

黄土丘陵区不同恢复年限对天然 草地土壤碳库动态的影响

党珍珍¹, 周正朝¹, 王凯博², 姚小萌¹

(1. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710062;

2. 中国科学院 地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西 西安 710075)

摘要: [目的] 揭示不同恢复年限的天然草地土壤碳库动态变化及其剖面分布特征, 全面认识和理解天然草地恢复下土壤有机库、无机碳库的动态特征。[方法] 采用野外调查与室内试验分析相结合的方法, 以农田为对照, 对黄土丘陵区不同恢复年限(11, 16, 22 和 35 a)的天然草地土壤有机碳(SOC)、无机碳(SIC)、总碳(STC)的动态变化及其剖面分布特征进行了探讨。[结果] (1) 天然草地恢复过程中表层(0—10 cm) SOC 含量随植被恢复年限显著增加, 下层(10—100 cm) SOC 含量随植被恢复年限变化不明显; 0—100 cm 土层 SOC 储量呈先减少后增加趋势, 但仍未达到农田 SOC 储量的水平。(2) 天然草地 0—20 cm 土层 SIC 含量呈相对脱钙现象, 0—100 cm 土层 SIC 库储量约为 SOC 库储量的 2.7~4.5 倍。土壤无机碳库随植被恢复年限的增加无明显变化, 但 SIC 的剖面分布深度发生改变。(3) 土壤总碳库随恢复年限增加无明显变化, 0—100 cm 土层 SIC 储量在 STC 库中所占比例约为 75.6%~86.0%。[结论] 短时间内天然草地的土壤碳汇效应并不明显, 碳库增汇效应需要长期的过程。

关键词: 天然草地; 土壤有机碳; 土壤无机碳; 碳储量; 黄土高原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)05-0049-06

中图分类号: S153.6

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.05.075

Effects of Vegetation Restoration Ages on Soil Carbon Pool of Natural Grassland in Loess Hilly Region

DANG Zhenzhen¹, ZHOU Zhengchao¹, WANG Kaibo², YAO Xiaomeng¹

(1. College of Tourism and Environmental Sciences, Shaanxi Normal University,

Xi'an, Shaanxi 710062, China; 2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology,

Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710075, China)

Abstract: [Objective] This Paper aimed to investigate the dynamic variation and distribution of soil carbon of natural grassland under different restoration years in order to understand the dynamic characteristics of soil organic and inorganic carbon pool. [Methods] Using field survey and laboratory analysis method, this study analyzed the dynamic variation of soil total carbon of natural grassland under different restoration years(11, 16, 22 and 35 a) in loess hilly region. [Results] Soil organic carbon(SOC) content in the 0—10 cm soil layer surface was increased significantly with the increase of restoration years, while no evident changes were found in the 10—100 cm soil layer. Variations in average soil organic carbon storage of natural grassland at 0—100 cm soil depth decreased initially and then increased with the increase of restoration years. However, it had not reached to the level of farmland. Decalcified phenomenon existed in 0—20 cm soil layer. Soil inorganic carbon (SIC) storage was 2.7 to 4.5 times larger than soil organic carbon storage in 0—100 cm total soil layers. No significant variations occurred in total soil carbon storage as the restoration years increased. Soil inorganic carbon storage accounted for about 75.6% to 86.0% of soil total carbon storage in the 0—100 cm soil. The SIC pool was an important factor that influenced soil total carbon pool in the study area, which also main-

收稿日期: 2014-05-08

修回日期: 2014-05-23

资助项目: 国家自然科学基金资助项目“黄土高原植被自然恢复过程中土壤有机碳来源判定与周转特征”(41301610); 陕西省青年科技新星项目(2014KJXX-52); 霍英东教育基金会高等院校青年教师资助项目(131025); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-04)

第一作者: 党珍珍(1989—), 女(汉族), 陕西省渭南市人, 硕士研究生, 研究方向为水土资源评价与规划。E-mail: dzhenzhen1004@126.com。

通信作者: 周正朝(1980—), 男(汉族), 四川省泸州市人, 博士, 副教授, 主要从事植物生态与土壤侵蚀研究。E-mail: zczhou@snnu.edu.cn。

tained the dynamic balance of soil carbon pool in this region. [Conclusion] In the semi-arid environment of the Loess Plateau, soil carbon sequestration effect in natural grassland is not obvious and the improvement of soil carbon pool is likely to require a considerably long period of time.

Keywords: natural grassland; soil organic carbon; soil inorganic carbon; soil carbon storage; Loess Plateau

自工业革命以来,大气 CO₂ 浓度由 280 μmol/mol 上升到现在的 380 μmol/mol^[1],并以每年 2 μmol/mol 的速率持续增加,对全球气候变化和陆地碳循环产生重大影响。土壤碳库作为陆地生态系统最大的碳库,既是碳源也是碳汇,其碳储量 0.1% 的变化将导致大气 CO₂ 浓度极大的波动^[2]。草地是全球最大的陆地生态系统,中国草地面积约 4 × 10⁸ hm², 占国土面积的 41.7%。其中,黄土高原天然草地约占该地区草地面积的 85%,土壤碳储量约占草地总碳储量的 92%^[2]。由此可见,研究草地土壤碳库变化对于缓解全球温室效应、调节陆地生态系统碳平衡具有极其重要的意义^[3]。

目前,学者们对草地土壤有机碳库已开展了大量研究,主要包括有机碳库的组成、来源与输出方式^[3-4],碳储量与分布及其影响因素^[5-6],而对土壤无机碳库、总碳库的关注较少。土壤无机碳库在全球碳循环以及陆地生态系统“碳汇”中也具有重要贡献^[7]。Landi 等^[8]研究发现草原土壤无机碳库累积速率约是有机碳库的 1.4 倍。秦小光等^[9]通过生物地球化学模型估算出黄土高原土壤无机碳储量为 850 Pg,是大气 CO₂ 理想的“汇”。因此,在评价土壤固碳现状和潜力时,有必要同时考虑土壤有机碳库和无机碳库的变化,这对人类调控 CO₂ 排放和应对未来全球气候变化具有重要指导作用。

黄土高原是中国典型的生态环境脆弱区,也是国家退耕还林还草重点建设区。自 1999 年实施退耕还林还草工程以来,植被的恢复与重建已成黄土高原治理水土流失和改善生态环境的重要措施^[7,10]。目前对黄土高原草地自然恢复的土壤有机碳库效应已有不少研究,而对自然草地恢复的土壤无机碳库效应的研究鲜见报道。为此,本文以黄土丘陵区不同恢复年限的天然草地为研究对象,探讨植被自然恢复对土壤有机碳库、无机碳库以及总碳库的影响,旨在为全面认识和理解天然草地恢复下土壤有机库、无机碳库的动态特征以及预测区域土壤碳库对全球气候变化的影响提供科学参考,同时对黄土高原草地的恢复与重建予以理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于子午岭北部甘肃省合水县连家砭林

场(35°03′—36°37′N,108°10′—109°08′E),属黄土丘陵沟壑区,气候为暖温带半干旱季风气候。该区海拔 1 400 m 左右,年均气温 7.4℃,≥10℃积温 2 671.0℃,年均降雨量 587.6 mm,土壤类型为原生或次生黄土,厚度 50—100 m。研究区天然草地群落优势种和建群种主要是铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、白羊草(*Bothriochloa ischumum*)、芨蒿(*Artemisia giraldii*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、苔草(*Carex lanceolata*)、狼牙刺(*Sophora davidii*)和长芒草(*Stipa bungeana*)等草本群落^[11]。

1.2 样品采集与制备

于 2012 年 11 月通过查阅相关资料和走访调查群众确定不同天然草地恢复年限,在综合考虑海拔、坡度、坡向以及土壤状况等立地条件的相似性的基础上,从该区域遴选出不同恢复年限(11,16,22,35 a)的天然草地作为研究对象,以农田为对照样地。据调查农田种植年限大于 30 a,种植农作物为玉米。农田每年仅施用一定量的农家肥(羊粪),无灌溉。天然草地距离居民点较远,面积一般在 2 000 m² 以上,不施肥,也无灌溉(表 1),且草地在弃耕前的农作管理方式基本一致。每一恢复年限设置 3 个重复样地,在每块样地内随机选取 5 个 1 m × 1 m 的样方,在每个样方内用直径 9 cm 的土钻按 0—10,10—20,20—30,30—50,50—70,70—100 cm 分层采样,混匀作为分层的代表样品,每份土样约重 500 g 左右,共采集 90 个土样。将所有样品带回实验室风干、研磨并过筛待用。

1.3 土壤样品分析

土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化—外加热法测定^[12];土壤无机碳(SIC)采用美国 UIC 公司生产的 CM150 无机碳分析仪测定,土壤无机碳含量(SIC)(g/kg) = 碳酸钙含量(CaCO₃) × 0.12 × 10,其中 CaCO₃ 含量(%) = CO₂ 含量(%) / 44 × 100。某一土层土壤有机碳、无机碳、总碳储量(kg/m²)的计算公式分别为:

$$SOCS_i = SOC_i \times BD_i \times H_i \times (1 - \delta_i) / 100 \quad (1)$$

$$SICS_i = SIC_i \times BD_i \times H_i \times (1 - \delta_i) / 100 \quad (2)$$

$$STCS_i = SOCS_i + SICS_i \quad (3)$$

式中:SOCS_i——第 *i* 层土壤有机碳储量(kg/m²); SIC_i——第 *i* 层土壤无机碳含量(g/kg); STC_i——第 *i*

层土壤总碳含量(g/kg); BD_i ——土壤容重(g/cm); H_i ——土层厚度(cm); δ_i ——直径>2 mm的石砾含量(体积分数%)。鉴于研究区黄土颗粒>2 mm的石砾含量极少,且处理土样时全部磨碎,故计算时 δ_i 取0。

1.4 数据分析

采用 SPSS 18.0 对试验统计数据进行分析,并进行最小显著差异法(LSD)检验,采用 Origin 8.0 软件处理图形。

表1 不同恢复年限的天然草地和农田样地特征

恢复年限/a	经纬度	海拔/m	坡向	坡位	坡度/(°)	平均盖度/%	优势群落物种
CK	108°28'6"E,36°4'25"N	1 476	半阳坡	坡顶	12	70	玉米
11	108°31'58"E,36°5'4"N	1 352	阳坡	坡顶	13	65	苔草+芨蒿+铁杆蒿
16	108°32'16"E,36°5'41"N	1 386	阳坡	坡顶	10	51	苔草+芨蒿+阿尔泰狗娃花
22	108°31'49"E,36°4'53"N	1 303	半阳坡	坡上部	15	73	白羊草+狼牙刺
35	108°31'39"E,36°5'9"N	1 346	半阳坡	坡顶	14	80	白羊草+苔草+芨蒿+铁杆蒿

2 结果与分析

2.1 恢复年限对天然草地土壤有机碳库的影响

2.1.1 恢复年限对土壤有机碳含量的影响 不同恢复年限的草地0—100 cm土层平均SOC含量为4.21~5.78 g/kg。天然草地土壤有机碳(SOC)含量在剖面上的变化表现为随土层的增加而减少,减幅为61.2%~86.2%。表层0—10 cm SOC含量约为深层70—100 cm的2.3~7.2倍,反映了草地植被对SOC的表聚效应。0—10 cm土层SOC含量显著增加,增幅为8.1%~48.3%。10—30 cm土层不同退耕年限间的SOC含量差异不显著。30—100 cm土层11 a草地SOC含量与农田差异不显著,但草地恢复到11 a后,30 cm以下土层SOC含量显著下降。与农田相比,天然草地恢复过程中SOC含量呈先减少后增加趋势。

2.1.2 恢复年限对天然草地土壤有机碳储量的影响

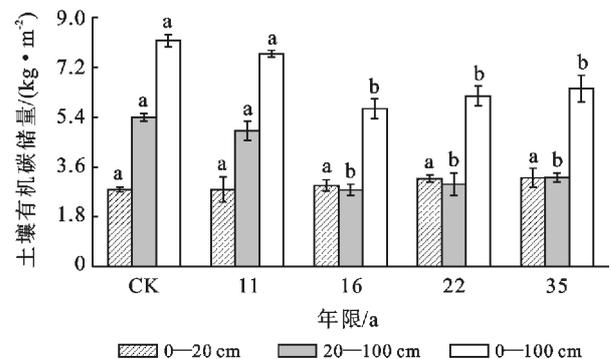
天然草地恢复过程中0—100 cm土层土壤有机碳(SOC)储量为0.86~1.45 kg/m²。0—20 cm土层SOC储量呈增加趋势,但差异性不显著(图1)。从SOC的储存空间分布发现,0—20 cm土层SOC储量占0—100 cm剖面土壤有机碳储存能力的34.0%~51.7%,呈现一定的“表聚”现象。20—100 cm土层SOC储量呈先下降后略微增加趋势,减幅为14.9%~40.8%。不同恢复年限的草地0—100 cm土层SOC储量呈先减少后增加趋势,但仍未达到农田土壤有机碳的水平。

2.2 恢复年限对天然草地土壤无机碳库的影响

2.2.1 恢复年限对天然草地土壤无机碳含量的影响

不同弃耕年限的天然草地0—100 cm土层平均土壤无机碳(SIC)含量变化范围为15.32~20.1 kg/m²,农田SIC含量为15.37 kg/m²。土壤无机碳(SIC)含量

在0—10 cm土层最低。11,16,22,35 a天然草地分别在20—30,50—70,70—100,30—50 cm处存在土壤无机碳的相对累积,表明弃耕后草地的恢复改变了土壤无机碳的剖面分布深度。总体看来,天然草地0—100 cm土层剖面SIC含量随恢复年限增加无明显变化。



注:不同小写字母表示同一土层不同年限间差异达5%显著水平,下同。

图1 不同恢复年限天然草地土壤有机碳储量剖面分布

2.2.2 恢复年限对天然草地土壤无机碳储量的影响

0—100 cm土层天然草地无机碳(SIC)储量整体上随恢复年限增加无明显变化规律,变化范围为4.20~5.89 kg/m²,土壤无机碳(SIC)储量最大值为最小值的1.3倍(图2)。与农田对照,0—100 cm土层SIC储量仅22 a草地增加显著,其他年限差异性不显著。天然草地恢复过程中0—20和20—100 cm土层SIC储量无明显变化规律。从SIC储量的垂直分布来看,0—20 cm土层SIC储量占总土层SIC储存能力的11.2%~18.8%,表层土壤呈现相对脱钙现象。0—100 cm土层剖面SIC库储量约为SOC库储量的2.7~4.5倍,约占整个土壤剖面总碳储量的75.6%~86.0%。

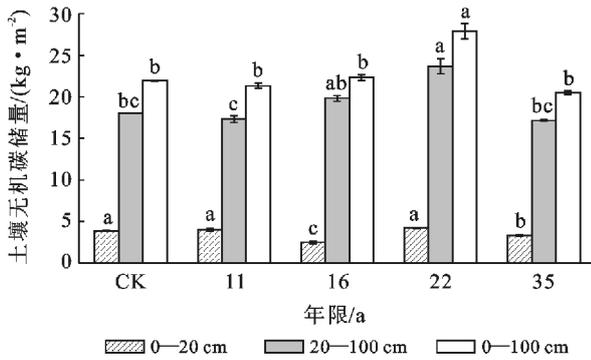


图 2 不同恢复年限天然草地土壤无机碳储量剖面分布

2.3 恢复年限对天然草地土壤总碳库的影响

2.3.1 恢复年限对天然草地土壤总碳含量的影响

天然草地 0—100 cm 土层平均总碳 (STC) 含量变化范围为 20.28~24.78 g/kg, 土壤总碳 (STC) 含量剖面分布也表现为随土层增加而减少, 减幅为 8.9%~36.0%。这与 SOC 土壤剖面垂直变化一致。表层 0—10 cm STC 含量也呈“表聚”现象, 约为深层 70—100 cm STC 含量的 1.1~1.5 倍。0—100 cm 土层天然草地 STC 含量总体随恢复年限延长而无明显增加趋势。

2.3.2 恢复年限对天然草地土壤总碳储量的影响

天然草地恢复过程中 0—100 cm 土层土壤总碳 (STC) 储量无明显增加, 甚至有略微下降趋势 (图 3)。与农田对照, 仅 22 a 草地 STC 储量显著增加, 其他年限 STC 储量均减少, 减幅为 3.1%~12.2%。0—20 和 20—100 cm 土层 STC 储量随弃耕年限增加均无明显增加趋势, 从 STC 储量在剖面上的垂直分布来看, 0—20 cm 土层 STC 储量占 0—100 cm 土层的 19.4%~24.2%, 介于相同土层土壤有机碳和无机碳在整个土壤剖面所占比例之间。

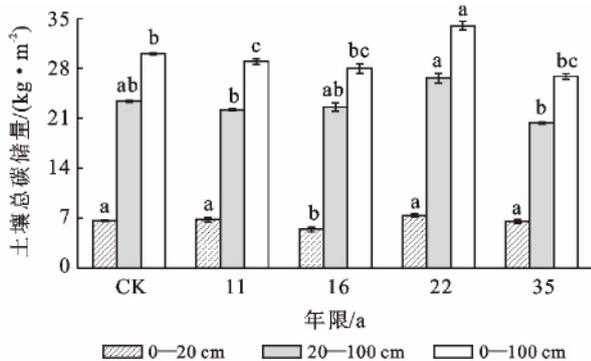


图 3 不同恢复年限的天然草地土壤总碳储量剖面分布

3 讨论

3.1 天然草地恢复对土壤有机碳的影响

土壤有机碳库是土壤碳库的重要组成部分, 其含

量由碳输入量和分解量共同决定^[13]。本研究结果表明, 天然草地恢复过程中表层 0—20 cm 土壤有机碳含量不断增加, 其 SOC 储量占整个土壤剖面 SOC 储存能力的 34.0%~51.7%, 呈现“表聚”效应, 这与前人研究结果相同^[14]。草地的恢复增加了地表凋落物分解输入土壤的碳量^[7], 根系周转和根际分泌物来源的碳也源源不断的向表层土壤输入^[15], 从而极大的促进表层 SOC 的积聚作用。李裕元等^[16]也研究发现由于表层土壤植物根系密集分布以及凋落物在地表聚集的直接作用使得黄土高原北部草地表层有机碳存储于 0—20 cm 土层。

随植被恢复年限的增加, 0—100 cm 土层 SOC 储量呈先减少后增加的趋势。据野外样地调查显示, 在 11~16 a 恢复阶段天然草地群落植被盖度下降, 物种多样性也减少, 可能是弃耕初期 (11~16 a) 草地群落不同物种间的竞争以及群落物种对于养分的竞争较为激烈有关, 弃耕前期群落覆盖度较低, 土壤侵蚀严重, 土壤有机碳随降水淋移、迁移到下层或坡下, 进而造成天然草地植被恢复前期阶段 SOC 的损失^[17]。天然草地恢复到 16 a 后, SOC 储量开始累积增加, 但仍未达到农田土壤有机碳的水平。Potter 等^[18]发现农田弃耕后恢复为草地, 大约需要 100 a 的时间才能使 SOC 含量达到弃耕前的土壤碳水平。Deng 等^[7]报道了黄土丘陵区农地弃耕后自然恢复的草地土壤碳增汇效应是一个长期的过程。本研究结果表明, 短时间内天然草地的土壤固碳效应并不明显, 有机碳库的恢复可能需要一个漫长的过程。目前, 由于缺乏土壤碳汇长期的研究结果, 对土壤碳库恢复到原始植被条件下碳水平所需时间尚不明确^[19]。

3.2 天然草地恢复对土壤无机碳的影响

干旱、半干旱区土壤无机碳 (SIC) 大多数为次生碳酸盐, SIC 的形成是大气 CO₂ 重要的碳汇, SIC 的累积量与土壤母质、气候、淋溶等条件密切相关^[20]。本研究结果显示, 表层 0—20 cm SIC 储量占整个土壤剖面 SIC 储量的 1.2%~18.8%, 具有相对脱钙现象, 这与杨黎芳等^[20]、Chang 等^[21]研究结果相同。表层土壤 SOC 含量较高, 根系生物量分布密集, 土壤和根系呼吸作用释放出大量 CO₂, 造成表层 CO₂ 分压增大, 土壤 pH 值降低, 加快了表层土壤碳酸盐的溶解^[20-21]。另外, 表层土壤结构疏松, 也利于降水将表层 SIC 向下层土壤淋溶、迁移^[21], 从而引起表层 SIC 储存能力的下降。

土壤碳酸盐一般形成于土壤 pH>7, 年均降水量 <800 mm 的干旱半干旱地区^[20], 黄土高原气候干

旱,有利于有机碳矿化以及植被根系、土壤微生物呼吸释放出更多的 CO_2 , CO_2 溶于水形成碳酸溶液,溶解部分碳酸钙形成重碳酸钙溶液。土壤下层碳含量受微生物影响较弱, CO_2 分压小^[20-21],从表层土壤淋溶下来的重碳酸盐发生沉淀形成次生碳酸盐(即无机碳),在土壤剖面下部层位出现土壤无机碳的累积层。本研究发现不同恢复年限草地 SIC 最大值均出现在 30 cm 以下土层,与上述结果一致。干旱、半干旱地区降雨量较少,有限的淋溶作用使土壤表层以下出现不同深度的钙累积现象^[20-22]。而湿润地区降雨较丰富,对土壤的淋溶作用较强烈,最终使碳酸盐从土壤母质淋失,不利于形成钙累积层^[23]。于天仁等^[24]研究发现母质、年龄相同的土壤钙聚集层出现的深度与降雨量有密切关系,目前对干旱、半干旱区土壤碳酸盐聚集层位置的影响机理尚不完全清楚还需要进一步探讨。本研究还发现,天然草地群落的恢复对土壤无机碳库无明显影响,但改变了土壤剖面钙积层的分布深度。Chang 等^[21]也研究发现黄土高原植被恢复过程中土壤无机碳储量不变,但重新分配了剖面钙累积层深度。据野外采样调查时发现,恢复 22 a 的草地土壤剖面中分布有许多料浆石(即钙结核),这可能是 22 a 草地 SIC 含量显著高于其他年限草地的主要原因。

3.3 天然草地恢复对土壤总碳的影响

天然草地恢复过程中 0—100 cm 土层总碳(STC)储量无明显增加,甚至有略微下降趋势。STC 含量剖面分布与 SOC 库一致,0—10 cm 土层 STC 含量也表现出“表聚”效应,且随土层深度增加而减少,但减少幅度缩小。尽管 SIC 在表层土壤储量较低,但在 0—100 cm 土层 SIC 在 STC 中所占比例约为 75.6%~86.0%,SIC 库储量约为 SOC 库储量的 2.7~4.5 倍,表明了 SIC 库对 STC 储量的贡献占绝大部分。天然草地恢复过程中土壤表层 0—20 cm SOC 的增加弥补了表层 SIC 的下降,下层 20—100 cm 土壤 SIC 的累积又补偿了 SOC 的减少,才使土壤总碳库随植被恢复年限延长而无明显增加。由此可见,土壤有机碳库和土壤无机碳库共同维持着土壤总碳库的动态平衡。

4 结论

(1) 天然草地恢复过程中 0—100 cm 土层土壤有机碳(SOC)储量呈先减少后增加趋势,但仍未达到农田 SOC 的水平。表明短时间内天然草地的土壤碳汇效应并不明显,碳库增汇效应需要长期的过程。

(2) 0—20 cm 土层土壤无机碳(SIC)呈现相对脱钙现象,0—100 cm 土层 SIC 库储量约为 SOC 库的 2.7~4.5 倍。天然草地的恢复对土壤无机碳库储量影响不明显,但改变了 SIC 的剖面分布深度。

(3) 随植被恢复年限的增加天然草地土壤总碳(STC)库的碳汇效应未见明显增加。0—100 cm 土层 SIC 储量在 STC 储量中约占 75.6%~86.0%,可见土壤无机碳库是土壤总碳库储量的重要影响因素。

[参 考 文 献]

- [1] Keeling C D, Whorf T P, Wahlen M, et al. Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980[J]. *Nature*, 1995, 375(6533): 666-670.
- [2] Harrison R B, Footen P W, Strahm B D. Deep soil horizons: Contribution and importance to soil carbon pools and in assessing whole-ecosystem response to management and global change[J]. *Forest Science*, 2011, 57(1): 67-76.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Li Ming, Zhang Xingchang, Pang Guowei, et al. The estimation of soil organic carbon distribution and storage in a small catchment area of the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2013(101): 11-16.
- [6] 傅华,陈亚明,王彦荣,等.阿拉善主要草地类型土壤有机碳特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2004, 24(3): 469-476.
- [7] Deng Lei, Shanguan Zhouping, Sweeney S. Changes in soil carbon and nitrogen following land abandonment of farmland on the Loess Plateau, China[J]. *PloS one*, 2013, 8(8): e71923.
- [8] Landi A, Mermut A R, Anderson D W. Origin and rate of pedogenic carbonate accumulation in Saskatchewan shancement of soil carbonate precipitation passive removal of atmospheric CO_2 [J]. *Mineralogical Magazine*, 2008, 72(2): 639-649.
- [9] 秦小光,李长生,蔡炳贵.气候变化对黄土碳库效应影响的敏感性研究[J]. *第四纪研究*, 2001, 21(2): 153-161.
- [10] 李双双,延军平,万佳.近 10 a 陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征[J]. *地理学报*, 2012, 67(7): 960-970.
- [11] 邹厚远,刘国彬,王晗生.子午岭林区北部近 50 a 植被的变化发展[J]. *西北植物学报*, 2002, 22(1): 1-8.
- [12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社, 2000: 25-38.

- [13] 王艳芬,陈佐忠. 人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响[J]. 植物生态学报,1998,22(6): 545-551.
- [14] 陶贞,沈承德,高全洲,等. 高寒草甸土壤有机碳储量及其垂直分布特征[J]. 地理学报,2006,61(7):720-728.
- [15] 武小钢,郭晋平,杨秀云,等. 芦芽山典型植被土壤有机碳剖面分布特征及碳储量[J]. 生态学报,2011,31(11): 3009-3019.
- [16] 李裕元,邵明安,郑纪勇,等. 黄土高原北部草地的恢复与重建对土壤有机碳的影响[J]. 生态学报,2007,27(6):2279-2287.
- [17] 王俊明,张兴昌. 退耕草地演替过程中的碳储量变化[J]. 草业学报,2009,18(1):1-8.
- [18] Potter K N, Torbert H A, Johnson H B, et al. Carbon storage after long-term grass establishment on degraded soils[J]. Soil Science, 1999,164(10):718-725.
- [19] 杨景成,韩兴国,黄建辉,等. 土壤有机质对农田管理措施
- 的动态响应[J]. 生态学报,2003,23(4):787-796.
- [20] 杨黎芳,李贵桐. 土壤无机碳研究进展[J]. 土壤通报, 2011,42(4):986-990.
- [21] Chang Ruiying, Fu Bojie, Liu Guohua, et al. The effects of afforestation on soil organic and inorganic carbon: A case study of the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2012(95):145-152.
- [22] 张林,孙向阳,高程达,等. 荒漠草原土壤次生碳酸盐形成和周转过程中固存 CO₂ 的研究[J]. 土壤学报,2011, 48(3):578-586.
- [23] Wu Haibin, Guo Zhengtang, Gao Qiong, et al. Distribution of soil inorganic carbon storage and its changes due to agricultural land use activity in China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 129(4): 413-421.
- [24] 于天仁,陈志诚. 土壤发生中的化学过程[M]. 北京:科学出版社,1990:349-352.

(上接第 48 页)

- [19] 吴福生. 含植物明渠水动力特性研究[D]. 南京:南京水利科学研究院,2009.
- [20] 李勉,姚文艺,陈江南,等. 草被覆盖下坡面—沟坡系统坡面流阻力变化特征试验研究[J]. 水利学报,2007,38(1):112-119.
- [21] Chow V T. Open-channel hydraulics[M]. New York: McGraw-Hill, 1959.
- [22] 肖培青,姚文艺,李莉,等. 植被影响下坡面流阻力变化特征研究[J]. 泥沙研究,2013(3):1-5.
- [23] 潘成忠,上官周平. 降雨和坡度对坡面流水动力学参数的影响[J]. 应用基础与工程科学报,2009,17(6):843-851.
- [24] 田风霞,刘刚,郑世清,等. 草本植物对土质路面径流水动力学特征及水沙过程的影响[J]. 农业工程学报, 2009,25(10):25-29.
- [25] Engman E T. Roughness coefficients for routing surface runoff[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1986,112(1):39-53.
- [26] 张升堂,康绍忠. 基于矢量糙率的栅格单元流量分配模型[J]. 水利学报,2006,36(11):1326-1330.