

# 西北干旱露天煤矿排土场土壤重构与水盐运移机制

张凯<sup>1</sup>, 李晓楠<sup>1</sup>, 暴凯凯<sup>1</sup>, 姜凯升<sup>2</sup>, 王潇芜<sup>1</sup>, 谭栩荧<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院, 北京 100083; 2. 国能新疆红沙泉能源有限责任公司, 新疆 昌吉州 831100)

**摘要:** 矿山排土场生态修复是煤矿露天开采面临的重大环境问题, 是制约建设绿色露天煤矿的重要因素。土壤重构是排土场生态修复的重要步骤, 以新疆为代表的西北煤炭基地, 水资源短缺, 盐碱化突出, 土壤水盐运移是决定土壤重构是否成功的关键指标。目前研究集中在表层土壤重构改善土壤养分促进植物生长, 针对保水控盐的功能化土壤重构的研究甚少, 对不同土壤重构方式下的水盐运移机制尚不明晰。研究立足新疆煤炭资源禀赋特征, 从煤炭循环经济的角度出发, 采用能源化工副产物煤气化渣 (CGS) 作为重构材料, 通过毛细水上升-蒸发试验, 分析 CGS 重构后水盐垂向运移和水分供给能力, 通过 Van Genuchten 模型拟合土壤水分特征曲线, 分析 CGS 重构后土壤持水能力, 研究 CGS 作为含水层重构材料的可行性。采用煤矿开采伴生岩石矿物红泥岩作为重构材料, 通过土柱入渗蒸发试验, 分析红泥岩重构后不同土壤深度的水盐变化情况, 研究红泥岩作为隔水层重构材料的可行性。结果表明, CGS 重构改善土壤质地, 优化孔隙结构, 促进了土壤水盐运移, 毛细作用增强, 促进了下层水分向上供给, 同时也增加了盐分表聚, 重构改变土水特征曲线参数, 增加了饱和含水量  $\theta_s$ , 降低了参数  $a$  和  $n$ , 改善了土壤持水性能。CGS 添加量越高, 细渣质量分数越大, 效果越明显。CGS 作为重构含水层材料具有可行性。红泥岩黏粒和次生矿物含量高, 孔隙结构丰富, 物理吸附性良好, 重构后 0~24 cm 深度下土壤含水率高于对照组, 蒸发后的盐分在 20~24 cm 达最高值, 红泥岩有效阻隔了盐分上移。红泥岩作为重构隔水层材料具有可行性。研究以期探索出一条适合西部煤炭基地排土场土壤重构模式。

**关键词:** 土壤重构; 水盐运移; 煤气化渣; 红泥岩; 毛细水上升

**中图分类号:** TD88 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)03-1556-14

## Soil reconstruction and water-salt transport mechanism of waste dump in arid open-pit coal mine in Northwest China

ZHANG Kai<sup>1</sup>, LI Xiaonan<sup>1</sup>, BAO Kaikai<sup>1</sup>, JIANG Kaisheng<sup>2</sup>, WANG Xiaoyuan<sup>1</sup>, TAN Xuying<sup>1</sup>

(1. School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. Guoneng Xinjiang Hongshaquan Energy Co., Ltd., Changji Prefecture 831100, China)

**Abstract:** The ecological restoration of mine dump is a major environmental problem faced by open-pit mining, and it is an important factor restricting the construction of green open-pit coal mine. Soil reconstruction is an important step in the ecological restoration of dumps. The northwest coal base, represented by Xinjiang, is characterized by water scarcity and salinization. Soil water and salt migration is a key indicator to determine the success of soil reconstruction. At present, the

收稿日期: 2023-11-06 修回日期: 2023-12-18 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.XH23.1457

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFF1303304); 国家自然科学基金资助项目 (42177037); 煤基大宗固废生态综合利用技术研发与示范基金资助项目 (GJNY-22-71)

作者简介: 张凯 (1984—), 男, 辽宁朝阳人, 教授, 博士。E-mail: zhangkai@cumtb.edu.cn

引用格式: 张凯, 李晓楠, 暴凯凯, 等. 西北干旱露天煤矿排土场土壤重构与水盐运移机制[J]. 煤炭学报, 2024, 49(3): 1556-1569.

ZHANG Kai, LI Xiaonan, BAO Kaikai, et al. Soil reconstruction and water-salt transport mechanism of waste dump in arid open-pit coal mine in Northwest China[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(3): 1556-1569.



移动阅读

research focuses on the surface soil reconstruction to improve soil nutrients and promote plant growth. There are few studies on the functional soil reconstruction of water and salt control, and the mechanism of water and salt transportation under different soil reconstruction methods is still unclear. Based on the characteristics of coal resource endowment in Xinjiang, from the perspective of coal circular economy, this study used coal gasification slag (CGS), a by-product of energy and chemical industry, as a reconstruction material. Through a capillary water rising-evaporation experiment, the vertical migration of water and salt and water supply capacity after CGS reconstruction were analyzed. The Van Genuchten model was used to fit the soil water characteristic curve, analyzed the soil water holding capacity after CGS reconstruction, and studied the feasibility of CGS as an aquifer reconstruction material. The red mudstone associated with coal mining was used as the reconstruction material. Through the soil column infiltration evaporation experiment, the water and salt changes at different soil depths after the reconstruction of red mudstone were analyzed, and the feasibility of mudstone as the reconstruction material of aquiclude was studied. The results showed that the CGS reconstruction improved soil texture, optimized pore structure, promoted soil water and salt transport, enhanced capillary action, promoted the upward supply of water in the lower layer, and also increased salt surface accumulation. The reconstruction changed the parameters of soil water characteristic curve, increased  $\theta_s$ , decreased  $a$  and  $n$ , and improved soil water holding capacity. The higher the amount of CGS added, the greater the fine slag content, the more obvious the effect. The CGS was feasible as a material for reconstructing aquifer. The red mudstone had high clay and secondary mineral content, rich pore structure and good physical adsorption. After reconstruction, the soil water content at 0–24 cm depth was higher than that of the control group, and the salt reached the highest value at 20–24 cm after evaporation. The red mudstone effectively blocked the upward movement of salt. Red mudstone was feasible as a material for reconstructing aquifuge. The research explores a suitable soil reconstruction model for the waste dump in western coal base.

**Key words:** soil reconstruction; water and salt transport; coal gasification slag; red mudstone; capillary water rising

随着我国东部地区可开发采煤炭资源锐减,能源生产重心已逐渐转移到地处干旱半干旱区、生态环境脆弱的西北地区<sup>[1]</sup>。据统计,西北地区蕴藏着我国约73%的煤炭资源量<sup>[2]</sup>,其中新疆煤炭预测储量达2.19万亿t,约占我国预测煤炭资源总量的39.3%<sup>[3]</sup>。新疆在西北地区煤炭能源结构中起支撑作用。作为我国重要的能源化工基地,新疆主要以露天开采为主<sup>[4]</sup>。新疆露天煤矿地处戈壁荒漠区,干旱少雨,土壤沙化和盐碱化严重,生态环境脆弱<sup>[5]</sup>,加剧了生态修复难度。排土场作为露天开采排弃物集中堆放的场地,是一个巨型土石混合堆积体,堆积过程中受机械反复碾压,土壤层次紊乱,土壤结构不良<sup>[6-7]</sup>,水土流失严重。因此,重构排土场合理的土壤结构是实现排土场生态修复的关键<sup>[8]</sup>。现有研究提出了垂向自上而下重构具有不同功能的人工土壤层包括表土层-含水层-隔水层,其中,表土层主要是富养,适宜植物生长,是现有研究最多的一层;含水层主要是储存水分,为植被生长提供水源;隔水层主要是发挥封闭和吸附功能,阻断水分渗下损失和盐分向上迁移的路径<sup>[7,9-10]</sup>,关于排土场土壤含水层和隔水层的研究相对甚少。新疆地处西北干旱区,蒸发强烈,排土场土壤压实严重导致了水分在土表迅速蒸发,作为新构土壤,排土场土壤结构

不稳定,水分也会以径流和渗漏方式流失,加剧了水资源短缺<sup>[11]</sup>,同时也加剧了土壤盐碱化程度<sup>[12]</sup>。因此,研究排土场土壤重构与蓄水和盐分迁移机制是克服这一难题的主要解决思路。

土壤重构的难点之一是排土场可用的土壤资源稀缺<sup>[13-14]</sup>,严重制约了排土场复垦效果。重构材料因地制宜。立足煤炭资源禀赋,煤化工产业在新疆迅速发展,以煤制气为代表的煤化工产能占全国的66%<sup>[15]</sup>。煤气化产业保障了国家能源安全,带动了区域经济社会发展的同时,也产生了大量的废弃物<sup>[16]</sup>。煤气化渣(Coal gasification slag, CGS)是煤气化过程产生的主要副产品,据统计每吨煤产生15%~20%的CGS<sup>[17]</sup>。CGS产量大,目前有关其应用的研究主要集中在制备混凝土混合物<sup>[18]</sup>、水泥添加剂<sup>[19]</sup>、陶瓷颗粒<sup>[20]</sup>、水玻璃<sup>[21]</sup>和水体吸附剂<sup>[22]</sup>等方面。新疆地域辽阔,受限于运输距离、处理成本和用户范围等因素,上述CGS资源化利用方式并不能为新疆CGS处置提供借鉴思路。新疆CGS产量高,消纳低<sup>[23]</sup>,CGS仍以堆存和填埋为主。研究表明CGS具有比表面大、孔隙率高的特点,能有效改善土壤物理结构<sup>[24]</sup>,促进水分保持和养分增持<sup>[25-26]</sup>及作物生长<sup>[27]</sup>,然而这些研究集中在CGS重构表土层,对于CGS是否可作为含水

层的重构材料仍有待验证。

重构材料需就地取材,以重构土壤的功能展开遴选。隔水层作为重构土壤的最下层,具有致密性和吸附性。露天煤矿开采需要将矿层上覆岩层进行剥离,过程中伴随产生了大量以红泥岩为主的岩土物质。红泥岩产量高,利用率低,不合理的堆积容易造成土地压占<sup>[28-29]</sup>。红泥岩具有高黏性和低渗透性能<sup>[30-31]</sup>,符合隔水层材料的基本性质。通过开展以红泥岩作为隔水层材料的研究,分析其是否能够有效防止水分渗漏,阻碍下层盐分上移,是判别红泥岩可否作为土壤重构材料的关键依据。

针对以上研究的不足,笔者以西北某露天煤矿排土场土壤为研究对象,假设 CGS 重构含水层和泥岩重构隔水层能够促进水盐运移,有效蓄水供水,开展以下工作:①通过毛细水上升试验和土水特征曲线研究 CGS 重构含水层的可行性;②通过土柱试验研究泥岩作为隔水层材料的可行性;③解析 CGS 作为含水层材料的蓄水机制以及泥岩作为隔水层材料对水分防渗和盐分阻隔的机制。本研究遵循煤炭行业循环经济发展理念<sup>[32]</sup>,以期为煤炭行业伴生材料综合利用和西北干旱地区排土场土壤重构提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

试验材料包括排土场土壤、煤气化渣、红泥岩和表土(表1)。排土场土壤取自新疆某露天煤矿外排土场平盘0~20 cm土层,土壤呈强碱性,电导率(Electrical Conductivity, EC)高,属壤砂土。煤气化渣取自

新疆某化工厂经 GE(原 Texaco)水煤浆气化产生,该化工厂煤气化粗渣(Coal gasification coarse slag, CGCS)产量为43.17万 t/a,煤气化细渣(Coal gasification fine slag, CGFS)产量为13.49万 t/a,前者砂粒质量分数高,后者粉粒质量分数高,渣样均无重金属和有机污染<sup>[33]</sup>。泥岩取自矿区+650平盘,属中生界侏罗系中上统石树沟群(J2-3sha),储量丰富,黏粒质量分数高。表土取自矿区未被扰动的土壤。

### 1.2 含水层试验设计

#### 1.2.1 毛细水上升-蒸发试验

试验采用内径8 cm,高100 cm的有机玻璃柱,按照表2进行装填,装填时土壤容重控制在 $1.8 \text{ g/cm}^3$ ,土壤含水率(Soil water content, SWC)控制在6%,逐层压实,每隔20 cm设置SL-100型传感器。试验初期将土柱外水箱注满水,待内外水箱液平齐时,停止加水。记录湿润锋高度并计算土壤水分入渗速率。当毛细水上升达最大高度后,开展蒸发试验,将土柱置于275 W红外灯下30 cm处,光照时间为8 h/d,此时土柱上边界被设定为蒸发的大气条件,下边界被指定为饱和含水量恒定的条件。蒸发持续10 d,毛细水上升和蒸发过程中SWC和EC由传感器连续自动监测,试验装置如图1(a)所示。为深入研究蒸发过程中土壤盐分的迁移变化,以20 cm为间隔每3 d进行取样,测试土壤 $\text{Cl}^-$ 和 $\text{Na}^+$ 质量分数。

#### 1.2.2 土壤水分特征曲线

将各重构组土样均匀压实装入环刀,加水逆向饱和土样12~24 h后置于测试单元上,监测环刀土样基质势及含水率变化。定时观察土壤张力计数据,当基质势达到峰值并开始下降时,取出环刀在 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 下放

表1 试验材料理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of experiment materials

材料	质量分数/%			pH	EC/ $(\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1})$
	砂粒(0.05~2 mm)	粉粒(0.002~0.05 mm)	黏粒(<0.002 mm)		
排土场土壤	81.0	17.2	1.8	9.0	3 500
CGCS	90.8	9.2	0	8.3	3 400
CGFS	72.9	26.6	0.4	8.9	4 100
红泥岩	58.4	38.9	2.6	9.4	490
表土	80.3	18.3	1.4	9.2	653

表2 煤气化渣重构含水层处理

Table 2 CGS reconstruction aquifer treatment

处理	CK	CFS1	CFS2	CFS3	CFS4	CFS5	CFS6	CFS7	CFS8	CFS9
w(CGFS) : w(CGCS)	0	1 : 3	1 : 2	1 : 1	1 : 3	1 : 2	1 : 1	1 : 3	1 : 2	1 : 1
w(CGFS)/%	0	5	5	5	8	8	8	10	10	10

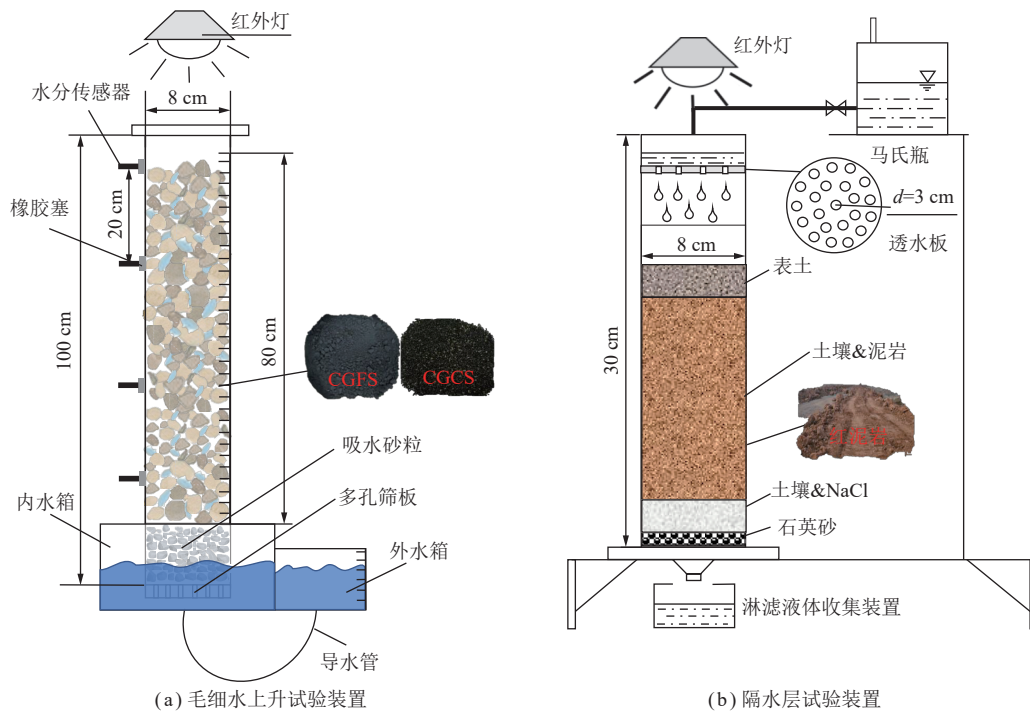


图1 试验示意

Fig.1 Experimental schematic diagram

置于烘箱中烘干 8~12 h, 定期取出称质量, 直至质量不再发生变化后, 称质量获得干土质量及容重。采用 Van Genuchten(VG) 模型<sup>[34]</sup>对土壤体积含水率和土壤水势参数拟合, 模型方程表达式为

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 + (ah)^n]^m} \quad (1)$$

式中,  $S_e$  为有效饱和度;  $\theta$  为体积含水量;  $\theta_r$  为残余含水率;  $\theta_s$  为饱和含水量;  $h$  为压力水头, cm;  $a$ 、 $n$ 、 $m$  为拟合参数,  $a$  为与空气值有关参数,  $n$  与土壤的脱水速率有关,  $m=1-1/n$ 。

### 1.3 隔水层试验设计

试验采用内径 8 cm, 高 30 cm 的有机玻璃土柱, 从下到上依次为 4 cm 高的掺有 NaCl 的排土场土壤, 20 cm 高的纯土壤 (对照组)/红泥岩 (实验组), 4 cm 高的表土, 土柱填装高度为 28 cm。填装结束后静置 24 h。静置后利用马氏瓶进行加水 (固定水量 100 mL), 待水分完全入渗后利用红外灯模拟蒸发, 历时 20 d, 试验装置如图 1(b) 所示。试验结束后, 每隔 4 cm 取样测定 SWC、EC、Cl<sup>-</sup> 质量分数以及蒸发前后泥岩元素组成, 土壤质地, 微观形貌和矿物成分。

### 1.4 分析仪器及测试方法

依据 US Salinity Laboratory(美国盐改中心) 开发的 RETC 软件中的 van Genuchten-Mualem 模型计算土水曲线模型参数, 绘制土水特征曲线 (Soil water characteristic curve, SWCC)<sup>[35]</sup>。粒度分析仪 (Malvern

Mastersizer 2000, Malvern Panalytical, UK) 测试材料粒度分布, 采用 1951 年美国农业部 (USDA) 制的分级标准进行粒度分级。FE28-Standard 型 pH 计测量 pH 值, 雷磁 DDS-11A 电导率仪测试 EC。土壤 Cl<sup>-</sup> 和 Na<sup>+</sup> 质量分数采用火焰光度法测试<sup>[36]</sup>。扫描电子显微镜 (SEM; Phenom ProX, Thermo Scientific, Holland) 测定样品的微观结构。ASAP 2460 3.01(Brunauer-Emmett-Teller(BET), ASAP 2460.01, Micromeritics, USA) 进行比表面积和孔隙分析。AXIOS 型 X 射线荧光光谱仪 (XRF, 荷兰 PANalytical B.V. 公司) 进行元素分析, Empyrean 型 X 射线衍射仪 (XRD, 荷兰 PANalytical 公司) 进行矿物成分分析。

## 2 结 果

### 2.1 煤气化渣重构对土壤入渗特性的影响

图 2 显示了 CGS 重构后土壤湿润峰上升高度和速率的变化。CGS 重构改善了毛细水上升, 重构后各组土壤湿润锋均随时间增加而增加, 表现为急升和缓升两阶段。各组湿润峰上升趋势相似, 但湿润锋进程差异大, CGS 添加量越多, CGCS 质量分数越低, 湿润峰上升高度越高, 如图 2(a) 所示。重构后各组土壤毛细水上升速率均随时间增加而降低。各组经历快速衰减后, 在 60 min 处出现转折, 之后下降速度有所减缓, 在 300 min 趋于稳定, 如图 2(b) 所示, 这是由于随着毛细水上升, 表面张力与毛细水头在垂直方向上的

差值逐渐减小,导致毛细上升速率减小并逐渐趋近于零<sup>[37]</sup>。毛细水上升速率变化点与湿润锋上升变化点一致,均表现为 CGS 添加量越多,CGCS 质量分数越

低,土壤毛细水上升进程越快,速率越大,依次为 CFS9 > CFS6 > CFS3 > CFS8 > CFS5 > CFS2 > CFS7 > CFS4 > CFS1 > CK。

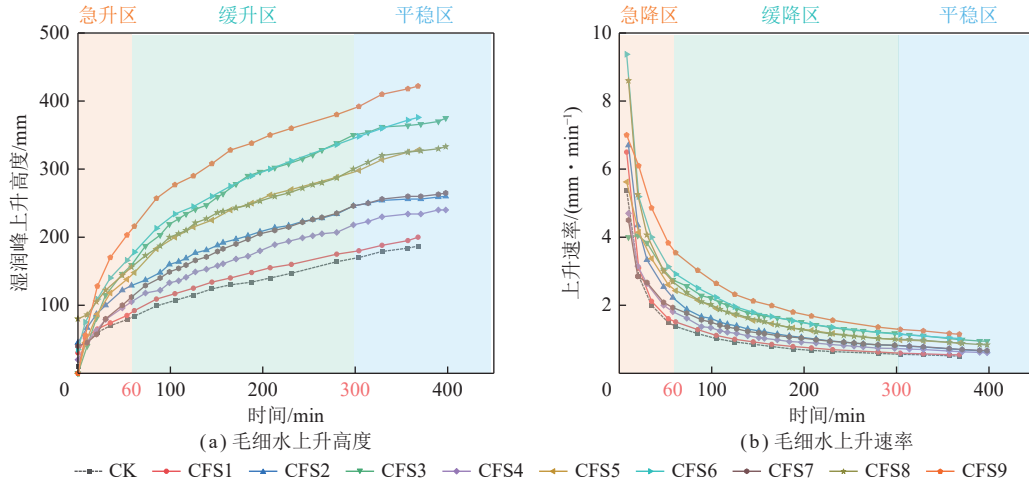


图2 CGS 重构后土壤毛细水上升情况

Fig.2 Rise of soil capillary water after CGS reconstruction

## 2.2 煤气化渣重构对土壤水盐运移的影响

### 2.2.1 土壤水分运移

CGS 重构后不同土层深度下 SWC 的动态变化如图 3(a) 所示。CGS 重构改善了土壤水分运移。受持续蒸发作用的影响,各组 SWC 在垂向上呈先增加后减小,CK 在垂向上的 SWC 均低于实验组,10 d 时最明显。蒸发后,各组在不同深度下 SWC 的变化表现为:0~20 cm 处,CK 在蒸发后 SWC 增加了 10.39%,实验组 CFS1~CFS9 在蒸发后 SWC 分别增加了 27.98%、38.67%、73.47%、105.71%、234.20%、23.35%、28.05%、350.43% 和 296.77%。40~60 cm 处,CK 在蒸发后 SWC 降低了 41.48%,实验组 CFS1~CFS9 在蒸发后 SWC 分别降低了 14.59%、26.64%、10.94%、9.19%、4.46%、7.07%、3.62%、20.90% 和 15.54%。60~80 cm 处,CK 在蒸发后 SWC 降低了 24.39%,实验组 CFS1~CFS9 在蒸发后 SWC 分别降低了 18.88%、22.91%、8.07%、7.80%、0.77%、3.57%、3.69%、10.02% 和 9.59%。0~20 cm 处实验组 SWC 增加高于 CK,40~60 cm 和 60~80 cm 处实验组 SWC 降低低于 CK。整体来看,各组自上而下均表现为 0~20 cm 处 SWC 逐渐增加且变化大,40~60 cm 处 SWC 最大保持稳定变化,60~80 cm 处 SWC 次之保持稳定变化。作为中间层 40~60 cm 深度下的 SWC 向表层供给同时得到 80 cm 处水分补充,这一现象在 CGS 重构后的实验组中表现最为明显,重构后各组 SWC 受重力,蒸发和毛管力影响,能显著提升土壤的供水能力,CGS 添加量越高,水分供给作用越好。

### 2.2.2 土壤盐分运移

CGS 重构后不同土层深度下 EC 的动态变化如图 3(b) 所示。EC 呈现出与 SWC 相似的分布,CGS 重构改善了土壤盐分运移,在蒸发的 10 d 时,0~20 cm 处 EC 增加显著。特征盐离子在蒸发作用下的垂向迁移变化如图 4(a) 所示,蒸发后,CK 在 0~40 cm 处土壤 Cl<sup>-</sup> 质量分数增加,60~80 cm 处 Cl<sup>-</sup> 质量分数低于蒸发前,蒸发作用影响了盐分迁移。实验组 0~40 cm 处的 Cl<sup>-</sup> 质量分数聚集明显,60~80 cm 处 Cl<sup>-</sup> 质量分数高于蒸发前,表明在蒸发过程中盐分随着水分在毛细作用下向上迁移明显。如图 4(b) 所示,蒸发后,CK 在 0~20 cm 处土壤 Na<sup>+</sup> 表聚现象明显。实验组 Na<sup>+</sup> 在垂向上的分布变化主要发生在最表层 0 处,且表聚低于 CK。Cl<sup>-</sup> 对盐分的迁移过程更具有指示性。结果表明,盐分符合“随水来,随水去”的规律,CGS 重构促进了水分供给的同时也促进了盐分的迁移,EC 和 Cl<sup>-</sup> 质量分数的迁移变化表现为 CGS 添加量越多,CGFS 质量分数越高,毛细作用越强,盐分表聚明显的结果。

### 2.3 煤气化渣重构后土壤土水特征曲线

土壤水分特征曲线如图 5 所示,CGS 重构影响了土壤水分特征曲线形状,CK 和 CFS1 的土壤水分特征曲线形状相似,CFS2~CFS9 的土壤水分特征曲线形状相似。土壤体积含水率随基质吸力的增大逐渐降低,体积含水率的减小速率随基质吸力的增大逐渐趋于稳定。CGS 添加量越多,CGFS 质量分数越高,曲线越高,下降速率平缓,土壤持水能力强,CGS 重构增加了土壤持水能力<sup>[38]</sup>。VG 模型对 CGS 重构后的土

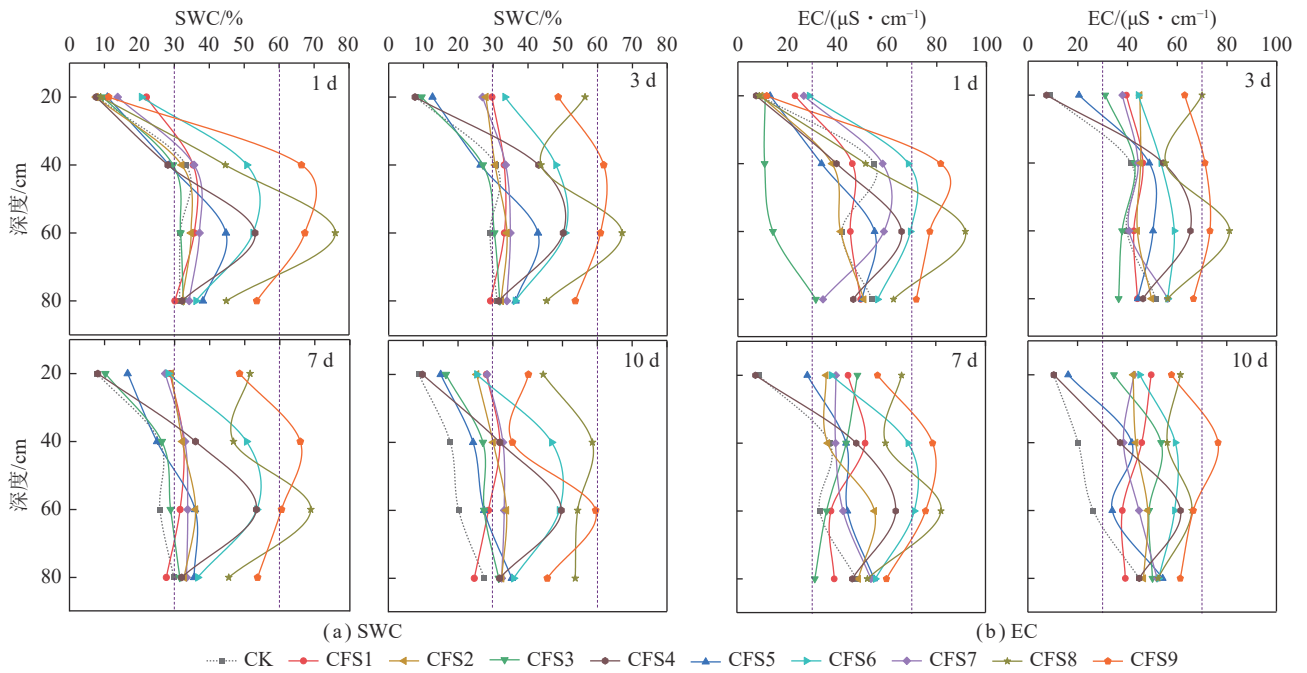


图3 CGS 重构后土壤在不同时期 SWC 和 EC 的变化

Fig.3 Changes of SWC and EC at different periods

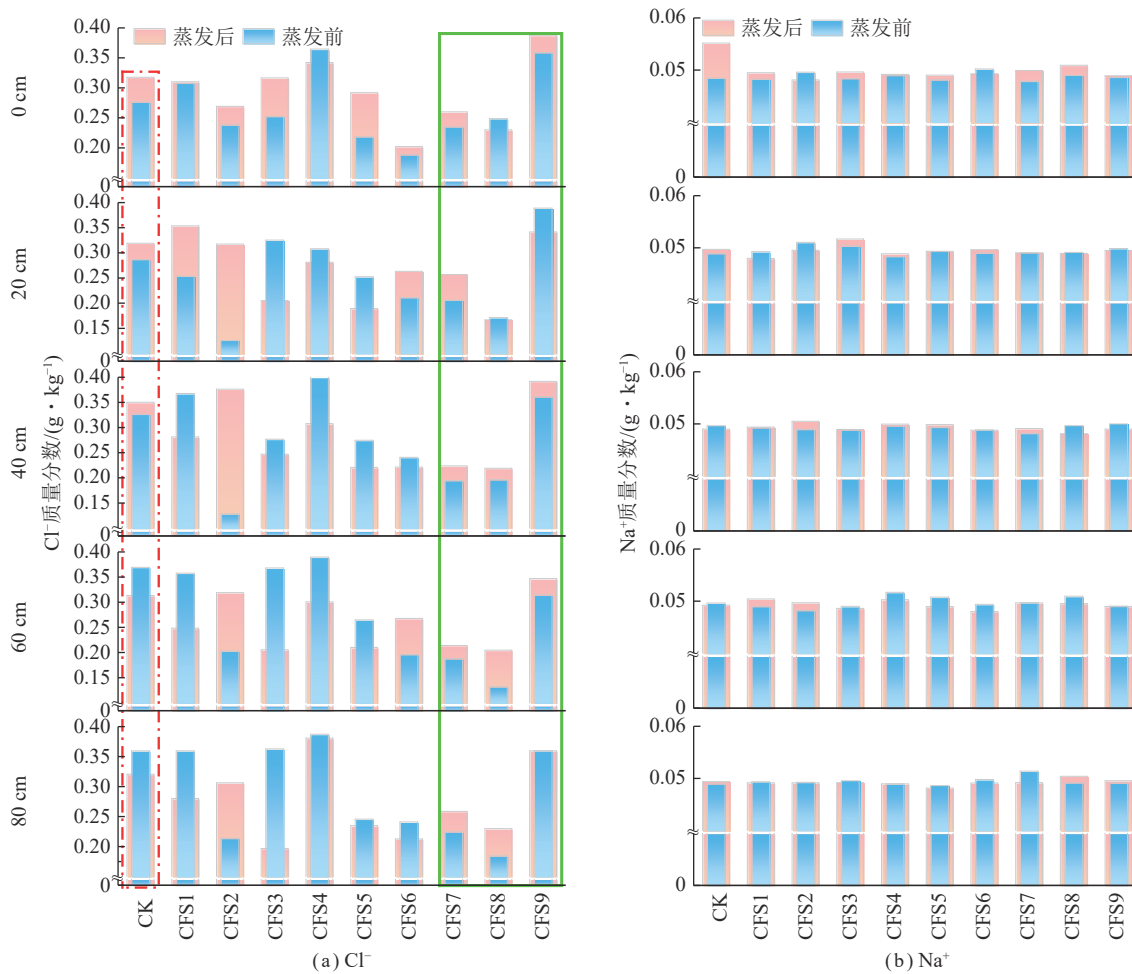


图4 蒸发前后煤气化渣重构后各组垂向土壤特征盐离子质量分数变化

Fig.4 Changes in characteristic salt ion content of vertical soil before and after evaporation

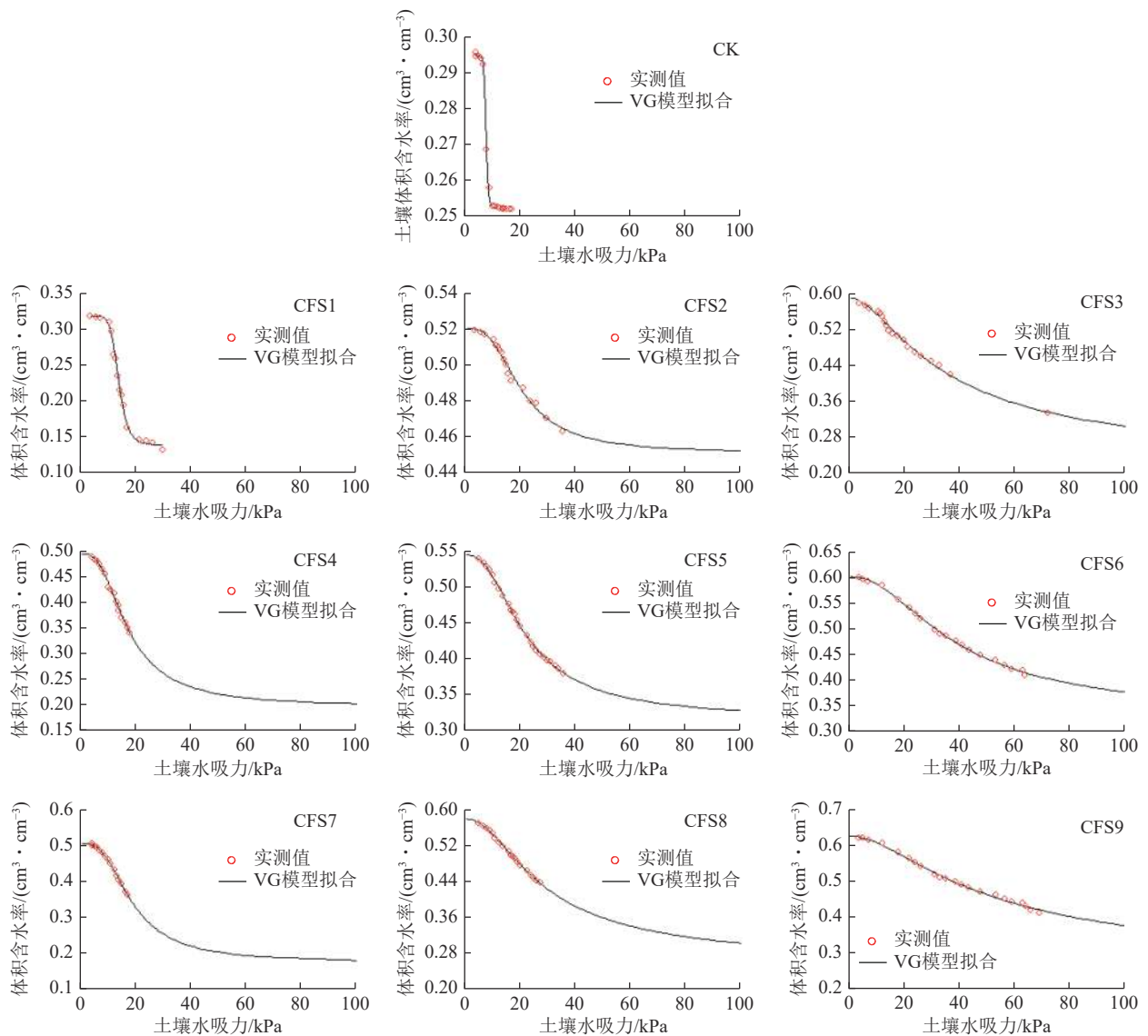


图 5 VG 拟合后的土水特征曲线

Fig.5 Soil water characteristic curves after VG fitting

水曲线模型拟合程度较高,  $R^2$  均在 0.98 以上。CGS 量分数越高, 饱和含水率  $\theta_s$  越大,  $a$  和  $n$  越小 (表 3), 重构改变了 VG 模型参数, CGS 添加量越多, CGFS 质表明重构后的土壤失水越慢, 持水效果好。

表 3 Van Genuchten 模型拟合参数

Table 3 Fitted parameters of Van Genuchten model

试验样品	$\theta_r / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_s / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$a$	$n$	$m$	$R^2$
CK	0.302 4	0.344 8	0.127 9	19.291 9	0.948 2	0.997 8
CFS1	0.138 3	0.318 2	0.073 9	8.745 1	0.885 7	0.994 3
CFS2	0.450 4	0.520 3	0.057 4	3.130 1	0.680 5	0.983 3
CFS3	0.195 1	0.590 1	0.046 3	1.812 6	0.448 3	0.990 3
CFS4	0.195 9	0.495 2	0.070 5	2.915 4	0.657 0	0.994 7
CFS5	0.313 4	0.544 2	0.057 9	2.594 8	0.614 6	0.998 9
CFS6	0.316 8	0.602 2	0.035 3	2.201 5	0.545 8	0.998 3
CFS7	0.172 7	0.505 5	0.064 1	3.062 7	0.673 5	0.998 5
CFS8	0.249 2	0.578 9	0.050 2	2.130 2	0.530 6	0.999 2
CFS9	0.234 1	0.625 0	0.031 1	1.844 0	0.457 7	0.996 2

### 2.4 泥岩重构后对土壤保水隔盐的影响

重构后各组在不同土壤深度下的水盐变化情况如图 6 所示。由图 6(a) 可知, 红泥岩重构改善了水分保持。CK 和实验组 SWC 自上到下呈现先增后减的趋势。实验组在各层的 SWC 均高于 CK, 在距红泥岩隔层最近的 12~16 cm 处, 实验组 SWC 最高, 高达 32%。蒸发后, 实验组在 0~28 cm 土层深度下的 SWC 是 CK 的 17 倍, 表明红泥岩隔层的存在具有保存水分的作用。如图 6(b)~(d) 所示, 红泥岩重构改善了盐分迁移。蒸发后, 土壤盐分增加, 表现为 CK 和实验组在 0~4、4~8、12~16、20~24 和 24~28 cm 处蒸发后的 EC 分别增加了 3.257、0.747、4.023、9.628、-0.002 倍和 -0.544、0.012、1.237、17.092、-0.009 倍。

24~28 cm 处的盐分在蒸发作用下向上迁移, 实验组 EC 在这层盐分降低程度高于 CK; 作为距盐分层最近的土层, 20~24 cm 处各组 EC 均增加, 且实验组增加程度高于 CK, 是 CK 的 1.8 倍; 20~28 cm 处盐分的变化结果表明重构后的红泥岩隔层具有吸附和阻隔盐分的作用。12~16、4~8、0~4 cm 处各组 EC 在蒸发后均呈增加趋势, 实验组增加强度低于 CK, 是 CK 的 0.9 倍, 这一结果在 0~4 cm 处尤为显著, 表现为蒸发后 CK 表层盐分析出, 如图 6(b) 所示。Cl<sup>-</sup> 质量分数变化情况和 EC 保持一致。结果表明红泥岩能拦截盐分, 使盐分无法随着水分直接向表层聚集。在排土场进行土壤重构时, 可考虑将红泥岩作为隔水层以期保持水分, 阻隔盐分表聚。

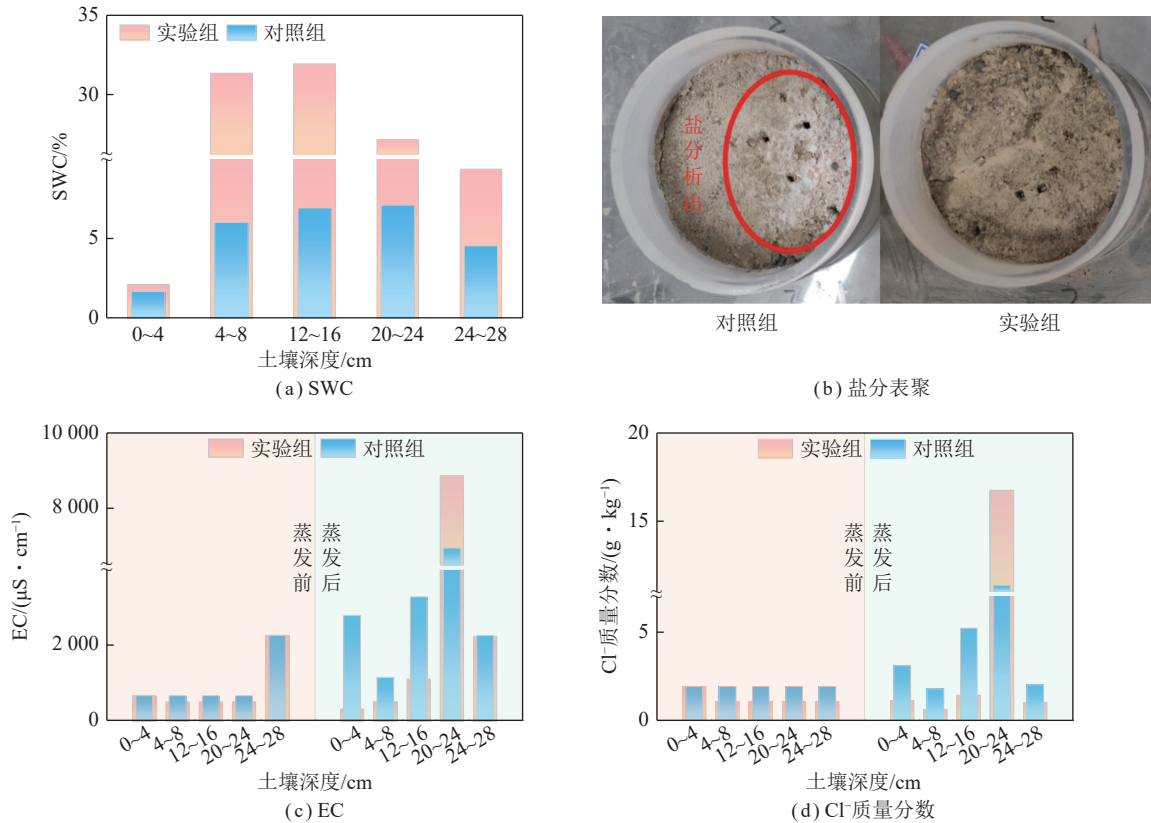


图 6 土壤水分和盐分变化

Fig.6 Changes in soil moisture and salinity

## 3 讨 论

### 3.1 煤气化渣作为含水层如何进行水分运输

毛细水上升是非饱和土壤孔隙中的水在毛细力的作用下沿着土壤微毛细管从较低向较高的高度迁移。毛细水上升如图 7 所示, 土柱自下而上, 随着重力势的增大, 土壤重力势在水分运动中逐渐占据主导作用, 基质势吸力越来越小, 2 者综合作用下水分向下运动, 形成表层 SWC 低, 下层 SWC 高的现象<sup>[39]</sup>。土壤水分的毛细上升程度由土壤孔隙结构和颗粒级配

决定<sup>[40]</sup>。CGS 重构后, 改善了土壤水分运移。CK 土壤级配差, 土壤孔隙较大 (图 8), 大多超过了其表面的毛管孔径, 影响了土壤渗透孔隙形状, 增加了毛细水上升阻力<sup>[41]</sup>。蒸发过程中, 下层土壤毛管水运动范围减小, 土层间水力联系降低, 毛管力对水分运动的驱动力较弱, 影响了对水分的补给作用<sup>[42-43]</sup>。CGS 重构后土壤粉粒和黏粒质量分数增加, 改善了土壤级配, 降低了颗粒间孔隙, 增强了毛细作用, 减小了重力势影响。在表面张力和渗透的共同作用下, 土壤中的水沿着更细的孔隙向上移动, 直到表面张力的垂直分量



与上升水柱的重力平衡。良好的毛管孔隙使实验组的水分在基质吸力作用下克服重力势作用达到更大持水量。整个垂向土层都处于毛管水运动区,具有连续水力联系,形成的毛管水流及时补充蒸发过程中表层水分散失,维持较高的含水率<sup>[44]</sup>。CGS 重构改善了

土水特征曲线参数,增加了土壤对水分的保持。下层土壤水分的供给和上层土壤水分的保持共同增加了表层 SWC。CCS 重构后,CGS 添加量越高,CGFS 占比越大,土壤颗粒越小,孔隙越细,毛管力越大,毛细管水上升高度越大,重构含水层的效果越好<sup>[45]</sup>。

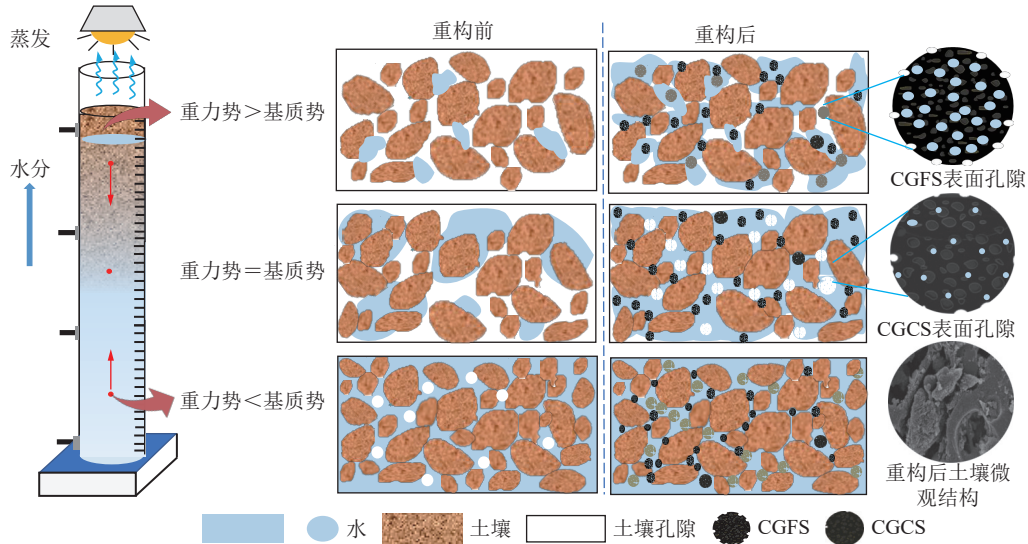
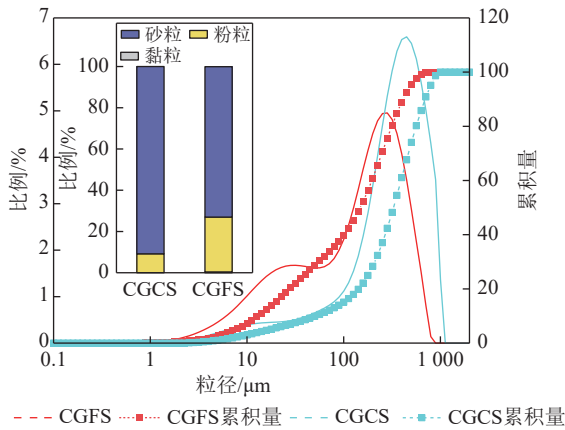
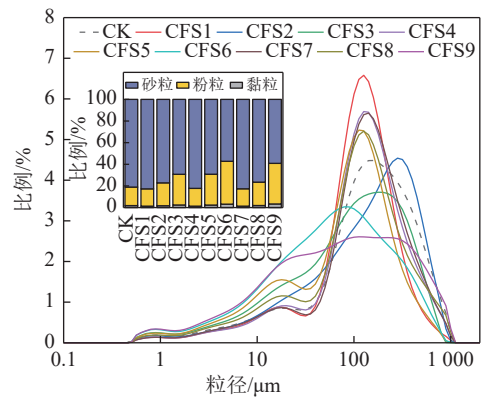


图 7 土壤水分上升示意

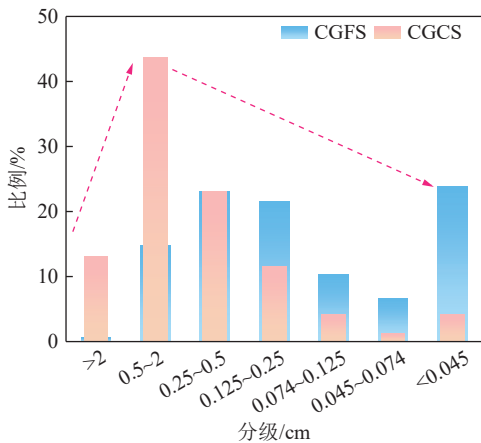
Fig.7 Schematic diagram of soil water rise



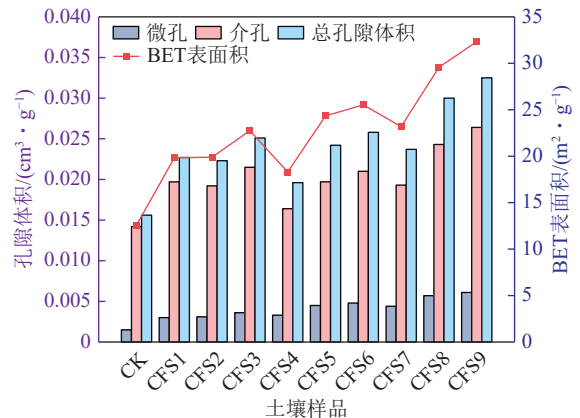
(a) 煤气化渣粒径组成



(b) 重构后土壤粒径组成



(c) 煤气化渣级配组成



(d) 重构后土壤孔隙分布

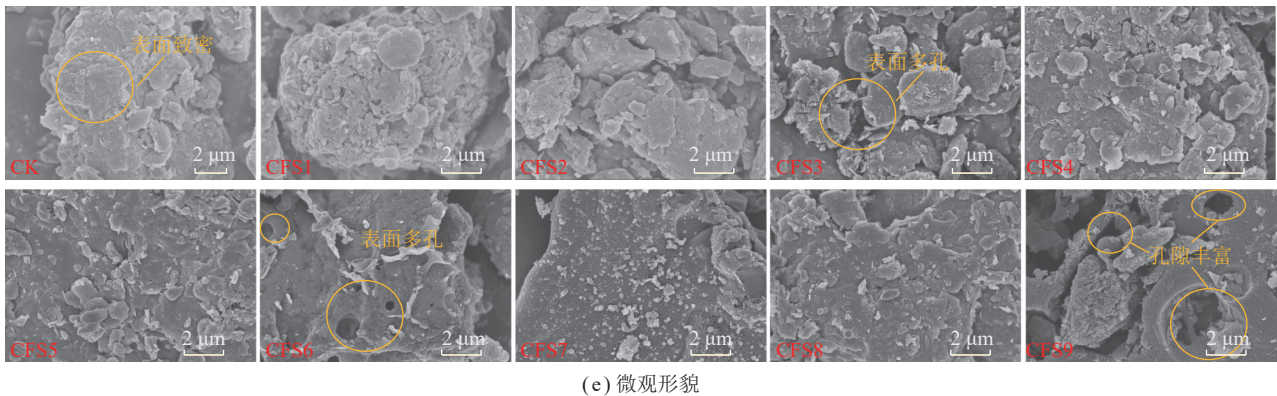


图8 土壤和材料物理性质

Fig.8 Physical properties of soil materials

### 3.2 煤气化渣作为含水层如何进行盐分运输

作为盐分运动的载体,水分在蒸发作用下的运移直接影响了盐分运移<sup>[46]</sup>。土壤水分蒸发分为3个阶段<sup>[47-48]</sup>。在第1阶段,土壤蒸发受限于可蒸发水分能量和表面与空气间水汽压差的限制。当表层土壤基质势变负时,进入第2阶段,此时蒸发受限于土壤水力特性,水分被转移到表面,第2阶段末期,土壤中液态水的运动最弱,水分在土壤孔隙中的运移主要以气相为主。第3阶段由土壤本身物理性质决定,蒸发率较低。盐分运移也是通过这一过程实现的。第1阶段,CGS重构后增大的EC增加了土壤水溶液浓度,改变了渗透率等物理参数,水溶液势能增加减缓了蒸发速率。第2阶段,盐分开始在近表层中沉淀积累,导致蒸发速率下降。第3阶段,表层SWC较低,毛细水迁移现象减弱,阻碍了蒸发速率,表现出CGS重构土壤EC和SWC高于CK。盐分运移主要与土壤自身含盐量、水分运动特性及土壤持水性有关<sup>[49-50]</sup>。CGS重构后的EC在各层的EC整体高于CK,当土壤受蒸发作用失水时,一部分阳离子紧紧吸附于颗粒表面,一部分阳离子与溶液中阴离子发生反应,形成可溶性盐分并随水分向上迁移。蒸发过程中土壤水分以毛管水上升的方式向土表运移,土壤盐分也随之运移,CGS重构后土壤毛管作用剧烈,水分向上供给,表层积盐明显,析出的盐分遇水进行再溶解,形成了水溶盐的循环过程<sup>[51]</sup>。CGS添加量越大,CGFS质量分数越高,重构土壤的含盐量越大,盐分溶解越充分,土表越容易积盐。CGS作为含水层的重构材料,在供给水分的同时也增加盐分的向上迁移,水分的供给和盐分的表聚形成了保水控盐的矛盾,但也有研究在新疆地区采用机械除盐的方式除去表层盐分<sup>[52]</sup>。笔者采用红泥岩作为隔水层,CGS作为含水层,隔水层存在隔绝了下层盐分进入土壤剖面,假设在这个系统中,

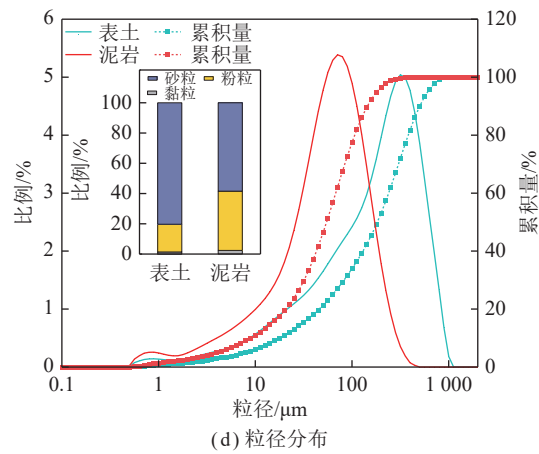
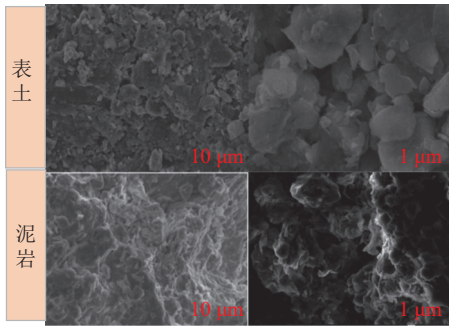
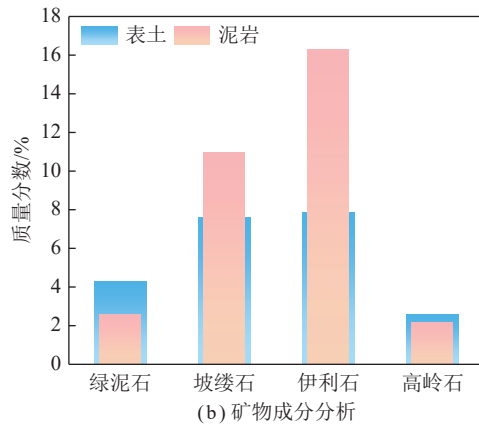
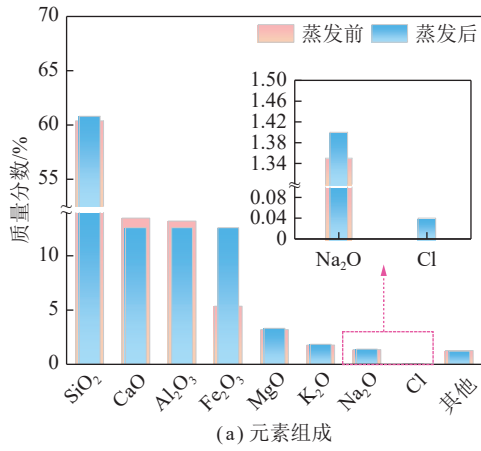
重构后的土层中盐分质量分数为定值,CGS重构后土壤水盐运移导致了盐分的表聚,这部分盐分采用机械除盐的方式去除。随着土壤复垦年限增加,迁移至表层的盐分逐渐被机械去除,土层中盐分总量逐渐降低,这种操作模式能有效克服CGS重构后盐分表聚的问题。

### 3.3 泥岩作为隔水层如何进行保水隔盐

20~24 cm处Cl<sup>-</sup>质量分数最大,泥岩对盐分的阻隔作用最为明显。蒸发前后泥岩元素组成表明,未蒸发泥岩不含Cl<sup>-</sup>,Na<sup>+</sup>占1.348 1%。蒸发结束后泥岩Na质量分数为1.405%,比实验前增加了0.053 4%;Cl<sup>-</sup>从无到有,增加了0.035 0%,如图9(a)所示,可以推测出是实验材料NaCl,表明NaCl吸附在泥岩表面上。为深入探讨泥岩对水盐的阻隔机制,对材料的矿物组成、微观结构和粒径分布进行了研究,结果表明,泥岩的黏土矿物质量分数高于表土,如图9(b)所示,黏土矿物比表面积大,带负电性<sup>[53]</sup>,具有良好的物理吸附性和表面化学活性,能与其他阳离子交换,因此,具有高质量分数黏土矿物的泥岩可以阻隔水分上移。此外表土颗粒多为片状结构,没有明显的微团粒结构,泥岩颗粒为多孔结构,表面凹凸不平,分布有少量重叠状黏团和内生状黏团,如图9(c)所示。表土粒径分布较广,为0.5~1 000 μm,泥岩分布范围为0.5~447 μm,累积量集中在10~355 μm,泥岩黏粒质量分数高于表土如图9(d)所示。黏粒是土壤中最细的部分,表面有负电荷,与其邻近的土壤水中的阳离子形成双电层<sup>[42]</sup>。巨大的表面积和表面负荷使黏粒有极强的吸附水分子能力,形成与其粒径比较相对厚的水层或水膜<sup>[54]</sup>,使得黏粒在一定含水量范围表现极强的粘结性和黏着性<sup>[55]</sup>。因此,在有泥岩层的土柱中浇灌水分,可以减少水分向更深层的土壤入渗,同时在高强度的蒸发条件下深层土壤水分向上传输受阻,进而

阻断了下层土壤盐分向表层土壤聚集,达到阻隔盐分的效果<sup>[56]</sup>。在对排土场进行土壤重构时,可以考虑在合适

的位置设置泥岩层,达到阻隔盐分表聚和水分渗漏的效果。



(c) 微观形貌

(d) 粒径分布

图9 材料性质

Fig.9 Material Properties

### 4 结 论

(1) CGS 重构含水层具有可行性,能改善土壤水盐运移。CGS 添加量越多,CGFS 质量分数越大,土壤毛细水上升进程越快,下层水分供给能力越强,表层持水性能增加,盐分表聚明显。重构优化了土壤蓄水能力的同时也增加了盐分表层富集的风险,Cl<sup>-</sup>对盐分迁移过程具有指示性,可作用盐分迁移重点监测指标。

(2) 泥岩重构隔水层具有可行性,重构后的土层具有吸附和封闭能力。红泥岩重构对水分的保持作用是 CK 的 17 倍,对盐分的阻隔作用是 CK 的 1.8 倍,重构能有效阻隔了水分渗漏和盐分向上迁移。

(3) CGS 能改善土壤级配,优化粒径组成和土壤质地,增加土壤比表面积(实验组是 CK 的 1.5~2.6 倍),丰富土壤孔隙结构(实验组是 CK 的 1.2~2.1 倍),增加毛细作用和持水性能,水分供给增强蒸发减弱,重构实现了含水层功能。

(4) 泥岩黏粒和黏土矿物质量分数高,比表面积大且表面负电荷,有极强的吸附水分子能力和表面化学活性,高强度蒸发条件下,重构土层吸附水分阻隔盐分上移,重构实现了隔水层功能。

(5) 研究表明,CGS 重构含水层和泥岩重构隔水层具有可行性。这种重构模式有效地改善了土壤对水分保持和盐分控制作用,适用于西北干旱煤炭基地排土场土壤重构。研究结果为实现绿色矿山建设提供了理论依据。但目前的研究还缺乏对表土层-含水层-隔水层 3 层重构方式下不同厚度土层的水盐运移规律研究,以及不同重构方式下水盐运移规律的公式验证和模型预测。此外,对泥岩吸附的化学机制尚未明晰。今后的研究可以针对以上内容开展土壤重构工作,以期完善西北干旱区煤炭基地排土场土壤重构的理论和丰富矿山土壤复垦实践。

### 参考文献(References):

[1] 卞正富,于昊辰,侯竞,等. 西部重点煤矿区土地退化的影响因素及

- 其评估[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 338–350.
- BIAN Zhengfu, YU Haochen, HOU Jing, et al. Influencing factors and evaluation of land degradation of 12 coal mine areas in Western China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 338–350.
- [2] 范立民, 孙魁, 李成, 等. 西北大型煤炭基地地下水监测背景、思路及方法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 317–329.
- FAN Limin, SUN Kui, LI Cheng, et al. Background, thought and method of groundwater monitoring in large coal base of northwest China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 317–329.
- [3] 于昊辰, 陈浮, 尹登玉, 等. 采矿与气候变化对戈壁矿区土地生态系统的影响——以准东煤炭基地为例[J]. 煤炭学报, 2021, 46(8): 2650–2663.
- YU Haochen, CHEN Fu, YIN Dengyu, et al. Effects of mining activities and climate change on land ecosystem in Gobimining area: A case study of Zhundong Coal Base[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(8): 2650–2663.
- [4] 杨天鸿, 孙东东, 胥孝川, 等. 新疆大型露天矿绿色安全高效开采存在问题及对策[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(1): 1–12.
- YANG Tianhong, SUN Dongdong, Xu Xiaochuan, et al. Problems and countermeasures in green, safe and efficient mining of large-scale open-pit mines in Xinjiang[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(1): 1–12.
- [5] 夏婷婷, 南海明, 高岷, 等. 新能源耦合煤化工及综合性能源走廊探索——产业兴疆路径研究[J]. 煤化工, 2022, 50(4): 3–9.
- XIA Tingting, NAN Haiming, GAO Min, et al. Exploration on new energy coupling with coal chemical industry and comprehensive energy corridor—Research on Xinjiang industry revitalization pathway[J]. *Coal Chemical Industry*, 2022, 50(4): 3–9.
- [6] DA Silva Barboza Fabrício, STUMPF Lizete, PAULETTO Eloy Antonio, et al. Impact of machine traffic events on the physical quality of a minesoil after topographic reconstruction[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 210: 104981.
- [7] 毕银丽, 彭苏萍, 杜善周. 西部干旱半干旱露天煤矿生态重构技术难点及发展方向[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1355–1364.
- BI Yinli, PENG Suping, DU Shanzhou. Technological difficulties and future directions of ecological reconstruction in open pit coal mine of the arid and semi-arid areas of Western China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5): 1355–1364.
- [8] ZHAO Jiao, MA Jing, YANG Yongjun, et al. Response of soil microbial community to vegetation reconstruction modes in mining areas of the loess plateau, China[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 714967.
- [9] 周伟, 时旭阳, 李明, 等. 露天矿坑隔水层重构及泥岩-地聚合物损伤渗透特性[J]. 煤炭学报, 2020, 45(10): 3556–3562.
- ZHOU Wei, SHI Xuyang, LI Ming, et al. Reconstructed water-blocking layer in open-pit mine and the damage permeability characteristics of mudstone-geopolymer[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(10): 3556–3562.
- [10] 王佟, 刘峰, 赵欣, 等. 生态地质层理论及其在矿山环境治理修复中的应用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(10): 3759–3773.
- WANG Tong, LIU feng, ZHAO Xin, et al. Theory of ecological geological layer and its application in mine environment remediation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(10): 3759–3773.
- [11] ZHANG Kai, LIU Shuyu, BAI Lu, et al. Effects of underground mining on soil-vegetation system: A case study of different subsidence areas[J]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2023, 9: 0122.
- [12] DALIAKOPOULOS I N, TSANIS I K, KOUTROULIS A, et al. The threat of soil salinity: A European scale review[J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 573: 727–739.
- [13] 胡振琪. 矿山复垦土壤重构的理论与方法[J]. 煤炭学报, 2022, 47(7): 2499–2515.
- HU Zhenqi. Theory and method of soil reconstruction of reclaimed mined land[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(7): 2499–2515.
- [14] 胡振琪, 张子璇, 孙煌. 试论矿山生态修复的地质成土[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(12): 21–29.
- HU Zhenqi, ZHANG Zixuan, SUN Huang. Geological soil formation for ecological restoration of mining areas and its case study[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(12): 21–29.
- [15] 姚云, 高进富, 董娟. 新疆现代煤化工产业发展探析[J]. 中国能源, 2022, 44(9): 69–76.
- YAO Yun, GAO Jinfu, DONG Juan. Analysis on the development of xinjiang's modern coal chemical industry[J]. *Energy of China*, 2022, 44(9): 69–76.
- [16] LI Yantian, WEI Chao, LIU Xiaoming, et al. Application of gasification slag in construction materials and high value-added materials: A review[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 402: 133013.
- [17] LUO Feng, JIANG Yinshan, WEI Cundi. Potential of decarbonized coal gasification residues as the mineral admixture of cement-based material[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 269: 121259.
- [18] LI Zuzhong, ZHANG Yayun, ZHAO Hongyan, et al. Structure characteristics and composition of hydration products of coal gasification slag mixed cement and lime[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 213: 265–274.
- [19] LUO Feng, WEI Cundi. Effects of decarbonized coal gasification coarse slag and fine ash on properties of cement paste as supplementary cementitious materials[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2022, 34(11): 04022281.
- [20] 张凯, 刘舒豪, 张日新, 等. 免烧法煤气化粗渣制备陶粒工艺及其性能研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(10): 222–227.
- ZHANG Kai, LIU Shuhao, ZHANG Rixin, et al. Research on preparation of non-sintered ceramsite from gasification cinder and its performance[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(10): 222–227.
- [21] QU Jiangshan, ZHANG Jianbo, LI Huiquan, et al. A high value utilization process for coal gasification slag: Preparation of high modulus sodium silicate by mechano-chemical synergistic activation[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 801: 149761.
- [22] HE Shaocang, LI Tianpeng, SHEN Tingting, et al. Preparation and performance of multi-ionic composite coagulants based on coal gasification coarse slag by one-step acid leaching[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 173: 249–262.
- [23] 徐连兵, 卓锦德, 张凯. 大型煤电化基地固废分质分类资源化利用研究[J]. 中国煤炭, 2022, 48(7): 131–136.

- XU Lianbing, ZHOU Jinde, ZHANG Kai. Study on qualitative classified resource utilization of solid wastes in large-scale coal, power and coal chemical industry cluster base[J]. *China Coal*, 2022, 48(7): 131-136.
- [24] YIN Chunyan, ZHAO Ju, LIU Xiaoyu, et al. Effect of coal water slurry gasification slag on soil water physical characteristics and properties in saline-alkali soil improvement[J]. *Journal of Sensors*, 2022, 11: 1114343.
- [25] ZHU Dandan, MIAO Shiding, XUE Bing, et al. Effect of coal gasification fine slag on the physicochemical properties of soil[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2019, 230(7): 155.
- [26] ZHANG RuiMei, LI Yazhen, ZHANG Kai, et al. Improvement and remediation of degraded soil based on solid waste[C]//The 4th International Conference on Green Energy, Environment and Sustainable Development. Mianyang: Advances in Transdisciplinary Engineering series, 2023.
- [27] 李强, 孙利鹏, 亢福仁, 等. 煤气化渣-沙土复配对毛乌素沙地苜蓿生长及重金属迁移的影响[C]//中国环境科学学会环境工程分会. 中国环境科学学会 2019 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分论坛论文集 (四). 陕西: 环境工程出版社, 2019, 6: 590-595.
- [28] 赵欣, 王佟, 李聪聪, 等. 露天矿区生态地质层修复中地形重塑层的构建技术及应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(7): 113-122.
- ZHAO Xin, WANG Tong, LI Congcong, et al. Construction and restoration technology of terrain remodeling layer in the restoration of ecological geological layer in open-pit mining areas[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(7): 113-122.
- [29] 王佟, 蔡杏兰, 李飞, 等. 高原高寒矿区生态地质层修复中的土壤层构建与成分变化差异[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(6): 2407-2419.
- WANG Tong, CAI Xinglan, LI Fei, et al. Soil layer construction and composition changes in restoration of ecological and geological layer in alpine mining area on plateau[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(6): 2407-2419.
- [30] 滕杰, 胡宁, 吴彤. 新疆某工程上第三系地层工程地质性状初探[J]. *水利水电工程设计*, 2015, 34(2): 40-43.
- TENG Jie, HU Ning, WU Tong. Preliminary exploration of the engineering geological characteristics of the tertiary strata in a project in Xinjiang[J]. *Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering*, 2015, 34(2): 40-43.
- [31] 谌文武, 林高潮, 刘伟, 等. 全风化灰绿色及红色泥岩物理力学性质对比研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(12): 2572-2582.
- CHEN Wenwu, LIN Gaochao, LIU Wei, et al. Physical and mechanical properties of weathered green and red mudstones[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(12): 2572-2582.
- [32] WANG Lingling, LI Yange, ZHANG Jianjun, et al. Analysis on the difference of reconstructed soil moisture content in a grassland open-pit mining area of China[J]. *Agronomy (Basel)*, 2022, 12(5): 1061.
- [33] ZHANG Kai, SONG Shuang, ZHAO Jianguang, et al. Land reclamation using typical coal gasification slag in xinjiang: A full-cycle environmental risk study[J]. *Minerals*, 2023, 13(10): 1263.
- [34] VAN Genuchten R. Predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44: 892-898.
- [35] 廖海, 栗现文, 陈俊英, 等. 原状盐渍土不同盐分含量对土壤水分特征曲线的影响[J]. *节水灌溉*, 2021(1): 7-13.
- LIAO Hai, LI Xianwen, CHEN Junying, et al. Effects of different salt contents of undisturbed saline soil on soil moisture characteristic curves[J]. *Water Saving Irrigation*, 2021(1): 7-13.
- [36] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 188-196.
- [37] 何艳平. 低液限粉土毛细上升特征的影响因素研究[J]. *工程勘察*, 2020, 48(4): 11-18.
- HE Yanping. Study on influencing factors of capillary rise characteristics of loess silt[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2020, 48(4): 11-18.
- [38] 李多美, 孔涛, 陈曦, 等. 半干旱区复垦煤矿不同土地利用类型对土壤结构和水力学特性的影响[J]. *煤炭科学技术*, 1-11 [2024-03-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20230821.1018.001.html>.
- LI Duomei, KONG Tao, CHEN Xi, et al. Effects of different land use types on soil structure and hydraulic characteristics of reclaimed coal mines in semi-arid areas[J]. *Coal Science and Technology*, 1-11 [2024-03-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20230821.1018.001.html>.
- [39] 陈昊海. 蒸发条件下的土壤水分运动分析[J]. *福建建设科技*, 2014(1): 12-14.
- CHEN Haohai. Soil Moisture movement ounder evaporation effect[J]. *Fujian Construction Science & Technology* 2014(1): 12-14.
- [40] HIRD Robert, BOLTON Malcolm D. Clarification of capillary rise in dry sand[J]. *Engineering Geology*, 2017, 230: 77-83.
- [41] 刘睿姝, 陈末, 王冠华, 等. 单向冻结作用下非饱和土水分迁移对变化控制条件的响应[J]. *水利科技与经济*, 2023, 29(1): 1-7.
- LIU Ruishu, CHEN Mo, WANG Guanhua, et al. Response of unsaturated soil water migration to changing control conditions under unidirectional freezing[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2023, 29(1): 1-7.
- [42] 马士力, 白云, 李大勇. 砂土中黏粒含量对渗透性的影响[J]. *广西大学学报 (自然科学版)*, 2018, 43(1): 226-231.
- MA Shili, BAI Yun, LI Dayong. Influence of clay content on permeability of sandy soil[J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2018, 43(1): 226-231.
- [43] 姚华, 张喜发, 张冬青. 影响粗粒土毛细水上升高度的因素研究[J]. *勘察科学技术*, 2007(1): 10-12.
- YAO Hua, ZHANG Xifa, ZHANG Dongqing. Research on affecting factors of rising height of capillary water on coarse grained soil[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2007(1): 10-12.
- [44] 张平, 吴昊, 殷洪建, 等. 土壤构造对毛细管水上升影响的研究[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(4): 265-267.
- ZHANG Ping, WU Hao, YIN Hongjian, et al. Effect of constitution of soil on upward movement of capillary water[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18(4): 265-267.
- [45] WEI Jianjian, HE Bin, FENG Yongxiang, et al. Electrochemical corrosion behaviour of x70 steel under the action of capillary water in saline soils[J]. *Materials*, 2022, 15(10): 3426.

- [46] GILFEDDER M, MEIN R G, CONNELL L D. Border irrigation field experiment. II: Salt transport[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2000, 126(2): 92–97.
- [47] ZHANG Xudong, SHU Changjian, WU Yajun, et al. Advances of coupled water-heat-salt theory and test techniques for soils in cold and arid regions: A review[J]. *Geoderma*, 2023, 432: 116378.
- [48] BITTELLI Marco, VENTURA Francesca, CAMPBELL Gaylon S, et al. Coupling of heat, water vapor, and liquid water fluxes to compute evaporation in bare soils[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 362(3–4): 191–205.
- [49] ZHANG Qiyong, CHEN Wenwu, WU Guocheng, et al. Effect of PVA-treated soil on water-salt capillary rise in loess soil: Soil column experiment[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 610: 127806.
- [50] LAI Yuanming, WEN Wei, PEI Wansheng, et al. A novel transport model to predict the moisture-heat-gas-salt behavior in unsaturated saline soil under evaporation[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 127052.
- [51] WAN Xusheng, GONG Fumao, QU Mengfei, et al. Experimental study of the salt transfer in a cold sodium sulfate soil[J]. *Ksce Journal of Civil engineering*, 2019, 23(4): 1573–1585.
- [52] LEE Xinqing, YANG Fang, XING Ying, et al. Use of biochar to manage soil salts and water: Effects and mechanisms[J]. *Catena*, 2022, 211: 106018.
- [53] 赵春吉, 赵红华, 常艳, 等. 水泥改性强膨胀土理化试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2014, 54(6): 604–611.
- ZHAO Chunji, ZHAO Honghua, CHANG Yan, et al. Physical-chemical experimental investigation on cement-treated highly expansive soil[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2014, 54(6): 604–611.
- [54] 蔡光华, 陆海军, 刘松玉. 温度梯度下压实黏土的水热迁移规律和渗透特性[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(6): 874–879.
- CAI Guanghua, LU Haijun, LIU Songyu. Moisture-heat migration laws and permeability of compacted clay under temperature gradient[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2017, 38(6): 874–879.
- [55] 张华渝, 王克勤, 宋娅丽. 滇中尖山河流域不同土地利用类型土壤粒径分布对土壤有机碳组分的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(4): 93–100.
- ZHANG Huayu, WANG Keqin, SONG Yali. Effects of soil particle size distribution of different land use types on soil organic carbon components in Jianshan river watershed in middle Yunnan Province[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2020, 40(4): 93–100.
- [56] 王曼华, 陈为峰, 宋希亮, 等. 秸秆双层覆盖对盐碱地水盐运动影响初步研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1395–1403.
- WANG Manhua, CHEN Weifeng, SONG Xiliang, et al. Preliminary study on effect of straw mulching and incorporation on water and salt movement in salinized soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(6): 1395–1403.