



黄河底泥基植生基材用于矿区生态修复的效果

宋亮 赵冰琴 夏栋 吴欣 胡鑫凯 许文年 包海龙

引用本文：

宋亮, 赵冰琴, 夏栋, 等. 黄河底泥基植生基材用于矿区生态修复的效果[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(4): 401–413.
SONG Liang, ZHAO Bingqin, XIA Dong. Effect of planting substrate based on Yellow River sediment for ecological restoration in mining area[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(4): 401–413.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2023-1702>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤矸石与城市污泥混合制备植生基质的试验研究

Experimental study of planting substrate mixed with coal gangue and municipal sludge
煤炭科学技术. 2022, 50(7): 304–314 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/25d3311d-07c1-492f-9678-b16c7d3e2630>

黄河流域煤炭富集区生态开采模式初探

Preliminary study on ecological mining mode in coal-rich area of the Yellow River Basin
煤炭科学技术. 2021, 49(12): 233–242 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/8a33f255-2161-4971-a451-ac4e29404493>

DSE及其代谢物对紫花苜蓿促生作用及其矿区生态修复潜力

DSE and its metabolites on *Medicago sativa L.* growth promotion and its potential for ecological restoration in mining areas
煤炭科学技术. 2023, 51(12): 90–99 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2023-1105>

黄河中游陕北煤矿区不同宽度的采动地裂缝对土壤抗冲性的影响

Influence of mining-induced ground fissures with different widths on soil anti-scourability in northern Shaanxi coal mining area in the middle reaches of the Yellow River
煤炭科学技术. 2025, 53(2): 377–390 <https://doi.org/10.12438/est.2024-1758>

碳中和目标下矿区土地复垦与生态修复的机遇与挑战

Opportunities and challenges of land reclamation and ecological restoration in mining areas under carbon neutral target
煤炭科学技术. 2023, 51(1): 474–483 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2023-0047>

神东矿区接种AMF对植物土壤生态化学计量及养分回收的影响

Effects of AMF inoculation on plant-soil ecological stoichiometry and nutrient recovery in Shendong mine
煤炭科学技术. 2024, 52(5): 354–363 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0273>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

碳中和科学与工程



宋亮,赵冰琴,夏栋,等.黄河底泥基植生基材用于矿区生态修复的效果[J].煤炭科学技术,2025,53(4):401-413.

SONG Liang, ZHAO Bingqin, XIA Dong, et al. Effect of planting substrate based on Yellow River sediment for ecological restoration in mining area[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(4): 401-413.

移动扫码阅读

黄河底泥基植生基材用于矿区生态修复的效果

宋亮^{1,2,3},赵冰琴^{1,2},夏栋^{1,2,3},吴欣²,胡鑫凯²,许文年^{1,2},包海龙⁴

(1. 防灾减灾湖北省重点实验室(三峡大学),湖北宜昌 443002; 2. 水泥基生态修复技术湖北省工程研究中心(三峡大学),湖北宜昌 443002;
3. 三峡大学 水利与环境学院,湖北宜昌 443002; 4. 蒙草生态环境(集团)股份有限公司,内蒙古呼和浩特 010000)

摘要:表土资源的严重短缺是黄河流域矿区生态修复的主要限制因素,黄河底泥又是水土流失的部分土壤颗粒,具有重要的生态利用价值。本研究以黄河底泥替代自然土壤,采用普通硅酸盐水泥为黏结剂,在此基础上添加不同比例的水泥和破碎玉米秸秆以及多种外源改性材料进行植生基材制备,采用正交试验在乌海市苏海图矿区堆填场边坡进行原位试验。通过测定植生基材水分、强度特性和监测植物生理特性来评价黄河底泥基植生基材用于矿区生态修复的效果。结果表明:①与CK处理相比,水泥作为硬性材料可增强基材强度,提高范围为0.62~1.67倍,但6%高水泥掺量会使得基材干燥收缩,内摩擦角降低1.2°~4.1°,并且会对植物出苗和前期生长阶段产生抑制作用。②黄河底泥为粉质砂土,容重大孔隙少,有机物料的加入可显著改善基材孔隙结构,提高基材12.57%~15.88%的最大吸持贮水量,并且使得土壤水分入渗速率提高35.56%,有利于植物根系以及植株的发育。此外,纤维状秸秆在一定程度上可提高基材延性,抑制基材裂缝的延伸和扩展。在水泥和有机物料均为4%时,基材黏聚力达到峰值25.17 kPa。③相关性分析和PLS-PM综合分析表明,植物生理特性在外源物质的直接作用和基材物理特性的间接作用下,除植株高度外,其余指标方差均>0.7,总体植生情况能够满足边坡生态修复的要求,且植物后期处于较为稳定的生长状态。④综合考虑,当水泥和有机物料掺量均维持在4%时,可使黄河底泥基植生基材蓄水持水能力和力学性能达到最佳,并且适用于水土资源短缺的矿区边坡生态修复和植物生长。该研究结果可推广到黄河流域其他涉及清淤的湖库区,对黄河流域生态保护修复具有重要作用。

关键词:黄河底泥;植生基材;保水性能;强度特征;植生效果

中图分类号:S157 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2025)04-0401-13

Effect of planting substrate based on Yellow River sediment for ecological restoration in mining area

SONG Liang^{1,2,3}, ZHAO Bingqin^{1,2}, XIA Dong^{1,2,3}, WU Xin², HU Xinkai², XU Wennian^{1,2}, BAO Hailong⁴

(1. Huber Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Provincial Engineering Research Center of Slope Habitat Construction Technique Using Cement-based Materials, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
3. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 4. Inner Mongolia M-Grass Ecology and Environment (Group) Co., Ltd, Huhehaote 010000, China)

Abstract: The primary constraint for the ecological restoration of mining areas in the Yellow River basin is the significant scarcity of top-soil resources. The predominant loss of soil particles in the form of Yellow River sediment holds crucial value for utilization purposes.

收稿日期:2023-11-16 策划编辑:常琛 责任编辑:钱小静 DOI: 10.12438/cst.2023-1702

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52200230);湖北省教育厅科学技术研究资助项目(Q20221210);内蒙古自治区科技重大专项课题资助项目(2021ZD0007-03)

作者简介:宋亮(1999—),男,甘肃天水人,硕士研究生。E-mail: 2394300914@qq.com

通讯作者:赵冰琴(1987—),女,湖北宜昌人,副教授,博士。E-mail: bingqinzhao@163.com

Natural soil was substituted for Yellow River sediment in this study, and Portland cement was employed as the binder. Planting substrates were prepared by adding various amounts of cement, broken corn stalks, and various external materials. Orthogonal testing was performed in situ at the landfill slope of the Suhaitu mining region in Wuhai City. The ecological restoration effect of the planting substrate based on Yellow River sediment was evaluated by monitoring the moisture and strength characteristics of the planting substrate and the plant's physiological characteristics. The results showed that cement as a hard material can improve the planting substrate strength compared with CK treatment, and the increased range was 0.62–1.67 times. However, 6% high cement content made the planting substrate dry and shrink, reduced the internal friction angle 1.2°–4.1°, and had an inhibiting effect on the germination stage of the plant. The sediment in the Yellow River is silty sand with few pores. The organic material can significantly improve the pore structure of the planting substrate, and increase the maximum water storage capacity of the substrate by 12.57%–15.88%. In addition, the soil water infiltration rate was increased by 35.56%, which was beneficial to the growth and development of plant roots. In addition, fibrous straw can improve the ductility of the planting substrate to a certain extent and inhibit the extension and expansion of substrate cracks. When the amount of cement and organic materials were both 4%, the cohesion of the planting substrate reached a peak of 25.17 kPa. Correlation analysis and PLS-PM comprehensive analysis showed that under the combined effect of plant physiological characteristics, except for plant height, the variance of other indicators was greater than 0.7. The overall planting state can meet the slope ecological restoration requirements, and the plants were in a relatively stable growth state in the later stage. In conclusion, when the content of cement and organic materials is 4%, the water-retaining and strength characteristic of the Yellow River sediment-based planting substrate can achieve optimization, and is suitable for ecological restoration and plant growth in abandoned mining areas with a shortage of water and soil resources. This research can be extended to other lakes and reservoirs involving dredging in the Yellow River Basin, which can play an important role in the ecological conservation and restoration of the Yellow River Basin and has a wide application perspective.

Key words: Yellow River sediment; planting substrate; water-retaining; strength characteristic; vegetative effect

0 引言

黄河流域是我国重要的能源领域,然而多年来对煤炭、金属、石油等资源大规模开发利用造成生态环境损伤,带来了严重的生态问题^[1]。在矿区生态修复过程中^[2],周围表土受到扰动,无法再利用,并且可引入的外来土壤资源严重短缺。同时,黄河底泥多年来在多处河道及水库库区的淤积严重,也已成为水沙调控的重中之重^[3]。黄河底泥主要为水土流失的土壤颗粒,具有无毒无害的特性,可直接作为充填材料用于煤炭塌陷区、矿藏区的土壤重构,也可以转化为土壤改良剂或者对黄河底泥改性处理后进行土壤化利用^[4-6]。因此,针对矿山生态修复中需要大量土壤这一实际工程问题,黄河底泥显然具有重要的利用价值。

目前,植被混凝土护坡技术的研究与应用已趋于成熟,可适用于45°~85°各类边坡的生态修复^[7]。其中植生基材是技术的核心,不仅要具有质轻多孔的物理结构和良好的蓄水持水性能,为植物提供生长所需的养分和水分外,还要具有一定强度和抗侵蚀能力,以防止基材脱落和坡面浅层溜坍^[8]。丁齐等^[9]研究发现在自然状态下水泥含量对无侧限抗压强度影响显著,并且水泥掺量为12%时,基材的无侧限抗压强度最大。夏振尧等^[10]发现生态护坡基材初期强度与水泥掺量呈正比,但水泥含量较高时会抑

制植物生长发育。刘大翔等^[11]研究了多种有机物料对植被混凝土孔隙率和无侧限抗压强度的影响,结果表明掺入7%~9%小粒径有机质时基材强度与孔隙结构较好。丘琛等^[12]利用CT扫描技术发现秸秆能够显著降低浅层土壤容重,提高土壤饱和导水率和大孔隙数量,改善土壤孔隙微结构。齐江涛等^[13]发现破碎玉米秸秆还田对降低风蚀水蚀、提高土壤蓄水能力具有重要作用。可以看出有机物料是优良的基材改良剂,在改善土壤理化性质以及恢复生物功能方面具有很好的效果^[14]。因此针对黄河底泥强度低、孔隙结构弱和蓄水持水能力不足等问题,研究利用水泥、有机物料等外源物质加以改良并进行合理利用在理论上是可行的。

基于以上背景,将黄河底泥改良为适合植物生长的植生基材,实现底泥的资源化利用,已经成为矿区生态修复工程的热点问题。但是,将黄河底泥加以改良制备成植生基材之后,还需对植物的定植和生长进行适应性研究。而种子萌发是植物成功建植的第一步,也是植物生活周期中抗逆性最弱的阶段,所以在植物幼苗期进行叶绿素、丙二醛和酶活性等幼苗生理指标测定,可以体现植物的抗逆能力^[15],足以反映植生基材的优劣性。因此,本研究从提高植生基材强度和蓄水持水能力出发,以黄河底泥为土壤基质,选取有机物料和水泥2种外源改性材料,通过设置不同掺量梯度,测定植生基材水分、强度指标。同

时选取抗旱耐碱性强的多年生草本植物垂穗披碱草 (*Elymus nutans*) 和灌木植物沙冬青 (*Ammopiptanthus mongolicus*)、柠条 (*Caragana korshinskii*)、油蒿 (*Artemisia ordosica*) 等进行植生试验研究, 监测和分析植物幼苗期以及成熟期的生理指标, 探究适宜植物生长的黄河底泥基植生基材在矿区生态修复中的作用机理。以期为高效消纳黄河底泥用于黄河流域矿区植被恢复提供实践依据, 并为黄河流域矿区边坡生态修复选择基质方案提供可行性思路, 进一步推动黄河流域生态保护和高质量发展。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究涉及的主要材料包括黄河底泥、水泥、有机物料、生态改良剂、有机肥、复合肥和保水剂。其中, 黄河底泥选用位于乌海市黄河海勃湾水利枢纽库区清淤底泥, 剔除杂物之后晒干、捣碎、过 2 mm 筛备用。依据《土工试验方法标准》对黄河底泥基本物理特性进行测试, 见表 1。水泥采用 P.O42.5 普通硅酸盐水泥, 有机物料选用玉米秸秆, 经风干破碎后过 5 mm 筛备用。生态改良剂由三峡大学边坡防护

与生态恢复研究中心提供, 属于三峡大学专利成果转让产品(专利号: 01138343.7), 为富含微生物活化菌剂的细粒状物质, 主要成分包括铁、磷、钙、硅等元素矿粉和物料素分解菌、固氮菌、解磷菌、解钾菌等有效活菌, 其 pH 为 5.5, 有效活菌数为 3.0×10^6 cfu/g。有机肥为附近养牛场经过腐熟后的干牛粪, pH 为 7.9, 有机质、氮、磷、钾的质量分数分别为 45.8%、3.2%、1.6% 和 0.7%。复合肥中养分配比为 N : P₂O₅ : K₂O = 16 : 7 : 7(质量比); 保水剂采用非离子聚丙烯酰胺 PAM, 呈白色粉末状, 实测去离子水中吸水倍率为 323 g/g。试验草灌种子主要包括多年生草本植物垂穗披碱草 (*Elymus nutans*) 和灌木植物沙冬青 (*Ammopiptanthus mongolicus*)、柠条 (*Caragana korshinskii*)、油蒿 (*Artemisia ordosica*), 混播接种量为 40~45 g/m², 由阿拉善荒漠生态综合治理研究院提供。试验设置水泥与有机物料掺量分别为 2%、4% 和 6%, 共 9 种配比类型, 其他材料掺量取固定值: 为 6% 生态改良剂、3% 有机肥、0.15% 复合肥和 0.08% 保水剂。上述材料掺量均是以干土质量为基础的质量分数表示, 另外以纯黄河底泥作为空白对照组(CK), 具体配比方案见表 2。

表 1 黄河底泥基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of the Yellow River sediment

最大干密度/ (g · cm ⁻³)	最优含水率/ %	塑限/ %	液限/ %	pH	粒径分布/%			
					0.50~0.25 mm	0.250~0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm
1.62	15.6	17.6	32.3	8.64	10.4%	35.2%	49.7%	4.7%

表 2 黄河底泥基植生基材配比方案

Table 2 Proportion scheme of the Yellow River sediment-based planting substrate

基材编号	各材料掺量与干土质量比/%						
	黄河底泥	水泥	有机物料	生态改造剂	有机肥	复合肥	保水剂
Z1	100	2	2	6	3	0.15	0.08
Z2	100	2	4	6	3	0.15	0.08
Z3	100	2	6	6	3	0.15	0.08
Z4	100	4	2	6	3	0.15	0.08
Z5	100	4	4	6	3	0.15	0.08
Z6	100	4	6	6	3	0.15	0.08
Z7	100	6	2	6	3	0.15	0.08
Z8	100	6	4	6	3	0.15	0.08
Z9	100	6	6	6	3	0.15	0.08
CK	100	0	0	0	0	0	0

1.2 试验设计

试验地点为内蒙古自治区乌海市苏海图矿区堆填场边坡 (106.766°E, 39.536°N, 海拔高度 1 048.0 m),

按照表 1 不同配比在坡度约为 40°的土石混合边坡上布置试验样地, 如图 1 所示。基材喷播采用植被混凝土施工工艺^[16]: 覆 30 cm 黄河底泥 → 坡面平

整→铺设加筋层→喷射 8 cm 底层基材→喷射 2 cm 面层基材(含草灌种子)→覆盖草帘→自然养护。养护 28 d 时,采用 100 cm³ 环刀在每个坡面随机采集 6 个原状土样,其中 3 个用于测定基材孔隙率及干容重,另外 3 个用于测定基材渗透系数;采用 60 cm³ 环刀采集 4 个原状土样,用于测定基材抗剪强度;采用 200 cm³ 环刀采集 3 个原状土样,脱模后用于测定基材无侧限抗压强度。



图 1 试验样地分布
Fig.1 Sample plot distribution

1.3 指标测定

土壤干容重采用环刀法测定^[17];孔隙度采用原状土吸水法测定^[17];渗透系数采用双环刀法测定^[17],10 组植生基材在测定渗透性试验中均在 120 min 后达到完全稳定,故取其稳渗率作为渗透系数;采用应变控制直剪仪进行快剪试验^[17],剪切速率为 1.2 mm/min 测定基材抗剪强度;采用 YYW-2 型应变控制式无侧限压力仪进行无侧限抗压试验^[17],应变速率为 1 mm/min,试样尺寸为 10 cm×20 cm² 的圆柱形土柱。

在每个基材坡面随机设置 3 个标准样方 (0.5 m×0.5 m),观测植物出芽率和植株生长高度。由于灌木生长初期植株矮小,且受扰动后发芽周期较长^[18],因此本文仅对多年生草本垂穗披碱草进行植物生理特性监测。而垂穗披碱草是禾本科披碱草属多年生根茎疏丛型草本植物,在播种 6~14 d 后处于快速萌发期,第 15 天之后较少萌发,基本停止^[19~20]。故在播种 14 d 发芽期结束后,对垂穗披碱草发芽率进行统计调查,并收集幼苗叶片进行幼苗生理指标测定,采用乙醇丙酮法^[21]测定叶绿素含量。播种 30 d 后测量植株高度,50 d 后测量生物量^[18],在 0.5 m×0.5 m 标准样方中,分别收集植物的地上和地下部分,用去离子水冲洗植物根系,将其自然阴干。采用分析天平测定植物鲜干重,将植物放入烘箱内 105 ℃ 杀青 15 min,之后定温 80 ℃ 烘干 8 h 至恒重,称重测定其生物量^[18]。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel2016 和 Origin2021 进行常规数据的统计以及作图;采用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析,

检验显著性水平为 0.05。采用 R(4.0.0) 中的“plspm”包进行偏最小二乘路径回归分析(PLS-PM)。土壤贮水特征计算:土壤饱和贮水量=最大吸持贮水量+最大滞留水量,最大吸持贮水量=毛管孔隙度×土层厚度,最大滞留水量=非毛管孔隙度×土层厚度。抗剪强度参数采用摩尔-库伦公式进行计算分析: $\tau_f = \sigma_n \tan \varphi + c$ 。其中, τ_f 为土的抗剪强度, kPa; σ_n 为作用在剪切面上的法向应力, kPa; φ 为内摩擦角, (°); c 为黏聚力, kPa。

2 结果与分析

2.1 不同处理对基材物理性质的影响

基材物理性质的优劣会直接影响植物发育和演替的速度,主要包括土壤质地、容重、孔隙状况以及入渗、持水性能等多项指标。各组植生基材的基本物理性质见表 3,添加有机物料的植生基材干容重总体上随有机物料掺量的增加而减小,尤其是 Z3 降低基材密度和提高孔隙度的效果最为明显,相比于 CK 组基材显著降低 9.88%,是较合适的轻质基材。

土壤贮水量是植被水分保持和水源涵养功能的重要指标,其主要与土壤孔隙状况和土层厚度相关。本试验中最大吸持贮水量与土壤饱和贮水量变化趋势相同,均表现为在相同水泥掺量下,随有机物料掺量的增加而增大。有机物料为 6% 时,最大吸持贮水量与土壤饱和贮水量相比于 2% 和 4% 时分别提高 12.57%~15.88%、6.97%~9.63% 和 10.00%~15.17%、3.26%~8.35%。说明有机物料的添加可有效提高基材吸水和持水能力。最大滞留贮水量与非毛管孔隙度紧密相关,具体表现为随有机物料掺量的增加呈先增大后减小的分布趋势,并且在有机物料和水泥含量均为 4% 时最高,可达到 3.43 mm, 相比于 CK 组基材明显提高 35.56%。

渗透系数是代表土体渗透性强弱的定量指标,各组植生基材渗透系数在 1.17~3.23 mm/min,表现为随有机物料掺量的增加而增大,并且有机物料从 2% 增加到 4% 时,渗透系数提高了 0.91~1.02 倍。而水泥对渗透系数并无明显影响,但当有机物料为 2% 时,不同水泥掺量下的植生基材渗透系数均略低于 CK 组,这可能是由于水泥作为一种胶结物质,其水化胶结作用,会填充部分土壤孔隙,影响了基材的孔隙结构,使得渗透系数略有下降^[22]。

2.2 不同处理对基材力学性质的影响

2.2.1 剪切应力-位移关系分析

根据试验结果,得到各组植生基材在不同竖向

表3 不同植生基材配比物理性质
Table 3 Physical properties of different planting substrate ratio

基材编号	干容重/(g·m ⁻³)	最大吸持贮水量/mm	最大滞留贮水量/mm	土壤饱和贮水量/mm	渗透系数/(mm·min ⁻¹)
Z1	1.59±0.04ab	41.18±1.26cd	2.85±0.28c	44.03±1.00c	1.31±0.09c
Z2	1.55±0.05ab	44.07±0.41b	3.19±0.32b	47.26±0.36b	2.63±0.12ab
Z3	1.46±0.02 d	47.72±0.43a	2.34±0.32cd	50.06±0.11a	3.23±0.16a
Z4	1.60±0.06a	40.67±0.57cd	2.04±0.12 d	42.71±1.43cd	1.26±0.10c
Z5	1.57±0.04ab	41.97±1.92bc	3.43±0.30a	45.40±0.75bc	2.41±0.17b
Z6	1.47±0.04 d	46.01±0.73ab	3.18±0.22b	49.19±0.51ab	3.13±0.32a
Z7	1.62±0.06a	39.79±2.74 d	2.70±1.26c	42.49±0.71 d	1.17±0.21c
Z8	1.58±0.05ab	41.87±0.47bc	3.41±0.33a	45.28±2.10bc	2.36±0.17b
Z9	1.51±0.03c	44.79±0.66ab	1.92±0.11 d	46.74±0.76b	2.80±0.11ab
CK	1.62±0.05a	38.68±1.01 d	2.21±0.14 d	40.89±0.28 d	1.43±0.23c

注: 数据格式为: 平均值±标准差; 同列数据小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

压力下的剪应力-位移关系曲线, 为探明不同水泥掺量对植生基材剪切应力-位移关系的影响, 以2%有机物料掺量下, CK、2%、4%、6%水泥掺量的植生基材为例。如图2所示, 随着剪切位移的增加, 剪切应力与剪切位移曲线均无明显的软化现象, 主要为塑性剪切变形, 基本遵循应变硬化规律。剪切应力在剪切位移达到6 mm之前增加明显, 之后逐渐趋于平稳, 故取剪切位移6 mm处的剪应力为抗剪强度。究

其原因是黄河底泥为粉质砂土, 基材在法向荷载和剪切应力共同作用下, 土体产生较大剪缩变形, 使土体体积减小, 密实度增大, 土体颗粒间的咬合作用增大, 剪切应力-位移关系曲线呈现硬化特征^[23]。

通过对分析各曲线可知, 在2%有机物料掺量固定的情况下, 添加水泥的植生基材抗剪强度较CK组有不同幅度的提高。通过对比图2b、图2c、图2d发现, 在100 kPa竖向压力时, 添加2%、4%和6%

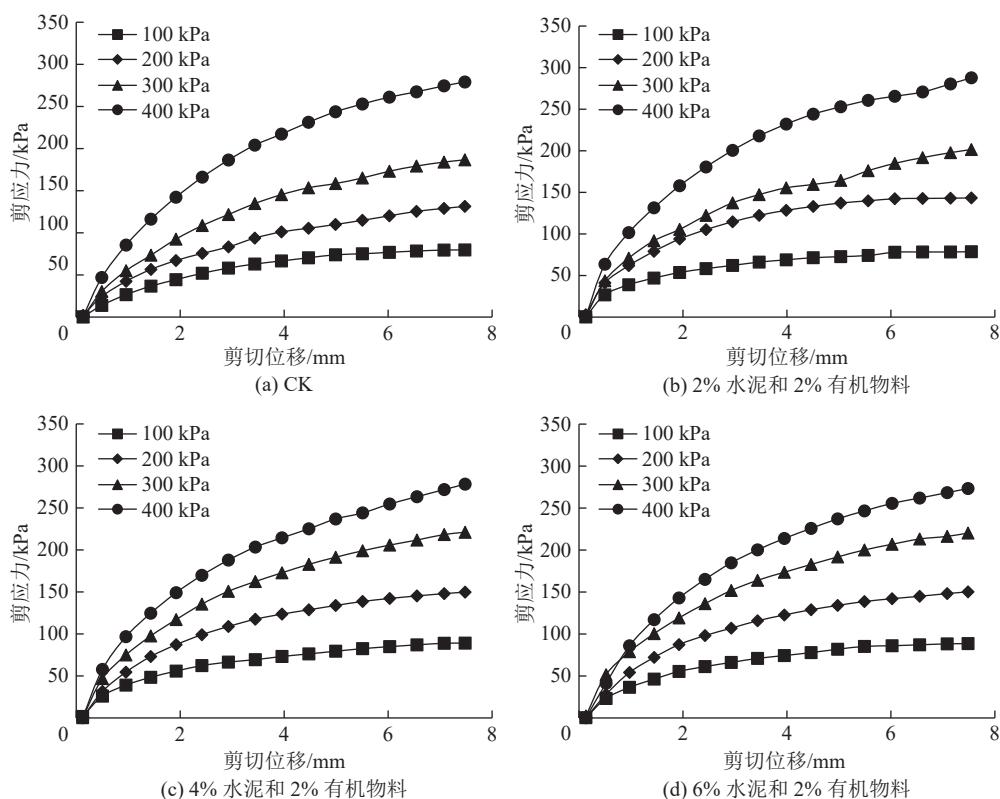


图2 不同水泥掺量下植生基材的剪应力-位移关系曲线

Fig.2 Shear stress-displacement curves of planting substrate under different cement content

水泥的植生基材抗剪强度分别为 78.01、84.89、86.02 kPa, 较 CK 组基材 (76.85 kPa) 分别提高了 1.51%、10.53% 和 11.88%, 说明添加水泥改良后的黄河底泥基植生基材土体抗剪强度增强, 且当 4% 和 6% 水泥掺量时, 强度增强尤为明显, 使得抵抗土体剪切变形能力得到显著提升, 有利于提高生态护坡基材的稳定性。

此外, 为探明不同有机物料掺量对植生基材剪切应力-位移关系的影响, 以 2% 水泥掺量下, CK、

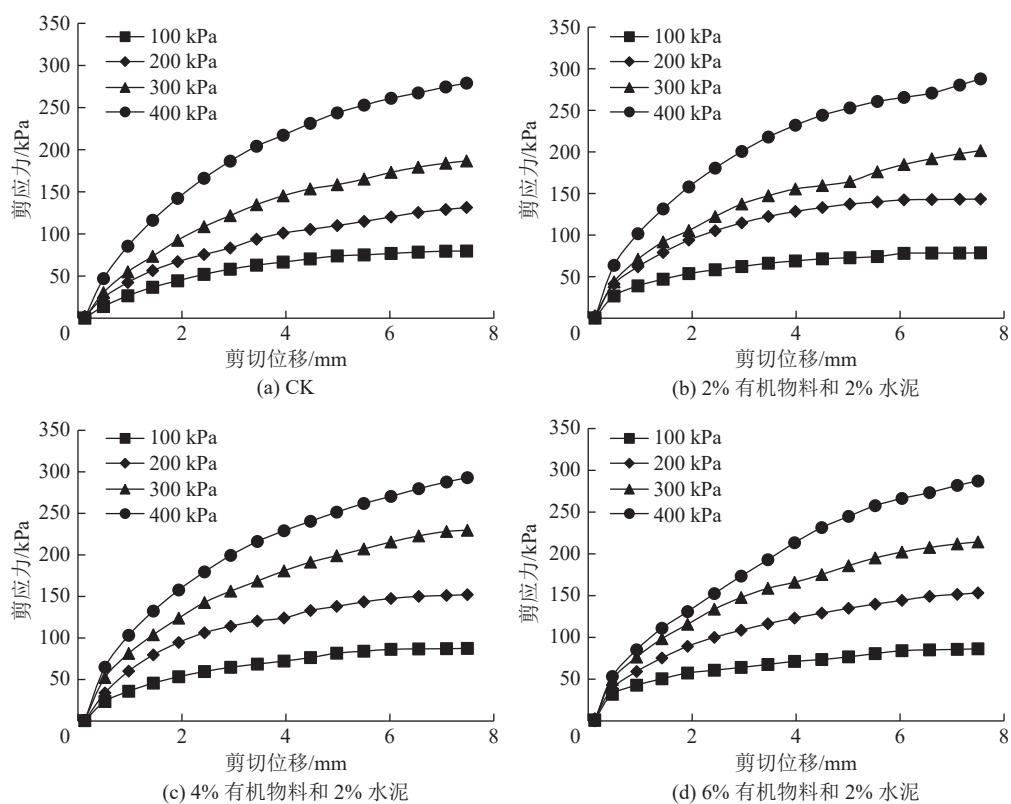


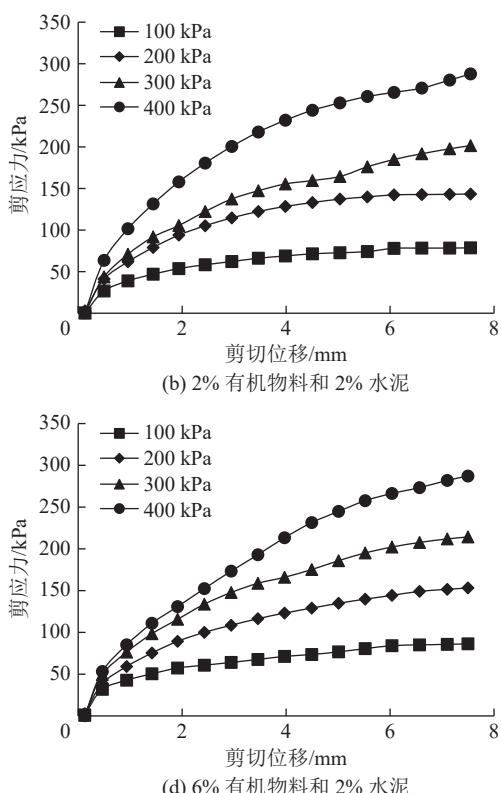
图 3 不同有机物料掺量下植生基材的剪应力-位移关系曲线

Fig.3 Shear stress-displacement curves of planting substrate under different organic materials content

2.2.2 抗剪强度参数分析

对 10 组植生基材试样在不同正应力下的抗剪强度进行拟合, 发现相关系数最小为 0.966, 最大为 0.998, 说明线性拟合效果良好^[10, 23-24], 根据摩尔-库伦准则可计算得到各组植生基材试样黏聚力 c 和内摩擦角 φ 见表 4。在有机物料掺量一定时, 植生基材黏聚力随水泥掺量的增加呈近似线性增长趋势, 并且当 4% 有机物料情况下, 植基材黏聚力增长速率最大, 2%、4% 和 6% 水泥掺量的植生基材黏聚力较 CK 组分别提高了 1.10、2.12 和 3.13 倍, 说明水泥的掺入能显著提高植生基材的黏聚力。在水泥掺量一定时, 植生基材的黏聚力随有机物料掺量的增加呈先升后降的变化趋势, 其中水泥掺量和有机物料均

2%、4% 和 6% 有机物料掺量的植生基材为例。由图 3 可见, 在 2% 水泥掺量固定, 坚向压力为 100 kPa 时, 添加 2%、4% 和 6% 有机物料的植生基材抗剪强度分别为 78.01、86.82、84.09 kPa, 较 CK 组基材 (76.85 kPa) 分别提高了 1.51%、13.04%、9.38%。抗剪强度呈现随有机物料掺量的增加表现为先增后减的变化趋势, 在 4% 有机物料时, 植生基材抗剪强度达到峰值, 表明在黄河底泥中添加有机物料能有效增强植生基材的抗剪强度, 但不能过量。



为 4% 时基材的黏聚力达到峰值为 25.17 kPa, 说明添加有机物料能有效提高植生基材的黏聚力, 但掺量不能大于 4%。

由表 4 可知, 所有植生基材的内摩擦角 φ 均在 $29.5^\circ \sim 34.3^\circ$ 间。除 4% 水泥掺量外, 在水泥掺量相同时, 随着有机物料掺量的增加, 基材的内摩擦角总体上呈先增后减的变化规律, 但变化幅度不大。说明适量有机物料的添加可以提升植生基材的内摩擦角, 但作用有限, 并且添加过量反而会降低植生基材的内摩擦角。在有机物料掺量相同时, 植生基材的内摩擦角总体上随水泥掺量的增加呈降低的变化趋势, 6% 水泥掺量的植生基材内摩擦角较 CK 组和 2% 水泥掺量的植生基材分别降低 $1.2^\circ \sim 4.1^\circ$ 和

表 4 黄河底泥基植生基材黏聚力 c 与内摩擦角 ϕ

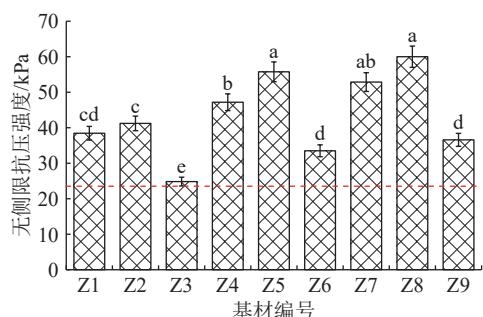
Table 4 Cohesion force and internal friction angle of the Yellow River sediment-based planting substrate

有机物料掺量	不同水泥掺量下的黏聚力 c /kPa			不同水泥掺量下的内摩擦角 ϕ (°)		
	2%	4%	6%	2%	4%	6%
2%	10.82	20.41	24.05	33.6	32.5	31.7
4%	16.92	25.17	33.31	34.3	32.1	32.4
6%	16.24	18.46	28.25	33.4	32.0	29.5
CK		8.06			33.6	

1.9°~3.9°, 说明水泥掺量较大会降低植生基材内摩擦角。

2.2.3 无侧限抗压强度分析

通过图 4 可以看出, 植生基材无侧限抗压强度明显受到有机物料和水泥掺量的影响, 且均高于 CK 组 (22.5 kPa)。其中在水泥掺量一定时, 植生基材无侧限抗压强度与黏聚力变化趋势相同, 有机物料为 4% 时植生基材的无侧限抗压强度达到峰值 (60 kPa), 相比于 CK 组基材提高 0.83~1.67 倍。此外, 水泥含量越高, 植生基材无侧限抗压强度越高, 当水泥掺量为 6% 时, 相比于 CK 组基材提高 0.62~1.67 倍, 说明添加水泥能有效增强植生基材的无侧限抗压强度。



注: 小写字母表示差异显著 ($P<0.05$); 红色虚线代表 CK。

图 4 植生基材无侧限抗压强度变化

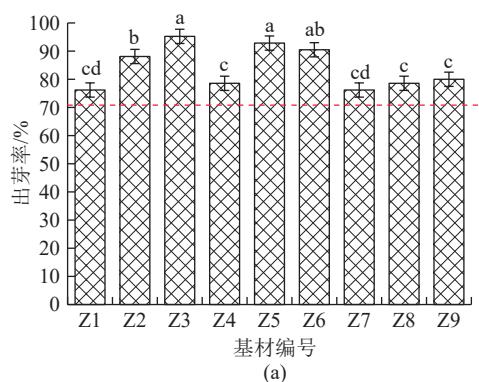
Fig.4 Planting substrate unconfined compressive strength change chart

2.3 不同处理基材对垂穗披碱草植生特性的影响

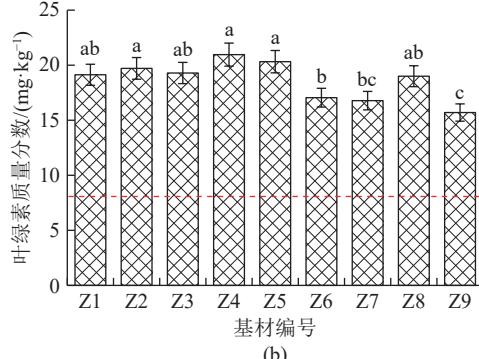
2.3.1 不同处理基材对垂穗披碱草出芽率及叶绿素含量的影响

由图 5a 可以看出, 不同配比的植生基材垂穗披碱草草种出芽率差异较大 ($P<0.05$), 但均高于 CK 组 (76%)。在相同水泥掺量占比下, 有机物料掺量为 4% 和 6% 时, 试验组的出芽率明显高于有机物料为 2% 的植生基材。在相同有机物料掺量占比下, 水泥掺量为 2% 和 4% 时, 试验组的出芽率明显高于 6% 水泥掺量下的植生基材。以上情况表明水泥掺量过高对垂穗披碱草发芽产生负面影响, 而高有机

物料掺量可增大黄河底泥土壤颗粒间隙, 增强水分吸附能力, 在种子萌发阶段, 为种子提供充足的水分以保证种子的发芽^[25]。



(a)



(b)

注: 小写字母表示差异显著 ($P<0.05$); 红色虚线代表 CK。

图 5 垂穗披碱草草种萌发特征和叶绿素质量分数

Fig.5 Germination characteristics and chlorophyll content of *Elymus nutans* seed

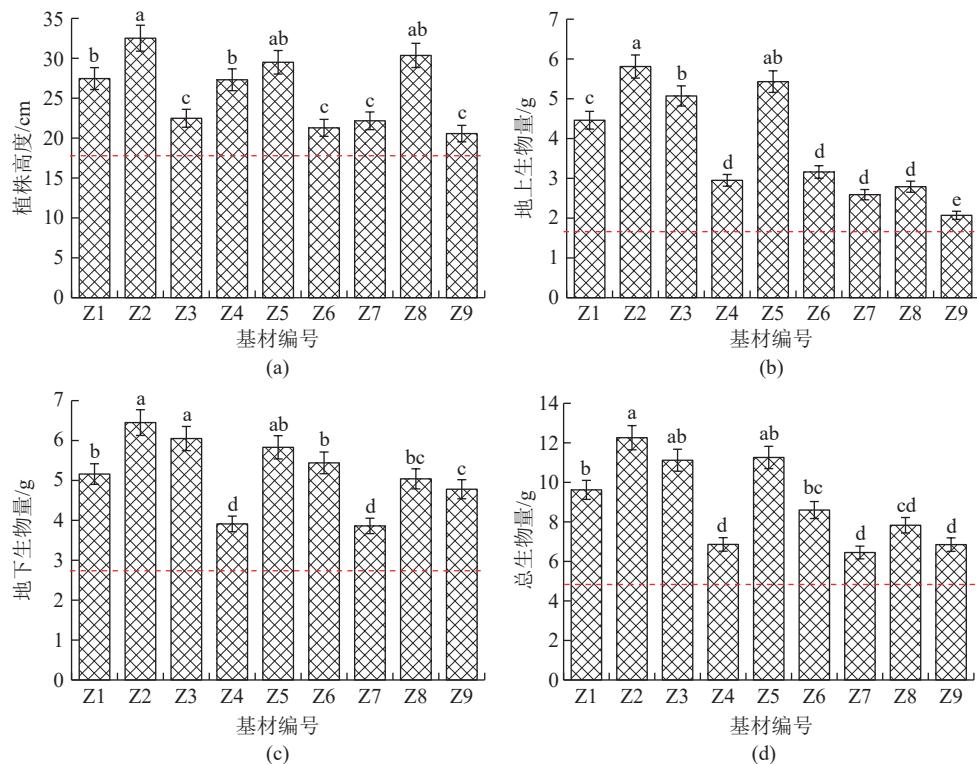
叶绿素含量在一定程度上反映了植物光合作用的强弱^[26], 本试验中不同处理下的垂穗披碱草叶绿素含量如图 5b 所示, 总体来看, 垂穗披碱草叶绿素含量变化规律与植株生长高度变化趋势有所类似, 但有所不同的是, 垂穗披碱草的叶绿素含量在 6% 高水泥掺量时略低于 2% 和 4% 水泥掺量下的叶绿素含量, 但差异不显著 ($P>0.05$)。当有机物料掺量为 4% 时, 垂穗披碱草的叶绿素含量均高于为 2% 和 6% 有机物料掺量下的叶绿素含量, 且当水泥掺量为 4% 和 6% 时表现尤为明显, 叶绿素质量分数分别为

19.01 和 20.32 mg/kg。

2.3.2 不同处理基材对垂穗披碱草植株高度及生物量的影响

植物生长高度是直接反映植物生理状况的指标,也可以从侧面反映植生基材的优劣^[27]。经过 30 d 种植后,各组植生基材垂穗披碱草植株高度如图 6a 所示,均在 20.4~32.5 cm 间。随着有机物料掺量的增

大,垂穗披碱草的植株高度呈现先增大后减小的趋势,其中有机物料掺量为 4% 时,垂穗披碱草植株高度相比于 2% 和 6% 有机物料掺量分别提高了 7.4%~27% 和 27.9%~32.2%。在低水泥掺量时,垂穗披碱草的生长高度并无明显差异 ($P>0.05$),而当水泥掺量为 6% 时垂穗披碱草的植株高度明显降低 ($P<0.05$)。



注: 小写字母表示差异显著 ($P<0.05$); 红色虚线代表 CK。

图 6 垂穗披碱草植株高度和生物量

Fig.6 Plant height and biomass of *Elymus nutans*

各组植生基材垂穗披碱草生物量如图 6b~图 6d 所示,有机物料掺量为 4% 时,垂穗披碱草的地上生物量和总生物量均最高,高出其他组别 6.51%~69.23%。当有机物料掺量为 2% 时,垂穗披碱草的地下生物量明显低于有机物料为 4% 和 6% 的植生基材,低出 14.74%~32.87%。总体来看,低水泥掺量 2% 和中等水泥掺量 4% 情况下,垂穗披碱草地上、地下以及总生物量均随着有机物料掺量的增加呈现先增大后减小的趋势,而在高水泥掺量 6% 时,垂穗披碱草地上、地下以及总生物量均处于较低水平。

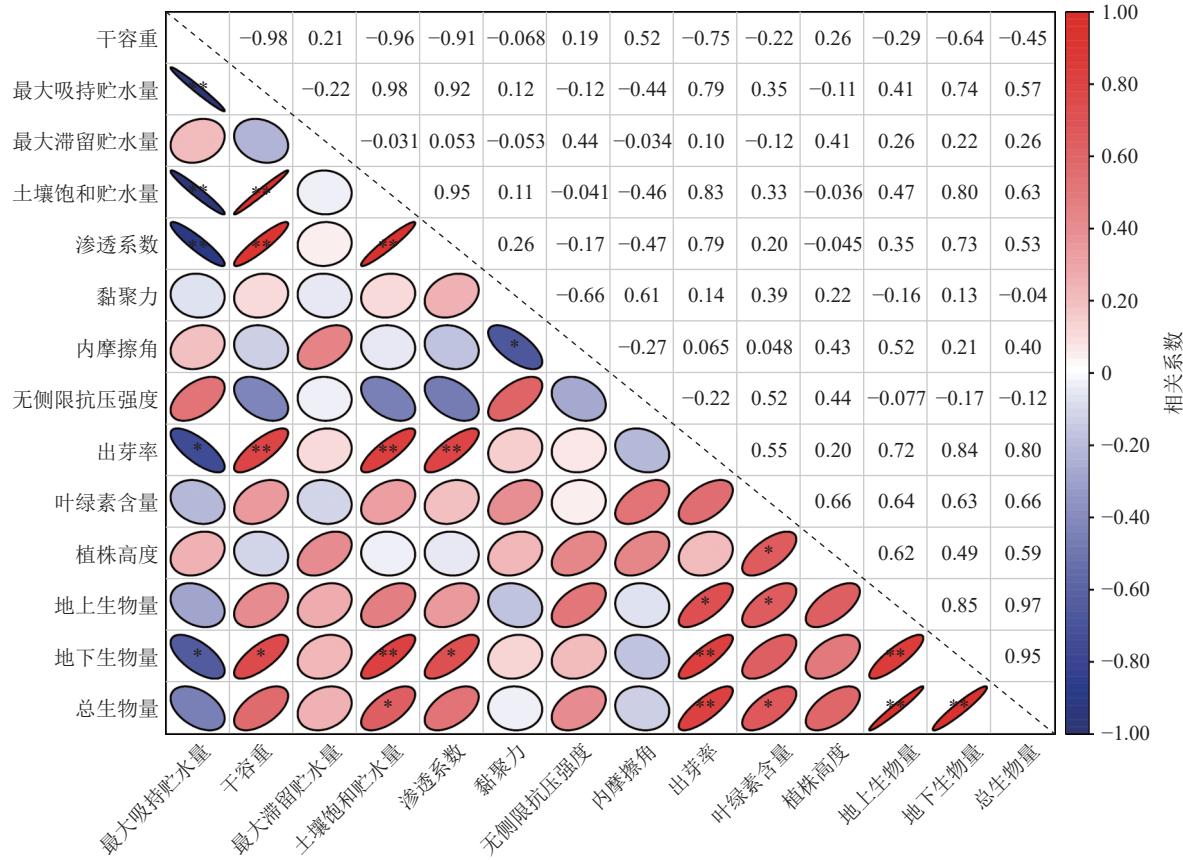
2.4 相关性分析

由图 7 可以看出,植生基材最大吸持贮水量、土壤饱和贮水量和渗透系数 3 者之间互呈显著正相关 ($P<0.05$),且均与基材干容重呈极显著负相关

($P<0.01$)。出芽率和地下生物量与最大吸持贮水量、土壤饱和贮水量、渗透系数呈显著或极显著正相关,与干容重呈显著负相关。叶绿素含量与植株高度、地上生物量、总生物量 3 者呈显著正相关。

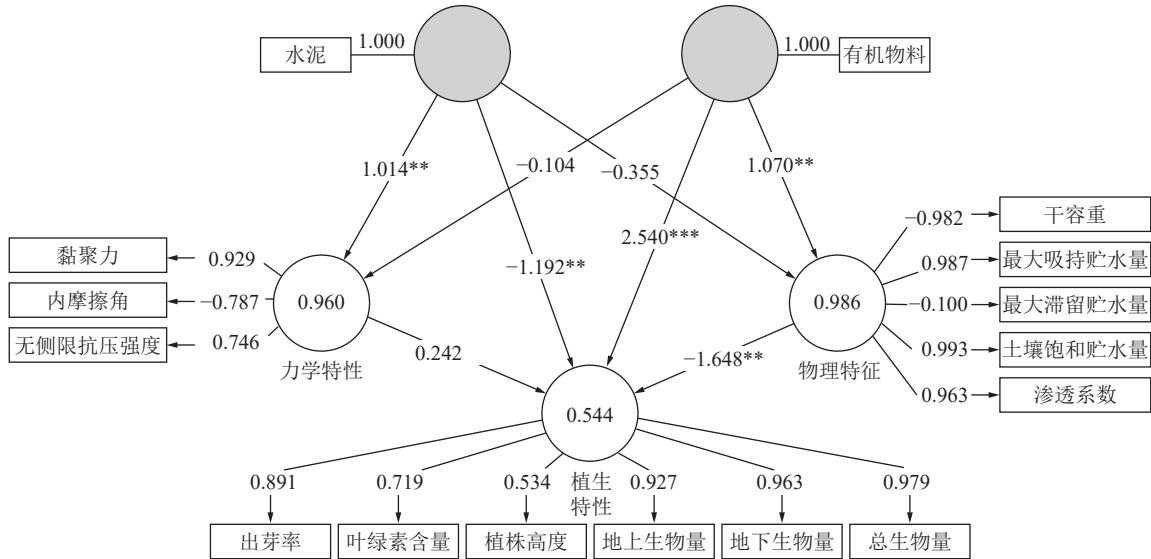
2.5 PLS-PM 分析

PLS-PM 结果表明(图 8),外源物质分别解释了基材物理、力学和植生特性子系统总方差的 98.6%、96%、54.4%,解释程度良好。分析表明,水泥材料与基材力学和植生特性分别呈极显著正相关(路径系数为 1.014, $P<0.01$)和极显著负相关(路径系数为 -1.192, $P<0.01$),说明水泥对植生基材力学特性起到正向作用,但对植物生理特性有抑制作用,且水平显著。有机物料对植生基材物理和植生特性均呈极显著正相关(路径系数为 1.07, $P<0.01$; 路径系数为 2.54, $P<0.001$)。结果表明,添加质地较轻的破碎玉



注: *表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关; **表示在 $P < 0.01$ 水平显著相关。

图 7 植生基材指标间相关性分析
Fig.7 Correlation analysis of planting substrate index



注: 椭圆内数字表示方差 R^2 ; 箭头上数字表示影响路径系数; **表示在 $P < 0.01$ 水平显著相关; ***表示在 $P < 0.001$ 水平显著相关。

图 8 外源物质与植生基材偏最小二乘路径 (PLS-PM) 分析
Fig.8 PLS-PM analysis of exogenous modified materials and planting substrate

米秸秆直接影响了植生基材容重、保水持水等物理特性, 间接作用于植物生理特性, 有利于植物生长发育。

3 讨 论

3.1 外源物质对基材水分、强度特征的影响

有机物料掺量对黄河底泥基植生基材容重及水

分特征影响显著,这主要是因为有机物料可以促进基材形成良好的土壤团粒结构^[25]。一方面,有机物料掺量的增加使得黄河底泥微小孔隙较为发育,毛细作用增强,改变了原底泥孔隙的均匀分布和连通性,土壤基材持水能力增加^[28]。同时使得非毛管孔隙相应增多,入渗水流的实际过水面积增大,提高了植生基材的水分入渗速率^[29],有利于植物根系快速吸收。另一方面,本试验所选用的破碎玉米秸秆内部是一种松散的纤维物质,其本身具有疏松多孔的特性,在短期内难以腐化,具有一定的吸水持水能力,也可以实现土壤水分的有效增容^[26,30]。

从水泥固化角度分析,水泥作为一种常规硬性材料,可作为黏结剂,在水泥水化过程中产生的具有胶结性能的水化产物可有效地对底泥颗粒进行连续胶结而形成强度较高的胶结骨架结构^[31-32],以提高植生基材强度,使基材能够在坡面上保持稳定。同时,黄河底泥中主要矿物种类以石英、钾长石、斜长石为主,矿物成分相对稳定,也为固化提供了基础^[5]。谈云志等^[33]研究发现水泥固化后的淤泥强度在养护后期会出现衰减,与本文试验结果不同。这主要是所选土体材料不同,谈云志选用河湖淤泥富含有机质,特定条件下,有机质降解后产生的腐殖酸会消耗Ca²⁺侵蚀固化淤泥的胶结结构,不利于形成强碱性环境。而本文选用黄河底泥进行水泥固化,虽然河湖淤泥与黄河底泥两者均具有强度低,pH呈碱性等相似特征,但黄河底泥中有机质、氮磷钾等养分含量均处于较低水平^[5],不会出现有机质降解释放腐殖酸,抑制水泥水化的情况。

此外,适量有机物料的添加也会提高黄河底泥基植生基材的强度,这主要是因为本试验选用玉米秸秆作为有机物料,采用机械破碎筛分时破碎并不完全,含有颗粒状和纤维状,其中纤维状秸秆在植生基材中主要起加筋作用,提高基材的初期强度^[10]。并且纤维状秸秆可以在土颗粒间发生相对滑动或位移时提供一定阻力,抑制剪切裂缝的延伸和扩展,增大植生基材的内摩擦角^[34]。但纤维状秸秆并未改变基材内部土颗粒的排列形式与接触特征,当超过某一临界值时,反而会影响基材的均匀性、整体性和团粒结构,从而降低了基材强度^[24],这与本文研究结果相同,当有机物料掺量为6%时,反而会降低植生基材强度。

3.2 外源物质对植物生理特性的影响

通过PLS-PM分析发现,高水泥掺量对植物生理特性有抑制作用且水平显著,这是由于水泥的加

入导致植生基材初期pH升高,基材孔隙内部碱性水环境对植物产生不利影响^[35],导致试验植物叶片稍发黄,植株矮小等情况。但总体来看,植株出芽率受影响较小,这主要是因为在植生基材中添加了生态改良剂,可以在种子周围快速形成一个适宜的缓冲环境,在植物发芽阶段保障植物发芽成活^[36]。随着时间的变化,植物后期处于较为稳定的生长环境,这主要是因为有机物料的加入,可显著提升植生基材有效通气孔隙和持水能力,为水和空气流通提供了更多通道,让植生基材具备良好的透气性,也为植物根系发育提供更多空间^[24]。另一方面玉米破碎秸秆具有类似海绵的孔隙结构,可为碱性物质的析出提供通道,其析出的碱性物质与空气中CO₂等物质结合生成多种盐,附着在基材表面从而降低了基材内部碱性浓度,有利于植物根系以及植株的发育^[37]。

本文研究发现高掺量有机物料的添加反而会影响植物生理特性,主要表现为植株高度和生物量相对较低。这主要是因为有机物料的添加使得植生基材内部形成连通孔隙,入渗能力增强会带走部分营养元素^[38-39],不利于根系的生长,这与曾思毅等^[21]研究结果相似。于丽双^[40]也发现,菌渣等有机物料的适量添加对水稻生长有促进作用,但比例过高会导致基质孔隙度过大、土壤水传导性太强,不利于营养物质的长期留存^[22],影响植物生长,这与本文试验结果相互印证。

3.3 外源物质对植生基材的综合作用

黄河底泥为粉质砂土,黏土含量低,结构松散,稳定性差,承载力低,具有遇水即化,遇水即散的特性^[5]。通过PLS-PM分析发现,水泥材料与基材力学特性呈极显著正相关,与基材物理特性和植生特性均呈负相关关系,这主要是因为黄河底泥颗粒在掺入水泥后,形成胶状物质网状结构,且水泥掺量越高,越易形成致密度良好的水化产物,使得复合基材强度增长明显^[41]。但研究发现6%水泥掺量时会使得植生基材内摩擦角略有降低,主要是因为水泥掺量过高,水化作用造成试样干燥收缩,裂缝数量增加,在快速剪切时,颗粒间有效接触点减少,从而引起内摩擦角减小^[42]。同时高水泥掺量会使得植生基材孔隙连通性减弱,蓄水贮水能力减弱^[43],进而使得叶绿素的合成受阻,分解加速,叶片变黄^[25]。

从水资源利用的角度来看,乌海地区降水稀少,年均降水量159.8 mm,夏季月均降水量仅维持在10~30 mm间^[44],所以在乌海地区进行生态修复所需土壤基材应具有良好的蓄水持水和入渗能力^[45],

而外源物质有机物料的掺入正好解决了这一问题。现有黄河底泥粉质颗粒占比高^[46],质地密实,较大的土壤容重阻碍了水分运移,降水难以及时入渗,造成部分水分以地表径流或蒸发的形式流失^[47]。有机物料的添加不仅加速了水分入渗速率,可使自然降水和灌溉水转化为土壤水的比例增加,也提高了植生基材持水与供水能力,具有较好的节水效果^[48]。并且质地较轻的破碎玉米秸秆有利于水分传导^[49],但掺量较高亦会使得基材养分流失^[50],不利于植物生长发育。在PLS-PM模型分析中,植生特性子系统在外源物质的直接作用和基材物理、力学子系统的间接作用下,除植株高度外,其余指标方差均>0.7,总体来看不同配比基材的植物出苗率及生长高度虽有差异,但植被总体覆盖度能够满足黄河流域矿区边坡生态修复的要求。

4 结论与展望

1) 黄河底泥为粉质砂土,容重大孔隙少,其有机物料的添加可以显著增强植生基材的通气孔隙,提高基材蓄水持水能力和渗透性能,起到很好的节水效果,有利于植物根系以及植株的发育,并且纤维状秸秆可以抑制剪切裂缝的延伸和扩展,提高基材延性,但掺量不能超过4%。

2) 黄河底泥结构松散,承载力低,其水泥的添加对黄河底泥基植生基材的强度提升显著,但水泥掺量为6%时会使得基材干燥收缩,内摩擦角 φ 略有所减小,并且黄河底泥是碱性土壤基质,高水泥掺量的添加会对植物出芽和前期生长阶段产生抑制作用。

3) 综合上述结论,以黄河底泥为土壤基质制备植生基材时,水泥与有机物料掺量均维持在4%,可使植生基材的蓄水持水能力与力学性能达到最佳,同时也符合水土资源短缺地区栽种植物的生长环境要求。此外,将黄河底泥基植生基材用于黄河流域矿区边坡生态修复,可以起到“化害为利、变废为宝”的作用,其研究结果可以推广到黄河流域其他涉及清淤的湖库区,具有广阔的应用前景,对黄河流域生态保护修复具有重要作用。

参考文献(References):

- [1] 滕雅丽, 谢苗苗, 王回苗, 等. 资源型城市土地利用转型及其对环境质量的影响: 以乌海市为例[J]. 生态学报, 2022, 42(19): 7941–7951.
TENG Yali, XIE Miaomiao, WANG Huihui, et al. Land use transition in resource-based cities and its impact on habitat quality: A case of Wuhai City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 7941–7951.
- [2] 卞正富, 于昊辰, 韩晓彤. 碳中和目标背景下矿山生态修复的路径选择[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 449–459.
BIAN Zhengfu, YU Haochen, HAN Xiaotong. Solutions to mine ecological restoration under the context of carbon[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 449–459.
- [3] 江恩慧, 王远见, 李军华, 等. 黄河水库群泥沙动态调控关键技术研究与展望[J]. 人民黄河, 2019, 41(5): 28–33.
JIANG Enhui, WANG Yuanjian, LI Junhua, et al. Prospect and research on the key technology of dynamic sediment regulation for cascade reservoirs in Yellow River[J]. Yellow River, 2019, 41(5): 28–33.
- [4] 王培俊, 胡振琪, 邵芳, 等. 黄河泥沙作为采煤沉陷地充填复垦材料的可行性分析[J]. 煤炭学报, 2014, 39(6): 1133–1139.
WANG Peijun, HU Zhenqi, SHAO Fang, et al. Feasibility analysis of Yellow River sediment used as the filling reclamation material of mining subsidence land[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6): 1133–1139.
- [5] 胡振琪, 李勇, 陈洋. 黄河泥沙在生态修复中的作用机理与关键技术[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(1): 1–15.
HU Zhenqi, LI Yong, CHEN Yang. The mechanism and key technology of the Yellow River sediment in ecological rehabilitation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(1): 1–15.
- [6] 胡振琪, 赵艳玲. 黄河流域矿区生态环境与黄河泥沙协同治理原理与技术方法[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 438–448.
HU Zhenqi, ZHAO Yanling. Principle and technology of coordinated control of eco-environment of mining areas and river sediments in Yellow River watershed[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 438–448.
- [7] 张家明, 陈积普, 杨继清, 等. 中国岩质边坡植被护坡技术研究进展[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 1–7.
ZHANG Jiaming, CHEN Jipu, YANG Jiqing, et al. Advances in biological protection of rock slopes in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5): 1–7.
- [8] 刘黎明, 宋岩松, 钟斌, 等. 植被混凝土生态修复技术研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(3): 916–927.
LIU Liming, SONG Yansong, ZHONG Bin, et al. Research progress on ecological restoration technology of vegetation concrete[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(3): 916–927.
- [9] 丁齐, 肖桂林. 生态护坡基材无侧限抗压强度试验研究[J]. 公路, 2014, 59(6): 252–258.
DING Qi, XIAO Henglin. Research on the unconfined compressive strength of basis material for ecological protection of slope[J]. Highway, 2014, 59(6): 252–258.
- [10] 夏振尧, 许文年, 王乐华. 植被混凝土生态护坡基材初期强度特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1719–1724.
XIA Zhenyao, XU Wenian, WANG Lehua. Research on characteristics of early strength of ecological slope-protected base material of vegetation-growing concrete[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1719–1724.
- [11] 刘大翔, 李少丽, 许文年, 等. 植被混凝土有机质类型与配比的合理选取[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(4): 37–40, 54.

- LIU Daxiang, LI Shaoli, XU Wennian, et al. Selection tests for type and ratio of organic matter in vegetation concrete[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(4): 37–40, 54.
- [12] 邱琛, 韩晓增, 陈旭, 等. CT 扫描技术研究有机物料还田深度对黑土孔隙结构影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(14): 98–107.
- QIU Chen, HAN Xiaozeng, CHEN Xu, et al. Effects of organic amendment depths on black soil pore structure using CT scanning technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(14): 98–107.
- [13] 齐江涛, 田辛亮, 刘凯, 等. 黑土区覆混耕作中玉米秸秆还田对土壤水分入渗性能的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 141–147.
- QI Jiangtao, TIAN Xinliang, LIU Kai, et al. Soil water infiltration under mulch tillage affected by maize stovers returning in black soil areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(1): 141–147.
- [14] DONG Y P, SHAO Y F, LIU A J, et al. Insight of soil amelioration process of bauxite residues amended with organic materials from different sources[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019, 26(28): 29379–29387.
- [15] 吴玮婷, 刘振婷, 高广磊, 等. 桔草芽孢杆菌对沙生植物种子萌发和幼苗生长生理特征的影响[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2024, 22(6): 70–76.
- WU Weiting, LIU Zhenting, GAO Guanglei, et al. Effects of *Bacillus subtilis* on seed germination and seedling growth physiological characteristics of psammophytes[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2024, 22(6): 70–76.
- [16] 国家能源局. 水电工程陡边坡植被混凝土生态修复技术规范: NB/T 35082—2016[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
- [17] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [18] 王广锋. 黄土区边坡陡坡段植被建植技术及应用效果[J]. 水土保持通报, 2020, 40(3): 243–248.
- WANG Guangfeng. Vegetation construction technology and application effect of steep slope in loess area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(3): 243–248.
- [19] 宋建超, 杨航, 景媛媛, 等. 外源 GABA 对 NaCl 胁迫下垂穗披碱草种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(2): 403–411.
- SONG Jianchao, YANG Hang, JING Yuanyuan, et al. Effects of exogenous GABA on seed germination and physiological characteristics of *elymus nutans* under NaCl stress[J]. Acta Agricola Sinica, 2022, 30(2): 403–411.
- [20] 邱娟, 罗琰, 王沛, 等. 碱胁迫对超干处理垂穗披碱草种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 中国草地学报, 2017, 39(1): 79–84.
- QI Juan, LUO Yan, WANG Pei, et al. Germination and seedling growth of ultra-dried *elymus nutans* seed under alkali stress[J]. Chinese Journal of Grassland, 2017, 39(1): 79–84.
- [21] 曾思毅, 孙娜, 秦雪龙, 等. 不同植生基质配比对宽叶雀稗种子萌发及幼苗生理的影响[J]. 草业科学, 2022, 39(5): 949–959.
- ZENG Siyi, SUN Na, QIN Xuelong, et al. Effects of different plant growing material ratios on seed germination and seedling growth of *Paspalum wettsteinii*[J]. Pratacultural Science, 2022, 39(5): 949–959.
- [22] 黄明逸, 张展羽, 徐辉, 等. 咸淡轮灌和生物炭对滨海盐渍土水盐运移特征的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 238–247.
- HUANG Mingyi, ZHANG Zhanyu, XU Hui, et al. Effects of cycle irrigation with brackish and fresh water and biochar on water and salt transports of coastal saline soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 238–247.
- [23] 李梦瑶, 李永辉, 吕梦凡, 等. 粉土混凝土界面与粉土剪切对比试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(1): 171–178, 217.
- LI Mengyao, LI Yonghui, LÜ Mengfan, et al. Comparative shear test study on silt-concrete interface and silt[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(1): 171–178, 217.
- [24] 梁永哲, 陈毅, 刘大翔, 等. 外掺植物纤维对冻融作用下植被混凝土抗剪强度的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 136–139, 145.
- LIANG Yongzhe, CHEN Yi, LIU Daxiang, et al. Effect of additive plant fiber on shearing strength of vegetation-compatible concrete under freezing-thawing cycles[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(2): 136–139, 145.
- [25] 孙超, 许文年, 夏振尧, 等. 岩质边坡植被混凝土肥力时间变异性研究[J]. 中国水土保持, 2009(4): 32–34, 60.
- SUN Chao, XU Wennian, XIA Zhenyao, et al. Time variability of vegetation concrete fertility on rocky slopes[J]. Soil and Water Conservation in China, 2009(4): 32–34, 60.
- [26] 杜韬, 王冬梅, 张泽洲, 等. 煤矸石植生基质保水性能对黑麦草生长的影响[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(4): 75–84.
- DU Tao, WANG Dongmei, ZHANG Zezhou, et al. Effect of the water-retaining property of coal gangue planting substrate on the growth of *Lolium perenne*[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(4): 75–84.
- [27] 秦琪焜, 方健梅, 王根柱, 等. 煤矸石与城市污泥混合制备植生基质的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(7): 304–314.
- QIN Qikun, FANG Jianmei, WANG Genzhu, et al. Experimental study of planting substrate mixed with coal gangue and municipal sludge[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(7): 304–314.
- [28] 张凯, 宰松梅, 仵峰, 等. 小麦玉米秸秆还田对土壤水分入渗的影响[J]. 东北农业大学学报, 2022, 53(9): 35–42.
- ZHANG Kai, ZAI Songmei, WU Feng, et al. Effects of returning wheat or corn straw on soil water infiltration[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2022, 53(9): 35–42.
- [29] ZHANG M, CHENG G, FENG H, et al. Effects of straw and biochar amendments on aggregate stability, soil organic carbon, and enzyme activities in the Loess Plateau, China[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2017, 24(11): 10108–10120.
- [30] 王擎运, 陈景, 杨远照, 等. 长期秸秆还田对典型砂姜黑土胀缩特性的影响机制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 119–124.
- WANG Qingyun, CHEN Jing, YANG Yuanzhao, et al. Effect mechanism of long-term straw returning on shrinkage characteristic in typical Shajiang black soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(14): 119–124.
- [31] CHOOBASTI A J, KUTANAEI S S. Microstructure character-

- istics of cement-stabilized sandy soil using nanosilica[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017, 9(5): 981–988.
- [32] 孙海超, 王文军, 凌道盛. 低掺量水泥固化土的力学特性及微观结构[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(3): 530–538.
- SUN Haichao, WANG Wenjun, LING Daosheng. Mechanical properties and microstructure of solidified soil with low cement content[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2021, 55(3): 530–538.
- [33] 谈云志, 柯睿, 陈君廉, 等. 偏高岭土增强石灰-水泥固化淤泥的耐久性研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(4): 1146–1152.
- TAN Yunzhi, KE Rui, CHEN Junlian, et al. Enhancing durability of lime-cement solidified sludge with metakaolin[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(4): 1146–1152.
- [34] CARRUTH W D, HOWARD I L. Use of Portland cement and polymer fibers to stabilize very high moisture content fine-grained soils[J]. *Advances in Civil Engineering Materials*, 2013, 2(1): 1–24.
- [35] 王玉军, 翟爱良, 赵佳, 等. 再生砖骨料植生混凝土植生试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2016(3): 90–95.
- WANG Yujun, ZHAI Ailiang, ZHAO Jia, et al. Experimental studies on planting tests of recycled brick aggregate vegetation-type concrete[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2016(3): 90–95.
- [36] 赵延春, 金耀华, 许飞, 等. 3种草在草坪砖-基质栽培环境下的适生性[J]. 分子植物育种, 2022, 20(1): 343–348.
- ZHAO Yanchun, JIN Yaohua, XU Fei, et al. Adaptability investigation of 3 grass species planted in the lawn brick-substrates[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2022, 20(1): 343–348.
- [37] 冯瑞云, 王慧杰, 郭峰, 等. 稻秆型土壤改良剂对土壤结构和水分特征的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(9): 44–48, 65.
- FENG Ruiyun, WANG Huijie, GUO Feng, et al. Effects of modified straw soil amendment on soil structure and water characteristics[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(9): 44–48, 65.
- [38] YANG X R, SHI C Q, ZHAO T N, et al. The effect of improving slag vegetative substrate at the dump of open-pit coal mine in rujigou, Ningxia, China[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2023, 14(4): 775–783.
- [39] BOWKER M A, MAESTRE F T, ESCOLAR C. Biological crusts as a model system for examining the biodiversity–ecosystem function relationship in soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(3): 405–417.
- [40] 于丽双. 利用菇渣制作有机水稻育苗基质的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018: 55–56.
- YU Lishuang. Study on making organic rice seedling substrate from mushroom residue[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018: 55–56.
- [41] 邓永锋, 赵余, 刘倩雯, 等. 钢渣的硅系与复合系激发及其在软土固化中的应用[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(11): 11–20.
- DENG Yongfeng, ZHAO Yu, LIU Qianwen, et al. Na₂SiO₄-and cement-based activation on steel slag and its application in soft-soil stabilization[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(11): 11–20.
- [42] 杨俊, 杨志, 张国栋, 等. 不同垂直荷载与剪切速率条件下水泥稳定风化砂直剪试验研究[J]. *水利水运工程学报*, 2014(3): 77–83.
- YANG Jun, YANG Zhi, ZHANG Guodong, et al. Direct shear test analysis of cement-stabilized weathered sand under different vertical loads and shear rates[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2014(3): 77–83.
- [43] 杨卫军, 杨成军, 潘玲, 等. 水泥改性磷石膏基植生材料的研究[J]. 非金属矿, 2020, 43(4): 20–23.
- YANG Weijun, YANG Chengjun, PAN Ling, et al. Study on cement modification of phosphogypsum-fly ash-humus soil vegetation material[J]. *Non-Metallic Mines*, 2020, 43(4): 20–23.
- [44] 张渭军, 黄金廷. 鄂尔多斯盆地降水量分布特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(2): 56–59.
- ZHANG Weijun, HUANG Jinting. Distribution characters of precipitation in Ordos basin[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(2): 56–59.
- [45] JIANG Y, LIU C M, LI X Y, et al. Rainfall-runoff modeling, parameter estimation and sensitivity analysis in a semiarid catchment[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2015, 67: 72–88.
- [46] 孙剑辉, 柴艳, 王国良, 等. 黄河泥沙对水质的影响研究进展[J]. 泥沙研究, 2010(1): 72–80.
- SUN Jianhui, CHAI Yan, WANG Guoliang, et al. Review on effects of sediment on the water quality of the Yellow River[J]. *Journal of Sediment Research*, 2010(1): 72–80.
- [47] 王晓彤, 胡振琪, 梁宇生, 等. 基于水分特性的采煤沉陷地充填复垦黄河泥沙容重优选[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16): 258–264.
- WANG Xiaotong, HU Zhenqi, LIANG Yusheng, et al. Optimal bulk density infilling reclamation of mining subsidence land with Yellow River sediment based on water characteristics[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(16): 258–264.
- [48] 魏俊岭, 金友前, 鄢红建, 等. 施肥措施对砂姜黑土水分入渗性能的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 965–971.
- WEI Junling, JIN Youqian, GAO Hongjian, et al. Effects of fertilization practices on infiltration in Shajiang black soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(8): 965–971.
- [49] 张宏媛, 逢焕成, 卢闯, 等. CT扫描分析稻秆隔层孔隙特征及其对土壤水入渗的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(6): 114–122.
- ZHANG Hongyuan, PANG Huancheng, LU Chuang, et al. Pore characteristics of straw interlayer based on computed tomography images and its influence on soil water infiltration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(6): 114–122.
- [50] 寇青青, 任剑萍, 汪明星, 等. 渝东北紫色土饱和导水率传递函数研究[J]. 土壤, 2020, 52(3): 611–617.
- KOU Qingqing, YUN Jianwei, WANG Mingxing, et al. Study on pedotransfer function of saturated hydraulic conductivity of purple soil in northeast Chongqing[J]. *Soils*, 2020, 52(3): 611–617.