不同恢复年限弃渣场入渗特征研究与评价

李叶鑫^{1,2},史东梅²,吕刚¹,林姿²

(1. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院,辽宁 阜新 123000;2. 西南大学资源环境学院,重庆 400715)

摘要:为分析弃渣场入渗性能及其植被恢复效应,采用野外双环入渗和主成分分析方法,分析和评价不同恢复年限弃渣场入渗特征。结果表明:(1)弃渣场恢复年限2个月(P1),2a(P2),4a(P3)和桑树林地(P4)的初始入渗率依次为11.32,9.34,15.84,19.38 mm/min,稳定入渗率为4.64,3.62,6.71,7.81 mm/min;桑树林地的稳定入渗率为3个弃渣场的1.68,2.16,1.16倍;(2)Kastiakov模型的拟合效果优于通用经验模型、Philip模型和 Horton模型,其决定系数为0.905~0.956;(3)入渗特征值与土壤容重,20~5 mm,5~2 mm颗粒含量呈显著负相关(p<0.05),与非毛管孔隙度、有机质含量和2~0.075 mm颗粒含量呈显著(p<0.05)或极显著(p<0.01)正相关;(4)主成分分析评价的土壤入渗能力排序依次为P4(2.398)>P3(0.792)>P1(-1.104)>P2(-2.089);随着恢复年限的增加,弃渣场入渗性能得到较好的改善且接近桑树林地。

关键词:弃渣场;入渗特征;植被恢复;林地;重庆市

中图分类号:S152.7 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2017)03-0091-05 DOI:10.13870/j. cnki. stbcxb. 2017. 03. 016

Research and Evaluation on Infiltration Characteristics of Dumps with Different Restoration Ages

LI Yexin^{1,2}, SHI Dongmei², LÜ Gang¹, LIN Zi²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000;
2. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715)

Abstract: In order to analyze the infiltration characteristics and the effects of vegetation restoration of dumps, infiltration characteristics of dumps with different restoration ages were studied and evaluated by using field double-ring infiltration and principal component analysis method. The results indicated that: (1) The initial infiltration rate of two-month (P1), two-years (P2), four-years (P3) dump and mulberry land (P4) was 11.32, 9.34, 15.84, and 19.38 mm/min, respectively; the stable infiltration rate was 4.64, 3.62, 6.71, and 7.81 mm/min, respectively. The stable infiltration rate of mulberry land was 1.68, 2.16, and 1.16 times greater than that of the other three dumps, respectively. (2) The fitting effect of Kastiakov model was better than that of the common empirical infiltration model, the Philip model, and the Horton model, with the determination coefficient ranging from 0.905 to 0.956. (3) The eigenvalues of soil infiltration had significantly negative correlations with soil bulk density, and 20-5 mm and 5-2 mm gravel content, but showed significantly or very significantly positive correlations with non-capillary porosity, organic matter content, and 2-0.075 mm soil particle content. (4) Soil infiltration capacity was evaluated by principal component analysis, and was in the order of P4 (2.398) > P3 (0.792) > P1 (-1.104) > P2 (-2.089). The infiltration capacity of dump was improved with the increasing restoration ages, and was close to that of the mulberry land.

Keywords: dump; infiltration characteristics; vegetation restoration; forest land; Chongqing City

随着社会经济的快速发展,生产建设活动的种类 与数量日益增多,不仅开挖、扰动原地貌,破坏植被, 而且产生的弃土弃渣已成为生产建设项目水土流失 的主要策源地^[1-2]。弃渣场具有坡度陡、物质组成复 杂、结构松散、渗透能力强、养分含量低等特性^[3-4],在降雨和地表径流冲刷下易发生严重的水土流失^[5-7]。

土壤水分入渗是指水分进入土壤形成土壤水的过程,它是降水、地面水、土壤水和地下水相互转化的一

收稿日期:2016-11-25

资助项目:重庆市水利局科技项目"重庆市生产建设项目水土流失危害研究"(2012),"生产建设项目弃土弃渣水土流失规律研究"(2011) 第一作者:李叶鑫(1989—),男,辽宁阜新人,博士研究生,主要从事工矿区水土保持与生态修复研究。E-mail:liyexin2008@126.com 通信作者:吕刚(1979—),男,吉林九台人,博士,副教授,主要从事土壤侵蚀与土壤水文学教学和研究。E-mail:lvgang2637@126.com

个重要环节[8],其入渗过程和入渗能力决定了地表径 流的大小进而影响土壤侵蚀过程。于亚莉等^[9]采用双 环入渗法研究了弃渣场平台和边坡的入渗特征,结果 表明弃渣场平台稳定入渗率在 1.13~4.75 mm/min 之间,边坡稳定入渗率在 1.64~8.21 mm/min 之间。 李叶鑫等[4]采用环刀法研究了不同碎石含量弃土弃渣 的入渗特征,认为40%碎石含量的弃土弃渣初始入渗 率、稳定人渗率和平均入渗率是土质弃渣的 1.30, 1.13,1.45倍。倪含斌等[10]采用人工模拟降雨试验研 究了不同时间堆积弃土的入渗规律,结果表明,新堆积 弃土入渗率要明显高于原状土,达到稳定入渗时间要 比原状土长;随着堆积时间的延长,稳定入渗率逐渐下 降到原状土水平。Peng 等^[11]研究表明,不同年限弃渣 场的稳定入渗率在 1.64~2.89 mm/min 之间,为天然 林地(6.22 mm/min)的 26.37%~46.46%。然而,由 于弃渣场下垫面条件明显不同于原地貌,其入渗一径 流过程具有特殊性。赵骍等[12]、郭宏忠等[13]认为弃渣 场具有较高的入渗能力,但与森林土壤有着本质区别。 因此,本文以不同恢复年限弃渣场和桑树林地为研究 对象,采用双环入渗法研究弃渣场入渗过程与入渗特 征,揭示弃渣场与林地之间的差异性,从入渗角度评价 弃渣场的恢复程度与恢复能力,以期为弃渣场水土保

持措施布置和生态恢复与植被重建提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市北碚区水土镇,地理坐标东经 106°26′,北纬 30°26′,海拔 230 m,年平均气温 18.3 ℃,年降雨量 1 105.4 mm,5—9 月的降雨量占全年 的 70%。在水土镇某城镇建设项目区内选择 3 个来 源相同的典型弃渣场为研究对象,弃渣场恢复年限分 别为 2 个月(P1),2 a(P2)和4 a(P3),弃土弃渣为中 生代侏罗纪沙溪庙组砂泥岩母质及其发育而成的紫 色土,植被恢复均以草本为主,主要植被有蕨类、狗尾 草、宽叶台草等。项目区林木只有桑树林地,因此选 取桑树林地(P4)为对照,样地基本情况见表 1。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤理化性质测定 试验于 2014年5月进行。按5点取样法采集弃渣场平台和桑树林地内 0—20 cm 土壤样品和5 kg 混合散样。采用 GZS-1 高频振筛器测定土壤颗粒组成(0~60 mm),土壤筛 孔径为60,40,20,10,5,2,1,0.5,0.25,0.1,0.075 mm,采用烘干法(105 ℃)测定土壤含水率,采用环刀 法测定土壤容重和孔隙度,采用重铬酸钾外加热法测 定土壤有机质。具体结果见表1。

表 1 弃渣场和林地基本情况及土壤理化性质

长星			形态特征			土壤理化性质					
竹吧 ·	恢复	弃渣量/	坡长/	坡度/	植被	容重/	土壤	总孔隙度/	毛管孔隙度/	有机质/	
编写	年限	万 m^3	m	(°)	覆盖度/%	$(g \cdot cm^{-3})$	含水率/%	%	%	$(g \cdot kg^{-1})$	
P1	2 个月	8.5	19.0	39.1	10	$1.49 \pm 0.04 ab$	8.39±1.06c	44.67±1.16ab	$31.66 {\pm} 0.60 \mathrm{c}$	$1.29 \pm 0.48c$	
P2	2 a	5.5	22.1	40.6	40	$1.58 \pm 0.09a$	14.23±2.45a	41.93±2.80b	36.47±1.81b	$2.53 \pm 0.39 d$	
P3	4 a	10.0	23.1	37.3	90	$1.32\!\pm\!0.16\mathrm{b}$	$10.90\!\pm\!1.33\mathrm{b}$	50.50±5.30a	34.65±1.92b	$4.57 \pm 0.81 \mathrm{b}$	
P4	_	—	_	—	95	$1.34\pm0.13b$	15.61±0.59a	49.62±4.20a	39.26±1.00a	6.04±0.79a	

注:"一"表示无数据;同列不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同。 1.2.2 土壤入渗特征测定 采用野外双环入渗法测 档

1.2.2 王壤入渗特征测定 米用野外双环入渗法测 定弃渣场和桑树林地土壤入渗率。双环入渗仪的内 环直径为15 cm,外环直径为30 cm,水头高为5 cm。 试验10 min 内每2 min 记录1次加水量,10 min 后 每5 min 记录1次,直到稳定入渗为止。初始入渗率 为最初入渗量与最初入渗时间(2 min)的比值,稳定 入渗率为入渗量趋于稳定时的入渗速率,平均入渗率 为达到稳渗时的入渗总量与达到稳渗时间的比值,稳 透总量为试验过程中入渗量与内环横截面积的比值。 每个弃渣场和林地均为3个重复。由于各弃渣场入 渗试验并未在同一时间进行,在计算入渗速率时需要 对水温进行校正。弃渣场入渗速率计算公式为:

$$V = \frac{10Q_n}{ST_n} \tag{1}$$

式中:V为弃渣场和林地在某一时刻土壤入渗率(mm/min);Q,为第 n 次测定时间内的加水量(mL);S 为内环

横截面积(cm^2); T_n 为第 n 次测定时间间隔(min)。

1.2.3 土壤入渗评价 选取单一的入渗指标来评价 弃渣场的入渗能力具有一定的偶然性和片面性,不能 准确地反映弃渣场的入渗能力,故采用主成分分析来 评价弃渣场的入渗能力。主成分分析多用于从多个 实测的原变量中提取少数、互不相关、抽象的综合指 标以达到对分析对象定性评价的作用。本文选取初 始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率和渗透总量进行 主成分分析。

2 结果与分析

2.1 弃渣场和林地土壤入渗特征

土壤渗透性大小通常用初始入渗率、稳定入渗 率、平均入渗率和渗透总量来评价^[10]。由表 2 和图 1 可知,由于堆弃年限和植被恢复状况不同,各个弃渣 场下垫面的入渗能力存在较大差异,各弃渣场初始入 渗率、稳定入渗率、平均入渗率等入渗性能指标均小 于林地,其大小表现为P4>P3>P1>P2。各样地的 初始入渗率大小依次为P4(19.38 mm/min)>P3 (15.84 mm/min)>P1(11.32 mm/min)>P2(9.34 mm/min),桑树林地的初始入渗率分别为弃渣场的 1.71,2.07,1.22 倍;稳定入渗率大小依次为P4 (7.81 mm/min)>P3(6.71 mm/min)>P1(4.64 mm/min)>P2(3.62 mm/min),桑树林地的稳定入渗 率分别为弃渣场的1.68,2.16,1.16 倍;平均入渗率大小 依次为P4(10.09 mm/min)>P3(7.82 mm/min)>P1 (5.73 mm/min)>P2(4.51 mm/min),桑树林地的平均 人渗率大小分别为弃渣场的 1.76,2.24,1.29 倍;渗透总量大小依次为 P4(908.53 mm)>P3(704.24 mm)>P1(515.52 mm)>P2(406.02 mm),桑树林地的渗透总量分别为弃渣场的 1.76,2.24,1.29 倍。3 个弃渣场土壤入渗特征值差异显著,入渗能力表现为 P3>P1>P2。与 P1 和 P2 相比,P3 入渗能力最接近桑树林地,说明随着堆弃年限的增加,弃渣场入渗能力得到较好的改善。P1 入渗能力大于 P2,这是由于 P1 土壤容重小于 P2,土石、砾石之间存在较大孔隙,且 P1 为刚刚形成的弃渣场,植被对弃渣场土壤结构的改善效果不明显。

表 2 不同恢复年限弃渣场和林地土壤入渗特征

样地	初始入渗率/	初始入渗率	稳定入渗率/	稳定人渗率	平均入渗率/	平均人渗率	渗透总量/	渗透总量
编号	$(mm \cdot min^{-1})$	比值	$(mm \cdot min^{-1})$	比值	$(mm \cdot min^{-1})$	比值	mm	比值
P1	$11.32 \pm 3.42c$	1.71	4.64±1.11c	1.68	$5.73 \pm 1.09c$	1.76	$515.52 \pm 83.58c$	1.76
P2	9.34 \pm 2.85d	2.07	$3.62 \pm 1.16d$	2.16	4.51 \pm 1.11d	2.24	406.02±88.39d	2.24
P3	$15.84 \pm 3.04 \mathrm{b}$	1.22	6.71±1.14b	1.16	$7.82 \pm 1.19 \mathrm{b}$	1.29	704.24 \pm 81.41b	1.29
P4	19.38±1.98a	1.00	7.81±1.24a	1.00	$10.09 \pm 1.53 a$	1.00	908.53±80.65a	1.00

注:比值为桑树林地 P4 数值与弃渣场 P1、P2、P3 数值的比值。



2.2 弃渣场和林地土壤入渗过程模拟

土壤水分入渗是一个随入渗时间延长而逐渐衰 减的过程。在入渗初期弃渣场和林地土壤入渗率较 大,随着土壤饱和度的增大,土壤入渗率不断减小, 直到达到稳定入渗率。由表3可知,各样地回归模型 的拟合优度存在差异,Kastiakov模型、通用经验模 型、Philip模型、Horton模型拟合的决定系数分别为

 $0.905 \sim 0.956, 0.880 \sim 0.954, 0.868 \sim 0.910, 0.845 \sim$ 0.944。Kastiakov 模型是幂函数模型,参数 a 和 b 是通 讨试验数据拟合而来。其中 a 为经验入渗系数,在数值 上近似等于前 2 min 的入渗速度,a 值越大,初始入渗率 越大;b为经验入渗指数,反映土壤入渗能力的衰减速 度,b值越大,衰退速度越快^[14]。P1、P2、P3的a值分别 为 11. 398,11. 069,14. 912,这与初始入渗率的大小关系 相一致。a 值大小不仅与表层土壤初始含水率有关, 而且还与土壤结构和土壤质地等关系密切。由于 P2 土 壤容重(1.58 g/cm3)和土壤初始含水率(14.23%)偏大, 总孔隙度较小(41.93%),其土壤结构松散且水势梯度 较小,从而导致 a 值较小; P1、P2、P3 的 b 值分别为 0.187,0.259,0.197,P2 入渗率衰退速度较快,P1 和 P3 人渗率衰退速度较慢。无论是 a 值还是 b 值,均 为 P3 与桑树林地最为接近,说明经过 4 a 的恢复,弃 渣场入渗能力得到较好改善,已接近桑树林地。

₹3 弃渣场和林地土壤入渗模型拟合参数

4户日.	Kastiakov 模型拟合参数			通用经验模型拟合参数			Horton 模型拟合参数				Philip 模型拟合参数			
細亏	а	b	R^2	а	b	п	R^2	а	b	С	R^2	а	b	R^2
P1	11.398	0.187	0.925	4.753	10.027	0.703	0.880	5.549	8.087	0.228	0.829	9.207	4.035	0.922
P2	11.069	0.259	0.956	0.580	10.659	0.288	0.952	3.825	5.559	0.079	0.910	9.950	2.6888	0.944
P3	14.912	0.197	0.905	7.382	19.529	1.243	0.894	7.729	19.263	0.446	0.887	11.897	5.578	0.853
P4	21.144	0.210	0.956	2.687	19.053	0.270	0.954	8.614	9.023	0.059	0.868	17.425	6.694	0.845

2.3 弃渣场入渗影响因素分析

土壤水分入渗是一个复杂过程,其入渗能力与土 壤质地、含水率、团聚体含量、土壤孔隙度、有机质等 因素有关。同时,弃渣场内部存在大量碎石,其碎石 含量、碎石粒径大小、碎石与土壤的结合方式和植被 根系状况等都会影响弃渣场入渗^[15]。碎石作为不透 水介质,不仅会减少水流过水断面的面积,增加其孔 隙的弯曲度而抑制水分下渗,也会增加有利于水分运 动的非毛管孔隙度,促进土壤水分入渗及再分 布^[15-16]。由表4可知,初始入渗率、稳定入渗率、平均 入渗率和渗透总量与土壤容重、20~5 mm 和 5~2 mm 颗粒含量呈显著负相关(p < 0.05),与非毛管孔 隙度、有机质含量和 2~0.075 mm 颗粒含量呈显著 (p < 0.05)或极显著(p < 0.01)正相关。相关研究表 明,非毛管孔隙度的大小直接影响到土壤通气透水能 力,为土壤水分的暂时贮存提供空间,起到暂时滞缓 峰值流量或削减快速径流量的作用^[17]。本研究中, 弃渣场入渗能力与非毛管孔隙度呈显著(p < 0.05) 或极显著(p < 0.01)正相关关系,说明非毛管孔隙度 的增多可提高弃渣场入渗能力、削弱地表径流和减少 水土流失;弃渣场入渗能力与 $20 \sim 5 \text{ mm}$ 和 $5 \sim 2 \text{ mm}$ 碎石含量呈显著负相关(p < 0.05),说明 $20 \sim 5 \text{ mm}$ 和 $5 \sim 2 \text{ mm}$ 和 $5 \sim 2 \text{ mm}$ 和 $5 \sim 2 \text{ mm}$ 碎石会抑制土壤水分入渗,这与周蓓蓓 等^[16]研究结果一致。

表 4 不同恢复年限弃渣场入渗能力与土壤理化性质的 Pearson 相关分析

人涂些江店		容重/	含水率/	毛管	非毛管	有机质/	60~20	$20 \sim 5$	$5 \sim 2$	2~0.075	<0.075
八世	\$村怔诅	$(g \cdot cm^{-3})$	%	孔隙度/%	孔隙度/%	$(g \cdot kg^{-1})$	mm	mm	mm	mm	mm
初始	相关系数	-0.763*	-0.434	-0.128	0.798*	0.944 * *	0.227	-0.763*	-0.760*	0.830**	-0.357
人渗率	Sig.	0.017	0.243	0.742	0.010	0.000	0.557	0.015	0.017	0.006	0.345
稳定	相关系数	-0.769*	-0.461	-0.147	0.812**	0.941 * *	0.213	-0.742*	-0.747*	0.856**	-0.692*
人渗率	Sig.	0.015	0.212	0.705	0.008	0.000	0.582	0.025	0.021	0.003	0.038
平均	相关系数	-0.769*	-0.501	-0.186	0.831**	0.941 * *	0.240	-0.744*	-0.745*	0.871**	-0.289
人渗率	Sig.	0.016	0.169	0.631	0.005	0.000	0.535	0.023	0.021	0.002	0.451
渗透	相关系数	-0.757*	-0.498	-0.177	0.815 * *	0.933 * *	0.221	-0.728*	-0.743*	0.880**	-0.284
总量	Sig.	0.018	0.173	0.648	0.007	0.000	0.567	0.031	0.022	0.002	0.460

注:*表示在 0.05 水平上显著相关(p<0.05);**表示在 0.01 水平上极显著相关(p<0.01)。

2.4 弃渣场入渗性能评价

为综合分析与评价不同恢复年限弃渣场的人渗性能,采用 SPSS 软件对初始入渗率(X_1)、稳定入渗率(X_2)、平均入渗率(X_3)和渗透总量(X_4)4个指标进行主成分分析。提取了1个主成分,特征值为3.984,方程贡献率为99.61%,几乎解释了整个总方差,信息损失量仅为0.39%,其主成分方程为 F_1 =0.501 x_1 +0.498 x_2 +0.501 x_3 +0.501 x_4 (x_i 为各入渗指标的标准化数据),计算并排序3个弃渣场入渗性能(表5)。

由表 5 可知,3 个弃渣场和桑树林地入渗性能的 大小依次为 P4(2.398)>P3(0.792)>P1(-1.104) >P2(-2.089),桑树林地高于弃渣场。3 个弃渣场 中以 P3 得分最高,为0.792,这是由于植被覆盖度的 增加降低弃渣场溅蚀和面蚀发生的可能性,植物根系 的延伸与穿插使较大碎石分解成为细小颗粒,同时根 系的分泌物促使土壤细颗粒的形成和发育。弃渣场 入渗性能的提高可为地表径流的入渗与贮存提供空 间,从而降低地表径流对弃渣场的冲刷和侵蚀,且随 恢复年限的增加更为显著。

表 5	不同恢复年	限弃渣场和林地	土壤入	、渗性能评价
-----	-------	---------	-----	--------

样地编号	得分	排序
P1	-1.104	3
P2	-2.089	4
P3	0.792	2
P4	2.398	1

3 结论

(1)3个弃渣场入渗特征值均显著小于林地。P1、

P2、P3、P4 的初始入渗率为 11.32,9.34,15.84,19.38 mm/min,稳定入渗率为 4.64,3.62,6.71,7.81 mm/min; 与 P1 和 P2 相比,P3 的入渗能力最接近桑树林地;Kastiakov 模型的拟合效果最佳,模型中系数 *a* 在 11.069~ 21.144 之间,指数 *b* 在 0.187~0.259 之间。

(2)初始人渗率、稳定入渗率、平均入渗率和渗透 总量与土壤容重、20~5 mm 和 5~2 mm 颗粒含量呈 显著负相关(p<0.05),与非毛管孔隙度、有机质含 量和 2~0.075 mm 颗粒含量呈显著(p<0.05)正相 关;对入渗特征值进行主成分分析,3个主成分 F_1 、 F_2 、 F_3 的累计贡献率为 99.999%;各样地入渗性能 大小为 P4(2.398)>P3(0.792)>P1(-1.104)>P2 (-2.089),说明随着恢复年限的增加,弃渣场入渗性 能得到较好的改善且接近桑树林地。

(3)弃渣场是土壤、碎石和岩体的混合物,是一种 典型的土石混合体,其结构松散、大孔隙多、易侵蚀, 存在严重的水分渗漏和养分流失等问题。弃渣场的 高渗透性与森林土壤有着本质区别,前者主要是因为 弃渣场松散的土壤结构和碎石间的优先路径,后者则 是由于较好的土壤团粒结构和植物根系。已有研究 表明,弃土时间超过7 a 的地区植被和抗侵蚀能力都 有较好的恢复,而堆积时间超过10 a 的弃土基本达 到原状土土壤的抗侵蚀水平^[18]。本研究发现,弃渣 场经过4 a 的恢复,其土壤理化性质、入渗能力和植 被覆盖度已接近桑树林地,其初始入渗率和稳定入渗 率为桑树林地的 81.73% 和 85.92%,这与倪含斌 等^[18]研究结果相一致,但恢复时间更短。其原因不 仅与当地的水热条件有关,也与弃土弃渣(紫色母岩) 的快速风化成土特性关系密切。本文仅从入渗角度 来分析了不同年限弃渣场与桑树林地之间的差异以 及弃渣场的恢复程度,今后应加强弃渣场恢复过程中 土壤质量和植物多样性等方面的研究。

参考文献:

- [1] 蔺明华.开发建设项目新增水土流失研究[M].郑州:黄 河水利出版社,2008:10-18.
- [2] 朱波,莫斌,汪涛,等.紫色丘陵区工程建设松散堆积物的侵蚀研究[J].水土保持学报,2005,19(4):193-195.
- [3] 刘建伟,史东梅,马晓刚,等.弃渣场边坡稳定性特征分析[J].水土保持学报,2007,21(5):192-195.
- [4] 李叶鑫,郭宏忠,史东梅,等.紫色丘陵区不同弃土弃渣 下垫面入渗特征及影响因素[J].环境科学学报,2014, 34(5):1292-1297.
- [5] Wang G Y, Innes J, Yu S Y, et al. Extent of soil erosion and surface runoff associated with large-scale infrastructure development in Fujian Province, China[J]. Catena, 2012, 89(1): 22-30.
- [6] 史东梅,蒋光毅,彭旭东,等.不同土石比的工程堆积体 边坡径流侵蚀过程[J].农业工程学报,2015,31(17): 152-161.
- [7] 王文龙,李占斌,李鹏,等.神府东胜煤田原生地面放水

(上接第90页)

- [14] 范严伟,赵文举,王昱. 入渗水头对垂直一维入渗 Philip 模型参数的影响[J]. 兰州理工大学学报,2015,41(1): 65-70.
- [15] 王清,张明,王通.不同石砾条件对土壤水分入渗的影响[J].湖南农业科学,2012(21):43-47.
- [16] 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): 1214-1218.

冲刷试验研究[J].农业工程学报,2005,21(13):59-62.

- [8] 吕刚,吴祥云.土壤入渗特性影响因素研究综述[J].中 国农学通报,2008,24(7):494-499.
- [9] 于亚莉,汪三树,彭旭东,等.不同植被恢复年限弃渣场 入渗性能研究[J].中国水土保持,2016(6):51-53.
- [10] 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.
- [11] Peng X D, Shi D M, Guo H Z, et al. Effect of urbanisation on the water retention function in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Catena, 2015, 133(10): 241-249.
- [12] 赵骍,景峰. 阎家沟煤矿区弃土坡模拟降雨入渗规律研 究[J]. 山西水土保持科技,2008(3):17-19.
- [13] 郭宏忠,蒋光毅,江东,等.生产建设项目弃土弃渣与林地 土壤入渗特征分析[J].中国水土保持,2014(7):51-53.
- [14] 郭华,樊贵盛. 冻融土壤 Kostiakov 入渗模型参数的非 线性预报模型[J]. 节水灌溉,2015(11):1-4.
- [15] 王慧芳,邵明安.含碎石土壤水分入渗试验研究[J].水 科学进展,2006,17(5):604-609.
- [16] 周蓓蓓,邵明安.不同碎石含量及直径对土壤水分入渗 过程的影响[J].土壤学报,2007,44(5):801-807.
- [17] 鲁绍伟,陈波,潘青华,等.北京山地不同密度侧柏人工 林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持学报,2013,27 (1):224-229.
- [18] 倪含斌,张丽萍,张登荣.模拟降雨试验研究神东矿区 不同阶段堆积弃土的水土流失[J].环境科学学报, 2006,26(12):2065-2071.
- [17] 李卓,吴普特,冯浩,等.不同粘粒含量土壤水分入渗能 力模拟试验研究[J].干旱地区农业研究,2009,27(3): 71-77.
- [18] 吴海姣,胡振华,李飞,等.掺入不同组分碎石后土石混 合物入渗模拟研究[J].中国水土保持科学,2014,12 (3):17-22.
- [19] 周蓓蓓. 土石混合介质水分溶质运移的试验研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2009.