

采石废弃地弃渣与农田土混合土壤粒径特征及水文效应

王佳欢¹, 杨新兵¹, 刘彦林², 赵小勇², 赵波¹, 史宝胜³

(1.河北农业大学林学院,河北 保定 071000;2.河北地矿建设工程集团有限责任公司,
河北省地矿局国土资源勘查中心,石家庄 050000;3.河北农业大学园林与旅游学院,河北 保定 071000)

摘要: 探究弃渣与农田土不同混合比例下重构土体粒径特征和水文效应的差异,对于提高采石废弃地重构土体的结构稳定、水资源高效利用以及资源利用化具有重要意义。以采石场弃渣和农田土为重构基质,以0:10(C₁),3:7(C₂),5:5(C₃),7:3(C₄),10:0(C₅)体积比例混合,采用野外土柱模拟方法,探究不同配比下土壤粒径特征和水文效应的差异。结果表明:(1)不同配比下弃渣含量越高,砂粒比重越大、黏粒和粉粒比重越小,砂粒比重最大为61.50%,分散度、偏度、峰态等群体特征参数变化分别为降低、升高、升高,不均匀系数显著降低,曲率系数在1~3波动,分形维数呈不显著降低趋势,土体结构朝不稳定方向变化。(2)混合土壤弃渣含量增大会引起容重变大、毛管孔隙和总孔隙数量减少、非毛管孔隙数量增加等土壤孔隙方面以及田间持水、毛管持水、饱和持水三者下降等土壤持水性能方面的变化,同时,初始入渗、稳定入渗、平均入渗等速率变化以及累计入渗量基本呈增加趋势,稳渗用时呈波动式变化。不同配比下土壤入渗模型拟合 $R^2 \geq 0.856$,RRMSE ≤ 0.153 ,整体上模型拟合效果较好,灰色关联分析结果表明,C₅入渗性能最好。(3)弃渣:农田土以3:7体积比例混合后的土壤在粒径结构和水文效应2个方面评价结果中表现最佳。

关键词: 采石废弃地;粒径特征;水文效应;灰色关联度

中图分类号: S156.99

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)03-0338-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.03.048

Experimental Study on Particle Size Characteristics and Hydrological Effect of Mixed Soil of Quarrying Waste Residue and Farmland Soil

WANG Jiahuan¹, YANG Xinbing¹, LIU Yanlin², ZHAO Xiaoyong², ZHAO Bo¹, SHI Baosheng³

(1.College of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000;

2.Hebei Geology and Mineral Resources Construction Engineering Group Co., Ltd. Land and

Resources Exploration Center of Hebei Geology and Mineral Resources Bureau, Shijiazhuang 050000;

3.College of Landscape Architecture and Tourism, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000)

Abstract: Exploring the difference of particle size characteristics and hydrological effect of reconstructed soil under the different mixture ratio of abandoned slag and farmland soil is of great significance for improving the structural stability, efficient utilization of water resources and utilization of resources in the quarrying waste-land. Taking the abandoned residue of quarry and farmland soil as reconstruction matrix as research objects, the soil column simulation method was used to explore the difference of soil particle size structure and hydro-logical effect at different both volume ratios of 0:10 (C₁), 3:7 (C₂), 5:5 (C₃), 7:3 (C₄) and 10:0 (C₅) respectively. The results showed that: (1) The higher ratios of abandoned slag resulted in the greater specific gravity of sand, and the smaller of clay and silt. The maximum specific gravity of sand was 61.50%. The characteristic parameters of particle size, such as dispersion, skewness and kurtosis, decreased, in-creased and increased respectively, and the non-uniformity coefficient decreased significantly, the curvature coefficient fluctuated between 1 to 3, and the fractal dimension showed an insignificant decreasing trend. The soil structure changed in an unstable direction. (2) The increase of abandoned residue in mixed soil would lead to the increase of bulk density, the decrease of the number of capillary pores and total pores, the in-crease of the number of non-capillary pores, and the decrease of field water holding capacity, capillary water

收稿日期:2021-10-30

资助项目:河北省重点研发计划项目(20374208D)

第一作者:王佳欢(1995—),男,硕士研究生,主要从事林业生态研究。E-mail:706585572@qq.com

通信作者:杨新兵(1978—),男,博士,副教授,主要从事水土保持和林业生态研究。E-mail:yangxinbing2001@126.com

holding capacity and saturated water holding capacity. At the same time, the changes of initial infiltration, stable infiltration, average infiltration and cumulative infiltration basically showed an increasing trend. There was a fluctuating change in the used time of steady infiltration. Under different ratios, the soil infiltration model fitted well with $R^2 \geq 0.856$, $RRMSE \leq 0.153$. The grey correlation analysis showed that C_5 had the best infiltration performance. (3) The mixed soil with the abandoned residue : farmland soil of 3 : 7 gave the best performance in the particle size structure and hydrological effect.

Keywords: quarrying wasteland; particle size characteristics; hydrological effect; grey correlation degree

伴随矿石原料的开采,其浪费土地资源的开采方式致使采石废弃地的地质结构和外貌特征发生较大变化,废弃地土壤出现的一系列环境质量問題受到广泛关注^[1]。受采石活动的影响,受损土壤容重大、紧实度高、养分流失严重,弃渣的夹杂令土壤昼夜温差大、保水性差,植物难以存活,生态恢复能力低下,属严重退化土壤^[2],因此,土壤环境修复成为采石场废弃地生态修复的首要问题。土壤本身是一种由大小各异、形状不规则的小颗粒以及颗粒孔隙组成的基质,颗粒的形状大小、排列分布既影响着土体的稳定性,又关系着水文效应,因而重构土体的粒径特征^[3]以及水文效应^[4]是土壤环境修复的研究重点。

基于采石废弃地土表缺失现状,实际生产中往往采用 2 种性质差异较大的基质进行混合,既达到土壤环境修复的目的,又起到废物利用的效果,是现行条件下较为推荐的修复手段。目前,关于基质混合方面的研究国内外早有报道,Dunsford 等^[5]将工业固体废弃物中的硫化铁与荒地土壤进行混合,其混合基质的肥力与持水性能较荒地土壤有较大提升;Wang 等^[6]通过研究土壤、粉煤灰、煤矸石、粉煤灰与煤矸石混合物等 4 种基质的水文特征发现,混合物与土壤具有相似的渗透性和体积含水率;王志刚等^[7]采用黏土与表土作为矿区排土场的土壤重构材料,结果发现,1 : 2 黏土表土配比下重构基质的持水性能显著提高;程杰等^[3]通过研究砷砂岩与沙复配后的颗粒变化发现,砷砂岩复配比例越高,复配土颗粒越细、分形维数越高;张露等^[8]研究砷砂岩和风沙土复配后的粒度组成变化,得到砷砂岩 : 风沙土以 1 : 2 或 1 : 5 的质量比复配土颗粒级配特征良好的结果。上述研究证明,基质混合确实具有促进新土壤朝颗粒较细、持水性能较强以及结构稳定等方面变化的效果。

石家庄西部山区矿产资源丰富,在历经上世纪采石活动后出现大量“掌子面”“白茬山”,表土缺失致使覆绿难度大,当地有关部门为解决土壤问题常常大量覆土,极大程度浪费现有的土地资源。为解决上述问题,基于“多聚土、少客土”原则,本研究将石家庄市鹿泉区一采石废弃地弃渣和附近农田土作为试验材料,通过混合基质充填土柱试验,阐明不同混合比例下土

壤粒径特征和水文效应差异,筛选最优配比,为鹿泉区采石废弃地土壤环境修复提供科学借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

石家庄市鹿泉区位于河北省中南部($37^{\circ}88'08''$ — $38^{\circ}27'27''N$, $114^{\circ}18'55''$ — $114^{\circ}51'36''E$),东环市区,西临井陘,北邻灵寿、平山,南接元氏,总面积 603 km^2 。鹿泉区为太行山低山丘陵区,试验点海拔 $310\sim 400\text{ m}$,属小起伏山地($200\sim 500\text{ m}$)。全区属暖温带半湿润季风型大陆性气候,冬冷夏热,雨热同期,最热 7 月平均气温 $27.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,最冷 1 月平均气温 $-1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,降水集中于 7—8 月,多年平均降水量 542.2 mm ,全年无霜期 219 天。境内滹沱河、太平河、清水河等河流均属海河水系,土壤类型主要为石灰性褐土,森林类型为暖温带落叶阔叶林。

1.2 试验设计

供试基质为鹿泉区某废弃石灰岩采石场弃渣和附近农田土,弃渣过 2 cm 筛子,其机械组成和物理性质为:石灰岩石块体积分数 46.26% ,石灰岩石砾体积分数 21.28% ,砂粒体积分数 19.33% ,粉粒体积分数 12.96% ,黏粒体积分数 0.17% ^[9],容重 1.60 g/cm^3 ,总孔隙度 26.91% ,农田土机械组成和物理性质为:石砾体积分数 51.61% ,砂粒体积分数 20.48% ,粉粒体积分数 25.34% ,黏粒体积分数 2.57% ,容重 1.07 g/cm^3 ,总孔隙度 51.18% 。弃渣与农田土按不同体积比例进行混合,混合比例分别为 $0 : 10(C_1)$, $3 : 7(C_2)$, $5 : 5(C_3)$, $7 : 3(C_4)$, $10 : 0(C_5)$,2 种基质风干后经过均匀搅拌装入容器,每个处理设置 3 个重复。选用外径 20 cm 、内径 19 cm 、长度 35 cm 的 PVC 管材作为装土容器,装土高度为 30 cm ,底部采用 300 目纱网封底。为模拟土壤环境,修筑 30 cm 深水泥槽,底部设排水口,将模拟土柱置于土槽中,试验布设于 2020 年 12 月 2 日。

1.3 试验方法

2021 年 6 月进行土壤入渗试验,试验采用一维垂直定水头法,选用外径 13 cm 、内径 12 cm 、高 100 cm 的马氏瓶作为供水装置,试验前对其进行加压试水保证气密性,调整马氏瓶位置,令水头高度保持在

土面以上 3 cm 处。试验开始时,迅速向土柱加水至 3 cm 刻度处,打开供水阀门并开始计时,参考张志华等^[10]的研究结果,分别在供水开始后的 1,3,6,10,15 min 时记录马氏瓶水位刻度,15 min 后每隔 5 min 记录 1 次水位刻度,当下降时间出现 3 次水位差一致时表明达到稳渗。整理数据并计算初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率、稳渗用时、累计入渗量。

土壤入渗分别采用 Horton、Philip、Kostiakov 模型进行拟合^[11],计算公式为:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) \times e^{-kt}$$

式中: t 为入渗时刻(min); $f(t)$ 为 t 时刻的入渗速率(mm/min); f_c 为稳定入渗速率(mm/min); f_0 为初始入渗速率(mm/min); e 为数学常数; k 为模型拟合参数。

$$f(t) = 0.5 \times S \times t^{-0.5} + A$$

式中: S 为吸渗率(mm/min^{0.5}); A 为模型拟合参数。

$$f(t) = \beta \times t^{-\alpha}$$

式中: β 、 α 为模型拟合参数。

入渗试验模型拟合效果采用决定系数(R^2)和相对均方根误差(RRMSE)判定,其中,决定系数(R^2)用于评价模型符合实际的程度,数值为 0~1,数值越接近 1 则表示符合程度越高,拟合效果越好。相对均方根误差(RRMSE)用于评价拟合值与实测值之间的差异程度,数值为 0~1,数值越接近 0 则表示模型预测准确度越高,计算公式^[12]为:

$$\text{RRMSE} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (O_i - P_i)^2} / \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k O_i^2$$

式中: O_i 为实际观测值(mm/min); P_i 为拟合值(mm/min)。

入渗试验结束后,采用环刀法测量土壤容重、孔隙度、持水量等指标^[13]。风干样品经 30% 过氧化氢溶液去除有机质、稀盐酸去除钙盐、蒸馏水除酸后利用 Bettersize 2000 激光粒度仪测定粒径体积百分含量,参考中国制粒径划分标准(1985 年)^[9]进行粒级分级:细黏粒(<1 μm)、粗黏粒(1~2 μm)、细粉粒(2~5 μm)、中粉粒(5~10 μm)、粗粉粒(10~50 μm)、细砂粒(50~250 μm)、粗砂粒(250~1 000 μm)。

粒径群体特征包括颗粒分散程度、对称性、集中程度,分别用分散度(S_e)、偏度(S_{rk})、峰态(S_k) 3 个指标表征^[14]。级配特征包括颗粒分布均匀程度和百分含量累计分布情况,分别采用不均匀系数(C_u)和曲率系数(C_s) 2 个指标表征,其中,不均匀系数(C_u)>5 表明颗粒分布范围广,数值较大时需参考曲率系数(C_s),级配状况良好时曲率系数(C_s)为 1~3^[14]。体积分形维数(D)采用 Tyler 的方法计算,黏粒含量越多、砂粒含量越少、土体结构越稳定,分形维数(D)则越大^[15]。指标具体计算公式为:

$$S_e = \sqrt{D_{75}/D_{25}}$$

$$S_{rk} = \sqrt{(D_{75} \times D_{25})/D_{50}^2}$$

$$S_k = (D_{75} \times D_{25})/(D_{90} \times D_{10} \times 2)$$

$$C_s = D_{30}^2/(D_{60} \times D_{10})$$

$$C_u = D_{60}/D_{10}$$

$$(3-D) \lg(R_i/R_{\max}) = \lg(V_{(r < R_i)}/V_T)$$

式中: D_{10} 、 D_{25} 、 D_{30} 、 D_{60} 、 D_{75} 、 D_{90} 为颗粒体积含量累计值达 10%、25%、30%、60%、75%、90% 时的粒径; r 为粒径; R_i 为颗粒径级的平均粒径; $R_{\max}$ 为试验结果的最大粒径; V_T 为粒径总体积; V 为体积; D 为分形维数, $\lg(R_i/R_{\max})$ (横坐标)与 $\lg(V(r < R_i)/V_T)$ (纵坐标)的拟合方程斜率为 $3-D$ 。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 24.0 软件进行数据处理,Origin 2018 软件进行绘图,土壤入渗性能采用灰色关联度法分析,粒径特征和水文效应评价采用坐标综合评定法。

2 结果与分析

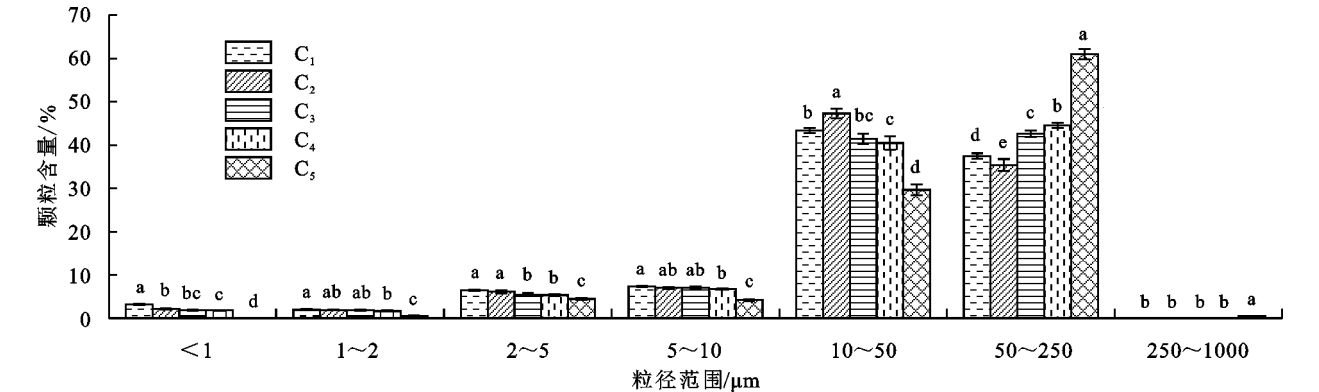
2.1 不同配比下土壤粒级组成和粒径结构比较

2.1.1 粒级组成比较 由图 1 可知,弃渣和农田土按体积比例混合后,细黏粒(<1 μm)体积分数最高 C_1 为 3.22%,其次 C_2 为 2.19%,最低 C_5 为 0%。粗黏粒(1~2 μm)体积分数最高 C_1 为 1.96%,其次 C_2 为 1.92%,最低 C_5 为 0.55%。黏粒体积分数大小排序为 $C_1 > C_2 > C_3 > C_4 > C_5$ 。细粉粒(2~5 μm)体积分数最高 C_1 为 6.47%,其次 C_2 为 6.15%,最低 C_5 为 4.49%。中粉粒(5~10 μm)体积分数最高 C_1 为 7.39%,其次 C_3 为 7.10%,最低 C_5 为 4.21%。粗粉粒(10~50 μm)体积分数最高 C_2 为 47.30%,其次 C_1 为 43.36%,最低 C_5 为 29.64%。粉粒体积分数大小排序为 $C_2 > C_1 > C_3 > C_4 > C_5$ 。细砂粒(50~250 μm)体积分数最高 C_5 为 60.99%,其次 C_4 为 44.54%,最低 C_2 为 35.40%。粗砂粒(250~1 000 μm)体积分数最高 C_5 为 0.51%,其他土壤不含粗砂粒。砂粒体积分数大小排序为 $C_5 > C_4 > C_3 > C_1 > C_2$ 。从粒径累计情况来看,随着弃渣含量的增加,黏粒(<2 μm)体积分数降低,粉粒(2~50 μm)体积分数呈下降趋势,砂粒(50~1 000 μm)体积分数呈上升趋势,说明弃渣含量越高,土壤颗粒越粗。

2.1.2 粒径结构比较 表 1 为不同配比下土壤粒径结构,群体特征中,由 C_1 到 C_5 分散度(S_e)逐渐降低,偏度(S_{rk})和峰态(S_k)基本呈增加趋势,说明弃渣含量增加可降低土壤分散程度,提高对称性和集中程度。所有土壤不均匀系数(C_u)均>5,说明各配比下的土壤均为不连续级配,其级配状况须通过曲率系数(C_s)来表

达,结果显示,土壤曲率系数(C_s)为 1.48~1.82,满足 1~3 良好级配条件,说明废弃采石场附近农田土、现场弃渣以及不同体积比例混合的土壤均属级配良好基

质。随着弃渣含量的增加,分形维数(D)逐渐降低,说明弃渣可降低黏粒含量、增加砂粒含量,土体结构偏向不稳定,易发生侵蚀。



注:图柱上方不同小写字母表示相同粒级范围不同配比土壤间差异在 0.05 水平上显著。

图 1 不同配比下土壤粒级分布

表 1 不同配比下土壤粒径结构

土壤类型	分散度(S_e)	偏度(S_{rk})	峰态(S_k)	不均匀系数(C_u)	曲率系数(C_s)	分形维数(D)
C_1	$2.08\pm0.04a$	$0.64\pm0.02c$	$1.03\pm0.03d$	$10.47\pm0.17b$	$1.54\pm0.09ab$	$2.30\pm0.12a$
C_2	$2.05\pm0.05a$	$0.62\pm0.01c$	$1.10\pm0.03c$	$11.66\pm0.23a$	$1.48\pm0.16b$	$2.18\pm0.17a$
C_3	$2.01\pm0.06a$	$0.64\pm0.02c$	$1.12\pm0.02c$	$9.75\pm0.34c$	$1.72\pm0.10ab$	$2.14\pm0.04a$
C_4	$1.96\pm0.04ab$	$0.71\pm0.03b$	$1.20\pm0.03b$	$8.32\pm0.23d$	$1.77\pm0.07a$	$2.09\pm0.15a$
C_5	$1.85\pm0.04b$	$0.86\pm0.04a$	$1.40\pm0.04a$	$7.70\pm0.40d$	$1.82\pm0.10a$	$2.02\pm0.14a$

注:表中数值为平均值±标准误;同列不同小写字母表示不同配比土壤间差异在 0.05 水平上显著。下同。

2.2 分形维数与粒级组成及粒径结构的关系

2.2.1 分形维数与粒级组成的关系 由表 2 可知,分形维数(D)与黏粒、粉粒呈正相关关系($P<0.01$),与砂粒呈负相关关系($P<0.05$),即黏粒、粉粒含量越高,砂粒含量越低,分形维数(D)越大。分形维数(D)与黏粒拟合关系最好, R^2 为 0.493,粉粒次之, R^2 为 0.437,与砂粒拟合 R^2 最低,为 0.382。

表 2 土壤分形维数与粒级组成相关关系

粒级组成	拟合方程	R^2	相关系数
黏粒	$Y=0.062X+1.933$	0.493	0.702**
粉粒	$Y=0.012X+1.534$	0.437	0.661**
砂粒	$Y=-0.009X+2.558$	0.382	-0.618*

注:*表示 0.05 水平上显著相关;**表示 0.01 水平上显著相关。下同。

2.2.2 分形维数与粒径结构的关系 由表 3 可知,分形维数(D)与分散度(S_e)、不均匀系数(C_u)呈正相关关系($P<0.01$),与偏度(S_{rk})、峰态(S_k)呈负相关关系($P<0.01$),与曲率系数(C_s)不相关($P>0.05$),即分散度(S_e)、不均匀系数(C_u)越大,偏度(S_{rk})、峰态(S_k)越小,分形维数(D)越大。分形维数(D)与分散度(S_e)拟合关系最好, R^2 为 0.770,峰态(S_k)次之, R^2 为 0.585,与曲率系数(C_s)拟合关系最差, R^2 为 0.012。

2.3 不同配比下土壤水文效应

2.3.1 孔隙度与持水量 由表 4 可知,从 C_1 至 C_5 容

重逐渐升高,当弃渣含量达到 50% 时容重发生显著变化,再增加无显著变化。毛管孔隙度和总孔隙度随弃渣含量增加基本呈降低趋势,非毛管孔隙度呈增加趋势,结果显示,弃渣加入时,毛管孔隙和总孔隙首先发生显著变化,弃渣含量达到 50% 非毛管孔隙发生显著变化,说明毛管孔隙对基质变化较为敏感。田间持水量、毛管持水量和饱和持水量均表现为 C_1 最大, C_5 最小,随弃渣体积含量增加均呈降低趋势。

表 3 土壤分形维数与粒径结构相关关系

粒径结构	拟合方程	R^2	相关系数
分散度	$Y=1.181X-0.203$	0.770	0.877**
偏度	$Y=-0.989X+2.831$	0.475	-0.689**
峰态	$Y=-0.787X+3.068$	0.585	-0.765**
不均匀系数	$Y=0.061X+1.565$	0.421	0.649**
曲率系数	$Y=0.075X+2.021$	0.012	0.110

2.3.2 入渗性能比较 由图 2 和图 3 可知,不同配比下土壤初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率和稳渗用时差异均达到显著水平($P<0.05$),其中,初始入渗速率为 4.40~24.59 mm/min,大小排序为 C_5 (24.59 mm/min) $>C_4$ (19.20 mm/min) $>C_3$ (15.17 mm/min) $>C_2$ (12.40 mm/min) $>C_1$ (4.40 mm/min);稳定入渗速率为 0.08~0.80 mm/min,大小排序为 C_5 (0.80 mm/min) $>C_4$ (0.68 mm/min) $>C_3$ (0.24 mm/min) $>C_2$ (0.14 mm/min) $>C_1$ (0.08 mm/min);平均入渗速率为 0.69~2.34 mm/min,大小排

序为 $C_5(2.34\text{ mm/min}) > C_4(1.86\text{ mm/min}) > C_2(1.00\text{ mm/min}) > C_3(0.77\text{ mm/min}) > C_1(0.69\text{ mm/min})$; 稳渗用时为 30~60 min, 大小排序为 $C_3(60\text{ min}) > C_1(45\text{ min}) = C_2(45\text{ min}) > C_5(35\text{ min}) > C_4$

(30 min)。除 C_2 与 C_3 外其他土壤累计入渗量差异均达显著水平($P < 0.05$), 累计入渗量为 31.32~86.22 mm, 大小排序为 $C_5(86.22\text{ mm}) > C_4(59.96\text{ mm}) > C_2(45.77\text{ mm}) > C_3(44.78\text{ mm}) > C_1(31.32\text{ mm})$ 。

表 4 不同配比下土壤孔隙度与持水量

土壤类型	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	毛管 孔隙度/%	非毛管 孔隙度/%	总孔隙度/%	田间 持水量/%	毛管 持水量/%	饱和 持水量/%
C_1	$1.07 \pm 0.07\text{c}$	$48.82 \pm 0.80\text{a}$	$2.36 \pm 0.29\text{c}$	$51.18 \pm 0.84\text{a}$	$41.88 \pm 1.19\text{a}$	$44.72 \pm 0.90\text{a}$	$46.95 \pm 1.23\text{a}$
C_2	$1.24 \pm 0.06\text{bc}$	$42.54 \pm 1.30\text{b}$	$3.05 \pm 0.13\text{c}$	$45.59 \pm 1.35\text{b}$	$34.54 \pm 0.53\text{b}$	$35.63 \pm 0.55\text{b}$	$38.15 \pm 0.32\text{b}$
C_3	$1.43 \pm 0.12\text{ab}$	$35.61 \pm 0.62\text{c}$	$3.98 \pm 0.49\text{b}$	$39.59 \pm 1.10\text{c}$	$25.35 \pm 0.78\text{c}$	$25.39 \pm 0.67\text{c}$	$29.18 \pm 1.12\text{c}$
C_4	$1.59 \pm 0.06\text{a}$	$21.51 \pm 0.77\text{d}$	$4.47 \pm 0.25\text{b}$	$25.98 \pm 0.88\text{d}$	$10.76 \pm 1.22\text{d}$	$13.46 \pm 1.18\text{d}$	$16.25 \pm 0.90\text{d}$
C_5	$1.60 \pm 0.09\text{a}$	$21.56 \pm 0.46\text{d}$	$5.36 \pm 0.39\text{a}$	$26.91 \pm 0.81\text{d}$	$11.25 \pm 0.54\text{d}$	$13.34 \pm 0.52\text{d}$	$15.81 \pm 0.62\text{d}$

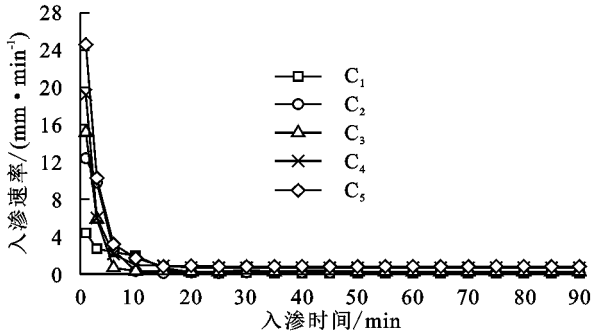


图 2 不同配比下土壤入渗速率

2.3.3 入渗拟合 由表 5 可知, R^2 与 RRMSE 呈负相关关系, R^2 越大, RRMSE 越小, 则模型拟合效果越好, 入渗速率预测值准确度越高, 不同配比下土壤入渗模型拟合的 $R^2 \geq 0.856$, $RRMSE \leq 0.153$, 说明下列模型均能较

好地模拟水分入渗过程。经对比发现, Horton 模型对 C_1 和 C_2 入渗拟合效果优于其他模型, Kostikov 模型对 C_3 、 C_4 和 C_5 入渗拟合效果优于其他模型。

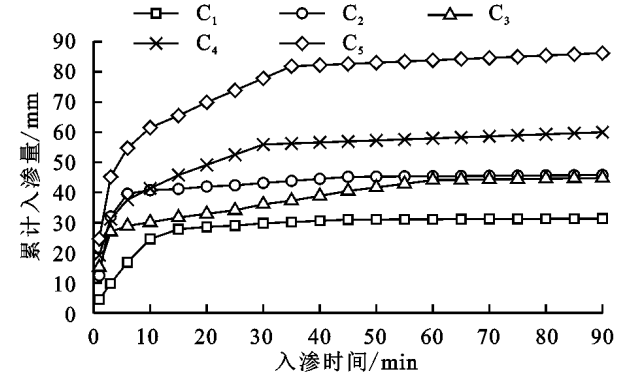


图 3 不同配比下土壤累计入渗量

表 5 不同配比下土壤入渗拟合

土壤 类型	Horton 模型					Philip 模型				Kostiakov 模型			
	f_c	f_o	k	R^2	RRMSE	S	A	R^2	RRMSE	β	α	R^2	RRMSE
C_1	0.080	4.399	0.117	0.959	0.087	10.971	-0.666	0.911	0.127	4.696	0.633	0.871	0.153
C_2	0.140	12.399	0.189	0.909	0.055	32.632	-3.050	0.900	0.057	13.427	0.833	0.856	0.069
C_3	0.239	15.175	0.301	0.910	0.063	32.659	-2.950	0.900	0.066	15.367	1.150	0.978	0.031
C_4	0.678	19.197	0.320	0.894	0.038	45.160	-5.041	0.942	0.028	19.247	1.133	0.998	0.006
C_5	0.798	24.590	0.274	0.924	0.026	58.242	-5.923	0.962	0.018	24.914	0.988	0.987	0.011

2.4 不同配比下土壤入渗性能灰色关联分析

灰色关联分析是一种常见于样本量较小时关系程度分析的方法, 基于行为因子序列的数学关系, 以分析因子间的关系程度或因子对主行为的影响程度^[14]。灰色关联分析前, 需要将初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率、稳渗用时和累计入渗量等 5 个反映土壤入渗性能的参数无量纲处理, 以消除参数纲量不同引起的影响。参考最大值化方法, 将各参数最优值作为参照值, 各组均与最优值做除法, 其结果组成的新数列为参数标准化值(表 6)。

灰关联系数为参数值与最优值的相关程度, 越靠近 1.000 则表示参数性能越优, 灰关联度为入渗性能参数的算数平均值, 其值反映了入渗性能的优劣。表 7 为不同配比下土壤入渗性能参数灰关联系数与

灰关联度, 分析结果显示, 土壤入渗性能依次为 $C_5(0.904) > C_4(0.636) > C_3(0.563) > C_2(0.480) > C_1(0.427)$, C_5 的初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率和累计入渗量相对最优, 说明全弃渣基质具有迅速排清地表积水、减少地表径流的作用, C_3 稳渗用时最优, 说明弃渣和农田土体积各半时对于减缓入渗速率下降具有良好效果。

表 6 不同配比下土壤入渗性能参数标准化

参数	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
初始入渗速率	0.179	0.504	0.617	0.781	1.000
稳定入渗速率	0.100	0.175	0.300	0.850	1.000
平均入渗速率	0.294	0.428	0.329	0.796	1.000
稳渗用时	0.750	0.750	1.000	0.500	0.583
累计入渗量	0.363	0.531	0.519	0.695	1.000

表 7 不同配比下土壤入渗性能参数灰关联系数与灰关联度

指标	参数	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
灰关联系数	初始入渗速率	0.354	0.476	0.540	0.672	1.000
	稳定入渗速率	0.333	0.353	0.391	0.750	1.000
	平均入渗速率	0.389	0.440	0.402	0.688	1.000
	稳渗用时	0.643	0.643	1.000	0.474	0.519
	累计入渗量	0.414	0.490	0.484	0.596	1.000
灰关联度		0.427	0.480	0.563	0.636	0.904

2.5 土壤粒径特征及水文效应评价

坐标综合评定法是一种基于原始数值与最优数值距离的多维空间分析方法,通过累计各因子与最优者的绝对距离,从而得到各组得分值,小者最优^[16]。由表 8 可知,选取黏粒含量、粉粒含量、砂粒含量、分散度、偏度、峰态、不均匀系数、曲率系数、分形维数等粒径特征以及容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度、田间持水量、毛管持水量、饱和持水量、初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率、稳渗用时、累计入渗量等水文效应共计 21 个指标进行评价, M_1 、 M_2 、 M_3 分别为粒径特征、水文效应、评价结果的得分值,粒径特征大小排序为 $C_2>C_1>C_3>C_4>C_5$,水文效应大小排序为 $C_1>C_2>C_5>C_3>C_4$,评价结果排序为 $C_2>C_1>C_3>C_4>C_5$ 。

表 8 土壤粒径特征及水文效应评价

土壤类型	粒径特征		水文效应		评价结果	
	M_1	排序	M_1	排序	M_1	排序
C_1	0.662	2	3.872	1	4.535	2
C_2	0.325	1	4.008	2	4.334	1
C_3	0.820	3	4.533	4	5.354	3
C_4	1.317	4	5.175	5	6.493	4
C_5	3.299	5	4.041	3	7.340	5

3 讨论

3.1 不同配比下土壤粒级组成和粒径结构差异

从粒级组成来看,弃渣混合比例越高,土壤砂粒含量越大,混合比例 0 : 10 到 10 : 0,砂粒含量由 35.40% 增加至 61.50%,粉粒含量由 60.50% 降低至 38.35%,黏粒含量由 5.19% 降低至 0.55%,可能是弃渣含量增加过程中砂粒逐渐占据粉粒、黏粒体积,增加基质中的孔隙,进而引起土壤中砂粒体积占比增加、粉粒和黏粒体积占比降低^[3]。

从粒径结构来看,弃渣含量的增加会引起分散度(S_e)、不均匀系数(C_u)、曲率系数(C_s)、分形维数(D)降低,偏度(S_{rk})、峰态(S_k)增加,这是因为弃渣中砂粒含量较高,粉粒和黏粒含量较低,使土壤颗粒更多的偏向于较高粒级当中,偏度(S_{rk})增加,粒径分布范围小且较为集中,分散度(S_e)降低、峰态(S_k)增加^[17-18]。本研究表明,混合土壤均为级配良好基质,

但不均匀系数(C_u)和曲率系数(C_s)降低随弃渣含量的增加呈降低趋势,级配特征变差的原因可能是较粗颗粒间的孔隙缺少细小颗粒的充填,使得土壤粒级分配不均匀、级配不连续^[19-20]。分形维数(D)随弃渣增加而降低的原因可能是颗粒出现粗粒化趋势时,会引起分形维数减小,与 Niu 等^[21]对我国北方山区土壤颗粒与分形特征的研究结果以及 Chen 等^[22]在我国西南地区边坡修复中关于土壤颗粒分形规律的研究结果一致。

从分形维数(D)与粒级组成及粒径结构的关系来看,分形维数(D)与黏粒和粉粒呈正相关关系、与砂粒呈负相关关系,这与陈宇轩等^[18]研究结果一致,分形维数(D)与分散度(S_e)、不均匀系数(C_u)呈正相关关系、与偏度(S_{rk})、峰态(S_k)呈负相关关系,这与严方晨等^[23]研究结果一致。

3.2 不同配比下土壤水文效应差异

从孔隙度和持水量来看,弃渣含量增加,土壤容重、非毛管孔隙度呈增加趋势,毛管孔隙度以及持水量等指标基本呈降低趋势,原因是弃渣增多使得原本农田土中单位体积砾石增多,砾石间大孔隙增加的同时降低了原本农田土的毛管孔隙,因而容重和非毛管孔隙增加、毛管孔隙减少。农田土本身因毛管孔隙数量多而具有良好的持水性,当加入弃渣后,原本不具有持水能力的砾石充斥在农田土中,土体结构变散,体现通气性能的非毛管孔隙增多,表征保水性能的毛管孔隙减少,土壤整体持水能力下降,与周扬等^[4]研究结果一致。

从入渗性能来看,土壤初始入渗速率、稳定入渗速率和累计入渗量都随弃渣含量增加呈增加趋势,这可能是弃渣中砾石和大颗粒含量高,促进水分下渗的大孔隙数量多造成的。摄晓燕等^[24]在风沙土中加入适量砒砂岩后土壤入渗率显著减小,砒砂岩中的小颗粒充填在风沙土大颗粒间隙中,抑制了水分下渗速度,与本研究结果相似。稳渗用时和平均入渗速率随弃渣含量的增加出现波动性,可能是混合土中原本土壤的孔隙结构和砾石充填致使下渗路径变复杂曲折^[25],延缓达到稳渗的时间,从而影响平均入渗速率。

4 结论

(1)农田土掺弃渣可明显提高土壤中大颗粒体积分数,弃渣含量越高,混合土壤群体变化特征为分散度降低、偏度和峰态升高,级配变化特征为不均匀系数降低、曲率系数为 1~3,分形维数降低趋势不显著,土体结构朝不稳定方向变化。黏粒、粉粒与分形维数相关性高,砂粒与分形维数相关性较高,除曲率

系数外,土壤群体特征、级配特征均与分形维数存在相关性。

(2)混合土壤中弃渣含量增加必然引起容重和非毛管孔隙增加,毛管孔隙、总孔隙和持水量下降,水分入渗因弃渣含量不同会存在稳渗用时差异,但入渗的初始、稳定、平均速率以及累计入渗量基本与弃渣含量呈正相关关系。混合土壤中弃渣含量 $<50\%$ 时宜采用 Horton 模型拟合入渗过程,弃渣含量 $\geq 50\%$ 时宜采用 Kostiakov 模型拟合入渗过程,土壤入渗性能灰色关联分析结果表明,弃渣越多,入渗性能越好。

(3)不同配比下土壤粒径特征和水文效应评价结果显示,弃渣:农田土以 3:7 体积比例混合后的土壤在稳定性、保水性、渗水性等方面表现最好。因此,实际生产建设中,废弃采石场土壤环境修复采取“三分渣、七分覆”的改良方式既能达到土壤修复目的,又能减少成本、废物利用。

参考文献:

- [1] Oliveira G, Nunes A, Clemente A, et al. Effect of substrate treatments on survival and growth of Mediterranean shrubs in a revegetated quarry: An eight-year study [J]. Ecological Engineering, 2011, 37(2): 255-259.
- [2] Feng Y, Wang J M, Bai Z K, et al. Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review [J]. Earth-Science Reviews, 2019, 191(1): 12-25.
- [3] 程杰,王欢元,解建仓,等.不同配比下复配土的土壤颗粒组成、分形维数与质地变化特征[J].水土保持研究, 2020, 27(2): 30-34.
- [4] 周杨,杨永刚.不同重构方式下古交典型矿区土壤持水性差异研究[J/OL].山西大学学报, 2021. DOI: 10.13451/j.sxu.ns.2021039.
- [5] Dunsford S J, Free A J, Davy A J. Acidifying peat as an aid to the reconstruction of lowland heath on arable soil: A field experiment [J]. Journal of Applied Ecology, 2010, 35(5): 660-672.
- [6] Wang J M, Li X F, Bai Z K, et al. The effects of coal gangue and fly ash on the hydraulic properties and water content distribution in reconstructed soil profiles of coal-mined land with a high groundwater table [J]. Hydrological Processes, 2017, 31(3): 687-697.
- [7] 王志刚,毕银丽,宋子恒,等.东部草原露天矿区黏土改良模拟研究[J].生态学报, 2018, 38(16): 5865-5875.
- [8] 张露,韩霁昌,王欢元,等.砒砂岩与风沙土复配后的粒度组成变化[J].中国水土保持科学, 2015, 13(2): 44-49.
- [9] 吴克宁,赵瑞.土壤质地分类及其在我国应用探讨[J].土壤学报, 2019, 56(1): 227-241.
- [10] 张志华,桑玉强,孔玉华,等.太行山低山丘陵区坡位对土壤渗透性能影响研究[J].灌溉排水学报, 2018, 37(9): 43-47, 78.
- [11] 杜建会,方政,林志斌.广州市典型绿地土壤水分入渗特征[J].生态学报, 2021, 41(24): 1-9.
- [12] 张晓艳,张建兵,王静怡.桂西北峰丛洼地土壤水动力学性质对不同退耕措施的响应特征[J].水土保持学报, 2018, 32(5): 140-145.
- [13] 郭建军,王佳欢,胡静霞,等.2022 年冬奥会崇礼赛区针叶林枯落物及土壤水文效应[J].中国水土保持科学, 2021, 19(4): 44-50.
- [14] 吴煜禾,张洪江,程金花,等.重庆四面山不同林地土壤颗粒特征及其与土壤侵蚀的关系[J].水土保持学报, 2011, 25(5): 219-223.
- [15] 赵佳琪,陈晓琳,李玉灵.冀东矿区不同植被恢复类型尾矿基质粒径组成和养分特征研究[J].林业与生态科学, 2021, 36(3): 262-268.
- [16] 杜姣姣,周运超,白云星,等.阔叶树种引入后马尾松人工林土壤水文物理性质研究[J].水土保持研究, 2021, 28(4): 105-112.
- [17] 高广磊,丁国栋,赵媛媛,等.生物结皮发育对毛乌素沙地土壤粒度特征的影响[J].农业机械学报, 2014, 45(1): 115-120.
- [18] 陈宇轩,高广磊,张英,等.呼伦贝尔沙地风沙土粒径分布特征[J].北京林业大学学报, 2019, 41(8): 124-130.
- [19] 张毅,乔良,曾润强,等.基于原位双环渗水试验的堆积层滑坡入渗规律[J].兰州大学学报, 2014, 50(5): 666-670.
- [20] 王景燕,胡庭兴,龚伟,等.川南坡地不同退耕模式对土壤团粒结构分形特征的影响[J].应用生态学报, 2010, 21(6): 1410-1416.
- [21] Niu X, Gao P, Wang B, et al. Fractal characteristics of soil retention curve and particle size distribution with different vegetation types in mountain areas of Northern China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, 12(12): 15379-15389.
- [22] Chen S N, Ai X Y, Dong T Y, et al. The physico-chemical properties and structural characteristics of artificial soil for cut slope restoration in Southwestern China [J]. Scientific Reports, 2016, 6(2): e20565.
- [23] 严方晨,焦菊英,曹斌挺,等.黄土丘陵沟壑区撂荒地不同演替阶段植物群落的土壤抗蚀性:以坊塌流域为例[J].应用生态学报, 2016, 27(1): 64-72.
- [24] 摄晓燕,张兴昌,魏孝荣.适量砒砂岩改良风沙土的吸水和保水特性[J].农业工程学报, 2014, 30(14): 115-123.
- [25] 吕刚,王婷,王韞策,等.辽西低山丘陵区坡地砾石含量及粒径对土壤入渗性能的影响[J].水土保持学报, 2017, 31(4): 86-92.