

海州露天煤矿排土场复垦区不同土地利用类型土壤入渗特征

吕刚, 傅昕阳, 李叶鑫, 王磊, 宋子岭

(辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 为揭示排土场复垦区不同土地利用类型土壤的水源涵养功能, 采用野外实地双环入渗试验和室内理化分析方法, 系统地研究了海州露天煤矿排土场复垦区不同土地利用类型(乔木林地、灌木林地、农用地、荒草地)土壤入渗特性及其影响因素。结果表明: 不同土地利用类型下的土壤初始入渗率、稳定入渗率和累计入渗量均表现为乔木林地>灌木林地>农用地>荒草地; 不同土地利用类型下土壤入渗过程的拟合优度存在差异, G-P综合模型、Kostiakov模型、Horton模型的平均拟合优度依次为0.926, 0.908, 0.905。G-P综合模型相对误差为79.21%~123.69%, 更接近排土场复垦区土壤入渗的实际过程, 可作为排土场复垦区土壤入渗过程的预测模型; 不同土地利用类型下土壤初始入渗率与非毛管孔隙度呈显著正相关, 稳定入渗率和累计入渗量与非毛管孔隙度、砾石含量和部分根系特征呈显著正相关; 采用主成分分析评价的土壤入渗能力排序为乔木林地>灌木林地>农用地>荒草地, 初始入渗率、稳定入渗率、14 min入渗率和累积入渗量的主成分方差累积贡献率为99.047%, 较好地表达了土壤入渗能力。

关键词: 土壤入渗; 土地复垦; 植被恢复; 排土场; 露天煤矿

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)03-0123-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.03.022

Soil Infiltration Characteristics under Different Land Utilization Types in the Dump Reclamation Area of the Haizhou Open-cast Coal Mine

LÜ Gang, FU Xinyang, LI Yexin, WANG Lei, SONG Ziling

(College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000)

Abstract: In order to investigate the function of water conservation in lands of different using types in the dump reclamation area, using field double-ring infiltration method and indoor soil physical and chemical analysis, this paper systematically investigated soil infiltration characteristics and their influencing factors under different utilization types (arbor, shrub, farmland, and grassland) in the dump reclamation area. The results indicated that infiltration rates, stable infiltration rate, and cumulative infiltration under different utilization types in the dump reclamation area showed the following order of arbor > shrub > farmland > grassland; The goodness of fit of the infiltrating processes were different under different utilization types in the dump reclamation area, with the average value being 0.926, 0.908, and 0.905 for the G-P model, the Kostiakov model, and the Horton model, respectively. The relative error of the G-P model was 79.2%—123.69%, it was closed to the actual process of soil infiltration in the reclaimed area, and could be used as the prediction model of soil infiltration process in the reclaimed area. The initial infiltration rate under different utilization types in the dump reclamation area had significantly positive correlations with non-capillary porosity, and stable infiltration rate, while cumulative infiltration had significantly positive correlations with non-capillary porosity, gravel content, root length density, and root surface area density. Principal component analysis showed that soil infiltration capacity followed the order of arbor > shrub > farmland > grassland. The initial infiltration rate, stable infiltration rate, 14 min infiltration rate, and cumulative infiltration together accounted for 99.047% of the principal component variance, and described the soil infiltration capacity well.

Keywords: soil infiltration; land reclamation; vegetation restoration; dump; open-cast coal mine

露天煤矿排土场是在露天开采过程中形成的一个巨型松散土石混合堆积体,对自然环境产生了较恶劣的影响,是工矿建设区水土流失最为严重的区域^[1]。排土场土壤结构松散,土壤质量贫瘠,不仅压占表土、破坏植被,还极易形成严重的次生地质灾害,使矿区生态系统的破坏速度加快。干旱半干旱地区露天煤矿排土场复垦区的土壤水分全部来自天然降水,土壤含水率的大小直接关系到排土场植被恢复的效果,是排土场植被恢复和生态重建的关键限制因子^[2]。为了提高排土场的植被成活率和植被覆盖度,常采用土地复垦等工程技术措施重构土壤。但由于复垦区回填土壤与其下层土壤、煤矸石、石块等物质存在较大的差异,使得复垦区土壤水文过程与原地貌相比差别较大。

土壤水分入渗是指降水、地面水转化为土壤水的一种过程^[3-4],是重要的土壤水文循环过程,是评价土壤抗蚀性和涵养水源能力的重要指标^[3]。因此,如何提高排土场复垦区土壤水分的利用效率,基于土壤水分入渗过程来揭示复垦区土壤的水源涵养作用和抗侵蚀能力,对于加快排土场水土流失治理与植被恢复具有重要意义。很多学者进行了一些关于排土场复垦区土壤入渗特征的研究。付微等^[5]采用圆盘入渗仪研究了神府东胜煤田复垦区不同土地利用类型土壤入渗特性及其空间变异性,得出不同土地利用类型土壤的入渗特性存在着较大的差异,且均表现出随着吸力增大稳定入渗率逐渐减小。杨政等^[6]以露天煤矿排土场新土体上的不同人工草地为研究对象,分析了不同人工草地上生物量、土壤水分及土壤入渗性能,结果表明较单一草种草地的初始入渗率高。杨国敏等^[7]利用稳定性同位素示踪技术,揭示了黑岱沟矿区排土场在降雨发生后易发生优先流形式的土壤水分入渗过程。续海龙等^[8]以抚顺西露天矿复垦矸石山为研究对象,采用野外实地双环水分入渗试验,得

出不同植被类型的初始渗透率、稳渗率、平均入渗率均表现为榆树林地>荒地>农用地。目前研究多致力于分析复垦区不同土地利用类型土壤入渗特征,而针对土壤入渗过程模拟,并筛选最优入渗模型的研究较少。因此,本文以海州露天煤矿排土场为研究对象,利用野外实地双环入渗试验,研究了复垦区不同土地利用类型土壤入渗特征及其影响因素,筛选最优入渗模型,并采用主成分分析评价不同土地利用类型土壤入渗能力,以期从土壤涵养水源的角度优化排土场复垦模式提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

辽宁省阜新市海州露天煤矿排土场位于露天矿坑西南部(121°40′12″ E,41°57′36″ N),面积约 13 km²,夏季炎热,年蒸发量 1 790 mm,年均气温 7.3 ℃,≥10 ℃年积温 3 476 ℃,无霜期 154 d,年均日照时数 2 865.5 h,年均风速 3 m/s,年均降水量 511.4 mm,且多集中于 7—8 月份。排土场区呈阶梯状,分为 10 多个大盘面,每个盘面矸石林立、沟壑纵横,陡坎坡平均坡度 45°,盘面海拔平均高度为 270 m,相对高差为 3~60 m。2004 年,由国土资源部投资对该排土场开展了土地复垦工作。在复垦前期,利用大型复垦设备进行搬运、平整、压实等前期工作,使复垦区域形成较合理的地形地貌,再进行客土回填工程。2005 年排土场复垦工作结束,同年,根据不同土地利用方向进行了排土场植被恢复工作。

综合考虑植被类型、地形状况、岩土排弃等因素,在保证立地条件基本一致的前提下,本研究于 2014 年 4 月根据人工植被恢复现状,在排土场同一区域(复垦年限为 8 a)内选取相邻但相互之间无影响的 4 种土地利用类型样地作为研究对象,分别为乔木林地(刺槐)、灌木林地(紫穗槐)、农用地(玉米)和荒草地。样地基本情况见表 1。

表 1 样地的基本概况

样地 类型	地理 位置	海拔/ m	小地形	水分 来源	枯落物 厚度/cm	枯落物 覆盖度/%	乔木层 郁闭度/%	植物总 盖度/%	水土流失 情况
乔木林地(A)	41°57′22.39″ N 121°39′40.09″ E	263.30	平地	大气降水	1~2	98	65	99	一般
灌木林地(B)	41°57′11.75″ N 121°39′26.62″ E	262.0	平地	大气降水	0.5~1	60	65	98	一般
农地(C)	41°57′43.34″ N 121°40′06.37″ E	262.5	平地	大气降水	0	0	0	5	一般
荒草地(D)	41°57′06.89″ N 121°39′51.26″ E	258.8	平地	大气降水	0.5~1	95	0	97	轻度

1.2 研究方法

1.2.1 野外双环入渗

在排土场复垦区采用自制双

环入渗仪测定不同土地利用类型土壤水分入渗过程,双环入渗仪内环直径为 5 cm,外环直径为 8.5 cm,高

度为 20 cm。选择较为平坦的地面,在去除地表植被和枯落物后将双环入渗仪垂直打入地表 10 cm 深,向内、外环同时加水,水头高为 5 cm。计时开始后,不断向外环加水以保持水头恒定,每隔一定时间向内环加水并记录其加水量,直到连续 3 次加水量基本相同,在计算入渗速率时需要水温进行校正。每个样地重复 3 次。入渗速率计算公式为:

$$V=\frac{10Q_n}{ST_n}$$
 (1)

式中:V 为排土场某一时刻土壤入渗率(mm/min);Q_n 为第 n 次测定时间内的加水量(mL);S 为内环横截面积(cm²);T_n 为第 n 次测定时间间隔(min)。

初始入渗率=最初入渗时段内渗透量/入渗时间,初始入渗时间为 1 min;稳定入渗率为单位时间内的渗透量趋于稳定时的渗透速率;14 min 入渗率为第 14 min 瞬时入渗速率;累计入渗量为前 39 min 内的渗透总量。

1.2.2 土壤物理性质及根系采集 试验前采用样线法调查林冠郁闭度和灌草盖度,计算公式为:郁闭度

=树冠冠幅总长/二对角线总长。

在 4 个样地分别采集 0—10 cm 土层的土样。采用环刀法(高为 5 cm、体积为 200 cm³ 的钢环刀)测定土壤含水率、容重、孔隙度(总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度)、饱和含水量等指标,试验方法参照文献[9]。

砾石(质量)含量采用水洗法测定:将环刀内土壤置于 2 mm 土壤筛上用自来水进行冲洗,在冲洗过程中左右转动筛子,自然风干筛子上的砾石,称重以计算砾石含量。每个指标 3 次重复。

采用根钻法进行野外根系的采集。在距离标准植株 30 cm 处的 0—10 cm 土层中采集植物根系样品(根钻内径 10 cm,长 10 cm),将其放入布袋内并带回实验室,用清水将根系洗净,按照<1 mm,1~2 mm 和 2~5 mm 将植物根系进行分级,采用 WinRHIZO 根系分析系统对各个径级根系长度进行分析,最后测定根系生物量(恒温 75 ℃条件下烘干至恒重),试验为 3 个重复,具体结果见表 2。

表 2 土壤物理性质及根系特征

样地 类型	初始 含水率/%	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	毛管 孔隙度/%	非毛管 孔隙度/%	砾石 含量/%	根长密度/ (cm·cm ⁻³)	根表面积密度/ (cm ² ·cm ⁻³)
乔木林地	11.42	1.19	40.14	14.54	86.53	0.0525	0.0623
灌木林地	10.75	1.28	40.14	11.74	70.65	0.0897	0.0487
农用地	9.42	1.16	40.85	14.82	79.69	—	—
荒草地	9.65	1.28	37.37	14.35	79.65	0.0436	0.0369

2 结果与分析

2.1 土壤入渗特征分析

土壤渗透性是评价土壤入渗快慢的重要指标^[10-13]。随着入渗时间的增加,土壤水分入渗速率逐渐减小,最终趋于稳定。由表 3 可知,排土场复垦区不同土地利用类型的初始入渗率大小为乔木林地(4.08 mm/min)>灌木林地(3.57 mm/min)>农用地(2.55 mm/min)>荒草地(1.53 mm/min),这是由于乔木和灌木发达的植物根系促进了土壤水分运动,而农用地(玉米)较低的初始含水率和不同程度的扰动也提高其初始入渗率;随后土壤入渗率下降趋势趋于缓慢且存在一定程度的波动,各样地 14 min 入渗率为乔木林地(1.67 mm/min)>灌木林地(1.19

mm/min)>农用地(0.68 mm/min)>荒草地(0.31 mm/min),与初始入渗率相比分别降低 59.07%,66.67%,73.33%,79.75%。这是由于随着土壤含水率的增加,水分将土壤颗粒间隙占据,使得土壤饱和度和增大,降低土壤入渗率;排土场复垦区不同土地利用类型土壤稳定入渗率大小为乔木林地(1.51 mm/min)>灌木林地(1.22 mm/min)>农用地(0.51 mm/min)>荒草地(0.2 mm/min),累计入渗量大小为乔木林地(133 mL)>灌木林地(113 mL)>农用地(52 mL)>荒草地(28 mL),与初始入渗率的变化规律相一致,不同土地利用类型之间土壤稳定入渗率和累计入渗量的差异与容重、孔隙度、砾石含量和植物根系等有关。

表 3 土壤入渗特征值

样地 类型	初始入渗率/ (mm·min ⁻¹)	稳定入渗率/ (mm·min ⁻¹)	14 min 入渗率/ (mm·min ⁻¹)	累计入 渗量/mL	土壤剖面层次
乔木林地	4.08	1.51	1.67	133	0—25 cm 为覆土层,25—45 cm 为煤矸石风化层,45—60 cm 为砂土层。
灌木林地	3.57	1.22	1.19	113	0—25 cm 为覆土层,25—45 cm 为煤矸石风化层,45—60 cm 为砂土层。
农用地	2.55	0.51	0.68	52	0—28 cm 为覆土层,28—38 cm 为煤矸石风化层,38—60 cm 为砂土层。
荒草地	1.53	0.20	0.31	28	0—20 cm 为覆土层,20—32 cm 为岩土层,32—60 cm 为煤矸石风化层。

排土场复垦区不同土地利用类型间的土壤入渗特征值存在一定差异。续海龙等^[8]采用野外双环入渗试验研究了抚顺西露天煤矿复垦矸石山不同植被

类型入渗特征,认为除了累计入渗量的其他入渗特征值均表现为:林地>荒草地>农地。本研究表明,初始入渗率、稳定入渗率、14 min 入渗率和累计入渗量

均表现为林地>农用地>荒草地,造成这一差异的主要原因为试验期为农用地耕作初期,农用地表层土壤扰动较大,致使其土壤结构松散而提高了入渗能力。由表 3 可知,不同样地中下层均有煤矸石风化层,已有研究表明,煤矸石上层覆土可以改善土壤质地和土壤结构,提高基质土壤的保水和保肥能力,有利于排土场植被恢复与重建^[14]。根据不同土地利用类型土壤剖面层次的实测数据,分析与土壤入渗特征值之间的关系,结果表明,不同土地利用类型土壤入渗特征值随着煤矸石风化层厚度的增加而减小。这与黄土高原地区不同碎石隔层厚度对土壤入渗影响的相关研究^[15]结果一致。这可能是因为煤矸石风化层作为复垦区土壤隔层,不利于土壤水分入渗,且煤矸石厚度增加,土壤入渗特征值减小。即排土场复垦后会在一定程度上减少土壤水分的垂直渗漏,提高土壤蓄水保土能力,为矿区植被恢复提供水分基础。

2.2 土壤入渗过程模拟

采用 Kostiakov 模型(模型 1)、Horton 模型(模型 2)和 Green-Ampt 入渗公式与 Philip 入渗公式的综合模型(模型 3),对排土场复垦区不同样地土壤水分入渗过程进行拟合,比较不同模型的拟合优度(表

4),绘制实测数据与模型计算值的关系曲线(图 1)。由表 4 可知,不同土地利用类型下土壤入渗过程的回归模型的拟合优度存在差异,大小为 G-P 综合模型>Kastiakov 模型>Horton 模型。G-P 综合模型拟合的决定系数为 0.896~0.939,平均为 0.926;Kastiakov 模型拟合的决定系数为 0.894~0.941,平均为 0.908;Horton 模型拟合的决定系数为 0.835~0.983,平均为 0.905。各样地的最优模型的决定系数在 0.896~0.983 之间,其中 G-P 综合模型占 2 个,表明 G-P 综合模型较较 Kastiakov 模型和 Horton 模型更能全面地反映露天矿排土场复垦土壤入渗的实际情况,且该模型可以更好地模拟和预测排土场的入渗过程和入渗能力。

利用 G-P 综合模型拟合了排土场复垦区不同土地利用类型土壤水分入渗过程,并得到了相应的模型参数。由表 4 可知,G-P 综合模型的决定系数在 0.891~0.939 之间,表明排土场复垦区不同土地利用类型土壤入渗速率和时间符合幂函数方程。其中 M 值在 1.527~3.132 之间, N 值在(-0.037)~0.871 之间,其大小和初始含水量相关,能较好的反映土壤初始含水率的变化情况。

表 4 土壤入渗模型拟合参数

样地 类型	Kastiakov 模型拟合参数			Horton 模型拟合参数				G-P 综合模型参数		
	$f(t)=at^{-n}$ (模型 1)			$f(t)=f_c+(f_0-f_c)e^{-kt}$ (模型 2)				$f(t)=Mt^{-0.5}+N$ (模型 3)		
	a	n	R^2	f_c	f_0-f_c	k	R^2	M	N	R^2
乔木林地	3.902	0.309	0.894	1.566	3.731	0.379	0.983	3.132	0.871	0.936
灌木林地	3.360	0.312	0.901	1.346	3.098	0.374	0.888	2.718	0.732	0.931
农用地	2.470	0.496	0.896	0.531	2.448	0.284	0.835	2.434	0.024	0.896
荒草地	1.510	0.536	0.941	0.299	1.671	0.337	0.913	1.527	-0.035	0.939

注: $f(t)$ 为入渗速率; t 为入渗时间; n 为经验系数; $f(c)$ 为稳定入渗率; f_0 为初始入渗率; k 为土壤物理特征指数; a 、 m 、 N 为拟合参数。

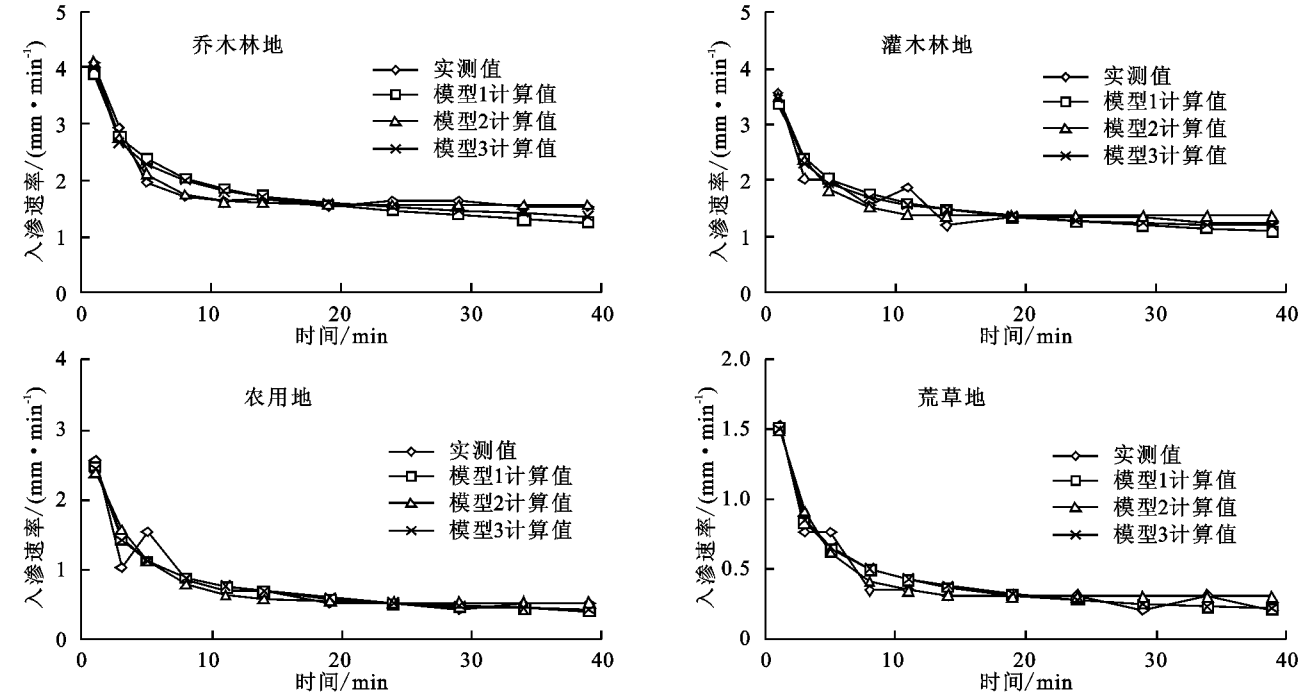


图 1 复垦区各样地土壤水分入渗过程实测曲线与模型计算曲线

将实测数据与模型计算值进行对比,分别计算入渗率的绝对误差和相对误差(表 5)。由表 5 可知,Kastiakov 模型、Horton 模型和 G-P 综合模型的绝对误差变化范围分别为 1.85~8.69,0.79~5.06,1.46~6.00 mm/min,相对误差的变化范围为 95.58%~120.88%,40.64%~95.47%,79.21%~123.69%。对比 3 个模型可知,G-P 综合模型和

Horton 模型的相对误差较小,更接近排土场复垦区土壤入渗的实测过程;结合图 1 可知,G-P 综合模型的拟合曲线接近实测入渗曲线。因此,结合排土场复垦区各个样地土壤入渗模型拟合优度和实测入渗曲线与计算曲线的误差,认为 G-P 综合模型更符合排土场复垦土壤入渗的实际过程,可以很好地模拟其入渗过程并进行预测。

表 5 实测入渗率与模型计算值的绝对误差和相对误差

编号	Kastiakov 模型		Horton 模型		G-P 综合模型	
	绝对误差/	相对误差/	绝对误差/	相对误差/	绝对误差/	相对误差/
	(mm·min ⁻¹)	%	(mm·min ⁻¹)	%	(mm·min ⁻¹)	%
乔木林地	8.69	120.88	5.06	82.75	6.00	79.21
灌木林地	2.33	129.19	0.79	40.64	1.77	96.54
农用地	2.07	95.58	1.63	77.76	2.66	123.69
荒草地	1.85	115.92	1.61	95.47	1.46	89.37

2.3 土壤水分入渗影响因素分析

土壤水分入渗是一个复杂过程,其入渗特性与土壤质地、土壤孔隙状况、根系数量及分布等因素有关^[3-4]。因此,选取容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、饱和含水量、砾石含量、根长密度和根表面积密度 8 个相关指标作为影响因子,分析其与初始入渗率、稳定入渗率和累计入渗量 3 个入渗特征值的相关性。由表 6 可知,初始入渗率与非毛管孔隙度显著正相关,稳定入渗率和累计入渗量与非毛管孔隙度极显著正相关。土壤初始入渗率、稳定入渗率和累计入渗量与容重负相关。说明土壤的渗透能力与非毛管孔隙度紧密相关,相关研究表明^[16-17],非毛管孔隙度越高,土壤渗透能力性越强,但本研究表明,农地表层非毛管孔隙度较高,但渗透性较差,与以往研究有一定差异,可能是因为影响土壤渗透能力的因素较多,

如:土壤颗粒组成、土壤容重、根长密度、根表面积密度等,同时农地的反复耕作和人为活动干扰也会在一定程度上影响土壤渗透能力,且本研究重点研究了 0—10 cm 表层土壤物理性质和渗透能力,而灌木和乔木的根系较草本植物根系深,10—28 cm 土层的状况也是影响入渗差异的另一个原因。土壤稳定入渗率和累计入渗量与砾石含量、根长密度和根表面积密度呈显著相关关系,初始入渗率与其也存在相关关系,但不显著。Reynolds^[18]认为土壤渗透能力随着根长密度的增加而显著提高,这是由于根系的穿插和延伸作用会形成植物根孔,土壤水分优先沿根孔运动。根表面积密度反映了根系与土壤之间的接触面积和紧实程度,形成的接触面为土壤水分运动提供导水通道。本研究中根表面积密度大小为乔木林地>灌木林地>荒草地,与入渗速率变化规律相一致。

表 6 土壤入渗性能相关性分析

入渗特征值	土壤容重	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	饱和含水量	砾石含量	根长密度	根表面积密度
初始入渗率	-0.712	0.724	-0.571	0.957*	0.527	0.751	0.567	0.624
稳定入渗率	-0.841	0.761	-0.644	0.932**	0.854	0.864**	0.754*	0.784*
累计入渗量	-0.817	0.757	-0.624	0.917**	0.795	0.813*	0.704*	0.752*
样本数/个	12	12	12	12	12	12	9	9

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

2.4 土壤水分入渗能力评价

为了评价排土场复垦区 4 种土地利用类型土壤入渗能力,利用 SPSS 软件对初渗率、稳渗率、14 min 入渗率和渗透总量等 4 个指标进行主成分分析,以揭示各指标对土壤入渗能力的贡献。

由表 7 可知,抽取的主成分贡献率达到了 99.047%,完成了对总方差的解释,因子负荷量表明主成分 4 个变量的正荷载差异较小,以稳定入渗率 X_2 最大,为 0.502,可以解释为土壤入渗能力的量

度。其次为累积入渗量、初始入渗率和 14 min 入渗率,分别为 0.501,0.499,0.499。其主成分方程为 $P_1=0.499\times\hat{X}_1+0.502\times\hat{X}_2+0.499\times\hat{X}_3+0.501\times\hat{X}_4$ ($\hat{X}_i$ 为各指标的标准化数据),第 1 主成分的贡献率为 99.047%,主成分 2 的贡献率为 0.523%,说明对于土壤入渗能力的表述无法用单一的土壤入渗特征指标解释,需要将初始入渗率、稳定入渗率、14 min 入渗率和累积入渗量等 4 个指标综合起来,进一步解释土壤入渗能力。

表 7 土壤入渗能力的 PCA 分析

主成分	X_1	X_2	X_3	X_4	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
P1	0.499	0.502	0.499	0.501	3.962	99.047	99.047
P2	0.578	-0.404	0.407	-0.577	0.021	0.523	99.569

为了更好地比较各土地利用类型土壤入渗能力的强弱,通过得出的主成分方程,计算各土地利用类型土壤渗透能力得分。由表 8 可知,海州露天煤矿排土场复垦区土壤入渗能力强弱为乔木林地>灌木林地>农用地>荒草地。这可能是因为矿区排土场复垦区林地土壤有机质含量高,自身枯枝落叶和根系对土壤有一定的改良作用,所以其入渗能力较其他土地利用类型强,而荒草土壤腐殖质含量低,结构性差,这可能是其土壤入渗能力差的原因。

表 8 土壤入渗能力评价

土地利用类型	得分	排序
乔木林地	2.156	1
灌木林地	1.087	2
农用地	-0.992	3
荒草地	-2.251	4

3 结论

(1)排土场不同土地利用类型的初始入渗率、稳定入渗率、14 min 瞬时入渗率、稳定入渗率和累计入渗量均表现为乔木林地>灌木林地>农用地>荒草地,这与排土场复垦区不同土地利用类型下土壤容重、孔隙度、砾石含量和植物根系等有关。

(2)排土场不同土地利用类型下土壤入渗过程的回归模型的拟合优度存在差异,其拟合优度依次为 G-P 综合模型(0.926)>Kostiakov 模型(0.908)>Horton 模型(0.905),各模型入渗速率的相对误差为 95.58%~120.88%,40.64%~95.47%,79.21%~123.69%。表明 G-P 综合模型较符合露天矿排土场复垦土壤入渗的实际情况,且该模型可以更好地模拟和预测排土场的入渗过程和入渗能力。

(3)排土场复垦区不同土地利用类型下土壤初始入渗率与非毛管孔隙度呈显著正相关,稳定入渗率与非毛管孔隙度和砾石含量呈极显著正相关,与根长密度和根表面积密度呈显著正相关,累计入渗量与非毛管孔隙度呈极显著正相关,与砾石含量、根长密度和根表面积密度呈显著正相关。

(4)对土壤初始入渗率、稳定入渗率、14 min 入渗率和累积入渗量 4 个指标进行主成分分析,得出各指标对土壤入渗能力的累积贡献率达到 99.047%,其主分量方程为 $P_1 = 0.499 \times \hat{X}_1 + 0.502 \times \hat{X}_2 + 0.499 \times \hat{X}_3 + 0.501 \times \hat{X}_4$, ($\hat{X}_i$ 为各指标的标准化数据),采用该方程计算得分评价的研究区不同土地利用类型土壤入渗能力排序为乔木林地>灌木林地>农用地>荒草地。

参考文献:

[1] 吕春娟,白中科,陈卫国,等. 黄土区露天矿排土场水分调控技术研究[J]. 水土保持通报,2011,31(1):160-164.

[2] 潘德成,邓春晖,吴祥云,等. 矿山复垦区土壤水分时空分布对植被恢复的影响[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(3):96-100.

[3] 高婵婵,赵传燕,王超,等. 黑河上游天老池流域不同植被下土壤理化性质和入渗特征[J]. 水土保持学报,2016,30(1):117-121,126.

[4] 刘营营,余冬立,刘冬冬,等. 土地利用与土壤容重双因子对土壤水分入渗过程的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(5):84-88,94.

[5] 付微,邵明安,黄明斌. 神府东胜煤田复垦区土壤入渗特性的试验研究[J]. 水土保持学报,2008,22(3):14-17.

[6] 杨政,王冬,刘玉,等. 矿区排土场人工草地土壤水分及入渗特征效应[J]. 草业学报,2015,24(12):29-37.

[7] 杨国敏,王力. 黑岱沟矿区排土场土壤水的氢氧稳定性同位素特征及入渗规律[J]. 煤炭学报,2015,40(4):944-950.

[8] 续海龙,魏忠义. 抚顺西露天矿复垦矸石山不同植被类型水分入渗研究[J]. 江西农业学报,2009,21(9):169-170.

[9] 中科院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京:科学出版社,1978.

[10] 李建兴,何丙辉,梅雪梅,等. 紫色土区坡耕地不同种植模式对土壤渗透性的影响[J]. 应用生态学报,2013,24(3):725-731.

[11] 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.

[12] 王纪杰,俞元春,陈容,等. 不同栽培代次、林龄的桉树人工林土壤渗透性研究[J]. 水土保持学报,2011,25(2):78-82,103.

[13] 吕刚,顾宇书,魏忠平,等. 白石砬子自然保护区几种主要植被类型土壤入渗特性研究[J]. 生态环境学报,2012,22(5):780-786.

[14] 胡振华,王电龙,呼起跃,等. 风化煤矸石入渗规律模拟[J]. 中国水土保持科学,2008,6(2):55-59.

[15] 马东豪. 黄土区土石混合介质水分运动试验研究及数值模拟[D]. 北京:中国科学院地理科学与资源研究所,2008.

[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] 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.

[18] Reynolds E R C. The percolation of rainwater through soil demonstrated by fluorescent dyes[J]. European Journal of Soil Science, 2006, 17(1): 127-132.