

不同土地利用类型土壤入渗性能及其影响因素研究

莫斌¹, 陈晓燕^{2,3}, 杨以翠¹, 罗帮林², 唐菊²,
官春明⁴, 林芷行¹, 周土金¹, 申云康¹

(1. 广西壮族自治区交通规划勘察设计研究院, 南宁 530000; 2. 西南大学 资源环境学院
三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400716; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所
黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 4. 重庆市水利电力建筑勘测设计研究院, 重庆 400015)

摘要:土壤入渗性能是土壤侵蚀研究的热点内容,其值受土壤理化性质的影响较大。为了准确测得紫色土区不同土地利用类型土壤入渗性能,采用一种新方法——点源入渗法对其进行测定,并对不同土地利用类型土壤入渗性能与其理化性质进行了相关性分析。结果表明:(1)不同土地利用类型土壤理化性质差异性较大,土壤初始含水率、非毛管孔隙度、毛管孔隙度、 >0.25 mm 团聚体含量和有机质含量基本上是表层土大于下层土;(2)不同土地利用类型土壤入渗性能差异较大,初渗速率和平均入渗率大小基本表现为林地 $>$ 坡耕地 $>$ 草地,稳渗速率则为坡耕地 $>$ 林地 $>$ 草地,达到稳渗时间为坡耕地 $>$ 林地 $>$ 草地;(3)初渗速率与湿筛 MWD 值和结构破坏率呈显著正相关,与毛管孔隙度呈显著负相关;(4)稳渗速率与非毛管孔隙度呈显著正相关,与容重呈显著负相关;(5)平均入渗率与非毛管孔隙度和结构破坏率呈正相关,其相关系数较大,与土壤容重和毛管孔隙度呈负相关,其相关系数绝对值较大。本研究可为紫色土区土壤入渗的研究提供理论依据。

关键词:土壤入渗性能;点源入渗法;不同土地利用类型;土壤理化性质;相关性

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)01-0013-05

Research on Soil Infiltration Capacity and Its Influencing Factors in Different Land Uses

MO Bin¹, CHEN Xiaoyan^{2,3}, YANG Yicui¹, LUO Banglin², TANG Ju²,
GONG Chunming⁴, LIN Zhihang¹, ZHOU Tujin¹, SHEN Yunkang¹

(1. *Guangxi Communication Planning Surveying and Designing Institute, Nanning, Guangxi 530000, China;*
2. *Key Laboratory of Ecoenvironments in Three Gorges Region, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China;* 3. *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China;*
4. *Chongqing Surveying and Design Institute of Water Resources Electric Power and Architecture, Chongqing 400015, China*)

Abstract: Soil infiltration capacity is the hotspot topic of soil erosion studies, and soil physicochemical properties have great influence on it. A new infiltration method, point-source infiltration method, was used to precisely evaluate the infiltration capacity in different purple soil land uses. And correlation analysis on soil physicochemical properties and soil infiltration capacity of different land uses was performed. Results showed that: (1) there is a large difference among soil physicochemical properties in different land uses, soil water content, non-capillary porosity, capillary porosity, content of >0.25 mm aggregate and organic matter content in the topsoil are greater than those in the subsoil; (2) soil infiltration capacity showed differences among different land uses. Land uses showed great effects, in general, initial infiltration rate and average infiltration rate decreased in the order: woodland slope $>$ slope cropland $>$ grassland, steady infiltration rates decreased in the order: slope cropland $>$ woodland $>$ grassland, and the time reaching stable state decreased in the order: slope cropland $>$ woodland $>$ grassland; (3) correlation analysis showed that there was a significantly positive correlation between initial infiltration rate and wet sieve MWD value and structure damage rate, and it had a significantly negative

correlation with capillary porosity; (4) steady infiltration rate and non-capillary porosity showed the significantly positive correlation, and it had a significantly negative correlation with the soil bulk density; (5) the average infiltration rate and non-capillary porosity and structure damage rate showed a positive correlation, and the correlation coefficient is large, and there was a negative correlation between average infiltration rate and soil bulk density and capillary porosity, the absolute value of correlation coefficient is relatively large. The results of this research can provide the theoretical basis for soil infiltration study in purple soil area.

Keywords: soil infiltration capacity; point-source infiltration method; different land uses; soil physicochemical properties; correlation

土壤侵蚀可破坏耕地,制约着农业经济的发展,是对生态环境构成威胁的全球性灾害之一^[1-2]。而土壤入渗是分析和表征土壤侵蚀过程的重要参数^[3-4],也是土壤水分循环的重要环节。紫色土区是我国土壤侵蚀最严重的区域之一,因而对该区不同土地利用类型土壤入渗性能进行研究意义重大。土壤入渗性能的测定方法较多,如双环法^[5-7]、环刀法^[8-10]、单圈入渗法^[11-12]、圆盘入渗法^[13-15]等。点源入渗法具有省时、省水、准确性高等优点^[16],但其在紫色土区土壤入渗方面的研究还没有报道。本试验就此问题对该区不同土地利用类型土壤入渗性能进行测定,以准确获取该区不同土地利用类型土壤入渗规律。加之影响土壤入渗的因素较多,其中土壤理化性质是主要影响因子之一。诸多研究者^[17-19]发现土壤入渗性能与土壤容重、土壤团聚体、有机质、孔隙度等理化性质密切相关。不同土地利用类型土壤理化性质差异很大,从而造成其土壤入渗性能的差异也显著。为了探索不同土地利用类型土壤理化性质及其入渗性能之间相关性,通过回归分析得出土壤理化性质各项指标与土壤入渗性能之间的权重关系。以期对紫色土区农业可持续发展、土壤入渗以及土壤理化性质与之相关性等研究提供资料参考。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

本试验所在地为西南大学后山试验基地,地理坐标为 106°24'E,29°48'N,海拔 268 m。该区属亚热带季风湿润气候区,多年平均气温约 18℃,多年平均降雨量约 1 089.8 mm,降雨季节分配不均,5—9 月为雨季,降雨量占全年的 70%。在试验区选择坡度相近(约 5°)的样地共 3 块,其高差在 20 m 以内,样地分布从坡上到坡下依次为:林地、坡耕地和草地。

1.2 试验设备

试验所用设备包括点源入渗仪(由水泵、计算机、相机、水桶等组成)、铁铲、铝盒、环刀、削土刀、温度计、秒表、漏斗等。

1.3 试验测定方法

点源入渗法在紫色土区作为一种新方法,其测定

原理及步骤^[16]如下:

(1) 水泵为恒定流量供水装置,转速范围为 0~100 r/min,可供水流量范围为 0~3.45 ml/min,通过调节水泵转速来控制恒定的供水流量大小。本研究设计供水流量为 2 L/h;(2) 数码相机用于记录供给水流在地表土壤上湿润面积随时间变化的过程,用于估算耕层土壤初始较高的入渗性能;(3) 计算机软硬件组成为笔记本及计算数字图像的软件,试验过程中经照相机拍摄的数字图像导入计算机,并经数字图像软件处理提取出水流在地面推进的湿润区域面积,继而计算出土壤入渗速率。

当用一定流量向地表供水时,初渗速率较大,对应的湿润地表面积较小。随着入渗过程的推进,土壤入渗性能不断降低,当湿润区域耕层内一定面积土壤含水量基本达到饱和时,土壤入渗过程转为由犁底层入渗能力控制,当湿润面积达到一定值,其入渗率基本保持不变。采取数值计算方法求其近似解,选择较小的时间间隔即较小的面积增量步长,在各时段以及面积增量段内,取入渗的平均值,可以递推得到 $i(t)$ 的数值近似估计值。

设不同测量时段 $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n$ 内地表湿润面积的增量分别为 $\Delta A_1, \Delta A_2, \dots, \Delta A_n$,所对应的水平投影面积为 $\Delta A_1 \cos \alpha, \Delta A_2 \cos \alpha, \dots, \Delta A_n \cos \alpha$,则 t_n 时刻水量平衡计算公式如下:

$$q'_n = i_n \Delta A_1 \cos \alpha + i_{n-1} \Delta A_2 \cos \alpha + \dots + i_1 \Delta A_n \cos \alpha \quad (1)$$

由公式(1)可得 t_n 时刻的入渗率为:

$$i_n = \frac{q'_n - \sum_{j=1}^{n-1} i_{n-j} \Delta A_{j+1} \cos \alpha}{\Delta A_1 \cos \alpha} \quad (n=2,3,\dots) \quad (2)$$

式中: i_n —— t_n 时刻的土壤入渗率,也代表第 n 时段的平均入渗率(mm/h); ΔA_n ——时段($t_n - t_{n-1}$)内地表湿润面积的增量(mm²); i_{n-j} —— t_{n-j} 时刻的土壤入渗率,也代表第 $(n-j)$ 时段的平均入渗率(mm/h); ΔA_{j+1} ——第 $(j+1)$ 时间段内水流在地表的湿润面积的增加量(mm²)。

选好样地后,将地面杂物清理干净,并调好供水流量和相机采集照片间隔时差(本试验设定为 3 min/张),安装好仪器;标定完毕后,同时按下水泵开

关及计算机开始试验按钮;试验结束后关掉水泵,收好相机,在电脑上计算出试验入渗过程数据。

每种土地利用类型重复 3 次试验,并尽量在相同时段内进行。入渗试验开始前在样地用环刀分层采集原状土,试验结束后带回室内测定土壤孔隙度、容重等物理性质。并采用“网格法”采集混合土样,每种土地利用类型采集 9 个小土样,每 3 个小土样混合成 1 个土样,共记 3 个土样。试验结束后带回室内风干,一半过 1 mm 筛,以测定其机械组成、微团聚体和有机质,另一半不过筛,用于测定大团聚体以及其水

稳性。本试验于 2014 年 3 月初至 4 月底完成。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型土壤理化性质

土壤入渗性能受诸多因素的影响,而土壤理化性质是表征土壤本质特性的指标,故为主要影响因子之一。因此,分析紫色土区不同土地利用类型土壤理化性质的差异性深入研究土壤入渗性能的前提,也是揭示土壤入渗性能差异的内在机理。研究区不同土地利用类型土壤理化性质见表 1。

表 1 不同土地利用类型土壤理化性质

土地利 用类型	土层 厚度/cm	容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	初始 含水量/%	非毛管孔 隙度/%	毛管孔 隙度/%	>0.25 mm 团聚体含量/%	有机质 含量/%	湿筛 MWD 值	结构破 坏率/%
林地	0—20	1.33	21.74	8.74	50.23	48.51	9.01	1.28	81.41
	20—40	1.32	19.53	6.93	46.98	48.09	6.77	0.87	75.10
草地	0—20	1.45	23.67	4.33	52.11	52.03	11.35	0.78	34.11
	20—40	1.52	21.89	2.33	47.30	50.23	7.46	0.83	44.34
坡耕地	0—20	1.31	25.03	10.68	51.35	52.95	20.79	0.92	40.73
	20—40	1.47	20.63	9.18	45.49	53.24	11.65	0.67	43.86

从表 1 可以看出,不同土地利用类型土壤理化性质差异性较大。土壤容重中,表层 0—20 cm 以草地最大,林地次之,坡耕地最小,草地分别比林地和坡耕地大 9.02% 和 10.68%;而 20—40 cm 则以草地最大,坡耕地次之,林地最小,草地分别比林地和坡耕地大 15.15% 和 3.40%。这是由于坡耕地表层土(耕层)前期耕作容易引起疏松,而耕层以下土壤容重较林地大是坡耕地常受踩踏等地表压力作用下所致。

初始含水率中,0—20 cm 比 20—40 cm 均要大,这是因为试验所在地属亚热带季风湿润气候区,常年地表湿度较大(特别是春、冬两季),因而其初始含水率较下层土大;3 种土地利用类型以坡耕地最大,草地次之,林地最小,其 0—20 cm 和 20—40 cm 分别比林地和草地的大 15.13%,5.74% 和 12.08%,6.11%。这是由于坡耕地为作物生长区,人为浇水所造成,草地郁闭度大,保水性能好,蒸散发较小,因而其含水率较高。本结果与刘春利等^[20]的研究结论相似。非毛管孔隙度中以坡耕地最大,林地次之,草地最小,其 0—20 cm 和 20—40 cm 分别比林地和草地的大 22.19%,146% 和 32.46%,293%;这是因为坡耕地受人为耕作影响最大,林地根系较草地发达,因而它们的非毛管孔隙度相对较大。毛管孔隙度则相反,以草地最大,林地次之,坡耕地最小(其表层较林地的大主要是因其含水率较高)。而 >0.25 mm 团聚体含量中,以坡耕地最大,草地次之,林地最小,其 0—20 cm 和 20—40 cm 分别比林地和草地的大 9.15%,17.37% 和 10.71%,5.99%;这是由于坡耕地受人为施肥等活动影响所致,草地则是因其诸多小根系作用及土壤动物活动而造成。有机质含量

也是呈坡耕地最大,草地次之,林地最小的规律,其 0—20 cm 和 20—40 cm 分别比林地和草地的大 131%,83.17% 和 72.08%,56.17%,其原因与 >0.25 mm 团聚体含量的基本一致。湿筛 MWD 值基本以林地最大,草地次之,坡耕地最小。结构破坏率则以林地最大,坡耕地次之,草地最小,其 0—20 cm 和 20—40 cm 分别比草地和坡耕地的大 47.30%,40.68% 和 30.76%,31.24%;这主要与土壤的有机质及团聚体含量有关^[21]。

2.2 不同土地利用类型土壤入渗性能结果

初始入渗率、稳定入渗率和平均入渗率是评价土壤入渗中最常用的 3 个指标^[22-23]。由于不同土地利用类型土壤入渗性能之间有较大差异,为了更好地表述这种差异,将 3 组重复试验结果取平均值进行比较分析以得出相应结论。如表 2 所示,初渗速率采用第 1 分钟时的入渗率表示,稳渗速率为土壤入渗达到稳定值时的入渗率,平均入渗率则是一定时间内土壤水分入渗总量与时间的比值。

由表 2 可知,不同土地利用类型间测得的土壤入渗性能差异较大。初渗速率中,其值呈现林地最大,坡耕地次之,草地最小;相差最大为 77.72%(林地与草地),相差最小为 28.19%(草地与坡耕地)。这与刘芝芹^[10]、张治伟^[24]等的研究结果有所差异,原因可能是不同区域土壤质地差别较大。第 20 分钟入渗率中,相较于初渗率以林地下降幅度最大(平均下降 26.56 倍),草地次之(平均下降 21.98 倍),坡耕地最小(平均下降 15.93 倍)。这主要是由于坡耕地土壤结构较好,其土壤理化性质除容重外均比林地和草地的大,林地下降最大可能源于其初始含水率最小,而

且土壤团聚体结构最不稳定。稳渗速率中,其数值表现为坡耕地最大,林地次之,草地最小;相差最大为 42.85%(草地与坡耕地),相差最小为 12.36%(林地与坡耕地)。这主要由于坡耕地前期耕作使其土壤结构较好,林地根系较草地根系活动深入,而稳渗速率与土壤犁底层结构密切相关,故其土壤稳渗速率相对较大。平均入渗率中,其数值表现为林地最大,坡耕地次之,草地最小;相差最大为 53.66%(林地与草地),相差最小为 8.62%(林地与坡耕地)。这主要由

表 2 不同土地利用类型土壤入渗性能结果

土地利用类型	初渗速率/ (mm·min ⁻¹)	第 20 分钟入渗率/ (mm·min ⁻¹)	稳渗速率/ (mm·min ⁻¹)	平均入渗速率/ (mm·min ⁻¹)	稳渗 时间/min
林地	11.72	0.42	0.30	1.26	54
草地	6.60	0.29	0.23	0.82	52
坡耕地	8.46	0.63	0.33	1.16	57

表 3 土壤入渗性能与其理化性质相关性结果

入渗指标	土壤容重	初始含水率	非毛管孔隙度	毛管孔隙度	>0.25 mm 团聚体含量	有机质含量	湿筛 MWD 值	结构破坏率
初渗速率	-0.689	-0.705	0.555	-0.999*	-0.845	-0.339	0.995*	0.972*
稳渗速率	-0.962*	-0.301	0.994*	-0.503	0.083	0.677	0.377	0.242
平均入渗率	-0.940*	-0.316	0.867	-0.914	-0.518	0.116	0.849	0.766

注:*表示相关性在 0.05 水平上显著。

由表 3 可知,不同土地利用类型土壤入渗性能与其理化性质相关性系数差异较大,因而其影响权重有较大差别。初渗速率与土壤的非毛管孔隙度、湿筛 MWD 值和结构破坏率呈正相关,其中与后两者为显著正相关;初渗速率与土壤容重、初始含水率、毛管孔隙度、>0.25 mm 团聚体含量以及有机质含量呈负相关,其中与毛管孔隙度为显著负相关;这可能是当供水接触到地表时便直接沿地表非毛管孔隙进入土壤,与其他土壤理化性质间响应关系较小。稳渗速率与非毛管孔隙度、>0.25 mm 团聚体含量、有机质含量、湿筛 MWD 值和结构破坏率呈正相关,其中与非毛管孔隙度为显著正相关,其次与有机质含量相关系数较大;稳渗速率与土壤容重、初始含水率、毛管孔隙度和干筛 MWD 值呈负相关,其中与容重呈显著负相关;这是由于稳渗速率为后期土壤入渗速率,既与表层土壤非毛管孔隙度有关,也与下层(犁底层)土壤结构有关,因而除容重、初始含水率及毛管孔隙度外与其他土壤理化性质均呈正相关。平均入渗率与非毛管孔隙度、有机质含量、湿筛 MWD 值和结构破坏率呈正相关,其相关系数以非毛管孔隙度和结构破坏率的较大;平均入渗率与土壤容重、初始含水率、毛管孔隙度、>0.25 mm 团聚体含量和干筛 MWD 值呈负相关,其相关系数绝对值以土壤容重和毛管孔隙度较大;这是因为平均入渗率贯穿整个入渗过程,其表示的是土壤入渗性能的综合平均指标,因而平均入渗

于林地前期入渗速率较大,加之此指标为整个人渗过程的均值。稳渗时间中,以坡耕地最长,林地次之,草地最小,但三者相差不大,相差最大不超过 10%。

2.3 不同土地利用类型土壤入渗性能与其理化性质相关性

土壤入渗性能受土壤自身理化性质影响较大,但不同理化性质指标对其影响权重有所差异。将不同土地利用类型土壤理化性质与其入渗性能用 SPSS 软件回归分析得到其相关性,结果见表 3。

率与土壤理化性质的相关性较初渗速率和稳渗速率与土壤理化性质的相关性差别大。本试验结果与前人^[25-26]研究结论基本一致。

3 讨论与结论

3.1 讨论

点源法在紫色土区的应用研究尚未见有报道,但因其具有使用方便、精度高等优点,将其应用于紫色土区土壤入渗的测定会有较好的效果,但也需通过选取样地避开特殊地点(路边、坑洼等)及测定时段等减少试验误差。

本试验在野外测定土壤入渗性能,而该方法在野外的应用研究较少,需逐步探索性进行。加上土壤入渗影响因子较多,不能将其全部罗列,而试验数量有限。况且不同土地利用类型土壤理化性质差异较大,而同一种土地利用类型其理化性质也有一定差异,因而对入渗影响因素权重分析时,不能对单一变量进行较好控制,所以采取均值法代替,因而试验结果有一定误差,还需进一步完善及更深入的研究。

3.2 结论

土壤水分入渗一直是土壤水运动研究的热点内容,紫色土区关于土壤入渗的研究较多,但由于研究方法及区位等不一致,得出的结果也不尽相同^[27-28]。本试验采用点源入渗法测定不同土地利用类型土壤入渗性能,并对试验结果进行分析和比较,得到以下结论:

(1) 初始含水率、非毛管孔隙度、毛管孔隙度、 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体含量和有机质含量基本为表层 $0\text{—}20\text{ cm}$ 大于下层 $20\text{—}40\text{ cm}$ 的。土壤容重中,以草地数值最大,林地与坡耕地相当。初始含水率中,以坡耕地最大,草地次之,林地最小。非毛管孔隙度中,以坡耕地最大,林地次之,草地最小,毛管孔隙度则与之相反。而 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体含量中,以坡耕地最大,草地次之,林地最小,有机质含量大小规律与之一致,湿筛 MWD 值则与之相反。结构破坏率则以林地最大,坡耕地次之,草地最小。

(2) 初渗速率值以林地最大,坡耕地次之,草地最小,平均入渗率表现规律与之一致。第 20 分钟入渗率中,相较于初渗速率以林地下降幅度最大(平均下降 26.56 倍),草地次之(平均下降 21.98 倍),坡耕地最小(平均下降 15.93 倍)。稳渗速率值表现为坡耕地最大,林地次之,草地最小;达到稳渗时间中,以坡耕地最长,林地次之,草地最小。

(3) 初渗速率与湿筛 MWD 值和结构破坏率呈显著正相关,与毛管孔隙度为显著负相关;稳渗速率与非毛管孔隙度为显著正相关,其次是有机质含量,与容重呈显著负相关;平均入渗率与非毛管孔隙度和结构破坏率的正相关系数较大,与土壤容重和毛管孔隙度负相关系数绝对值较大。

本文对研究区不同土地利用类型土壤入渗性能结果进行了比较,并与土壤理化性质进行相关性分析,得出不同土地利用类型土壤入渗性能的差异性和影响入渗因子的权重,可以为紫色土区土壤入渗的研究提供理论帮助。

参考文献:

- [1] 雷廷武,张晴雯,闫丽娟. 细沟侵蚀物理模型[M]. 北京: 科学出版社,2009.
- [2] 郑永春,王世杰,欧阳自远. 地球化学示踪在现代土壤侵蚀研究中的应用[J]. 地理科学进展,2002,21(5):507-516.
- [3] 方胜. 喀斯特坡地土壤稳渗率空间变化特征研究[D]. 北京:中国科学院大学,2013.
- [4] 毛天旭,朱元骏,邵明安,等. 模拟降雨条件下含砾石土壤的坡面产流和入渗特征[J]. 土壤通报,2011,42(5):1214-1217.
- [5] 赵景波,张慧慧,马淑苗. 青海湖沙柳河镇南部土壤入渗规律[J]. 山地学报,2013,31(6):693-700.
- [6] 安传志,曲亚辉. 河北太行山片麻岩山地不同植被下土壤水分入渗特征[J]. 河北林业科技,2013(5):14-15.
- [7] 肖庆礼,黄明斌,邵明安,等. 黑河中游绿洲不同质地土壤水分的入参与再分布[J]. 农业工程学报,2014,30(2):124-131.
- [8] 秦华军,何丙辉,赵旋池,等. 西南喀斯特山地林下经济模式对土壤渗透性的影响[J]. 中国生态农业学报,2013,21(11):1386-1394.
- [9] 李建兴,何丙辉,谌芸. 不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响[J]. 生态学报,2013,33(5):1535-1544.
- [10] 刘芝芹,黄新会,王克勤. 金沙江干热河谷不同土地利用类型土壤入渗特征及其影响因素[J]. 水土保持学报,2014,28(2):57-62.
- [11] 李晓静,胡振琪,张国强,等. 西南山区采煤塌陷地破坏水田土壤水分特征分析[J]. 煤矿开采,2011,16(6):48-50.
- [12] 陈亚凯,邵芳,乔志勇,等. 黄河泥沙充填复垦耕地表层土壤垂直入渗特性研究[J]. 中国生态农业学报,2014,22(7):798-805.
- [13] 刘建伟,陈洪松,张伟,等. 盘式入渗仪法测定喀斯特洼地土壤透水性研究[J]. 水土保持学报,2008,22(6):202-206.
- [14] 陈世平,李毅,付秋萍,等. 不同含盐土壤圆盘入渗特征试验[J]. 农业工程学报,2010,26(4):36-41.
- [15] 李晓峰,何武全. 利用圆盘入渗仪测定土壤水动力参数的入渗特征试验研究[J]. 灌溉排水学报,2010,29(5):68-72.
- [16] 孙蓓,马玉莹,雷霆武,等. 农地耕层与犁底层土壤入渗性能的连续测量方法[J]. 农业工程学报,2013,29(4):118-124.
- [17] 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.
- [18] 黄茹,黄林,何丙辉,等. 三峡库区不同林草治理措施下土壤入渗特征研究[J]. 西南大学学报:自然科学版,2013,35(8):119-126.
- [19] 姜艳丽. 土壤团聚体水稳定性对水分运动过程影响的试验研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [20] 刘春利,邵明安. 六道沟流域典型坡面不同土地利用方式下土壤水分动态变化研究[J]. 中国生态农业学报,2006,14(4):54-56.
- [21] 董莉丽. 不同土地利用类型下土壤水稳性团聚体的特征[J]. 林业科学,2011,47(4):95-100.
- [22] 倪含斌,张丽萍. 神东矿区堆积弃土坡地入渗规律试验研究[J]. 水土保持学报,2007,21(3):28-31.
- [23] 朱兵兵,张平仓,王一峰,等. 长江中上游地区土壤入渗速率的空间分异研究[J]. 长江科学院院报,2006,23(6):32-35.
- [24] 张治伟,朱章雄,王燕,等. 岩溶坡地不同利用类型土壤入渗性能及其影响因素[J]. 中国生态农业学报,2010,26(6):71-76.
- [25] 胡建朋,杨吉华,罗明达,等. 山东石灰岩山地不同林分类型土壤入渗特征研究[J]. 水土保持学报,2011,25(3):54-58.
- [26] 徐小军. 汶川地震区新生水土流失对土壤与植被的影响[D]. 重庆:西南大学,2012.
- [27] 王文德. 三峡库区森林土壤入渗特征研究[D]. 武汉:华中师范大学,2013.
- [28] 刘承,王玉宽,傅斌,等. 紫色土不同土地利用方式下降雨入渗试验研究[J]. 水土保持研究,2009,13(3):20-23.