

工程堆积体入渗特征及入渗模型适宜性评价

李叶鑫^{1,2,3}, 史东梅³, 吕刚², 王道涵², 林姿³

(1. 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁 阜新 123000;

2. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 3. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要: 以重庆市城镇建设和交通枢纽工程形成的典型工程堆积体为研究对象, 采用野外双环入渗法对工程堆积体入渗特征、影响因素及入渗模型适宜性进行研究, 筛选重庆市典型工程堆积体最优入渗模型。结果表明: (1) 工程堆积体初始入渗率可达 23.20 mm/min, 随着入渗时间的延长, 入渗速率逐渐降低, 30 min 瞬时入渗率为 2.38~11.32 mm/min, 稳定入渗率为 1.81~9.05 mm/min; (2) 工程堆积体的初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率、30 min 入渗率、60 min 入渗率和渗透总量均表现为中等变异, 变异系数为 36.42%~57.49%; (3) 工程堆积体初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率和渗透总量与容重和含水率均呈负相关关系, 与总孔隙度呈正相关关系; 稳定入渗率、平均入渗率和渗透总量与 60~40, 40~20, 20~10, 10~5 mm 碎石含量呈负相关关系, 与 5~2 mm 碎石含量呈正相关关系; (4) 不同工程堆积体回归模型的拟合效果存在差异, 其决定系数 R^2 依次为 Kastiakov 模型(0.899) > 通用经验模型(0.893) > Horton 模型(0.870) > Philip 模型(0.867), Kastiakov 模型拟合效果优于通用经验模型、Horton 模型和 Philip 模型, 可以较好地模拟和预测重庆市工程堆积体入渗过程和入渗能力。

关键词: 入渗特征; 工程堆积体; 适宜性评价; 入渗模型; 重庆市

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0086-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.014

Infiltration Characteristics and Suitability Evaluation of Infiltration Model of the Typical Engineering Accumulation

LI Yexin^{1,2,3}, SHI Dongmei³, LÜ Gang², WANG Daohan², LIN Zi³

(1. College of Mining Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000;

2. College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin,

Liaoning 123000; 3. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715)

Abstract: Taking the typical engineering accumulation of urban construction and transportation hub project in Chongqing as case study, the infiltration characteristics, influencing factors and suitability of infiltration model were explored by using field double-ring infiltration, and the best infiltration model of typical engineering accumulation in Chongqing was filter out. The results indicated that: (1) The initial infiltration rate of engineering accumulation was 23.20 mm/min. The infiltration rate decreased gradually with time, and the 30 min-infiltration rate was 2.38~11.32 mm/min and the stable infiltration rate was 1.81~9.05 mm/min; (2) The initial infiltration rate, stable infiltration rate, average infiltration rate, 30 min-infiltration rate, 60 min-infiltration rate, and total infiltration of each engineering accumulation showed medium variation and the coefficient variation was 36.42%~57.49%; (3) The initial infiltration rate, stable infiltration rate, average infiltration rate, and total infiltration of engineering accumulation had negative correlations with soil bulk density and soil water content, while positive correlations with total soil porosity existed. The stable infiltration rate, average infiltration rate, and total infiltration of engineering accumulation had negative correlations with 60~40, 40~20, 20~10, 10~5 mm gravel content and had positive correlations with 5~2 mm gravel content; (4) There were differences in the fitting effect of the regression models with different engineering accumulations and the ranking of R^2 from high to low was: Kastiakov model (0.899) > common empirical infiltration model (0.893) > Horton model (0.870) > Philip model (0.867). The fitting effect of Kastiakov model was better than the common empirical infiltration model, Philip model and Horton model, and which

收稿日期: 2018-01-19

资助项目: 重庆市水利局科技项目“生产建设项目工程堆积体水土流失规律研究”; 重庆市生产建设项目“水土流失危害研究”

第一作者: 李叶鑫(1989—), 男, 辽宁阜新人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀与流域治理研究。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教学和科研。E-mail: lvgang2637@126.com

could be used to simulate and predict the infiltration process and infiltration capacity of engineering accumulation in Chongqing.

Keywords: infiltration characteristics; engineering accumulation; suitability evaluation; infiltration model; Chongqing city

随着社会经济的发展,水利水电工程、交通运输工程、输变电工程、矿产工程、输油气管等各类生产建设项目日益增多,这些工程建设项目不仅破坏植被,开挖原地貌,损坏水土保持设施,而且还会产生大量弃土弃渣,形成物质组成复杂、结构松散、渗透能力强、养分含量低的工程堆积体^[1-4],极易发生严重的水土流失^[5-7]。相关研究^[8]表明,复杂疏松的物质组成是弃土弃渣体及扰动土体侵蚀特殊于撂荒地的根本原因,其侵蚀量为撂荒地的2.27~239.2倍。朱波等^[9]认为紫色丘陵区生产建设项目工程侵蚀严重,松散堆积物侵蚀模数可达52 400 t/(km²·a),远大于相同条件下的草地,其侵蚀量与植被覆盖度和堆积时间关系密切。重庆市地处亚热带季风性湿润气候区,年降水量为1 105.4 mm,年内降水量时空分配不均匀且主要集中在5—9月,是水土流失极易发生的侵蚀敏感期^[10]。重庆市生产建设项目涉及水利水电工程、矿产资源开发工程、交通枢纽工程和城镇基础建设工程等4个方面,其生产建设项目类型和数量呈大幅度增加趋势^[11],工程建设松散弃土坡的侵蚀模数高达10万 t/(km²·a),其侵蚀量是裸露撂荒地侵蚀模数10倍以上^[12],已成为重庆市人为水土流失的主要地貌单元。

工程堆积体下垫面入渗能力决定了降雨的二次分配,一方面改变工程堆积体坡面水分空间分布结构,影响植被的生长发育,同时,水分的深层运动会加大工程堆积体边坡失稳的可能性,诱发滑坡、泥石流等水土流失灾害;另一方面,入渗能力的高低会影响坡面产流过程、径流量以及坡面水流特性,水土流失形式多样,进而影响工程堆积体水土流失量。赵驿等^[13]、郭宏忠等^[14]、李叶鑫等^[15]都认为工程堆积体的高渗透性与森林土壤有着本质区别,前者主要是因为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。目前,关于工程堆积体入渗特征的研究方法有室内单环入渗法^[16-17]、野外双环入渗法^[18-19]、室内外人工模拟降雨^[20-21]、野外实地放水冲刷法^[4,6]等。野外双环入渗法是田间测定渗透性常用且经典的方法,具有设备简单、经济、操作方便等优点,被国内外学者广泛运用。Shi等^[22]采用野外双环入渗法对比研究重庆市不同年限(1,2,3年)工程堆积体和原地貌(坡耕地和人工林地)土壤渗透性能及水源涵养功能的差异性,认为项目区形成的工程堆积体会降低其渗透性能,各工程堆积体稳定入渗率为1.64,1.89,2.89 mm/min,坡耕地和林地

则为3.90,6.22 mm/min,说明城镇建设工程形成的工程堆积体极大地改变了项目区原地貌土壤渗透性能。但关于重庆市典型工程堆积体下垫面入渗特征的影响因素及筛选最优入渗模型的研究较少。本文以重庆市北碚区典型工程堆积体为研究对象,对比分析不同年限工程堆积体下垫面入渗特征,探讨工程堆积体入渗性能的主导因子,评价4种入渗模型的拟合程度,筛选重庆市典型工程堆积体最优入渗模型,以期重庆市生产建设项目工程堆积体下垫面入渗特征、水土流失防治以及生态修复与重建提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市北碚区,地处东经106°26',北纬30°26',海拔230 m,年平均气温18.3℃,年降水量1 105.4 mm,5—9月的降水量占全年的70%。工程堆积体形态特征主要有坡度、坡长、坡高、堆积形态等指标。本文对重庆市北碚区生产建设项目典型工程堆积体的类型和来源、占地面积、形态特征、植被覆盖度、坡面主要侵蚀特征以及是否采取水土保持措施等项目进行调查,在此基础上选取9个典型工程堆积体作为研究对象,其来源为北碚区城镇建设或交通枢纽工程开挖地表的弃土弃渣,弃土弃渣为中生代侏罗纪沙溪庙组砂泥页岩母质及其发育而成的紫色土、碎石、石块等,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。

1.2 研究方法

试验于2014年5—8月开展。在每个工程堆积体平台处,按照5点取样法采集0—10 cm土层环刀样品和5 kg混合散样,每个工程堆积体3个重复。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,以分析工程堆积体入渗特征与土壤物理性质相关性。采用野外双环入渗法测定工程堆积体入渗速率。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。试验结束后,计算初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率和渗透总量等入渗特征值,并采用Kostiakov模型($f(t) = at^{-b}$)、通用经验模型($f(t) = a + bt^{-n}$)、Horton模型($f(t) = a + be^{-kt}$)和Philip模型($f(t) = st^{-0.5} + a$)来拟合工程堆积体下垫面入渗过程。具体试验操作和数据处理可参照文献^[18-19]。

表 1 工程堆积体形态特征

编号	弃渣来源	地理位置	占地面积/ m ²	堆积时间	坡度/ (°)	坡长/ m	坡高/ m	植被 覆盖率/%	主要侵蚀 特征	水土保持 措施
1#	城镇建设工程	29°47'48" N 106°23'54" E	10487.80	2月	28.5	16.70	7.97	0	面蚀、沟蚀、重力侵蚀	无措施
2#	城镇建设工程	29°47'42" N 106°23'50" E	13726.34	2a	38.0	14.20	8.84	60	面蚀、沟蚀、重力侵蚀	挡墙
3#	交通枢纽工程	29°47'37" N 106°23'45" E	5149.28	2a	38.0	10.20	6.28	50	面蚀、沟蚀、重力侵蚀	挡墙
4#	交通枢纽工程	29°47'33" N 106°23'42" E	6645.01	2a	37.3	32.56	19.73	65	面蚀、沟蚀	挡墙
5#	城镇建设工程	29°51'44" N 106°23'4" E	903.78	2a	36.5	6.90	4.10	35	面蚀、沟蚀、重力侵蚀	无措施
6#	城镇建设工程	29°52'10" N 106°24'35" E	9835.21	1a	34.0	20.00	11.18	40	面蚀、沟蚀	挡墙
7#	城镇建设工程	29°47'6" N 106°30'43" E	10487.80	1a	25.5	35.50	15.28	20	面蚀、沟蚀、重力侵蚀	无措施
8#	城镇建设工程	29°46'48" N 106°29'50" E	13726.34	2a	32.0	15.20	8.05	40	面蚀、沟蚀、重力侵蚀	无措施
9#	城镇建设工程	29°44'32" N 106°26'15" E	12634.57	4a	34.8	23.10	13.18	90	面蚀	无措施

注:表中工程堆积体坡度、坡长、坡高和植被覆盖度为多点测量的平均值。

表 2 工程堆积体坡面颗粒分布及分形维数

编号	粒径/mm											平均 粒径/mm	分形 维数
	60~40	40~20	20~10	10~5	5~2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.1	0.1~0.075	<0.075		
1#	0	1.27	9.86	21.11	31.39	8.94	10.80	3.84	5.90	1.92	4.97	4.81	2.548
2#	0	1.07	5.12	13.17	31.01	7.23	11.55	5.14	15.73	4.11	5.87	3.41	2.620
3#	5.32	11.95	14.86	18.65	21.50	5.17	7.18	3.93	6.70	2.17	2.57	10.76	2.500
4#	0	13.81	11.86	13.81	21.02	6.07	10.20	5.30	9.52	3.09	5.32	7.90	2.597
5#	1.97	7.58	20.72	27.42	21.69	5.34	7.96	2.65	2.36	0.67	1.64	9.34	2.374
6#	3.58	9.58	15.49	19.09	21.37	5.36	8.72	4.38	6.68	2.28	3.47	9.35	2.530
7#	0	9.14	18.14	13.83	15.83	16.01	8.62	4.21	6.48	2.22	5.52	7.39	2.577
8#	0	10.28	16.28	13.39	16.36	16.57	8.07	5.20	6.25	1.96	5.64	7.45	2.577
9#	0	4.30	9.50	7.84	11.34	16.13	11.06	10.43	11.70	8.81	8.89	4.10	2.692

2 结果与分析

2.1 工程堆积体入渗过程分析

土壤水分入渗是一个随入渗时间延长而逐渐衰减的过程,即随着时间的延长入渗速率逐渐减小,直到达到稳定入渗速率。由图 1 可知,在入渗初期(0~10 min),工程堆积体入渗速率迅速减小,初始入渗率为 23.20 mm/min,堆积体结构松散且孔隙发达,土壤含水率较低,水分在重力和水压作用下迅速向下运动。在 10~40 min 阶段,入渗率依然呈下降趋势,但下降趋势减缓且存在一定程度的波动,30 min 瞬时入渗率为 2.38~11.32 mm/min,与初始入渗率相比分别降低 51.22%和 58.01%。该阶段入渗率减小的主要原因是:一方面,表层细小颗粒随水分入渗而向下运动,使得上层粗颗粒逐渐被架空,在水力和重力共同作用下形成小范围的塌陷,使得入渗通道被堵塞,降低土壤入渗率;另一方面,随着堆积体含水率的增加,颗粒之间的孔隙被水分逐渐填充,使得饱和度增大,入渗梯度减小,降低土

壤入渗率;在稳定入渗阶段(40~100 min),入渗率继续呈减小趋势,但减小程度明显变缓。各个工程堆积体稳定入渗率最大值为 9.05 mm/min,最小值为 1.81 mm/min,较 30 min 瞬时入渗率降低 20.04%和 23.84%,较初始入渗率降低 60.99%和 68.02%。

2.2 工程堆积体入渗特征

由图 2 可知,工程堆积体初始入渗率为 5.66~23.20 mm/min,平均为 13.36 mm/min,其中 1#工程堆积体最大,6#工程堆积体最小,两者相差 3.1 倍;稳定入渗率为 1.81~9.05 mm/min,平均为 4.49 mm/min,其中 1#工程堆积体最大,5#工程堆积体最小,两者相差 4 倍;平均入渗率为 2.30~11.16 mm/min,平均为 5.73 mm/min,其中 1#工程堆积体最大,6#工程堆积体最小,两者相差 3.85 倍;渗透总量为 218.60~915.32 mm,平均为 472.65 mm,其中 1#工程堆积体最大,6#工程堆积体最小,两者相差 3.19 倍。由表 3 可知,除初始入渗率外,其他入渗

特征值的峰度和偏度均小于 1,服从正态分布;初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率、30 min 入渗率、60 min 入渗率和渗透总量的变异程度较大,其变异系数分别为 36.42%,57.49%,51.72%,50.59%,52.19%,46.97%,均为中等变异,其中稳定入渗率的变异程度最高。这可能与工程堆积体的物质组成、碎石含量及分布、堆积年限、植被状况和人为干扰等多方面因素有关,也反映工程堆积体在恢复植被过程中土壤物理性质的改变和植物根系对土壤入渗能力的影响。

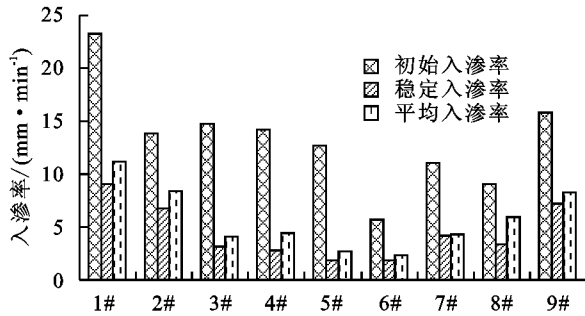


图 2 工程堆积体土壤入渗特征

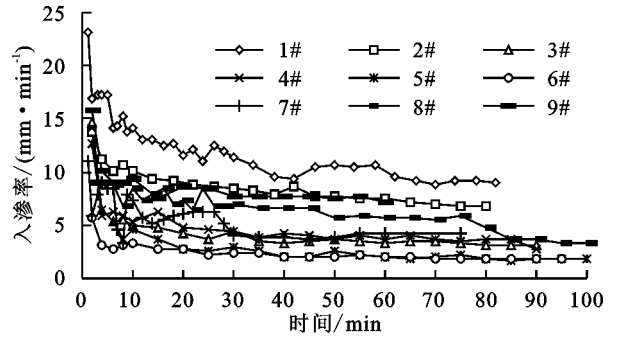


图 1 工程堆积体入渗率随时间变化特征

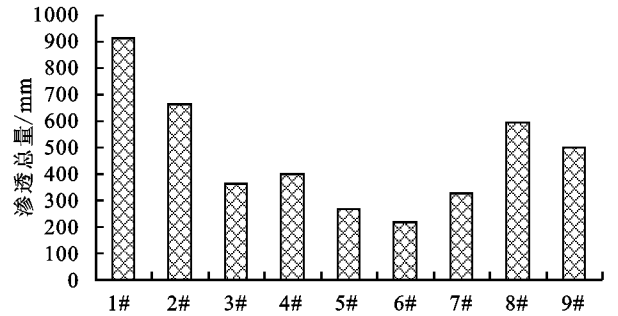


表 3 工程堆积体入渗速率统计特征

测定指标	最大值	最小值	极差	平均值	标准差	标准误差	峰度	偏度	变异系数/%	样本数
初始入渗率/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	23.20	5.66	17.54	13.36	4.87	1.62	1.79	0.59	36.42	9
稳定入渗率/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	9.05	1.81	7.24	4.49	2.58	0.86	-0.80	0.77	57.49	9
平均入渗率/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	11.16	2.30	8.86	5.73	2.96	0.99	-0.43	0.72	51.72	9
30 min 入渗率/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	11.32	2.38	8.94	5.85	2.96	0.99	-0.40	0.69	50.59	9
60 min 入渗率/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	9.62	2.06	7.56	5.04	2.63	0.88	-0.83	0.54	52.19	9
渗透总量/mm	915.32	218.60	696.72	472.65	222.03	74.01	0.56	0.97	46.97	9

2.3 工程堆积体入渗影响因子

由表 4 可知,工程堆积体的初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率和渗透总量与容重和含水率均呈负相关(样本数 $N=9$),与孔隙度呈正相关,其相关系数较低,而入渗特征值与碎石含量的相关系数较高,说明碎石对入渗的影响程度更大,这与董辉等^[23]关于不同粒径碎石与渗透系数的相关性较大的研究结果一致。稳定入渗率是土壤水分入渗达到稳定时土壤入渗能力的表现,平均入渗率是入渗过程中的整体平均水平的表现,因此选择稳定入渗率和平均入渗率进一步分析入渗性能与不同粒径碎石含量的相关性。稳定入渗率与 60~40 mm 碎石含量呈负相关,与 40~20,20~10,10~5 mm 碎石含量呈极显著负相关,仅与 5~2 mm 碎石含量呈正相关,说明 5~2 mm 碎石可促进土壤水分入渗,而 60~5 mm 碎石会抑制土壤水分入渗且 40~20,20~10,10~5 mm 碎石的抑制作用更为显著,这与 Wilcox 等^[24]研究结果一致,认为碎石直径与土壤入渗能力呈较好的负相关,且碎石粒径越小,影响越显著。平均入渗率与 60~40,10~5 mm 碎石含量均呈负相关,与 40~20,20~10 mm 碎石含量呈极显著和显著负相关,与 5~2 mm 碎石含量呈正相关,说明 5~2 mm 碎石会提高

土壤整体入渗水平,而 60~5 mm 碎石会降低整体入渗水平且 40~10 mm 碎石更为显著。综合不同粒径碎石含量对稳定入渗率和平均入渗率的相关分析,表明粒径 >5 mm 碎石能够抑制工程堆积体的入渗能力,40~20,20~10 mm 碎石可以达到极显著和显著水平。稳定入渗率和平均入渗率与平均粒径呈极显著负相关,渗透总量与平均粒径呈显著负相关。

对于粒径 <2 mm 土壤颗粒而言,除 2~1 mm 含量与初始入渗率呈负相关外,2~0.075 mm 各粒级土壤颗粒均与土壤入渗特征值呈正相关, <0.075 mm 土壤颗粒含量与土壤入渗特征值呈负相关,说明 2~0.075 mm 土壤颗粒会促进入渗且 1~0.5 mm 土壤颗粒对稳定入渗率的促进作用极显著, <0.075 mm 土壤颗粒会抑制土壤入渗且对稳定入渗率的抑制作用极显著,该研究结果与林地等原生地地貌关于土壤入渗特性影响因素的结果不同,这可能与工程堆积体内部大量碎石有关,碎石的存在改变了土壤原有的物理性质,影响土壤细小颗粒对土壤入渗的作用。但是,工程堆积体入渗性能的影响因素是极其复杂的,后期仍需进一步研究。

2.4 工程堆积体入渗模型优化

为比较不同拟合模型对工程堆积体入渗过程的拟合优度,分别采用 Kostikov 模型、通用经验模型、

Horton 模型和 Philip 模型对工程堆积体入渗过程进行优化模拟。由表 5 可知,不同工程堆积体回归模型的拟合优度存在差异,其拟合优度依次为 Kastiakov 模型>通用经验模型>Horton 模型>Philip 模型。Kastiakov 模型拟合的决定系数为 0.824~0.956,平均为 0.899;通用经验模型拟合的决定系数为 0.832~0.979,平均为 0.893;Horton 模型拟合的决定系数为 0.761~

0.936,平均为 0.870; Philip 模型拟合的决定系数为 0.815~0.938,平均为 0.867。结合 9 个工程堆积体土壤水分入渗的最优模型,其中 Kastiakov 模型占 6 个,通用经验模型占 3 个,表明 Kastiakov 模型符合重庆市典型工程堆积体入渗的实际情况,这与董辉等^[23]、周蓓蓓等^[25]研究结果一致,即 Kastiakov 模型更加符合土石混合质或碎石土入渗过程。

表 4 工程堆积体入渗性能与土壤物理性质的 Spearman 相关性

测定指标	初始入渗率/ (mm·min ⁻¹)		稳定入渗率/ (mm·min ⁻¹)		平均入渗率/ (mm·min ⁻¹)		渗透总量/mm	
	相关系数	Sig.	相关系数	Sig.	相关系数	Sig.	相关系数	Sig.
容重/(g·cm ⁻³)	-0.104	0.790	-0.183	0.637	-0.215	0.579	-0.158	0.685
含水率/%	-0.447	0.227	-0.024	0.951	-0.045	0.909	-0.355	0.349
总孔隙度/%	0.19	0.625	0.157	0.687	0.082	0.833	0.058	0.882
60~40 mm/%	-0.329	0.388	-0.575	0.106	-0.559	0.118	-0.404	0.281
40~20 mm/%	-0.521	0.150	-0.801**	0.010	-0.802**	0.009	-0.752*	0.019
20~10 mm/%	-0.489	0.182	-0.808**	0.008	-0.721*	0.028	-0.654	0.056
10~5 mm/%	0.059	0.881	-0.823**	0.002	-0.316	0.407	-0.088	0.822
5~2 mm/%	0.440	0.236	0.330	0.385	0.394	0.295	0.600	0.088
2~1 mm/%	-0.060	0.878	0.315	0.409	0.301	0.430	0.046	0.906
1~0.5 mm/%	0.518	0.153	0.809**	0.008	0.734*	0.024	0.648	0.059
0.5~0.25 mm/%	0.105	0.788	0.498	0.172	0.356	0.347	0.067	0.865
0.25~0.1 mm/%	0.116	0.767	0.560	0.117	0.443	0.233	0.339	0.372
0.1~0.075 mm/%	0.182	0.639	0.562	0.116	0.422	0.258	0.183	0.639
<0.075 mm/%	-0.228	0.556	-0.696*	0.037	-0.601	0.087	-0.343	0.367
平均粒径/mm	-0.333	0.381	-0.817**	0.007	-0.850**	0.004	-0.717*	0.030
分形维数	0.226	0.559	0.594	0.092	0.653	0.057	0.536	0.137

注: * 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$ 。

表 5 工程堆积体入渗模型拟合参数

编号	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		
	a	b	R ²	a	b	n	R ²	a	b	n	R ²	a	b	R ²
1#	21.916	0.199	0.939	2.003	20.140	0.232	0.837	9.979	10.800	0.096	0.882	31.340	8.238	0.910
2#	14.884	0.171	0.956	2.135	13.054	0.220	0.954	7.293	5.732	0.062	0.884	22.001	6.185	0.938
3#	13.991	0.339	0.865	3.874	25.322	1.359	0.908	4.223	32.455	0.603	0.852	27.003	1.895	0.815
4#	15.531	0.412	0.890	3.469	30.878	1.484	0.871	3.733	31.377	0.534	0.934	29.614	1.186	0.827
5#	16.452	0.548	0.924	1.776	21.958	1.027	0.979	2.276	18.350	0.305	0.936	30.538	1.374	0.917
6#	5.636	0.256	0.883	1.845	6.169	0.812	0.832	2.161	5.180	0.264	0.771	10.345	1.348	0.872
7#	11.992	0.225	0.871	0.995	11.249	0.266	0.864	3.907	5.110	0.032	0.761	20.773	3.531	0.862
8#	11.104	0.260	0.943	0.320	10.856	0.275	0.938	4.166	5.728	0.105	0.891	19.247	2.831	0.832
9#	15.123	0.194	0.824	7.730	22.147	1.467	0.854	7.993	21.798	0.519	0.923	23.646	5.609	0.830

3 讨论

从本研究来看,各个工程堆积体入渗能力差异较大,其稳定入渗率在 1.81~9.05 mm/min,相差 4 倍,变异系数为 57.49%,属于中等变异性。这是由于工程堆积体堆积年限在 2 个月到 4 年不等,在重庆独特的水域(三峡库区)、地理环境(西南土石山区)和气候环境共同作用下会发生不同程度的水土流失和母岩风化(重庆市紫色泥页岩的年风化成土速率为 15 800~25 500 t/km²[26]),大量的碎石和岩石风化为细小颗粒,为工程堆积体生态修复提供充足的物质和养分资源;同时,由于堆积年限不同,堆积体呈现不同的沉降作用和紧实程度,土壤结构性及下垫面微地形产生差异,水分沿发达的大孔隙和管状通道等优先路径快速向下运动,造成入渗过程及入渗速率的差

异。此外,随着工程堆积体堆积年限的增加,植被状况有所恢复,所形成的植物根系通道也会影响其入渗过程及入渗能力。朱波等^[9]认为堆积初期、植被覆盖度仅为 10%的工程堆积体的侵蚀量高达 48 000 t/(km²·a),径流系数为 60%;而当植被覆盖度达到 80%时,侵蚀量仅为堆积初期的 3.5%,径流系数仅为 22%。Peng 等^[19]研究结果表明,不同年限弃渣场的稳定入渗率为 1.64~2.89 mm/min,为天然林地(6.22 mm/min)的 26.37%~46.46%。以上结果说明植物根系能够有效地提高入渗能力。本研究所选取堆积体的植被覆盖度最小为 0,最大为 90%,植物根系的差异影响工程堆积体下垫面的入渗能力,一方面根系的网络、穿插、缠绕、固结作用会改善堆积体土壤结构,增加土壤有效孔隙;另一方面,根系和土壤的

接触面形成导水通道,是土壤水分运动的主要通道。本研究表明,重庆市典型工程堆积体的入渗模型拟合优度依次为 Kastiakov 模型>通用经验模型>Horton 模型>Philip 模型,Kastiakov 模型拟合的决定系数为 0.824~0.956,能够较好的反映工程堆积体入渗过程。由于工程堆积体物质组成复杂,碎石含量较高,入渗过程影响因素复杂,土石比、压实度、初始含水率、植物根系密度等因素及交互作用都会影响入渗过程及入渗模型的拟合效果,今后需利用室内定量试验揭示各因素的作用机理及对入渗能力的贡献率,以提高工程堆积体入渗模型的拟合效果和精度。

4 结论

(1)工程堆积体入渗过程可分为入渗初期(0~10 min)、缓慢降低(10~40 min)和稳渗阶段(40~100 min)3个时期,初始入渗率可达 23.20 mm/min,稳定入渗率为 1.81~9.05 mm/min。稳定入渗率、平均入渗率、30 min 入渗率、60 min 入渗率和渗透总量均服从正态分布,属中等变异。

(2)工程堆积体初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率和渗透总量与容重和含水率均呈负相关,与孔隙度呈正相关。工程堆积体稳定入渗率与 60~40 mm 碎石含量呈负相关,与 40~20,20~10,10~5 mm 碎石含量呈极显著负相关。2~0.075 mm 土壤颗粒会促进入渗且 1~0.5 mm 土壤颗粒对稳定入渗率的促进作用极显著,<0.075 mm 土壤颗粒会抑制土壤入渗且对稳定入渗率的抑制作用极显著。稳定入渗率和平均入渗率与平均粒径呈极显著负相关,渗透总量与平均粒径呈显著负相关。

(3)不同工程堆积体回归模型的拟合优度存在差异,其拟合优度依次为 Kastiakov 模型>通用经验模型>Horton 模型>Philip 模型。9个工程堆积体的入渗最优模型中,Kastiakov 模型占6个,通用经验模型占3个。Kastiakov 模型的拟合优度高于通用经验模型、Horton 模型和 Philip 模型,符合重庆市典型工程堆积体的实际入渗情况。

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] Wang G, Innes J, Yang Y, et al. Extent of soil erosion and surface runoff associated with large-scale infrastructure development in Fujian Province, China [J]. *Catena*, 2012, 89: 22-30.

[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] 丁文斌,李叶鑫,史东梅,等. 2种工程堆积体边坡模拟径流侵蚀对比研究[J]. *土壤学报*,2017,54(3):558-569.

[5] 杨帅,高照良,李永红,等. 工程堆积体坡面植物篱的控蚀效果及其机制研究[J]. *农业工程学报*,2017,33(15):

147-154.

[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冲刷试验研究[J]. *农业工程学报*,2005,21(13):59-62.

[8] 郭明明,王文龙,李建明,等. 神府矿区弃土弃渣体侵蚀特征及预测[J]. *土壤学报*,2015,52(5):1044-1057.

[9] 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.

[10] 史东梅,江东,卢喜平,等. 重庆涪陵区降雨侵蚀力时间分布特征[J]. *农业工程学报*,2008,24(9):16-21.

[11] 蒋光毅,汪三树,郭宏忠,等. 重庆市生产建设项目弃渣场水土保持型生态修复模式[J]. *亚热带水土保持*,2015(1):61-64.

[12] 赵纯勇,杨华,孔德树,等. 南方山地丘陵城市水土流失及对策研究[J]. *中国水土保持*,2002(6):28-29.

[13] 赵骅,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.

[14] 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.

[15] 李叶鑫,史东梅,吕刚,等. 不同恢复年限弃渣场入渗特征研究与评价[J]. *水土保持学报*,2017,31(3):91-95.

[16] 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.

[17] 詹振芝,黄炎和,蒋芳市,等. 砾石含量及粒径对崩岗崩积体渗透特性的影响[J]. *水土保持学报*,2017,31(3):85-90.

[18] 史东梅,蒋光毅,彭旭东,等. 城镇化人为扰动下垫面类型影响水源涵养功能的评价[J]. *农业工程学报*,2017,33(22):92-102.

[19] Peng X, Shi D, Guo H, et al. Effect of urbanisation on the water retention function in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. *Catena*, 2015, 133:241-249.

[20] 康宏亮,王文龙,薛智德,等. 陕北风沙区含砾石工程堆积体坡面产流产沙试验[J]. *水科学进展*,2016,27(2):256-265.

[21] 甘凤玲,何丙辉,王涛. 汶川震区滑坡堆积体坡面人工降雨入渗模拟研究[J]. *水土保持学报*,2015,29(6):19-24.

[22] Shi D, Wang W, Jiang G, et al. Effects of disturbed landforms on the soil water retention function during urbanization process in the Three Gorges Reservoir Region, China [J]. *Catena*, 2016, 144: 84-93.

[23] 董辉,黄润秋,罗潇,等. 堆积碎石土斜坡浅表入渗的空间分布与变异性研究[J]. *岩土工程学报*,2017,39(8):1501-1509.

[24] Wilcox B P, Wood M K, Tromble J M. Factors influencing infiltrability of semiarid mountain slopes [J]. *Journal of Range Management*, 1988, 41(3): 197-206.

[25] 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.

[26] 朱波,高美荣,刘刚才. 紫色泥页岩的风化侵蚀与工程建设增沙[J]. *山地学报*,2001,19(增刊1):50-55.