

川中丘陵紫色土区土壤水分入渗性能研究

马 浩,尹忠东*,许智超

(北京林业大学 水土保持学院,水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室,北京 100083)

摘 要:选取四川省盐亭县陈家湾小流域为研究对象,使用环刀法对紫色土土壤水分入渗规律、不同土地利用方式下土壤入渗性能进行了研究,分析了容重、坡度、坡向对土壤入渗性能的影响。结果表明:紫色土土壤水分入渗速率随着时间增加呈下降趋势,25~30 min 达到稳定入渗阶段,土壤水分入渗过程可用 Horton 公式较好描述。随着坡度的增加,土壤入渗速率增加,不同坡向土壤水分稳定入渗速率表现为半阴坡>半阳坡>阳坡。土壤容重与土壤入渗速率呈负相关关系,随着土壤容重的增加,土壤入渗速率减小。不同土地利用方式下,耕地的土壤稳渗速率大于林地。

关键词:紫色土;土壤入渗;稳渗速率

中图分类号:S714.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2011)03-0068-05

Capability of Soil Water Infiltration of Purple Soil in Hilly Area of Central Sichuan

MA Hao, YIN Zhong-dong, XU Zhi-chao

(Key Laboratory of Soil & Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The soil water infiltration process of purple soil and soil infiltration performance under different land use were studied by using the method of core sampler. Influences of soil bulk density, slope, slope aspect on soil infiltration were analyzed. The Chenjiawan watershed of Yanting County in Sichuan Province was chosen as a study area. The results indicated that the rate of soil water infiltration of purple soil decreased with the increase of infiltration time initially, and came into stable situation after 25~30 minutes. The Horton Empirical formula could simulate the process of soil water infiltration properly. The soil stable infiltration rates changed with different slope aspect as following: semi-shady slope > semi-sunny slope > sunny slope. The soil bulk density was negatively correlated with soil infiltration rates, the soil infiltration rates decreased as soil bulk density increased. Under different land use types, infiltration of farmland was bigger than that of forestry land.

Key words: purple soil; soil infiltration; stable infiltration rate

土壤水分入渗是一个非常复杂的动态过程,是降水、地面水、土壤水和地下水相互转化的重要环节,受到自然因素和人为因素共同影响。研究土壤水分入渗规律对水文和侵蚀模拟、防止土壤流失具有重要意义^[1-4]。

川中丘陵紫色土区由于降雨季节分配不均,雨季降雨量大且集中,土地利用不合理,人为活动干扰较大,导致该区域存在较为严重的水土流失,造成土

地生产力急剧下降。为改善土壤状况,防止水土流失进一步恶化,需要对紫色土区土壤入渗速率进行研究,从而为增加土壤入渗,合理配置土地利用资源提供依据。

目前,已经有学者对紫色土区土壤入渗进行了一定程度的研究,如利用人工模拟降雨研究田间条件下坡度、降雨、耕作方式对紫色土坡耕地土壤入渗的影响,结果表明雨强对入渗过程有着重要影响,随着坡

收稿日期:2010-03-25 修回日期:2010-12-16
基金项目:国家重点基础研究发展计划“西南紫色土区水土流失综合调控原理与治理范式”(2007CB407207-1)
作者简介:马浩,男,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀。
* 通讯作者:尹忠东,男,副教授,研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail:yaayp@sina.com。

度的增加,稳定入渗率表现出升—降—升的变化趋势,入渗率随降雨历时增加而减小,二者呈幂函数关系^[5];使用环刀法研究了三峡库区不同土地利用类型下紫色土土壤入渗性能,研究表明土壤入渗速率随时间变化呈幂函数关系,农林混作型耕地能够延缓地表径流产生,增加土壤水分入渗^[6];利用双环法研究了长江中上游包括紫色土在内典型土壤入渗规律,得出蒋定生、Horton 公式对土壤入渗拟合精度高于 Philip 方程和 Kostiaikov 经验公式,土壤稳渗速率与容重呈负相关^[7]。当前,普遍采用双环法在野外测定土壤入渗速率,对单独影响因素造成土壤入渗速率的变化进行分析,忽略了不同因素之间的相关性。本研究综合考虑了土壤容重、坡度、坡向、土壤初始含水量对土壤入渗速率的影响,研究其变化规律,将入渗速率测定在室内进行,保证了研究精度和效率。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省绵阳市盐亭县境内的陈家湾小流域。该研究区面积 0.17 km²,流域内的土地利用类型以耕地和林地为主,属中亚热带季风气候,年均气温 17.3℃,年平均降水量 880.7 mm,无霜期 294 d,年均日照时数 1 300 h,年均蒸发量 1 070 mm。本区土壤为水稻土和石灰性紫色土。土层厚度 70 cm 以上,质地为中壤土。本区为典型的川中丘陵地带,自然植被类型为纯柏木林(*Cupressus funebris*)、桤木(*Alnus cremastogyne*)和柏木混交林,林下灌木和草本稀疏,灌木主要是黄荆(*Vitex negundo*)、马桑(*Coriaria sinica*),草本以禾本科、莎草科等为主,主要作物为玉米、油菜、小麦、水稻。

1.2 方法

1.2.1 土壤样品采集与测定 选取试验小流域内各坡向(半阴、半阳、阳坡)的坡上部、坡中部具有代表性的林地,沟底耕地作为样地(表 1)。林地主要树种为侧柏,耕地种植方式为玉米—小麦轮作。使用环刀采集土壤表层 0~20 cm 原状土,铝盒采集扰动土,在室内用烘干法测定初始含水量,以重量百分比表示;土壤容重采用环刀法^[8]测定。

1.2.2 土壤入渗能力测定 入渗试验采用环刀法,使用马氏瓶控制定水头置于离环刀 5 cm 高的上方,用于控制水量。将采集的土样环刀于水中浸泡 12 小时后,上方套同样规模的环刀用于接水,该环刀侧面 上方打孔,将多余的上方来水及时导出以保证环刀中的水面保持稳定水平,最后将环刀置于漏斗上侧宽口中,二者作为整体用三角架支撑,下方用水管接至置

于水平地面的量筒当中,用于测定入渗水量(图 1)。测定初始,每 0.5 min 记录一次读数,5 min 后,每 1 min 记录 1 次,从 9 min 起,每 2 min 记录 1 次,25 min 后,每 5 min 记录 1 次,40 min 后,每 10 min 记录 1 次,每组样品进行 60 min 实验,之后停止读数。

表 1 小流域样点分布与土壤性质
Table1 Typical distributed plot sites and soil characters

编号	坡向	坡位	坡度/(°)	土壤容重/(g·cm ⁻³)	土壤初始含水率/%
林 1	半阴	上	30	1.28	9.25
林 2	半阴	中	15	1.50	10.40
林 3	阳坡	上	35	1.25	8.40
林 4	阳坡	中	20	1.54	9.75
林 5	半阳	上	25	1.51	10.15
林 6	半阳	中	20	1.64	9.55
耕 7	沟底	下	5	1.37	9.62
耕 8	沟底	下	5	1.39	9.85

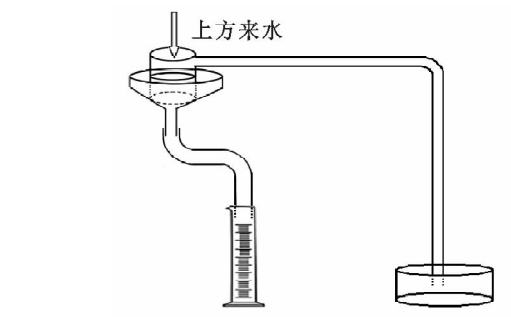


图 1 土壤入渗测定装置

Fig. 1 Device of soil infiltration determination

2 结果与分析

2.1 土壤入渗速率变化及拟合

土壤的入渗性能随着降雨时间的增加而发生变化。随着降雨过程的进行,土壤含水率增大,最终达到饱和,也导致土壤的实际入渗能力变弱,之后随着降雨时间的增加,逐步减小并最终达到一个稳定的值。土壤的稳定入渗率代表土壤入渗后期达到饱和时的导水能力。

由图 2 至图 9 可以看出,土壤入渗初期,0~10 min 阶段,初始入渗速率最大,并且下降迅速,初始入渗最高的为坡地耕地,从 11.6 mm·min⁻¹下降到 10.2 mm·min⁻¹;10~25 min 阶段,入渗速率依然呈下降趋势,但速度明显变慢;25~30 min 阶段,土壤水分达到饱和,入渗基本保持恒定,趋于一个稳定值,即稳定入渗速率。不同的土地利用方式下,耕地的土壤稳渗速率明显大于林地,造成这种现象的原因是耕地的土壤沙粒含量高,透水性最强,同时土壤容重小于林地土壤。

对土壤入渗过程进行拟合,能够得到小流域土壤入渗速率方程。在不同使用条件下,不同的方程拟合效果也不尽相同。目前国内通常使用 Philip 方

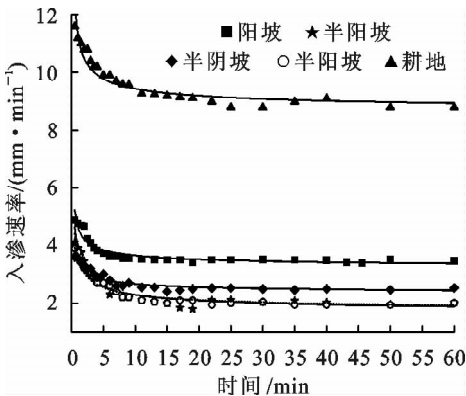


图 2 陡坡入渗过程及 Philip 拟合曲线

Fig. 2 Infiltration process of steep slope and Philip fitting curve

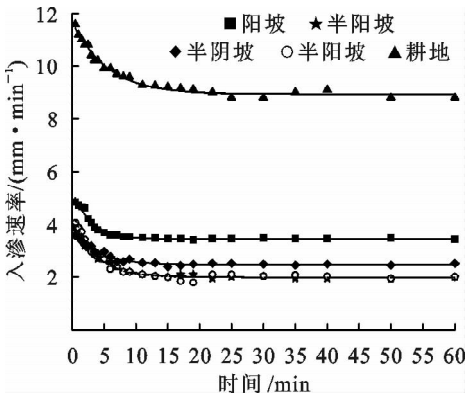


图 3 陡坡入渗过程及 Horton 拟合曲线

Fig. 3 Infiltration process of steep slope and Horton fitting curve

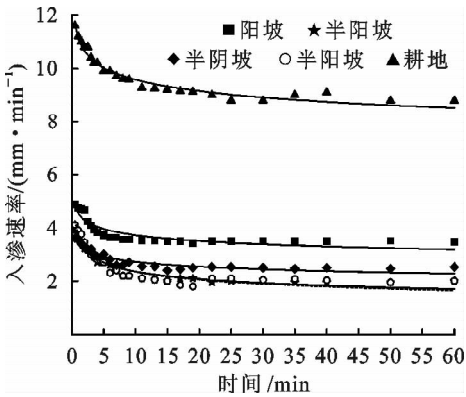


图 4 陡坡入渗过程及 Kostiakov 拟合曲线

Fig. 4 Infiltration process of steep slope and Kostiakov fitting curve

土壤入渗速率与时间呈指数关系。

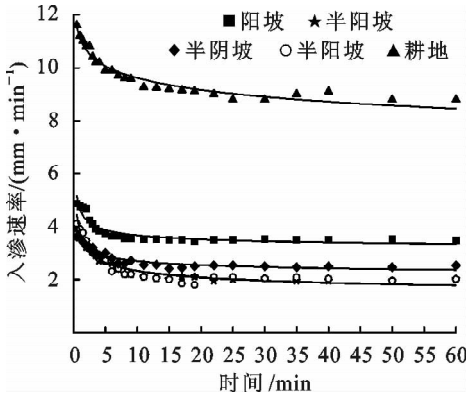


图 5 陡坡入渗过程及蒋定生拟合曲线

Fig. 5 Infiltration process of steep slope and Jiang fitting curve

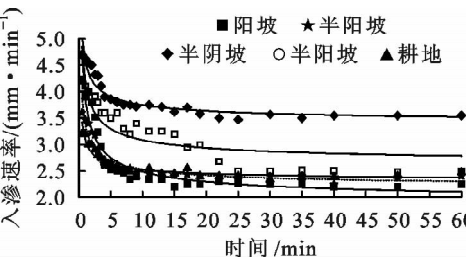


图 6 缓坡入渗过程及 Philip 拟合曲线

Fig. 6 Infiltration process of gradual slope and Philip fitting curve

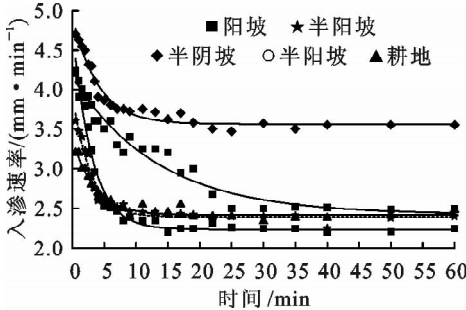


图 7 缓坡入渗过程及 Horton 拟合曲线

Fig. 7 Infiltration process of gradual slope and Horton fitting curve

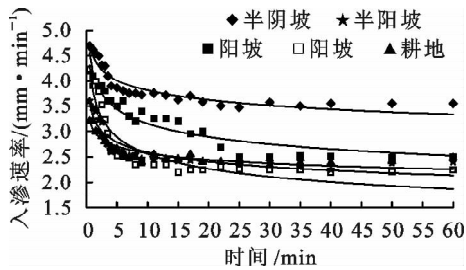


图 8 缓坡入渗过程及 Kostiakov 拟合曲线

Fig. 8 Infiltration process of gradual slope and Kostiakov fitting curve

程、Horton 公式、Kostiakov 公式和蒋定生经验公式对土壤入渗进行拟合。对陈家湾小流域不同坡度、坡向、土地利用类型土壤入渗速率使用 4 种方程进行拟合。通过对相关系数的比较(表 2),可以看出, Horton 公式的相关系数均值最高,为 0.970,其次是蒋定生经验公式,为 0.911,Philip 和 Kostiakov 拟合效果一般,分别是 0.874 和 0.887。表明陈家湾小流域土壤入渗过程同 Horton 公式拟合最好,

2.2 土壤容重与稳定入渗率的关系

土壤水分的入渗从根本上讲是水分在土体内部不断深入、流动的过程,入渗速率的主要决定因素是土壤空隙状况,因此,土壤容重对土壤水分入渗影响较大。

图 10 表明,当土壤容重从 $1.25\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 增加到 $1.54\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时,土壤稳定入渗速率从 $3.8\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 减小到 $1.22\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,表明土壤容重与入渗速率呈负相关,土壤入渗能力受土壤容重影响较大。造成这一结果的原因是土壤水分入渗过程中,土壤中空隙越大,水流通过速率越快。土壤容重直接反映的是土壤的紧密程度,土壤容重越大,导致了孔隙度减小,大孔隙减少,它便通过影响较大的空隙实现了对入渗速率的影响。

表 2 土壤入渗拟合回归结果

Table 2 Result of soil infiltration regression

公式	Philip 方程			Horton 公式				Kostiakov 公式			蒋定生经验公式			
	$y=a+1/2 * b * x^{(-1/2)}$			$y=n+(m-n)\exp^{(-kx)}$				$y=a * x^{-b}$			$y=m+(n-m)x^{(-k)}$			
参数值	a	b	r ²	m	n	k	r ²	a	b	r ²	m	n	k	r ²
阳坡坡顶	3.198	2.844	0.870	5.319	3.478	0.357	0.966	4.542	0.087	0.812	3.045	4.619	0.409	0.869
半阳坡坡顶	1.682	3.849	0.915	4.161	1.988	0.247	0.990	3.574	0.181	0.938	0.919	3.595	0.278	0.941
半阳坡坡顶	1.616	4.258	0.902	4.518	1.990	0.288	0.983	3.709	0.197	0.903	1.138	3.739	0.343	0.913
半阴坡坡顶	2.300	2.311	0.876	3.800	2.480	0.247	0.972	3.415	0.099	0.886	1.838	3.449	0.277	0.902
阳坡坡中	2.579	3.202	0.741	4.153	2.424	0.075	0.957	4.189	0.124	0.908	1.218	4.171	0.315	0.935
阳坡坡中	1.847	4.056	0.876	4.786	2.235	0.337	0.964	3.822	0.175	0.858	1.539	3.867	0.381	0.879
半阳坡中	2.148	2.433	0.895	3.951	2.392	0.361	0.965	3.308	0.106	0.849	2.001	3.362	0.401	0.896
半阴坡中	3.367	2.406	0.878	4.942	3.561	0.256	0.963	4.522	0.075	0.895	2.772	4.561	0.251	0.91
耕地	8.617	5.233	0.902	11.696	8.935	0.186	0.982	11.146	0.066	0.959	5.968	11.198	0.166	0.964
耕地	2.272	1.620	0.889	3.378	2.416	0.292	0.960	3.042	0.073	0.867	2.061	3.079	0.327	0.902

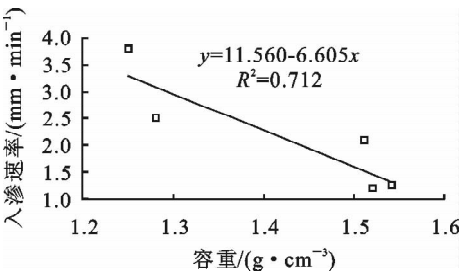


图 10 土壤稳渗速率与土壤容重的关系
Fig. 10 Relationship between soil stable infiltration rate and soil bulk density

2.3 不同坡度、坡向土壤水分入渗特征

研究结果表明,坡下到坡中随着坡度增加,土壤入渗速率由初期的 $1.21\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 增加到 $1.26\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,坡上部坡度增加过程中,土壤入渗速率迅速增加,从 $1.26\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 增加到 $3.80\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ (图 11)。造成这一现象的原因是:(1)坡度从小到大的变化过程中,土壤初始含水量逐渐变小,从而坡下部更早达到饱和状态,下渗能力减弱比陡坡快;(2)随着坡度的增加,土壤容重也相应发生变化,表现为随着坡度的增加,容重呈减小趋势,随着容重减小,土壤孔隙度增大,土壤入渗速率上升;(3)在小流域坡上部,雨滴下降方向与坡度形成角度较小,打击作用弱于坡下部,从而造成坡上部结皮发育状况不及坡下部,更有利于土壤入渗;(4)降雨产生

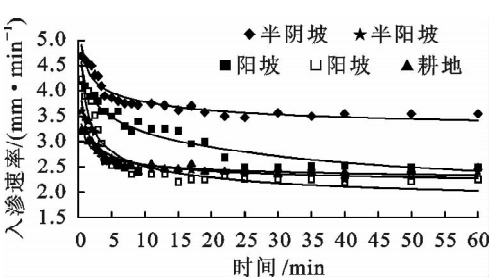


图 9 缓坡入渗过程及蒋定生拟合曲线
Fig. 9 Infiltration process of gradual slope and Jiang fitting curve

土壤侵蚀,上方泥沙沉积于坡下部,使坡下部土壤孔隙度减小,降低了土壤入渗速率。

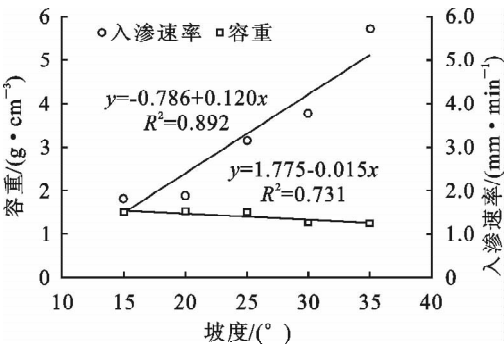


图 11 土壤稳渗速率与坡度的关系
Fig. 11 Relation between soil stable infiltration rate and slope

由图 12 可知,小流域不同坡向土壤水分达到饱和状态时,稳渗速率的差异表现为半阴坡>半阳坡>阳坡,其原因是随着坡向从半阴坡向半阳坡再向阳坡变化,土壤水分不同,使得不同坡向上植被覆盖率发生变化,半阴坡植被状况好于半阳坡,半阳坡好于阳坡,植被产生的枯枝落叶层厚度也表现为半阴坡>半阳坡>阳坡。枯枝落叶分解进入土壤中,使得土壤容重减小,土壤孔隙度增大,土壤水分入渗性能变好,从而稳定入渗率产生相应变化,同时阳坡植被覆盖差,降雨过程中雨滴击溅更容易结皮,在某种

程度上也降低了土壤入渗速率。

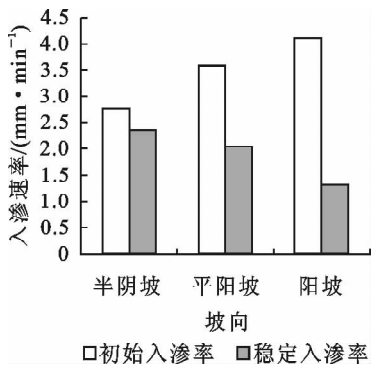


图 12 土壤稳渗速率与坡向的关系

Fig. 12 Relationship between soil stable infiltration rate and slope aspect

3 结论与讨论

土壤入渗速率随着时间的增加呈降低趋势，初始 0~10 min 内，入渗速率急剧下降，10~25 min 阶段，下降趋势减缓，25~30 min 后，入渗速率基本达到稳定。不同土地利用类型土壤稳渗速率表现为耕地>林地，土壤入渗过程同 Horton 方程拟合较好。

土壤容重对土壤入渗性能有着重要影响，二者呈负相关关系，随着土壤容重的增加，土壤入渗能力呈下降趋势。

坡度对土壤入渗速率的影响在国内已经有广泛研究，有学者认为坡度越大，入渗率越小^[9]，其原因是伴随着坡度由缓坡向陡坡转变，降雨造成的径流随坡面方向增大，而在垂直于坡面方向上力量减小。也有学者的研究成果表明，土壤稳定入渗率随坡度增加而快速增加^[10]。

林地坡度对土壤水分入渗的影响表现为随着坡度的增加，从坡下部到坡中部缓坡变化过程中，土壤入渗速率缓慢增加，坡中部到坡上部随着坡度的增加，土壤入渗速率迅速增加。土壤入渗速率大小分布为坡上>坡中>坡下。不同坡向上，土壤稳定入渗速率表现为半阴坡>半阳坡>阳坡。

参考文献：

[1] 吴长文,王礼先. 林地土壤的入渗及其分析[J]. 水土保持研究, 1995,2(1):71-75.

WU C C,WANG L X. The analysis on the characteristics of infiltration and its simulation into forested land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1995,2(1):71-75.

[2] 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,1984,18(4):10-13.

[3] 赵西宁,吴发启. 土壤水分入渗的研究进展和综述[J]. 西北林学院学报,2004,19(1):42-45.

ZHAO X N,WU F Q. Development and reviews of soil infiltration research[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2004,19(1):42-45.

[4] 余新晓,赵玉涛,张志强,等. 长江上游亚高山暗针叶林土壤水分入渗特征研究[J]. 应用生态学报,2003,14(1):16-20.

YU X X,ZHAO Y T,ZHANG Z Q, et al. Characteristics of soil water infiltration in sub-alpine dark coniferous ecosystem of upper reaches of Yantze[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2003,14(1):16-20.

[5] 傅斌,王玉宽,朱波,等. 紫色土坡耕地降雨入渗试验研究[J]. 农业工程学报,2008,24(7):39-43.

FU B, WANG Y K, ZHU B, et al. Experimental study on rainfall infiltration in sloping farmland of purple soil[J]. Transactions of the CSAE,2008,24(7):39-43.

[6] 马晓刚,张兵,史冬梅,等. 丘陵区不同土地利用类型紫色土入渗特征研究[J]. 水土保持学报,2007,21(5):25-29.

MA X G,ZHANG B,SHI D M, et al. Study on soil infiltration characteristic of different land utilization types in purple soil hilly region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007,21(5):25-29.

[7] 朱冰冰,张平仓,丁文峰,等. 长江中上游地区土壤入渗规律研究[J]. 水土保持通报,2008,28(4):44-47.

ZHU B B,ZHANG P C,DING W F, et al. Infiltration process in the middle and upper reaches of the Yangtze River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2008,28(4):44-47.

[8] 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.

[9] 袁建平,雷廷武,郭索彦,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):88-92.

YUAN J P,LEI T W,ZHANG S Y,et al. Spatial variation of steady water infiltration rates of small watershed in hilly and gully loess region[J]. Acta Pedologica Sinica,2001,38(4):88-92.

[10] JANEAU J L,BRICQUET J P,PLANCHON O,et al. Soil crusting and infiltration on steep slopes in northern Thailand [J]. European Journal of Soil Science,2003,24:543-553.