

DOI: 10.5846/stxb201011131626

程积民 程杰 杨晓梅 刘伟 陈芙蓉. 黄土高原草地植被碳密度的空间分布特征. 生态学报 2012, 32(1): 0226-0237.

Cheng J M, Cheng J, Yang X M, Liu W, Chen F R. Spatial distribution of carbon density in grassland vegetation of the Loess Plateau of China. Acta Ecologica Sinica 2012, 32(1): 0226-0237.

黄土高原草地植被碳密度的空间分布特征

程积民^{1,2,*}, 程杰¹, 杨晓梅², 刘伟², 陈芙蓉²

(1. 西北农林科技大学, 杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100)

摘要:草地是世界上分布最广的植被类型之一, 作为陆地生态系统的重要组成部分, 参与了全球碳源/汇及碳循环过程, 在全球气候变化中扮演着重要角色, 并对其产生重大影响。以黄土高原草地植被为研究对象, 结合国家退耕还林草与封山禁牧工程的实施, 对封禁前后的天然草地和退化草地, 采用样带多点调查与多年定位测定相结合的方法, 分析了黄土高原不同类型草地植物活体、凋落物和根系碳密度分布格局与地带性规律, 系统研究了黄土高原不同草地类型退化草地和封禁草地生物量与碳密度沿海拔及降水梯度的时空变异特征, 阐述了影响草地碳密度分布的主要驱动因子及其作用机理。结果表明: 4 种草地类型 3 种处理的草地生物量和碳密度自西北向东南均与降雨量呈指数增长趋势, 并随海拔降低而显著降低, 且二者呈显著的线性回归关系; 各草地类型地上/地下生物量与碳密度分布规律均为荒漠草原 < 丘陵典型草原 < 梁塬典型草原 < 草甸草原; 封禁 11a 草地活体植物、凋落物和根系碳密度总量: 荒漠草原为 7.066 t/hm², 丘陵典型草原为 8.080 t/hm², 梁塬典型草原为 15.319 t/hm², 草甸草原为 20.982 t/hm², 分别是退化草地的 14.8、8.33、6.5 倍和 15.88 倍。充分表明, 封禁不仅能使草地植被恢复和生物量提高, 而且也是草地生产力和碳密度增加的一条重要途径。由此可见, 气候干旱和草地退化是影响草地生物量和碳密度的关键因素, 系统研究黄土高原封禁草地生物量增长与碳密度变化过程, 将会对未来全球气候变化分析作出重要贡献。

关键词:黄土高原; 天然草地; 碳密度; 气候; 响应

Spatial distribution of carbon density in grassland vegetation of the Loess Plateau of China

CHENG Jimin^{1,2,*}, CHENG Jie¹, YANG Xiaomei², LIU Wei², CHEN Furong²

1 Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Soil Resources, Yangling 712100, China

Abstract: Grassland is an important and terrestrial ecosystem and one of the most widely distributed ecosystems in the world. In the context of climate change, grassland has a significant impact on global carbon source/sink dynamics and carbon cycling. The focus of the present study was the grassland vegetation of the Loess Plateau. We analyzed the effects of natural and degraded grassland grazing pre- and post-prohibition to combine the policy of returning farmland to forest or grassland and grazing prohibition. Using multi-point transect surveys and long-term fixed monitoring sites, plant distribution, leaf litter, and distribution and zonation of below ground carbon density of different types of grassland in the Loess Plateau were recorded. The temporal-spatial variability of biomass and carbon density with respect to the altitudinal

基金项目: 中国科学院重要方向项目(KZCX2-YW-441, KZCX2-YW-149); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050202); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室专项(10502-Z8); 农业部现代农业产业技术体系建设专项资金资助(CARS-35)

收稿日期: 2010-11-13; 修订日期: 2011-06-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gyzcjm@ms.iswc.ac.cn

and precipitation gradient was studied in several degraded grasslands and an enclosed grassland. The main driving factors of carbon density change and mechanisms underlying the distribution pattern of carbon density were also analyzed. The results indicated that the biomass and carbon density showed a tendency to exponentially increase with precipitation amount, and also significantly decrease with altitude from northwest to southeast in the degraded grassland, early enclosed grassland and enclosed grassland for 11 years among four types of grasslands. There was a significant linear relationship between biomass and carbon density. In each type of grassland, the amount of biomass of above ground and below ground carbon density was present in the following order: desert steppe < hills typical steppe < plateau steppe < meadow steppe. Carbon density of plants, leaf litter, and roots in grassland where grazing has been prohibited for 11 years was 7.066 t/hm² for desert steppe, 8.080 t/hm² for hilly steppe, 15.319 t/hm² for plateau steppe and 20.982 t/hm² for meadow steppe, which were 14.8 times, 8.33 times, 6.5 times, and 15.88 times higher than degraded grassland, respectively. Our results demonstrated that grazing prohibition can not only restore vegetation and increase biomass in the grassland, but also significantly improve grassland productivity and the potential for carbon sequestration. The arid climate and grassland degradation are critical factors that influence the biomass and carbon density of grassland. Study of biomass and carbon density change following grazing prohibition can make an important contribution towards the analysis of the effects of global climate change on grassland in the Loess Plateau.

Key Words: the Loess Plateau; natural grassland; carbon density; climate; response

近年来,大气的 CO₂ 含量在不断增加,致使全球气候逐渐变暖。草地是世界最大的绿地之一,也是陆地生态系统重要的组成部分和碳汇,它对抑制气候变化和固定大气中的 CO₂ 具有重要作用。诚然,草地植被和草地土壤也向大气中释放 CO₂^[1],这是植物和土壤在陆地生态系统 C 循环中具有“碳汇-碳源”的双重功能^[2]。从全球来看,世界草地面积为 24×10⁸hm²,约占全球陆地面积的 1/5,其中热带草原约为 15×10⁸hm²,温带草原约占 9×10⁸hm²,是世界分布最广的植被类型之一。根据 WBGU 估算,全球草地生态系统的碳储量约为 1200 PgC。其中草地植被层碳储量约为 110 PgC,土壤层中 1100 PgC^[3]。我国草地是最大的陆地生态系统,各类草地面积约 4×10⁸hm²,占土地总面积的 40% 以上^[4],其植被碳储量约占我国陆地生态系统总植被碳储量的 16.7%^[5]。在黄土高原地区草地面积达 0.6×10⁸hm²,其中天然草地占 85%,人工和改良草地占 15%,占该区域土地总面积的 32.6%^[6]。因此,研究草地生态系统碳收支/碳平衡过程,是正确认识全球碳循环的关键之一^[7]。

通过恢复草地植被与重建措施来增加草地面积,提高耗碳性生物量生产,增加土壤有机碳含量,缓解温室效应,这方面国内外的研究报导较多^[8]。我国实施的退耕还林草与封山禁牧工程 10 余年来,不仅在退化草地植被恢复、水土流失治理、改善生态环境,调节区域气候等方面效果卓著^[9],而且对解决区域碳汇做出了重要贡献。长期以来,国际上诸多学者对草地生态系统土壤碳库尤其是有机碳库进行了广泛而深入的研究,在土壤有机碳库的组成^[10]、来源与输出方式^[11-12]、碳储量及其时空分布特征等方面取得了很多成果^[13-16]。但目前对碳密度和碳储量方面的研究多集中于农田、森林和土壤^[17-18],对草地碳循环研究仅局限在估算和预测层面,而实地调查和植物测定方面的研究报导较少,尤其是对黄土高原大面积的不同类型天然草地碳密度变化研究尚属空白。本文采用样带法从黄土高原西北到东南方向,结合海拔梯度与气候变化,对不同草地类型的碳密度进行了多点式试验研究,以期为全球气候变化及草地生态系统碳汇/碳源的深入研究与系统分析草地植被在全球气候变化中的生态价值和贡献提供科学依据。

1 研究区概况及样地选择

研究采样地点从黄土高原(35°12′—39°38′N, 106°21′—113°36′E)西南向东北分为两条主样线,再由西北向东南分为 3 条副样线,包括荒漠草原、典型草原和草甸草原 3 个类型,穿过海拔 1250—2650 m,经过干旱-半干旱-半湿润区气候带,年均降水量 220—630 mm 范围,年均潜在蒸发量 1860 mm,年均气温 5.8—13.5 °C

(表 1)。

试验结合国家退耕还林草与封山禁牧工程的实施,对封禁前后的天然草地和退化草地进行定位测定。草地建群种和优势种为本氏针茅(*Stipa bungeana*)、短花针茅(*S. breviflora*)、大针茅(*S. grandis*)、厚穗冰草(*Aneurolepidium dasystachys*)、白羊草(*Bothriochloa ischemum*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、垂穗披碱草(*Clinelymus nutans*)、硬质早熟禾(*Poa sphondylodes*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、白草(*Pennisetum centrasianicum*)、芦苇(*Phragmites communis*)、拂子茅(*Calamagrostis epigeios*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparis*)、黄蒿(*Artemisia scoparia*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、星毛萎凌菜(*Potentilla acaulis*)、二裂萎凌菜(*P. bifurca*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、阿尔泰狗哇花(*Heteropappus altaicus*)、扁蓿豆(*Melilotus ussuriensis*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、草木犀状黄芪(*Astragalus melilotoides*)、大披针苔草(*Carex lanceolata*)等 1 年生和多年生草本,还有少量灌木和半灌木,如小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)等。

表 1 采样点气候与植物分布状况

Table 1 Sampling distribution of climate and plants

草地类型 Grassland types	面积 Area /(10 ⁴ hm ²)	海拔 Altitude /m	降雨量 Rainfall /mm	平均气温 Mean temperature/°C	干燥度 Aridity
荒漠草原类 I Desert grassland	630.00	1250	220	6.5	2.5—3.0
丘陵典型草原类 II Hilly typical steppe	845.90	1350	450	7.2	2.0—2.5
梁源典型草原类 III Plateau typical steppe	554.33	1560	540	13.5	2.0—2.5
草甸草原类 IV Meadow steppe	295.00	2200	630	5.8	1.0—1.5

草地类型 Grassland types	≥10℃ 积温 Cumulative temperature	盖度 Cover /%	物种密度 Plant density /(株/m ²)	草地生物量 Biomass /(kg/m ²)
荒漠草原类 I Desert grassland	2650.5	26.2 ^① 51.6 ^②	①4.3±0.85abA ②12.2±1.55abAB	①0.15±0.04abA ②0.64±0.11aA
丘陵典型草原类 II Hilly typical steppe	2850.2	32.5 78.5	9.2±1.6abA 18.3±2.1abAB	0.38±0.21abA 0.98±0.19aA
梁源典型草原类 III Plateau typical steppe	2259.7	35.6 82.5	11.1±2.1ab 24.8±0.75abA	0.36±0.16aA 1.02±0.21abA
草甸草原类 IV Meadow steppe	1900.3	37.5 85.2	13.4±1.6ab 26.5±1.51aA	0.36±0.11aA 1.12±0.23abA

小字母为差异显著水平($P < 0.05$)、大字母为差异极显著水平($P < 0.01$); ①封禁初期 ②封禁 11a; I: 5 个类型组, 每组 $N=66$; II: 7 个类型组, 每组 $N=66$; III: 6 个类型组, 每组 $N=66$; IV: 4 个类型组, 每组 $N=66$

2 试验布设与测定方法

2.1 试验样地布设

试验设计选择了封山禁牧前(1999 年 5 月)的草地,为封禁初期草地,11a 封禁(2009 年 9 月)草地和退化草地 3 种类型。采用样线法选择 2 条主样线和 3 条副样线(图 1),草地分为荒漠草原、丘陵典型草原、梁源典型草原和草甸草原 4 种草地植被类型,按草地类型组,对在同一气候条件下具有相似地表和土壤环境特征的草地,以样线法沿坡面水平方向,在 3 种类型调查测定中,对 22 个典型草地类型组,每组选择设置样地 3 hm²,封禁初期草地调查样方重复 6 次,样方面积为 1 m × 1 m,共调查样方 132 个;封禁草地调查样方重复 10 次,共调查样方 220 个;退化草地调查样方重复 6 次,共调查样方 132 个,试验共调查样方 484 个。同时对应进行活体植物、凋落物和根系测定与取样。

2.2 生物量测定

地上生物量测定 在 4 种草地类型各样方内,随机设置 1 m × 1 m 样方,齐地面剪取植株地上活体部分,称取鲜质量。然后,按比例取部分样品带回室内,进行植物干重及含碳量测定。

根系生物量测定与地上测定相对应,采用直径为 9 cm 的根钻,每 10 cm 为一层,取样至 100 cm。根系样

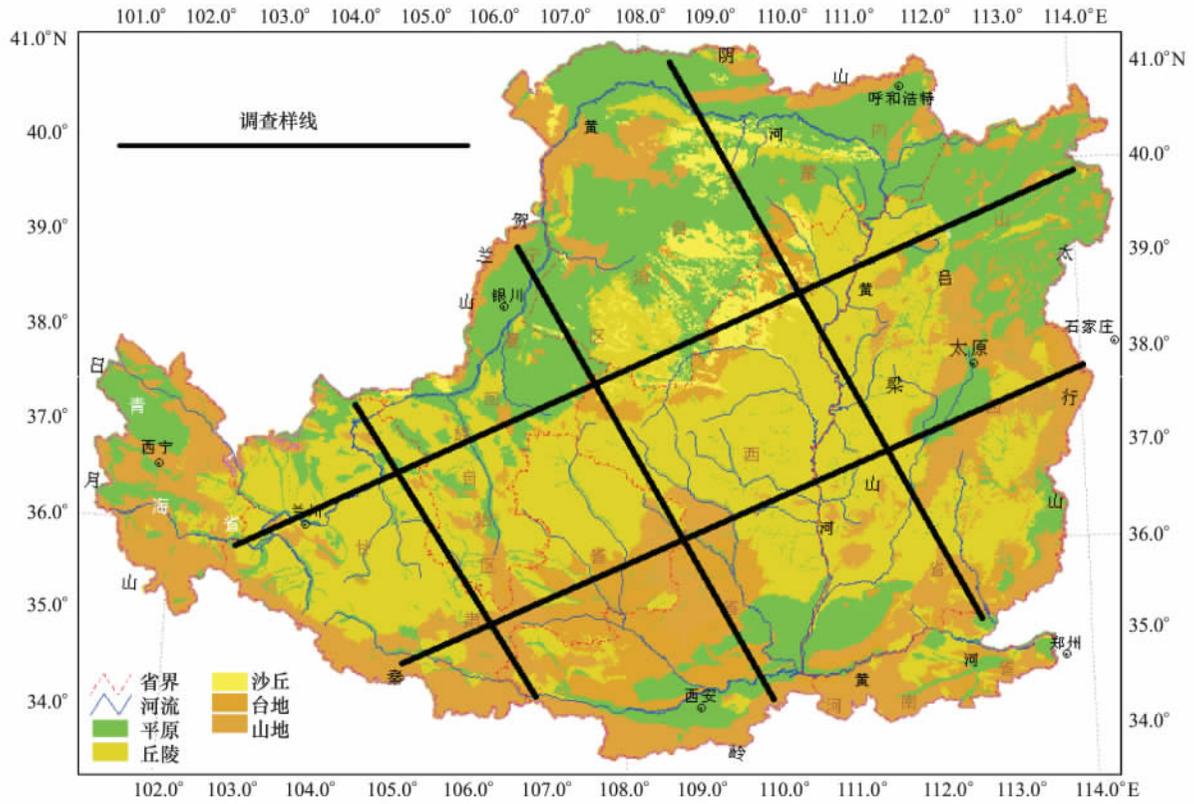


图1 黄土高原草地调查取样路线

Fig. 1 Sampling picture for grassland survey of Loess Plateau

品取回后,用铁筛经清水缓慢冲洗掉泥土,再用吸水纸吸取明水,阴晾后称取鲜重。其后将样品,在(70±5)℃烘箱烘干至恒重,再根据取样鲜重与总鲜重的比例换算单位面积生物量。

2.3 地表凋落物的现存测定

在4种草地类型中,与地上生物量的测定相对应,设置20 cm×20 cm的小样方,取地表凋落物的未分解层,带回实验室在(70±5)℃烘干,测定其现存量。

2.4 植被碳密度测定法

植被碳密度测定:植物体地上和地下部分碳密度测定估算公式为:

$$Cb = \alpha M \tag{1}$$

式中,Cb为植物体碳密度(t/hm²);M为地上部分(或地下部分)生物量(t/hm²);α为生物量中有机碳含量,一些学者采用0.45/0.5^[9,19-20]作为植被含碳量的估测值,本研究全部采用实测值。

2.5 统计分析

对所测定的数据采用Excel处理后,再利用SPSS 13.0软件进行平均值、标准差和单因素方差分析,并用最小显著差异法(LSD)进行多重比较。

3 结果与分析

3.1 草地碳储量变化特征

根据黄土高原不同草地类型对退化、封禁初期和封禁11a的草地平均碳密度和对应的草地类型面积,计算了黄土高原草地植被的碳储量(表2),研究中使用的黄土高原草地面积是以草地类型为单元的调查数据,4种草地类型的总面积为23.2523×10⁶ hm²,其中丘陵和梁塬典型草原类型分布面积最大,为14.002×10⁶ hm²,占黄土高原草地总面积的60.22%;其次是荒漠草原类型6.300×10⁶ hm²,占草地总面积的27.1%;草甸草原类型分布面积最小,为2.950×10⁶ hm²,占黄土高原草地总面积的12.69%。

表 2 不同类型草地植被碳储量变化

Table 2 Vegetation carbon storage changes among different types of grassland

草地类型 Grassland types	试验处理 Experiment treatments	碳储量 Carbon storage/(kg/hm ²)				年均碳储量 Mean carbon storage /(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)
		活体植物 Living plants	凋落物 Litter	根系 Roots	合计 Sum	
荒漠草原 Desert grassland	退化草地	130.2	20.4	303.2	453.8	453.8
	封禁初期草地	246.3	149.6	1278.6	1674.5	558.2
	封禁 11a 草地	1634.7	2082.9	3431.1	7148.7	714.9
丘陵典型草原 Hilly typical steppe	退化草地	269.7	43.9	662.0	975.6	975.6
	封禁初期草地	713.4	248.9	2646.5	3608.8	1202.9
	封禁 11a 草地	2371.8	3908.2	7225.7	13505.7	1350.6
梁源典型草原 Plateau typical steppe	退化草地	401.3	43.3	693.3	1137.9	1137.9
	封禁初期草地	1147.2	330.8	1018.9	2496.9	379.3
	封禁 11a 草地	3322.9	4571.3	7697.6	15591.8	1559.2
草甸草原 Meadow steppe	退化草地	475.9	87.4	794.0	1357.3	1357.3
	封禁初期草地	1312.4	312.9	2320.1	3945.4	1315.1
	封禁 11a 草地	4046.2	4803.2	12286.3	21135.7	2113.6

表 2 看出,黄土高原不同草地类型各处理间碳储量变化差异较大,总体变化趋势是封禁 11a 草地>封禁初期草地>退化草地。4 种草地类型间碳储量的年均变化趋势为草甸草原>梁源典型草原>丘陵典型草原>荒漠草原,这于其他作者的研究结果基本上吻合^[21-22]。

3.2 草地生物量与降雨量时空变异特征

黄土高原草地地上生物量的变化,无论是退化草地、封禁初期草地和封禁 11a 草地,均随经度和降雨量的逐渐增加,生物量表现出明显空间变异特征,即沿样带自西北向东南,生物量不仅出现明显上升趋势(图 2),且呈指数增长。4 种草地类型平均退化草地生物量与降雨量变化趋势为 $Y=31.0e^{0.0029x}$, $R^2=0.931$, $N=66$; 封禁初期草地为 $Y=33.7e^{0.0038x}$, $R^2=0.961$, $N=66$; 封禁 11a 草地为 $Y=187.6e^{0.0022x}$, $R^2=0.933$, $N=66$ 。

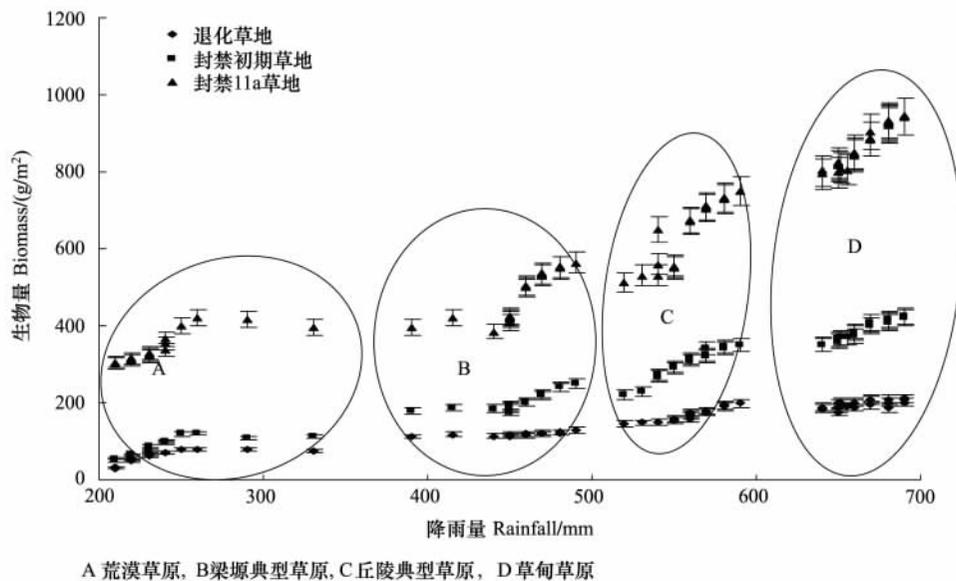


图 2 草地类型生物量与降雨量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of above-ground biomass and rainfall among different type of grassland

在荒漠草原,退化草地生物量为 $(58.30 \pm 16.2) \text{ g/m}^2$,封禁初期为 $(82.65 \pm 15.5) \text{ g/m}^2$,封禁 11a 为 $(367.10 \pm 46.6) \text{ g/m}^2$,分别是退化草地的 1.4 倍和 6.3 倍;丘陵典型草原,退化草地生物量为 (118.29 ± 19.6)

g/m^2 封禁初期为 $(220.71 \pm 54.5) \text{ g/m}^2$, 封禁 11a 为 $(456.57 \pm 72.6) \text{ g/m}^2$, 分别是退化草地的 1.87 倍和 3.86 倍; 梁源典型草原 退化草地生物量为 $(182.33 \pm 26.3) \text{ g/m}^2$, 封禁初期为 $(311.83 \pm 46.1) \text{ g/m}^2$, 封禁 11a 为 $(628.50 \pm 36.6) \text{ g/m}^2$, 分别是退化草地 1.7 倍和 3.45 倍; 草甸草原退化草地生物量为 $(198.25 \pm 34.3) \text{ g/m}^2$, 封禁初期为 $(399.0 \pm 36.2) \text{ g/m}^2$, 封禁 11a 为 $(875.55 \pm 44.3) \text{ g/m}^2$, 分别是退化草地的 2.01 倍和 4.42 倍。4 种草地类型生物量均随降雨量增加而增加, 并呈正相关关系, 变化差异为荒漠草原 < 丘陵典型草原 < 梁源典型草原 < 草甸草原。

根系生物量在退化草地、封禁初期和封禁 11a 草地与地上生物量均表现出相同趋势, 即沿草地测定样带自西北向东南, 随降雨量逐渐增加呈上升趋势, 并呈指数性增长 (图 3)。4 种草地类型平均, 在退化草地根系生物量与降雨量变化总趋势为 $Y = 133.4e^{0.0018x}$, $R^2 = 0.772$, $N = 66$; 封禁初期草地为 $Y = 258.6e^{0.0019x}$, $R^2 = 0.822$, $N = 66$; 封禁 11a 草地为 $Y = 449.2e^{0.0029x}$, $R^2 = 0.973$, $N = 66$ 。

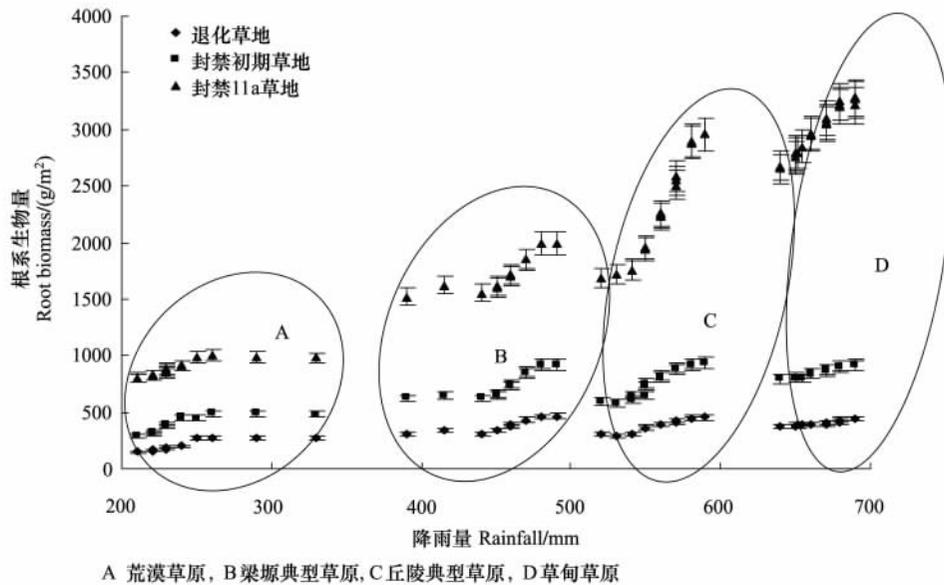


图 3 草地 0—100cm 根系生物量与降雨量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of root biomass (0—100cm) and rainfall

在荒漠草原类型, 退化草地根系生物量为 $(197.4 \pm 26.2) \text{ g/m}^2$, 封禁初期和封禁 11a 为 $(399.20 \pm 79.1) \text{ g/m}^2$ 和 $(904.80 \pm 67.3) \text{ g/m}^2$, 分别是退化草地 2.02 倍和 4.58 倍; 在丘陵典型草原, 退化草地为 $(400.0 \pm 62.1) \text{ g/m}^2$, 封禁初期和封禁 11a 为 $(792.29 \pm 72.25) \text{ g/m}^2$ 和 $(1799.2 \pm 200.1) \text{ g/m}^2$, 是退化草地 1.98 倍和 4.5 倍; 梁源典型草原, 退化草地为 $(377.0 \pm 52.3) \text{ g/m}^2$, 封禁初期和封禁 11a 为 $(809.83 \pm 79.23) \text{ g/m}^2$ 和 $(2279.0 \pm 139.1) \text{ g/m}^2$, 是退化草地 2.15 倍和 6.05 倍; 草甸草原退化草地为 $(409.5 \pm 34.3) \text{ g/m}^2$; 封禁初期和封禁 11a 为 $(848.0 \pm 56.2) \text{ g/m}^2$ 和 $(2988.25 \pm 167.2) \text{ g/m}^2$, 是退化草地 2.1 倍和 7.3 倍。4 种草地类型差异大小与地上生物量趋势相同, 也均与降雨量呈正相关关系。

3.3 草地活体植物碳密度对海拔梯度的响应

从图 4 可以看出, 沿海拔梯度草地活体植物碳密度随海拔降低而降低, 二者表现出显著的线性回归关系。封禁 11a 草地活体植物碳密度与海拔线性回归方程为: $Y = -0.126x + 4.219$, $R^2 = 0.7763$; 封禁初期草地为: $Y = -0.0583x + 1.498$, $R^2 = 0.8861$ 。封禁 11a 碳密度在荒漠草原最高为 1.92 t/hm^2 , 分别是封禁初期草地及退化草地 6 倍和 12 倍; 在丘陵典型草原最高为 2.88 t/hm^2 , 是 3.2 倍和 10.29 倍; 在梁源典型草原最高为 4.08 t/hm^2 , 是 3.26 倍和 8.5 倍; 在草甸草原最高为 4.41 t/hm^2 , 是 3.24 倍和 8.65 倍。

从图 5 看出, 沿海拔梯度草地根系碳密度也是随海拔降低而降低。封禁 11a 草地根系碳密度与海拔线性回归方程为: $Y = -0.4084x + 12.117$, $R^2 = 0.7544$, 封禁初期草地线性回归方程为: $Y = -0.0522x + 2.9081$, $R^2 =$

0.2504。草地封禁 11a 后,荒漠草原最高为 3.7 t/hm^2 ,是封禁初期草地和退化草地的 2.64 倍和 10.57 倍;丘陵典型草原最高为 7.83 t/hm^2 ,是 2.58 倍和 9.91 倍;梁源典型最高为 9.03 t/hm^2 ,是 2.79 倍和 9.82 倍;草甸草原最高为 12.99 t/hm^2 ,是 5.37 倍和 14.76 倍。由此看来 4 种草地类型中,草甸草原活体植物及根系碳密度均较高,其次是典型草原,荒漠草原碳密度含量较低。

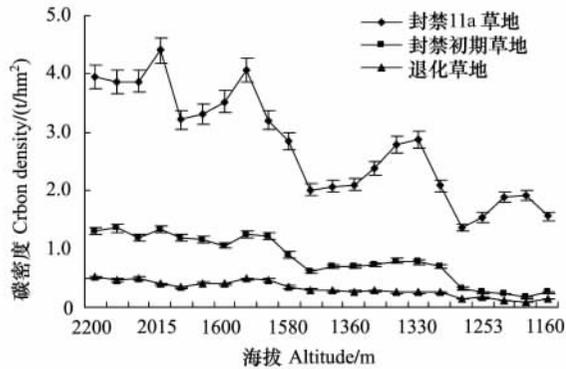


图4 草地活体植物碳密度与海拔梯度响应

Fig. 4 Response between carbon density and altitude gradient for living plants of grassland

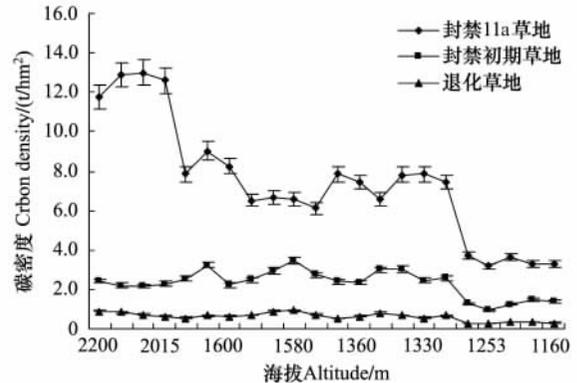


图5 草地0—100cm根系碳密度变化与海拔梯度响应

Fig. 5 Response between carbon density and altitude gradient for 0—100cm root of grassland

3.4 草地活体植物碳密度对降雨量的响应

黄土高原在经度 $106^{\circ}21'$ — $113^{\circ}36'$ 之间,随经度由西向东递增,年均降雨量(除局部受地形影响外)由 200 mm 逐渐增加到 680 mm 左右,气候由干旱向半干旱和半湿润过渡,年均温度范围约为 5.8 — 13.5 °C,因受纬度递增的影响,降雨量和温度逐渐上升,表明降水和温度是区域最重要的气候驱动因子。

从图 6 和图 7 可以看出,黄土高原无论是封禁初期还是封禁 11a 草地活体植物碳密度大部分集中在降雨量为 450—680 mm 左右,草地封禁初期和封禁 11a,活体植物碳密度变化受降雨量影响差异显著。荒漠草原样带主要分布在我国西北部,即甘肃景泰、宁夏中北部、鄂尔多斯高原西南部和陕西榆林部分地区,降雨量在 200—300 mm 范围,草地植被主要以短花针茅、蒙古冰草、甘草、细弱隐子草、沙生冰草和冷蒿等为主,封禁初期碳密度变化幅度为 0.16 — 0.32 t/hm^2 ,封禁 11a 为 1.37 — 1.92 t/hm^2 ,平均增长量为 0.14 — $0.19 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;丘陵和梁源典型草原,样带主要分布在我国中部青海东部、甘肃陇中陇东,宁夏南部、陕西中北部和山西中北部地区,在西部和东部样带还可看到与其它草地类型镶嵌分布,降雨量在 450—550 mm 左右,草地植被主要以本氏针茅、达乌里胡枝子、铁杆蒿、百里香、萎凌菜、厚穗冰草、香茅草和猪毛蒿等为主,草地封禁初期活体植物碳密度的变化幅度为 0.62 — 1.25 t/hm^2 ,封禁 11a 为 2.02 — 4.08 t/hm^2 ,平均增长量为 0.22 — $0.41 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;草甸草原样带主要分布在我国东南部及黄土高原局部山地,降雨量在 550—680 mm 左右,草地植被主要以白羊草、细叶苔草、大披针苔草、白颖苔草、垂穗披碱草和芦苇等为主,草地封禁初期碳密度变化幅度为 1.20 — 1.36 t/hm^2 ,封禁 11a 为 3.87 — 4.41 t/hm^2 ,平均增长量为 0.39 — $0.44 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,增长率和草地封禁初期较接近。

3.5 草地凋落物碳密度时空变异性

草地凋落物是维持草地养分平衡与草地持续生长的重要组成部分,也是重要的土壤碳库。黄土高原植被

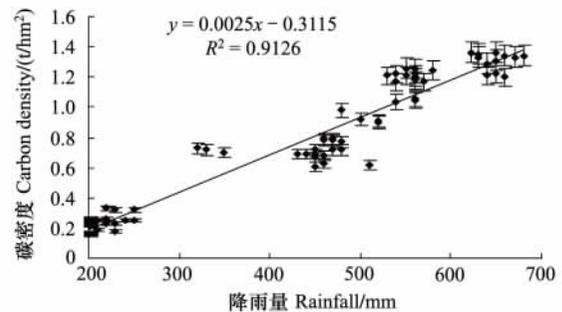


图6 封禁初期草地碳密度与降雨量变化

Fig. 6 Changes between carbon density and rainfall of initial enclosed grassland

通过封禁途径,大面积天然草地已得到恢复,草地生物量提高较快,对增加土壤碳储量发挥了重要作用。

表 3 显示,在黄土高原 4 大草原类 22 个类型组中,凋落物碳密度随封禁时间变化差异显著。在荒漠草原 5 个类型组中,封禁 11a 草地凋落物碳密度最高达 3.30 t/hm²,比封禁初期草地和退化草地分别提高了 14.75 倍和 65 倍;丘陵典型草原 7 个类型组中,封禁 11a 最高达 4.80 t/hm²,比封禁初期草地和退化草地提高 19.86 倍和 79 倍;梁源典型草原 6 个草原类型组中,封禁 11a 最高达 5.10 t/hm²,比封禁初期和退化草地提高 17.2 倍和 62.75 倍;在草甸草原 4 个类型组中,封禁 11a 最高达 5.55 t/hm²,比封禁初期草地和退化草地分别提高 14.9 倍和 49 倍。其总体变化规律与活体植物类似。

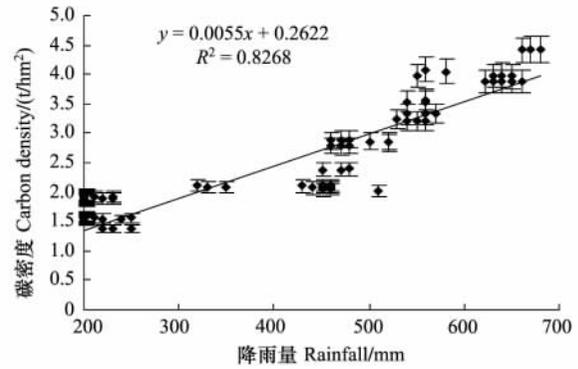


图 7 年草地碳密度与降雨量变化

Fig. 7 Changes between carbon density and rainfall of enclosed 11a grassland

表 3 不同草原植被类型组凋落物的碳密度

Table 3 Litter carbon density of different grassland vegetation types/(t/hm²)

草原类型 Grassland types	草原类型组 Row of grassland types	退化草地 Degeneration grassland	封禁初期草地 Initial enclosed grassland	封禁 11a 草地 Enclosed 11a grassland
荒漠草原类 Desert grassland	丛生禾草组	0.00	0.24±0.06 ^B	3.30±1.85 ^A
	强旱生小半灌木组	0.04±0.01 ^{Bb}	0.10±0.02 ^{Bb}	1.50±0.84 ^{Aa}
	旱生豆科灌木草组	0.05±0.00 ^{Bb}	0.12±0.03 ^{Bb}	1.70±1.00 ^{Aa}
	根茎禾草组	0.03±0.01 ^{Bb}	0.11±0.04 ^{Bb}	1.80±0.77 ^{Aa}
	旱生杂类草组	0.00	0.15±0.09 ^B	1.70±0.41 ^A
丘陵典型草原类 Hilly typical steppe	丛生禾草组	0.04±0.02 ^{Bb}	0.18±0.02 ^{Bb}	3.20±2.13 ^{Aa}
	1 年生禾草组	0.04±0.01 ^{Bb}	0.17±0.06 ^{Bb}	2.10±1.18 ^{Aa}
	根茎禾草组	0.05±0.01 ^{Bb}	0.18±0.06 ^{Bb}	4.30±0.44 ^{Aa}
	旱生豆科草组	0.00	0.18±0.24 ^B	4.80±0.96 ^A
	旱生蒿类小半灌木组	0.03±0.01 ^{Bb}	0.23±0.02 ^{Bb}	4.00±1.57 ^{Aa}
	旱生蒿类半灌木组	0.06±0.02 ^{Bb}	0.15±0.04 ^{Bb}	4.00±0.91 ^{Aa}
梁源典型草原类 Plateau typical steppe	旱生杂类草组	0.05±0.02 ^{Bb}	0.17±0.04 ^{Bb}	4.20±0.95 ^{Aa}
	低丛生禾草组	0.06±0.02 ^C	0.28±0.05 ^B	4.75±0.12 ^A
	旱生蒿类半灌木组	0.08±0.03 ^C	0.27±0.05 ^B	5.10±0.08 ^A
	旱生蒿类小半灌木组	0.05±0.02 ^{Bb}	0.22±0.06 ^{Bb}	4.91±0.48 ^{Aa}
	根茎禾草组	0.03±0.01 ^C	0.20±0.04 ^B	4.05±0.06 ^A
	旱生豆科草组	0.00	0.24±0.08 ^B	4.00±1.18 ^A
山地草甸草原 Mountain meadow steppe	旱生杂类草组	0.03±0.00 ^{Bb}	0.12±0.04 ^{Bb}	4.00±0.98 ^{Aa}
	中旱生蒿类半灌木组	0.11±0.02 ^C	0.35±0.02 ^B	5.55±0.02 ^A
	中生蒿类草组	0.10±0.02 ^C	0.34±0.03 ^B	4.15±0.08 ^A
	小型沙草组	0.06±0.01 ^C	0.29±0.03 ^B	3.25±0.17 ^A
	高丛生禾草组	0.05±0.02 ^C	0.24±0.02 ^B	4.60±0.33 ^A

小字母为差异显著水平 ($P < 0.05$), 大字母为差异极显著水平 ($P < 0.01$)

4 讨论

草地是世界上分布最广的植被类型之一,作为陆地生态系统的重要组成部分,参与了全球碳源/汇及碳循环过程,在全球气候变化中扮演着重要角色,并对其产生重大影响。早期草地生态系统碳循环过程研究主要集中在草地群落土壤呼吸和碳平衡方面。有关研究显示,中国草地碳主要储存在土壤中,是植被层的 13.5

倍。从地区上看,中国草地 85% 以上的有机碳分布于高寒和温带地区;从草地类型上分析,草原和草甸类型草地蓄积了全国草地有机碳的 2/3,而其他类型草地的碳储量很低^[20]。

4.1 黄土高原草地植被碳密度分布特征

本文通过典型草地调查测定,分析了目前黄土高原不同类型草地植物活体、凋落物和根系碳密度分布格局与地带性规律,阐述了影响草地碳密度分布的主要驱动因子及其作用机理,旨在突出草地碳密度研究的重要性,揭示其中存在的制约因素和不确定性,使碳密度研究能够更好地为政策措施制定提供依据。

诸多研究表明,草地植被碳密度沼泽草甸最高,其次为热带灌丛、稀树草原和温带草甸草原及暖温带灌丛,高山荒漠和温带荒漠最低^[21-23],黄土高原草地植被碳密度分布状况与全球草地分布规律基本上吻合。从黄土高原西北到东南随着经度和纬度及气候的变化,由此形成不同草地类型,受气候影响其植被盖度、生物多样性及生产力形成显著差异,致使南北草地碳密度存在明显异质性。从草地不同类型测定结果可以看出,在退化草地、封禁初期草地和封禁 11a 草地中,草地活体植物及根系的碳密度含量最高为草甸草原;其次为丘陵和梁塬典型草原;而荒漠草原碳密度含量较低。本区域草地植物碳密度变化差异,一是受海拔梯度的变化,直接影响到降雨量和温度的变化,加之封禁措施更有利于草甸草原群落中蒿类、蕨类及苔草类植物繁殖生长,并能大幅度增加草地生物量;二是随着人类活动干扰的加剧和未来气候变化及 CO₂ 的增加,在草甸草原生态系统碳循环中也会发生相应的变化;三是丘陵和梁塬典型草原类型为黄土高原草地的主体,虽然草地面积较大,但人为活动频繁,草地退化严重,只有通过封禁管理途径,才使草原碳密度增加幅度较大;四是荒漠草原受海拔、温度和干旱等气候影响,空气干燥度大,土壤水分亏缺,抑制了生物量的提高,直接影响碳密度的增加。

4.2 影响草地生态系统生物量和碳密度的主要气候因子与作用机理

黄土高原由于温度和降水在很大程度上直接影响着植物生产力和草地生物量组成,而单位面积草地生物量与碳密度显著相关,所以温度和降水也是限制黄土高原草地碳密度空间分布格局的重要因子。但草地生物量和碳密度的大小是由光照、温度、降水等多个因子共同决定的,各因子的影响程度由于受植物物种和其生长阶段的不同也有差异^[21],所以在草地植被碳密度的研究中不能单纯考虑某一个因子^[20-24],在水热因子组合适宜的地区,有利于草地植物生长,生物量增长较快,草地凋落物积累也相应增大,成为草地碳密度的主要组成部分。草地上的植被和大气中的 CO₂ 通过同化作用形成 GPP,再经过植物自身的呼吸作用、动物的呼吸作用、植物根部的呼吸作用消耗掉大部分能量,积累了少部分能量,并释放出 CO₂ 到大气,形成草地生态系统碳循环全过程。这个过程包含了草食动物的碳摄取、碳蓄积、碳排放的 3 个主要环节^[25]。

草地退化与过渡放牧利用,使草地土壤裸露,表层土壤有机质与大气 CO₂ 充分接触,致使土壤温度增高的方法之一,并使天然降水量由间接利用转化为直接吸收,极大地增强了土壤的呼吸作用,可使草地土壤中的大量碳释放到大气中^[26]。但在黄土高原地区不足 10 个纬度和 15 个经度范围内,形成复杂多变的气温、降水和光照等气候及不同区域的地形地貌环境条件,直接影响到草地活体植物生物量形成、凋落物积累及其碳密度的水平地带性分布,并非是简单地仅按经度与纬度以西北或东南向排列,总体分布趋势是由西北荒漠草原向东南典型草原到草甸草原变化,基本是随纬度升高而增加,这是黄土高原草地碳密度分布格局应有的特点。

同时,草地植物生物量和碳密度的大小,应综合考虑不同气候区和草地生态系统类型,在黄土高原多变气候的综合作用下,植物系统各组分碳密度与其生物量有相同的变化趋势。在退化草地、封禁初期草地和 11a 封禁草地植物各系统碳密度与生物量的变化虽差异较大,但各草地类型组分的变化总体趋势相同,同时,封禁技术可大幅度增加草地植被碳储量(表 4)。

通过提高人类管理来提高草地土壤质量和地上生物量水平,增加草地生态系统的碳储量,是一种低成本的固碳减排途径^[19],但是各种管理活动的影响过程和程度却各不相同^[27-28]。因而,以 CO₂ 减排与增汇为目的,进行草地生态系统科学规范化管理,促进我国生存环境的改善及履行气候变化公约,保证社会经济的高速发展,是我国政府当前迫切需要解决的重要问题。科学地回答这些国家关心的重大问题,关键就在于正确地认识和把握气候变化和人类活动引起的草地生态系统类型转变,特别是退耕还林(草)政策实施所恢复和重

建的陆地生态系统碳循环的生态学过程、机制及其与环境的相互作用机理,揭示这些生态系统的生产力及其土壤 CO₂排放的动态规律,准确地评估这些生态系统的碳源/汇及其固碳潜力^[20],具有重要的现实意义。

表 4 不同草地植被类型的总碳密度

Table 4 Total carbon density of different types of grassland vegetations

草地类型 Grassland types	试验处理 Experiment treatment	平均碳密度 Mean carbon density / (t/hm ²)				年均碳密度 Mean carbon density /(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)
		活体植物 Living plants	凋落物 litter	根系 Roots	合计 Sum	
荒漠草原 Desert grassland	I	0.131±0.03 ^{Bb}	0.040±0.01 ^{Bb}	0.306±0.05 ^B	0.477	0.477
	II	0.242±0.03 ^B	0.144±0.03 ^{Bb}	1.262±0.07 ^B	1.648	0.549
	III	1.656±0.12 ^A	2.000±0.06 ^{Aa}	3.410±0.37 ^A	7.066	0.707
丘陵典型草原 Hilly typical steppe	I	0.270±0.02 ^C	0.045±0.02 ^{Bb}	0.654±0.11 ^{Aa}	0.969	0.969
	II	0.713±0.07 ^B	0.180±0.06 ^{Bb}	2.647±0.21 ^B	3.540	0.885
	III	2.333±0.15 ^A	3.800±0.19 ^{Aa}	7.300±0.33 ^A	8.080	0.808
梁源典型草原 Plateau typical steppe	I	0.408±0.05 ^C	0.050±0.01 ^C	1.947±0.04 ^A	2.355	2.355
	II	1.132±0.13 ^B	0.222±0.06 ^B	2.813±0.26 ^B	4.167	1.389
	III	3.368±0.22 ^A	4.468±0.06 ^A	7.483±0.65 ^{Aa}	15.319	1.532
山地草甸草原 Mountain meadow steppe	I	0.473±0.05 ^C	0.080±0.01 ^C	0.768±0.05 ^A	1.321	1.321
	II	1.303±0.11 ^B	0.305±0.03 ^B	2.218±0.27 ^B	3.826	1.913
	III	4.031±0.18 ^A	4.388±0.26 ^A	12.563±0.86 ^A	20.982	2.100

I: 退化草地; II: 封禁初期草地; III: 封禁 11a 草地

5 结论

(1) 黄土高原荒漠草原、丘陵典型草原、梁源典型草原和草甸草原封禁 11a 草地,地上生物量年增长量分别为 36.71、45.66、62.85、87.56 g·m⁻²·a⁻¹,地下生物量年增长量分别为 90.48、179.92、227.90、298.83 g·m⁻²·a⁻¹。

(2) 封禁 11a 草地活体植物碳密度,在荒漠草原最高为 0.192 t·hm⁻²·a⁻¹,是封禁初期草地的 6 倍;丘陵典型草原最高为 0.288 t·hm⁻²·a⁻¹,是封禁初期的 3.2 倍;梁源典型草原最高为 0.408 t·hm⁻²·a⁻¹,是封禁初期草地的 3.26 倍;草甸草原碳密度最高为 0.441 t·hm⁻²·a⁻¹,是封禁初期草地的 3.24 倍。

(3) 封禁 11a 草地凋落物碳密度,在荒漠草原最高达 0.330 t·hm⁻²·a⁻¹,比退化草地提高了 65 倍;丘陵典型草原达 0.480 t·hm⁻²·a⁻¹,比退化草地提高了 79 倍;梁源典型草原达 0.510 t·hm⁻²·a⁻¹,比退化草地提高了 62.75 倍;草甸草原最高达 0.555 t·hm⁻²·a⁻¹,比退化草地提高了 49 倍。

(4) 封禁 11a 草地类型的活体植物、凋落物和 0—100 cm 根系年平均碳密度变化为:草甸草原>梁源典型草原>丘陵典型草原>荒漠草原。

References:

- [1] Fan J W, Zhong H P, Liang B, Shi P L, Yu G R. Carbon stock in grassland ecosystem and its affecting factors. *Grassland of China*, 2003, 25 (6): 51-58.
- [2] Li Y W, Wang N, Sun Y. Carbon circulation in forest soil under elevated CO₂ concentration. *Journal of Northeast Forestry University*, 2007, 35 (7): 64-73.
- [3] WBGU. The Accounting of Biological Sinks and Sources Under the Kyoto Protocol. Special Report. Berlin: German Advisory Council on Global Change, 1998.
- [4] Xiao S S, Dong Y S, Qi Y C, Peng Q, He Y T, Yang Z J. Advance in responses of soil organic carbon pool of grassland ecosystem to human effects and global changes. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(10): 1138-1148.
- [5] Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Carbon pools in terrestrial ecosystems in China//Wang G C, Wen Y P, eds. *Monitoring and Relevant Process of Greenhouse Gas Concentration and Emission*. Beijing: China Environmental Science Press, 1996: 109-128.
- [6] Cheng J M, Wan H E. *Vegetation Construction and Soil and Water Conservation in Loess Plateau of China*. Beijing: China Forestry Press, 2002.

- [7] Fu B J , Chen L X , Ma K M , Wang Y L. Landscape Ecology Principles and Applications. Beijing: Science Press ,2001.
- [8] Li K R , Wang S Q , Cao M K. Vegetation and soil carbon storage in China. Science in China Series D ,2003 ,33(1) : 72-80.
- [9] Hu J Z. Carbon storage of artificial forests in rehabilitated lands in the upper reaches of the Yellow River. Journal of Beijing Forestry University , 2005 ,27(6) : 1-8.
- [10] Parton W J , Schimel D S , Cole C V , Ojima D S. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. Soil Science Society of America Journal ,1987 ,51(5) : 1173-1179.
- [11] Qi Y C , Dong Y S , Geng Y B , Yang X H , Geng H L. The progress in the carbon cycle researches in grassland ecosystem in China. Progress in Geography ,2003 ,22(4) : 342-352.
- [12] Don A , Schulze E D. Controls on fluxes and export of dissolved organic carbon in grasslands with contrasting soil types. Biogeochemistry ,2008 ,91(2/3) : 117-131.
- [13] IPCC. Land-Use , Land-Use Change , and Forestry. Cambridge , New York: Cambridge University Press ,2000.
- [14] Post W M , Izaurralde R C , Mann L K , Bliss N. Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil. Climatic Change ,2001 ,51(1) : 73-99.
- [15] Han S J , Dong Y S , Cai Z C , Song C C. Chinese Terrestrial Ecosystem Carbon Cycle in the Biogeochemical Processes. Beijing: Science Press ,2008.
- [16] Li L H , Chen Z Z. The global carbon cycle in grassland ecosystems and its responses to global change I . Carbon flow compartment model , inputs and storage. Chinese Bulletin of Botany ,1998 ,15(2) : 14-22.
- [17] He Q T. Preliminary estimates of solar energy utilization by plant biomass method. Journal of Beijing Forestry University ,1986 ,8(3) : 52-59.
- [18] Ma Q Y , Chen X L , Wang J , Lin C , Kang F F , Cao W Q , Ma Z B , Li W Y. Carbon content rate in constructive species of main forest types in northern China. Journal of Beijing Forestry University ,2002 ,24(5/6) : 96-100.
- [19] Chang R Y , Tang H P. Sensitivity analysis on methods of estimating carbon sequestration in grassland ecosystem of Inner Mongolia , China. Journal of Plant Ecology ,2008 ,32(4) : 810-814.
- [20] Zhong H P , Fan J W , Yu G R , Han B , Hu Z M , Yue Y Z , Liang B. Progress of carbon cycle research in grassland ecosystem. Acta Agrestia Sinica ,2005 ,13(Z1) : 67-73.
- [21] Lu C Q , Sun S C. A review on the distribution patterns of carbon density in terrestrial ecosystems. Acta Phytocologica Sinica ,2004 ,28(5) : 692-703.
- [22] Ni J. Carbon storage in terrestrial ecosystems of China: estimates at different spatial resolutions and their responses to climate change. Climatic Change ,2001 ,49(3) : 339-358.
- [23] Li L H , Chen Z Z. Changes in soil carbon storage due to over-grazing in *Leymus chinensis* steppe in the Xilin river basin of Inner Mongolia. Journal of Environmental Science ,1997 ,9(4) : 486-490.
- [24] Su Y Z , Zhao H L. Influences of grazing and enclosure on carbon sequestration in degraded sandy grassland , Inner Mongolia , North China. Chinese Journal of Environmental Science ,2003 ,24(4) : 23-28.
- [25] Wang C Q , Meng X M , Zhang X G , Xia D D. Progress studies on carbon budget/carbon cycle in terrestrial ecosystem. Resource Development and Market ,2009 ,25(2) : 165-171.
- [26] Risser P G , Birney E C , Blocker H D. The True Prairie Ecosystem. Stroudsburg: Hutchinson Ross ,1981.
- [27] Zhou M H , Cheng J M , Wang H E , Wang L X , Zhao L P. Distribution characteristics of the root system of the *Stipa bungeana* Trin. community in Yunwu Mountain. Acta Agrestia Sinica ,2008 ,16(3) : 267-271.
- [28] Jia X N , Cheng J M , Wang H E. Effects of enclosure on the community characteristics of *Stipa bungeana* grassland in Yunwu Mountain. Acta Agrestia Sinica ,2008 ,16(3) : 272-277.

参考文献:

- [1] 樊江文, 钟华平, 梁隼, 石培礼, 于贵瑞. 草地生态系统碳储量及其影响因素. 中国草地, 2003, 25(6) : 51-58.
- [2] 李玉文, 王楠, 孙玥. CO₂ 体积分数升高条件下森林土壤的碳循环. 东北林业大学学报, 2007, 35(7) : 64-73.
- [4] 肖胜生, 董云社, 齐玉春, 彭琴, 何亚婷, 杨智杰. 草地生态系统土壤有机碳库对人为干扰和全球变化的响应研究进展. 地球科学进展, 2009, 24(10) : 1138-1148.
- [5] 方精云, 刘国华, 徐篙龄. 中国陆地生态系统的碳库//王庚臣, 温玉璞. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.

出版社, 1996: 109-128.

- [6] 程积民, 万惠娥. 中国黄土高原植被建设与水土保持. 北京: 中国林业出版社, 2002.
- [7] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 王仰麟. 景观生态学原理及应用. 北京: 科学出版社, 2001.
- [8] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量. 中国科学 D 辑, 2003, 33(1): 72-80.
- [9] 胡建忠. 黄河上游退耕地人工林的碳储量研究. 北京林业大学学报, 2005, 27(6): 1-8.
- [11] 齐玉春, 董云社, 耿元波, 杨小红, 耿会立. 我国草地生态系统碳循环研究进展. 地理科学进展, 2003, 22(4): 342-352.
- [15] 韩士杰, 董云社, 蔡祖聪, 宋长春. 中国陆地生态系统碳循环的生物地球化学过程. 北京: 科学出版社, 2008.
- [16] 李凌浩, 陈佐忠. 草地生态系统碳循环及其对全球变化的响应 I. 碳循环的分室模型、碳输入与贮量. 植物学通报, 1998, 15(2): 14-22.
- [17] 贺庆棠. 用生物量法对植物群体太阳能利用率的初步估算. 北京林业大学学报, 1986, 8(3): 52-59.
- [18] 马钦彦, 陈遐林, 王娟, 蔺琛, 康峰峰, 曹文强, 马志波, 李文宇. 华北主要森林类型建群种的含碳率分析. 北京林业大学学报, 2002, 24(5/6): 96-100.
- [19] 常瑞英, 唐海萍. 草原固碳量估算方法及其敏感性分析. 植物生态学报, 2008, 32(4): 810-814.
- [20] 钟华平, 樊江文, 于贵瑞, 韩彬, 胡中民, 岳燕珍, 梁颀. 草地生态系统碳循环研究进展. 草地学报, 2005, 13(增刊): 67-73.
- [21] 吕超群, 孙书存. 陆地生态系统碳密度格局研究概述. 植物生态学报, 2004, 28(5): 692-703.
- [24] 苏永中, 赵哈林. 持续放牧和围封对科尔沁退化沙地草地碳截存的影响. 环境科学, 2003, 24(4): 23-28.
- [25] 王春权, 孟宪民, 张晓光, 夏丹丹. 陆地生态系统碳收支/碳平衡研究进展. 资源开发与市场, 2009, 25(2): 165-171.
- [27] 周梦华, 程积民, 万惠娥, 王丽学, 赵凌平. 云雾山本氏针茅群落根系分布特征. 草地学报, 2008, 16(3): 267-271.
- [28] 贾晓妮, 程积民, 万惠娥. 封育对云雾山本氏针茅草地群落的影响. 草地学报, 2008, 16(3): 272-277.