

云雾山草地植被恢复过程土壤水库特性及影响因素^{*}

张 扬^{1,2}, 赵世伟¹, 侯庆春¹, 华 娟^{1,2}

(1. 中国科学院水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 为了了解植被恢复过程土壤水库特征的变化及其驱动因子, 为半干旱典型草原区植被恢复的土壤环境效应提供评价依据, 研究了宁南半干旱典型草原区植被恢复 80 a 对土壤水库库容、实际贮水量和贮水效率的影响及驱动因子。结果表明: 土壤水库总库容、吸持库容、实际贮水量、贮水效率以及土壤物理性质均在草原植被恢复 25 a 内不断提高, 经 37 a 略微下降后随植被演替土壤水库特征和土壤物理性质继续改善。通过逐步回归分析, 容重、有机质含量和水稳性团聚体分形维数是影响土壤水库总库容的主要因子, 毛管孔隙度则是影响土壤实际贮水量和贮水效率的主要因子。土壤有机质含量与容重、分形维数呈显著负相关 ($P < 0.05$), 与毛管孔隙度呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。植被恢复促使有机质积累, 从而改善了土壤结构状况, 提高了土壤贮水能力、贮水量和贮水效率。可以认为土壤有机质积累是土壤水库功能提高的直接动力。

关键词: 典型草原; 土壤水库; 植被恢复; 土壤贮水能力

中图分类号: S152.7; S283

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2009)03-0200-04

Soil Storage Characteristics and Its Influencing Factors during Revegetation in Yunwu Mountains

ZHANG Yang^{1,2}, ZHAO Shi-wei¹, HOU Qing-chun¹, HUA Juan^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: In order to provide some basic foundation with revegetation and soil reservoir in semi-arid typical grassland areas, we need to deepen our understanding on the change of soil reservoir and its driving factors. We studied the effect of vegetation restoration 80a on soil storage capacity, practical storage and the efficiency of soil storage. The result showed that soil storage capacity, retention storage capacity, practical storage, the efficiency of soil storage and soil physical properties improved constantly, in the plant community which was enclosed 25 years. However they declined slightly at 37 a. Soil storage and soil physical properties improved again after 37 a when the plant community was enclosed. Application of the stepwise regression, we can find that the driving factors of soil storage capacity were bulk density, organic matter content and fractal dimension. The driving factors of Soil practical storage and the efficiency of soil storage were capillary porosity. Correlative analysis show that content of soil organic matter negatively correlated with bulk density and fractal dimension ($P < 0.05$), respectively positive correlated with capillary porosity ($P < 0.01$). Revegetation was precondition of accumulation of organic matter, which improved water storage capacity. Therefore, soil organic matter was basic motive force of soil reservoir function.

Key words: typical steppe; soil reservoir; revegetation; water-holding capacity of the soil

土壤水库是联系地面水库和地下水库的纽带, 是地上植被赖以生存的根基。抢救和保卫土壤水库是黄土高原综合治理与持续发展治本之道^[1]。厚达 100 m 以上的黄土-古土壤系列为黄土高原提供了巨大的土壤水库, 但近年来由于人为干扰, 植被的破坏, 水土流失加剧, 土壤水库遭到了毁灭性的破坏, 生态环境正常发展受阻^[1]。植被繁衍是形成高容量土壤水库的“天赐动力和强劲保障”^[1-2]。森林植被恢复过程对土壤水库的生态效应引起了一些研究者的关注, 对不同林地类型、不同林地恢复阶段的土壤水库贮水能力进行了详细的分

* 收稿日期: 2009-03-10

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划课题(2006BCA010A07, 2006BAD09B08)

作者简介: 张扬(1984-), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤水分研究。E-mail: zhangyang06@mails.gucas.ac.cn

通讯作者: 赵世伟(1962-), 男, 研究员, 主要从事植被与土壤互动关系研究。E-mail: swzhao@ms.iswc.ac.cn

析^[3-7];草地植被恢复过程研究多见于对土壤水分的研究^[8],而土壤水分在把土壤作为一个整体的“水库”中运动方面的研究较少;植被恢复对土壤水库贮水能力和贮水效率及其驱动因子的关系尚不清楚。本文通过研究半干旱典型草原区植被恢复过程中土壤水库的生态效应,探讨土壤水库功能恢复与提高的驱动因子,揭示植被恢复对土壤水库的影响机理,为黄土高原水库恢复和植被建设提供理论依据。

1 研究区概况

云雾山自然保护区代表我国黄土高原地区温带草原地带及以长芒草为建群种的草原生态系统,已具备典型、完整的长芒草草原生态系统特征,位于宁夏回族自治区固原市东北部,东经 106°24' - 106°28', 北纬 36°13' - 36°19', 海拔 1 800 ~ 2 148 m, 总面积 4 000 hm²。属温凉半干旱黄土覆盖的低山丘陵区,年平均气温 4 ~ 6 °C, 干燥度 1.5 ~ 2.0, 年降雨量 400 ~ 450 mm, 0 ~ 10 °C 积温为 2 370 ~ 2 882 °C, 年均无霜期为 112 ~ 137 d, 年日照时数约为 2 500 h。地带性土壤为山地灰褐土和黑垆土,土层分布均匀深厚,地下水位深,对土壤水补充能力差。该区常见的植物群落有大针茅 (*Stipa grandis*) 群落 (80 a)、长芒草 (*Stipa bungeana*) 群落 (60 a)、铁杆蒿 (*Artemisia gmelinit*) 群落 (37 a)、百里香 (*Thymus mongolicus*) 群落 (25 a) 和杂草群落^[2]。样地具体条件见表 1。

表 1 样地具体条件

植被恢复 时间/a	海拔/ m	坡向	坡度/ (°)	有机质/ (g · kg ⁻¹)	饱和导水率/ (mm · min ⁻¹)	生物量/ (g · m ⁻³)	植被
0	2037	半阳坡	13.3	2.54	0.18	-	大燕麦
7	2083	半阳坡	13.3	11.51	0.23	231.9	赖草 - 阿尔泰狗娃花 + 猪毛蒿
17	2089	半阳坡	20.7	13.33	0.26	267.4	铁杆蒿 - 大针茅 + 乳白香青 + 阿尔泰狗娃花
25	2038	半阴坡	11.7	18.23	0.59	381.5	长芒草 - 铁杆蒿 + 大针茅 + 百里香
37	2074	半阳坡	17.3	13.86	0.55	277.5	铁杆蒿 - 大针茅 + 阿尔泰狗娃花 + 百里香 + 长芒草
60	2056	半阴坡	13.3	17.55	0.48	261.5	大针茅 + 长芒草 - 铁杆蒿 + 白颖苔草
80	2028	半阴坡	18.3	16.95	0.54	348.9	长芒草 - 铁杆蒿 + 大针茅 + 百里香

2 研究方法

(1) 土壤物理性质的测定。在样地内按“S”型布点,每块样地内分别选取 3 个试验点,按人工分层在 100 cm (0 - 5 cm, 5 - 10 cm, 10 - 20 cm, 20 - 40 cm, 40 - 70 cm, 70 - 100 cm) 土层内用环刀取土,测定土壤的容重和含水率,并绘制水分特征曲线。利用加权平均计算整个剖面的平均值。

(2) 土壤含水率用烘干法测定。

(3) 土壤贮水量的计算。计算 100 cm 土层深度内土壤水库的吸持库容、滞留库容和总库容,公式如下:

$$W_c = 10000 P_c hr, W_a = 10000 P_a hr, W_i = W_c + W_a \quad W = 10 \sum_{i=1}^n h_i$$

式中: W_c ——土壤吸持库容 (t/hm²); P_c ——毛管孔隙度 (%); W_a ——土壤滞留库容 (t/hm²); P_a ——毛管孔隙度 (%); W_i ——土壤总库容 (t/hm²); h ——土层深度 (m); r ——水的比重 (t/m³); W ——土壤实际贮水量 (t/hm²); n ——100 cm 土壤划分的含水均一的层次; i ——第 i 层土壤质量含水量; ρ ——土壤容重 (g/cm³)。

(4) 土壤水库贮水效率的计算: $e = W / W_i$

式中: e ——土壤水库贮水效率 (%)。土壤水库贮水效率是实际贮水量与贮水潜力 (土壤总库容) 的比值,反映了土壤水库的利用效率,土壤水库功能的优劣的反映。

(5) 数据处理 利用 Excel 和 SPSS13.0 软件对数据进行统计分析。

3 结果与分析

3.1 土壤水库贮水能力

土壤水库总库容和分库容受土壤物理性质影响很大,土壤水库总库容是毛管孔隙与非毛管孔隙水分贮蓄量之和,反映了土壤水库贮蓄和水土保持功能的潜在能力,它是土壤涵蓄潜力的最大值,也可以反映土壤涵养水源及调节水分循环的一个重要指标^[5-6]。从土壤保水能力来看,吸持库容可以长时间保持在土壤中,主要用于植物根系吸收和土壤蒸散;从土壤蓄水能力来看,滞留库容能较快容纳降水并及时下渗,更加有利于涵养水源。

根据分层实测的孔隙度逐层累计计算得出不同植被恢复年限土壤各分库容 (表 2)。随着植被恢复,25 a 内 100 cm 土层土壤水库总库容和吸持库容不断增加,与坡耕地 (0 a) 相比,二者在 25a 时分别增加 13.0%, 49.37%, 经 37 a 略微下降而后随植被恢复时间延长,分别稳定至 6 000 t/hm², 2 450 t/hm² 左右。植被演替过程中,土壤滞留库容在 3 296.67 ~ 3 570.68 t/hm² 之间,无明显规律性变化,但均小于坡耕地 (0 a)。随着植被

恢复,土壤水库总库容波动性增加,其增加主要源于吸持库容的增加。植被恢复明显增加了土壤吸持水分的能力,植物根系可吸收利用的水分增加;滞留库容的涵养水源能力无明显变化。在黄土高原典型草原区土壤滞留库容远大于吸持库容。

表 2 土壤的物理特性及贮水能力

植被恢复 时间/a	容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	参数 a	孔隙度/ %			库容/($t \cdot hm^{-2}$)				
			总孔隙	毛管	非毛管	总库容	吸持	滞留	实际	效率
0	1.24	12.91	53.11	16.97	36.14	5310.73	1697.22	3613.51	1682.15	31.67
7	1.18	16.65	55.66	20.92	34.73	5565.63	2092.31	3473.32	1759.80	31.62
17	1.13	19.81	57.50	24.53	32.97	5749.77	2453.10	3296.67	2273.15	39.53
25	1.06	20.07	60.00	25.35	34.65	5999.65	2535.14	3464.51	2420.83	40.35
37	1.14	17.48	57.23	21.99	35.24	5723.34	2199.31	3524.03	1941.83	33.93
60	1.10	19.42	58.78	24.56	34.23	5878.38	2455.56	3422.82	2137.75	36.37
80	1.05	19.57	60.22	24.51	35.71	6022.12	2451.44	3570.68	2125.85	35.30

3.2 土壤实际贮水量与土壤水库贮水效率

草地植被恢复最初的 25 a 内 100 cm 土层实际贮水量不断增加(表 2),恢复至 25 a($2\ 420.83\ t/hm^2$)时较农田($1\ 682.15\ t/hm^2$)提高 43.91%。经 37 a 时下降后,随植被恢复时间延长贮水量稳定至 $2\ 137.75\ t/hm^2$ 。土壤水库贮水效率在植被恢复 25 a 内从 31.67% 增加到 40.35%,随植被恢复时间延长稳定至 35% 左右。说明随着植被恢复,土壤的实际贮水量得到恢复,土壤水库的贮水效率也随之提高,土壤水库功能得到改善。

3.3 土壤持水性与孔隙状况

由于不同植被的改良土壤作用,在同一生境下形成的土壤具有不同的理化特性,因而具有不同的蓄水、持水性能,并反映在土壤水分特征曲线上。实测土壤含水量和土壤吸力之间的关系为 $\theta = aS^b$,式中: θ 为土壤重量含水量, S 为土壤吸力, a, b 为参数,其中参数 a 可反映土壤持水性能的大小^[9]。由表 2 可见, a 值呈现先升高,再降低后升高的趋势。农地最低(12.91);在最初的 25 a 内,随着植被恢复时间的延长 a 值不断增加,25 a 最大为 20.07,37 a 降低到 17.48,随着植被演替到顶级群落 a 值又不断提高到 19.57。说明参数 a 随着演替的进程并不是持续增加。

土壤容重和孔隙度是土壤物理性质的一个重要指标,影响土壤的透水性、通气性、松紧度、入渗性能、持水能力、溶质迁移特征和土壤的抗侵蚀能力。植被恢复后土壤(0-100 cm)容重降低,在 $1.05 \sim 1.18\ g/cm^3$ 之间,低于坡耕地土壤(表 2)。植被恢复 25 a 内容重减少至 $1.06\ g/cm^3$,而后容重波动性降低(表 2)。土壤容重与参数 a 的变化趋势相反,但所反映的土壤物理性质的变化趋势相同。

3.4 土壤物理特征对土壤水库总库容、土壤实际贮水量和贮水效率的影响

本文选用表征土壤结构的 8 个因子:容重(X_1)、饱和导水率(X_2)、参数 a (X_3)、毛管孔隙度(X_4)、非毛管孔隙度(X_5)、有机质含量(X_6)、分形维数(X_7)和 $>0.25\ mm$ 水稳性团聚体含量(X_8)对 100 cm 土壤水库总库容(Y_1)、实际贮水量(Y_2)、土壤水库贮水效率(Y_3)进行逐步回归分析,得出:

$$Y_1 = 9512.583 - 3043.430 X_1 + 7.953 X_6 - 154.391 X_7 \quad R^2 = 0.999 \quad P < 0.01 \quad (1)$$

$$Y_2 = 18.961 + 8.194 X_4 \quad R^2 = 0.833 \quad P < 0.05 \quad (2)$$

$$Y_3 = 13.762 + 0.960 X_4 \quad R^2 = 0.679 \quad P < 0.05 \quad (3)$$

由式(1)可知,影响土壤水库总库容的因子有容重、有机质含量和分形维数,即有机质含量越高、土壤结构越好(容重和分形维数越低),总库容越大。容重对总库容的影响最大,直接通径系数为 -0.81,其对总库容的影响是直接的。有机质含量对总库容的直接影响为 0.17,通过容重对总库容的间接影响为 0.76,说明有机质含量提高使容重降低,总库容提高。分形维数对土壤水库总库容的直接作用最小,仅为 0.04,通过容重对总库容的间接影响为 -0.66。容重是土壤有机质含量和土壤结构的综合反映,是土壤水库总库容的主要影响因子。

由式(2),(3)可知,影响土壤实际贮水量和贮水效率的因子均为毛管孔隙度,毛管孔隙通过毛管力的作用长期保持土壤水分,并能为植物生长所利用。毛管孔隙的增加能够增加土壤的实际贮水量和贮水效率。

3.5 土壤各项性质相关性分析

表 4 的分析结果表明,土壤有机质含量与容重、分形维数呈显著负相关($P < 0.05$),与饱和导水率、参数 a 、

表 3 各因素对土壤水库总库容的通路分析

影响因子	直接作用	间接作用		
		X_1	X_6	X_7
X_1	-0.81		-0.16	-0.03
X_6	0.17	0.76		0.03
X_7	-0.04	-0.66	-0.14	

毛管孔隙度、 >0.25 mm 水稳性团聚体含量呈显著正相关 ($P < 0.05$)。毛管孔隙度与容重、分形维数呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与参数 a 、有机质含量、 >0.25 mm 水稳性团聚体含量呈极显著正相关 ($P > 0.01$), 尤其与参数 a 相关系数为 1.00, 说明表征土壤持水性能的参数 a 完全取决于土壤毛管孔隙度。土壤非毛管孔隙度与其他性质均无显著性相关。

表4 土壤各项性质相关分析

	容重	饱和 导水率	参数 a	毛管孔 隙度	非毛管 孔隙度	有机 质含量	分形 维数	>0.25 mm 水 稳性团聚体
容重	1							
饱和导水率	-0.83*	1						
参数 a	-0.91**	0.65	1					
毛管孔隙度	-0.93**	0.68	1.00**	1				
非毛管孔隙度	0.25	0.08	-0.62	-0.59	1			
总有机质含量	-0.94**	0.81*	0.94**	0.95**	-0.41	1		
分形维数	0.82*	-0.82*	-0.83*	-0.85**	0.4	-0.83*	1	
>0.25 mm 水稳性团聚体	-0.82*	0.7	0.87**	0.87**	-0.43	0.95**	-0.67	1

注: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$ 。

4 结论与讨论

(1) 在半干旱典型草原植被恢复 25 a 内, 土壤水库总库容和吸持库容不断提高, 到 25 a 时分别较坡耕地提高 13.0%, 49.37%。随植被恢复时间延长, 土壤最大和吸持库容经略微下降后, 二者增加至稳定。植被恢复过程土壤滞留库容无明显规律性变化, 但均小于坡耕地。

(2) 0 - 100 cm 土层实际贮水量、土壤水库贮水效率、土壤持水性、容重和孔隙状况变化规律与土壤水库总库容和吸持库容相同。说明土壤水库的贮水能力和土壤水分状况并不是随着植被恢复年限的延长而不断增加, 而是植被恢复 25 a 内土壤性质和贮水能力不断增大, 而后土壤性质和贮水能力波动性提高。

(3) 土壤结构特征和有机质含量对土壤贮水潜力、实际贮水量和贮水效率有重要影响。有机质含量越高, 团聚体分形维数和土壤容重越低, 土壤水库总库容越大。毛管孔隙度越大, 土壤实际贮水量和贮水效率越高。土壤有机质含量与容重、分形维数呈显著负相关 ($P < 0.05$), 与毛管孔隙度呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。随着恢复的进行, 盖度提高, 生物量增大, 凋落物增多, 植被的生物吸收、固定和表层富集作用等, 使得土壤有机碳、氮等微生物结构性物质逐渐增多。有机质水平的提高有利于土壤结构的形成和稳定性提高^[10-11], 降低容重, 增加孔隙度^[10]。有机质积累是土壤贮水能力、贮水量和贮水效率提高的直接动力。

(4) 随着植被恢复时间的延长, 土壤的物理性质、有机质含量以及贮水能力并不是持续提高。安韶山等在该区域对团聚体分形维数表征的土壤结构^[12]、土壤有机质含量^[13]以及酶活^[14](尿酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶、脱氢酶)的研究也出现同样规律。说明在植被恢复初期, 坡耕地撂荒后, 群落组成种对空闲生态位的拓展和利用, 使群落盖度、生物量不断增加, 对土壤物理、化学、生物学性质的影响比较大。随植物生产力不断提高, 对土壤水分和养分的需求增加, 在超过土壤承载力时, 植被生物量降低^[15], 随恢复时间延长植被与土壤间达到一个新的平衡。同时也说明植被自然恢复一定时间后土壤性质受到植被特性等多种因素的影响, 有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 朱显谟. 抢救“土壤水库”实为黄土高原生态环境综合治理与可持续发展的关键[J]. 水土保持学报, 2000, 14(1): 1-6.
- [2] 邹厚远, 张信. 云雾山草原自然保护区的管理途径探讨[J]. 草业科学, 1997, 14(1): 3-4.
- [3] 柴亚凡, 王恩姮, 陈祥伟, 等. 植被恢复模式对黑土贮水性能及水分入渗特征的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 60-64, 73.
- [4] 黄荣珍, 李凤, 谢锦升, 等. 福建闽江上游不同林地类型土壤水库蓄水量动态变化[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 50-53.
- [5] 刘霞, 张光灿, 李雪蕾, 等. 小流域生态修复过程中不同森林植被土壤入渗与贮水特征[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 1-5.
- [6] 孙艳红, 张洪江, 程金花, 等. 缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 106-109.
- [7] 魏强, 张秋良, 代海燕, 等. 大青山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 111-115.
- [8] 焦峰, 温仲明, 焦菊英, 等. 黄丘区退耕地植被与土壤水分养分的互动效应[J]. 草业学报, 2006, 15(2): 79-84.
- [9] 赵世伟, 吴金水. 子午岭北部不同植被类型土壤水分特征研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(4): 119-122.

下转第 231 页

3 结论

在土壤剖面上,尽管长芒草群落盖度不同,但土壤初始入渗速率和稳定入渗速率都随着土壤深度的增加而下降。因此,如果降雨历时较长,土壤入渗速率可能不断下降,直至土壤入渗速率与下层较低的稳定入渗速率相一致。在同一深度的土壤剖面上,群落盖度越大土壤初始入渗速率和稳定入渗速率也分别越高。逐步回归分析表明,影响土壤初始入渗速率的主要因素是土壤有效孔隙度、初始含水量和水稳性团聚体含量;影响土壤稳定入渗速率的主要因素是土壤有效孔隙度、根长密度和水稳性团聚体含量。但水稳性团聚体对表层土壤初始入渗速率和稳定入渗速率影响不显著。长芒草群落通过对土壤物理机械作用和根系死亡留下的根孔提高了土壤的有效孔隙,使土壤水分入渗性能提高。此外,长芒草群落还通过提高土壤有机质含量和水稳性团聚体含量提高了土壤的入渗性能。

参考文献:

- [1] Bens O, Wahl N A, Fischer H, et al. Water infiltration and hydraulic conductivity in sandy cambisols: impacts of forest transformation on soil hydrological properties [J]. *Eur. J. For. Res.*, 2007, 126: 101-109.
- [2] Anderson S H, Udawatta R P, Seobi T, et al. Soil water content and infiltration in agroforestry buffer strips [J]. *Agroforestry System*, 2009, 75: 5-16.
- [3] 袁建平,张素丽,张春燕,等.黄土丘陵区小流域土壤稳定入渗速率空间变异[J].*土壤学报*,2001,38(4):579-583.
- [4] 王国梁,刘国彬,周生路.黄土丘陵沟壑区小流域植被恢复对土壤稳定入渗的影响[J].*自然资源学报*,2003,18(5):529-536.
- [5] 吴钦孝,韩冰,李秧秧.黄土丘陵区小流域土壤水分入渗特征研究[J].*中国水土保持科学*,2004(2):1-5.
- [6] 单建平,陶大力.国外对树木细根的研究动态[J].*生态学杂志*,1992,11(4):46-49.
- [7] 花伟东,郭亚芬,张忠学.坡耕地局部打破犁底层对水分入渗的影响[J].*水土保持学报*,2008,22(5):213-216.
- [8] 徐敬华,王国梁,陈云明,等.黄土丘陵区退耕地土壤水分入渗特征及影响因素[J].*中国水土保持科学*,2008,6(2):19-25.
- [9] 许明祥,刘国彬,卜崇峰,等.圆盘入渗仪法测定不同利用方式土壤渗透性试验研究[J].*农业工程学报*,2002,12(4):54-58.

责任编辑:李鸣雷 刘 英

上接第 183 页

- [10] 田大伦,陈书军.樟树人工林土壤水文物理性质特征分析[J].*中南林学院学报*,2005,25(2):1-6.
- [11] 王燕,王兵,赵广东,等.江西大岗山3种林型土壤水分物理性质研究[J].*水土保持学报*,2008,22(1):151-153.
- [12] 任海.小良热带人工混交林的枯落物及其生态效益研究[J].*应用生态学报*,1998,9(5):458-462.
- [13] 王棣,吕皎.油松混交林的水土保持及水源涵养功能研究[J].*水土保持学报*,2001,15(4):44-46.
- [14] 陈礼光,郑郁善,林金国,等.突脉青冈林水文效应研究[J].*福建林学院学报*,1999,19(2):170-173.
- [15] 郑郁善,陈礼光,洪长福,等.沿海丘陵巨尾桉人工林水源涵养功能研究[J].*江西农业大学学报*,2000,22(2):220-224.
- [16] 余新晓,张建军,朱金兆.黄土地区防护林生态系统土壤水分条件的分析与评价[J].*林业科学*,1996,32(4):289-296.
- [17] 孙艳红,张洪江,程金花.缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J].*水土保持学报*,2006,20(2):106-109.
- [18] 吴钦孝,韩冰,李秧秧.黄土丘陵区小流域土壤水分入渗特征研究[J].*中国水土保持科学*,2004,2(6):1-5.
- [19] 余新晓,赵玉涛.贡嘎山东坡峨眉冷杉林地物分布及其水文效应初步研究[J].*北京林业大学学报*,2002,24(56):14-18.
- [20] 李少宁.江西省既大岗山森林生态系统服务功能研究[D].北京:中国林业科学研究院,2007.

责任编辑:李鸣雷 刘 英

上接第 203 页

- [10] Franzluebbers A J. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth[J]. *Soil and Tillage Research*,2002,66(2):197-205.
- [11] Horn R, Taubner H, Wuttke M. Soil physical properties related to soil structure[J]. *Soil and Tillage Research*,1994,30(2):187-216.
- [12] 安韶山,张扬,郑粉莉.黄土丘陵区土壤团聚体分形特征及其对植被恢复的响应[J].*中国水土保持科学*,2008,6(2):66-70,82.
- [13] 安韶山,张玄,张扬,等.黄土丘陵区植被恢复中不同粒级土壤团聚体有机碳分布特征[J].*水土保持学报*,2007,21(6):109-113.
- [14] 黄懿梅,安韶山,曲东,等.黄土丘陵区植被恢复过程中土壤酶活性的响应与演变[J].*水土保持学报*,2007,21(1):152-155.
- [15] 郭忠升,邵明安.半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J].*生态学报*,2003,23(8):1640-1647.

责任编辑:李鸣雷 刘 英