

植被恢复对昆阳磷矿土壤有机碳储量的影响

赵川, 和丽萍, 李贵祥, 邵金平, 柴勇

(云南省林业科学院, 昆明 650201)

摘要: 植被恢复是既能保持磷矿开采时又能有效扼制矿区生态环境的退化, 并逐步恢复已退化的矿区生态系统最有效的生物措施。为揭示植被恢复对昆阳磷矿土壤有机碳和碳素积累的影响, 研究探讨了昆阳磷矿不同恢复林地的土壤有机碳储量变化。结果表明: (1) 不同恢复林地的土壤有机碳含量存在显著差异 ($p < 0.05$), 7种不同植被恢复人工林土壤平均有机碳含量分别是废弃地的14.29倍、11.83倍、11.40倍、5.89倍、15.48倍、15.59倍、18.53倍。(2) 土壤有机碳在剖面的含量表现出明显的“表聚作用”, 均以表土层(0—20 cm)最大, 且随土层厚度的增加, 呈下降趋势。(3) 不同恢复林地的土壤有机碳密度差别较大, 变化趋势和土壤有机碳含量的变化趋势一致, 且在同一林分土壤中, 单位深度土壤各土层平均有机碳密度均以表层最大, 随土层的增加而降低。(4) 土壤有机碳主要存储于0—20 cm土层中, 平均含量为53.60%, 随着土层的加深, 土壤有机碳所占比重急剧下降, 经过植被恢复, 7种人工林土壤有机碳储量较废弃地0—20 cm土壤有机碳储量提高了26.53%, 20.39%, 34.48%, 10.81%, 28.62%, 39.52%, 36.71%, 说明目前矿区通过植被恢复后的土壤状况显著优于未进行恢复措施的废弃地。

关键词: 土壤有机碳储量; 植被恢复; 林分类型; 昆阳磷矿

中图分类号: S714.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)05-0168-04

Impacts of Vegetation Restoration on the Soil Organic Carbon Storage in Kunyang Phosphorite Mine

ZHAO Chuan, HE Liping, LI Guixiang, SHAO Jinping, CHAI Yong

(Yunnan Academy of Forestry, Kunming 650201, China)

Abstract: Vegetation restoration can keep phosphate rock mining, effectively curb the mining area ecological environment degradation, and gradually restore the mining area of degraded ecosystem, is one of the most effective measures. The results show that significant differences of soil organic carbon(SOC) contents exist between the different forest types and soil layers, the average organic carbon contents under seven different vegetation restoration plantations (Ⅰ—Ⅶ) are 14.29 times, 11.83 times, 11.40 times, 5.89 times, 15.48 times, 15.59 times, 18.53 times of that of the abandoned land, and the difference is significant ($p < 0.05$); SOC contents of 7 stands present the phenomenon of surface enrichment, showing a decreasing trend from the surface to the deep layer, SOC content is mainly accumulates in 0—20 cm soil layer; vertical distribution of soil organic carbon density and vertical distribution of soil organic carbon content characteristics in seven kinds of stands are consistent, soil organic carbon density reduced with increase of soil depth, with soil organic carbon density in topsoil 0—20 cm is maximum; organic carbon reserves decreased with increase of soil depth, while soil organic carbon was mainly concentrated in the 0—20 cm soil layer, the average content is 53.60%. After vegetation restoration, soil organic carbon contents of 0—20 cm soil layers in 7 kinds of plantations increase by 26.53%, 20.39%, 34.48%, 20.39%, 28.62%, 39.52% and 28.62%, respectively, indicating that the soil conditions after vegetation restoration are significantly better than that of the remnant waste land without the recovery measures in the current mining area.

Keywords: soil organic carbon storage; vegetation restoration; forest types; Kunyang phosphorite mine

土壤是陆地生态系统中最大的碳库,其碳储量占整个陆地生态系统碳库的 $2/3$ ^[1]。土壤有机碳是土壤中较为活跃的部分,其含量和动态在土壤质量演变和全球碳循环中起着十分重要的作用^[2]。植被恢复是既能保持磷矿开采时又能有效扼制矿区生态环境的退化,并逐步恢复已退化的矿区生态系统最有效的生物措施。矿区废弃地作为重构土体,其土壤与自然立地条件下的土壤存在显著差异,主要表现为土壤层序紊乱、土壤结构性差、养分贫瘠,这些特殊性严重阻碍植物生长,进而影响微生物对凋落物和根系等土壤养分主要来源的分解与转化,最终可能会缓解碳氮的形成^[3]。因此,土壤有机碳成为衡量矿区土壤修复质量好坏的一个重要指标,研究矿区废弃地植被恢复土壤有机碳储量的变化过程对认识土壤质量的演变及其恢复效果评价有重要意义。

昆阳磷矿为我国磷化工业和农业生产的发展做出了重大贡献^[4]。但是随着近三十多年来的开采,对其地质环境造成了一定影响与破坏,诱发了一系列地质灾害和地质环境问题。项目组通过前期研究,提出了矿区生态修复综合配套技术,使示范区的生态环境得到恢复和改善,为全省矿区废弃地生态环境恢复治理工程提供有效的技术支撑及示范样板。目前自然条件下植被恢复与有机碳变化的关系已有大量研究,一系列研究表明,植被恢复可显著提高有机碳含量^[5],且在一定恢复年限内有机碳含量与恢复年限成正比^[6-7]。但关于矿区废弃地植被恢复对土壤有机碳储量的影响研究尚少,特别是对土壤不同层次有机碳的变化规律至今无人报道。本文的目的就是通过研究昆阳磷矿废弃地植被恢复过程中不同林分的土壤有机碳含量和有机碳储量变化,为合理评价植被恢复对土壤的碳汇效应及对土壤的改良与管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于昆明市西南 72 km,地理坐标为东经 $103^{\circ}31'10''$ — $103^{\circ}34'48''$,北纬 $24^{\circ}12'58''$,属北亚热带季风气候,年平均气温 14.7°C ,历年平均降水量 907.1 mm。矿区内土壤主要为红壤及冲积土。现有的各种植被类型都是在原有植被破坏后,植被恢复过程而形成的次生植被。矿区周围的植被大体可分为森林、灌丛、灌草丛和栽培植被 4 大类型。矿区附近的森林以暖温性针叶林为主,主要有云南松(*Pinus yunnanensis*)次生林和华山松(*Pinus armandii*)林,此外有以旱冬瓜(*Alnus nepalensis*)为主的落叶阔叶林。灌丛主要由落叶灌木山柳(*Clethra barbinervis*)和榛子(*Corylus heterophylla*)组成,其中也有一些

常绿种类如杜鹃(*Rhododendron simsii* R. spp)、水红木(*Viburnum cylindricum*)、杨梅(*Myrica rubra*)等,但数量较少,另外在灌丛中零星生长着云南松、华山松等乔木树种,形成稀树灌丛。灌草丛主要是由乔本科植物组成的禾草灌草丛。在禾草灌草丛中除草本植物外,常有少量灌木种类存在^[8]。

1.2 样品采集与分析

本研究所选样地均是在矿区废弃地采用平台覆土的方式进行植被恢复的,主要成分都是以采场剥离表土(红壤)为主,同白云岩、黑页岩和风化岩石混合而成。根据林木种植的措施、布局划分出 7 种人工植物群落,种植时间为 2005 年,包括蓝桉(*Eucalyptus globulus*)林、直干桉(*E. maideni*)林、圣诞树(*Acacia dealbata*)林、藏柏(*Cupressus torulosa*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)、旱冬瓜林、旱冬瓜+圣诞树林、废弃地(尚未采取任何植被恢复措施的区域)。于 2015 年 7 月进行群落调查和土壤样品的采集。在各人工林分内有代表性的地段,设置 3 个 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$ 的标准固定样地,对样地内乔木进行每木检尺(表 1)。每个样地分别设 3 个土壤剖面,观察剖面物理性质,分别在 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm 深度取环刀土及混合土样,用于测定土壤容重及室内化学分析,每个样点重复取 3 个样作为平行。将所取样本带回实验室后立即将鲜土样在室内铺于牛皮纸上,自然风干后去除石块、根茎及各种新生体和侵入体,研磨,过筛后保存备用。并同时测定 $>2\text{ mm}$ 的石砾含量(体积分数)。

土壤有机碳质量分数采用浓硫酸—重铬酸钾氧化外加热法测定^[9],土壤容重采用烘干法测定,在 $(105\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 条件下烘干至恒重。

1.3 相关计算及数据分析

土壤有机碳储量是在一个特定有机碳库中的有机碳量或者单位面积的有机碳库^[10],第 i 层单位面积土壤有机碳储量占剖面总有机碳储量的百分比 R_i 按照下面方法计算。如果某一土体的剖面由 k 层组成,则该剖面的土有机碳密度计算公式为^[11]:

$$\text{SOC}_i = O_i H_i B_i (1 - G_i) / 100 \quad (1)$$

式中: SOC_i 为土壤剖面第 i 层有机碳密度(kg/m^2); H_i 为第 i 层土壤的厚度(cm); B_i 为第 i 层土壤的容重(g/cm^3); O_i 为 i 层土壤的有机碳含量(g/kg); G_i 为直径 $\geq 2\text{ mm}$ 的石砾所占的体积百分比(%)。

如果某一土壤剖面由 k 层组成,那么该剖面的有机碳密度(kg/m^2)为:

$$\text{SOC}_t = \sum_{i=1}^k \text{SOC}_i = \sum_{i=1}^k O_i H_i B_i (1 - G_i) / 100 \quad (2)$$

式中: k 为土层数。

表 1 样地基本情况

样地林分类型	海拔/m	树高/m	胸径/cm	郁闭度	林下植物
蓝桉林	2190	15	14	0.9	紫茎泽兰(<i>Ageratina adenophora</i>)、红花月见草(<i>Oenothera rosea</i>)、三叶草(<i>Trifolium repens</i>)等
直干桉林	2210	15	15	0.5	紫茎泽兰较多,其他偶可见野拔子(<i>Elsholtzia rugulosa</i>)、匍匐风轮菜(<i>Clinopodium repens</i>)、红花月见草、酢浆草(<i>Oxalis griffithii</i>)等
圣诞树林	1989	10	11	0.7	紫茎泽兰、波叶山蚂蝗(<i>Desmodium sequax</i>)、野拔子等
藏柏林	2240	10	15	0.9	紫茎泽兰、云南兔儿风(<i>Ainsliaea yunnanensis</i>)、荩草(<i>Arthraxon hispidus</i>)、小铁仔(<i>Myrsine africana</i>)、沙针(<i>Oxyris wightiana</i>)等
栓皮栎林	2242	10	10	0.6	紫茎泽兰、喜阴悬钩子(<i>Rubus mesogaeus</i>)、波叶山蚂蝗、马桑(<i>Coriaria nepalensis</i>)、匍匐风轮菜、一把伞南星(<i>Arisaema erubescens</i>)等
旱冬瓜林	2189	5	7.5	0.6	小铁仔、滇榛(<i>Corylus yunnanensis</i>)、火棘(<i>Pyracantha fortuneana</i>)、多蕊金丝桃(<i>Hypericum choisianum</i>)、三叶草、紫茎泽兰、匍匐风轮菜等
旱冬瓜+圣诞树林 废弃地	2360 2160	6~7(旱冬瓜),8(圣诞树) —	12(旱冬瓜),16(圣诞树) —	0.7	栽秧泡(<i>Rubus ellipticus</i> var. <i>obcordatus</i>)、波叶山蚂蝗、黄毛草莓(<i>Fragaria nilgerrensis</i>)、紫茎泽兰、匍匐风轮菜、尼泊尔老鹳草(<i>Geranium nepalense</i>)等 匍匐风轮菜、多蕊金丝桃、长柔毛委陵菜(<i>Potentilla griffithii</i>)等

第*i*层单位面积土壤有机碳储量占剖面总有机碳储量的百分比按照下面公式计算:

$$R_i = \frac{SOC_i}{SOC_t} \times 100\%$$
 (3)

所有数据均采用 SPSS 11.5 实用统计软件和 Excel 2003 数据处理系统,进行数据分析和图表处理。

2 结果与分析

2.1 不同植被恢复林分土壤有机碳含量及其分布特征

由表 2 可看出,7 种植被恢复人工林样地和废弃地 0—60 cm 土壤平均有机碳含量为 1.22±0.12~

22.61±1.35 g/kg,大小依次为旱冬瓜+圣诞树林(22.61±1.35 g/kg)>旱冬瓜林(19.02±1.93 g/kg)>栓皮栎林(18.89±1.17 g/kg)>蓝桉林(17.43±1.12 g/kg)>直干桉林(14.43±1.23 g/kg)>圣诞树林(13.91±1.05 g/kg)>藏柏林(7.19±0.59 g/kg)>废弃地(1.22±0.12 g/kg),其中旱冬瓜+圣诞树林、旱冬瓜林、栓皮栎林、蓝桉林、直干桉林、圣诞树林、藏柏林平均有机碳含量分别是废弃地的 18.53 倍、15.59 倍、15.48 倍、14.29 倍、11.83 倍、11.40 倍、5.89 倍。

表 2 不同林分土壤有机碳含量 g/kg

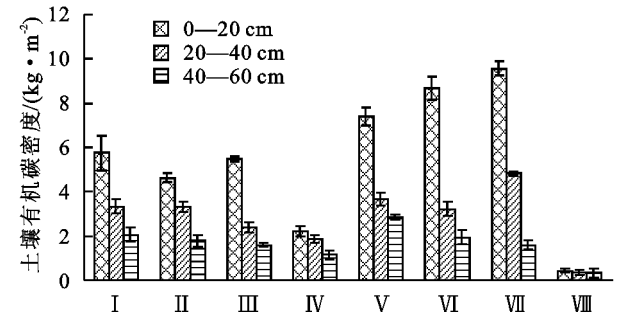
土层深度/cm	蓝桉林	直干桉林	圣诞树林	藏柏林	栓皮栎林	旱冬瓜林	旱冬瓜+圣诞树林	废弃地
0—20	26.38±1.56Ad	20.61±0.89Ae	24.09±1.40Ad	9.23±0.72Af	30.22±2.17Ac	36.13±3.19Ab	41.24±1.67Aa	1.40±0.13Aa
20—40	16.41±1.13Bb	14.87±1.60Bb	10.96±1.03Bb	7.64±0.54Bc	15.17±0.45Bb	13.21±1.52Bb	20.05±1.44Ba	1.19±0.12Bb
40—60	9.49±0.67Ca	7.80±1.20Ca	6.69±0.71Ca	4.68±0.52Cb	11.28±0.88Ca	7.71±1.06Ca	6.54±0.95Ca	1.07±0.11Cb
平均值	17.43±1.12	14.43±1.23	13.91±1.05	7.19±0.59	18.89±1.17	19.02±1.93	22.61±1.35	1.22±0.12

注:不同大、小写字母分别表示同一林分类型不同土层和不同林分类型同一土层间在*p*<0.05 水平下差异性显著。

土壤有机碳含量在土壤剖面的分布也存在明显差异,不同植被恢复林地土壤各层有机碳含量为1.07±0.11~41.24±1.67 g/kg(表 2),其中最大值是最小值的 38.54 倍,各植被类型土壤层有机碳含量均以表土层(0—20 cm)最大,且随土层厚度的增加,土壤有机碳含量呈下降趋势。

2.2 不同植被恢复林分土壤有机碳密度及其分布特征

不同植被恢复林分样地土壤有机碳密度在 0—60 cm 不同土层的垂直分布见图 1,分析结果表明:7 种不同植被恢复人工林和废弃地 0—60 cm 土壤平均有机碳密度为 5.33±0.20~0.36±0.12 kg/m²,整个土壤层面上土壤平均有机碳密度大小顺序为旱冬瓜+圣诞树林>栓皮栎林>旱冬瓜林>蓝桉林>直干桉林>圣诞树林>藏柏林>废弃地。



注:Ⅰ表示蓝桉林;Ⅱ表示直干桉林;Ⅲ表示圣诞树林;Ⅳ表示藏柏林;Ⅴ表示栓皮栎林;Ⅵ表示旱冬瓜林;Ⅶ表示旱冬瓜+圣诞树林;Ⅷ表示废弃地。下同。

图 1 不同植被恢复林分土壤有机碳密度

2.3 不同植被恢复林分土壤有机碳储量的剖面分布

根据公式(2),(3)计算 7 种不同植被恢复人工林

样地 0—60 cm 土壤层次单位面积有机碳储量占剖面有机碳总储量的百分比。由图 2 可知,各样地的有机碳储量均随着土层加深所占比例逐渐降低,各样地的有机碳主要集中于土层 0—20 cm 内,大小顺序为早冬瓜林(62.67%)>早冬瓜+圣诞树林(59.88%)>圣诞树林(57.85%)>栓皮栎林(53.10%)>蓝桉林(51.58%)>直干桉林(47.61%)>藏柏林(42.49%),平均含量为 53.60%;20—40 cm 土层中有机碳储量排序为藏柏林(35.77%)>直干桉林(34.04%)>早冬瓜+圣诞树林(30.12%)>蓝桉林(30.02%)>栓皮栎林(26.44%)>圣诞树林(25.39%)>早冬瓜林(23.28%),平均含量为 29.30%;40—60 cm 土层中有机碳储量排序为藏柏林(21.74%)>栓皮栎林(20.47%)>蓝桉林(18.38%)>直干桉林(18.35%)>圣诞树林(16.76%)>早冬瓜林(14.05%)>早冬瓜+圣诞树林(9.99%),平均含量为 17.11%。

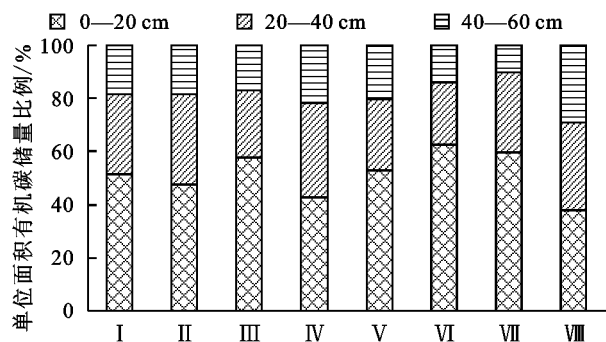


图2 不同植被恢复林分土壤有机碳储量剖面分布

3 结论与讨论

(1) 昆阳磷矿矿区废弃地不同恢复林分土壤有机碳含量随着土层深度增加显著减少,不同林分类型及土层间土壤有机碳含量存在明显差异;植被恢复对矿区土壤有机碳含量有了较大的提高;同一地区不同的林分类型因地表植被覆盖、枯落物分解程度、进入土壤的生物残渣、组成植物根系以及土壤微生物的分解作用等不同,土壤有机物质的输入和输出也不相同,从而影响土壤有机碳含量^[12-13]。

(2) 昆阳磷矿矿区废弃地不同恢复林地的土壤有机碳在剖面的含量表现出明显的“表聚作用”,各样地的有机碳主要集中于土层 0—20 cm 内,随着剖面深度的增加,有机碳含量逐渐降低,主要是因为影响土壤有机碳含量的因素(树木、地表植被的根系、凋落物等)主要集中在土壤表层。

(3) 昆阳磷矿矿区废弃地 7 种不同恢复林地的土壤有机碳密度差别较大,变化趋势和土壤有机碳含量的变化趋势一致,且在同一林分土壤中,单位深度土壤各土层平均有机碳密度均以表层最大,随土层的

增加而降低。不同植被恢复林分中,受不同植物根系分布、凋落物分解程度以及人为干扰等因素的影响,土壤有机碳含量及土壤容重出现不同的变化,导致土壤有机碳密度也随之出现差异^[14]。

(4) 7 种不同植被恢复人工林土壤有机碳主要存储于 0—20 cm 土层中,随着土层的加深,土壤有机碳所占比重急剧下降,最底层(40—60 cm)土层的土壤有机碳百分比最低。这主要是因为不同林分导致有机物进入土壤的方式和植物残体量不同,从而造成有机碳含量的垂直分布状况存在较大差异。同时,根系的垂直分布直接影响输入到土壤剖面各个层次的有机碳数量;而且随土层深度的增加分解者的活动减弱,导致植物碎屑在土壤中的位置越深,其分解也越慢^[15-16]。经过植被恢复,7 种人工林土壤有机碳储量较废弃地 0—20 cm 土壤有机碳储量提高了 26.53%,20.39%,34.48%,10.81%,28.62%,39.52%,36.71%,说明目前矿区通过植被恢复后的土壤状况显著优于未进行恢复措施的废弃地。

综上所述,碳输入主要来源的地表凋落物以及根系这两个生物因素的差异是造成矿区废弃地不同植被恢复林分碳储量和碳素积累差异较大的原因;植被恢复不仅显著影响地表凋落物的积累量和性质,而且显著影响土壤有机碳的积累速率。

参考文献:

- [1] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils [J]. *Nature*, 1990,348 (6298):232-234.
- [2] 周成虎,周启鸣,王绍强. 中国土壤有机碳库空间分布的分析与估算[J]. *Ambio:人类环境杂志*,2003,32(1):6-12.
- [3] 王清奎. 碳输入方式对森林土壤碳库和碳循环的影响研究进展[J]. *应用生态学报*,2011,22(4):1075-1081.
- [4] 施顺生. 昆阳磷矿采空区复垦技术及环境效益[J]. *中国工程科学*,2005(7) S:421-424.
- [5] 陈朝,吕昌河,范兰,等. 土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展[J]. *生态学报*,2011,31(18):5358-5371.
- [6] 梁爱华,韩新辉,张杨,等. 纸坊沟流域退化土壤碳氮关系对植被恢复的时空响应[J]. *生态学报*,2011,31(18):5358-5371.
- [7] 郭然,王效科,逯非,等. 中国草地土壤生态系统固氮现状和潜力[J]. *生态学报*,2008,28(2):862-867.
- [8] 和丽萍,方向京,李贵祥,等. 昆阳磷矿植被修复土壤理化与生物学性状的典型相关分析[J]. *水土保持研究*,2015,22(2):58-63,68.
- [9] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
- [10] 杨金艳,王传宽. 东北东部森林生态系统土壤碳贮量和碳通量[J]. *生态学报*,2005,25(11):2875-2882.

- [4] 赵哈林, 刘新民, 李胜功. 科尔沁沙地脆弱生态环境的基本属性特征和成因分析[J]. 中国沙漠, 1998, 18(2): 10-16.
- [5] 高君亮, 高永, 罗凤敏, 等. 表土粒度特征对风蚀荒漠化的响应[J]. 科技导报, 2014(25): 20-25.
- [6] 赵文智, 刘志民, 程国栋. 土地沙质荒漠化过程的土壤分形特征[J]. 土壤学报, 2002, 39(6): 877-881.
- [7] 文海燕, 傅华, 赵哈林. 退化沙质草地开垦和围封过程中的土壤颗粒分形特征[J]. 应用生态学报, 2006, 17(1): 55-59.
- [8] 齐雁冰, 常庆瑞, 惠洪河. 人工植被恢复荒漠化逆转过程中土壤颗粒分形特征[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 566-569.
- [9] 高君亮, 李玉宝, 虞毅, 等. 毛乌素沙地不同土地利用类型土壤分形特征[J]. 水土保持研究, 2010, 17(6): 220-223.
- [10] 张正偲, 董治宝. 土壤风蚀对表层土壤粒度特征的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(12): 86-89.
- [11] 王淮亮. 基于数字图像处理的风蚀地表颗粒特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.
- [12] 高君亮, 郝玉光, 丁国栋, 等. 乌兰布和荒漠生态系统防风固沙功能价值初步评估[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(12): 41-46.
- [13] 马玉明, 王林和, 姚云峰, 等. 风沙运动学[M]. 呼和浩特: 远方出版社, 2004.
- [14] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [15] 任雪, 褚贵新, 王国栋, 等. 准噶尔盆地南缘绿洲—沙漠过渡带“肥岛”形成过程中土壤颗粒的分形研究[J]. 中国沙漠, 2009, 29(2): 298-304.
- [16] 张继义, 王娟, 赵哈林. 沙地植被恢复过程土壤颗粒组成变化及其空间变异特征[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 153-157.
- [17] 伏耀龙, 张兴昌, 王金贵. 岷江上游干旱河谷土壤粒径分布分形维数特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 120-125.
- [18] 管孝艳, 杨培岭, 吕焯. 基于多重分形的土壤颗粒粒径分布于土壤物理特性关系[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 44-50.
- [19] 朱震达, 陈治平, 吴正, 等. 塔克拉玛干风沙地貌研究[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [20] 高亚军. 陕北农牧交错带土地荒漠化演化机制及土壤质量评价研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2003.
- [21] 邹诚, 徐福利, 闫亚丹. 黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用模式对土壤机械组成和速效养分影响分析[J]. 生态农业科学, 2008, 24(12): 424-427.
- [22] Langford R P. Nabkha (coppice dune) fields of south-central New Mexico, U. S. A[J]. Journal of Arid Environment, 2000, 46: 25-41.
- [23] 刘小平, 董治宝. 直立植被粗糙度和阻力分解的风洞试验研究[J]. 中国沙漠, 2002, 22(1): 82-87.
- [24] 张世熔, 邓良基, 周倩, 等. 耕层土壤颗粒表面的分形维数及其与主要土壤特性的关系[J]. 土壤学报, 2002, 39(2): 221-226.
- [25] 苏永中, 赵哈林. 科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 71-74.

~~~~~

(上接第 171 页)

- [11] Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Soil carbon pool in China and its global significance [J]. Journal of Environmental Sciences, 1996, 2: 249-254.
- [12] Post W M, Izaurralde R C, Mann L K. Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil[J]. Climatic Change, 2001, 51(1): 73-99.
- [13] 丁访军, 潘忠松, 周凤娇, 等. 黔中喀斯特地区 3 种林型土壤有机碳含量及垂直分布特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 161-164, 169.
- [14] 梁启鹏, 余新晓, 庞卓, 等. 不同林分土壤有机碳密度研究[J]. 生态环境, 2010, 19(4): 889-893.
- [15] 王文静, 王百田, 吕钊, 等. 山西太岳山不同林分土壤有机碳储量研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(1): 81-85.
- [16] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99-105.