

DOI: 10.5846/stxb201301190118

柴曦, 梁存柱, 梁茂伟, 韩伟华, 李智勇, 苗百岭, 王炜, 王立新. 内蒙古草甸草原与典型草原地下生物量与生产力季节动态及其碳库潜力. 生态学报, 2014, 34(19): 5530-5540.

Chai X, Liang C Z, Liang M W, Han W H, Li Z Y, Miao B L, Wang W, Wang L X. Seasonal dynamics of belowground biomass and productivity and potential of carbon sequestration in meadow steppe and typical steppe, in Inn Mongolia, China. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(19): 5530-5540.

内蒙古草甸草原与典型草原地下生物量与 生产力季节动态及其碳库潜力

柴曦^{1,2}, 梁存柱^{1,2,*}, 梁茂伟^{1,2}, 韩伟华³, 李智勇^{1,2}, 苗百岭^{1,2}, 王炜^{1,2}, 王立新^{2,4}

(1. 内蒙古大学生命科学学院, 呼和浩特 010021; 2. 中美生态、能源及可持续性科学内蒙古研究中心, 呼和浩特 010021;

3. 呼和浩特市土默特中学, 呼和浩特 010021; 4. 内蒙古大学环境与资源学院, 呼和浩特 010021)

摘要: 地下根系是草原生态系统的重要组成部分, 其生物量及其净生产力对地下碳库具有直接与间接作用, 分析地下生物量季节动态与周转对深入揭示草原生态系统碳库动态及其固碳速率与潜力具有重要意义。应用钻土芯法对不同利用方式或管理措施下内蒙古草甸草原、典型草原地下生物量动态及其与温度、降水的相关性研究表明: 草甸草原和典型草原地上生物量季节动态均为单峰型曲线, 与上月降水显著正相关 ($P < 0.05$), 但地下生物量季节动态表现为草甸草原呈“S”型曲线, 典型草原则是双峰型曲线, 与温度、降水相关性均不显著 ($P > 0.05$); 两种草原根冠比和地下生物量垂直分布均为指数函数曲线, 根茎型草原地下生物量集中在土壤 0—5 cm, 丛生型草原地下生物量集中于土壤 5—10 cm, 根冠比值在生长旺季 (7—8 月份) 最小。草甸草原地下净生产力及碳储量范围分别为 2167—2953 $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 和 975—1329 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 典型草原为 2342—3333 $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 和 1054—1450 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 地下净生产力及其碳储量约为地上净生产力及其碳储量的 10 倍, 具有较大的年固碳能力, 且相对稳定; 地下净生产力与地上净生产力呈显著负相关性 ($P < 0.05$); 地下生物量碳库是地上生物量碳库的 10 倍左右, 适度放牧可增加地下生产力, 但长期过度放牧显著降低其地下生物量与生产力, 并使其垂直分布趋向于浅层化。

关键词: 地下生物量; 地下净生产力; 垂直分布格局; 碳库; 根系周转

Seasonal dynamics of belowground biomass and productivity and potential of carbon sequestration in meadow steppe and typical steppe, in Inner Mongolia, China

CHAI Xi^{1,2}, LIANG Cunzhu^{1,2,*}, LIANG Maowei^{1,2}, Han Weihua³ LI Zhi Yong^{1,2}, MIAO Bailing^{1,2}, WANG Wei^{1,2}, WANG Lixin^{2,4}

1 College of Life Sciences, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China

2 Sino-US Center for Conservation, Energy, and Sustainability Science, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China

3 Hohhot Tumote Middle School, Hohhot 010021, China

4 College of Environment and Resources, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China

Abstract: Belowground root system is an important part of the prairie ecosystem. Its biomass and net primary productivity have both direct and indirect effects on belowground carbon pool; therefore understanding the seasonal dynamic and turnover of belowground biomass is essential for further understanding of the dynamics, rate and potential of carbon sequestration in grassland ecosystems. Using soil coring method, we studied the dynamics of belowground biomass in relation to temperature

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31160476); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2010CB950602)

收稿日期: 2013-01-19; **网络出版日期:** 2014-03-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bilcz@imu.edu.cn

and precipitation in meadow steppe and typical steppe grasslands under different land use and management regimes. For the studied grasslands, seasonal dynamic patterns of the aboveground biomass were characterized by unimodal curves. The aboveground biomass was significantly and positively correlated with the previous monthly precipitation ($P < 0.05$). The seasonal patterns of belowground biomass were characterized by “S” shaped curves in the meadow steppe grasslands, and bimodal curves in the typical steppe grasslands. There were no significant correlations between belowground biomass and temperature or precipitation in either meadow steppe or typical steppe ($P > 0.05$). Root to shoot ratio decreased throughout the growing season in both meadow steppe and typical steppe grasslands. The vertical distribution of belowground biomass can best be described as exponential curves. Belowground biomass was concentrated at the depth of 0—5 cm in the grasslands dominated by rhizomatous grasses and at 5—10 cm in grasslands dominated by bunch grasses. Belowground net primary productivity ranged from 2167 to 2953 $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ in the meadow steppe grasslands; whereas it ranged from 2342 to 3333 $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ in the typical steppe grasslands. Carbon storage ranged from 975 to 1329 $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ in the meadow steppe grasslands and 1054 to 1450 $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ in the typical steppe grasslands. Belowground net primary productivity and carbon storage were 10 times greater than those of aboveground, therefore the belowground system had a larger annual carbon sequestration capacity and was relatively stable. Moreover, net primary productivity was significantly and negatively correlated between above- and belowground ($P < 0.05$). We conclude that moderate grazing can increase the belowground productivity and carbon storage, however, the long-term overgrazing would significantly reduce the belowground biomass and productivity, and modify their vertical distributions. Belowground biomass and productivity tended to be higher at the upper layer of soil.

Key Words: below-ground biomass; below-ground net primary productivity; vertical distribution; carbon pool; root turnover

全球气候变化及其应对措施是目前科学界和政府决策部门广为关注的首要环境问题,而碳捕获和碳固持是研究和解决这一重大环境问题的核心环节^[1]。大量的研究表明,草地作为全球分布面积最大的陆地生态系统,是陆地生态系统的重要碳库之一^[2],对减缓全球气候变化有重要作用^[3]。特别是草地生态系统的碳汇优势在于系统中约 80%的碳集中于地下土壤,高于土壤碳约占 60%的森林生态系统,尤其高于土壤碳仅占 45%左右的热带森林^[4]。草原生态系统中地下根系的碳库存虽然不及土壤有机碳,但远大于地上部分碳库存并相对稳定,且土壤有机碳也直接或间接来源于地下根系。因此研究地下根系生产力、空间格局及其动态是研究生态系统地下有机碳库的基础,对深入揭示草原生态系统固碳速率、固碳潜力及其碳库动态具有重要意义。

20 世纪中期国外学者开始对草地地下生物量的变化特征、影响因子进行研究^[5-7],同时也对地下生物量的测定方法和计算方法进行了对比分析并取得了一定的成果。我国学者从 20 世纪 80 年代开始对我国北方草地地下生物量进行研究,包括内蒙古典

型草原区羊草草原和大针茅草原地下生产力、根系周转、时空动态以及与水热因子之间的关系^[8-10],典型草原不同放牧强度对地下生物量、地下生产力的影响^[11-12];高寒草甸与高寒草原地下生物量动态特征、生产力以及影响因子^[13-16];灌丛化石生针茅荒漠草原地下生物量动态特征,短花针茅荒漠草原不同放牧梯度对地下生物量的影响^[17-18]。但是,对草甸草原地下生物量、生产力等相关问题研究的报道较少,而不同草地类型之间地下生物量季节动态以及地下净生产力对比的研究也鲜有报道。

尽管如上所述我国草地地下根系研究已有较多报道,但大多集中于地下生物量及其垂直分布格局、根冠比及其影响因子方面,对地下根系生产力及其动态、周转及地下生物量碳库研究则仍是一个薄弱的环节。温带草原相对于一岁一枯荣的地上部分,累积多年的地下部分生产力测定是比较困难的^[5,7,19-20],而且测定方法多样,如钻土芯法、微根窗法和内生长法^[7,21],很多学者使用钻土芯法。

本文利用钻土芯法对内蒙古草甸草原与典型草原生长季节地下生物量进行动态监测,分析地上生

物量、地下生物量、根冠比及其地上生物量和地下生物量与水热因子的关系;运用两种计算方法计算地下净生产力、碳储量和周转值,研究地下净生产力与地上净生产力之间的关系,对比地上生物量和地下生物量碳储量;增加内蒙古草甸草原和典型草原地下生物量、生产力、季节动态及其影响因子与地下生物量碳库特征的数据资料,为内蒙古草原生态系统地下碳库及其固碳速率与潜力研究提供参考。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

本研究分别在草甸草原区和典型草原区进行。草甸草原试验与采样区设于中国农业科学院呼伦贝尔草原生态系统国家野外科学观测研究站贝加尔针茅试验样地,位于呼伦贝尔市海拉尔区北 10 km 谢尔塔拉牧场 11 队,海拔 684 m。气候属温带大陆季风气候,平均年降水量为 300—400 mm,主要集中于 6—9 月;年平均气温为 $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高气温和最低气温分别为 $35.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-38.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的年积温约为 $2297.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,无霜期 100 d 左右;土壤为暗栗钙土。植被为羊草 (*Leymus chinensis*)、贝加尔针茅 (*Stipa baicalensis*) 草甸草原,主要伴生植物有日阴营

(*Carex pediformis*)、裂叶蒿 (*Artemisia tanacetifolia*)、西伯利亚羽茅 (*Achnatherum sibiricum*)、细叶白头翁 (*Pulsatilla turczaninovii*) 等。典型草原试验与取样区设于锡林郭勒盟锡林浩特市东 25 km 毛登牧场内蒙古大学草地生态学研究基地大针茅样地和退化草原恢复样地,海拔 1100 m;气候为典型的大陆性气候;平均降水量为 200—300 mm,主要集中在 6—9 月;年平均气温 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高气温 $31.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低气温 $-34.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的年积温为 $2700.5\text{ }^{\circ}\text{C}$;土壤类型主要为栗钙土。植被为大针茅 (*Stipa grandis*) 典型草原,主要伴生植物有羊草 (*Leymus chinensis*)、冰草 (*Agropyron michnoi*),过度放牧后退化为冷蒿 (*Artemisia frigida*) 群落。

1.2 试验设计与取样方法

分别在位于草甸草原区呼伦贝尔草原生态系统国家野外科学观测研究站贝加尔针茅样地选取围封和放牧 2 个取样点,在位于典型草原区的毛登牧场内蒙古大学草地生态学研究基地选取大针茅群落样地和冷蒿、冰草退化群落恢复样地进行试验和取样,样地基本信息见表 1。草甸草原区海拉尔和典型草原区锡林浩特 2011 年 11 月—2012 年 11 月年平均降水量和平均温度如图 1 所示。

表 1 实验样地概况

Table 1 Basic characteristic of sample plots

样地代码 Plot code	试验样地类型 Type of plots	地理坐标 Geographic coordinates	优势种及其地上生物量占总生物量的%(2012年8月) Dominant species and Percentage of the total biomass of aboveground biomass(August 2012)	利用情况 Utilization
H1	贝加尔针茅草甸草原围封区	49°21'N 120°7'E	羊草 (<i>Leymus chinensis</i>) (34%)、日阴营 (<i>Carex pediformis</i>) (16%)、贝加尔针茅 (<i>Stipa baicalensis</i>) (12%)	自 1997 年开始围封,不放牧、不打草,接近原生状态。
H2	H1 样地围栏外自由放牧区	49°21'N 120°7'E	日阴营 (<i>Carex pediformis</i>) (17%)、黄囊苔草 (<i>Carex korshinskyi</i>) (12%) + 细叶白头翁 (<i>Pulsatilla turczaninovii</i>) (10%)	自由放牧草地,常年公共放牧的草地类型
X1	大针茅典型草原退化恢复区	44°15'N 116°23'E	冷蒿 (<i>Artemisia frigida</i>) (10%)、米氏冰草 (<i>Agropyron michnoi</i>) (9%)、羊草 (<i>Leymus chinensis</i>) (9%)、大针茅 (<i>Cleistogenes squarrosa</i>) (6%)、1 年生植物猪毛菜 (<i>Salsola collina</i>) (22%)	放牧导致重度退化,已围封恢复 3a
X2	大针茅典型草原围封打草区	44°12'N 116°14'E	大针茅 (<i>Stipa grandis</i>) (58%)、知母 (<i>Rhizoma Anemarrhenae</i>) (12%)、糙隐子草 (<i>Cleistogenes squarrosa</i>) (8%)	围封不放牧,每年 9 月份打草

试验从 2012 年 5 月开始到 10 月份结束,每月中旬左右分别在各样地进行调查与取样。每个取样

点内随机设置 10 个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的样方,用收割法分种齐地面收割地上部分,然后在每个样方内用直径 7

cm 的根钻按照 0—5、5—10、10—20、20—30、30—40、40—50、50—70 cm 的层次钻取土柱,每个样方内取两钻,每个样地共计 20 钻 140 个土柱。将土柱放在 0.5 mm 网眼的纱网袋里,用水冲洗,将采集到的地上部分与根系置于 65—70 °C 的烘箱中烘干称重,计算地上与地下生物量。地下生物量统计时不区分死根与活根。

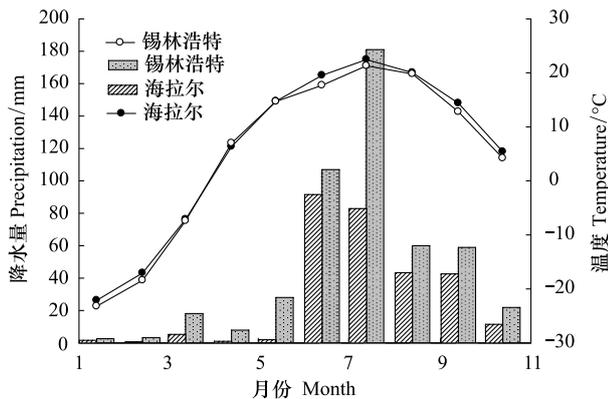


图1 海拉尔、锡林浩特市1—10月月平均降水、月平均温度
Fig.1 The average monthly precipitation and temperature between January and October in Hailar and Xilinhot city
柱形代表月平均降水量,曲线代表月平均温度

1.3 数据处理与统计分析

地上净初级生产力 (Above-ground Net Primary Productivity, ANPP) 用生物量峰值来代替。地下净初级生产力 (Below-ground Net Primary Productivity, BNPP) 算法多样,本文采用国内外常用的两种方法计算:方法 I 是用一年内地下生物量最高值与最低值之差来表示,方法 II 是用相邻采样间隔生物量的增量之和表示^[22-24]。地下部分周转值表示一年内地下部分有多少被更替的数值,是用一年内地下部分净生产力占平均地下生物量的比例来计算的^[24-25]。估算植被碳储量,通常按照植物有机干物质中碳占的比重转换为碳量,根据国际上常用的转换率 0.45 将植被净生产力转换为碳量^[26-27],即植被碳储量 = 净生产力 × 0.45。

数据处理与分析应用 Excel2007 和 Spss13.0 进行处理。全部数据对数转换后进行 Shapiro-Wilk 正态分布检验,数据均符合正态分布。显著性检验采取 *t* 检验和单因素方差分析,相关性分析用 Person 相关。

2 结果与分析

2.1 群落地上、地下生物量及根冠比季节动态

贝加尔针茅草甸草原 (H1、H2) 与典型草原 (X1、X2) 地上生物量 (AGB) 季节动态均为单峰型曲线 (图 2)。除自由放牧区 (H2) 最大值为 56.95 g/m² 出现在 7 月份外,其他各样地最大值为 210.32 g/m² (H1)、300.68 g/m² (X1) 和 154.95 g/m² (X2), 均出现在生长旺季的 8 月份。由于锡林浩特地区 2012 年生长季降水量较高,退化恢复区 (X1) 样地猪毛菜等 1 年生植物层片长势很好,故 X1 群落 AGB 比围封打草群落 (X2) 高。除 H2 自由放牧样地外,AGB 与时间可以拟合二次函数方程 ($P < 0.05$)。方差分析结果表明相同时间内各群落 AGB 差异显著 ($P < 0.05$)。

草甸草原 H1、H2 群落地下生物量 (BGB) 在生长季节 5—10 月份趋势均呈“S”型变化 (图 2)。在生长季的前期和末期为 BGB 增加的时期,而在生长季的中、后期为 BGB 减少的时期。不同月份 H1 与 H2 群落 BGB 生长速率不同,尤其表现在 6—7 月之间。由 *t* 检验可知,H1 与 H2 0—70 cm 地下生物量只有 5、6 月份差异显著,其他月份差异不显著。典型草原 X1、X2 群落 BGB 在生长季节 5—10 月份变化趋势表现为双峰型曲线 (图 2),5—6、7—8 月份为 BGB 增加时期,6—7、8—9 月份为 BGB 减少时期,6、8 月份为峰值是 BGB 最大时期,X2 群落 BGB 最大值明显要高于 X1。进入 10 月份是生长季末期,地上植被基本都枯萎死亡,BGB 有所升高,X1 的 BGB 升高幅度更大一些。经 *t* 检验可知,相同时间 BGB 差异显著。

H1、H2、X1、X2 群落根冠比 (Root-Shoot Ratio, R/S) 表现为指数曲线 ($P < 0.05$) (图 2),其中草甸草原放牧区 (H2) 除了 5 月份异常外,其他时间 4 个群落变化趋势基本一致。草甸草原围封未退化 H1 样地最大值出现在生长季初期即返青时期,而 H2 样地最大值则出现在生长季 6 月份,4 个样地最小值均出现在 8 月份,之后进入生长季末期 R/S (Root-Shoot Ratio) 又有所回升,整个生长季内 (5 月份除外) H2 群落 R/S 高于 H1 群落,且差异显著 ($P < 0.05$)。典型草原 X1、X2 群落 R/S 季节动态趋势基本一致,即最高值出现在生长季初期 5 月份,最低值出现在 7 月

份,进入8月份后又有所回升。经单因素方差分析, X1、X2 在6月份 R/S 差异不显著($P>0.05$),其他月

份各群落差异显著($P<0.05$)。

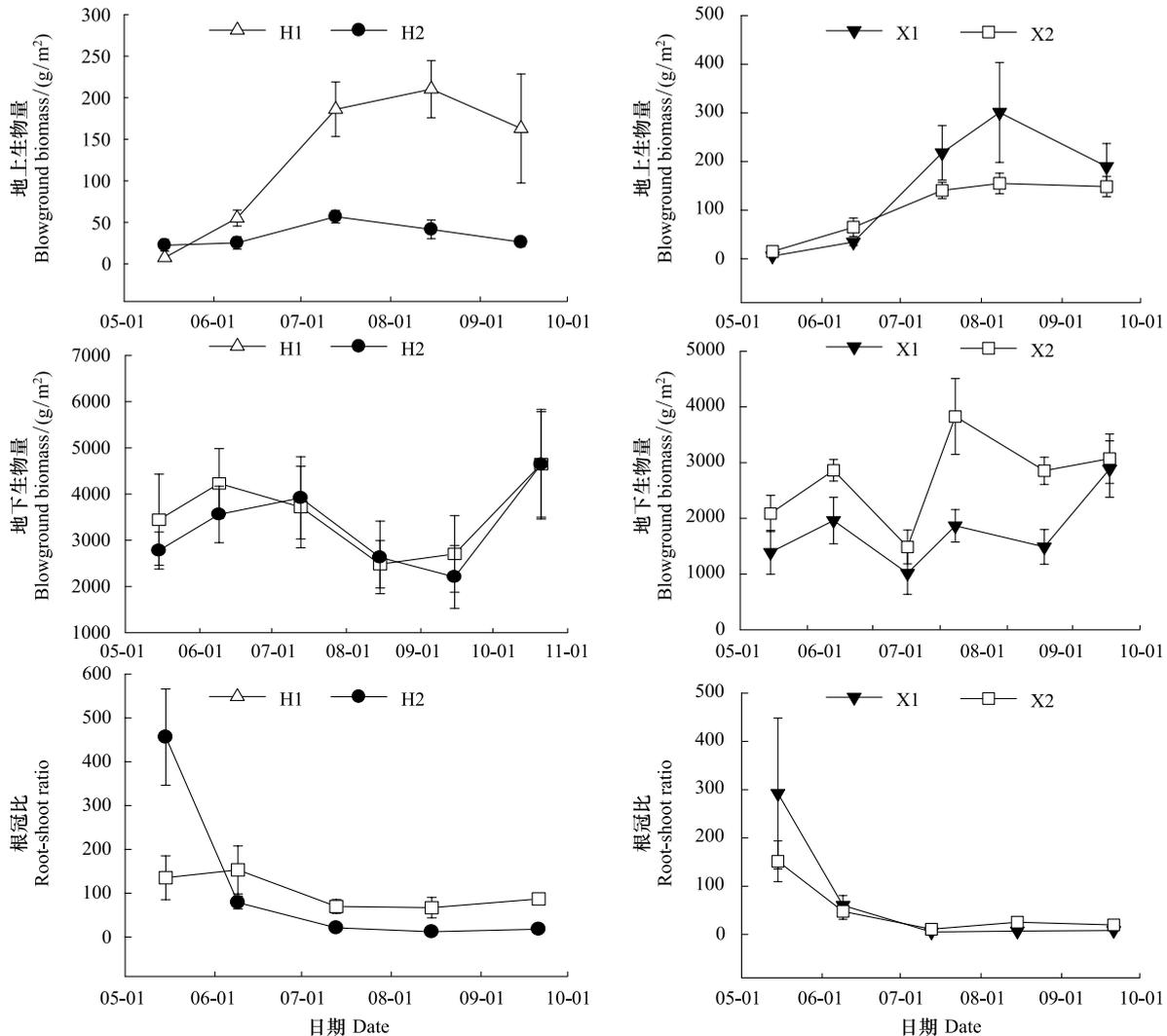


图2 地上生物量、地下生物量及根冠比季节动态

Fig.2 Seasonal dynamics of above-ground biomass, below-ground biomass and root-shoot ratio

H1、H2、X1、X2 为样地代码

2.2 群落地下生物量垂直分布格局

4 个群落 8 月份生长旺季地下生物量垂直分布均表现为指数函数形式($n = 140, R^2 = 0.729-0.892, P<0.05$),随着土壤深度的增加,根量逐层减少,BGB 主要集中在 0—30 cm,占地下总生物量的 70%以上,其中 0—10 cm 约占 50%(表 2)。其他月份垂直分布格局与 8 月份相同。H1、H2 两个根茎型草甸草原(羊草、日荫菅)样地 0—5 cm 地下生物量所占比例高于 X1、X2 两个丛生型典型草原(大针茅)样地,而 X1、X2 样地 5—10 cm 所占比例则高于 H1 和 H2 样地(表 2),表明根茎型草原根系多集中于 0—5 cm 的

表层,丛生型草原根系分布略深。草甸草原 H2 自由放牧区 0—10 cm 地下生物量比 H1 围封区高(表 2),表明在草甸草原放牧也导致根系浅层化,与典型草原类似^[28]。经方差分析以上各种差异均显著($P<0.05$)。

2.3 地上生物量、地下生物量与水热因子的关系

考虑到降水、温度等水热因子具有时滞性,将地上生物量、地下生物量与上月、上上月平均温度和降水进行相关性分析。结果表明 H1、H2、X1 群落地上生物量与上月降水显著正相关,X2 与上月降水有正相关性,但关系不显著;说明降水对各群落地上生物

量的影响均存在着 1 个月的时滞。各群落地上生物量与上上月降水相关性均不显著,说明群落地上生物量受上上月降水影响不显著(表 3)。H1 和 X2 群落地上生物量与上月、上上月温度相关性显著,X1 与上月温度相关性显著,H2 与上月、上上月温度相

关性均不显著(表 3),表明放牧干扰影响了地上生物量与热量的正常相关关系。

4 个样地地下生物量与上月、上上月平均温度、降水均没有显著相关性($P>0.05$)。

表 2 各样地地下生物量垂直分布

Table 2 Vertical distribution of below-ground biomass in every plots

样地 Plot	0—5 cm		5—10 cm		10—20 cm		20—30 cm		30—40 cm		40—50 cm		50—70 cm		0—70 cm
	g/m ²	%	g/m ²	%	g/m ²	%	g/m ²	%	g/m ²						
H1	814.88	32.85	430.13	17.34	349.54	14.09	281.81	11.36	210.45	8.48	152.09	6.13	241.39	9.73	2480.29
H2	814.88	36.16	430.13	17.84	349.54	14.25	281.81	10.17	210.45	8.29	152.09	5.34	241.39	7.95	2630.70
X1	532.23	28.53	395.42	21.20	231.70	12.42	193.68	10.38	180.29	9.67	132.72	7.12	199.17	10.68	1865.22
X2	861.95	22.52	951.77	24.86	644.09	16.82	387.63	10.13	318.34	8.32	250.36	6.54	414.09	10.82	3828.22

表 3 地上生物量与水热因子相关性分析与显著性检验

Table 3 Correlation analysis and significance levels between the above-ground biomass and hydrothermal factor

样地 Plot	上月平均气温 Average temperature previous month		上月降水 Precipitation previous month		上上月平均气温 Average temperature the month before last month		上上月降水 Precipitation the month before last month	
	Person 指数	<i>P</i>	Person 指数	<i>P</i>	Person 指数	<i>P</i>	Person 指数	<i>P</i>
	H1	0.951	0.013 *	0.919	0.027 *	0.915	0.029 *	0.761
H2	0.586	0.299	0.934	0.020 *	0.445	0.452	0.155	0.803
X1	0.884	0.046 *	0.940	0.018 *	0.836	0.077	0.584	0.301
X2	0.965	0.008 **	0.800	0.104	0.967	0.007 **	0.671	0.215

* $P<0.05$, ** $P<0.01$

2.4 地上、地下净初级生产力及周转值与植被碳储量

用两种不同计算地下净初级生产力(BNPP)的方法所得结果不同(表 4)。采用方法 II(相邻采样间隔生物量的增量之和)的计算结果高于方法 I(采

用一年内地下生物量最高值与最低值之差),但是两种方法所计算出的结果趋势是一致的,H2 的 BNPP 及碳储量高于 H1,X2 的 BNPP 及碳储量高于 X1(表 4),说明适度放牧草地的地下净生产力会高于常年围封草地的地下净生产力。尽管在典型草原退化群

表 4 地上、地下净初级生产力($\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$)、周转值及其碳储量($\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$)

Table 4 Above-ground and below-ground net primary productivity turnover value and Carbon Storage

样地 Plot	地上净生产力 Above-ground Net Primary Productivity	方法 Methods	0—70 cm		生物量碳储量 Biomass carbon stocks	
			地下净生产力 0—70 cm Below- ground Net Primary Productivity	0—70 cm 周转值 0—70 cm Turnover Value	地上生物量 Above-ground Biomass	地下生物量 Below-ground Biomass
			H1	210.32	I	2166.95
		II	2953.04			1328.89
H2	41.63	I	2435.07	0.74	18.73	1095.78
		II	3573.96			1608.28
X1	300.68	I	1869.60	1.06	135.31	841.32
		II	2819.84			1268.93
X2	154.95	I	2341.77	0.87	69.73	1053.80
		II	3332.80			1499.76

落围封恢复样地(X1)地上生物量高于围封打草区(X2),但X1地下净生产力仍低于X2。X2在5—10 cm的BNPP及碳储量高于其他层次,其他群落的BNPP及碳储量逐层递减,0—5 cm最大。与ANPP相比,BNPP及其碳储量远远高于ANPP,是ANPP 10倍左右。除X1(86%)外,其他样地地下净生产力均占总净生产力的90%以上,尤其是H2地下净生产力占总净生产力的比例达到了98%左右。两种方法计算出0—70 cm的BNPP与ANPP负相关性显著,即随着地上部生产力的增加地下部生产力逐渐减少,Person相关系数分别为 -0.951 ($P = 0.049$)和 -0.967 ($P = 0.033$),回归方程分别为 $Y = 2589.659 - 2.184X$ ($R^2 = 0.905$, $P = 0.049$), $Y = 1136.683 - 0.303X$ ($R^2 = 0.935$, $P = 0.033$),式中 X 为地上部分生产力($\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$), Y 为地下部分生产力($\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$)。

0—70 cm周转速率最高是X1为1.06,各层次变化范围0.85—2.07;最低是H1为0.61,各层次变化范围0.56—0.84;H2周转速率为0.74,各层次变化范围0.56—1.18;X2周转速率为0.87,各层次变化范围为0.64—1.37(表4)。

3 讨论

3.1 地上生物量和地下生物量动态特征及其与气候因子的相关性

生长季内地上生物量(AGB)季节动态是单峰型曲线,各群落各月份AGB受上月降水影响,与上月降水显著正相关。草甸草原和典型草原降水量分别在6、7月最高,故草甸草原和典型草原AGB最大值出现在7—8月份。研究发现,AGB与降水量有显著正相关关系,并且认为除了降水AGB还与上一年的地上生产力变化有关^[29];也有研究认为,地上生产力与年降水量有密切关系,地上生产力随着年降水量的增加而增大^[30],研究结果与上述学者的研究结果基本一致;而有研究认为AGB与年降水量、月降水量、关键时期降水量以及1—7月降水量都没有显著相关关系^[31]。自然状态下的草地群落AGB受温度的影响显著,而扰动状态下的草地群落AGB受温度影响规律不明显,说明放牧和退化草地地上部分的生长节律发生改变,使得地上部分与温度之间的关系变得更复杂。典型草原退化群落围封恢复3a的X1样地地上生物量高于多年围封打草区X2样

地,是因为锡林浩特2012年是丰水年,降水量充沛,使猪毛菜、藜等1年生植物生长较多,占总生物量的22%,这也说明X1群落虽然仍处于退化状态,但由于稀疏的多年生植物产生了较大剩余“资源空间”,在较好的水热条件下其快速生长导致地上生物量高于多年生植物密度较高、剩余“资源空间”较小的群落^[32]。

不同地区的地下生物量季节动态曲线明显不同,草甸草原为“S”型曲线,而典型草原则为双峰型;在地上部分生长季末期都有持续增长的趋势。研究表明,高寒草甸地下生物量动态特征为“N”曲线,与我们研究的草甸草原季节动态颇为相似^[13,15]。内蒙古荒漠草原地下生物量动态特征为单峰型曲线,峰值为 2118.84 g/m^2 ,出现在9月份^[17],表明不同地区地下生物量动态趋势不同,与地上生物量动态趋势相比较为复杂。各样地地下生物量(BGB)与上月、上上月温度和降水累积量没有显著的相关性,说明BGB受温度、降水时滞性影响不明显,但也表明BGB受温度、降水的波动影响较小,与地上生物量(AGB)相比,有一定的稳定性。海拉尔和锡林浩特2011年11月—2012年11月年平均降水量分别为297.0、521.2 mm。根据国内较常用的降水年型划分标准划分降水年型^[33],草甸草原样点2012年为平水年,典型草原样点为丰水年,典型草原地上生物量虽然高于草甸草原,但地下生物量仍低于草甸草原,这也间接说明地下生物量的相对稳定性及地上生物量较大的波动性。由此进一步表明地下生物量碳库也是相对稳定的。

3.2 地下生物量与地上生物量的关系

植物体的各部分是一个统一的整体,地上部分对地下部分的生长发育有重要影响,它是地下部分生长发育的能量来源,并依靠地下部分吸收生长所需的水分和营养物质^[34]。地下生物量与地上生物量的比值(R/S)反映了光合作用物质在植物体内的分布^[35]。草甸草原和典型草原各样地R/S季节动态均为指数曲线,越接近生长季末R/S越大,这与李旭东、耿浩林等人的研究是一致的^[36-37]。植物在生长季末,地下生物量要远大于地上生物量,根系中积累的营养物质用于维持植物冬天的呼吸消耗;进入返青期(5月份)后,随着温度的升高,植物开始复苏,地上部茎、叶逐渐生长,光合产物积累越来越多,

地上部生长速率超过了地下部生长速率,根冠比开始减小;但由于草甸草原自由放牧区(H2)牛羊在生长季早期的大量啃食,其地上现存生物量较低,6月份根冠比要高于5月份根冠比,造成与多年围封样地(H1)5—6月份根冠比变化趋势不一致。到了生长旺季(7、8月份),植物主要营养物质及大部分光合作用产物用于植物营养生长和生殖生长,地上部分生物量达到最高;地下部分呼吸作用大于有机物质的输送,即消耗大于积累,加之生长旺季降水量大,温度较高,地下部分物质分解加快,所以生长旺季(7、8月份)地下部分生物总量最低,其R/S也最小。生长末期(9—10月份)植被逐渐枯萎成为立枯或凋落物,地上部分营养物质向地下部分转移,所以从9月份开始地上生物活体量减少,地下部生物量增加,R/S比生长旺季高。H2根冠比高于H1这主要是由于放牧区地上现存生物量较低及放牧区地下生物量较高造成的。在一定放牧条件下光合产物分配给地下部分有所增加,以减轻地上生物量因被啃食而降低光合效率的负面效应^[11]。

3.3 放牧和退化对地下生物量的影响

研究区草甸草原放牧条件下只有在生长季初期(5—6月份)地下生物量比不放牧条件下低,但是从生长季中期到生长季末期(7—9月份)没有显著差异,说明草甸草原较高的放牧压力(H2接近重度退化)仍不影响地下生物量的生长甚至会促进地下生物量的积累。孙力安等人研究表明适度放牧可以增加地下部分生产力^[34],本文研究结果与其一致,而与王艳芬^[11]、Gao^[21]在内蒙古典型草原及刘玲玲等^[25]在高山与亚高山研究结果:放牧会降低地下生物量不一致。由此可见,放牧对地下生物量的影响较为复杂,可能与放牧强度、草地植被类型、土壤肥力、气候因子等综合因素有关,草甸草原通常有较高的耐牧力,特别是表现在地下部分。典型草原严重退化群落恢复3a后地下生物量仍显著低于围封打草区,说明重度退化草原地下部分恢复的时间较慢,这也再次表明地下生物量的相对稳定性。X1和X2均属于丛生型草原,其5—10cm地下生物量应高于0—5cm,而退化草地5—10cm地下生物量所占比例低于0—5cm,退化草地地下生物量又趋于表层化,这与刘伟等人的研究结果一致^[38]。

3.4 地上生产力与地下生产力关系及地下生物量碳库

两种方法计算得出的地下生产力均是 $X1 < H1 < X2 < H2$,而地上生产力 $X1 > H1 > X2 > H2$,地下生产力(BNPP)随着地上生产力(ANPP)的增大而减小。植物地上部分、地下部分主要靠植物光合作用积累营养物质,生长季内地上生物量高说明地上部分积累的营养物质多,相应地下部分获得的营养物质就会较少。在生长季末,温度降低、降水量减少,地上部分枯萎死亡,部分营养物质会向地下部分转移,但是转移的部分也会相对较小并不能把全部地上物质转移到地下部分,所以地上部分的净生产力影响地下部分净生产力,其关系是显著负相关。这与戴诚等人的研究结果是不一致的,他们认为地下净生产力与地上生物量之间是正相关关系,但是关系并不显著^[39]。

一般情况下,不同草地类型BNPP存在差异,草甸草原偏高一些,荒漠草原偏低,典型草原处于中间^[40]。但是计算得出的典型草原BNPP高于草甸草原BNPP,典型草原BNPP占总净生产力的比例也高于草甸草原,这也不能排除锡林浩特今年丰水年对BNPP造成影响,仍有待深入研究。

根据这两种方法的计算结果可以得出BNPP及其碳储量范围,草甸草原范围分别在 $2167—2953 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $975—1329 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,典型草原在 $2342—3333 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $1054—1450 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,草甸草原放牧草地为 $2435—3574 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $1095—1608 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,典型草原退化草地范围为 $1970—2820 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $841—1269 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,各群落整个生长季BNPP及碳储量是ANPP及碳储量的10倍左右,说明地下生物量是一个较高的碳库,含量远高于地上生物量且相对稳定。同时,典型草原区重度退化将减小地下生产力和碳储量,是一个潜在碳库,但需要较长时间的恢复;草甸草原一定放牧压力对地下碳库影响较小,且适度放牧会增加生态系统地下的碳储量。

用两种计算方法算出的1年内地下生物量净生产力的变化趋势一致,方法II计算结果高于方法I,由于地下部分生产力的测定比较困难,影响因素复杂,所以无论用哪种方法计算出的数值都只是地下生产力的估计值,与真实值的差距到底有多大,还有

待进一步研究;但是两种方法计算结果规律一致,说明这两种方法都可以应用,但方法 II 所得结果略高。我国学者大多选用方法 I 计算地下净生产力^[9,35], 本文由方法 I 计算结果也与我国大多数学者采用该方法所计算的结果一致^[8-10]。而国外学者两种方法都有应用^[5,7]。

3.5 草甸草原与典型草原地下根系周转

植物地下生物量主要成分是碳水化合物,地下部分周转值主要是指地下生物量中碳的周转,其周转方式有根自身呼吸消耗、根向土壤中分泌有机物质、根死亡被土壤微生物分解释放 3 种方式。根系周转是土壤有机碳的主要来源,由此根系周转对碳分配和植物养分循环起着十分重要的作用。周转值 $X_1 > X_2 > H_2 > H_1$, 典型草原周转值比草甸草原周转值高,是由于锡林浩特 2012 年雨水充沛,雨热条件好,使得根系呼吸、死根分解速率加快。平水年典型草原 0—30 m 根系周转率应为 0.5 左右,各层次变化范围在 0.26—0.68 之间^[9],而丰水年典型草原 0—30 cm 根系周转值为 0.82,各层次变化范围为 0.64—1.01,高于平水年。表层根系周转值低于深层根系,是由于表层根系较多,周转时间较长,而随着土壤深度的加深根系越来越少,周转时间也会相对较短。

4 结论

(1) 草甸草原和典型草原地上生物量季节动态均为单峰型曲线,8 月份地上生物量最高;地上生物量受上月降水影响,围封条件下的草甸草原和典型草原地上生物量受上月和上上月温度影响明显,放牧扰动由于牲畜的采食干扰了这一趋势。

(2) 草甸草原地下生物量季节动态为“S”型曲线,典型草原地下生物量季节动态为双峰型曲线。两个群落的地下生物量均与温度、降水没有显著的相关性;由此判断,与地上生物量相比,地下生物量有一定的稳定性,可成为一个稳定的碳库。

(3) 草甸草原与典型草原根冠比和地下生物量垂直分布均为指数函数曲线。根冠比值越接近生长季始末越大(5 月、9 月),生长旺季值最小(7—8 月)。随土壤深度的加深,地下生物量逐渐减少,其中根茎型草原地下生物量集中在 0—5 cm,丛生型草原地下生物量集中于 5—10 cm。

(4) 水分条件较好的草甸草原在适度的放牧强

度下可以促进地下生物量和净生产力的增加,但使根系浅层化;典型草原重度退化群落地下生物量和净生产力显著减少,围封恢复 3 年仍未达到多年围封打草群落,表明其地下生物量的恢复需较长时间。

(5) 群落地下净生产力(BNPP)与地上净生产力(ANPP)负相关性显著,ANPP 愈大,BNPP 愈小;草甸草原 BNPP 及碳储量范围分别为 2167—2953 $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 和 975—1329 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$,典型草原为 2342—3333 $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 和 1054—1450 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$,地下净生产力及碳储量是地上净生产力及碳储量的 10 倍左右,表明地下部分是一个含碳量较高并且稳定的碳库。草甸草原的周转值为 0.61,各层次变化范围 0.56—0.84;典型草原周转值为 0.87,各层次变化范围为 0.64—1.37。

References:

- [1] Chu S. Carbon capture and sequestration. *Science*, 2009, 325 (5498): 1599-1599
- [2] Reeder J D, Schuman G M. Influence of livestock grazing on C sequestration in semi-arid mixed-grass and short-grass rangelands. *Environmental Pollution*, 2002, 116(3): 457-463.
- [3] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 2004, 123(1/2): 1-22.
- [4] White R P, Murray S, Rohweder M. *Pilot Analysis of Global Ecosystems: Grassland Ecosystem*. Washington: World Resources Institute, 2000: 49-53.
- [5] Dahlman R C, Kutschera C L. Root productivity and turnover in native prairie. *Ecology*, 1965, 46(1/2): 84-89.
- [6] Lauenroth W K, Whitman W C. A rapid method for washing roots. *Journal of Range Management*, 1971, 24(4): 308-309.
- [7] Aerts R, Berendse F, Klerk N M, Bakker C. Root production and root turnover in two dominant species of wet heathlands. *Oecologia*, 1989, 81(3): 374-378.
- [8] Chen Z Z, Huang D H, Zhang H F. A study on the model of interrelation between underground biomass and precipitation of *Aneurolepidium chinense* and *Stipa grandis* grassland in Inner Mongolia region//Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station Academia Sinica, ed. *Research on Grassland Ecosystem (The Second)*. Beijing: Science Press, 1988: 20-25.
- [9] Chen Z Z, Huang D H. A measurement to underground productivity and turnover value of *Aneurolepidium Chinense* and *Stipa Grandis* grassland at the Xilin river valley Inner Mongolia//Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station Academia Sinica, ed. *Research on Grassland Ecosystem (The Second)*. Beijing: Science Press, 1988: 132-138.
- [10] Chen Z Z, Huang D H, Zhang H F. The comparative study on

- underground biomass of *Stipa Baicalensis*, *Stipa Krylovii* and *Filifolium Sibiricum* grassland//Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station Academia Sinica, ed. Research on Grassland Ecosystem (The Second). Beijing: Science Press, 1988: 122-131.
- [11] Wang Y F, Wang S P. Influence of different stocking rates on belowground biomass in Inner Mongolia Steppe. Acta Agraria Sinica, 1999, 9(3): 198-203.
- [12] Wan L Q, Chen W W, Li X L, He F, Liu S J. Effects of grazing on soil moisture, bulk and pasture Underground biomass. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(26): 25-29.
- [13] Li Y N. The relation between below-ground biomass and meteorological conditions and the analysis of turnover value on alpine meadow. China Agricultural Meteorology, 1998, 19(1): 36-38, 42-42.
- [14] Li G D. The study of underground phytomass and its seasonal changes in Alpine Grass-Kobresia meadow of Tianzhu Area, Gansu. Acta Prataculturae Sinica, 1990, 1(1): 42-46.
- [15] Du X J. Research on Heterogeneity of Tibet Alpine Meadow Grassland Biomass [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2007.
- [16] Yan Y, Zhang J G, Zhang J H, Fan J R, Li H X. The belowground biomass in alpine grassland in Nakchu Prefecture of Tibet. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11): 2818-2823.
- [17] Feng Y F. Determination of the underground biomass and turnover value on Shrub fossil raw desert steppe. Inner Mongolia Prataculture, 1990, (3): 27-31.
- [18] Sun X L, Wang M J, Chen H J, Chen L L, Na L. Response of underground biomass to different grazing intensities in the *Stipa breviflora* desert steppe. Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition, 2010, 31(4): 101-104.
- [19] Gill R A, Jackson R B. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. New Phytologist, 2000, 147(1): 13-31.
- [20] Milchunas D G, Lauenroth W K. Belowground primary production by carbon isotope decay and long-term root biomass dynamics. Ecosystems, 2001(2): 139-150.
- [21] Gao Y Z, Giese M, Lin S, Sattelmacher B, Zhao Y, Brueck H. Belowground net primary productivity and biomass allocation of a grassland in inner Mongolia is affected by grazing intensity. Plant and Soil, 2008, 307(1/2): 41-50.
- [22] Yu W T, Yu Y Q. Advances in the research of underground biomass. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(6): 927-932.
- [23] Chen Z Z, Wang S P. Typical Grassland Ecosystem in China. Beijing: Science Press, 2000: 51-65.
- [24] Canham C D, Lauenroth W K. Models in Ecosystem Science. Princeton: Princeton University Press, 2003.
- [25] Liu L L, Wu Z L, Li Q. A study on below-ground biomass and net primary production of sub-alpine meadow in Northwest Yunnan Province. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2006, 28(S1): 314-318.
- [26] Wang S Q, Zhou C H, Luo C W. Studying carbon storage spatial distribution of terrestrial natural vegetation in China. Progress in Geography, 1999, 18(3): 238-244.
- [27] Ma W H, Han M, Lin X, Ren Y L, Wang Z H, Fang J Y. Carbon storage in vegetation of grasslands in Inner Mongolia. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(3): 192-195.
- [28] Wang W, Liu Z L, Hao D Y, Liang C Z. Research on the restoring succession of the degenerated grassland in Inner Mongolia I. Basic characteristics and driving force for restoration of the degenerated grassland. Acta Phytoecologica Sinica, 1996, 20(5): 449-459.
- [29] Oosterheld, M, Loreti, J, Semmartin, M, Sala, O E. Inter-annual variation in primary production of a semi-arid grassland related to previous-year production. Journal of Vegetation Science, 2001, 12(1): 137-142.
- [30] Fang J Y, Piao S L, Tang Z Y. Interannual variability in net primary production and precipitation. Science, 2001, 293(5536): 1723-1723.
- [31] Cai C X, Li Z Q, Chen Z Z, Wang Y F, Wang S P, Wang Y F. The relationship between aboveground biomass and precipitation on *Stipa grandis* steppe in Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(7): 1657-1662.
- [32] Liang C Z, Liu Z Y, Zhu Z Y, Wang W. Specific diversity and distribution characteristics of annual synusia in Alashan desert. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(6): 897-903.
- [33] Zhang B Y, Xu X X, Liu W Z, Chen T L. Dynamic changes of soil moisture in loess hilly and gully region under effects of different yearly precipitation patterns. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6): 1234-1240.
- [34] Sun L A, Liang Y M, Liu G B. Summary of research on grassland below-ground biomass. Foreign Animal Science: Grassland and Pasture, 1993, (1): 6-14.
- [35] Shen Y Y, Yan S G, Zhu X Y, Zhao Y. The primary productivity of saline pastures in Hexi Corridor I The seasonal dynamics of above and underground biomass. Acta Prataculturae Sinica, 1995, 4(2): 44-50.
- [36] Geng H L, Wang Y H, Wang F Y, Jia B R. The dynamics of root-shoot ratio and its environmental effective factors of recovering *Leymus chinensis* steppe vegetation in Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 4629-4534.
- [37] Li X D, Zhang C P, Fu H. Seasonal dynamics of root-shoot ratio and the effect of factors in grazed and ungrazed grasslands of the Loess Plateau. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(4): 307-312.
- [38] Liu W, Zhou H K, Zhou L. Biomass Distribution Pattern of Degraded Grassland in Alpine Meadow. Grassland of China,

2005, 27(2): 9-15.

- [39] Dai C, Kang M Y, Ji W Y, Jiang Y. Responses of underground productivity to biomass and environmental factors in Xilingol grassland, Inner Mongolia. *Chinese Journal of Grassland*, 2012, 34(3): 54-60.

参考文献:

- [8] 陈佐忠, 黄德华, 张鸿芳. 内蒙古锡林河流域羊草草原与大针茅草原地下生物量与降水量关系模型 // 中国科学院内蒙古草原生态系统定位站. 草原生态系统研究(第2集). 北京: 科学出版社, 1988: 20-25.
- [9] 陈佐忠, 黄德华. 内蒙古锡林河流域羊草草原与大针茅草原地下部分生产力和周转值 // 中国科学院内蒙古草原生态系统定位站. 草原生态系统研究(第2集). 北京: 科学出版社, 1988: 132-138.
- [10] 陈佐忠, 黄德华, 张鸿芳. 贝加尔针茅、克氏针茅、线叶菊草地地下生物量的比较研究 // 中国科学院内蒙古草原生态系统定位站. 草原生态系统研究(第2集). 北京: 科学出版社, 1988: 122-131.
- [11] 王艳芬, 汪诗平. 不同放牧率对内蒙古典典型草原地下生物量的影响. *草地学报*, 1999, (3): 198-203.
- [12] 万里强, 陈玮玮, 李向林, 何峰, 刘树军. 放牧对草地土壤含水量与容重及地下生物量的影响. *中国农学通报*, 2011, 27(26): 25-29.
- [13] 李英年. 高寒草甸植物地下生物量与气象条件的关系及周转变值分析. *中国农业气象*, 1998, 19(1): 36-38, 42-42.
- [14] 李光棣. 高寒禾草——嵩草型草地地下植物量及其季节动态的研究. *草业学报*, 1990, 1(1): 42-46.
- [15] 杜小娟. 西藏高寒草甸草原生物量异质性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [16] 鄢燕, 张建国, 张锦华, 范建容, 李辉霞. 西藏那曲地区高寒草地地下生物量. *生态学报*, 2005, 25(11): 2818-2823.
- [17] 冯雨峰. 内蒙古灌丛化石生针茅荒漠草原地下生物量与周转变值的测定. *内蒙古草业*, 1990, (3): 27-31.
- [18] 孙熙麟, 王明玖, 陈海军, 陈丽丽, 娜乐. 短花针茅荒漠草原地下生物量对不同强度放牧的响应. *内蒙古农业大学学报: 自然科学版*, 2010, 31(4): 101-104.
- [22] 宇万太, 于永强. 植物地下生物量研究进展. *应用生态学报*,

2001, 12(6): 927-932.

- [23] 陈佐忠, 汪诗平. 中国典型草原生态系统. 北京: 科学出版社, 2000: 51-65.
- [25] 刘玲玲, 吴兆录, 李青. 滇西北亚高山草地的地下生物量及净初级生产力研究. *云南大学学报: 自然科学版*, 2006, 28(S1): 314-318.
- [26] 王绍强, 周成虎, 罗承文. 中国陆地自然植被碳量空间分布特征探讨. *地理科学进展*, 1999, 18(3): 238-244.
- [27] 马文红, 韩梅, 林鑫, 任艳林, 王志恒, 方精云. 内蒙古温带草地植被的碳储量. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(3): 192-195.
- [28] 王炜, 刘钟龄, 郝敦, 梁存柱. 内蒙古草原退化群落恢复演替的研究——I. 退化草原的基本特征与恢复演替动力. *植物生态学报*, 1996, 20(5): 449-459.
- [31] 蔡学彩, 李镇清, 陈佐忠, 王义凤, 汪诗平, 王艳芬. 内蒙古草原大针茅群落地上生物量与降水量的关系. *生态学报*, 2005, 25(7): 1657-1662.
- [32] 梁存柱, 刘钟龄, 朱宗元, 王炜. 阿拉善荒漠区一年生植物层片物种多样性及其分布特征. *应用生态学报*, 2003, 14(6): 897-903.
- [33] 张北赢, 徐学选, 刘文兆, 陈天林. 黄土丘陵沟壑区不同降水年型下土壤水分动态. *应用生态学报*, 2008, 19(6): 1234-1240.
- [34] 孙力安, 梁一民, 刘国彬. 草地地下生物量研究综述. *国外畜牧学: 草原与牧草*, 1993, (1): 6-14.
- [35] 沈禹颖, 阎顺国, 朱兴运, 赵银. 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与分配. *草业学报*, 1995, 4(2): 44-50.
- [36] 耿浩林, 王玉辉, 王凤玉, 贾丙瑞. 恢复状态下羊草(*Leymus chinensis*)草原植被根冠比动态及影响因子. *生态学报*, 2008, 28(10): 4629-4534.
- [37] 李旭东, 张春平, 傅华. 黄土高原典型草原草地根冠比的季节动态及其影响因素. *草业学报*, 2012, 21(4): 307-312.
- [38] 刘伟, 周华坤, 周立. 不同程度退化草地生物量的分布模式. *中国草地*, 2005, 27(2): 9-15.
- [39] 戴诚, 康慕谊, 纪文瑶, 江源. 锡林郭勒草原地下生产力对生物量及环境因子的响应. *中国草地学报*, 2012, 34(3): 54-60.