

恢复状态下羊草 (*Leymus chinensis*) 草原植被 根冠比动态及影响因子

耿浩林^{1,2}, 王玉辉^{1,*}, 王凤玉¹, 贾丙瑞¹

(1. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 利用内蒙古羊草草原围栏样地连续两年的地上、地下生物量数据和当地同时期的降水、气温资料, 分析了退化羊草草原, 在恢复过程中植被根冠比动态及与水热因子之间的关系。研究表明: (1) 羊草草原植被地上、地下生物量季节变化均呈单峰型曲线, 峰值出现在 8 月。(2) 羊草草原植被根冠比具有明显的季节变化, 生长季初和生长季末根冠比值较大, 最低值出现在地上生物量最高的 8 月中下旬。(3) 羊草草原植被月根冠比与上上月降水量相关关系极显著, 与上月平均气温相关关系显著; 以根冠比为因变量, 上上月降水量、上月平均气温为自变量可分别建立线性回归方程。该方程可以较好地模拟羊草草原植被生长季内月根冠比的动态变化, 这样在草地恢复过程中, 可由上月的水热因子来指导下月的草地管理, 并为更准确地估算草原生态系统生产力及碳储存动态提供重要参数。

关键词: 生物量; 根冠比; 降水量; 温度

文章编号: 1000-0933(2008)10-4629-06 中图分类号: Q143, Q948, S812 文献标识码: A

The dynamics of root-shoot ratio and its environmental effective factors of recovering *Leymus chinensis* steppe vegetation in Inner Mongolia

GENG Hao-Lin^{1,2}, WANG Yu-Hui^{1,*}, WANG Feng-Yu¹, JIA Bing-Rui¹

1 Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

2 Graduate university of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 4629 ~ 4634.

Abstract: We conducted a field study to examine the relationships between the root-shoot ratio dynamics and precipitation and temperature for the typical *Leymus chinensis* steppe recovering from grazing in Inner Mongolia. A former pasture land that had been fenced off for two years was selected for the study; and aboveground and belowground biomass were collected from the study site along with local precipitation and temperature observations during the study period to be used in the analysis. Our results indicated that: (1) The seasonal change of both aboveground and belowground biomass in *Leymus chinensis* demonstrated a pattern with a single peak occurring in August. (2) the root-shoot ratio showed seasonal variation, with relatively high values at the beginning of and the end of the growing season. The minimum ratio occurred in late August when the aboveground biomass reached its maximum. (3) the monthly root-shoot ratio was significantly correlated ($p < 0.05$) with the monthly precipitation two months previous, and with the monthly mean temperature of the previous month.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB106806); 国家自然科学基金资助项目(No. 40671183; 40625015)

收稿日期: 2007-05-21; **修订日期:** 2008-03-06

作者简介: 耿浩林(1980~), 男, 河北邯郸人, 硕士生, 主要从事草地生态学研究. E-mail: ghl.1980@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yhwang@ibcas.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Key Project for Basic Research (No. 2007CB106806); the Natural Science Foundation of China (No. 40671183; 40625015)

Received date: 2007-05-21; **Accepted date:** 2008-03-06

Biography: GENG Hao-Lin, Master candidate, mainly engaged in grassland ecology. E-mail: ghl.1980@163.com

A regression model was built with the root-shoot ratio as the dependent variable and precipitation and temperature as independent variables. This regression could be used to model the monthly root-shoot ratio dynamics of *Leymus chinensis* steppe during the growing season. Therefore, precipitation and temperature information from current and previous months can be used to make predictions for the next month. These predictions could be used to plan vegetation management and provide more accurate estimates for steppe ecosystem productivity and carbon stock dynamics.

Key Words: biomass; root-shoot ratio; precipitation; temperature

根冠比(即植物地下部分和地上部分生物量的比值)是植物体光合作用产物分配的重要体现,被众多陆地生态系统模型作为计算光合产物向植物地下部分分配的依据,如 HRBM^[1], SLAVE^[2], CASA^[3], CARAIB^[4], DEMETER^[5]等,以及基于植物地上部分生物量估算景观、区域尺度植被碳储量的重要参数。我国学者朴世龙等基于固定的根冠比,分析了中国不同草地类型的生物量及其空间分布格局^[6],李克让等基于 CEVSA 模型采用根、茎、叶的固定比例系数估算了中国植被的碳储量^[7]。但是植物的干物质分配是一个复杂的过程,它受到植物种类、年龄、气候条件等众多因素的影响。确认根冠比在植物生长过程中的变化特征以及影响根冠比变化的相关因素,进而对根冠比进行模拟,对提高陆地生态系统模型的模拟精度以及陆地生态系统碳储量估算的准确性具有十分重要的意义。

草地作为陆地生态系统的重要组成部分,约为陆地总面积的 1/5,在陆地生态系统碳循环中占有十分重要的地位和作用。但目前与森林生态系统相比,草地生态系统植被碳储量的估算还存在很大的不确定性,其中一个重要的原因就在于对植物地下部分认识的不足。特别是对超载过牧后严重退化草地在恢复过程中草地植被地下部分认识的深入,对提高当前我国草地生态系统的碳固定和储存能力估算精度具有重要的作用。为此,本文选取我国温带典型草原的代表性类型——羊草草原作为研究对象,试图揭示以下问题:(1)退化恢复过程中的羊草草原植被根冠比的季节动态如何?是否存在固定的根冠比值?(2)在无人类干扰的退化恢复草地,水热因素(温度和降水)的变化是否会影响根冠比的状况?

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究地点位于内蒙古锡林郭勒盟白音锡勒牧场(43°55'N, 116°31'E, 海拔 1201m),属于中度偏重度退化的羊草草原生态系统类型^[8]。该样地自 2001 年 6 月 15 日围栏禁牧,面积约 1.20hm²,地势平坦开阔,土壤为栗钙土,土壤腐殖质层较薄。气候属大陆性半干旱温带草原气候,年均温在 -1.1~0.2℃之间,年均日照总时数达 2617.54h。年均降水量为 350.43mm,主要集中在 7~9 月份;可能蒸散量达 403.14mm,年际间变化较大^[9]。建群种羊草(*Leymus chinensis*)在群落中占绝对优势,大针茅(*Stipa grandis*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、冰草(*Agropyron cristatum*)等禾本科草类及菊科的冷蒿(*Artemisia frigida*)、莎草科的黄囊苔草(*Carex korshinskyi*)等均作为重要伴生种出现^[8]。

1.2 取样方法及样品处理

植物地上、地下生物量测定于每年生长季的 6~9 月进行,每隔 10~15d 取样 1 次。地上生物量采用传统的收割法,样方大小为 0.5m×0.5m,齐地剪割,实验室烘干(65℃恒温)称重(精度 0.01g),每次取 3 个重复。地下生物量采用根钻法,根钻直径为 3.8cm。在获取地上生物量后的 3 个样方内,沿对角线分 0~10cm、10~20cm、20~30cm 共 3 层分别在每个样方内钻取 9 个点的地下根系。所取样品经冲洗筛选后烘干(65℃恒温)称重(精度为 0.01g),平均后折算成单位面积的地下生物量。气象资料从锡林浩特市气象站获取。

1.3 数据处理方法

使用 Excel 进行了数据的初步处理,应用统计分析软件 SPSS (10.0 版)的 Correlate 和 Regression 进行了相关分析和回归分析。

2 结果与分析

为能够了解退化恢复状态下羊草草原植被根冠比的季节变化特征,首先分析了退化恢复状态下羊草草原植被地上、地下生物量的季节变化状况。

2.1 羊草草原植被地上、地下生物量的季节变化

图1给出了2001年和2002年羊草草原植被地上生物量的季节变化。结果显示2001年羊草草原植被地上生物量的季节变化呈单峰型曲线,峰值出现在8月上旬。地上生物量的峰值为 $154.25 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。2002年地上生物量也表现为单峰型曲线,最高值出现在8月中旬。最高生物量为 $176.03 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,较2001年增加 $21.78 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

2001年羊草草原植被地下生物量变化与地上生物量变化趋势相似,呈单峰型曲线(图2)。从6月中旬开始呈现逐渐增加的趋势,到8月上旬达到最高值,该峰值为 $3589.62 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,然后又趋于减小。

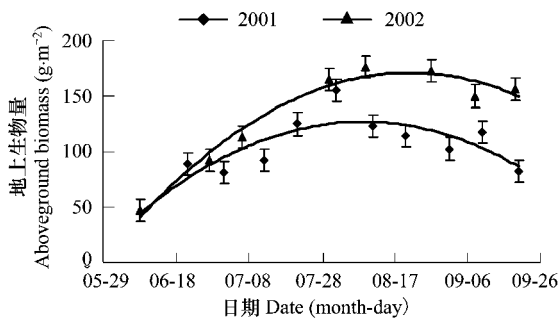


图1 2001和2002年羊草草原植被地上生物量的季节变化

Fig. 1 The seasonal variation of aboveground biomass of 2001 and 2002 in the *Leymus chinensis* steppe vegetation

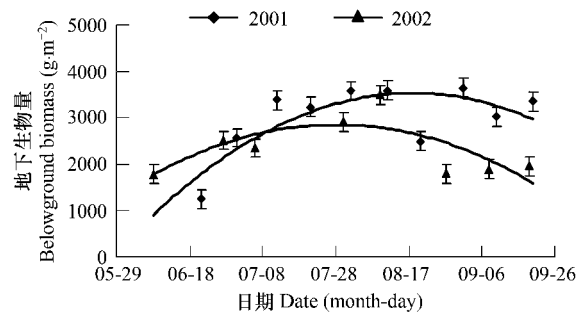


图2 2001和2002年羊草草原植被地下生物量的季节变化

Fig. 2 The seasonal variation of belowground biomass of 2001 and 2002 in the *Leymus chinensis* steppe vegetation

2002年地下生物量变化与2001年地下生物量变化具有相似的趋势(图2),6月到8月上旬地下生物量逐渐增加,8月中下旬地下生物量急剧减小,减小到与生长季初(6月份)的地下生物量基本相同。2002年最高地下生物量为 $3490.51 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,比2001年略低。

2.2 羊草草原植被根冠比的季节变化

图3给出了2001年和2002年羊草草原植被根冠比的季节变化。图中显示2001年羊草草原植被根冠比的变化大体上表现为反抛物线形状(图3),经 F 检验,各点之间差异显著。从6月份开始根冠比呈现下降趋势,到8月中旬,植物地上生物量达到最高值时根冠比达到最小,而后根冠比又逐渐增大。2001年最小根冠比为22.3,出现在8月20日,最大根冠比为41.48,出现在9月20日。植物生长具有一定的季节周期性,地上部分与地下部分相互促进,相互制约,在不同时期具有不同的生长中心。根冠比在生长季初期比较大,主要是因为春季水热条件较差,植物虽已返青,但地上部分

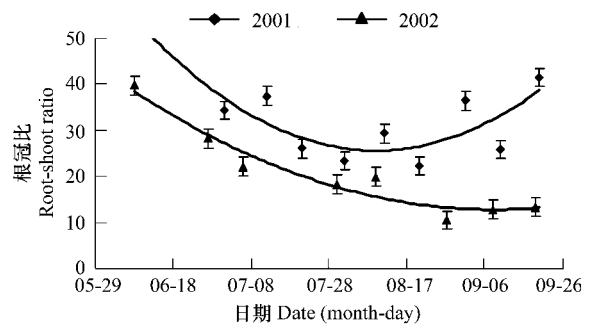


图3 2001和2002年羊草草原植被根冠比的季节变化

Fig. 3 The seasonal variation of root-shoot ratio of 2001 and 2002 in the *Leymus Chinensis* steppe vegetation

生成生物量较少,而此时地下部分由于多年的积累初始值较大,所以根冠比较大。但是随着生长季的推进,水热条件逐渐改善,地上部分成为主要生长中心,快速生长,生成生物量占整体生物量的比例逐渐增大,根冠比呈现减小趋势。而到生长季末期,由于温度的逐渐降低,植物地上部分的生长基本已停止并开始枯萎,但根系适应低温能力较强,仍在生长,就植物体内物质转运来说,植物为了越冬和来年的生长,部分光合作用产物向

地下部分运输进行能量储存,从而使根冠比又逐渐增大。这与植物对周围环境长期适应而形成的特定的生长规律有关。

2002 年根冠比也表现为先减小后增大的过程与 2001 年的根冠比变化趋势相似(图 3)。经 F 检验,各点之间差异也达到显著水平。不同的是 8 月下旬以后根冠比增大的趋势没有 2001 年明显,且 2002 年最小根冠比值较 2001 年偏小。2002 年最小根冠比为 10.44,出现在 8 月 27 日,最大根冠比为 39.76,出现在 6 月 8 日。

2.3 羊草草原植被根冠比影响因子的分析

在自然环境中,环境因子的胁迫作用往往限制了植物生物量分配格局,对光、养分、水分的竞争是决定生物量分配的重要因素^[10,11]。生物量分配与一定的环境是有联系的,也就是说,它是可预测的^[12]。植物生物量和水分的关系尤其密切,在干旱和半干旱区,水分是生物量形成的主要限制因子^[13]。天然草地地上、地下生物量主要受降水和温度的影响^[14],因此,植物的地上、地下生物量分配也应主要受降水、气温等因素的影响。本研究选取了降水和气温两个重要环境因子,分析了降水、气温与根冠比的关系,以期望用降水和气温能够模拟恢复状态下羊草草原植被根冠比的变化。

草地群落生物量相对于水热条件具有时滞效应,因此,一定时期的生物量必定与此前的水热条件有关。为此,本研究对可能对根冠比产生影响的前期水热因素(包括月降水量、月平均气温、上月降水量、上月平均气温、上上月降水量、上上月平均气温)与根冠比的相关性进行了分析,分析结果显示只有上月平均气温、上上月降水量与研究月份的月根冠比之间相关关系较好,分别达到了显著和极显著水平,分析结果如表 1。

表 1 羊草草原植被根冠比与水热因子的相关关系分析与显著性检验

Table 1 Correlation coefficients and significance levels between the root-shoot ratio and precipitation and temperature in the *Leymus chinensis* steppe vegetation

相关系数 Correlation coefficients	上上月降水量 Monthly precipitation two months previous	上月平均气温 Monthly mean temperature of the previous month
根冠比 Root-shoot ratio	-0.924	-0.734
P 值 Sig.	0.001 **	0.038 *

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

相关分析结果表明,在这两年中,月根冠比与上上月降水量之间呈极显著相关关系,相关系数为 -0.924,并为负相关(见表 1),说明随着前期降水的增加,月根冠比表现为逐渐减小的趋势。而上月平均气温和月根冠比的关系也达到了显著相关水平,相关系数为 -0.734,也为负相关(见表 1),即上月平均气温较高,则该月根冠比较小。降水比气温的时滞更长,基本相差 1 个月。基于此,以月根冠比为因变量,上上月降水量、上月平均气温为自变量分别建立了线性回归方程,分析结果见表 2。

表 2 羊草草原植被根冠比与水热因子的回归分析与显著性检验

Table 2 Regression equations and significance levels between the root-shoot ratios and independent variables of precipitation and temperature in the *Leymus chinensis* steppe vegetation

自变量(X) Independents (X)	回归方程 Regression equations	Adjusted R^2	F	Sig.
上上月降水量 Monthly precipitation two months previous	$Y = -0.91 X + 60.89$	0.83	35.264	0.001 **
上月平均气温 Monthly mean temperature of the previous month	$Y = -5.38 X + 138.57$	0.46	7.015	0.038 *

Y (因变量): 根冠比 Y (Dependent) root-shoot ratio; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

了解一个植被类型的根冠比,需对地上、地下生物量进行取样,而这一工作要花费大量的人力、物力和财力,并且对地面植被造成一定程度的破坏。如果能找到影响根冠比变化的环境因子,然后通过这些环境因子来模拟根冠比的变化,就可以达到既省时省力,又不破坏草地植被的目的。通过以上分析发现,在月根冠比与上上月降水量、上月平均气温之间具有极显著和显著的相关关系,并可建立拟合度良好的线性回归方程。这样,就可以利用相对易得的降水和气温资料来模拟根冠比的季节动态变化。

3 讨论

在全球陆地生态系统碳模型中,根冠比作为其中的重要参数之一,对估算全球生态系统碳分配和储存的准确度具有决定性的重要意义。因此,充分了解和掌握根冠比的变化及影响因子是目前需要迫切解决的问题。本研究正是以此为出发点,目的就在于掌握草地生态系统根冠比在自然环境下的变化规律,并用环境因子模拟根冠比变化,从而为众多全球陆地生态系统碳模型提供更准确的参数。

研究结果显示,恢复状态下羊草草原植被根冠比具有明显的季节变化,生长季初和生长季末根冠比值较大。2001、2002 年生长季内根冠比变动范围分别为 22.3 ~ 41.48 和 10.44 ~ 39.76。白永飞等对羊草群落研究发现,生长季内根冠比变化达 3.26 ~ 210.62^[15]。与之相比,本研究连续两年生长季内根冠比的变幅均明显较小。张娜等^[16]研究发现安塞 3 类天然草地群落根冠比的季节变化都非常显著,越接近于生长季始末,其值越大,与本研究结果相似。

Coupland 在对北美草原 12 个长期生态站资料的分析中发现根冠比与干旱的程度及温度有关^[17]。因此在本研究中,主要分析了整个生长季前后的降水、气温对根冠比的影响。研究结果表明,两年的上上月降水量与月根冠比之间相关关系极显著,并为负相关,与 Wang 等的随着降水增加羊草群落地下生物量所占比例减小的研究结果^[18,19]相似。两年的上月平均气温与月根冠比之间的相关关系亦达到显著相关水平。月根冠比与上上月降水量、上月平均气温之间可以建立拟合度良好的回归方程,用这两个环境因子可以很好地模拟生长季内月根冠比的动态变化。

马克平等^[20]认为,根冠比作为群落或生态系统的特征值应具有较为稳定的特点,因此,以地上生物量达到极大值时的根冠比值作为草地群落或生态系统的根冠比较为合适,许多研究者采用该值作为群落或生态系统的根冠比^[21,22],众多模型也采用此时的固定的根冠比值。如在经典 CASA 模型中,森林植被叶、茎和根的比例为 1:1:1,草原植被的根冠比一般为 1:1^[12]。但是本研究却发现根冠比具有很强的季节变化规律,白永飞、张娜等的研究也得出了相似的结论。所以本文认为现有全球陆地生态系统碳模型采用固定根冠比值的方法应适当进行改进,最好采用环境因子动态模拟根冠比变化,根据本研究,可以用上月平均气温和上上月降水量来模拟月根冠比的变化,这样可能会使模型运算结果更准确也更切合实际。

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,光合同化产物在植物体各器官的分配受周围环境的影响,并表现出一定的复杂性。本研究目前主要分析了降水和气温对根冠比的影响,可能还有其它环境因素影响根冠比,有待于进一步研究。

4 结论

4.1 恢复过程中,羊草草原植被根冠比变化呈反抛物线型,生长季初和生长季末根冠比较大,最低值出现在地上生物量最高的 8 月中下旬,表现出明显的季节波动性。

4.2 恢复过程中,羊草草原植被月根冠比与上上月降水量之间相关关系极显著,可建立线性回归方程, $Y = -0.91X + 60.89$ 。月根冠比与上月平均气温之间相关关系显著,也可建立线性回归方程, $Y = -5.38X + 138.57$ 。用这两个环境因子可以较好地模拟生长季内月根冠比的变化。

References:

- [1] Esser G. Sensitivity of global carbon pools and fluxes to human and potential climatic impacts. *Tellus*, 1987, 39: 245—260.
- [2] Friedlingstein P, Delire C, Muller J F, *et al.* The climate induced variation of the continental biosphere: a model simulation of the Last Glacial Maximum. *Geophysical Research Letters*, 1992, 19: 897—900.
- [3] Potter C S, Randerson J T, Field C B, *et al.* Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7: 811—841.
- [4] Wamant P, Francois L, Strivay D, *et al.* CARAIB: a global model of terrestrial biological productivity. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, 8: 255—270.
- [5] Foley J A. Net primary productivity of the terrestrial biosphere: The application of a global model. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99: 20773—20783.

- [6] Piao S L, Fang J Y, He J S, Xiao Y. Spatial distribution of grassland biomass in China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(4): 491—498.
- [7] Li K R, Wang S Q, Cao M K. The vegetation and soil carbon storage in China. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(1): 72—80.
- [8] Jia B R, Zhou G S, Wang F Y, *et al.* A comparative study on soil respiration between grazing and fenced typical *Leymus chinensis* steppe, Inner Mongolia. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(9): 1611—1615.
- [9] Chen Z Z, Wang S P. The typical grassland ecosystem of China. Beijing: Science Press, 2000. 9—12.
- [10] Geiger D R, Servaites J C. Carbon allocation and response to stress. In: Mooney H A, Winner W E, Pell E J, eds. *Response of plants to multiple stresses*. CA: Academic Press, San Diego, 1991. 103—127.
- [11] Mooney H A, Winner W E. Partitioning response of plants to stress. In: Mooney H A, Winner W E, Pell E J, eds. *Response of plants to multiple stresses*. CA: Academic Press, San Diego, 1991. 129—141.
- [12] Friedlingstein P, Joel G, Field C B and Fung I Y. Toward an allocation scheme for global terrestrial carbon models. *Global Change Biology*, 1999, 5: 755—770.
- [13] Cheng W L, Liu H Y, Wang S D. The studies on the relation between the biomass and the factors influencing it. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Neimongol*, 2000, 31(3): 285—289.
- [14] Dong Q M, Zhao X Q, Ma Y S, *et al.* Regressive analysis between stocking rate for yak and aboveground and underground biomass of warm-season pasture in *Kobresia parva* alpine meadow. *Pratacultural Science*, 2005, 22(5): 65—71.
- [15] Bai Y F, Xu Z X, Li D X. Study on seasonal fluctuations biomass for *Leymus chinensis* grassland. *Grassland of China*, 1994, 3: 1—5, 9.
- [16] Zhang N, Liang Y M. Studies on the below-ground /above-ground biomass ratio of natural grassland in loess hilly region. *Acta Pratacultural Sinica*, 2002, 11(2): 72—78.
- [17] Coupland R T. *Grassland ecosystems of the world: analysis of grasslands and their uses*. Cambridge: Cambridge University Press, 1979. 62.
- [18] Wang R Z, Gao Q, Chen Q S. Effects of climatic change on biomass and biomass allocation in *Leymus chinensis* (*Poaceae*) along the North-east China Transect (NECT). *Journal of Arid Environments*, 2003, 54: 653—665.
- [19] Wang R Z, Ripliy E A, Zu Y G, *et al.* Demography of reproductive and biomass allocation of grassland and dune *Leymus chinensis* in the Songnen Plain, north-eastern China. *Journal of Arid Environments*, 2001, 49: 289—299.
- [20] Ma K P, Zhou R C, Guo Y S. The formation pattern of underground biomass of *Calamagrostis angustifolia* meadow. *Pratacultural Science*, 1992, 9(2): 24—28, 33.
- [21] Chen Z Z, Huang D H, Zhang H F. Discuss on the model of belowground biomass and precipitation relationship of *Leymus chinensis* steppe and *Stipa grandis* steppe in Xilin river basin, Inner Mongolia. In: *Grassland ecosystem research. (Volume 2)*. Beijing: Science and Technology Press, 1988. 20—25.
- [22] Wang Q J, Wang W Y, Deng Z F. The dynamics of biomass and the allocation of energy in *Alpine kobresia* meadow communities, Haibei region of Qinghai Province. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(3): 222—230.

参考文献:

- [6] 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. *植物生态学报*, 2004, 28(4): 491~498.
- [7] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳储量. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(1): 72~80.
- [8] 贾丙瑞, 周广胜, 王凤玉, 等. 放牧与围栏羊草草原生态系统土壤呼吸作用比较. *应用生态学报*, 2004, 15(9): 1611~1615.
- [9] 陈佐忠, 汪诗平. 中国典型草原生态系统. 北京: 科学出版社, 2000. 9~12.
- [13] 成文联, 柳海鹰, 王世东. 生物量与其影响因素之间关系的研究. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2000, 31(3): 285~289.
- [14] 董全民, 赵新全, 马玉寿, 等. 牦牛放牧率与小嵩草高寒草甸暖季草地地上、地下生物量相关分析. *草业科学*, 2005, 22(5): 65~71.
- [15] 白永飞, 许志信, 李德新. 羊草草原群落生物量动态研究. *中国草地*, 1994, 3: 1~5, 9.
- [16] 张娜, 梁一民. 黄土丘陵区天然草地地下/地上生物量的研究. *草业学报*, 2002, 11(2): 72~78.
- [20] 马克平, 周瑞昌, 郭亚胜. 小叶章草甸地下生物量形成规律的研究. *草业科学*, 1992, 9(2): 24~28, 33.
- [21] 陈佐忠, 黄德华, 张鸿芳. 内蒙古锡林河流域羊草草原和大叶茅草原地下生物量与降水关系模型探讨. 见: 中国科学院内蒙古草原生态系统定位站编. *草原生态系统研究第二集*. 北京: 科学技术出版社, 1988. 20~25.
- [22] 王启基, 王文颖, 邓自发. 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*, 1998, 22(3): 222~230.