

## 晋西黄土区不同土地利用类型坡面土壤饱和导水率研究<sup>\*</sup>

纳磊<sup>1</sup>, 张建军<sup>1,2</sup>, 朱金兆<sup>1,2</sup>, 董煌彪<sup>1</sup>, 王鹏<sup>1</sup>, 袁琳丽<sup>1</sup>

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 山西 吉县 落叶阔叶林生态系统国家野外站, 山西 吉县 042200)

**摘 要:**饱和导水率是表征土壤入渗能力的重要参数之一, 对模拟土壤入渗过程、建立流域水文模型具有重要意义。通过在山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站蔡家川流域的实验, 采取对比分析方法, 对不同土地利用类型坡面土壤入渗特征进行研究。结果表明: 土壤饱和导水率与土壤非毛管孔隙度、土壤总孔隙度均呈正相关, 与土壤容重呈负相关。相同坡向条件下, 土壤饱和导水率坡下部 > 坡中部 > 坡上部; 相同坡位条件下, 土壤饱和导水率阴坡 > 阳坡; 各地类土壤饱和导水率呈现以下变化规律: 灌草坡 > 天然次生林 > 河漫滩 > 刺槐林 > 油松林 > 紫穗槐林 > 侧柏林 > 坡耕地 > 土质路面。

**关键词:**入渗; 饱和导水率  $K_s$ ; 异质性; 黄土坡

中图分类号: F301.24; S152.72

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2008)03-0069-05

## Spatial Heterogeneity of Soil Saturated Hydraulic Conductivity from Different Land Use Types on Loess Slope in West of Shanxi Province

NA Lei<sup>1</sup>, ZHANG Jian-jun<sup>1,2</sup>, ZHU Jin-zhao<sup>1,2</sup>, DONG Huang-biao<sup>1</sup>, WANG Peng<sup>1</sup>, YUAN Lin-li<sup>1</sup>

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Chinese National Ecosystem Observation and Research Station, Jixian, Shanxi 042200, China)

**Abstract:** As one of the parameters describing soil infiltration capacity, soil saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ) is also very important for infiltration and watershed hydrological modeling. The watershed in West of Shanxi province which is a national forestry ecology research station was analyzed by experiments, and infiltration characteristics from different types of land use were researched by contrastive analyzing. The results show that:  $K_s$  and non-capillary porosity, total porosity have significantly positive relationships, while a highly negative relationship shows between  $K_s$  and soil volumetric weight. On the condition of same exposure,  $K_s$  rises from top to base of the slope. On the condition of same slope segment,  $K_s$  is higher on apoco than that was on adretto.  $K_s$  changes obviously with the transforms of land use types.

**Key words** infiltration; soil saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ); heterogeneity; loess slope

入渗是指水分通过土壤表面垂直向下进入土壤和地下的运动过程。它不仅直接影响地面径流量的大小, 也影响土壤水分及地下水的增长。因此, 研究不同立地类型坡面入渗的变化规律对于建立流域降雨-径流、降雨-侵蚀模型具有重要的基础性研究意义。20 世纪 60 年代以来, 世界各国学者对土壤入渗的空间变异性展开了一系列的研究, Helalia<sup>[1]</sup>对田间土壤入渗的研究表明, 土壤有效孔隙度与稳渗速率之间存在显著的相关关系; Bodman<sup>[2]</sup>认为入渗初期, 土壤含水率增加, 土壤入渗速率减小, 随着时间的延续, 土壤含水率对入渗的影响变小, 并最终可以忽略。Hillel<sup>[3]</sup>研究认为在雨滴打击作用下, 土壤表层团聚体遭到破坏, 分散的小颗粒填

充了土壤表面的孔隙, 土壤表面被压实, 土壤入渗能力降低。我国学者从 20 世纪 80 年代以来对土壤入渗进行了大量研究, 蒋定生等<sup>[4-5]</sup>研究认为, 土壤入渗能力主要取决于土壤机械组成、水稳性团粒含量、土壤容重等因素, 土壤质地愈粗, 透水性能愈强; 在渗透率较大的坡面上, 入渗速率与坡度成反比关系。贾志军等<sup>[6]</sup>研究认为土壤平均入渗率与土壤含水率呈负相关的线性关系。袁建平等<sup>[7]</sup>研究认为, 土地利用方式不同, 坡面土壤稳渗速率存在较大差异。赵西宁等<sup>[8]</sup>研究发现, 坡面耕作措施可有效地提高土壤入渗速率, 延缓坡面径流, 是控制坡耕地水土流失的有效措施。土壤入渗方面的研究很多, 但以黄土区不同土地利用类型坡面为研究对

\* 收稿日期: 2007-10-08

基金项目: “973”国家重大基础研究课题(2002CB111503); “十一五”科技支撑计划(2006BAD03A1204); 国家自然科学基金项目(30571530)

作者简介: 纳磊(1982-), 男, 宁夏银川人, 在读硕士, 主要从事数字水文、地理信息系统研究。E-mail: kevinwd@163.com

通信作者: 张建军(1964-), 副教授, 硕士生导师, 主要从事水土保持学、数字水文研究。E-mail: zhangjianjun@bjfu.edu.cn

象,以土壤饱和导水率为主要研究内容,对土壤入渗空间变化规律,特别是不同植被类型条件下坡面土壤入渗变化规律的研究并不多。因此,该文通过在野外挖土壤剖面,利用体积 400 cc 的环刀采取原状土样,在室内采用定水头的方法对蔡家川流域土壤饱和导水率的空间异质性规律进行研究。

1 研究区概况

研究流域位于山西省吉县蔡家川,属北京林业大学水土保持学院国家级森林生态研究定位站。地理坐标位于东经 110°27′ - 111°07′,北纬 35°53′ - 36°21′,海拔高度在 904 ~ 1 592 m,相对高差 688 m。该流域为黄河的 3 级支流,呈由西向东走向,全长约 12.15 km,流域面积 38 km<sup>2</sup>。流域地貌类型为典型的梁状丘陵沟壑类型,沟壑密度为 0.966 km/km<sup>2</sup>。研究区气候为半干旱大陆性季风气候,年平均降水量 575.9 mm,多集中在 7 - 9 月,最大年际变化率为 43.1%。年平均水面蒸发量为 1 732.9 mm,年平均气温 10℃。流域内土壤以褐土为主,抗蚀性差,水土流失严重,平均侵蚀模数 11 823 t/km<sup>2</sup>。土地利用类型主要有人工林地、天然林地、果园、农地、灌草坡等。主要树种有刺槐 (*Robinia pseudo-acacia*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*)、侧柏 (*Platycladus orientalis*)、灌木以沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、虎榛子 (*Ostryopsis davidiana*) 等为主。

2 研究方法

本次研究于 2006 年 7 - 8 月,在实验流域内选取天然次生林地、油松林地、刺槐林地、侧柏林地和灌草坡等不同地类,挖取深 1 m 的土壤剖面,在 10 - 20,20 - 40,40 - 60,60

- 80,80 - 100 cm 5 个土层使用体积为 400 cc 的环刀<sup>[9]</sup>取得原状土样 3 只,用铝盒分层取得土样,在实验室利用恒定水头法测定土壤饱和导水率,用烘干法测得土壤容重和土壤含水率,取 3 次实测数据平均值作为试验结果。用同样的实验方法测定不同坡向、不同坡位表层 0 - 10 cm 土层的土壤饱和导水率和土壤含水率。

3 结果与分析

3.1 不同土地利用类型坡面土壤属性变化

黄土区地下水埋藏较深,无法上行补给,降水通过入渗进入各个土层,成为土壤水分补给的惟一来源<sup>[10]</sup>。因此,土壤性质直接影响着进入坡面各层土壤水分的多寡。通过对刺槐、油松、侧柏、次生林和灌草坡共 5 个不同土地利用类型坡面的土壤属性进行分析得到表 1。

由表 1 可见,天然次生林、侧柏林土壤水分含较高,0 - 100 cm 土层的平均土壤含水率分别为 20.5%,20.35%;油松林地、灌草坡地土壤含水率一般,0 - 100 cm 土层的平均土壤含水率分别为 15.78%,14.08%;刺槐林地土壤含水率最低,0 - 100 cm 土层的平均土壤含水率仅为 10.88%。

侧柏林地土壤非毛管孔隙度最高,0 - 100 cm 土层平均土壤非毛管孔隙度达到 4.55%;灌草坡地、刺槐林地、天然次生林地土壤非毛管孔隙度低于侧柏林地,0 - 100 cm 土层平均土壤非毛管孔隙为 3.85%,3.2%,2.75%,分别为侧柏林地的 84.6%,70.3%和 60.4%;油松林地土壤非毛管孔隙度最低,0 - 100 cm 土层平均土壤非毛管孔隙度为 2%,仅为侧柏林地的 44%。

表 1 不同土地利用类型坡面土壤属性

土地利用类型	指 标	土层/cm				
		0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
油松林地	含水率/ %	14.63	18.63	17.38	13.88	14.38
	非毛管孔隙度/ %	3.50	1.00	1.50	1.50	2.50
	总孔隙度/ %	57.00	51.50	52.25	54.00	54.25
	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.13	1.22	1.21	1.20	1.20
刺槐林地	含水率/ %	12.00	11.75	12.38	11.38	6.88
	非毛管孔隙度/ %	1.00	2.25	0.75	4.50	7.50
	总孔隙度/ %	47.00	48.50	43.00	56.75	54.75
	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.43	1.28	1.46	1.26	1.26
侧柏林地	含水率/ %	33.25	20.38	14.25	15.75	18.13
	非毛管孔隙度/ %	2.00	1.25	1.00	8.50	10.00
	总孔隙度/ %	51.25	48.50	45.00	54.00	60.75
	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.14	1.24	1.27	1.15	1.07
天然次生林地	含水率/ %	17.63	23.63	21.13	20.88	19.25
	非毛管孔隙度/ %	1.75	3.00	2.50	3.25	3.25
	总孔隙度/ %	50.75	55.25	52.50	57.25	60.25
	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.63	1.26	1.29	1.17	1.15
灌草坡地	含水率/ %	15.13	15.00	14.50	13.50	12.25
	非毛管孔隙度/ %	1.75	2.50	2.75	4.50	7.75
	总孔隙度/ %	45.50	48.00	47.50	50.25	76.25
	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.46	1.32	1.30	1.26	1.16

不同土地利用类型坡面土壤总孔隙度差别不大,天然次生林地土壤总孔隙度最高,0 - 100 cm 土层平均土壤总孔隙

度达到 55.2%;油松林地、灌草坡地、侧柏林地稍低,0 - 100 cm 土层平均土壤总孔隙度分别达到 53.8%,53.5%和

52.5 %,是天然次生林地的 97.5 %,96.9 %和 95.1 %;刺槐林地坡面土壤总孔隙度较低,0 - 100 cm 土层平均土壤总孔隙为 50 %,是天然次生林地的 90.6 %。

不同土地利用类型坡面土壤容重呈现 2 个级别,刺槐林地、天然林地、灌草坡地土壤容重较高,分别为 1.33,1.3,1.3 g/cm<sup>3</sup>;油松林地、侧柏林地土壤容重较低,分别为 1.19,1.17 g/cm<sup>3</sup>。

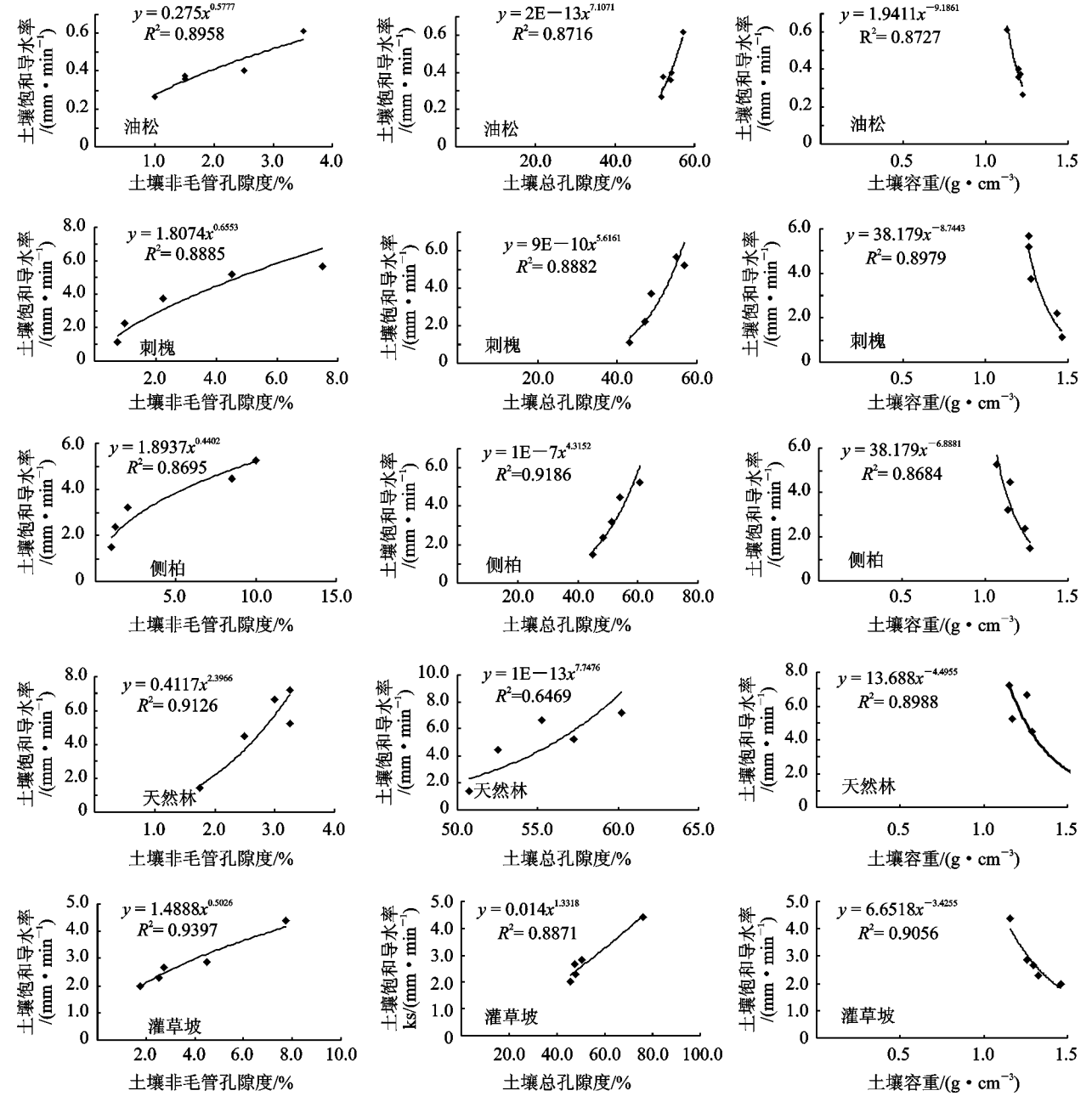


图 1 不同土地利用类型坡面土壤饱和和导水率与土壤属性相关性

从图 1 可以看出,土壤饱和和导水率与土壤非毛管孔隙度的关系可以用幂函数表达,相关性显著,决定系数最高的荒草坡,达到 0.94,侧柏林地最小,为 0.87。土壤饱和和导水率与土壤总孔隙之间也呈正相关,相关性略低于非毛管孔隙度,决定系数最高的为侧柏林地,达到 0.92,最低的为次生林地,仅为 0.65。土壤饱和和导水率与土壤容重呈负相关,相关性显著,所研究的各地类土壤饱和和导水率与土壤容重相关

3.2 坡面土壤饱和和导水率与土壤属性相关性分析

土壤入渗性能的高低与土壤的通透性有着密切的联系,土壤的通透性主要取决于土壤孔隙度的高低,特别是孔径超过 0.02 mm 的非毛管孔隙的多少<sup>[11]</sup>。通过对不同土地利用类型坡面土壤饱和和导水率与土壤属性特征值的相关性分析得到图 1。

关系的决定系数 0.87 ~ 0.91,其中在荒草坡地达到 0.91,在侧柏林地上为 0.87。

土壤饱和和导水率与土壤非毛管孔隙度、土壤总孔隙度均呈正相关,前一种相关关系的变化率小于后者;荒草坡和天然林地的土壤饱和和导水率与土壤非毛管孔隙度间的相关性较高,土壤非毛管孔隙度是影响土壤饱和和导水率的主要因素;在油松林和刺槐林地,土壤饱和和导水率与土壤非毛管孔

隙度间、土壤总孔隙度间的相关性相当;在侧柏林地,土壤饱和和导水率与土壤总孔隙度间的相关性较高,土壤总孔隙度是影响土壤饱和导水率的主要因素;土壤饱和导水率与土壤容重呈负相关,二者相关性较高。

3.3 不同坡位土壤饱和导水率变化规律

相同坡向条件下,不同坡位土壤入渗性能不同<sup>[12]</sup>。通过对油松、刺槐、侧柏、次生林、灌草坡及农耕地阴坡方向上不同坡位的土壤初始入渗率、饱和导水率和土壤含水率数据(共计 21 组)分析得到表 2。

表 2 不同坡位土壤入渗率

土地利用类型	坡位	初始入渗率/ (mm·min <sup>-1</sup> )	饱和导水率/ (mm·min <sup>-1</sup> )	土壤含水率/ %
油松林地	上	1.10	0.76	12.32
	中	2.00	1.16	14.51
	下	3.40	2.04	15.87
刺槐林地	上	0.80	0.50	6.67
	中	1.60	1.16	8.32
	下	2.20	2.58	10.81
侧柏林地	上	0.30	0.31	8.28
	中	1.60	0.93	8.73
	下	1.80	1.11	9.86
天然次生林地	上	1.70	0.67	14.99
	中	6.20	2.67	16.86
	下	8.00	5.69	20.21
紫穗槐林地	上	1.90	0.82	11.07
	中	3.30	1.04	12.09
	下	3.60	1.44	12.65
灌草坡地	上	2.20	1.16	10.79
	中	5.50	1.93	14.54
	下	12.00	7.24	17.29
新翻坡耕地	上	0.25	0.10	6.69
	中	0.20	0.27	9.88
	下	0.95	0.44	10.91

从表 2 看出,不同立地类型条件下,阴坡土壤初始入渗率、饱和导水率均呈从坡上部至坡下部逐步增大的变化趋势。出现这一规律的主要原因是坡面土壤性质随坡位产生变化。坡上、中部土壤水分条件较差,在长时间的侵蚀作用下,坡面表层松散的土壤被侵蚀、冲刷、搬运到坡下部,导致坡上部表层土壤更加致密,土壤入渗率较低;而在坡下部堆积了大量松散土壤,植被生长茂盛,土壤入渗率较高。

3.4 不同坡向土壤入渗变化规律

不同坡向的土壤水分、植被状况等存在较大差异,在同一坡位条件下,不同坡向土壤入渗性能不同<sup>[13]</sup>。通过对刺槐、紫穗槐、灌草坡及坡耕地不同坡向上的土壤初始入渗率、饱和导水率和土壤含水率数据(共计 24 组)分析后得表 3。

从表 3 可以看出,在不同立地类型坡面条件下,不同坡向土壤初始入渗率、饱和导水率均呈现阴坡大于阳坡的变化规律。这是由于不同坡向土壤水分条件不同所致。阳坡因土壤水分含量低,植被生长较差,枯枝落叶量少,植物对土壤物理性质的改良作用较差,因此土壤较为致密,入渗能力差。阴坡因土壤含水率明显高于阳坡,植被生长良好,枯枝落叶层较厚,在植物的作用下土壤更为疏松,入渗能力较强。

3.5 不同土地利用类型坡面表层土壤饱和导水率变化规律

不同的下垫面条件下,土壤入渗速率不同<sup>[14]</sup>。通过对不同土地利用类型阴坡坡面的表层土壤初始入渗率、饱和导水率及土壤含水率分析后得到表 4。

表 3 不同坡向土壤入渗率

土地利用类型	坡向	坡位	初始入渗率/ (mm·min <sup>-1</sup> )	饱和导水率/ (mm·min <sup>-1</sup> )	土壤含水率/ %
刺槐林地	阳	上	0.80	0.50	6.67
		中	1.60	1.16	8.32
		下	2.20	2.58	10.81
	阴	上	0.40	0.70	8.06
		中	5.40	3.40	9.98
		下	6.60	6.40	12.38
紫穗槐林地	阳	上	0.80	0.34	8.89
		中	0.80	0.53	9.22
		下	2.10	0.76	9.66
	阴	上	1.90	0.82	11.07
		中	3.30	1.04	12.09
		下	3.60	1.44	12.65
灌草坡地	阳	上	0.30	0.13	4.93
		中	0.50	0.22	5.58
		下	0.80	0.62	5.72
	阴	上	2.20	1.16	10.79
		中	5.50	1.93	14.54
		下	12.00	7.24	17.29
新翻坡耕地	阳	上	0.25	0.09	13.85
		中	1.50	0.14	14.09
		下	1.90	0.64	16.02
	阴	上	0.25	0.10	6.69
		中	0.20	0.27	9.88
		下	0.95	0.44	10.91

表 4 不同土地利用类型坡面表层土壤入渗率

土地利用类型	初始入渗率/ (mm·min <sup>-1</sup> )	饱和导水率/ (mm·min <sup>-1</sup> )	土壤含水率/ %
油松林地	2.17	1.32	14.23
刺槐林地	1.53	1.41	8.60
侧柏林地	1.23	0.78	8.96
天然次生林地	5.30	3.01	17.35
紫穗槐林地	2.93	1.10	11.94
灌草坡地	6.57	3.44	14.21
河漫滩地	3.38	1.84	20.20
坡耕地	0.47	0.27	9.16
土质路面	0.11	0.04	4.27

从表 4 可以看出,不同土地利用类型坡面表层土壤的入渗特征存在显著差异。灌草坡、天然次生林地的初始入渗率、前 5 min 平均入渗率和饱和导水率较高,分别为 6.57, 7.44, 3.44mm/min 和 5.30, 6.32, 3.01 mm/min。油松林、刺槐、侧柏、紫穗槐林地及河漫滩地的土壤入渗特征值分别为次生林地土壤初始入渗率的 40.94%, 28.87%, 23.21%, 55.29% 和 63.76%; 前 5 min 平均入渗率的 35.46%, 38.92%, 24.2%, 46.99% 和 49.52%; 饱和导水率的

43.85 % ,46.84 % ,25.91 % ,36.55 % 和 61.13 % 。坡耕地和土质路面的土壤入渗特征值最小,分别为灌草坡地土壤初始入渗率的 8.86 % 和 2.08 % ;前 5 min 平均入渗率的 8.23 % 和 1.1 % ;饱和导水率的 8.97 % 和 1.33 % 。

根据数据分析,可以将各地类划分为 3 类。第一类,饱和导水率 > 2.5 mm/min,分别为次生林地、灌草坡;第二类,饱和导水率介于 1.0 ~ 2.5 mm/min,主要是各类人工林地;第三类,饱和导水率 < 1.0 mm/min 以下,分别为侧柏林地、坡耕地和土质路面。

研究表明,在黄土高原地区应该大力发展天然次生林,也就是说如何将现有人工林通过抚育管理措施,转化为近自然林,这样水土保持林才能发挥最大的水源涵养和水土保持作用。土质路面的初渗速率、前 5 min 平均入渗速率、饱和导水率都非常小,仅为天然次生林地的 2.08 % ,1.10 % 和 1.33 % 。降雨时路面首先会产生地表径流,形成的地表径流沿路面流动过程中冲刷路面产生侵蚀,而黄土区的山路大部分为没有硬化的土质路面,因此,土质道路是黄土区侵蚀、产生泥沙的主要来源之一。因此,黄土区道路建设中如何控制路面水土流失是山区建设中急需解决的问题。

4 结 论

(1)土壤饱和导水率与土壤非毛管孔隙度、土壤总孔隙度均呈正相关,与土壤容重呈负相关。

(2)在相同坡向条件下,土壤初始入渗率、饱和导水率随坡位变化呈现以下规律:坡下部 > 坡中部 > 坡上部。

(3)在相同坡位条件下,土壤初始入渗率、饱和导水率随坡向变化呈现以下规律:阴坡 > 阳坡。

(4)将不同土地利用类型坡面土壤入渗性能划分为 3 个等级。第一级,饱和导水率 > 2.5 mm/min,分别为次生林地、灌草坡;第二类,饱和导水率介于 1.0 ~ 2.5 mm/min,主要是各类人工林地;第三类:饱和导水率 < 1.0 mm/min,分别为侧柏林地、坡耕地和土质路面。

参考文献:

[1] Helalia A M. The relationship between soil infiltration

and effective porosity in different soils[J]. Agricultural Water Management, 1993, 24(8): 39-47.

[2] Bodman G B, Colman E A. Moisture and energy condition during downward entry of water into soil[J]. Soil Science Soc. AM. J., 1944, 8(2): 166-182.

[3] Hillel D. Crust formation in lassies soils[J]. International Soil Science, 1960, 29(5): 330-337.

[4] 蒋定生, 黄国俊, 谢永生. 黄土高原土壤入渗能力野外测试[J]. 水土保持通报, 1984, 4(4): 7-9.

[5] 蒋定生, 黄国俊. 地面坡度对降雨入渗影响的模拟试验[J]. 水土保持通报, 1984, 4(4): 10-13.

[6] 贾志军, 王贵平, 李俊义, 等. 土壤含水率对坡耕地产流影响的研究[J]. 山西水土保持科技, 1990, 22(4): 25-27.

[7] 袁建平, 雷廷武, 郭彦彦, 等. 黄土丘陵区小流域土壤入渗速率变异性[J]. 水利学报, 2001, 10(5): 88-92.

[8] 赵西宁, 吴发启, 王万忠. 黄土高原沟壑区坡耕地土壤入渗规律研究[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(4): 109-112.

[9] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978.

[10] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 36-42.

[11] Edwards W M, Norton L D, Redmond C E. Characterizing macrospores that affect infiltration into no tilled[J]. Soil Science Society of American Journal, 1993, 157: 1586-1594.

[12] 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性[J]. 土壤学报, 2001, 38(4): 579-583.

[13] 夏江宝, 杨吉华, 李红云. 不同外界条件下土壤入渗性能的研究[J]. 水土保持研究, 2004, 11(2): 115-117.

[14] 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(2): 1-5.

(上接第 68 页)

[15] Cain M L, Subler S, Evans J P, et al. Sampling spatial & temporal variation in soil nitrogen availability[J]. Oecologia, 1999, 118: 397-404.

[16] 韦兰英, 上官周平. 黄土高原白羊草、沙棘和辽东栎细根比根长特性[J]. 生态学报, 2006, 26(12): 4164-4169.

[17] Vogt K A, Vogt D J, Vogt P A, et al. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species [J]. Plant and Soil, 1996, 187: 159-219.

[18] 杨丽韞, 罗天祥, 吴松涛. 长白山原始阔叶红松 (*Pinus koraiensis*) 林及其次生林细根生物量与垂直分布特征[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3609-3617.

[19] 梅莉, 王政权, 韩有志, 等. 水曲柳根系生物量、比根长和根长密度的分布格局[J]. 应用生态学报, 2006, 17(1): 1-4.

[20] 安慧, 韦兰英, 刘勇, 等. 黄土丘陵区油松人工林和白桦天然林细根垂直分布及其与土壤养分的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 611-619

[21] 刘建军. 秦岭油松、锐齿栎根系生态研究[M]. 西安: 西北大学出版社, 2002: 36.

[22] 何维明. 不同生境中沙地柏根表面积分布特征[J]. 林业科学, 2000, 36(5): 17-21.

[23] 王佑民, 刘秉正. 黄土高原防护林生态特征[M]. 北京: 中国林业出版社, 1994: 57.