号:** Q948 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2010)06-0760-10

## \* Primary productivity and its main affecting factors of Alpine meadows on the Tibetan plateau

Burenbayin<sup>1,4</sup>, XU Guang-Ping<sup>2</sup>, DUAN Ji-Chuang<sup>1,4</sup>,  
CHANG Xiao-Feng<sup>1,4</sup>, ZHANG Zhen-Hua<sup>1,4</sup>, WANG Shi-Ping<sup>3\*</sup>

(1. Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Haibei Alpine Meadow Ecosystem Research Station, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; 2. Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and the Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, China; 3. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 4. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Alpine meadows and shrublands are approximately  $7 \times 10^8 \text{ hm}^2$  which is about 50% of the natural grasslands on the Tibetan plateau and accounts for about 16.2% of the total grassland area in China. Alpine meadow is dominated by *Kobresia* meadow, including *K. humilis* meadow, *Potentilla fruticosa* shrub meadow, *Kobresia tibetica* meadow, *K. parva* meadow and *K. pygmaea* meadow. The average aboveground biomass of the five meadows was 354.2, 422.4, 445.1, 227.3 and 368.5  $\text{g/m}^2$ , respectively, while the belowground biomass of 0–40 or 0–50 cm soil depth was 3 389.6, 3 548.3, 11 922.7, 4 439.3 and 5 604.8  $\text{g/m}^2$ , respectively. Their ratios of belowground and aboveground biomass were 10.55, 10.15, 27.82, 14.82 and 15.21 respectively, which were much higher than that of the default value ( $2.8 \pm 95\%$ ) recommended by IPCC(2006). The belowground biomass or belowground net primary productivity was more sensitive to the climate change and heavy grazing than above-grassland biomass did. Drought and heavy grazing decreased the ratio of

\* 收稿日期: 2010-10-12 修回日期: 2010-11-10

基金项目: 国家“973”项目(2010CB833502); 国家自然科学基金(30871824)[Supported by the National Basic Research Program(2010CB833502); the National Natural Science Foundation of China(30871824)]

作者简介: 布仁巴音(1984-), 男(蒙古族), 硕士研究生, 主要从事全球变化与草地生态学研究, (E-mail) burenbayin@163.com.

\* 通讯作者(Author for correspondence): 汪诗平(1964-), 男, 博士, 博士生导师, 研究员, (E-mail) wangship2008@yahoo.cn.

belowground to aboveground biomass, even its value was less than 2 under extreme degradation conditions. Natural restoration is possible for light or moderate degraded alpine meadow for 3–8 years. However, it should be re-constructed for heavy or extreme degraded alpine meadow due to soil quality decrease and poison plant species and weeds invasion.

**Key words:** alpine meadow; primary productivity; grazing; climate change; restoration of degraded alpine meadow

草地是陆地植被重要组成部分,是世界上分布最广的植被类型之一,几乎覆盖 25% 的陆地面积 (Ojima, 1993; Fang 等, 2001)。净初级生产力约占全球陆地植被净初级生产力的 1/3, 活生物量的碳贮量占全球陆地植被碳贮量的 1/6 以上, 在只考虑活生物量及土壤有机质的情况下, 草地碳贮量约占陆地植被总碳贮量的 25% (De Fries 等, 1999; Mooney 等, 2001)。草地碳库的研究认为天然草地生态系统可能已组成每年约 0.5 Pg 的碳汇 (Scurlock 等, 1998)。由此可见, 草地在区域气候变化和全球碳循环中扮演着重要的角色, 草地作为陆地植被巨大的碳库, 在减少与固定 CO<sub>2</sub> 过程中具有重要的功能。中国天然草地面积约为 4 × 10<sup>8</sup> hm<sup>2</sup>, 是我国面积最大的陆地植被, 估计我国天然草地每年的固碳量为 1~2 t/hm<sup>2</sup>, 年总固碳量约为 6 × 10<sup>8</sup> t, 为全国年碳排放量的 1/2 (Ni, 2002)。所以, 中国草地生态系统应成为我国甚至全球陆地植被固碳的重要途径之一。

青藏高原作为独立的地理单元在全球变化中起着特殊作用, 其生态系统对气候变化异常敏感, 其生态系统对区域和全球变化的响应具有极为重要的地位。虽然在各个方面都已经开展了一些研究, 但是与青藏高原的国际地位及对我国生态安全的重要性相比, 还刚刚开始。和极地 (南极和北极) 生态系统不同的是, 青藏高原高寒草地生态系统还受到人类活动的深刻影响, 以过度放牧为主导因子的植被退化是青藏高原面临的主要问题之一。因此, 研究气候变化和放牧对青藏高原高寒草地生态系统的影响已成为国内外关注的学术热点。青藏高原有各类天然草地 14 × 10<sup>8</sup> hm<sup>2</sup>, 其中高寒草甸和高寒灌丛约占青藏高原天然草地面积的 50%, 占全国草地总面积的 16.2%。青南高原、藏北高原、川西高原、甘南高原和羌塘高原共同构成巨大的青藏高原主体 (表 1), 而嵩草草甸是高寒草甸的主体, 包括矮嵩草草甸、藏嵩草草甸、小嵩草草甸、高山嵩草草甸、金露梅灌丛草甸等 (周兴民, 2001)。自 20 世纪 60 年代以来, 我国许多学者对高寒草甸生物量或净初级生产力进行了大量研究, 但多数是对地上生物量进行监测, 对地下生物量以及对地上地下生物量分配及其主要影响因素

的研究相对较少。然而, 对于高寒草甸生态系统, 90% 以上的生物量和碳储量分布在地下, 地上与地下生物量的比值远大于 IPCC (2006) 的估测值 (2.8 ± 95%) (周兴民, 2001; 赵新全, 2009), 表明高寒草甸生态系统的碳循环过程可能与其它生态系统有所不同。因此, 为了深入理解青藏高原在全球变化中的作用及其主要影响因素, 有必要回答以下问题: (1) 地上、地下生物量及其主要影响因素? (2) 地上与地下生物量分配模式及其主要影响因素? (3) 退化高寒草甸生态系统的主要恢复措施及其效果? 本文正是基于上述目的, 从而对相关研究进行系统的总结。

## 1 主要高寒草甸类型初级生产力

### 1.1 地上生物量

根据中国科学院海北高寒草甸生态系统定位研究站 14 年长期定位监测资料表明, 矮嵩草草甸地上净初级生产力年际变化较大, 平均值为 342.0 ± 51.9 g/m<sup>2</sup> (变动范围 260.4~430 g/m<sup>2</sup>) (王启基等, 1998)。年地上净初级生产力主要与气温年较差、4 月份降水量、5 月份平均气温、年降水量呈正相关, 而与 1 月份平均气温呈负相关 (王启基等, 1997)。而李英年等 (1995) 发现矮嵩草高寒草甸地上生物量与当年 1 月份的平均气温、4 月份土壤 20 cm 的平均温度和 4 月份的降水量密切相关。周立等 (1995a) 研究表明, 在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位研究站地区, 年降水量与年地上净初级生产力都存在 3~4 年的平均波动周期, 且多数年份两者变化方向是一致的, 说明年降水量是决定年地上净初级生产力大小的主要驱动力, 但两者变化不完全一致, 又表明地上净初级生产力是与其它环境和生物因子共同作用的结果, 特别是年气温变化周期平均为 3 年 (周立等, 1995b)。根据青海省 35 个县的草地资源调查资料, 在更大的空间尺度上, 嵩草草甸地上净初级生产力与年降水量和年均温关系显著, 逐步回归的数学模型为:  $W = 8.0580T + 0.3967P + 16.8364$  ( $P < 0.01$ ), 其中 T 为年均温, P 为年降水量 (王启基等, 1997)。因此, 高寒草甸的地上生物量存在很大的时空异质性, 根据表 2

中王启基等(1998)、周华坤等(2005)和杨时海等(2006)等研究结果,得出不退化或轻度退化状况下青藏高原主要草甸类型矮嵩草草甸、高寒灌丛草甸、藏嵩草沼泽化草甸、小嵩草草甸和高山嵩草草原化草甸的地上生物量平均值分别为 354.2、422.4、445.1、227.3 和 368.5 g/m<sup>2</sup>。

表 1 高寒草甸的面积及其分布(中国草地资源,1996)  
Table 1 The area of the alpine meadows and its distribution

省区 Province	总面积 (hm <sup>2</sup> ) Total area		可利用面积 (hm <sup>2</sup> ) Available area	
	数量	%	数量	%
青海 Qinghai	23208960	38.99	21070587	38.26
西藏 Tibet	25341714	42.57	24171816	43.89
四川 Sichuan	9747057	16.37	8658466	15.72
甘肃 Gansu	1226847	2.06	1175202	2.13
合计 Total	59524578	100.00	55076071	100.00

## 1.2 地下生物量和净初级生产力

地下生物量随不同季节而变化,一般在 8 月底或 9 月初最大。不同嵩草草甸其地下生物量差异较大,其中矮嵩草草甸、高山嵩草草原化草甸、藏嵩草沼泽化草甸和高寒灌丛草甸 0~50 cm(或 40 cm)地下生物量分别为 2 123~2 428、5 605、11 183 和 2 758~4 509 g/m<sup>2</sup>(表 2)。在总地下生物量中,0~10 cm 地下生物量占 0~40 cm 地下生物量的 85%~95%,95% 的根系分布在 0~20 cm 土壤中,这是高寒草地植物适应寒冷的一种生物学适应(王启基等,1988;周华坤等,2005;刘伟等,2005),远高于温带典型草原(0~10 cm 根系只有 0~50 cm 的 50%)(汪诗平等,2003)。依据表 2 和表 3 数据,在不退化或轻度退化状况下,矮嵩草草甸、高寒灌丛草甸、藏嵩草沼泽化草甸、小嵩草草甸和高山嵩草草原化草甸 0~50 cm(或 0~40 cm)平均地下生物量分别为:3 389.6、3 548.3、11 922.7、4 439.3、5604.8 g/m<sup>2</sup>。

王启基等(1988)研究表明,矮嵩草草甸 0~50 cm 的地下净初级生产力年际变化也较大,如 1980、1981 和 1982 年矮嵩草草甸地下年净初级生产力分别为 654.0、948.0 和 386.2 g/m<sup>2</sup>,3 年平均值为 662.7 g/m<sup>2</sup>,而李英年等(2004)发现矮嵩草草甸 0~40 cm 的地下净生产量为 1 075.2 g/m<sup>2</sup>。周华坤等(2002a)和李英年等(2004)研究表明,金露梅灌丛草甸 0~40 cm 的年地下净生产量分别为 1206.4 和 1294.0 g/m<sup>2</sup>。王启基等(1988,1998)认为地下净初级生产力主要与生长季的降水量和月平均气温的关系较大,其回归方程为:  $W = -1872.8019 + 0.0051P + 356.4736T$ ,其中

$P$  为生长季的降水量, $T$  为生长季月平均气温。

## 1.3 地上地下生物量的比例

依据表 2,表 3 的数据,得出在不退化或轻度退化状况下,青藏高原矮嵩草草甸、高寒灌丛草甸、小嵩草草甸、藏嵩草沼泽化草甸和高山嵩草草原化草甸的地下/地上生物量的比值分别为:10.55、10.15、27.82、14.82 和 15.21,远大于 IPCC(2006)报告中地下/地上生物量比例的默认值(2.8±95%),也大于朴世龙等(2004)的研究结果。这可能与地下生物量或净初级生产力对气候等的干扰反应比地上生物量更敏感,如王启基等(1998)发现 1980、1981 和 1982 年的年降水量分别为 529.3、500 和 455.7 mm,矮嵩草草甸地上生物量分别为 296.6、296.8 和 260.4 g/m<sup>2</sup>,但地下/地上净初级生产力的比分别为 2.20、3.19 和 1.48,因此,干旱降低了地下/地上净初级生产力的比例。

## 1.4 凋落物生物量和根系周转率

矮嵩草草甸、高山嵩草草甸和藏嵩草沼泽化草甸生长季结束时地上生物量分别为 418.5、368.4 和 518.5 g/m<sup>2</sup>,其凋落物分别约为 55.1、35.4 和 94.1 g/m<sup>2</sup>,分别占地上生物量的 6.89%、8.67% 和 18.09%(王启基等,1995a,b,c,d,1997,1998)。李海英等(2004)研究表明,随着退化程度的增加,高寒矮嵩草草甸生长季的立枯生物量显著降低,到生长季结束时未退化、轻度退化和重度退化的草场立枯量分别为 90、40 和 5 g/m<sup>2</sup>。周华坤等(2002a)研究发现,对于金露梅高寒灌丛草甸而言,死根与活根生物量的比例随着生长季节的后移而降低,到 9 月底地下生物量达到最大值时,总生物量中约有 25% 为死根,0~50 cm 根系周转值随着土壤深度的增加有增加的趋势,平均为 35.72%。

## 2 放牧和鼠害对高寒草甸初级生产力的影响

随着人口的增加和草地畜牧业的发展,人类活动特别是过度放牧正在以前所未有的规模和强度影响并改变着青藏高原的生态环境,加之鼠虫害和气候变化的影响,使得高寒草地严重退化,据不完全统计,目前青藏高原约有  $5 \times 10^8$  hm<sup>2</sup> 的草地处于不同程度的退化状态,约占青藏高原草地总面积的 1/3,其中严重退化的次生裸地—“黑土滩”面积约为  $703.2 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>,约占退化草地面积的 16.5%(马玉

表 2 主要高寒草甸地上、地下生物量及其分配  
Table 2 The distribution of the aboveground and underground biomass of main alpine meadows

地理位置 Position	海拔 Altitude (m)	草地类型 Type	地上生物量 Above- ground biomass (g/m <sup>2</sup> )	地下生 物量 (g/m <sup>2</sup> )	层次(cm) Under- ground biomass /level	地下/ 地上 Under- ground/ Above- ground	利用方式 Use way	来源 Source
101°12'~101°23' E, 37°29'~37°45' N	3 200	藏嵩草沼 泽化草甸	518.5	0~50	11183.2	21.57	冬季放牧	王启基等(1995a)
				0~10	5089.5			
				10~20	2952.4			
				20~30	2594.5			
				30~50	546.8			
101°12'~101°23' E, 37°29'~37°45' N	3 200	矮嵩草草甸	321.2	0~50	2428.3	7.56	冬季放牧	王启基等(2004)
				0~10	2048.3			
				10~20	189.4			
				20~30	100.0			
				30~50	88.1			
101°12'~101°23' E, 37°29'~37°45' N	3 200	矮嵩草草甸	418.5	0~50	2578.0	6.16	冬季放牧	史慧兰等(2005a,b)
				0~10	2073.2			
				10~20	226.9			
				20~30	180.5			
				30~50	97.4			
101°12'~101°23' E 37°29'~37°45' N	3 200	矮嵩草草甸	376.1	0~30	3185.6	8.63	冬季放牧	王长庭等(2003)
101°12'~101°23' E, 37°29'~37°45' N	3 250	矮嵩草草甸	348.3	0~40	2122.8	6.09	冬季放牧	李英年等(2004)
101°12'~101°23' E, 37°29'~37°45' N	3 400	高寒灌丛	375.1	0~50	3377.6	9.01	冬季放牧	周华坤等(2002a)
				0~10	2881.0			
				10~20	329.2			
				20~30	124.0			
				30~50	43.5			
101°12'~101°23' E, 37°29'~37°45' N	3 400	高寒灌丛草甸	269.3	0~40	2758.2	10.24	冬季放牧	李英年等(2004)
101°12'~101°23' E, 37°29'~37°45' N	3 400	高寒灌丛草甸	402.8	0~40	4509.2	11.19	冬季放牧	李英年等(2006)
101°12'~101°23' E, 37°29'~37°45' N	3 600	高山嵩草 草原化草甸	368.5	0~50	5604.8	15.21	冬季放牧	王启基等(2004)
				0~10	5068.4			
				10~20	418.7			
				20~30	91.4			
				30~50	24.1			
98°48'~100°55' E, 33°43'~35°16' N	3 840	藏嵩草沼 泽化草甸	371.6	0~30	12662.2	34.07		王长庭等(2004)
				0~10	8394.2			
				10~20	2508.4			
				20~30	1759.6			
				30~50	24.1			
98°48'~100°55' E, 33°43'~35°16' N	3 856	异针茅群落	335.1	0~30	3429.0	10.23	冬季放牧	王长庭等(2004)
				0~10	2845.3			
				10~20	358.7			
				20~30	225.0			
				30~50	24.1			
98°48'~100°55' E, 33°43'~35°16' N	3 927	小嵩草草甸	288.1	0~30	4013.3	13.93	冬季放牧	王长庭等(2004)
				0~10	3446.2			
				10~20	337.3			
				20~30	229.8			
				30~50	24.1			
98°48'~100°55' E, 33°43'~35°16' N	3 988	小嵩草草甸	220.6	0~30	3466.3	15.71	冬季放牧	王长庭等(2004)
				0~10	2896.9			
				10~20	469.8			
				20~30	99.6			
				30~50	24.1			

表 3 不同退化程度或放牧强度下高寒草甸地上、地下生物量及其比例  
Table 3 The proportion of the aboveground and underground biomass of different degraded or different grazing intensity alpine meadows

地理位置 Position	海拔 Altitude (m)	草地类型 Type	地上生物量 Above- ground biomass (g/m <sup>2</sup> )	地下生 物量 (g/m <sup>2</sup> )	层次(cm) Under- ground biomass /level	地下/地上 Under- ground/ Above- ground	利用方式 Use way	来源 Source
100°26'~43' E 34°17'~25' N	4 120	矮嵩草草甸	371.7	0~40	4811.4	12.94	未退化	周华坤等 (2005)
			460.0	0~40	4621.0	10.05	轻度退化	
			393.2	0~40	3761.4	9.57	中度退化	
			311.0	0~40	1815.6	5.84	重度退化	
101°12'~33' E 37°29'~45' N	3 900	矮嵩草草甸	282.7	0~40	533.7	1.89	极度退化	刘伟等 (2005)
			215.6	0~40	2778.6	12.89	未退化	
			196.6	0~40	2168.3	11.03	轻度退化	
			155.5	0~40	970.4	6.24	中度退化	
99°47' E 33°37' N	4 000	小嵩草草甸 (1998 和 1999 年)	141.4	0~40	307.2	2.17	重度退化	董全民等 (2005)
				0~30	5009.6		不放牧	
				0~30	4754.7		轻牧	
				0~30	3830.8		中牧	
				0~30	3506.8		重牧	
				0~30	4948.8		不放牧	
				0~30	4481.6		轻牧	
				0~30	3296.0		中牧	
99°54' E 33°10' N	4 160	小嵩草草甸	163.5	0~50	4296.8	26.28	轻牧	石德军等 (2006)
			122.4	0~50	4823.8	39.41	中牧	
			87.8	0~50	2498.7	28.46	重牧	
			123.6	0~50	1756.6	14.21	极牧	
101°21' E 38°20' N	3 600	线叶嵩草草甸	83.5	0~40	2294.7	27.48	冬季放牧	王小利等 (2006)
				0~10	1413.8		(重度退化)	
				10~20	442.1			
				20~30	242.8			
				30~40	196.0			
98°48'~100°55' E 33°43'~35°16' N	4 232	小嵩草草甸	173.2	0~30	4555.1	26.30	夏季放牧	王长庭等 (2004)
				0~10	3896.0			
				10~20	472.0			
				20~30	187.1			
98°48'~100°55' E 33°43'~35°16' N	4 435	线叶嵩草草甸	132.2	0~10	4625.3	34.99	夏季放牧	王长庭等 (2004)

寿等,1999)。平均产草量下降了 20%~50%,退化的原因除了超载过牧以外,鼠害也是一个重要的因素,据调查青藏高原鼠害发生面积约 2 000 万 hm<sup>2</sup>,鼠类每年消耗新鲜牧草约 150 亿 kg,相当于 1 000 万羊单位(周兴民等,1995)。

### 2.1 放牧影响与调控

王启基等(1995d)通过 3 年不同放牧强度试验的研究发现,在高寒矮嵩草草甸冬春牧场上(11 月 1 日~次年 5 月 31 日),与对照(不放牧)相比(地上和 0~50 cm 地下生物量分别为 430 和 950 g/m<sup>2</sup>),重度和极度放牧降低了地上、地下生物量的 8% 和 25% 左右,表明重度和极度放牧对地下生物量的影响大于对地上生物量的影响;而轻度或适度放牧地

上、地下生物量变化不大,甚至适度放牧反而提高了地下生物量 5%;总体上,重度和极度放牧降低了地下与地上生物量的比值。而周华坤等(2004)通过对金露梅灌丛草甸夏秋草场连续 18 年的放牧试验研究表明,随着放牧强度的增大,地上生物量随着显著降低,不放牧条件下高寒金露梅灌丛地上生物量为 642.2 g/m<sup>2</sup>,而轻度放牧地上生物量为 741.8 g/m<sup>2</sup>,中度放牧 467.8~503.8 g/m<sup>2</sup>,重度放牧 370.2~383.1 g/m<sup>2</sup>。李海英等(2004)研究也发现,与未退化的嵩草草甸相比(地上生物量为 460 g/m<sup>2</sup>),轻度退化和重度退化的草场地上生物量分别下降到 250、180 g/m<sup>2</sup>。与 20 世纪 60 年代相比,小嵩草草甸平均产草量下降了 30%,大面积草场严重退化(马

表 4 不同退化程度高寒草甸植物类群地上生物量的相对比例(%)变化  
Table 4 The relative proportion of aboveground biomass of different degraded alpine meadows

退化程度 Degradation degree	莎草 Sedges	禾草 Grasses	杂类草 Forbs	金露梅灌丛 Potentilla fruticosa shrub	立枯凋落物 Litter	来源 Source
不放牧	18.0	30.2	20.3	18.5	13.14	韩发等
轻度放牧	18.8	28.3	22.3	19.5	11.15	(1993)
中度放牧	17.6	16.2	38.8	18.9	8.43	
重度放牧	14.7	9.9	53.0	16.9	5.57	
不放牧	7.5	52.1	17.3	24.6	28.6	周华坤等
轻度放牧	7.7	40.0	9.4	42.8	22.6	(2004)
中度放牧 1	8.3	25.7	19.2	46.7	31.0	
中度放牧 2	9.4	17.0	40.4	33.3	23.0	
重度放牧 1	4.6	19.3	35.1	41.1	19.0	
重度放牧 2	1.9	15.3	63.8	19.1	11.9	
轻度退化	72.4	17.5	10.1	/	/	刘伟等
中度退化	43.0	27.4	29.6	/	/	(2005)
重度退化	25.3	6.4	68.3	/	/	
极度退化	0.3	1.9	97.8	/	/	

表 5 不同退化程度高寒草甸植物类群地下生物量的相对比例(%)及其地下/地上的比例(括号中的值)变化

Table 5 The relative proportion of underground biomass of different degraded alpine meadows

退化程度 Degradation degree	莎草 Sedges	禾草 Grasses	杂类草 Forbs	来源 Source
未退化	85.5	12.6	1.9	周华坤等
轻度退化	82.3	14.2	3.0	(2005)
中度退化	78.1	13.4	8.5	
重度退化	49.9	18.8	31.4	
极度退化	2.7	9.4	87.9	
轻度退化	82.9(14.76)	14.2(10.46)	3.0(3.73)	刘伟等
中度退化	78.1(31.16)	13.4(8.38)	8.5(4.90)	(2005)
重度退化	57.4(14.84)	6.5(6.67)	36.1(3.46)	
极度退化	2.7(9.43)	9.5(5.87)	87.8(1.07)	

玉寿等,1999)。

因此,随着高寒草甸退化程度的加剧,地上、地下生物量均呈现显著的下降趋势,而且地下生物量下降的速率更大,如与未退化或轻度退化的草场相比,中度退化、重度退化和极度退化的草场地下生物量下降了 1.33、2.86 和 9.05 倍,从而导致地下/地上生物量的比值随放牧强度的增大而迅速下降(表 3)。地上总生物量随放牧强度的增加其下降幅度相对较小,主要表现在植物种类组成的变化上,如嵩草和禾草的比例在轻度退化下变化不大甚至禾草的比例还有所增加,但随着退化程度的增大,优良牧草的比例大幅下降,毒杂草的比例大幅增加(表 4,表 5)(周华坤等,2004,2005;刘伟等,2005;石德军等,2006)。由于杂类草的地下/地上生物量的比例只有禾草和莎草的 1/3~1/5,而且这种变化随着退化程

度的增加而增大(刘伟等,2005)(表 6)。因此,这是导致退化草甸地下/地上生物量比例降低的主要原因。

## 2.2 鼠害影响与调控

高原鼠兔和高原鼯鼠是高寒草甸地区危害草场的主要鼠种。鼠害是破坏青藏高原草地生态系统的主要生物灾害之一,是草地生态环境恶化的反映。在鼠害严重的地区,地上生物量为 37.5~152.5 kg/hm<sup>2</sup>(魏学红等,2006)。1998 年底,仅西藏、四川、青海和甘肃 4 省区不完全统计,鼠害面积达 1.53×10<sup>7</sup> hm<sup>2</sup>,占青藏高原草地可利用面积的 13%,损失牧草约 1.32×10<sup>10</sup> kg,相当于 748 万只绵羊的年采食量(魏学红等,2006)。

鼠害的程度随放牧率增大和草场退化程度的加重而增大(刘季科等,1991;刘伟等,2003)。随着草场退化程度的加剧,高原鼠兔的种群密度和有效洞口数显著增加,此外,高原鼠兔除了大量啃食牧草与放牧家畜争夺食物资源外,其对草场的破坏作用主要表现在挖掘活动而破坏了土壤结构,从而减少了草场的可利用面积。研究表明,随着草场退化加重,高原鼠兔挖掘洞道以及形成的土地秃斑(次生裸地)的数量显著上升,在严重退化的草场上,形成的秃斑面积高达总草场面积的 22.9%(刘伟等,2003)。因此,重度放牧导致了草场的重度甚至极度退化,为高原鼠兔和高原鼯鼠创造了适宜的生活条件,同时鼠害更加重了草场的退化,最终形成“黑土滩”(刘季科等,1991)。

围栏封育、补播、建立人工草地等措施可以有效的防除高原鼠兔,如人工草地的防除率达 95%,半人工草地的防除率也达 65%(董世魁等,2002;马玉寿

等,2002;李青云等,2004;刘文辉等,2007;潘正武等,2007)。景增春等(1995)通过6年的研究发现,在开垦撂荒后退化严重鼠害猖獗的高寒草甸区采取补播和鼠害控制等综合治理后(机械灭鼠、补播围栏、控制放牧等),与对照相比(平均地上生物量 $180.8\text{ g/m}^2$ ),地上生物量连续6年平均值达到 $369.2\text{ g/m}^2$ ,提高了2倍,主要是群落中禾草比例大幅度提高,综合治理后群落中禾草比例达到 $40\%\sim 60\%$ ,而对照区为 $10\%\sim 15\%$ ;同时,鼠害大大降低。6年间,示范牧户累计增加牧草产量 $2\ 882\text{ t}$ ,实际投入产出比 $1:8$ 。

### 2.3 退化生态系统恢复措施

2.3.1 围栏封育 高寒退化草场通过围栏封育往往使植被层的高度、盖度和地上生物量都得到显著的增加,从而改变了小型哺乳动物特别是高原鼠兔的栖息地生境条件,使退化生态系统得到有效改善,因其成本低、易操作,因而是高寒退化草地改良和鼠害生态治理的重要措施之一(边疆晖等,1994;沈景林等,1999;刘伟等,1999,2003;周华坤等,2002b)。马玉寿等(2003)对不同退化程度的高寒草甸封育结果表明,对于未退化的草甸而言,围封3年,地上总生物量变化不大,但禾草的比例逐渐增加,莎草科植物的比例有所下降;对于轻度退化的草甸,恢复3年后地上总生物量基本上达到了未退化草甸的水平,且毒杂草比例显著下降;而中度退化的草地封育3年后地上生物量基本达到轻度退化的水平,但与未退化的相比,仍然低 $40\%$ ;对于重度退化的草甸,尽管封育3年地上生物量也增加了 $68\%$ ,但只有未退化草甸的 $40\%$ ,且毒杂草比例高达 $80\%$ ;3年封育对“黑土滩”型退化草甸几乎没有太大的影响,地上生物量只有未退化草甸的 $25\%$ 。周兴民等(1986)研究也发现,对于中度退化的矮嵩草草甸,经过3年多夏季的围栏封育,围封后的第一、第二和第三年地上生物量分别为 $252.1$ 、 $297.9$ 和 $364.1\text{ g/m}^2$ ,与第一年相比,第二年和第三年地上生物量增加了 $18.1\%$ 和 $44.4\%$ ;同时,禾草的比例也由第一年的 $34.3\%$ 提高到第三年的 $60.2\%$ ,而杂类草则由原来的 $47.5\%$ 下降到第三年的 $21.9\%$ 。而周华坤等(2004)围栏封育研究表明,对于重度退化的金露梅灌丛草甸进行封育,虽然可以显著提高金露梅、禾草和莎草在群落中的比例以及群落的地上生物量,但与对照相比( $71.9\text{ g/m}^2$ ),封育5年后地上生物量仅提高了 $36.3\%$ ,说明对于重度退化的草场,仅仅围栏封育是很难达到快速恢复的目的;同时还认为

对于轻牧的高寒金露梅灌丛草甸不宜进行封育,相反要进行适当的利用以提高草场优良牧草的比例。

一般地,在青藏高原,冬春草场和夏秋草场的面积和产草量相当,但由于家畜在冬春草地上放牧的时间(11月~次年5月)几乎是夏秋草场的2倍,所以普遍的是冬春草场过牧,草地退化严重。所以围栏草地大部分建在冬春草地上。若对围栏草地只围不建,不进行草地改良,则干草产量不超过 $450\text{ kg/hm}^2$ ,若对围栏草地进行一定的改良和管理,如划破草皮、分区轮牧、部分封育、补播、除杂、施肥、灭鼠等,则干草产量可达 $3\ 000\text{ kg/hm}^2$ (陈全功,1996;2007;施建军等,2007;周华坤等,2007)。

2.3.2 施肥和补播 草地施肥是改良退化草地的重要措施,施肥不但提高牧草产量,而且有效的改善牧草品质。高寒草甸地区由于气温低,土壤微生物活性微弱,土壤潜在肥力高,但速效养分供应不足,因此施肥的效果非常明显。王启基等(1995b)通过对严重退化的矮嵩草草甸的恢复研究发现,松耙(圆盘耙切割 $2\sim 5\text{ cm}$ 深)、补播(垂穗披碱草、老芒麦和冷地早熟禾按不同比例混合)和施肥(尿素和二胺各 $75$ 、 $37.5\text{ kg/hm}^2$ )可以有效的快速恢复该退化草甸,与对照( $237.9\text{ g/m}^2$ )相比,施肥和松耙+补播+施肥处理分别提高了地上生物量 $23.7\%$ 和 $71.6\%$ ,但对地下生物量影响不大(3种处理 $0\sim 30\text{ cm}$ 地下生物量分别为 $773.2$ 、 $815.4$ 和 $713.6\text{ g/m}^2$ ,且 $86\%\sim 90\%$ 均分布在 $0\sim 10\text{ cm}$ ),从而降低了地下/地上生物量的比值(上述3种处理地下/地上比值分别为 $3.25$ 、 $2.78$ 和 $1.88$ )。这些措施主要促进了群落中禾本科植物的比例,抑制了杂类草的生长发育,不仅改变了草地植物群落的组成成分,提高了牧草品质和使用价值,而且达到了生物防除毒杂草的目的。另外还发现,对于严重退化的高寒草甸,仅仅围栏封育效果非常有限。通过对生态经济效益分析表明,松耙+补播+施肥处理虽然能更大的提高地上生物量,但投入也大,所以投入产出比仍然比仅仅施肥处理的低,如前者每投入1元可增产牧草干物质 $20.5\text{ kg}$ ,产出 $4.1$ 元(当时价格),而后者分别为 $33.2\text{ kg}$ 和 $6.6$ 元(王启基等,1995c)。

张松林等(1986)发现,对于严重退化的矮嵩草草甸,6月份施肥可以显著提高地上生物量 $30\%\sim 60\%$ ;与对照相比( $280.7\text{ g/m}^2$ ),施 $75\text{ kg/hm}^2$ 尿素可以增产 $80\%$ 左右,地上生物量达到 $555\text{ g/m}^2$ 。纪亚君(2006)研究发现,通过对“黑土滩”型退化小

嵩草草甸的施肥试验表明(8种施尿素处理: 0, 37.5, 75, 112.5, 150, 187.5, 225 和 262.5 kg/hm<sup>2</sup>), 在综合考虑总生物量和禾草生物量对施肥反应的基础上, 认为最佳施肥量为 150 kg/hm<sup>2</sup>, 2 年平均结果可分别增加地上总生物量和禾草生物量 2 883 和 1 770 kg/hm<sup>2</sup>。马涛等(2007)发现, 在冬春高寒草甸(线叶嵩草等)草场上连续 7 年仅仅施氮肥时, 导致了物种丰富度显著下降, 但大大提高了禾草群落中的比例, 在施氮肥 30 g (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>/m<sup>2</sup> 时地上生物量显著提高, 是对照处理(338.5 g/m<sup>2</sup>)的 1.23 倍。在重度退化草甸上采用施肥、补播垂穗披碱草和施肥+补播 3 种措施, 结果表明, 对照处理地上生物量只有 52 g/m<sup>2</sup>(优良牧草比例只有 11%), 而施肥、补播以及施肥+补播使地上生物量分别达到 153.2、340.4、472.8 g/m<sup>2</sup>, 优良牧草分别达到 42%、59%、68%(马玉寿等, 2002)。施氮肥时间以 7 月上旬为宜, 施肥量以 150~300 kg 尿素/hm<sup>2</sup> 为宜, 与对照(平均值 306.9 g/m<sup>2</sup>)相比, 该施肥处理可将退化的小嵩草草甸地上生物量提高 499.5~522.7 g/m<sup>2</sup>, 提高了 62.8%~70.3%(马玉寿等, 2003)。

对于轻度和中度退化的高寒草甸应以围封禁牧为主要措施, 轻度退化草场一般封育 2~3 年即可恢复到初始状态, 而中度退化草场则需要 5~8 年时间, 但如果结合补播和施肥, 则恢复速率会加快(周兴民等, 1986; 王启基等, 1995, 2004; 马玉寿等, 2002, 2003; 张耀生等, 1998, 2003; 周华坤等, 2003)。对于重度和极度退化的高寒草甸, 由于草地植物群落中优良牧草的比例极低, 仅靠自然恢复很难进行恢复或需要的年限很长, 所以必须采用人工重建的措施, 并结合毒杂草防除和施肥等措施进行恢复, 通过建立人工或半人工草地的措施予以重建。通过 2 年的毒杂草防除试验表明, 可以有效提高地上生物量和优良牧草的比例, 与对照相比, 优良牧草地上生物量从 94.8 g/m<sup>2</sup> 增加到 223.4 g/m<sup>2</sup>(马玉寿等, 2002)。

对于恢复的退化草甸植被, 应该实行划区轮牧, 建立优化放牧制度和适当的放牧强度, 牧草利用率为 45%~55% 为宜, 其中夏秋草场的适宜放牧强度为 2.41 羊/hm<sup>2</sup>, 冬春草场为 1.87 羊/hm<sup>2</sup>, 全年平均放牧强度为 1.05 羊/hm<sup>2</sup>, 两季的草场面积为 1:1.16; 同时要优化畜群结构, 提高母畜比例, 增加家畜的出栏率和商品率, 保证草场生态环境和社会经济稳定持续发展(周立等, 1995c; 赵新全等, 2000)。

王启基等(2004)研究表明, 通过 6 年对“黑土

滩”采取 5 种不同的恢复和重建措施(未退化矮嵩草草甸、垂穗披碱草+冷地早熟禾(2:1)人工草地、垂穗披碱草人工草地、围封和对照(“黑土滩”)), 发现 6 年后不同处理间地上、地下生物量及不同植物类群的碳含量及整个系统的碳储量均发生了显著变化。与未退化的矮嵩草草甸相比, “黑土滩”以及围封处理的草甸上禾草和杂类草的碳含量均有所降低, 特别是围封处理牧草碳含量甚至低于“黑土滩”上植物的碳含量, 另外, 杂类草碳含量比禾草碳含量高, 而垂穗披碱草的碳含量最高(41.5%), 均低于 IPCC(2006)建议的 0.47 默认值。总体上, 未退化草甸根系的碳含量最低, 但现存生物量是其它处理的 3~6 倍, 因此, 植物现存总固碳量是其它处理的 2~5 倍, 而混播人工草地植物总固碳量是“黑土滩”草甸及其围封后的草甸的 1.4~2 倍; 同时发现, 单播人工草地与围封处理差异不大, 主要原因是人工草地 0~20 cm 土层中的根系没有形成“根毡层”, 故远低于未退化的高寒草甸。人工草地植被(包括土壤)总固碳量是“黑土滩”草甸的 1.5 倍左右, 但与围封处理的差异不大, 主要原因是人工草地土壤碳储量有所下降的原因, 因为围封不利用导致更多的凋落物归还给土壤从而提高了土壤有机质含量。

## 参考文献:

- 景增春, 边疆晖, 樊乃昌. 1995. 高寒草甸牧场鼠害综合治理后动植物群落的演替及经济、生态效益的研究[C]//中国科学院海北高寒草甸生态系统定位研究站, 高寒草甸生态系统. 4: 333-340
- 李英年, 王启基, 周兴民. 1995. 矮嵩草草甸地上生物量与气候因子的关系及其预报模式的建立[C]//中国科学院海北高寒草甸生态系统定位研究站, 高寒草甸生态系统. 4: 1-10
- 刘季科, 王溪, 刘伟, *et al.* 1991. 藏系绵羊试验放牧水平对啮齿动物群落作用的研究, I. 啮齿动物群落结构和功能分析[C]//刘季科, 王祖望主编, 高寒草甸生态系统(第 3 集). 科学出版社, 9-22
- 王启基, 杨福囤, 史顺海. 1988. 高寒矮嵩草草甸地下生物量形成规律的初步研究《高寒草甸生态系统国际学术讨论会论文集》[M]. 73-80
- 王启基, 周兴民, 沈振西, *et al.* 1995a. 高寒藏嵩草沼泽化草甸植物群落结构及其利用[C]//中国科学院海北高寒草甸生态系统定位研究站编著, 高寒草甸生态系统. 4: 91-100
- 王启基, 周兴民, 沈振西, *et al.* 1995b. 不同调控策略下退化草地植物群落结构及其多样性分析[C]//中国科学院海北高寒草甸生态系统定位研究站编著, 高寒草甸生态系统. 4: 269-280
- 王启基, 周兴民, 沈振西, *et al.* 1995c. 不同调控策略下退化草地恢复与重建的效益分析[C]//中国科学院海北高寒草甸生态系统定位研究站, 高寒草甸生态系统. 4: 343-351
- 王启基, 周立, 王发刚. 1995d. 放牧强度对冬春草场植物群落结构及功能的效应分析[C]//中国科学院海北高寒草甸生态系

- 定位研究站编著,高寒草甸生态系统,4:353-363
- 汪诗平,王艳芬,陈佐忠. 2003. 放牧生态系统管理[M]. 北京: 科学出版社
- 张松林,周兴民. 1986. 施肥对矮嵩草草甸草场地上生物量的影响[C]//高原生物学集刊. 科学出版社,5:7-12
- 赵新全. 2009. 高寒草甸生态系统与全球变化[M]. 北京: 科学出版社
- 周立,王启基,周琪. 1995a. 高寒草甸生态系统非线性振荡行为周期性的研究-I. 降水和初级生产力的功率谱分析及其波动周期[C]//中国科学院台北高寒草甸生态系统定位研究站,高寒草甸生态系统. 4:219-239
- 周立,王启基,周琪. 1995b. 高寒草甸生态系统非线性振荡行为周期性的研究-II. 气温波动的功率谱分析及其波动周期与初级生产力振荡周期的关系[C]//中国科学院台北高寒草甸生态系统定位研究站编著,高寒草甸生态系统. 4:241-250
- 周立,王启基,赵京, et al. 1995c. 高寒草甸牧场最优放牧强度的研究 I. 藏羊最大生产力放牧强度[C]//中国科学院台北高寒草甸生态系统定位研究站,高寒草甸生态系统. 4:365-375
- 周兴民,张松林. 1986. 矮嵩草草甸在封育条件下群落结构和生物量变化的初步观察[C]//高原生物学集刊. 北京:科学出版社,5:1-6
- 周兴民,王启基,张堰青, et al. 1995. 青藏高原退化草地的现状、调控策略和持续发展[C]//中国科学院台北高寒草甸生态系统定位研究站编著,高寒草甸生态系统. 4:263-268
- 周兴民. 2001. 中国嵩草草甸[M]. 北京:科学出版社
- Bian JH(边疆晖), Fan NC(樊乃昌), Jing ZC(景增春). 1994. Studies on the successive relation between small mammal community and plant community in Alpine Meadow(草甸地区小哺乳动物群落与植物群落演替关系的研究)[J]. *Acta Theriol Sin(兽类学报)*, 14(3):209-216
- Chen QG(陈全功). 1996. The snow disaster and its defence strategy in Yushu Tibetan prefecture of Qinghai Province(青海玉树的雪灾及其防御对策)[J]. *Prat Sci(草业科学)*, 14(2):60-63
- Chen QG(陈全功). 2007. Grassland deterioration in the source region of the Yangtze-Yellow rivers and integrated control of the ecological environment(江河源区草地退化与生态环境的综合治理)[J]. *Acta Prat Turae Sin(草业学报)*, 16(1):10-15
- De Fries RS, Field CB, Fung I, et al. 1999. Combining satellite data and biogeochemical models to estimate global effects of human-induced land cover change on carbon emissions and primary productivity[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 13:803-815
- Dong QM(董全民), Zhao XQ(赵新全), Ma YS(马玉寿), et al. 2005. Regressive analysis between stocking rate for yak and aboveground and underground biomass of warm-season pasture in *Kobresia parvaalpina* meadow(牦牛放牧率与小嵩草高寒草甸暖季草场地上、地下生物量相关分析)[J]. *Prat Sci(草业科学)*, 22(5):65-71
- Dong SK(董世魁), Hu ZZ(胡自治), Long RJ(龙瑞军). 2002. Effect of mixture perennial grasses on vegetation and soil fertility of grassland and economic values of mixture grassland in Alpine region(高寒地区混播多年生禾草对草地植被状况和土壤肥力的影响及其经济效益分析)[J]. *J Soil Water Conservation(水土保持学报)*, 16(3):98-101
- Fang JY, Chen AP, Peng CH, et al. 2001. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. *Science*, 292:2 320-2 322
- Han F(韩发), Ben GY(胥桂英), Shi SB(师生波). 1993. Study on some plant growth characteristics under different grazing intensities in Alpine bushland(不同放牧强度下高寒灌丛植物的生长特点)[J]. *Acta Phytoecol Geobot Ica Sin(植物生态学与地植物学学报)*, 23(3):20-26
- IPCC( Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. 《2006年 IPCC 国家温室气体清单指南》
- Ji YJ(纪亚君). 2006. Effects of nitrogen on the grass yield of Qinghai alpine meadow(青海高寒草甸施氮肥增产效应浅析)[J]. *Prat Sci(草业科学)*, 4(5):26-29
- Li HY(李海英), Peng HC(彭红春), Wang QJ(王启基). 2004. Study on the aboveground biomass of plant communities among the stages of regressive succession in alpine *Kobresia humilis* meadow(高寒矮嵩草草甸不同退化演替阶段植物群落地上生物量分析)[J]. *Acta Pratacul Turae Sin(草业学报)*, 13(5):23-28
- Li QY(李青云), Shi JJ(施建军), Ma YS(马玉寿). 2004. Effects of fertilizer application on sown pasture in the fountainhead region of the Yangtze, Yellow and Meikong rivers(三江源区人工草地施肥效应研究)[J]. *Prat Sci(草业科学)*, 21(4):35-38
- Li YN(李英年), Wang QX(王勤学), Gu S(古松), et al. 2004. Integrated monitoring of Alpine vegetation types and its primary production(高寒植被类型及其植物生产力的监测)[J]. *Acta Geo Sin(地理学报)*, 59(1):40-48
- Li YN(李英年), Zhao L(赵亮), Wang QX(王勤学), et al. 2006. Estimation of biomass and annual turnover quantities of *Potentilla frolicosa* shrub(高寒金露梅灌丛生物量及年周转量)[J]. *Acta Agrest Sin(草地学报)*. 14(1):72-77
- Liu W(刘伟), Zhou HK(周华坤), Zhou L(周立). 2005. Biomass distribution pattern of degraded grassland in Alpine meadow(不同程度退化草地生物量的分布模式)[J]. *Grassland of China(中国草地)*, 27(2):7-12
- Liu W(刘伟), Wang QJ(王启基), Wang X(王溪). 1999. Ecological process of forming "Black-Soil-Type" degraded grassland(高寒草甸"黑土型"退化草地的成因和生态过程)[J]. *Acta Agrestia Sin(草地学报)*, 7(4):300-301
- Liu W(刘伟), Wang X(王溪), Zhou L(周立), et al. 2003. Studies on destruction, prevention and control of plateau Pikas in *Kobresia pygmaea* meadow(高原鼠兔对小嵩草草甸的破坏及其治理)[J]. *Acta Theriol Sin(兽类学报)*, 23(3):214-219
- Liu WH(刘文辉), Zhou QP(周青平), Yan HB(颜红波), et al. 2007. Influence of fertilization on *Elymus brevicastratus* Keng mass and seed yield in Alpine region(Briefing)(高寒地区施肥对短芒老芒麦产量和种籽产量的影响(简报)[J]. *Acta Agrest Sin(草地学报)*, 15(2):193-195
- Ma YS(马玉寿), Lang BN(朗百宁), Wang QJ(王启基). 1999. "黑土型"退化草地研究工作的回顾与展望(Review and prospect of the study on 'Black Type' deteriorated grassland)[J]. *Prat Sci(草业科学)*, 16(2):5-9
- Ma YS(马玉寿), Lang BN(朗百宁), Li QY(李青云), et al. 2002. Research on recovery technology of Alpine degraded meadows in headwater River(江河源区高寒草甸退化草地与恢复重建技术研究)[J]. *Prat Sci(草业科学)*, 19(9):1-5
- Ma YS(马玉寿), Lang BN(朗百宁), Li QY(李青云), et al. 2003. Effect of fertilizing nitrogen rate and time on *Kobresia pygmaea* meadow grassland(施氮量与施氮时间对小嵩草草甸草地的影响)[J]. *Prat Sci(草业科学)*, 20(3):47-49
- Ma T(马涛), Wu GL(武高林), He YL(何彦龙), et al. 2007. The effect of simulated mowing of the fertilizing level on community production and compensatory responses on the Qinghai-Tibetan(青藏高原东部高寒草甸群落生物量和补偿能力对施肥与刈割的响应)[J]. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, 27(6):2 288-2 293
- Mooney H, Roy J, Saugier B. 2001. Terrestrial global productivity: past, present and future[M]. Academic Press, San Diego

- Ni J. 2002. Carbon storage in grasslands of China[J]. *J Arid Environ*, **50**:205-218
- Ojima DS, Dirks BOM, Gleovn EP, et al. 1993. Assessment of C budget for grasslands and dry lands of the world[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, **70**:95-109
- Pan ZW(潘正武), Zhuo YP(卓玉璞). 2007. Study on mixed seeding of perennial artificial grassland in Alpine region(高寒牧区多年生人工草地混播组合试验)[J]. *Prat Sci(草业科学)*, **24**(11):53-55
- Piao SL(朴世龙), Fang JY(方精云), He JS(贺金生), et al. 2004. Spatial distribution of grassland biomass in China(中国草地植被生物量及其空间分布格局)[J]. *Acta Phytocool Sin(植物生态学报)*, **28**(4):491-498
- Scurlock JMO and Hall DO. 1998. The global carbon sink; a grassland perspective[J]. *Global Change Biology*, **4**:229-233
- Shen JL(沈景林), Meng Y(孟杨), Hu WL(胡文良), et al. 1999. Experimental study of degenerated grassland improvement in plateau area(高寒地区退化草地改良试验研究)[J]. *Acta Pratacul Turae Sin(草业学报)*, **8**(1):9-14
- Shi DJ(石德军), Li XL(李希来), Yang LJ(杨力军), et al. 2006. Changes and restore countermeasures of different "Black-Soil-Type" degraded grassland(不同退化程度"黑土滩"草地群落特征的变化及其恢复对策)[J]. *Prat Sci(草业科学)*, **23**(7):1-3
- Shi HL(史惠兰), Wang QJ(王启基), Jing ZC(景增春), et al. 2005a. Community succession and species diversity of manmade pratum as well as degenerated pratum on 'Heitutan land'(Secondary Bare Land) in the area covered by the headwaters of Yellow River and Yangtze River(江源区人工草地及"黑土滩"退化草地群落演替与物种多样性动态)[J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin(西北植物学报)*, **25**(4):34-39
- Shi HL(史惠兰), Wang QJ(王启基), Jing ZC(景增春), et al. 2005b. The structure, biodiversity and stability of artificial grassland plant communities in the source regions of the Yangze and Yellow River(江源区人工草地群落特征、多样性及其稳定性分析)[J]. *Acta Pratacul Turae Sin(草业学报)*, **14**(3):15-19
- Shi JJ(施建军), Ma YS(马玉寿), Dong QM(董全民), et al. 2007. Studies of fertilizer application on the artificially vegetated "Black soil type" degenerated grassland("黑土型"退化草地人工植被施肥试验研究)[J]. *Acta Pratacul Turae Sin(草业学报)*, **16**(2):25-32
- Wang CT(王长庭), Wang QJ(王启基), Shen ZX(沈振西), et al. 2003. Response of biodiversity and productivity to simulated rainfall on an alpine *Kobresia humilis* meadow(高寒矮嵩草草甸群落植物多样性和初级生产力对模拟降水的响应)[J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin(西北植物学报)*, **23**(10):1 713-1 718
- Wang CT(王长庭), Wang QJ(王启基), Long RJ(龙瑞军), et al. 2004. Changes in plant species diversity and productivity along an elevation gradient in an Alpine meadow(高寒草甸群落植物多样性和初级生产力沿海拔梯度变化的研究)[J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin(西北植物学报)*, **28**(2):240-245
- Wang QJ(王启基), Jing ZC(景增春), Wang WY(王文颖). 1997. The study of grassland resource, ecological environment and sustainable development in Qinghai-Xizang Plateau(青藏高原高寒草甸草地资源环境及可持续发展研究)[J]. *Qinghai Caoye(青海草业)*, **6**(3):1-11
- Wang QJ(王启基), Wang WY(王文颖), Deng ZF(邓自发). 1998. The dynamics of biomass and the allocation of energy in Alpine *Kobesia medow* communities in Haibei Region of Qinghai Province(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)[J]. *Acta Phytocool Sin(植物生态学报)*, **22**(3):222-230
- Wang QJ(王启基), Shi HL(史惠兰), Jing ZC(景增春), et al. 2004. Recovery and benefit analysis of ecology on degraded natural grassland of the source region of Yangze and Yellow rivers(江河源区退化天然草地的恢复及其生态效益分析)[J]. *Prat Sci(草业科学)*, **21**(12):25-29
- Wang XL(王小利), Gan YM(干友民), Zhang L(张力), et al. 2006. Study on underground photomass of heavily degraded *Kobresia capallifolia* grassland in Qinghai Lake area(环湖草原重度退化线叶嵩草草地一年内地下植物量变化研究)[J]. *Sichuan Caoyuan(四川草原)*, **6**:6-9
- Wei XH(魏学红), Yang FY(杨富裕), Sun L(孙磊). 2006. Harm and prevention of *Ochotona curzonie* on Alpine meadow in Tibet(高原鼠兔对西藏高寒草地的危害及防治)[J]. *Sichuan Caoyuan(四川草原)*, **5**:41-45
- Yang SH(杨时海), Li YN(李英年), Pu JT(蒲继廷), et al. 2006. Investigation of the plant community and soil environmental factors of three Alpine vegetation types(三种高寒草甸植被类型植物群落结构及其土壤环境因子研究)[J]. *Acta Agrest Sin(草地学报)*, **14**(1):77-83
- Zhang YS(张耀生), Zhou XM(周兴民), Wang QJ(王启基). 1998. A preliminary analysis of production performance of oat (*Avena stiva*) at Alpine meadow pasture(高寒牧区燕麦生产性能的初步分析)[J]. *Acta Agrest Sin(草地学报)*, **7**(2):115-123
- Zhang YS(张耀生), Zhao XQ(赵新全), Huang DQ(黄德清). 2003. The study on sustainable using of perennial sowing grassland in the Qinghai-Tibet Plateau pasture(青藏高寒牧区多年生人工草地持续利用的研究)[J]. *Acta Pratacul Turae Sin(草业学报)*, **12**(3):22-27
- Zhao XQ(赵新全), Zhang YS(张耀生), Zhou XM(周兴民). 2000. Theory and practice for sustainable development of animal husbandry on the Alpine meadow pasture(高寒草甸畜牧业可持续发展:理论与实践)[J]. *Resources Sci(资源科学)*, **22**(4):50-61
- Zhou HK(周华坤), Zhou L(周立), Zhao XQ(赵新全), et al. 2002a. Study of formation pattern of below-ground biomass in *Potentilla fruticosa* shrub(金露梅灌丛地下生物量形成规律的研究)[J]. *Acta Pratacul Turae Sin(草业学报)*, **11**(2):59-65
- Zhou HK(周华坤), Zhou L(周立), Zhao XQ(赵新全), et al. 2002b. Influence of grazing disturbance on Alpine grassland(放牧干扰对高寒草场的影响)[J]. *Grassland of China(中国草地)*, **24**(5):53-61
- Zhou HK(周华坤), Zhou L(周立), Liu W(刘伟), et al. 2003. The influence of fencing on degraded *Kobresia humilis* meadows and non-degraded(封育措施对退化与未退化矮嵩草草甸的影响)[J]. *Grassland of China(中国草地)*, **25**(5):53-57
- Zhou HK(周华坤), Zhou L(周立), Zhao XQ(赵新全), et al. 2004. Effect of fencing on lightly and heavily grazing *Potentilla fruticosa* shrublands(围栏封育对轻牧和重牧金露梅灌丛的影响)[J]. *Acta Agrest Sin(草地学报)*, **12**(2):140-144
- Zhou HK(周华坤), Zhao XQ(赵新全), Zhou L(周立), et al. 2005. A study on correlations between vegetation degradation and soil degradation in the 'Alpine Meadow' of the Qinghai-Tibetan Plateau(青藏高原高寒草甸的植被退化和土壤退化特征研究)[J]. *Acta Pratacul Turae Sin(草业学报)*, **14**(3):31-40
- Zhou HK(周华坤), Zhao XQ(赵新全), Zhao L(赵亮), et al. 2007. The community characteristics and stability of the *Elymus nutans* artificial grassland in Alpine meadow(高山草甸垂穗披碱草人工草地群落特征及稳定性研究)[J]. *Chin J Grassland(中国草地学报)*, **29**(2):13-25