

# 湖南紫鹊界梯田区森林土壤涵养水源功能初步研究

段兴凤<sup>1</sup>, 宋维峰<sup>1</sup>, 曾 洵<sup>2</sup>, 高松奇<sup>3</sup>

(1. 西南林业大学 环境科学与工程系, 昆明 650224; 2. 湖南新化县水保局, 湖南 新化 417600;

3. 中国东方航空公司 云南分公司, 昆明 650200)

**摘 要:**通过对湖南紫鹊界梯田区森林土壤物理性质与土壤持水量、枯落物持水率、土壤水分入渗进行分析,初步探讨了紫鹊界梯田区森林土壤水源涵养功能,为研究森林生态功能提供科学依据,为梯田的可持续发展服务。结果表明:(1)各土层土壤容重、孔隙度、通气孔隙度与土壤持水量、入渗速率均大于荒坡土壤,且通过方差分析可知其差异明显;(2)该区森林土壤涵养水源指标与物理性指标存在一定相关性。土壤持水量与土壤容重、孔隙度、通气孔隙度关系密切,疏松、结构良好、孔隙多、通气良好的土壤持水量高。枯落物的持水率表面上与土壤物理性质关系不大,但土壤容重、孔隙度等通过影响土壤团聚体结构、林下微环境和枯落物的分解状况,进而影响枯落物蓄水性能。土壤的渗透性能受林地土壤物理性质影响较大,主要表现为土壤容重和孔隙度,林地土壤孔隙度大,土壤结构良好,质地疏松,入渗速率高。

**关键词:**森林土壤; 物理性质; 涵养水源; 紫鹊界梯田区

中图分类号:S714.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2011)01-0157-04

## Analysis Forest Soil on Soil and Water Conservation Function of Ziquejie Terrace

DUAN Xing-feng<sup>1</sup>, SONG Wei-feng<sup>1</sup>, ZENG Xun<sup>2</sup>, GAO Song-qi<sup>3</sup>

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

2. Soil Conservation Service, Xinhua, Hunan 417600, China; 3. China Eastern Airlines, Kunming 650200, China)

**Abstract:** Analysis of soil physical property and soil retention, water-holding rate of litter, water infiltration of Ziquejie terrace to research water conservation function, in order to sustainable development of the terrace. The results showed that: (1) Each layer of soil bulk density and porosity, soil retention, water infiltration rate exceeded hillsides, and notable differences. (2) Water conservation index and physical property index have some relationships. Soil retention and soil bulk density and porosity, properties have close relationships. Soil structure, forest litter is decomposed of environment and condition affected by soil bulk density and porosity, and last affect water content. Soil bulk density and porosity affect soil infiltration rate. Soil porosity, soil structures have good quality, and then have high rate of infiltration.

**Key words:** forest soil; physical property; soil and water conservation; Ziquejie terrace

紫鹊界梯田起源于秦汉,盛于唐宋,至今已有两千余年的历史<sup>[1]</sup>,是当今世界修筑最早的梯田之一。紫鹊界梯田区总面积 115.5 km<sup>2</sup>,从海拔 500 m 的山坡向上有五百多级梯田,约 4 000 多公顷。这些梯田内无塘无库,无任何人工水利设施,全为天然自流灌溉,长久以来却能年年旱涝保收,这都源于梯田区上方茂密森林强大的水源涵养功能。森林土壤和植被具有良好的涵养水源功能,而紫鹊界梯田区森林土壤水源涵养功能更为突出。

分析探讨紫鹊界梯田区森林土壤物理性质与水源涵养功能,能更好地为梯田的可持续发展服务。本文对梯田区 3 块标准地及荒坡土壤物理性质与土壤持水量、枯落物持水率、土壤水分入渗进行研究,探讨它们的变化及其相互关系,为评价森林生态功能提供科学依据。

### 1 研究区概况

研究区位于湖南省新化县西南部水车镇金龙村

收稿日期:2010-07-13

修回日期:2010-08-05

资助项目:国家自然科学基金项目(31070631)

作者简介:段兴凤(1986—),女,硕士研究生,主要研究方向:土壤侵蚀。E-mail: dxfeng.86@163.com

通信作者:宋维峰(1967—),男,博士,教授,主要研究方向:生态环境工程、森林水文。E-mail: songwf85@126.com

林区(110°55′50.4″—110°55′50.8″E,27°41′26″—27°41′27.2″N)。本区属中低山丘陵地貌,海拔 684~708 m。气候属中亚热带季风气候,年平均气温为 13.7℃,最高气温 39℃,最低气温-5℃;年降雨量为 1 650~1 700 mm;初霜一般在 11 月 15 日前后,终霜一般在翌年 2 月 30 日左右,年均无霜期为 260 d,年均日照 1 488 h。土壤为花岗岩风化发育的红壤,砂性质地,山地土壤剖面完整,土层厚度 100 cm 以上。本区天然林生长茂密,植物种类繁多,主要乔木树种有楠竹(*Phyllostachys pubescens*)、杉木(*Cunning-*

*hamia Lanceolata*)等,杂生各种灌草本植物,草本植物以蕨类居多。

## 2 研究方法

### 2.1 样地及土壤剖面选择

在全面踏勘天然林群落基础上布设 20 m×20 m 标准地 3 块,调查各样地的海拔高度、坡度、坡位、坡向、坡形等立地因子,各样地基本情况见表 1。在每块样地的代表性地段挖掘土壤剖面,并调查土壤因子。样地和土壤剖面按序号命名,分别为:1,2,3,荒坡为 4。

表 1 样地基本情况

样地号	经度	纬度	海拔/m	坡度/(°)	坡向	坡位	土壤类型
1	110°55′50.7″	27°41′26.0″	708	45	SE	上	棕红壤
2	110°55′50.8″	27°41′26.3″	690	43	E	上	黄红壤
3	110°55′50.4″	27°41′27.2″	684	48	SW	上	黄红壤
4	110°55′52.3″	27°41′26.9″	675	20	NE	中	黄红壤

### 2.2 样品采集

在挖掘好的土壤剖面内按 0—20 cm、20—40 cm 2 个层次用环刀取原状土样供物理性质分析,每层取 3 个重复样。在每块样地内土壤剖面附近分别收集枯落物,供枯落物持水率测定用。

### 2.3 样品分析

2.3.1 土壤基本物理性质的测定 土壤基本物理性质按常规分析方法测定<sup>[2-4]</sup>:土壤容重、孔隙度测定采用环刀法;土壤水分测定采用恒温箱烘干法。

2.3.2 土壤通气孔隙度的计算 计算公式为

$$Q=P-(w\times r)\tag{1}$$

式中: $Q$ ——土壤通气孔隙度(%); $P$ ——总孔隙度(%); $w$ ——自然含水率(%); $r$ ——土壤容重(g/cm<sup>3</sup>)。

2.3.3 土壤持水量的计算 计算公式为

$$V=10000\times P\times D\tag{2}$$

式中: $V$ ——土壤最大毛管持水量(t/hm<sup>2</sup>); $D$ ——土层深度(m); $P$ ——土壤总毛管孔隙度(%)。

2.3.4 枯落物持水率测定 采用浸泡法(一般浸泡

24 h)。

2.3.5 土壤渗透性能测定 在标准地土壤剖面附近,选择一块地面完好无裂缝,地下无洞穴的地方,采用野外原位双环法测定。双环内环直径 28 cm,高 25 cm;外环直径 54 cm,高 25 cm。土壤稳渗速率用下式计算<sup>[5]</sup>

$$R_s=(0.42\Delta h)/\Delta t(0.7+0.03T)\tag{3}$$

式中: $R_s$ ——10℃标准水温时土壤的入渗速率(mm/min); $\Delta h$ ——某一时段  $\Delta t$  供水桶读数差值(mm); $\Delta t$ ——时段(min); $T$ ——某时段的平均水温(℃)。

### 2.4 数据的统计分析

数据采用 EXCEL 2003 和 SPSS 11.5 进行整理、分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 紫鹊界梯田区森林土壤物理性质

根据样品分析和计算方法,在土层厚度为 0—40 cm 测得各土壤剖面的物理特性如表 2。

表 2 土壤物理特性表

土壤剖面	土层/cm	自然含水量/%	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	土壤通气孔隙度/%
1	0—20	46.2	0.95	44.82	36.10	8.72	3.58
	20—40	38.7	1.05	40.44	35.78	4.67	0.01
2	0—20	42.7	0.90	46.13	40.70	5.43	7.95
	20—40	36.1	1.09	39.33	34.86	4.47	-0.20
3	0—20	39.9	1.00	44.35	40.35	4.00	4.60
	20—40	32.1	1.35	43.09	41.75	1.35	-0.10
4	0—20	25.0	1.42	38.23	34.91	3.32	1.28

通过测定,得出紫鹊界梯田区森林土壤各土层土壤容重的变幅为:0—20 cm 土层 0.90~1.00 g/cm<sup>3</sup>,

20—40 cm 土层 1.05~1.35 g/cm<sup>3</sup>,其土壤容重随土层深度的增加而递增。0—20 cm、20—40 cm 土层总

孔隙度和毛管孔隙度分别为 44.35%~46.13%、39.33%~43.09%和 36.10%~40.70%、34.86%~41.75%,其土壤孔隙度随土层深度的增加而递减。该区土壤疏松,结构状况较好。土壤通气度与土壤总孔隙度、容重以及土壤含水量等有一定的相关关系,土壤孔隙度高,而土壤容重和含水量相对较小,则相对的土壤通气孔隙度亦高,表明其土壤的通气性能好。通过测定,得出紫鹊界梯田区森林土壤表层土壤通气性远远优于深层土壤,0—20 cm 土层土壤通气孔隙度(5.38%)要大于荒坡土壤(1.28%)。

利用其各土层土壤容重与荒坡土壤容重进行方差分析,森林土壤剖面 1,2,3 两两之间显著性概率  $\text{sig.}=0.314\sim0.976>0.05$ ,而荒坡与土壤剖面之间  $\text{sig.}=0.022\sim0.034<0.05$ ,即森林土壤剖面之间容重差异不显著,而荒坡与森林土壤剖面 1,2,3 均有显著差异,表明紫鹊界梯田区森林土壤较荒坡明显疏松。对土壤孔隙度、通气孔隙度等进行方差分析,也得出与土壤容重一致的结果。

3.2 紫鹊界梯田区森林土壤蓄水能力

林地蓄水量包括枯落物层蓄水量和土壤层蓄水量<sup>[6]</sup>。紫鹊界梯田区森林土壤持水量见表 3。

表 3 土壤持水性能表

土壤剖面	土层/cm	最大持水量/(t·hm <sup>-2</sup> )	毛管持水量/(t·hm <sup>-2</sup> )
1	0—20	896.40	722.00
	20—40	808.86	715.56
2	0—20	922.55	813.90
	20—40	786.59	697.29
3	0—20	887.01	807.02
	20—40	861.80	835.00
平均	0—20	902.00	780.97
平均	20—40	819.10	749.28
平均	0—40	860.50	765.12
4	0—20	764.60	698.20

表 4 紫鹊界梯田区森林枯落物持水能力

样地号	厚度/cm	干物质重/g	浸水后重/g			持水率/%		
			20 min	2 h	24 h	20 min	2 h	24 h
1	5.5	100	357.41	388.50	550.00	257.41	288.50	450.03
2	5.1	100	401.46	415.82	458.30	301.46	315.82	358.28
3	4.8	100	279.04	323.10	388.10	179.04	223.10	288.13
平均						245.97	275.81	365.48

3.4 紫鹊界梯田区森林土壤水分入渗

土壤水分入渗作为森林植被的主要水文过程,是反映森林涵养水源功能的重要水文参数<sup>[12]</sup>。许明祥,杨海龙等人的研究表明:在土壤理化特性相同条

由表 3 可知,紫鹊界梯田区森林土壤最大持水量平均值为 860.50 t/hm<sup>2</sup>,毛管持水量平均值为 765.12 t/hm<sup>2</sup>,其持水量随土层深度的增加而递减。与荒坡比较,森林土壤平均最大持水量(902.00 t/hm<sup>2</sup>)和平均毛管持水量(780.97 t/hm<sup>2</sup>)均大于荒坡(764.60 t/hm<sup>2</sup>和 698.20 t/hm<sup>2</sup>),由此可见,紫鹊界梯田区森林土壤具有很好的水源涵养功能。

利用其各土层土壤最大持水量与荒坡土壤进行方差分析,森林土壤剖面 1,2,3 两两之间显著性概率  $\text{sig.}=0.617\sim0.976>0.05$ ,而荒坡与土壤剖面之间  $\text{sig.}=0.042\sim0.050\leq 0.05$ ,即森林土壤剖面之间土壤最大持水量差异不显著,而荒坡与森林土壤剖面 1,2,3 均有显著差异,表明紫鹊界梯田区森林土壤最大持水量较荒坡明显要大。

3.3 紫鹊界梯田区森林枯落物水源涵养功能

森林植被涵养水源和保持水土的作用,很重要的部分是借助林下地表的枯落物。枯落物不仅能很好地防止雨水直接冲刷地面,使土壤免遭雨滴直接击溅侵蚀;滞缓地表径流对土壤的冲刷<sup>[7]</sup>,而且自身也有很好的吸水率和吸水量,凋落物分解后,还能很好地起到改善土壤理化性质的作用。紫鹊界梯田区森林枯落物持水率见表 4。

从表 4 可看出,紫鹊界梯田区天然林凋落物 24 h 饱和持水率最大为 450.03%,最小为 288.13%,平均值 365.48%。与不同竹林地枯落物层饱和持水率相比(186.66%~271.95%)<sup>[8-9]</sup>,明显要高;与不同杉木林地枯落物层饱和持水率相比(185.25%~370.48%)也要高<sup>[9-10]</sup>。

经测定,紫鹊界梯田区天然林凋落物浸水 24 h 后分别为自身干物质重的 3.88~5.50 倍,其持水能力较高,对促进土壤养分循环起着重要的作用<sup>[11]</sup>。前 20 min 浸水后重分别为自身干物质重的 2.79~4.01 倍,可见,紫鹊界梯田区凋落物持水量在前 20 min~1 h 上升较快。

件下,土壤渗透性能越好,地表径流越少,土壤的流失量也相应减少<sup>[13-14]</sup>,则水源涵养能力越强。紫鹊界梯田区森林土壤水分入渗情况见图 1。

从图 1 可以看出,紫鹊界梯田区森林土壤初渗率(1.5 min 时入渗速率)(样地 2 为 14.00 mm/min,样地 3 为 8.00 mm/min,荒坡 6.00 mm/min)、稳渗率(样地 2 为 0.18 mm/min,样地 3 为 0.14 mm/min,荒坡 0.07 mm/min)和平均入渗率(样地 2 为 5.25 mm/min,样地 3 为 3.50 mm/min,荒坡 1.99 mm/min)均高于荒坡,土壤渗透性能良好,涵养水源功能较强。

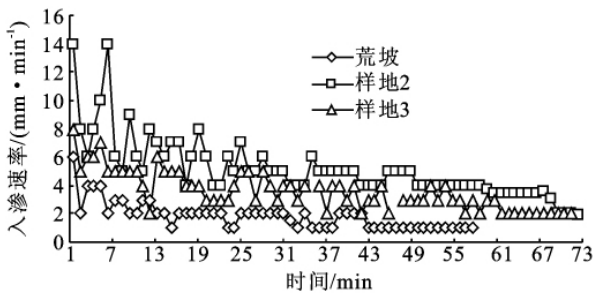


图 1 紫鹊界梯田区森林与荒坡土壤水分入渗图

3.5 土壤物理性指标与涵养水源指标相关性分析

利用紫鹊界梯田区森林各土层土壤主要物理性指标与涵养水源指标进行相关分析,其相关系数  $r$  见表 5。

表 5 土壤各指标间的相关关系

指标	毛管 持水量	最大 持水量	枯落物饱 和持水率	土壤入 渗速率
容重	-0.188	-0.502	-0.028	-0.374
总孔隙度	0.644*	0.997**	-0.029	-0.084
毛管孔隙度	1.000**	0.646*	-0.325	-0.119
非毛管孔隙度	-0.449	0.392	0.359	0.053
通气孔隙度	0.455	0.889**	-0.241	0.25
毛管持水量	1	0.646*	-0.325	-0.119
最大持水量	0.646*	1	-0.029	-0.077
枯落物饱和持水率	-0.325	-0.029	1	0.808**
土壤入渗速率	-0.119	-0.077	0.808**	1

注: \* 显著水平  $p<0.05$ ; \*\* 极显著水平  $p<0.01$ 。

涵养水源指标与土壤物理性指标关系密切,相关系数  $r$  较高。土壤持水量与土壤容重、孔隙度、通气孔隙度的相关系数都很高,即疏松、结构良好、孔隙多、通气良好的土壤持水量高。枯落物的持水率表面上与土壤物理性质关系不大,但土壤容重、孔隙度等通过影响土壤团聚体结构、林下微环境和枯落物的分解状况,进而影响枯落物蓄水性能。土壤渗透性能受林地土壤物理性质的影响,主要表现是土壤容重和通气孔隙度。林地土壤容重较小,土壤通透性能好,结构良好,质地疏松,降雨后,把大量的地表径流变成缓慢流动的土壤径流<sup>[15]</sup>,渗透到土壤中的水分绝大部分因重力作用经过非毛管孔隙下渗到土壤下层,提高入渗速率。

涵养水源指标之间也有一定相关性,尤其是枯落物饱和持水率与土壤入渗速率间相关系数  $r$  高达 0.808,即枯落物层积累多,层次厚,分解快,分解较彻底,具有孔隙多、结构好的特点,枯落物蓄水性能强,土壤水分入渗快。枯枝落叶腐烂分解释放养分归还土壤,对土壤结构产生巨大影响,一方面枯枝落叶为土壤中的动物、微生物的活动提供食物(能量),其生物活动易在土体内产生孔隙;另一方面枯枝落叶腐烂分解后形成的腐殖质与黏粒结合形成微团聚体,使土体变得疏松透水,同时枯落物的存在和团粒结构的形成,提高了土壤表面的糙率,延缓径流,起到了增加入渗的功效<sup>[16]</sup>。

4 结论与讨论

(1)紫鹊界梯田区森林各土层土壤主要物理特性(土壤容重、孔隙度和通气孔隙度等)与土壤持水量、入渗速率均大于荒坡土壤,且通过方差分析可知其差异明显。

(2)通过相关分析,该区森林土壤涵养水源指标与物理性指标存在一定相关性。土壤持水量与土壤容重、孔隙度、通气孔隙度的相关系数都很高,即疏松、结构良好、孔隙多、通气良好的土壤持水量高。枯落物的持水率表面上与土壤物理性质关系不大,但土壤容重、孔隙度等通过影响土壤团聚体结构、林下微环境和枯落物的分解状况,进而影响枯落物蓄水性能。土壤渗透性能受林地土壤物理性质的影响,主要表现为土壤容重和通气孔隙度。林地土壤容重较小,土壤通透性能好,结构良好,质地疏松,降雨后,把大量的地表径流变成缓慢流动的土壤径流<sup>[15]</sup>,渗透到土壤中的水分绝大部分因重力作用经过非毛管孔隙下渗到土壤下层,提高入渗速率。

(3)森林水文生态功能主要靠森林和土壤共同结合起来发挥作用,只有同时具备良好的森林植被和深厚的土壤,才会具有较大的水文生态功能和较高的水文生态效益。紫鹊界梯田区的森林植被在改良其土壤的物理特性,提高土壤贮水能力,增强土壤涵养水源能力上都具有显著的生态功能。

参考文献:

[1] 何丽芳. 打造与哈尼梯田媲美的观光胜号:论湖南紫鹊界梯田文化资源的旅游开发[J]. 农村经济与科技,2006(3):39-40.  
[2] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:科学技术出版社,1978.

- [3] 李峰,胡铁松,黄华金. SWAT 模型的原理、结构及其应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2008(3): 24-28.
- [4] 梁犁丽,汪党献,王芳. SWAT 模型及其应用进展研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2007, 5(2): 125-131.
- [5] Huisman J A, Breuer L, Fredr H G. Sensitivity of simulated hydrological fluxes towards changes in soil properties in response to land use change[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2004, 29(11/12): 749-758.
- [6] Romanowicz A A, Vancloosterm M, Rounsevell M, et al. Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: a case study in the Thyle Catchment, Belgium[J]. Ecological Modelling, 2005, 187(2): 27-39.
- [7] Klaus E, Lytz B, Hans-Georg F. Parameter uncertainty and the significance of simulated land use change effects [J]. Journal of Hydrology, 2003, 273(1): 164-176.
- [8] Holvoet K, Van Griensven A, Seuntjens P, et al. Sensitivity analysis for hydrology and pesticide supply towards the river in SWAT[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2005, 30(8): 518-526.
- [9] 宋艳华. SWAT 模型辅助下的径流模拟与生态恢复水文响应研究: 以陇西黄土高原华家岭南河流域为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2006.
- [10] 王鹏. 基于 SWAT 模型的岔路河星星哨水库以上流域径流模拟[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [11] 许其功,席北斗,何连生,等. 三峡库区大宁河流域非点源污染研究[J]. 环境工程学报, 2008, 2(3): 299-303.
- [12] 张丽娟,秦富仓,岳永杰,等. SWAT 模型灵敏性分析模块在云州水库流域的研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(3): 122-127.
- [13] Morris M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments[J]. Technometrics, 1991, 33(2): 123-131.
- [14] Romanowicz A A, Vanclooster M, Rounsevell M, et al. Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: a case study in the Thyle catchment, Belgium[J]. Ecological Modelling, 2005, 187(1): 27-39.
- [15] 范丽丽,沈珍瑶,刘瑞民,等. 基于 SWAT 模型的大宁河流域非点源污染空间特性研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(4): 133-137.
- [16] 张雪松,郝芳华,杨志峰. 基于 SWAT 模型的中尺度流域产流产沙模拟研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(4): 38-42.
- [17] 王海龙,余新晓,武思宏,等. SWAT 模型灵敏度分析模块在黄土高原典型流域的应用[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(2): 238-242.
- [18] Popov E G. Gidrologicheskie Prognozy (Hydrological Forecasts)[M]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979.
- [19] 庞靖鹏,刘昌明,徐宗学. 基于 SWAT 模型的径流与土壤侵蚀过程模拟[J]. 水土保持研究, 2007, 14(6): 88-93.

(上接第 160 页)

- [3] 严昶升. 土壤肥力研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1987.
- [4] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [5] 王艳红,宋维峰,李财金. 不同竹林地土壤水分入渗研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(2): 165-168.
- [6] 蔡跃台. 不同植被类型土壤理化性质及水源涵养功能研究[J]. 浙江林业科技, 2006, 26(3): 12-16.
- [7] 杨玉盛. 杉木林取代杂木林后林分水源涵养功能差异的研究[J]. 福建林学院学报, 1992, 12(2): 125-131.
- [8] 王艳红,宋维峰,李财金. 不同竹林枯落物层水文生态效应研究[J]. 陕西农业科学, 2009(1): 31-34.
- [9] 刘明. 凤凰山林场小流域试验场森林土壤涵养水源效益研究[J]. 林业资源管理, 1998(6): 51-54.
- [10] 阎文德. 祁连山森林枯落物水文作用的研究[J]. 西北林学院学报, 1997, 12(2): 7-14.
- [11] 俞新妥. 杉木连栽林地土壤生化特性及土壤肥力的研究[J]. 福建林学院学报, 1989, 9(3): 256-262.
- [12] 王兵,魏文俊. 宁夏六盘山不同森林类型土壤贮水与入渗研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2006, 27(3): 1-5.
- [13] 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, 18(4): 54-58.
- [14] 杨海龙,朱金兆,毕利东. 三峡库区森林流域生态系统土壤渗透性能的研究[J]. 水土保持学报, 2003, 7(3): 63-65.
- [15] 李智广. 水土流失测验与调查[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [16] 杨吉华,张永涛,高祥伟,等. 封山育林提高森林蓄水保土效益的研究[J]. 水土保持研究, 2001, 8(3): 2-5.