武夷山风景区不同林地类型土壤水分物理性质及土壤水库特性

李 灵[1], 张 玉[1], 孔丽娜[1], 江慧华[1], 陈家晖[1], 周 艳[2]
(1. 福建省绿色化工技术重点实验室, 武夷学院 环境与建筑工程系, 福建 武夷山 354300;
2. 武夷山风景名胜区管理委员会, 福建 武夷山 354300)

摘 要: 对武夷山风景区 6 种林地类型的土壤容重、孔隙度、持水量及土壤水库容等性能进行了研究, 结果表明, (1) 0—60 cm 土层土壤容重为杉木林> 马尾松林> 灌木林> 针阔混交林> 竹林> 常绿阔叶林。(2) 6 种林地土壤总孔隙度和最大持水量为常绿阔叶林> 竹林> 针阔混交林> 灌木林> 马尾松林> 杉木林; 毛管孔隙度和田间持水量为竹林> 常绿阔叶林> 针阔混交林> 灌木林> 马尾松林> 杉木林; 非毛管孔隙度为常绿阔叶林> 针阔混交林> 灌木林> 马尾松林> 杉木林> 竹林; 毛管持水量为竹林> 常绿阔叶林> 灌木林> 针阔混交林> 马尾松林> 杉木林。(3) 在 0—60 cm 土层内, 常绿阔叶林和竹林的土壤总库容最大, 针阔混交林、灌木林、马尾松林次之, 杉木林的最小。竹林的储水库容最大, 而通透库容最小。在相同的立地条件下, 常绿阔叶林的土壤特性优于其它林分, 最有利于涵养水源。

关键词: 林地类型; 土壤水分; 物理性质; 土壤水库; 武夷山风景区
文献标识码: A 文章编号: 1000-288X(2011)03-0060-06 中图分类号: S714.7, S727.21

Soil Physical Characteristics and Water Storage Capacity for Six Main Forest Lands in Wuyishan Scenery District

LI Ling[1], ZHANG Yu[1], KONG Li-na[1], JIANG Hui-hua[1], CHEN Jia-hui[1], ZHOU Yan[2]
(1. *Provincial Key Laboratory of Green Chemical Industry Technology, Department of Environmental and Architecture Engineering of Wuyi College, Wuyishan, Fujian* 354300, *China*;
2. *Administration Committee of Wuyishan Scenery District, Wuyishan, Fujian* 354300, *China*)

Abstract: Soil bulk density, soil porosity, soil moisture capacity and water storage characteristics for six main forest types in Wuyishan Scenery District were studied. Results are as follows. (1) The soil bulk density in the top 60 cm followed the order of: chinese fir forests> masson pine forests> shrubs> mixed forest> moso bamboo forests> broadleaf forest. (2) The total porosity and maximum water-holding capacity were: broadleaf forest> moso bamboo forests> mixed forests > shrubs> masson pine forests> chinese fir forests; and the capillary porosity and field moisture capacity were: Moso bamboo forests> broadleaf forests> mixed forests > shrubs> masson pine forests> chinese fir forests; the soil non-capillary porosity was broadleaf forests> mixed forests > shrubs > masson pine forests> chinese fir forests> moso bamboo forests; the soil capillary water-holding was moso bamboo forests> broadleaf forests> shrubs> mixed forests > masson pine forests> chinese fir forests. (3) In the layer of 0—60 cm, the order of soil total storage capacity was broadleaf forests> moso bamboo forests> mixed forests> shrubs> masson pine forests> chinese fir forests. The storage volumetric capacity of moso bamboo forests was the largest, but its transmission volumetric capacity was the smallest. Given the same site condition, the soil physical characteristics of the broadleaf forest were superior to those of the others and therefore provided the best function of soil and water conservation.

Keywords: forest types; soil water; physical property; soil reservoir; Wuyishan Scenery

收稿日期: 2010-09-17 修回日期: 2010-10-22
资助项目: 福建省科技厅项目“武夷山风景区土壤生态环境演变规律的研究”(2008F5060); 南平市科技计划项目“武夷山风景区不同土地利用方式的土壤中重金属的分布特性研究”(N2009Z10-3); 大学生创新性实验计划项目“土壤生态环境对旅游干扰与土地利用变化的响应”(2008-12)
作者简介: 李灵(1973—), 女(汉族), 河南省南阳市人, 博士, 主要从事水土保持和土壤营养生态学研究。E-mail: haodou_025@126.com。

在陆地生态系统中, 土壤层是最主要的水分贮存库和水文调节器, 土壤水分是流域水量平衡乃至地区水文循环中的重要因子, 是生态系统中最活跃、最有影响的因素之一。土壤水分物理性质不仅决定土壤中水、气、热和生物状况, 而且对土壤中养分元素的有效性和供应有着重要影响, 常被作为土壤质量评价的重要指标[1-2]。不同森林类型由于其树种生物学特性与林分结构的不同, 其林地土壤的水分物理效应存在一定的差异[3]。土壤是一种疏松多孔体, 土层深厚的土壤有较强的存蓄、调节水分的功能, 被形象地称之为"土壤水库"[4-5]。由于受水资源短缺的影响, 近年来土壤水分物理性质的研究成为热点问题[6]。因此, 研究不同类型林地土壤的水分物理性能, 了解区域内地带性植被土壤水资源的变化规律, 为植被恢复重建中造林、营林技术提供理论依据。

武夷山风景名胜区自 1999 年 12 月被列入"世界文化与自然遗产名录"以来, 有关武夷山风景区的报道逐渐增多, 但有关林地土壤水分物理特性的研究较少[7]。本文以武夷山风景区森林土壤为研究对象, 探讨不同林地土壤的水分物理及水库容特征, 对指导区域植被空间分布格局的合理调控有重要意义。

1　研究区概况

武夷山国家级风景名胜区(117°35′—118°01′E, 27°35′—27°43′N) 地处福建省西北部, 面积约 7 000 hm^2, 属低山丘陵地域, 是典型的中亚热带湿润季风气候, 冬季温暖, 夏季日温偏高, 年平均温度 18 ℃, 无霜期 270 d, 年降雨量 2 000 mm, 年平均相对湿度 80%。大部分成土母岩由火山砾岩、红砂岩和页岩组成, 表层多为灰紫色砂粒及砾块, 疏松而透水性强, 为沙质砾土, 土层浅薄, 有机质较贫乏, pH 值为 4.5~6.0。研究区主要的森林类型有次生的常绿阔叶林、马尾松林(*Pinus massoniana*)、杉木林(*Cunninghamia lanceolata*)、针阔混交林、竹林(*Phyllostachys pubescens*) 和灌木林等, 面积约占整个风景区面积的 80%。

2　研究方法

本研究以武夷山风景区内的常绿阔叶林、马尾松林、杉木林、针阔混交林、竹林和灌木林 6 种不同类型林地土壤为研究对象, 建立调查样地(20 m × 20 m) 并进行常规调查, 记录其坡度、坡向、平均胸径、平均树高等指标(见表 1)。

于 2009 年 9—10 月在上述的 6 种类型林地内分别布设 3 块样地, 在每块样地按 S 形设 5 个土壤取样点, 按 0—20, 20—40, 40—60 cm 分别取原状土样, 同时用铝盒取土, 带回室内。用烘干法测定土壤含水量; 用环刀法测定土壤的容重、孔隙度和持水性等水分物理性质。采用下式计算出土壤的水库容指标, 即:

$$W_t = 10\,000 \times C_{max} \times \rho \times h$$

$$W_s = 10\,000 \times C_{min} \times \rho \times h$$

$$W_a = W_t - W_s$$

式中: W_t ——土壤总库容(t/hm^2); W_s ——储水库容(t/hm^2); W_a ——通透库容(t/hm^2); C_{max} ——饱和含水量(%); C_{min} ——田间持水量(%); ρ——土壤容重(g/cm^3); h ——土层厚度(m)。

表 **1**　样地基本概况

植被类型	海拔/m	坡度/(°)	坡位	坡向	平均高/m	平均胸径/cm	主要林下植被
常绿阔叶林	516	25	上坡	西北	10.23	16.51	虎皮楠, 石斑木, 杜鹃, 石栎, 黑莎草
针阔混交林	234	18	下坡	东南	12.40	14.37	胡枝子, 黄栀子, 马银花, 狗脊, 芒萁
马尾松林	282	21	下坡	东北	9.25	9.84	盐肤木, 胡枝子, 油茶, 芒萁, 五节芒, 地念
杉木林	259	12	中坡	西北	9.08	8.76	狗脊, 观音座莲
灌木林	372	20	中下坡	西南	1.76	—	五节芒, 金毛耳草, 苔草
竹 林	249	22	下坡	西北	5.13	—	—

3　结果与分析

3.1　不同林地类型土壤容重和孔隙度

土壤容重是土壤松紧程度的一个敏感性指标, 反映了土壤的孔隙状况、透水性、通气性、持水能力、入渗速率、溶质迁移特征、根系生长的阻力状况和土壤的抗侵蚀能力等[8-10]。不同林分类型的土壤容重均随土壤深度的增加而增大(图 1)。

不同林分类型的土壤容重存在一定的差异, 0—60 cm 土层, 6 种林地平均土壤容重为: 杉木林> 马尾松林> 灌木林> 针阔混交林> 竹林> 常绿阔叶林, 其大小分别为 1.39, 1.35, 1.20, 1.16, 0.99, 0.91 g/cm^3, 杉木林是常绿阔叶林的 1.53 倍。

产生差异的原因是不同林分类型的枯落物特性与储量、土壤中根系分布及森林植被下生物群等不同所致[11]。

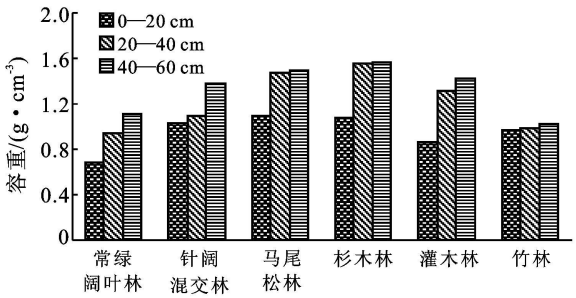


图 1 不同林分类型土壤容重的垂直变化

土壤的孔隙状况是土壤结构的重要指标, 其大小、数量及分配可以反映土壤结构的好坏。不同林地类型土壤总孔隙度、非毛管孔隙及毛管孔隙随土层的增加而逐渐减小(表 2) 。在 0—60 cm 土层, 6 种林地平均土壤总孔隙度为常绿阔叶林> 竹林> 针阔混交林> 灌木林> 马尾松林> 杉木林, 其大小分别为54. 09%, 52. 93%, 44. 92%, 42. 72%, 42. 05%, 31. 82%, 常绿阔叶林是杉木林的 1. 70 倍。6 种林地类型平均土壤非毛管孔隙度为常绿阔叶林> 针阔混交林> 灌木林> 马尾松林> 杉木林> 竹林, 其大小分别为 13. 22%, 12. 52%, 11. 19%, 10. 70%, 6. 50%, 5. 62%, 常绿阔叶林是竹林的 2. 35 倍。6 种林地类型平均土壤毛管孔隙度为竹林> 常绿阔叶林> 针阔混交林> 灌木林> 马尾松林> 杉木林, 其大小分别为 47. 31%, 40. 88%, 32. 40%, 31. 53%, 31. 35%, 25. 32%, 竹林是杉木林的 1. 87 倍。

表 2 不同林地类型的土壤孔隙度

植被类型	土层/ cm	总孔隙度/ %	非毛管孔隙度/ %	毛管孔隙度/ %	非毛管孔隙/ 总孔隙度
常绿阔叶林	0—20	59.56	14. 95	44. 61	0. 251
	20—40	54.68	12. 85	41. 83	0. 235
	40—60	48.04	11. 85	36. 19	0. 247
针阔混交林	0—20	51.76	13. 65	38. 11	0. 264
	20—40	41.71	12. 7	29. 01	0. 304
	40—60	41.28	11. 21	30. 07	0. 272
马尾松林	0—20	46.78	12. 50	34. 28	0. 267
	20—40	40.74	10. 31	30. 43	0. 253
	40—60	38.62	9. 28	29. 34	0. 240
杉木林	0—20	38.02	8. 50	29. 52	0. 224
	20—40	30.22	6. 10	24. 12	0. 202
	40—60	27.23	4. 90	22. 33	0. 180
灌木林	0—20	52.46	14. 25	38. 21	0. 272
	20—40	40.75	10. 17	30. 58	0. 250
	40—60	34.96	9. 16	25. 80	0. 262
竹林	0—20	54.61	6. 50	48. 11	0. 119
	20—40	53.49	5. 75	47. 74	0. 107
	40—60	50.68	4. 60	46. 08	0. 091

土壤的孔隙组成直接影响土壤中水、肥、气、热的协调及微生物的活性[11]。研究发现, 土壤总孔隙度在 50% 左右, 其中非毛管孔隙占 1/ 5~ 2/ 5 时土壤的通气性、透水性和持水能力比较协调[12-13]。本研究区内除杉木林地土壤总孔隙度小于 40% 外, 其它类型林地的土壤总孔隙度在 50% 左右波动, 且非毛管孔隙占总孔隙的比例除竹林的约 0. 1 外, 其它类型林地的基本上大于 0. 2。说明研究区内土壤的孔隙状况整体上处于较好的水平。从土壤容重和孔隙度特性分析可知, 常绿阔叶林、针阔混交林土壤特性好, 有利于涵养水源。灌木林次之, 马尾松林和杉木林的相对较差。非毛管孔隙度反映了森林对降水水分疏通作用, 它体现了林地调节洪水, 蓄洪作用能力, 是评价林地土壤水源涵养能力的重要指标[14], 竹林土壤总孔隙度虽然较大, 但非毛管孔隙度反而最小, 在降雨量大的情况下, 不利于水分的充分入渗而蓄积, 因此竹林地土壤结构不利于涵养水源。

3. 2 不同林地类型土壤持水性

土壤的持水性是土壤对水分蓄集和保持的能力, 研究土壤持水性的变化规律对于阐明土壤抗旱能力和增加“土壤水库”库容并对区域土壤侵蚀的潜在危险性评价具有重要意义[15]。不同林地类型土壤的最大持水量、田间持水量、毛管持水量在 60 cm 土层内整体上随土壤深度的增加而下降(见表 3) , 这与土壤

有机质、土壤动物形成的孔隙、植物根系、死亡根系形成的根孔都随深度而降低有关[16]。

表 3　不同林地类型土壤持水量

植被类型	土层/cm	最大持水量/%	田间持水量/%	毛管持水量/%
常绿阔叶林	0—20	87.59	58.27	65.60
	20—40	58.17	40.29	44.50
	40—60	43.28	27.45	32.60
	均值	63.01	42.00	47.57
针阔混交林	0—20	50.25	34.46	37.00
	20—40	38.27	23.78	26.61
	40—60	30.13	18.76	21.95
	均值	39.55	25.67	28.52
马尾松林	0—20	42.92	28.38	31.45
	20—40	27.71	18.56	20.70
	40—60	25.92	15.96	19.69
	均值	32.18	20.97	23.95
杉木林	0—20	35.53	24.51	27.59
	20—40	19.50	9.30	15.56
	40—60	17.46	9.32	14.31
	均值	24.16	14.38	19.15
灌木林	0—20	61.00	39.28	44.43
	20—40	31.11	21.10	23.34
	40—60	24.62	15.43	18.17
	均值	38.91	25.27	28.65
竹林	0—20	56.30	43.99	49.60
	20—40	54.58	43.04	48.71
	40—60	49.69	40.49	45.18
	均值	53.52	42.51	47.83

不同林分类型由于其土壤孔隙度、有机质和黏粒含量、团聚体水稳性能等的差异, 导致不同林地类型的土壤持水性能存在差异[17]。不同林地类型 0—60 cm 土层平均土壤最大持水量与总孔隙度变化趋势一致, 为常绿阔叶林> 竹林> 针阔混交林> 灌木林> 马尾松林> 杉木林, 其大小分别为 63.01%, 53.52%, 39.55%, 38.91%, 32.18%, 24.16%, 常绿阔叶林是杉木林的 2.61 倍。田间持水量和毛管持水量与毛管孔隙度的变化趋势基本一致, 田间持水量为竹林> 常绿阔叶林> 针阔混交林> 灌木林> 马尾松林> 杉木林, 其大小分别为 42.51%, 42.00%, 25.67%, 25.27%, 20.97%, 14.38%, 竹林是杉木林的 2.96 倍。毛管持水量为竹林> 常绿阔叶林> 灌木林> 针阔混交林> 马尾松林> 杉木林大小分别为 47.83%, 47.57%, 28.65%, 28.52%, 23.95%, 19.15%, 竹林是杉木林的 2.50 倍。从土壤的持水性能来看, 常绿阔叶林和竹林的土壤持水性能较好, 针阔混交林和灌木林的次之, 马尾松林和杉木林的较差。

3.3　不同林地类型土壤水库容特征

3.3.1　*总库容*　土壤总库容是土壤完全饱和时的总蓄水量[4], 不同林地类型土壤的总库容在 60 cm 土层内随土壤深度的增加而下降(见表 4)。这这主要是因为表层土壤由于较多有机物质的归还, 结构疏松多孔, 含较多的有机亲水胶体, 可保蓄较多的土壤水分, 使土壤水库容较底土高。不同林地类型 0—60 cm 土层土壤总库容为常绿阔叶林> 竹林> 针阔混交林> 灌木林> 马尾松林> 杉木林, 其大小分别为 3 245.6, 3 175.6, 2 695, 2563.4, 2 522.8, 1 909.4 t/hm^2, 常绿阔叶林是杉木林的 1.70 倍。

3.3.2　*贮水库容和通透库容*　土壤总库容又细分为通透库容和储水库容。土壤贮水库容是指保持土壤水分最大容量的库容, 由田间持水量计算而得, 通透库容由总库容减贮水库容所得。不同林分类型土壤的储水库容、通透库容随土壤深度的增加而呈减小的趋势(见表 4)。

贮水库容反映了田间实际情况下土壤能保持水分的最大容量, 6 种林地类型 0—60 cm 土层土壤储水库容为竹林> 常绿阔叶林> 针阔混交林> 灌木林> 马尾松林> 杉木林, 其大小分别为 2 522.99, 2 159.31, 1 742.30, 1 666.65, 1 742.30, 1 103.47 t/hm^2, 竹林是杉木林的 2.29 倍。不同林地类型 0—60 cm 土层土壤储水库容占总库容的比例为竹林(79.49%)> 常绿阔叶林(66.40%)> 灌木林(64.97%)> 马尾松林(64.89%)> 针阔混交林(64.33%)> 杉木林(56.68%)。

当土壤含水量大于田间持水量时, 多余水分短时间地蓄存于土壤中, 最终经入渗补给地下水或蒸发消耗掉, 因此通透库容主要起滞蓄作用, 对水分入渗、蒸发等性质具有重要意义。0—60 cm 土层土壤通透库容为常绿阔叶林> 针阔混交林> 灌木林> 马尾松林> 杉木林> 竹林, 其大小分别为 1 086.29, 952.70, 896.75, 882.84, 805.93, 652.61 t/hm^2, 常绿阔叶林是竹林的 1.66 倍。通透库容反映了土壤的透水性, 通透库容大, 土壤易接纳较多的天然降水, 是形成深层贮水的主要原因。

不同林地类型 0—60 cm 土层土壤通透库容占总库容的比例为杉木林(43.32%)> 针阔混交林(35.67%)> 马尾松林(35.11%) 灌木林(35.03%)> 常绿阔叶林(33.60%)> 竹林(20.51%)。

研究区内竹林土壤总库容相对较大, 但储水库容占总库容的比例接近 80%, 土壤的通透性下降, 不利于土壤的深层蓄水, 而杉木林土壤储水库容占总库容

的比例相对较小, 不利于土壤水分的保持。因此, 研究土壤水库库容的大小和作用时, 不能仅注重总库容的大小, 必须将土壤水库的库容分别进行计算, 将不同功能的库容分开来才能说明问题[18]。

表 4 不同林地类型土壤水库容

林地类型	土层/cm	总库容/(t·hm⁻²)	储水库容/(t·hm⁻²)	通透库容/(t·hm⁻²)	占总库容的比列/%	
					储水库容	通透库容
常绿阔叶林	0—20	1 191.2	792.47	398.73	66.53	33.47
	20—40	1 093.6	757.45	336.15	69.26	30.74
	40—60	960.8	609.39	351.41	63.43	36.57
	0—60	3 245.6	2 159.31	1 086.29	66.40	33.60
针阔混交林	0—20	1 035.2	709.88	325.32	68.57	31.43
	20—40	834.2	518.40	315.80	62.14	37.86
	40—60	825.6	514.02	311.58	62.26	37.74
	0—60	2 695.0	1 742.30	952.70	64.33	35.67
马尾松林	0—20	935.6	618.68	316.92	66.13	33.87
	20—40	814.8	545.66	269.14	66.97	33.03
	40—60	772.4	475.61	296.79	61.58	38.42
	0—60	2 522.8	1 639.96	882.84	64.89	35.11
杉木林	0—20	760.4	524.51	235.89	68.98	31.02
	20—40	604.4	288.24	316.16	47.69	52.31
	40—60	544.6	290.72	253.88	53.38	46.62
	0—60	1 909.4	1 103.47	805.93	56.68	43.32
灌木林	0—20	1 049.2	675.62	373.58	64.39	35.61
	20—40	815.0	552.82	262.18	67.83	32.17
	40—60	699.2	438.21	260.99	62.67	37.33
	0—60	2 563.4	1 666.65	896.75	64.97	35.03
竹 林	0—20	1 092.2	853.41	238.79	78.14	21.86
	20—40	1 069.8	843.58	226.22	78.85	21.15
	40—60	1 013.6	826.00	187.60	81.49	18.51
	0—60	3 175.6	2 522.99	652.61	79.49	20.51

4 结 论

(1) 6 种林型的土壤容重均随土层深度的增加而增大, 0—60 cm 土层土壤容重为杉木林(1.39 g/cm³) > 马尾松林(1.35 g/cm³) > 灌木林(1.20 g/cm³) > 针阔混交林(1.16 g/cm³) > 竹林(0.99 g/cm³) > 常绿阔叶林(0.91 g/cm³), 杉木林的是常绿阔叶林的 1.53 倍。

(2) 不同林地土壤孔隙度和持水量随土层深度的增加而减小, 总孔隙度和最大持水量为常绿阔叶林 > 竹林> 针阔混交林> 灌木林> 马尾松林> 杉木林, 常绿阔叶林分别是杉木林的 1.70, 2.61 倍; 非毛管孔隙度为常绿阔叶林> 针阔混交林> 灌木林> 马尾松林> 杉木林> 竹林, 常绿阔叶林是竹林的 2.35 倍; 毛管孔隙度和田间持水量为竹林> 常绿阔叶林> 针阔混交林> 灌木林> 马尾松林> 杉木林, 竹林分别是杉木林的 1.87 和 2.96 倍; 毛管持水量为竹林> 常绿阔叶林> 灌木林> 针阔混交林> 马尾松林> 杉木林, 竹林是杉木林的 2.50 倍。

(3) 0—60 cm 土层土壤总库容为常绿阔叶林(3 245.6 t/hm²) > 竹林(3 175.6 t/hm²) > 针阔混交林(2 695 t/hm²) > 灌木林(2 563.4 t/hm²) > 马尾松林(2 522.8 t/hm²) > 杉木林(1 909.4 t/hm²); 土壤储水库容为竹林(2 522.99 t/hm²) > 常绿阔叶林(2 159.31 t/hm²) > 针阔混交林(1 742.30 t/hm²) > 灌木林(1 666.65 t/hm²) > 马尾松林(1 742.30 t/hm²) > 杉木林(1 103.47 t/hm²), 土壤通透库容为常绿阔叶林(1 086.29 t/hm²) > 针阔混交林(952.70 t/hm²) > 灌木林(896.75 t/hm²) > 马尾松林(882.84 t/hm²) > 杉木林(805.93 t/hm²) > 竹林(652.61 t/hm²)。

结果表明, 研究区内常绿阔叶林的土壤特性和涵养水源功能最好; 针阔混交林和灌木林的次之, 马尾松林和杉木林的相对较差。竹林土壤总孔隙度、最大持水量及总库容虽然较大, 但通透库容占总库容的比例较低, 非毛管孔隙度最小, 因此竹林地土壤的排水能力相对较差, 在降雨较少的情况下, 可以更好地将

水分吸收在土壤中, 但在降雨量大而集中的南方红壤区, 高强度的降雨来不及入渗而形成较大的地表径流, 造成强烈的冲刷, 因此竹林地土壤结构不利于涵养水源。

[参 考 文 献]

[1] Boix-Fayos C, Calvo-Cases A, Imeson A C, et al. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators[J]. Catena, 2001, 44(1): 47-67.

[2] Li Y Y, Shao M A. Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China[J]. Journal of Arid Environments, 2006, 64(1): 77-96.

[3] 巍强, 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.

[4] 沃飞, 蔡彦明, 方堃, 等. 天津市不同种植年限蔬菜地土壤水分特征对比研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 236-240.

[5] Philip J R. Hillslope infiltration divergent and converge slopes[J]. Water Resource, 1991, 27(6): 1035-1040.

[6] Peter A C. Developments in soil-water physics since the mid 1960s[J]. Geoderma, 2001, 100: 355-387.

[7] 何东进, 洪伟, 胡海清, 等. 武夷山风景区森林景观土壤物理性质异质性及其分形特征[J]. 林业科学, 2005, 41(5): 175-179.

[8] 王 丽, 梦 丽, 张金池, 等. 不同植被恢复模式下矿区废弃地土壤水分物理性质研究[J]. 中国水土保持, 2010(3): 54-58.

[9] 刘世梁, 傅伯杰, 马克明, 等. 岷江上游高原植被类型与景观特征对土壤性质的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(1): 26-30.

[10] Brejda J J, Moorman T B, Karlen D L, et al. Identification of regional soil quality factors and indicators: I. Central and southern high plains[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(6): 2115-2124.

[11] 杨 弘, 李 忠, 裴铁璠, 等. 长白山北坡阔叶红松林和暗针叶林的土壤水分物理性质[J]. 应用生态学报, 2007, 18(2): 272-276.

[12] 姜培坤, 周国模, 钱新标. 侵蚀型红壤植被恢复后土壤养分含量与物理性质的变化[J]. 水土保持通报, 2004, 18(1): 12-14.

[13] 孙艳红, 张洪江, 杜士才, 等. 四面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, 2009, 23(5): 109-112, 117.

[14] 骆土寿, 李意德, 陈德祥, 等. 广东白盆珠水库水源林土壤水源涵养能力研究[J]. 生态科学, 2007, 26(2): 159-164.

[15] 史东梅, 吕刚, 蒋光毅, 等. 马尾松林地土壤物理性质变化及抗蚀性研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 35-39.

[16] 张远东, 刘世荣, 罗传文, 等. 川西亚高山林区不同土地利用与土地覆盖的地被物及土壤持水特征[J]. 生态学报, 2009, 29(2): 627-635.

[17] 王光玉. 杉木混交林水源涵养和土壤性质研究[J]. 林业科学, 2003, 39(S1): 15-19.

[18] 杨金玲, 张甘霖. 城市"土壤水库"库容的萎缩及其环境效应[J]. 土壤, 2008, 40(6): 992-996.

(上接第 56 页)

[11] 李凯辉, 胡玉昆, 阿德力·麦地, 等. 温度对轮叶马先蒿种子发芽的影响[J]. 云南植物研究, 2006, 28(4): 421-424.

[12] 邱正强, 马玉寿, 施建军, 等. 甘肃马先蒿对"黑土型"退化草地垂穗披碱草人工草地的影响[J]. 草原与草坪, 2006(5): 26-29.

[13] 柳妍妍, 胡玉昆, 于建梅, 等. 轮叶马先蒿危害现状及防除对策[J]. 干旱区研究, 2008, 25(6): 778-782.

[14] 王绍明, 张霞, 李裕. 植物群落可入侵性及其影响因子的分析[J]. 干旱区地理, 2004, 27(4): 634-637.

[15] 李英年, 赵新全, 王勤学, 等. 青海海北高寒草甸五种植被生物量及环境条件比较[J]. 山地学报, 2003, 21(3): 257-264.

[16] 王静, 唐亚, 夏怡凡, 等. 川渝地区马先蒿属物种丰富度空间分布格局及其影响因素[J]. 云南植物研究, 2007, 29(1): 51-57.

[17] 仁青吉, 崔现亮, 赵彬彬. 放牧对高寒草甸植物群落结构及生产力的影响[J]. 草业学报, 2008, 17(6): 134-140.

[18] 仁青吉, 武高林, 任国华. 放牧强度对青藏高原东部高寒草甸植物群落特征的影响[J]. 草业学报, 2009, 18(5): 256-261.

[19] 王鑫, 胡玉昆, 热合木都拉·阿迪拉, 等. 巴音布鲁克高寒草原羊茅(*Festuca ovina*)群落生态位特征[J]. 干旱区地理, 2009, 32(2): 255-260.

[20] 冯缨, 张元明, 潘伯荣. 天山北坡中段草地类型的生态梯度组合格局与环境分析研究[J]. 干旱区地理, 2006, 29(4): 238-243.