

黄土高原草地植被与土壤固碳量研究

程积民^{1,2}, 程 杰², 杨晓梅¹

(1. 西北农林科技大学 动物科技学院 陕西 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 陕西 杨凌 712100)

摘要: 在黄土高原自东南向西北, 采用样带多点调查与定位监测相结合的研究方法, 系统分析了不同草地类型封禁初期和封禁 11 a 草地生物量与固碳量变化特征。结果表明: 4 种草地类型地上活体植物、凋落物/地下活体根系和土壤中碳密度与碳储量分布规律均为森林草原 > 梁塬典型草原 > 丘陵典型草原 > 荒漠草原; 草地封禁 11 a, 地上活体植物、凋落物、0~100 cm 活体根系和土壤中碳密度总量 森林草原类型为 63.38~97.65 t·hm⁻², 梁塬典型草原类型为 49.04~68.80 t·hm⁻², 丘陵典型草原类型为 52.33~62.11 t·hm⁻², 荒漠草原类型为 11.93~19.62 t·hm⁻²; 碳储量 4 种草地类型分别为 230.287 7 Tg C、332.306 7 Tg C、484.055 5 Tg C 和 113.856 3 Tg C; 黄土高原草地总固碳量为 573.10 Tg C, 其中: 活体植物为 42.89 Tg C, 占总固碳量的 7.48%; 凋落物为 80.40 Tg C, 占 14.03%; 活体根系为 108.66 Tg C, 占 18.96%; 土壤为 341.15 Tg C, 占 59.53%。这充分表明, 封禁不仅能使草地植被快速恢复和生物量增加, 而且也是提高草地固碳潜力的一条重要途径。

关键词: 黄土高原; 天然草地; 固碳量; 碳密度

中图分类号: Q948.15 文献标志码: A 文章编号: 1000-3037(2011)03-0401-11

草地是全球最大的陆地生态系统,也是调节气候变化和维持生态系统平衡的重要类型,目前在世界范围内,草地约占陆地总面积的 20%,在我国各类草地面积约为 4×10^8 hm²,占到土地总面积的 40% 以上^[1],黄土高原地区草地面积达 0.232×10^8 hm²,占其土地其总面积的 33%^[2]。20 世纪 60—70 年代,黄土高原集中连片万亩(约 666.67 hm²)以上分布的草地达 236 处,但在长期的过度放牧、乱垦乱挖和人为破坏下,草地退化严重,目前草地植被多以与农林地镶嵌分布为主,666.67 hm² 以上集中连片分布的草地不足 30 处,且以典型草原类型为主,占黄土高原草地总面积的 65%。同时,以本氏针茅(*Stipa bungeana*)为建群种所组成的地带性群落占据优势,是欧亚大陆草原区最典型的地带性植被群落^[3],也是黄土高原地带性草原植被的主体,具有较强的自然恢复与水土保持功能。但多年来由于受气候、地形和土壤条件的地带性分异影响,黄土高原草原植被从东南到西北,由森林草原、典型草原到荒漠草原形成具有明显的地带性分布特征^[4]。

草地对全球气候变化、生态系统平衡、减少大气中 CO₂ 的排放和碳汇做出了重要贡献,近年来,对碳密度和碳储量的研究主要以估算和模型推断为主,多集中于农田、森林、土壤等方面,而对草地碳汇和碳源的研究报导较少,尤其是对黄土高原不同草地类型碳密度和固碳

收稿日期: 2010-06-08; 修订日期: 2010-09-21。

基金项目: 国家重点实验室基金(10502-Z8)资助项目; 中国科学院重要方向项目(KZCX2-YW-441、KZCX2-YW-149); 国家重点基础研究发展计划 973 项目(2007CB106803); 国家自然科学基金重点项目(40730631)。

第一作者简介: 程积民(1955-) 陕西人,研究员,主要从事草地生态与恢复生态学研究。E-mail: gyzcjm@ms.iswc.ac.cn

量的定位监测研究起步较晚,目前尚未见到系统报导。为此,本文采用样带法覆盖黄土高原草地植被的取样方法,对不同地带的草地类型进行系统调查与监测研究,以期揭示黄土高原草地植被固碳潜力及其速率。

1 研究区概况及样地选择

研究采样地点覆盖黄土高原(35°12′~39°38′N,106°21′~113°36′E),选择SW-NE样线两条、SE-NW样线3条,囊括森林草原、典型草原和荒漠草原3个类型,穿过海拔1250~2650 m,经过干旱一半干旱一半湿润区气候带,平均年降水量220~630 mm,年均潜在蒸发量1860 mm,年均气温5.8~13.5℃(表1)。

表1 采样点气候与植物分布状况

Table 1 Climate conditions and plant distribution of sampling points

草地类型	面积 /10 ⁴ hm ²	海拔 /m	降雨量 /mm	平均气 温/℃	干燥 度	≥10℃积 温/(℃·d)	盖度 /%	物种密度 /(种/m ²)	草地生物量 /(kg/m ²)
森林草原类 4个类型组 每组n=66	295.00	2200	630	5.8	1.0~ 1.5	1900.3	37.5 ^① 85.2 ^②	12.1±2.1 ^{ab①} 26.5±1.51 ^{abA②}	0.36±0.11 ^{aA①} 1.12±0.23 ^{abA②}
梁塬典型草原类 6个类型组 每组n=66	554.33	1560	540	13.5	2.0~ 2.5	2259.7	35.6 ^① 82.5 ^②	11.1±2.1 ^{ab①} 24.8±0.75 ^{abA②}	0.36±0.16 ^{aA①} 1.02±0.21 ^{abA②}
丘陵典型草原类 7个类型组 每组n=66	845.90	1350	450	7.2	2.0~ 2.5	2850.2	32.5 ^① 78.5 ^②	9.2±1.6 ^{abA①} 18.3±2.1 ^{abAB②}	0.38±0.21 ^{abA①} 0.98±0.19 ^{aA②}
荒漠草原类 5个类型组 每组n=66	630.00	1250	220	6.5	2.5~ 3.0	2650.5	26.2 ^① 51.6 ^②	4.3±0.85 ^{abA①} 12.2±1.55 ^{abAB②}	0.15±0.04 ^{abA①} 0.64±0.11 ^{aA②}

注:小写字母为差异达显著水平($P < 0.05$),大写字母为差异达极显著水平($P < 0.01$);①表示封禁前;②表示封禁11 a。

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进行定位测定。草地建群种和优势种为本氏针茅、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(*Penniset umcentrasiaticum*)、芦苇(*Phragmites communis*)、拂子茅(*Calamagrostis epigeios*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、猪毛蒿(*A. scoparis*)、黄蒿(*A. scoparia*)、冷蒿(*A. 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(*Mellissit usruthenicus*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、草木犀状黄芪(*Astragalus. melilotoides*)、大披针苔草(*Carex lanceolata*)等一年生和多年生草本,还有少量灌木和半灌木,如小叶锦鸡儿(*Caraganda microphylla*)等。

2 试验样地布设与测定方法

2.1 试验样地布设

试验从国家退耕还林草封山禁牧前的1999年(封禁前)开始到其后2009年(封禁11 a),在黄土高原的森林草原类、梁塬典型草原类、丘陵典型草原类和荒漠草原类,选择了22个典

型草地类型组, 每组选择代表性样地 3 处, 面积各 1 hm^2 , 设置四大调查测定内容(地上活体植物、凋落物、地下活体根系、土壤) 进行生物量和有机碳等测定。各类型在具有相似的土壤状况和气候条件下, 在代表性样地内地势相对平坦处, 按样线法沿坡向水平方向设置取样面积为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的小样方 10 个(图 1)。

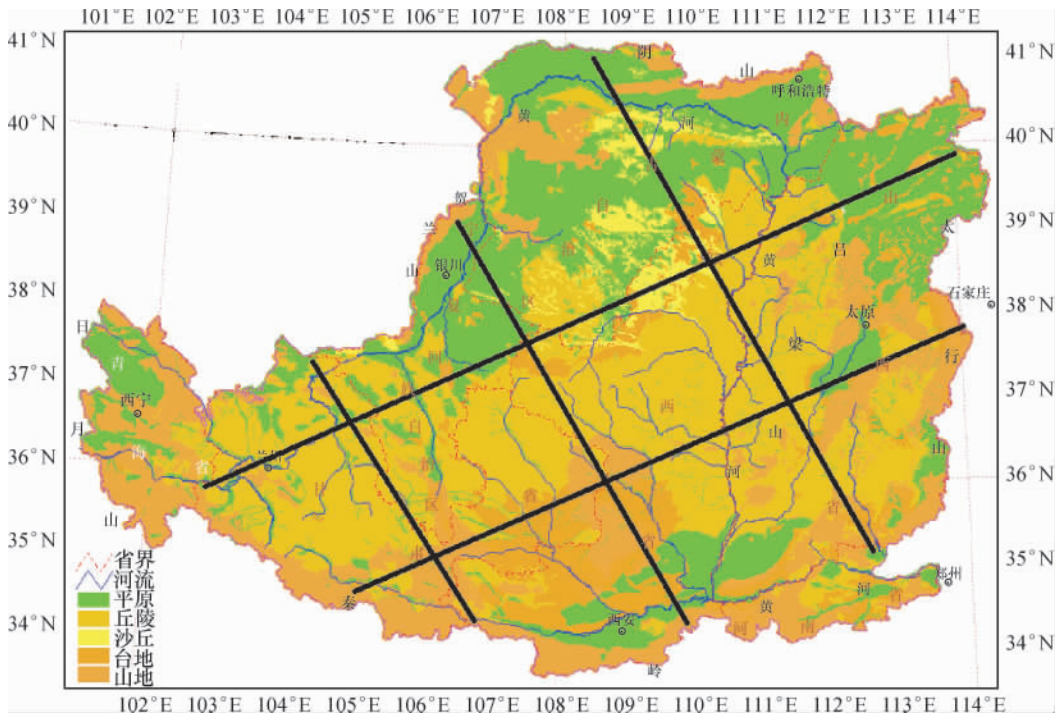


图 1 黄土高原草地调查取样路线

Fig. 1 Sampling route for grassland survey on the Loess Plateau

2.2 生物量的测定

在四大草地类型中, 地上生物量的测定, 在各样方内随机设置 10 个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的小样方, 剪取植株地上活体部分, 称取鲜质量, 重复 5 次。

根系部分生物量测定与地上部分相对应, 采用直径为 9 cm 的根钻, 选取 5 个样地, 每个样地取样深度为 0 ~ 100 cm, 每 20 cm 为一层取样, 共 5 层, 每层重复 5 次, 并将相同层次分别混合为一个样品, 共取 25 个样品, 为 125 个样次; 根系样品取回后经清水洗去泥土后阴干称取鲜重。地上和地下取样分别在 $70 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒重, 然后再根据取样鲜重与总鲜重的比例换算单位面积地上和地下部分生物量。

2.3 地表凋落物的现存量测定

在四大草地类型中, 与地上生物量的测定相对应, 设置 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 的小样方, 重复 6 次, 对地表凋落物按未分解层取样, 带回实验室在 $70 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干测定其现存量。

2.4 土壤样品采集与分析

与地上生物量测定相对应的每个样地内用直径 2.5 cm 土钻, 选取 3 个样地, 每个样地取样深度为 0 ~ 100 cm, 每 10 cm 为一层取样, 共 10 层, 每层重复 5 次, 并将相同层次分别混合为一个样品, 共取 30 个样品, 为 150 个样次, 然后用环刀取原状土测定各层土壤容重。将土样带回实验室, 自然风干后, 研磨、过筛处理。在测定生物量和地表凋落物的同时采集植

物样品,有机碳含量测定采用 $K_2Cr_2O_7$ 容量法测定^[5]。

2.5 碳储量的计算

不同组分生物量与其碳含量的乘积为各组分碳储量,草本植物、凋落物、活体根系和土壤有机碳储量之和为草地生态系统总碳储量。其中,土壤有机碳储量的计算公式为^[5]:

$$C_s = \sum C_i \times R_i \times D_i \quad (1)$$

式中: C_s 为土壤有机碳储量 (t/hm^2); C_i 为第 i 层土壤有机碳含量 (%); R_i 为第 i 层土壤容重 (g/cm^3); D_i 为第 i 层的土层厚度 (cm)。

2.6 固碳量估算

采用碳储量变化法:依据草地生态系统在禁牧措施实施前后碳储量差值来估算草地禁牧的固碳量。计算公式为^[6]:

$$\Delta C = (C_t - C_0) \times A \quad (2)$$

式中: ΔC 为草地生态系统碳储量变化量 ($Mg C$); C_0 为禁牧时的草地碳储量 ($Mg C/hm^2$); C_t 为禁牧 t 年后草地的碳储量 ($Mg C/hm^2$); A 为草地面积 (hm^2)。

2.7 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,显著性检验水平为 $P=0.05$,并用最小显著差异法 (LSD) 进行多重比较。

3 结果与分析

3.1 草地类型碳密度的异质性

黄土高原由东南向西北分布有森林草原、典型草原和荒漠草原类型,受气候的影响形成的地带性植被分布较为稳定,但草地碳密度不同类型的变化差异显著,其碳密度的大小是由光照、温度、降水等多个因子共同决定的,各因子的影响程度受草地物种和其生长阶段的不同也有差异^[7-9]。

1999 年以前黄土高原由于受开垦和过度放牧的影响,导致草原生态系统有机碳大量损失,结合国家退耕还林草和封山禁牧工程的实施,通过 10 a 的封禁与自然恢复,草地生态系统得到了全面休养生息,到 2009 年由于草地覆盖度和生物量的大幅度提高,草地活体植物、凋落物、活体根系和土壤中的碳密度差异显著。由表 2 看出,草地封禁初期碳密度总计在地上活体植物、凋落物、活体根系和土壤中的变化幅度,森林草原地带 4 种类型共为 $33.98 \sim 42.69 t \cdot hm^{-2}$,梁源典型草原地带 6 种类型为 $27.13 \sim 37.41 t \cdot hm^{-2}$,丘陵典型草原地带 7 种类型为 $25.27 \sim 35.68 t \cdot hm^{-2}$,荒漠草原地带 5 种类型为 $6.17 \sim 11.39 t \cdot hm^{-2}$ 。从表 3 看出,草地经过 10 余年的封禁恢复与自然修复,碳密度在地上活体植物、凋落物、活体根系和土壤中的总计变化幅度,森林草原地带 4 种类型为 $63.38 \sim 97.65 t \cdot hm^{-2}$,梁源典型草原地带 6 种类型为 $49.04 \sim 68.80 t \cdot hm^{-2}$,丘陵典型草原地带 7 种类型为 $52.33 \sim 62.11 t \cdot hm^{-2}$,荒漠草原地带 5 种类型为 $11.93 \sim 19.62 t \cdot hm^{-2}$,比封禁初期分别提高 101.5%、82.58%、87.77% 和 79.73%,碳密度在地上活体植物、凋落物、活体根系的年增长率分别为 6.22%、6.08%、6.29% 和 2.46% $t \cdot hm^{-2} \cdot a$ 。另外从碳密度在草地各器官的大小可看出,在封禁初期 4 种草地类型均表现出相同的变化趋势,其排序为土壤 > 活体根系 > 活体植物 > 凋落物,经过 10 余年封禁,4 种草地类型的排序变为土壤 > 活体根系 > 凋落物 > 活体植物,表明通过较长时间的封禁,草地凋落物大量积累,一方面覆盖地面积蓄与调节天然降雨,增加土壤水分,另

一方面大量的凋落物通过转化进入土壤形成有机质 增加土壤养分。因此 过度放牧使草地初级生产力降低 家畜采食减少了碳素由植物凋落物向土壤中的输入 且促进了草地土壤的呼吸作用 从而加速碳素从土壤向大气的释放 致使表层土壤 0~20 cm 中碳素的贮存量降低。如内蒙古锡林河流域羊草草原的研究结果表明 40 a 来过度放牧使表层土壤 0~20 cm 中碳的贮存量降低了 12.4%^[10]。

表 2 黄土高原封禁初期草地生态系统碳密度

Table 2 Carbon density of initial enclosed grassland ecosystem on the Loess Plateau

草地类型	碳密度/(t·hm ⁻²)				总计
	活体植物	凋落物	活根系 0~100 cm	土壤 0~100 cm	
I 森林草原类					
I-1 中旱生蒿类半灌木组	1.31 ± 0.10 ^B	0.35 ± 0.02 ^B	2.42 ± 0.24 ^B	29.90 ± 3.33 ^B	33.98
I-2 中生蒿类草本组	1.36 ± 0.11 ^B	0.34 ± 0.03 ^B	2.20 ± 0.13 ^B	34.39 ± 4.32 ^B	38.29
I-3 小型沙草组	1.20 ± 0.16 ^B	0.29 ± 0.03 ^B	2.16 ± 0.22 ^B	33.57 ± 1.56 ^B	37.22
I-4 高丛生禾草组	1.34 ± 0.12 ^B	0.24 ± 0.02 ^B	2.27 ± 0.17 ^B	38.84 ± 3.12 ^B	42.69
II 梁源典型草原类					
II-5 低丛生禾草组	1.20 ± 0.07 ^B	0.28 ± 0.05 ^B	2.54 ± 0.20 ^B	23.11 ± 2.39 ^B	27.13
II-6 旱生蒿类半灌木组	1.17 ± 0.05 ^B	0.27 ± 0.05 ^B	3.24 ± 0.08 ^B	24.95 ± 1.92 ^B	29.63
II-7 旱生蒿类小半灌木组	1.06 ± 0.13 ^B	0.22 ± 0.06 ^{Bb}	2.22 ± 0.16 ^B	25.15 ± 1.45 ^B	28.65
II-8 根茎禾草组	1.25 ± 0.13 ^B	0.20 ± 0.04 ^B	2.49 ± 0.22 ^B	33.47 ± 4.62 ^B	37.41
II-9 旱生豆科草组	1.21 ± 0.15 ^B	0.24 ± 0.08 ^B	2.95 ± 0.27 ^B	28.66 ± 2.14 ^B	33.06
II-10 旱生杂类草组	0.90 ± 0.10 ^B	0.12 ± 0.04 ^{Bb}	3.44 ± 0.35 ^B	31.31 ± 1.99 ^B	35.77
III 丘陵典型草原类					
III-11 丛生禾草组	0.62 ± 0.08 ^B	0.18 ± 0.02 ^{Bb}	2.75 ± 0.15 ^B	21.72 ± 2.50 ^B	25.27
III-12 1 年生禾草组	0.69 ± 0.12 ^B	0.17 ± 0.06 ^{Bb}	2.40 ± 0.26 ^B	23.38 ± 0.41 ^B	26.64
III-13 根茎禾草组	0.69 ± 0.19 ^B	0.18 ± 0.06 ^{Bb}	2.34 ± 0.14 ^B	26.67 ± 3.95 ^B	29.88
III-14 旱生豆科草组	0.72 ± 0.07 ^B	0.18 ± 0.24 ^B	2.99 ± 0.15 ^B	31.79 ± 1.12 ^B	35.68
III-15 旱生蒿类小半灌木组	0.79 ± 0.06 ^B	0.23 ± 0.02 ^{Bb}	3.03 ± 0.08 ^B	30.11 ± 0.67 ^{Bb}	34.16
III-16 旱生蒿类半灌木组	0.78 ± 0.10 ^B	0.15 ± 0.04 ^{Bb}	2.46 ± 0.23 ^B	25.86 ± 2.49 ^{Bb}	29.25
III-17 旱生杂类草组	0.70 ± 0.06 ^B	0.17 ± 0.04 ^{Bb}	2.56 ± 0.26 ^B	25.18 ± 1.41 ^{Bb}	28.61
IV 荒漠草原类					
IV-18 丛生禾草组	0.32 ± 0.05 ^B	0.24 ± 0.06 ^B	1.26 ± 0.22 ^B	9.57 ± 0.77 ^B	11.39
IV-19 强旱生小半灌木组	0.25 ± 0.04 ^B	0.10 ± 0.02 ^{Bb}	0.93 ± 0.12 ^B	4.89 ± 0.32 ^B	6.17
IV-20 旱生豆科灌木草组	0.23 ± 0.04 ^{Bb}	0.12 ± 0.03 ^{Bb}	1.23 ± 0.08 ^B	8.34 ± 1.34 ^{Bb}	9.92
IV-21 根茎禾草组	0.16 ± 0.03 ^{Bb}	0.11 ± 0.04 ^{Bb}	1.49 ± 0.32 ^B	8.18 ± 0.57 ^{Bb}	9.94
IV-22 旱生杂类草组	0.25 ± 0.04 ^{Bb}	0.15 ± 0.09 ^B	1.40 ± 0.09 ^B	5.98 ± 0.11 ^{Bb}	7.78

注: 各处理平均植 ± 标准差, 表中每列同一处理内不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 大写字母表示差异极显著 ($P < 0.01$)。下同。

3.2 草地类型碳储量变异性

在黄土高原草地植被分布的地带性基础上 根据不同草地类型对封禁初期和封禁 11 a 的草地平均碳密度(表 2 和表 3) 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 4) 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 A 种草地类型的总面积为 $23.2523 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 其中: 典型草原类分布面积最大 为 $14.002 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 占黄土高原草地总面积的 60.22%; 其次是荒漠草原 $6.300 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 占黄土高原草地总面积的 27.1%; 森林草原分布面积最小 为 $2.950 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 占黄土高原草地总面积的 12.69%。

表 3 黄土高原封禁 11 a 草地生态系统碳密度

Table 3 Carbon density of 11 years enclosed grassland ecosystem on the Loess Plateau

草地类型	碳密度/(t·hm ⁻²)				总计
	活体植物	凋落物	活根系 0~100 cm	土壤 0~100 cm	
I 森林草原类					
I-1	3.96 ± 0.56 ^A	5.55 ± 0.02 ^A	11.77 ± 0.46 ^A	59.06 ± 2.94 ^A	80.34
I-2	3.87 ± 0.16 ^A	4.15 ± 0.08 ^A	12.89 ± 0.55 ^A	76.74 ± 7.42 ^A	97.65
I-3	3.88 ± 0.31 ^A	3.25 ± 0.17 ^A	12.99 ± 0.88 ^A	52.71 ± 2.24 ^A	72.83
I-4	4.41 ± 0.34 ^A	4.60 ± 0.33 ^A	12.60 ± 0.66 ^A	41.77 ± 3.14 ^A	63.38
II 梁塬典型草原类					
II-5	3.22 ± 0.18 ^A	4.75 ± 0.12 ^A	7.83 ± 0.66 ^A	45.76 ± 2.89 ^A	61.56
II-6	3.32 ± 0.18 ^A	5.10 ± 0.08 ^A	9.03 ± 0.75 ^A	38.26 ± 3.97 ^A	55.71
II-7	3.53 ± 0.22 ^A	4.91 ± 0.48 ^{Aa}	8.25 ± 0.66 ^A	43.22 ± 1.13 ^A	59.91
II-8	4.08 ± 0.12 ^A	4.05 ± 0.06 ^A	6.52 ± 0.19 ^A	49.42 ± 2.05 ^A	64.07
II-9	3.21 ± 0.09 ^A	4.00 ± 1.18 ^A	6.66 ± 0.25 ^A	54.93 ± 1.41 ^A	68.80
II-10	2.85 ± 0.13 ^A	4.00 ± 0.98 ^{Aa}	6.55 ± 0.45 ^A	35.64 ± 1.52 ^A	49.04
III 丘陵典型草原类					
III-11	2.02 ± 0.35 ^A	3.20 ± 2.13 ^{Aa}	6.12 ± 0.25 ^A	49.56 ± 2.56 ^A	60.90
III-12	2.07 ± 0.22 ^A	2.10 ± 1.18 ^{Aa}	7.84 ± 0.12 ^A	40.32 ± 1.23 ^A	52.33
III-13	2.10 ± 0.18 ^A	4.30 ± 0.44 ^{Aa}	7.45 ± 0.38 ^A	41.01 ± 4.92 ^{Aa}	54.86
III-14	2.38 ± 0.25 ^A	4.80 ± 0.96 ^A	6.60 ± 0.25 ^A	48.32 ± 3.48 ^A	62.11
III-15	2.79 ± 0.17 ^A	4.00 ± 1.57 ^{Aa}	7.81 ± 0.30 ^A	46.70 ± 5.69 ^{Aa}	61.30
III-16	2.88 ± 0.09 ^A	4.00 ± 0.91 ^{Aa}	7.83 ± 0.79 ^A	38.31 ± 1.82 ^{Aa}	53.02
III-17	2.09 ± 0.07 ^A	4.20 ± 0.95 ^{Aa}	7.45 ± 0.77 ^A	41.62 ± 0.91 ^{Aa}	55.36
IV 荒漠草原类					
IV-18	1.37 ± 0.08 ^A	3.30 ± 1.85 ^A	3.70 ± 0.29 ^A	11.22 ± 0.89 ^A	19.59
IV-19	1.54 ± 0.10 ^A	1.50 ± 0.84 ^{Aa}	3.16 ± 0.34 ^A	5.73 ± 0.42 ^A	11.93
IV-20	1.89 ± 0.20 ^{Aa}	1.70 ± 1.00 ^{Aa}	3.63 ± 0.38 ^A	12.40 ± 0.78 ^{Aa}	19.62
IV-21	1.92 ± 0.20 ^A	1.80 ± 0.77 ^{Aa}	3.27 ± 0.52 ^A	12.44 ± 0.15 ^A	19.43
IV-22	1.56 ± 0.18 ^{Aa}	1.70 ± 0.41 ^A	3.29 ± 0.33 ^A	12.16 ± 0.34 ^{Aa}	18.71

表 4 黄土高原封禁初期与封禁 11 a 草地生态系统碳储量

Table 4 Carbon storage between initial and 11 years enclosed grassland ecosystem on the Loess Plateau

草地类型	面积/10 ⁶ hm ²	碳储量/(Tg C)				小计
		活体植物	凋落物	活体根系 0~100 cm	土壤 0~100 cm	
I 森林草原类 (4 个类型组)	2.950 0	3.871 6 ^①	0.924 7	21.157 0	97.809 5	123.762 8
		11.936 3 ^②	14.177 8	36.244 6	167.929 0	230.287 7
II 梁塬典型草原类 (6 个类型组)	5.543 3	6.359 3 ^①	1.319 0	15.648 3	147.643 2	170.969 8
		18.420 0 ^②	25.344 4	42.669 9	245.872 4	332.306 7
III 丘陵典型草原类 (7 个类型组)	8.459 0	6.034 5 ^①	2.105 2	22.386 9	218.862 6	249.389 2
		20.062 7 ^②	33.059 4	61.122 0	369.811 4	484.055 5
IV 荒漠草原类 (5 个类型组)	6.300 0	1.551 8 ^①	0.942 6	8.055 2	47.153 9	57.703 5
		10.298 6 ^②	13.122 4	21.553 2	68.882 1	113.856 3
总计	23.252 3	17.817 2 ^①	5.291 5	67.247 4	511.469 2	601.825 3
		60.717 6 ^②	85.704 0	161.589 7	852.494 9	1160.506 2

注: ①表示封禁初期; ②表示封禁 11 a。

从表 4 可以看出,黄土高原从东南到西北分布的森林草原、梁源典型草原、丘陵典型草原和荒漠草原地带,封禁初期各草地类型总碳储量依次为 123.76 Tg C ($1 \text{ Tg} = 10^{12} \text{ g}$)、170.97 Tg C、249.39 Tg C 和 57.7 Tg C; 经过自然封禁恢复 10 余年的草地总碳储量分别增加到 230.288 Tg C、332.307 Tg C、484.056 Tg C 和 113.856 Tg C。其中地下活体根系和土壤碳储量封禁初期和封禁 10 余年均远高于地上部分,森林草原类型封禁初期地上活体植物和凋落物及地下活体根系碳储量分别为 4.8 Tg C 和 21.16 Tg C,封禁 10 余年后为 26.114 Tg C 和 36.245 Tg C; 梁源典型草原类型封禁初期为 7.678 Tg C 和 15.648 Tg C,封禁 10 余年后为 43.764 Tg C 和 42.670 Tg C; 丘陵典型草原类型初期为 8.140 Tg C 和 22.387 Tg C,封禁 10 余年分别为 53.122 Tg C 和 61.122 Tg C; 荒漠草原类型封禁初期为 2.494 Tg C 和 8.060 Tg C,封禁 10 余年分别为 23.421 Tg C 和 21.553 Tg C。

在此基础上得出黄土高原 ($0.232 \times 10^8 \text{ hm}^2$) 草地植被的总碳储量,封禁初期为 601.82 Tg C,其中 0~100 cm 土壤碳储量为 511.46 Tg C,占封禁初期总碳储量的 85%,活体植物、凋落物和活体根系仅占 15%; 其中森林草原类型碳储量占其总量的 20.56%,梁源典型草原类型占 28.41%,丘陵典型草原类型占 41.44%,荒漠草原类型占 9.6%。封禁 10 余年自然恢复草地为 1160.506 2 Tg C,其中 0~100 cm 土壤碳储量为 852.494 9 Tg C,比封禁初期提高 73.46%,地上活体植物、凋落物和活体根系提高 26.54%; 其中森林草原类型碳储量占总植被碳储量的 19.8%,梁源典型草原类型占 28.65%,丘陵典型草原类型占 41.72%,荒漠草原类型占 9.83%。黄土高原碳储量总增长量为 558.680 9 Tg C,年增长量为 50.79 Tg C/a。

3.3 草地固碳量时空分布格局及其潜力

在黄土高原结合国家退耕还林草工程的实施,对退化严重的不同类型天然草地通过 11 a 的自然封禁恢复,不仅改善了草地的生长环境,提高了草地的覆盖度与生物量,而且增加了草地的固碳量。目前,黄土高原 $0.232 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 草地的森林草原类、梁源典型草原类、丘陵典型草原类和荒漠草原类 22 个典型草地类型组(表 5)封禁恢复 11 a 草地总固碳量为 573.10 Tg C,年总固碳量 52.1 Tg C/a,黄土高原草地平均固碳量为 24.7 t/hm²。且不同草地植被类型各组分中碳储量与其生物量有相同的变化趋势:森林草原 4 种草地类型面积 $0.0295 \times 10^8 \text{ hm}^2$,封禁 11 a 总固碳量为 120.83 Tg C,年总固碳量 10.98 Tg C/a,平均固碳量为 40.96 t/hm²,其中地上活体植物、凋落物为 21.31 Tg C,占总固碳量的 17.64%, $\rho \sim 100 \text{ cm}$ 的活体根系为 29.40 Tg C,占总固碳量的 24.33%, $\rho \sim 100 \text{ cm}$ 土壤固碳量为 70.12 Tg C,占总固碳量的 58.03%; 梁源典型草原 6 种类型面积 $0.055 4 \times 10^8 \text{ hm}^2$,封禁 11 a 总固碳量为 161.53 Tg C,年总固碳量 14.68 Tg C/a,平均固碳量为 29.16 t/hm²,其中地上活体植物、凋落物为 36.08 Tg C,占总固碳量的 22.34%, $\rho \sim 100 \text{ cm}$ 的活体根系为 27.02 Tg C,占总固碳量的 16.73%, $\rho \sim 100 \text{ cm}$ 土壤固碳量为 98.42 Tg C,占总固碳量的 60.93%; 丘陵典型草原 7 种类型面积 $0.084 6 \times 10^8 \text{ hm}^2$,封禁 11 a 总固碳量为 234.66 Tg C,年总固碳量 21.33 Tg C/a,平均固碳量为 27.74 t/hm²,其中地上活体植物、凋落物为 44.98 Tg C,占总固碳量的 19.17%, $\rho \sim 100 \text{ cm}$ 的活体根系为 38.74 Tg C,占总固碳量的 16.5%, $\rho \sim 100 \text{ cm}$ 土壤固碳量为 150.95 Tg C,占总固碳量的 64.33%; 荒漠草原 5 种类型面积 $0.063 \times 10^8 \text{ hm}^2$,封禁 11 a 总固碳量为 56.08 Tg C,年总固碳量 5.1 Tg C/a,平均固碳量为 8.9 t/hm²,其中地上活体植物、凋落物为 20.93 Tg C,占总固碳量的 37.3%, $\rho \sim 100 \text{ cm}$ 的活体根系为 13.50 Tg C,占总固碳量的 24.1%, $\rho \sim 100 \text{ cm}$ 土壤固碳量为 21.66 Tg C,占总固碳量的 38.6%。其封禁 10 余年草地固碳量比封禁初期活体植物部分增加 2.1~6.4 倍, $\rho \sim 100 \text{ cm}$ 活体根系增加

1.7~2.6倍 $\rho \sim 100$ cm 土壤增加 1.4~2.6 倍,与苏永中等对科尔沁退化沙地草地 10 a 恢复区植物系统固存的碳分别比 5 a 恢复区和持续放牧区增加 2.1 和 3.3 倍^[11] 结果基本吻合。

表 5 黄土高原草地生态系统固碳量 (Tg C)

Table 5 Carbon sequestration of the Loess Plateau grassland ecosystem (TgC)

类型	活体植物	凋落物	活根系 0~100 cm	土壤 0~100 cm	小计
I 森林草原类 (4 个类型组)	8.064 6	13.244 6	29.400 3	70.119 5	120.829 0
II 梁塬典型草原类 (6 个类型组)	12.060 7	24.021 3	27.021 5	98.422 9	161.526 4
III 丘陵典型草原类 (7 个类型组)	14.020 9	30.954 2	38.735 1	150.947 2	234.657 4
IV 荒漠草原类 (5 个类型组)	8.746 9	12.179 3	13.498 1	21.656 7	56.081 0
总计	42.893 1	80.399 4	108.655 0	341.146 3	573.093 8

4 讨论

草地生态系统是地球上分布面积较广的类型之一^[12-14],巨大的草地面积使得草地在全球碳汇中发挥了十分重要的作用^[15]。据有关研究报导,在北美温带草地地下部分固碳量占群落总固碳量的比例为 50%~75%;前苏联地区温带草原的这一比例在 34%~92% 之间变化,平均为 68.5%;印度热带草地的这一比例较低,平均约为 40%;我国温带典型草原为 70%;就全世界范围而言,地下部分固碳量约占总固碳量的 $55.5\% \pm 2.8\%$ ($n=41$),变化范围在 19%~92% 之间^[4,16]。黄土高原草地地下 0~100 cm 根系和土壤部分固碳量约占总固碳量的 $78.49\% \pm 3.3\%$ ($n=66$),与前人的研究结果基本相一致。地下根系是土壤有机碳的重要来源,许多研究结果发现 85% 的生物量储存在地下植物根系。在我国,草地是最大的陆地生态系统类型,各类草地面积约 4×10^8 hm^2 ,占土地总面积的 40% 以上,对草地生态系统而言,土壤碳库约占总碳储量的 90%^[4],中国草地碳在土壤中的储存量是植被层的 13.5 倍^[17],本研究结果表明,黄土高原土壤碳库约占总碳储量的 79.03%~87.10%,土壤中的碳储存量是植被层的 7.95 倍,与以上研究结果接近。同时,从表 6 看出,黄土高原草地植被碳储量与马文红等^[18]对内蒙古温带草地总植被碳储量为 226.0 ± 13.3 Tg C、方精云等^[17]和朴世龙等^[5]分别用草地清查资料或遥感数据估算的内蒙古草地植被碳储量分别为 274.0 Tg C 和 188.5 Tg C 的研究结果相一致。

总体而言,在全球范围内草地生态系统碳储量远不如森林高,主要是森林植被在长期的积累过程中形成了较高的生物量和凋落物,而草地在我国及黄土高原的地上部分由于受长期过度放牧、开垦和人为活动的干扰,草地植被循环转化较快,地表凋落物的积累量较少,草地的逆向演替较快,顺向演替速度慢, CO_2 源的作用较为明显。但占碳储量比例较大的地下部分,由于受气候干旱和土壤水分不足的影响,分解转化缓慢, CO_2 库的作用明显,两相权衡,草地生态系统在碳平衡中,依然有明显的碳库作用^[4,19-23]。

表 6 黄土高原和内蒙古温带草原植被碳储量比较

Table 6 Vegetation carbon storage comparison for Loess Plateau grassland and Inner Mongolia temperate steppe

文献来源	面积/ 10^6 hm^2	地上碳储量/ Tg C	地下碳储量/ Tg C	植被总碳储量/ Tg C
方精云等 ^[17]	87. 0	39. 4	234. 7	274. 0
朴世龙等 ^[5]	70. 1	29. 3	159. 2	188. 5
马文红等 ^[18]	58. 5	33. 2	193. 9	226. 0
本研究	23. 25	42. 89	108. 66	151. 55

5 结论

(1) 黄土高原草地封禁可显著提高其碳密度,封禁 10 余年后比封禁初期最高增加,森林草原活体植物为 2.2 倍,凋落物 14.86 倍, $0 \sim 100 \text{ cm}$ 根系 4.37 倍, $0 \sim 100 \text{ cm}$ 土壤 1.03 倍;梁源典型草原活体植物 2.26 倍,凋落物 17.20 倍, $0 \sim 100 \text{ cm}$ 根系 1.63 倍, $0 \sim 100 \text{ cm}$ 土壤 0.64 倍;丘陵典型草原活体植物 2.65 倍、凋落物 19.87 倍, $0 \sim 100 \text{ cm}$ 根系 1.59 倍, $0 \sim 100 \text{ cm}$ 土壤 0.56 倍;荒漠草原活体植物 5.0 倍、凋落物 12.75 倍, $0 \sim 100 \text{ cm}$ 根系 1.44 倍, $0 \sim 100 \text{ cm}$ 土壤 0.29 倍。

(2) 黄土高原草地封禁同样可显著提高其碳储量,森林草原、梁源典型草原、丘陵典型草原和荒漠草原 4 个类型,总碳储量封禁初期分别为 123.76、170.97、249.39 和 57.7 Tg C ;自然封禁恢复 11 a 分别达到 230.287 7、332.306 7、484.055 5 和 113.856 3 Tg C ,增长幅度为 86.08% ~ 97.32%。

(3) 在黄土高原 $0.232 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 的草地上,4 个主要草原类型共包括 22 个典型草地类型组,地上、地下和土壤部分总固碳量为 573.10 Tg C ,年总固碳量 52.1 Tg C/a ,平均固碳量为 24.7 t/hm^2 。草地各组分的总固碳量分别为:活体植物 42.893 1 Tg C ,占黄土高原总固碳量的 7.48%;凋落物 80.399 4 Tg C ,占 14.03%; $0 \sim 100 \text{ cm}$ 根系 108.655 Tg C ,占 18.96%; $0 \sim 100 \text{ cm}$ 土壤 341.146 3 Tg C ,占黄土高原总固碳量的 59.53%。

(4) 封禁 11 a 草地类型的地上活体植物、凋落物、 $0 \sim 100 \text{ cm}$ 根系和 $0 \sim 100 \text{ cm}$ 土壤层的年平均固碳量的变化趋势为:丘陵典型草原 > 梁源典型草原 > 森林草原 > 荒漠草原。

参考文献 (References):

- [1] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grassland [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51(5): 1173-1179.
- [2] 齐玉春,董云社,耿元波,等. 我国草地生态系统碳循环研究进展 [J]. 地理科学进展, 2003, 22(4): 342-352. [QI Yu-chun, DONG Yun-she, GENG Yuan-bo, et al. The progress in the carbon cycle researches in grassland ecosystem in China. *Progress in Geography*, 2003, 22(4): 342-352.]
- [3] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils [J]. *Nature*, 1990, 348(6298): 232-234.
- [4] 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、碳输入与贮存 [J]. 植物学通报, 1998, 15(2): 14-22. [LI Ling-hao, CHEN Zuo-zhong. The global carbon cycle in grassland ecosystems and its responses to global change I. Carbon flow compartment model, input and storage. *Chinese Bulletin of Botany*, 1998, 15(2): 14-22.]
- [5] 朴世龙,方精云,贺金生,等. 中国草地植被生物量及其空间分布格局 [J]. 植物生态学报, 2004, 28: 491-498. [PIAO Shi-long, FANG Jing-yun, HE Jin-sheng, et al. Spatial distribution of grassland biomass in China. *Acta Phytocoecologica Sinica*, 2004, 28: 491-498.]

- [6] 常瑞英,唐海萍. 草原固碳量估算方法及其敏感性分析[J]. 植物生态学报, 2008, 32(4): 810-814. [CHANG Rui-ying, TANG Hai-ping. Sensitivity analysis on methods of estimating carbon sequestration in grassland ecosystem of Inner Mongolia, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2008, 32(4): 810-814.]
- [7] 吕超群,孙书存. 陆地生态系统碳密度格局研究概述[J]. 植物生态学报, 2004, 28(5): 692-703. [Lü Chao-qun, SUN Shu-cun. A review on the distribution patterns of carbon density in terrestrial ecosystems. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(5): 692-703.]
- [8] Ni J. Carbon storage in terrestrial ecosystem of China: Estimates at different spatial resolutions and their responses to climate change [J]. *Climatic Change*, 2001, 49: 339-358.
- [9] 钟华平,樊江文,于贵瑞,等. 草地生态系统碳蓄积的研究进展[J]. 草业科学, 2005, 22(1): 4-11. [ZHONG Hua-ping, FAN Jiang-wen, YU Gui-rui, et al. The research progress of carbon storage in grassland ecosystem. *Pratacultural Science*, 2005, 22(1): 4-11.]
- [10] Li L, Chen Z. Changes in soil carbon storage due to over-grazing in *Leymus chinensis* steppe in the Xilin River basin of Inner Mongolia [J]. *Journal of Environmental Science*, 1997, 9: 486-490.
- [11] 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[J]. 环境科学, 2003, 24(4): 23-28. [SU Yong-zhong, ZHAO Ha-lin. Influences of grazing and enclosure on carbon sequestration in degraded sandy grassland, Inner Mongolia. *Environment Science*, 2003, 24(4): 23-28.]
- [12] Don A, Schulze E D. Controls on fluxes and export of dissolved organic carbon in grasslands with contrasting soil type s [J]. *Biogeochemistry*, 2008, 91(2/3): 117-131.
- [13] IPCC. Land-use, Landuse Change, and Forestry [M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2000.
- [14] Scurlock J M O, Hall D O. The global carbon sink: A grassland perspective [J]. *Global Change Biology*, 1998, 4: 229-233.
- [15] Mokany K, Raison R J, Prokushkin A S. Critical analysis of root: Shoot ratios in terrestrial biomes [J]. *Global Change Biology*, 2005, 11: 1-13.
- [16] 李博,雍世鹏,李瑶,等. 中国的草原[M],北京: 科学出版社, 1990: 213-218. [LI Bo, YONG Shi-peng, LI Yao, et al. Chinese Grassland. Beijing: Science Press, 1990: 213-218.]
- [17] 方精云,杨元合,马文红,等. 中国草地生态系统碳库及其变化[J]. 中国科学: 生命科学, 2010, 40(7): 566-576. [FANG Jing-yun, YANG Yuan-he, MA Wen-hong, et al. Ecosystem carbon stocks and their changes in China's grasslands. *Science in China: Life Science*, 2010, 40(7): 566-576.]
- [18] 马文红,韩梅,林鑫,等. 内蒙古温带草地植被的碳储量[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(3): 192-195. [MA Wen-hong, HAN Mei, LIN Xin, et al. Carbon storage in vegetation of grasslands in Inner Mongolia. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, 20(3): 192-195.]
- [19] 彭少麟,李跃林,任海,等. 全球变化条件下的土壤呼吸效应[J]. 地球科学进展, 2002, 17(5): 705-713. [PENG Shao-lin, LI Yue-lin, REN Hai, et al. Progress in research on soil respiration under the global change. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(5): 705-713.]
- [20] McGuire A D, Melillo J M, Kicklighter D W, et al. Equilibrium responses of soil carbon to climate change: Empirical and process based estimates [J]. *Journal of Biogeography*, 1995, 22: 785-796.
- [21] 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[J]. 东北林业大学学报, 2007, 35(7): 64-73. [LI Yu-wen, WANG Nan, SUN Yue. Carbon circulation in forest soil under elevated CO₂ concentration. *Journal of Northeast Forestry University*, 2007, 35(7): 64-73.]
- [22] 程积民,万惠娥. 中国黄土高原植被建设与水土保持[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002. [CHENG Ji-min, WAN Hui-e. Vegetation Construction and Soil and Water Conservation in the Loess Plateau of China. Beijing: Chinese Forestry Press, 2002.]
- [23] 胡建忠. 黄河上游退耕地人工林的碳储量研究[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(6): 1-8. [HU Jian-zhong. 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.]

Grassland Vegetation and Soil Carbon Sequestration in the Loess Plateau

CHENG Ji-min^{1,2}, CHENG Jie², YANG Xiao-mei¹

(1. College of Animal Sciences of Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

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

Abstract: The features of biomass and carbon sequestration were studied based on multi-point transect survey and combined with positioning monitoring methods for different type of grasslands from southeast to northwest in the Loess Plateau. The data were obtained for the pre- and post-11-year fencing. Results showed that carbon density and storage were decreased from southeast to northwest with an exponentially trend among four-type grasslands. In each type of grassland (aboveground living plants, litter/underground of soil root and soil), the characteristics of distribution of carbon density and storage presented a tendency: forest steppe > plateau steppe > hilly steppe > desert steppe. Grassland carbon density and storage, which included living plants, litter, 0-100cm depth of soil root and soil, were 63.38-97.65 t·hm⁻² and 230.2877 Tg C for forest steppe, 49.04-68.80 t·hm⁻² and 332.3067 Tg C for plateau steppe, 52.33-62.11 t·hm⁻² and 484.0555 Tg C for hilly steppe and 11.93-19.62 t·hm⁻² and 113.8563 Tg C for desert steppe respectively, after 11-year fencing. The total carbon sequestration of grasslands was 573.10 Tg C after 11-year fencing on the Loess Plateau. Among which, living plant was 42.89 Tg C (7.48% of the total carbon sequestration), litter was 80.40 Tg C (14.03%), living root was 108.66 Tg C (18.96%), and soil was 341.15 Tg C (59.53%). In conclusion, our results demonstrated that grassland fencing can not only restore vegetation and increase biomass, but can also significantly improve grassland carbon sequestration potential.

Key words: Loess Plateau; natural grassland; carbon sequestration; carbon density