

改性亲水性聚氨酯材料对石漠化土壤理化性质的影响

徐程翔¹, 梁止水¹, 孙悦¹, 潘波²

(1.东南大学土木工程学院,南京 210096; 2.广西壮族自治区林业科学研究院,南宁 530002)

摘要: [目的] 明确施用 W-OH 固化剂对广西石漠化土壤特性及导水能力的影响。[方法] 采用湿筛法,研究不同 W-OH 固化剂施用量(0、1%、3%、5%)对石漠化土壤理化性质的影响。[结果] 1) 施用 W-OH 固化剂可显著提高土壤 >0.25 mm 水稳性团聚体含量、平均重量直径及几何平均直径,降低土壤的分形维数,增强土壤的结构稳定性,当施用量达到 5% 时,改善效果较为明显;2) SEM 试验结果表明, W-OH 固化剂可以对石漠化土壤颗粒进行有效胶结;3) 当施用 1% W-OH 固化剂时,土壤电导率有所降低,其余浓度变化均不显著;4) 低浓度 W-OH 固化剂使土壤饱和导水率显著增加,当施用水平达到 5% 时,土壤的饱和导水率显著降低;5) W-OH 固化剂能有效降低土壤的吸水和释水速率。[结论] 施用 W-OH 固化剂能够改善石漠化土壤的理化性质与水文特征,研究结果将为 W-OH 固化剂用于石漠化土壤改良提供一定的理论支撑。

关键词: W-OH 土壤固化剂; 石漠化; 土壤理化性质; 土壤导水性能

中图分类号: S156.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0047-10

Effects of Modified Hydrophilic Polyurethane Materials on Physicochemical Properties of Rocky Desertification Soil

Xu Chengxiang¹, Liang Zhishui¹, Sun Yue¹, Pan Bo²

(1.School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2.Guangxi Zhuang Autonomous Region Academy of Forestry, Nanning 530002, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the effects of W-OH soil stabilizer application on soil properties and hydraulic conductivity in rocky desertification regions of Guangxi Zhuang Autonomous Region. [Methods] A wet-sieving method was employed to study the effects of different W-OH soil stabilizer application rates (0, 1%, 3%, and 5%) on the physicochemical properties of rocky desertification soil. [Results] 1) The application of W-OH soil stabilizer significantly increased the content of >0.25 mm water-stable aggregates, mean weight diameter, and geometric mean diameter, while reducing the fractal dimension of soil aggregates, thereby enhancing soil structural stability, with the most pronounced improvement observed at the 5% application rate. 2) Scanning electron microscopy (SEM) results revealed that W-OH stabilizer effectively cemented particles of rocky desertification soil. 3) Soil electrical conductivity decreased slightly at the 1% application rate of W-OH stabilizer, whereas no significant changes were observed at other concentrations. 4) Low concentrations of W-OH stabilizer resulted in a significant increase in saturated hydraulic conductivity, whereas the 5% application rate led to a significant decrease. 5) W-OH stabilizer effectively reduced both water absorption and desorption rates of the soil. [Conclusion] Application of W-OH soil stabilizer can significantly improve the physicochemical properties and hydrological characteristics of rocky desertification soil. These findings provide theoretical support for the application of W-OH in the amelioration of rocky desertification soils.

收稿日期: 2026-04-27

修回日期: 2026-05-26

录用日期: 2026-06-08

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-08-26

资助项目: 国家自然科学基金项目(42207394); 广西重点研发计划项目(桂科 AB21196048); 中央财政林草科技推广示范项目([2023]TG17号); 重点实验室自主课题项目(2021-A-02-01)

第一作者: 徐程翔(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持与生态修复研究。E-mail: 220245335@seu.edu.cn

通信作者: 梁止水(1988—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与生态修复研究。E-mail: zs_liang@seu.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

Keywords: W-OH soil stabilizer; rocky desertification; soil physicochemical properties; soil hydraulic conductivity

Received: 2026-04-27

Revised: 2026-05-26

Accepted: 2026-06-08

Online(www.cnki.net): 2026-08-26

喀斯特石漠化是指亚热带脆弱喀斯特环境条件下,不合理的人类活动导致的土壤严重流失、基岩大面积裸露、地表土被不连续和退化过程,是土地退化的极端形式^[1-3]。由于其土层浅薄且极其不连续,一旦发生水土流失,生态系统将面临近乎不可逆的破坏,因此被形象地称为“地球之癌”^[4]。据统计^[5],截至2016年,中国的岩溶地区面积大约为 $4\,522.3\times 10^4\text{ hm}^2$,其中石漠化土地面积占岩溶面积的22.3%。广西作为我国喀斯特地貌的典型分布区,石漠化面积占该区土地总面积的比例极高,严重的水土流失和生态退化不仅造成当地土地资源的损失及土地生产力的降低,而且还严重影响我国区域生态文明建设和经济的可持续发展^[6]。因此,石漠化治理对实现广西社会经济发展,生态文明建设具有非常重要的意义。

长期以来,石漠化的治理主要以客土回填等工程措施和封山育林等植物措施为主,也有二者相结合的综合治理措施,取得一定的生态恢复成效^[7]。然而喀斯特生态系统自身存在土壤孔隙结构发育不良、持水保肥能力差等固有缺陷,颗粒松散且养分贫瘠,因此植被在坡面或石沟中成活率较低,治理效果有限;而单一的工程措施成本高昂且不能有效解决土壤微观结构退化的问题,严重影响措施的综合治理效益^[8]。因此,以新型土壤固结材料为核心,结合工程和生物措施的综合治理技术,可以很好地解决土壤抗侵蚀和水分涵养问题,成为石漠化区退化土壤治理的新途径。亲水性聚氨酯(W-OH)材料是一种以水为固化剂的生态环保型高分子材料,当喷洒或者搅拌在沙土中,可快速渗透并包裹土壤颗粒,形成具有一定力学强度的多孔性网状柔性固结层,不仅可以提高土壤稳定性,还能促进植被的恢复^[9]。与传统的化学改良剂(如PAM等)不同,W-OH具有环境友好、结构稳定性强等优点,已经被广泛应用于边坡治理、荒漠化治理及水土保持领域^[9-13]。目前,W-OH材料主要应用于砒砂岩区及崩岗区治理等^[10,12,14-16],而在广西石漠化土壤治理领域研究较少,需展开系统研究。

土壤理化性质是表征退化土壤结构稳定性、水分运移规律及抗侵蚀能力的重要指标之一。目前关于石漠化土壤的理化性质及改善措施研究很少。为此,本研究以广西石漠化土壤为对象,对不同W-OH材料施用水平(0,1%,3%,5%)的石漠化土壤微观形

貌、颗粒组成、团聚体稳定性、电导率及饱和导水率进行测定,以探讨不同施用水平W-OH材料对石漠化土壤理化性质及导水性能的影响,旨在为W-OH材料在石漠化土壤治理领域的应用提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2024年1—5月在东南大学土木工程学院试验中心进行。土样取自广西壮族自治区河池市凤山县的龙拉(24°28′24″~24°28′25″N,106°50′28″~107°05′43″E),该研究区属于典型喀斯特峰丛洼地地貌,石漠化成土背景脆弱,土层浅薄且极其不连续。根据《喀斯特石漠化地区植被恢复技术规程 LY/T 1840—2020》^[17],采样区土地利用类型主要为石质坡耕地与灌木荒地,因长期高强度垦殖导致水土流失严重,呈现典型中度石漠化特征。采样区海拔830 m,亚热带季风气候,夏季高温多雨,冬季温和少雨,雨热同期。年平均气温为19.2℃(1月10.5℃,7月26.0℃),年降水量为1564.0 mm,年均无霜期362 d。石漠化土壤砂粒质量分数为66.36%,粉粒质量分数为33.15%,黏粒质量分数为0.27%。W-OH材料由江苏杰成凯科技有限公司提供,其基本理化性状为:呈淡黄色至褐色油状液体,密度为1.18 g/cm³,固含量约为85%,且不含重金属等有害成分,黏度为500~800 mPa·s,可以与水以任意比例互溶,迅速发生化学反应,能在自然状态下固化,固化后形成的凝胶体具有良好的孔隙结构,并且无环境污染,是一种生态友好型水土保持材料。

1.2 试验设计

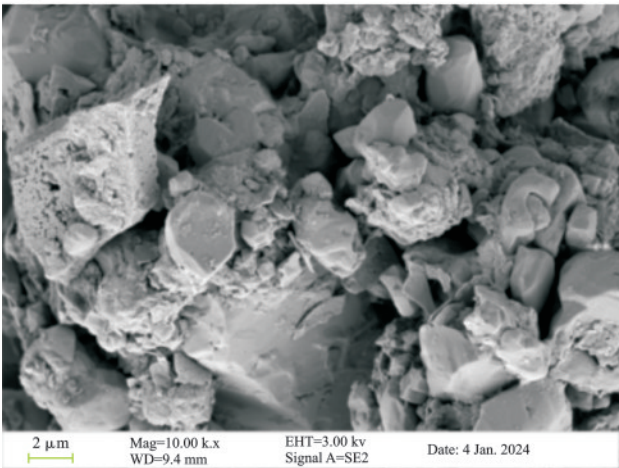
本试验共设置4个不同的W-OH固化剂施用水平,分别为0(CK)、1%(G0.01)、3%(G0.03)、5%(G0.05)(以风干土质量计),将土壤风干、研磨后过2 mm孔径土壤筛,试验时将一定质量的土壤平铺于规格尺寸为40.0 cm×30.0 cm×4.8 cm的不锈钢托盘中,土壤厚度为2 cm,按风干土质量的15%含水量称取一定量的水,并在水中加入设定比例的固化剂,充分搅拌后用喷枪喷洒至土壤表面,用保鲜膜密封24 h使土壤水分分布均匀。处理后根据不同测定指标采用差异化制样方式:用于颗粒组成与电导率测定的土样经风干、研磨、过2 mm筛;用于水稳性团聚体与微观形貌测定的土样取风干原状土块直接制样;用于饱和导水率测定的土样在环刀内直接喷洒固化剂溶液并密封养护24 h后测定。每次试验重复3次。

土壤微观形貌表征使用型号为 Hitachi Regulus 8100 的扫描电子显微镜 SEM 测定^[18];土壤颗粒组成采用型号为马尔文 Mastersizer 2000 的激光粒度仪进行测定^[19];土壤电导率采用 DDSJ-308F 电导率仪进行测定^[8];土壤水稳性团聚体质量分数采用湿筛法^[20]进行测定;土壤团聚体稳定性采用土壤团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、分形维数(D)来进行评价^[21-23]。土壤饱和导水率采用环刀法^[24]进行测定。土壤动态吸水与释水速率采用室内连续精密称重法^[25]进行测定。

1.3 数据处理

试验数据均采用 Origin 2024 软件进行统计分析,数据的统计分析通过 SPSS 26 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA)。

(a) 未经处理的石漠化土壤



2 结果与分析

2.1 W-OH 材料对土壤微观形貌与元素组成的影响

图 1 为 W-OH 材料处理前后土壤在 10 000 倍放大下的 SEM 图像。从图 1a 可以看出,原生石漠化土壤的颗粒棱角较为分明,土壤颗粒的结构单元多呈扁平状聚集体及片状结构,且颗粒间界限清晰,主要以边-面接触方式为主,面-面及边-边接触方式为辅,颗粒间孔隙分布较大且无规律,颗粒间黏结性差。经过 W-OH 材料处理后的土壤,固化剂溶液在土壤颗粒表面形成胶结物质包裹,其颗粒聚集和堆叠现象明显,使得颗粒整体变大变粗糙。颗粒的棱角变得相对圆润,且土壤颗粒间的孔隙被胶状物填充,密实性提高从而有效提高黏结性。

(b) 经过W-OH材料处理后的石漠化土壤

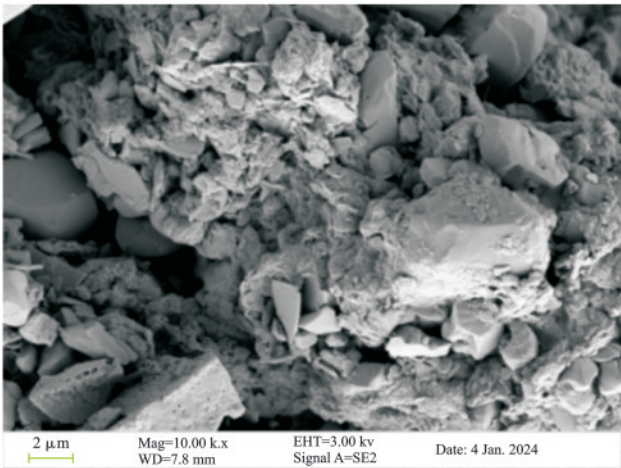


图 1 W-OH 材料处理前后石漠化土壤 SEM 表征

Fig.1 SEM images of rocky desertification soil before and after treatment with W-OH stabilizer

W-OH 材料处理前后石漠化土壤表面 SEM-EDS 元素分析见图 2。W-OH 材料处理前后,土壤中 O、C、Si、Al 元素呈明显的峰值特征。相比于处理前,处理后的土壤中,C 元素的质量分数有显著提升,由

3.26% 增至 13.69%,其他元素没有明显改变,表明活性基团的碳氢主链成功和土壤颗粒表面结合,增强颗粒间的黏结性,说明 W-OH 材料有效地促进土壤颗粒的团聚作用。

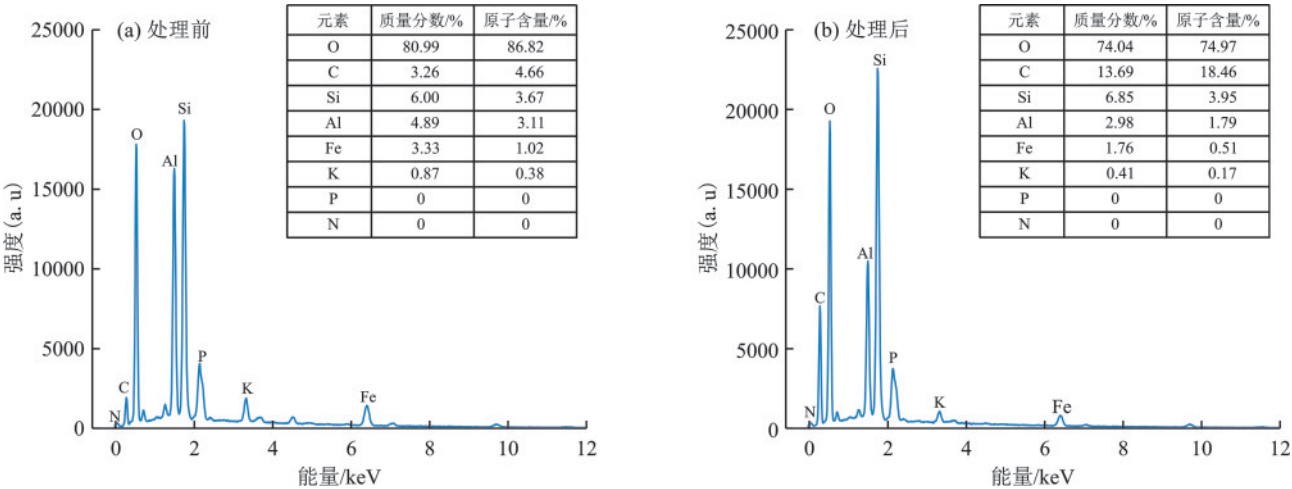


图 2 W-OH 材料处理前后石漠化土壤 SEM-EDS 元素分析

Fig.2 SEM-EDS elemental analysis of rocky desertification soil before and after treatment with W-OH stabilizer

2.2 W-OH 材料对土壤颗粒组成的影响

土壤颗粒组成是指土壤各粒级矿质颗粒所占的质量分数,是影响土壤质地和结构的重要因素之一^[26]。W-OH 材料的施用对土壤各粒径分布具有不同程度的影响。不同浓度 W-OH 材料固结后的石漠化土壤粒径分布见表 1。相较于对照组,粒径<0.002 mm 的游离态黏粒质量分数均表现为 0,此测试结果并非意味着黏粒在总量上消失,而是由于 W-OH 极强的包被与桥接效应,使散落的原生黏粒与粉粒发生强胶结并完全凝聚,转化为更大粒径的微团聚体或复合体,导致其在激光粒度测试中未能被物理分散,从而改变原有的空间赋存状态。不同处理

组的土壤颗粒组成主要集中于极粗砂粒(1~2 mm)及粗砂粒(0.5~1 mm),其中 G0.01 处理的极粗砂粒(1~2 mm)质量分数为 35.08%,粗砂粒(0.5~1 mm)质量分数为 23.09%;G0.03 处理组中的极粗砂粒(1~2 mm)质量分数为 33.51%,粗砂粒(0.5~1 mm)质量分数为 23.46%;G0.05 处理组中的极粗砂粒(1~2 mm)质量分数为 33.97%,粗砂粒(0.5~1 mm)质量分数为 26.66%。

总体来看,相比于对照组,各处理组土壤的黏粒和粉粒质量分数均有所降低,而砂粒质量分数有所增加,表明土壤粒径结构显著改善,土壤结构正逐步向团聚化方向发展。

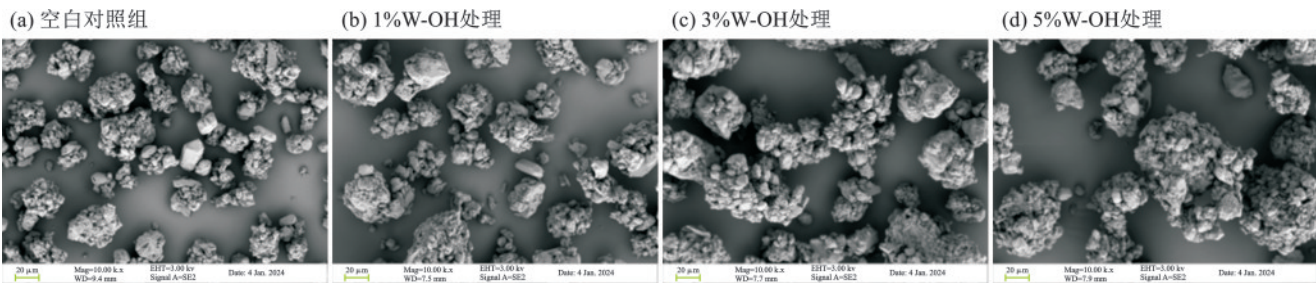
表 1 不同处理方式对土壤颗粒组成的影响
Table 1 Effects of different treatments on soil particle composition

处理	土壤粒级质量分数/%							
	黏粒 (<0.002 mm)	粉粒		极细砂粒	细砂粒	中砂粒	粗砂粒	极粗砂粒
		0.002~0.02 mm	0.02~0.05 mm	(0.05~0.1 mm)	(0.1~0.25 mm)	(0.25~0.5 mm)	(0.5~1 mm)	(1~2 mm)
CK	0.48a	20.62a	10.94a	7.11a	9.11b	9.00a	21.26b	20.98b
G0.01	0b	9.64b	8.42b	6.41b	9.00a	7.40b	23.09ab	35.08a
G0.03	0b	9.35b	8.82b	6.84b	9.54a	7.58b	23.46ab	33.51a
G0.05	0b	4.54c	6.03c	6.58b	11.00a	10.33a	26.66a	33.97a

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 3 为不同处理组放大倍数为 1 000 倍的扫描电镜图,通过图 3a 可以直观地观察到,未添加 W-OH 的土壤颗粒粒径较小;加入 W-OH 后(图 3b、图

3c 和图 3d),各处理组开始出现团聚状的土壤颗粒,并且随着 W-OH 浓度的提高,土壤颗粒的粒径逐渐增大。



注:扫描电镜图的放大倍数为 1 000 倍。

图 3 不同处理方式土壤扫描电镜图
Fig.3 SEM images of soil under different treatments

2.3 W-OH 材料对土壤比表面积的影响

氮气吸附-脱附的等温曲线能够揭示材料表面性质、孔隙分布及吸附质与吸附剂之间相互作用关系,直观反映样品在不同相对压力条件下的吸附和脱附行为,为深入探究材料的比表面积、孔隙结构及吸附特性提供理论依据^[27]。根据 IUPAC 对孔径的界定,孔径<2 nm 被定义为微孔,孔径为 2~50 nm 被定义为介孔,孔径>50 nm 则被定义为大孔。

图 4 为未添加 W-OH 材料与添加浓度为 5% W-OH 材料的石漠化土壤的等温吸附曲线。根据 IUPAC 等温吸附曲线分类标准,2 组样品的等温吸附

曲线均属于 IV 型等温吸附曲线,在低压区吸附速率相对较慢,对应单层分子吸附向多层分子吸附过渡的过程;中高压区吸附量快速增长,且吸附支与脱附支不重合,形成明显的滞后回线,这是介孔内发生毛细管凝聚效应的结果,直接印证土壤中存在大量的介孔(2~50 nm)。2 组样品的滞后回线均为 H3 型,该类型回滞环通常对应片状颗粒堆积形成的狭缝状介质^[27]。与对照组相比,添加 5% 浓度 W-OH 材料处理组的吸附量有明显提升,表明固化剂的添加改变土壤的孔隙分布特征,尽管比表面积下降,但平均孔径增大,说明 W-OH 促进土壤颗粒的重聚和孔隙的重构。

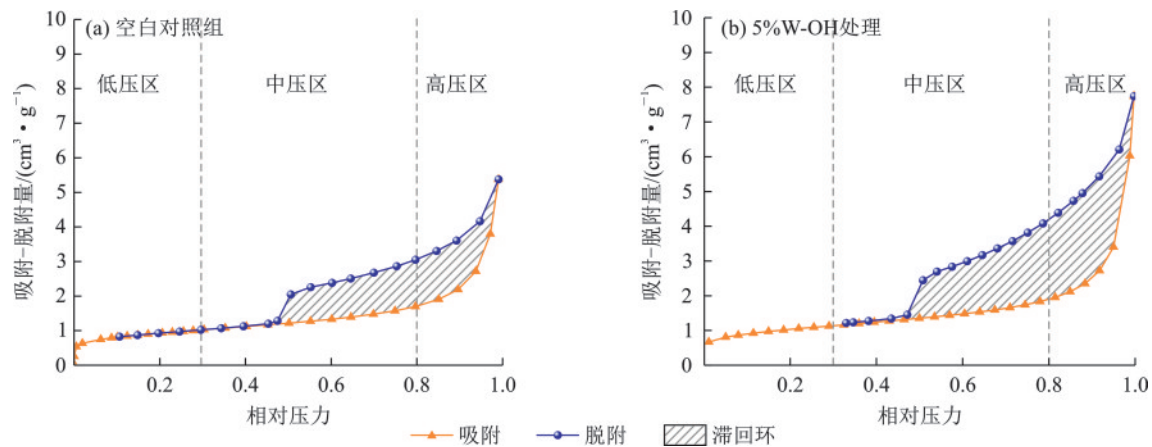


图 4 不同处理组土壤的氮气吸附-脱附等温曲线

Fig.4 N₂ adsorption-desorption isotherms of soil under different treatment groups

由表 2 可知,与对照组相比,添加 5% W-OH 材料之后,土壤比表面积、总孔体积及微孔体积均有所降低,土壤平均孔径增加。其中,对照组土壤的比表面积为 6.101 4 m²/g,经过 W-OH 材料处理后降至 3.670 1 m²/g,降幅达 39.85%。此孔隙结构变化的机制可归结为 2 个方面:一方面,W-OH 材料在土壤孔隙内发生吸附与填充,堵塞部分微小孔隙,减少孔隙的有效暴露面积的同时降低孔隙连通性,直接导致土壤比表面积、总孔体积与微孔体积的降低;另一方面,W-OH 材料在土壤中逐步形成高分子网状结构,通过增强胶结作用包裹分散的土壤颗粒,降低土壤颗粒的分散程度,促进大粒径团粒结构的形成,团粒的聚集使土壤颗粒整体粒径增大,最终表现为土壤平均孔径的增加。

表 2 土壤比表面积及孔容、孔径参数

Table 2 Specific surface area, pore volume, and pore size parameters of soil				
处理	比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)	平均孔径/ nm	总孔体积/ (cm ³ ·g ⁻¹)	微孔体积/ (cm ³ ·g ⁻¹)
CK	6.101 4	9.243 0	0.014 1	0.000 8
G0.05	3.670 1	13.049 7	0.012 0	0.000 3

2.4 W-OH 材料对土壤团聚体的影响

2.4.1 W-OH 材料对土壤团粒分布特征的影响 从图 5 可以看出,对照组(CK)中<0.25 mm 粒径的水稳性团聚体占比最大,而>2 mm 水稳性团聚体含量仅占 9.00%。随着 W-OH 材料施用量的增加,各粒径范围内的土壤水稳性团聚体含量发生显著变化,其中>2 mm 的大粒径水稳性团聚体含量大幅增加,与对照组相比,分别增加 3.90、7.18、8.99 倍。当 W-OH 施用量为 5%(G0.05)时,>2 mm 的土壤水稳性团聚体占比高达 92%。此结果直观印证 W-OH 材料的胶结作用:其通过高分子链的桥接作用促使土壤细颗

粒相互聚集,大幅提升大粒径水稳性团聚体的占比,而大粒径水稳性团聚体是增强土壤结构稳定性、提升抗侵蚀能力的核心组分。

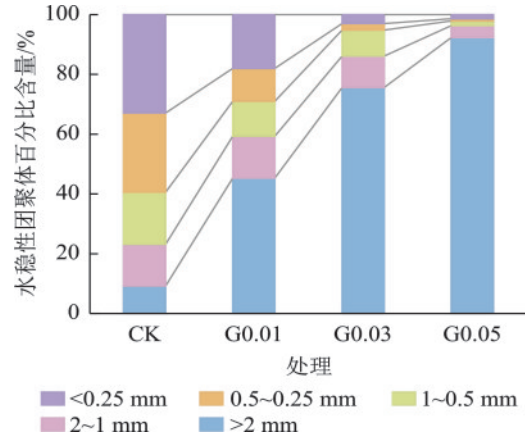


图 5 不同处理方式对土壤团聚体结构的影响

Fig.5 Effects of different treatments on soil aggregate structure

2.4.2 W-OH 材料对粒径>0.25mm 土壤水稳性团聚体含量的影响 由表 3 可知,施用 W-OH 材料可显著提高>0.25 mm 水稳性团聚体含量($p<0.05$),促进土壤向团聚化发育。随着 W-OH 材料浓度的增加,各处理组的>0.25 mm 水稳性团聚体含量显著提高,相较于对照组,处理组 G0.01、G0.03、G0.05 的>0.25 mm 水稳性团聚体含量分别增长 19.64%、46.63%、47.68%,其中处理组 G0.01 土壤水稳性团聚体为 79.8%;G0.03 土壤水稳性团聚体为 97.8%;G0.05 土壤水稳性团聚体为 98.5%。

2.4.3 W-OH 材料对土壤团聚体稳定性的影响 进一步分析表 3 中反映土壤团聚体稳定性的核心指标(MWD、GMD、D)可知,随着 W-OH 材料施用浓度的提高,土壤的 MWD 和 GMD 较对照组均显著提高($p<0.05$),其中 3% 与 5% 处理组 MWD 差异不显著,而 GMD 各浓度间差异显著;与对照组(CK)相

比, G0.01、G0.03、G0.05 处理组 MWD 分别提高 1.10、1.99、2.35 倍; GMD 依次提高 1.25、3.39、4.34 倍。随着 W-OH 材料施用水平的提高, 土壤团聚体 D 值呈降低趋势, 其中处理组 G0.03 与 G0.05 的 D 值差异不显著($p>0.05$)。

表 3 不同处理方式对石漠化土壤团聚体组成及稳定性的影响

Table 3 Effects of different treatments on composition and stability of rocky desertification soil aggregates				
处理	>0.25 mm 团聚体质量 分数/%	平均重量直 径(MWD)/ mm	几何平均直 径(GMD)/ mm	分形维数 (D)
CK	66.7c	0.710 7c	0.425 7d	2.655a
G0.01	79.8b	1.493 8b	0.957 0c	2.451b
G0.03	97.8a	2.124 4a	1.870 0b	1.830c
G0.05	98.5a	2.384 4a	2.274 8a	1.824c

从作用机制看, MWD 和 GMD 显著提升, 本质上是 W-OH 材料的高分子胶结效应增强土壤细颗粒的团聚强度, 推动小粒径团聚体向大粒径、高水稳性团聚体转化; 而分形维数(D)的降低反映土壤团聚体的粒径分布趋于集中、结构异质性减弱, 是土壤结构向规整化、稳定化方向优化的直接体现。

2.5 W-OH 材料对土壤电导率的影响

土壤电导率可以表征土壤中盐度的大小, 间接反映土壤肥力的情况, 电导率过高或过低都会抑制作物的生长^[28-30]。4 组试验的电导率分别为 63.05、59.55、60.75、64.25 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。试验测试结果表明, W-OH 材料对石漠化土壤电导率的调控并非呈现简单的线性关联, 而是表现出明显的非单调剂量效应。具体分析可能的原因, 低浓度 W-OH 材料处理(1%、3%)的土壤电导率较对照组显著降低($p<0.05$)。与空白对照组相比, G0.01 和 G0.03 处理组的电导率分别显著降低 5.55% 和 3.65%, W-OH 作为一种亲水性高分子聚氨酯材料, 其高分子长链及侧链中富含具有未共用电子对的酰胺基等强亲水性活性官能团, 易与喀斯特土壤中的金属离子发生配位络合, 形成大分子螯合物, 从而束缚住游离态的离子, 导致电导率降低。然而, 当固化剂施用水平进一步提升至 5% 时, 电导率回升并与对照组无显著差异, 5% 的施用水平导致大量聚氨酯凝胶在土壤微孔隙内部过度堆积, 这可由表 2 中比表面积从对照组的 $6.101\ 4\ \text{m}^2/\text{g}$ 锐减至 $3.670\ 1\ \text{m}^2/\text{g}$ 看出, 这种孔隙结构的重构压缩电荷扩散层, 从而反向促使原本吸附在微孔内部的吸附态阳离子发生物理脱附并进入孔隙水中, 最终表现为高浓度下电导率的非线性回升。

2.6 W-OH 材料对土壤水文特征的影响

2.6.1 W-OH 材料对土壤导水性能的影响 土壤饱和和导水率(K_s)是表征土壤水分垂直运送能力的核心指标, 其值受土壤孔隙结构、土壤体积质量等因素的耦合调控, 而孔隙结构与土壤体积质量的变化又直接关联土壤的结构稳定性。施用 W-OH 材料可以有效地改善土壤的孔隙结构和土壤体积质量, 进而改良土壤特性^[31]。4 组试验的饱和和导水率分别为 0.56、0.63、0.64、0.33 mm/min 。其原因为当施用 1% 和 3% 的浓度 W-OH 材料时, 高分子的桥接作用驱动松散的细颗粒向水稳性大团粒转化, 从表 3 中平均重量直径(MWD)及几何平均直径(GMD)的显著上升和分形维数的显著降低可以看出, 土壤结构正向稳定化转变, 原本散乱的微小孔隙重新排列重构为结构稳定、连通性极佳的垂直大孔隙网络, 从而在宏观上表现为饱和和导水率的显著上升。当固化剂施用水平达到 5% 时, 高分子固化剂过量施用, 其机制从开始的“颗粒桥接”转变为“孔隙填充”, 聚氨酯凝胶在固化过程中, 因实体填充直接堵塞并切断原本贯通的垂直毛细管通道。虽然在宏观上看平均孔径由 $9.243\ 0\ \text{nm}$ 增大到 $13.049\ 7\ \text{nm}$ (表 2), 但这些孔隙在三维空间多为互不连通的孤立孔隙, 水分垂直运移通道被中断, 最终表现为饱和和导水率的大幅下降。

2.6.2 W-OH 材料对土壤吸水性能的影响 由图 6 可知, 不同施用水平下, 土壤的吸水速率的动态变化趋势一致, 均为初始时刻达到顶峰, 随后快速下降并最终稳定在一定水平。相较于对照组, 处理组土壤初始吸水速率均有不同程度的降低。

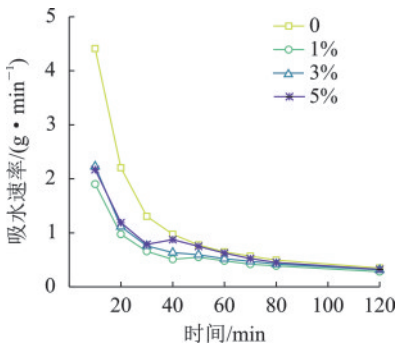


图 6 不同处理方式对土壤吸水速率的影响
Fig.6 Effects of different treatments on soil water absorption rate

从微观结构分析结合前文的氮气吸附数据, 施用 W-OH 后比表面积下降, 总孔体积和微孔体积收缩, 意味着固体凝胶进行了大面积的填充和堵塞, 这种微孔的缺失导致水分在接触土壤时, 毛细管通道受阻, 吸水速率变得平缓。随着入渗持续进行, 大约到 60 min 时, 各处理组的吸水速率与对照组趋于一致, 说明此时土壤基质内部已逐步接近水分饱和状态。

由图7可知,对照组的变化趋势明显不同于其他处理组,对照组的吸水倍率在初始时刻达到最大后逐渐降低并稳定在一定水平;其他处理组的吸水倍率在初始时刻最小而后逐渐增大,说明W-OH材料的使用能够显著改变土壤的吸水性能,使土壤吸水速率变缓,这种缓慢吸水的特性有助于减少地表径流,从而降低可能的土壤水力侵蚀的风险。与此同时,施用浓度为1%和3%的处理组在120 min之后的吸水倍率达到与对照组相同水平,而施用浓度为5%的处理组在40 min达到与对照组相同的水平且逐渐高于对照组。此结果可能是固化剂的双重作用:在吸水前期,过饱和的聚氨酯凝胶主要起堵塞作用,切断部分毛细管通道,吸水倍率比较低;但在后期随着水分长时间的浸泡,W-OH材料内部的强亲水性活性官能团开始发挥海绵蓄水作用,能够有效持留更多自由水,从而在宏观上表现出更优异的后期持水和调蓄能力。

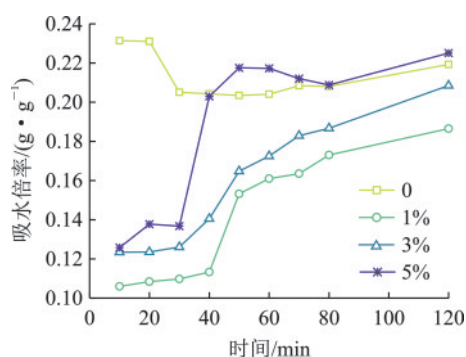


图7 不同处理方式对土壤吸水倍率的影响

Fig.7 Effects of different treatments on soil water absorption ratio

2.6.3 W-OH材料对土壤释水性能的影响 由图8可知,各处理组释水速率的动态变化均表现为初始处于较低水平,之后逐渐增大,达到峰值后逐渐降低并稳定在某一水平上。释水速率大小关系表现为CK>G0.01>G0.05>G0.03。在试验前50 min,各组的释水速率相差无几;但50 min之后,空白对照组的释水速率开始大幅超过并高于所有W-OH处理组。原生状态下的石漠化土壤由于砂粒质量分数高,缺乏大团聚体,内部的水分多以自由水形式存在于毛细通道中。在蒸发初期,表层覆盖的自由水能够不受阻碍地通过垂直大孔隙网络逸散到空气中,前期释水速率差别不大;随着时间的推移,添加W-OH材料的处理组通过聚氨酯柔性凝胶形成高密度的锁水网络,对孔隙水产生极强的束缚力,表现为中后期释水速率明显低于对照组。此微观机理在土壤累积释水倍率的变化趋势上得到进一步的证实:相较于空

白对照组,所有施加W-OH的处理组其土壤释水倍率均呈不同程度的明显降低。其中,施用1%低浓度处理组的保水控释效果最为突出,而3%和5%的处理组释水倍率基本持平(图9)。

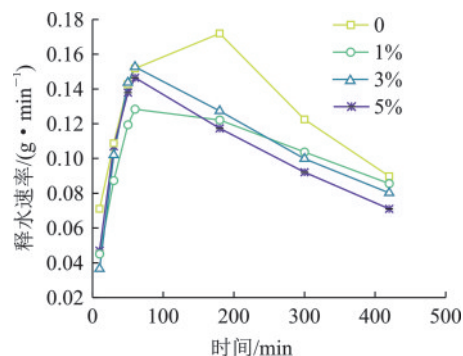


图8 不同处理方式对土壤释水速率的影响

Fig.8 Effects of different treatments on soil water evaporation rate

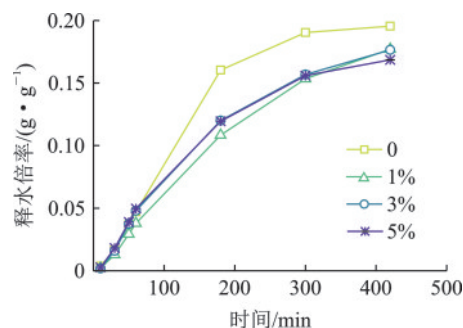


图9 不同处理方式对土壤释水倍率的影响

Fig.9 Effects of different treatments on soil water evaporation ratio

3 讨论

>0.25 mm 土壤水稳性团聚体质量分数、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)及分形维数(D)是评价土壤稳定性的核心指标,其中>0.25 mm 土壤水稳性团聚体质量分数、MWD、GMD的值越大,团聚体粒径越大、结构越稳定;分形维数越高,代表土壤稳定性越差^[20,32-34]。本研究结果表明,随着W-OH材料施用水水平的提高,土壤粒径逐渐增加,土壤团粒结构分布发生明显变化,细颗粒向大粒级团聚体转化,>0.25 mm 土壤团聚体质量分数明显提高。本研究中,不同W-OH材料施用水水平对土壤团聚体稳定性的影响存在明显差异,相比对照组,施用浓度为5%W-OH材料的土壤>0.25 mm 水稳性团聚体质量分数、MWD、GMD最高,D最低,表明施用5%W-OH材料时土壤团聚体稳定性最优。此改良效应的作用机制可归结为:W-OH材料与土壤接触后,迅速渗透并包裹土壤颗粒,通过物理化学作用逐步形成高分子网状结构;同时,W-OH材料的黏性随着时间的延长不断增强,通过包裹、桥接等强胶结作

用将分散的土壤颗粒相互黏结,促使土壤的颗粒粒径变大^[35]。Liang 等^[36]在砒砂岩中添加不同浓度的 W-OH 材料,通过扫描电镜技术观测经过 W-OH 材料固结之后的土壤形貌变化,表明施加 W-OH 材料后,土壤质地由松散变得紧密,且具有一定的力学强度,有助于土壤向着团聚化发展,从而提高土壤的稳定性,与本研究结论互为印证。

土壤电导率反映土壤含盐量的大小,是土壤分析的一个重要的综合性指标,与土壤含盐量、含水量及土壤质地结构变化关系密切^[28-30]。本研究表明,在不同 W-OH 材料施用水平下,固化后的土壤电导率有一定变化,但不显著,其中相比对照组,施用浓度为 1% W-OH 材料的土壤电导率最低,而施用浓度为 5% 的 W-OH 材料土壤电导率增加,可能是由于 W-OH 材料中聚氨酯对金属离子具有一定的捕获能力, W-OH 水溶液固化体含有酰胺基、烷基等官能团,而酰胺分子中含有羰基和氮原子,可与金属离子形成配位键,从而使固结体与金属离子形成较为稳定的螯合物,将金属离子固定在固结体上,使土壤的电导率降低^[31]。随着 W-OH 材料施用水平的增加,土壤电导率增加,是由于固化剂浓度改变其内部结构,影响吸附位点的数量及分布,使 W-OH 材料的浓度对土壤电导率值产生不同的影响,具体原因需要进一步探究。

土壤饱和导水率是表征土壤水分垂直运送能力的核心指标,主要受土壤质地、土壤体积质量及孔隙分布特性的影响^[37-39]。本研究结果表明,相比对照组,随着 W-OH 材料施加水平的提高,土壤饱和导水率(K_s)逐渐增大,当施加水平达到 5% 时,土壤饱和导水率明显降低,其原因可能是供试土壤属于砂质土壤,由于广西地区的自然或人为因素使土壤浅层的团粒结构差,孔隙发育差,施加 W-OH 材料可以改善土壤的孔隙结构,使土壤的导水能力提高;而施加较高浓度的 W-OH 材料时,过多的固化剂可能在土壤表面堆积,使土壤的导水能力下降。杨思远等^[40]研究表明,施用水平为 4.5% 的 W-OH 重构阻水层的阻水功能最好,与本试验的研究结果基本一致。

4 结 论

1) W-OH 材料能够通过微观层面的物理化学作用显著改善石漠化土壤的微观形貌与颗粒组成。固化剂在土壤颗粒表面形成的胶结物质,显著提高含碳活性基团的富集度;同时,其桥接效应驱动散落的原生黏粒与粉粒向大粒径复合体团聚,重构土壤的孔隙结构,使土壤平均孔径增大、内部流体与空气的运移通道得以拓宽。

2) W-OH 材料能够驱动石漠化土壤向高质量的团聚化方向变化,且改良效应随施用量的增加而显

著增强。施用后, >0.25 mm 大粒级水稳性团聚体占比及团聚体几何尺度(MWD、GMD)均呈倍数级提升,分形维数明显降低。表明高分子柔性网状体的强力胶结赋予土壤极佳的空间结构规整性与水稳性,从而能够大幅度提升退化土壤的抗侵蚀性。

3) W-OH 材料对石漠化土壤的水文调节特征呈现复杂的非线性响应。施用固化剂对土壤电导率整体影响平缓;对垂直水文传导能力则具有双重调控效应:低浓度(1%~3%)施用下,由于稳定的大孔隙网络的构建,土壤饱和导水率显著提升;而当施用量达到 5% 的过饱和状态时,过量的高分子凝胶直接在孔隙内发生物理填充,堵塞垂直毛细通道并形成孤立孔隙,反向导致土壤导水能力急剧下降。

参考文献:

- [1] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨[J]. 中国岩溶, 2002, 21(2): 101-105.
Wang Shijie. Concept deduction and its connotation of karst rocky desertification[J]. Carsologica Sinica, 2002, 21(2): 101-105.
- [2] 韦茂繁. 广西石漠化及其对策[J]. 广西大学学报(哲学社会科学版), 2002, 24(2): 42-47.
Wei Maofan. Stony desertification in Guangxi and the way to deal with it[J]. Journal of Guangxi University (Philosophy and Social Science), 2002, 24(2): 42-47.
- [3] 宋维峰. 我国石漠化现状及其防治综述[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(5): 102-106.
Song Weifeng. Review of the present situation and combating of rocky desertification in China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(5): 102-106.
- [4] 甘海燕, 胡宝清. 石漠化治理存在问题及对策: 以广西为例[J]. 学术论坛, 2016, 39(5): 54-57.
Gan Haiyan, Hu Baoqing. Problems and countermeasures of rocky desertification governance: A case study of Guangxi[J]. Academic Forum, 2016, 39(5): 54-57.
- [5] 但新球, 李梦先, 吴协保, 等. 中国岩溶地区石漠化现状[J]. 中南林业调查规划, 2019, 38(1): 1-6.
Dan Xinqiu, Li Mengxian, Wu Xiebao, et al. The present situation of rocky desertification in karst areas of China[J]. Central South Forest Inventory and Planning, 2019, 38(1): 1-6.
- [6] 戴全厚, 严友进. 西南喀斯特石漠化与水土流失研究进展[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 1-10.
Dai Quanhong, Yan Youjin. Research progress of karst rocky desertification and soil erosion in southwest China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(2): 1-10.
- [7] 赵磊磊, 罗志锋, 孙永玉. 西南岩溶地区石漠化生态治理与植被恢复[J]. 林业建设, 2025, 43(1): 62-66.
Zhao Leilei, Luo Zhifeng, Sun Yongyu. Ecological control

- and vegetation restoration on rocky desertification in southwest karst area[J]. *Forestry Construction*, 2025, 43(1): 62-66.
- [8] 田晓龙, 汪依妮, 柳鑫, 等. 喀斯特地区不同石漠化程度草地根系分解与周转特征[J]. *生态学报*, 2021, 41(10): 4203-4212.
- Tian Xiaolong, Wang Yini, Liu Xin, et al. Root decomposition and turnover characteristics of different rocky desertification grasslands in karst area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(10): 4203-4212.
- [9] 梁止水, 吴智仁, 杨才千, 等. 基于W-OH的砒砂岩抗蚀促生机理研究[J]. *水利学报*, 2016, 47(9): 1160-1166.
- Liang Zhishui, Wu Zhiren, Yang Caiqian, et al. Mechanism of erosion resistance and vegetation promotion by W-OH in Pisha sandstone[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(9): 1160-1166.
- [10] Zhu Xuchao, Liang Yin, Tian Zhiyuan, et al. Effect of W-OH, a hydrophilic polyurethane polymer, in controlling erosion of two typical erodible soils in Southern China[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(21): e1163.
- [11] 梁止水, 吴智仁, 张立欣, 等. W-OH材料砂土固结体抗水流冲击性能[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2021, 19(3): 89-94.
- Liang Zhishui, Wu Zhiren, Zhang Lixin, et al. Resisting water impact performance of solidified sandy soil by W-OH[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2021, 19(3): 89-94.
- [12] 王欣, 朱绪超, 梁音, 等. 新型W-OH材料对南方典型侵蚀土壤入渗和产流产沙的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(6): 123-131.
- Wang Xin, Zhu Xuchao, Liang Yin, et al. Effects of new polyurethane material (W-OH) on infiltration and runoff and sediment yield of two typical erodible soils in South China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, 18(6): 123-131.
- [13] 刘玉明, 章本本, 沈程鹏, 等. W-OH加固花岗岩残积土边坡的抗冲刷性能研究[J]. *市政技术*, 2023, 41(6): 15-19.
- Liu Yuming, Zhang Benben, Shen Chengpeng, et al. Study on the scour resistance of W-OH reinforced granite residual soil slope[J]. *Journal of Municipal Technology*, 2023, 41(6): 15-19.
- [14] Liang Zhishui, Sun Yue, Fang Xiuwen, et al. Effect of W-OH material on water/fertilizer retention and plant growth in the pisha sandstone area of China[J]. *Sustainability*, 2024, 16(15): e6369.
- [15] Qin Xiaochun, Ni Anchen, Zhang Nan, et al. Erosion control and growth promotion of W-OH material on red clay highway slopes: A case study in South China[J]. *Sustainability*, 2021, 13(3): e1144.
- [16] 方志, 陈辰, 肖国洲. W-OH材料对赣南山区土壤减渗抗蚀作用的影响[J]. *科技创新与应用*, 2024, 14(17): 55-58.
- Fang Zhi, Chen Chen, Xiao Guozhou. Effect of W-OH material on infiltration reduction and erosion resistance of soil in mountainous areas of southern Jiangxi[J]. *Technology Innovation and Application*, 2024, 14(17): 55-58.
- [17] 国家林业和草原局. 喀斯特石漠化地区植被恢复技术规范: LY/T 1840—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- National Forestry and Grassland Administration. Technical specification for vegetation restoration in karst rocky desertification areas: LY/T 1840—2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [18] 张季如, 黄丽, 祝杰, 等. 微观尺度上土壤孔隙及其分维数的SEM分析[J]. *土壤学报*, 2008, 45(2): 207-215.
- Zhang Jiru, Huang Li, Zhu Jie, et al. Sem analysis of soil pore and its fractal dimension on micro scale[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(2): 207-215.
- [19] 罗绪强, 王世杰, 张桂玲, 等. 喀斯特石漠化过程中土壤颗粒组成的空间分异特征[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(12): 227-233.
- Luo Xuqiang, Wang Shijie, Zhang Guiling, et al. Spatial variation of soil particle composition in the process of karst rocky desertification[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(12): 227-233.
- [20] 卢金伟, 李占斌. 土壤团聚体研究进展[J]. *水土保持研究*, 2002, 9(1): 81-85.
- Lu Jinwei, Li Zhanbin. Advance in soil aggregate study[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2002, 9(1): 81-85.
- [21] 王清奎, 汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. *土壤通报*, 2005, 36(3): 415-421.
- Wang Qingkui, Wang Silong. Forming and stable mechanism of soil aggregate and influencing factors[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(3): 415-421.
- [22] 于雯霏, 王佩佩, 刘俊娥, 等. 黄土高原典型植被根系对土壤团聚体及其有机碳组分的影响[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(6): 246-254.
- Yu Wenfei, Wang Peipei, Liu June, et al. Effects of typical vegetation roots on soil aggregates and their organic carbon fractions on the Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(6): 246-254.
- [23] 何欢, 康必均, 尹婧, 等. 不同营林措施对川东华蓥山杉木林土壤团聚体稳定性及细根分布的影响[J]. *土壤通报*, 2024, 55(2): 351-359.
- He Huan, Kang Bijun, Yin Jing, et al. Effects of forest management measurements on soil aggregate stability and fine root distribution of Chinese fir in Huaying Mountains of east Sichuan[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2024, 55(2): 351-359.
- [24] 韩凤朋, 郑纪勇, 李占斌, 等. PAM对土壤物理性状以及水分分布的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(4): 70-74.
- Han Fengpeng, Zheng Jiyong, Li Zhanbin, et al. Effect of PAM on soil physical properties and water distribution[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(4): 70-74.
- [25] 姜银光, 冯吉, 邱信蛟, 等. 不同离子类型对土壤保水剂吸释水特性影响研究[J]. *北京水务*, 2012(2): 7-11.

- Jiang Yinguang, Feng Ji, Qiu Xinjiao, et al. Study on the characteristics of the soil SAP repeated water absorption and release by different types of ions [J]. *Beijing Water*, 2012(2):7-11.
- [26] 沈慧, 姜凤岐, 杜晓军, 等. 水土保持林土壤肥力及其评价指标[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(2):60-65.
- Shen Hui, Jiang Fengqi, Du Xiaojun, et al. Study on soil fertility of water and soil conservation forest and its evaluation indexes[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(2):60-65.
- [27] 何余生, 李忠, 奚红霞, 等. 气固吸附等温线的研究进展[J]. *离子交换与吸附*, 2004(4):376-384.
- He Yusheng, Li Zhong, Xi Hongxia, et al. Research progress of gas-solid adsorption isotherms [J]. *Ion Exchange and Adsorption*, 2004(4):376-384.
- [28] 张一清, 王文娥, 胡笑涛, 等. 土壤电导率对土壤含盐量及施肥浓度的响应试验研究[J]. *中国农业大学学报*, 2023, 28(3):176-187.
- Zhang Yiqing, Wang Wene, Hu Xiaotao, et al. Experimental study on the response of soil conductivity to soil salt content and fertilizer concentration [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(3):176-187.
- [29] 张一清, 王文娥, 胡明宇, 等. 容重及含水率对土壤电导率的影响研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(3):162-169.
- Zhang Yiqing, Wang Wene, Hu Mingyu, et al. Influence of bulk density and water content on soil electrical conductivity[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(3):162-169.
- [30] 孙宇瑞. 土壤含水率和盐分对土壤电导率的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2000, 5(4):39-41.
- Sun Yurui. Experimental survey for the effects of soil water content and soil salinity on soil electrical conductivity[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2000, 5(4):39-41.
- [31] 阙云, 龚方泽, 张玉乐. 新型改性水溶性生态土壤稳定剂的微观特性及固土机理分析[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(6):919-926.
- Que Yun, Gong Fangze, Zhang Yule. Microscopic characteristics of new modified water-soluble polymer material and stabilization mechanism of its stabilized soil [J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 2017, 45(6):919-926.
- [32] Bi Mingfeng, Zhang Shuaipu, Xu Qinxue, et al. Coupling and synergistic relationships between soil aggregate stability and nutrient stoichiometric characteristics under different microtopographies on karst rocky desertification slopes[J]. *Catena*, 2024, 243:e108142.
- [33] Cao Yousong, Xiao Bo, Ghanbarian B. Biocrusts enhance soil structural stability during freeze-thaw cycles and improve soil erosion resistance in cold-winter drylands[J]. *Catena*, 2024, 243:e108206.
- [34] 李惠惠, 孙浩宇, 赵建荣. 土壤团聚体稳定性表征及评价方法研究进展[J]. *仲恺农业工程学院学报*, 2025, 38(2):64-71.
- Li Huihui, Sun Haoyu, Zhao Jianrong. Research progress on stability characterization and evaluation methods of soil aggregate [J]. *Journal of Zhongkai University of Agriculture and Engineering*, 2025, 38(2):64-71.
- [35] 张俊魁, 高海鹰, 梁止水. 水溶性聚氨酯改良砒砂岩的水理性能试验研究[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(1):103-106.
- Zhang Junkui, Gao Haiying, Liang Zhishui. Water-physical properties of feldspathic sandstone modified by hydraulic polyurethane [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(1):103-106.
- [36] Liang Zhishui, Wu Zhiren, Deng Lin, et al. Improving the consolidation properties of hydrophilic polyurethane for feldspathic sandstone water erosion prevention [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(15):17642-17651.
- [37] 曹湘英. 土壤饱和导水率分布特征及影响因素分析[J]. *水土保持应用技术*, 2024(5):13-15.
- Cao Xiangying. Analysis on distribution characteristics and influencing factors of soil saturated hydraulic conductivity [J]. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2024(5):13-15.
- [38] 敖家坤, 牛健植, 谢宝元, 等. 土壤大孔隙结构对饱和导水率的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2021, 43(2):102-112.
- Ao Jiakun, Niu Jianzhi, Xie Baoyuan, et al. Influence of soil macropore structure on saturated hydraulic conductivity [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2021, 43(2):102-112.
- [39] 傅子洹, 王云强, 安芷生. 黄土区小流域土壤容重和饱和导水率的时空动态特征[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(13):128-134.
- Fu Zihuan, Wang Yunqiang, An Zhisheng. Spatio-temporal characteristics of soil bulk density and saturated hydraulic conductivity at small watershed scale on Loess Plateau [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(13):128-134.
- [40] 杨思远, 杨海龙, 杨鹏辉, 等. 基于W-OH的矿区重构冻土阻水层功能评价模拟研究[J]. *干旱区地理*, 2025, 48(1):75-84.
- Yang Siyuan, Yang Hailong, Yang Penghui, et al. Function evaluation of reformed waterproof layer over frozen ground in mining area based on W-OH [J]. *Arid Land Geography*, 2025, 48(1):75-84.