

黄河泥沙的固碳能力及其持水性能研究

郭德辉¹, 张敏¹, 冯晋华¹, 张建伟¹, 赫中营¹, 李小春²

(1. 河南大学 建筑工程学院, 河南 开封 475004; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要:【目的】明确黄河泥沙改良后的固碳能力和持水性能,为黄河泥沙的高值化利用提供理论依据和技术参考。【方法】基于活性氧化镁碳化方法,通过CO₂吸收量测试、持水率测试以及微观测试,研究固化剂掺量、碳化时间以及初始含水率对黄河泥沙固碳能力、持水性能以及微观结构的影响规律。【结果】①黄河泥沙的固碳能力与固化剂掺量、碳化时间等因素呈正相关,存在最优初始含水率使黄河泥沙的固碳能力达到最佳。②黄河泥沙的持水性能与固碳能力呈正相关,但其持水性能提升幅度随固化剂掺量和碳化时间的增加而降低。③初始含水率较低时,固碳过程促进了黄河泥沙持水性能的提升,而较高的初始含水率则显著降低了黄河泥沙固碳后的持水性能。④黄河泥沙碳化过程中生成的棱柱状水碳镁石及片状球碳镁石、水菱镁石等镁碳酸盐通过胶结作用将松散的土颗粒胶结在一起,形成块状胶结物,使黄河泥沙更加密实,进而提升了松散黄河泥沙的持水性能。【结论】碳化方法提升了黄河泥沙的固碳能力与持水性能,为后续黄河泥沙的资源化利用提供了理论和技术参考。

关键词:黄河泥沙;固化剂掺量;CO₂吸收量;持水性能;微观结构

中图分类号:TU521

文献标识码:A

文章编号:2096-6792(2026)05-0013-09

黄河泥沙的资源化利用是推动黄河流域高质量发展的重要内容^[1]。黄河年输沙量居于世界前列^[2],每年由中游输送而来的大量泥沙导致下游河床持续抬升,进而形成“地上悬河”,对周边地区的安全构成威胁^[3-4]。因此,泥沙治理是协调黄河水沙关系的关键。在新时代绿色发展理念的推动下,黄河泥沙的资源属性日益凸显^[5]。近年来,已开展了将黄河泥沙作为采煤沉陷地充填复垦材料^[6-7],以及用于改良盐碱地^[8]等方面的研究,并取得了初步成果。

黄河泥沙主要由砂土、粉土、黏粒组成^[9],其持水性能较差,限制了其在建筑工程、安全工程以及生态改良等方面的应用。在改善土体持水性能的研究中,张雷等^[10]将水泥作为淤泥质黏土的固化剂并开展相关研究,发现水泥的加入可有效降低土体的渗透系数,但是水泥的生产导致大量的碳排放。张俊然等^[11]采用环境友好的生物聚合物作为粉土的固化剂,使土体饱和含水率增大,孔隙比增

大,持水能力显著提高。与水泥改良方法相比,生物聚合物的使用显著减少了碳排放。王亮等^[12]采用活性氧化镁碳化技术对粉土和粉质黏土进行改良,该技术在使土体抗渗性达到水泥固化土的抗渗水平的同时,展现出良好的固碳潜力,不仅使土体抗渗性得到了改善,而且还具有良好的环境效益。就实现“双碳”目标而言,该技术优势突出,凭借其独特的固碳潜力,在岩土工程中得到了广泛关注^[13-18]。郑旭等^[19]基于上述方法开展了针对粉土和粉质黏土冻融耐久性的研究,发现改良土与水泥固化土相似,具有较好的抗冻性。刘松玉等^[20]通过研究经该方法改良后粉土的抗硫酸盐侵蚀性,发现改良土具有比水泥固化土更强的抗硫酸盐侵蚀能力。王东星等^[21]将淤泥质土通过该方法进行改良后,发现改良土的抗压强度得到了进一步增加。上述研究证明了活性氧化镁硫化技术对于不同质地较差土体材料的显著改良优势,然而该方法对于成分复杂的黄河泥沙的作用尚不清晰,缺乏系统的

收稿日期/Received:2025-03-10

修回日期/Revised:2025-05-13

基金项目:国家自然科学基金项目(42307243);河南省科技攻关项目(242102321012,252102320040);河南省青年人才托举工程(2025HYTP034)。

第一作者:郭德辉(1999—),男,硕士研究生,从事土壤性能改良方面的研究。E-mail:guodehui@henu.edu.cn。

通信作者:张敏(1988—),女,副教授,博士,从事环境岩土与区域碳中和方面的研究。E-mail:minzhang@henu.edu.cn。

研究,相关研究工作亟待开展。

本研究通过分析改良后的黄河泥沙对 CO_2 吸收量和持水率的变化,研究其固碳能力和持水性能,探明固化剂掺量、碳化时间和初始含水率对土体固碳能力和持水性能的影响。通过电子显微镜、扫描电镜(Scanning Electron Microscopy, SEM)和 X 射线衍射(X-ray Diffraction, XRD)对碳化土的微观结构和化学成分进行分析。该研究为黄河泥沙的高值化利用提供技术和理论参考依据,对推动流域“双碳”目标的实现具有重要意义。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用黄河泥沙取自开封市袁坊乡王庵控导工程黄河沿线,经烘干处理至恒重状态后,作为试验材料。活性氧化镁购自河北镁神科技股份有限公司。使用智能粒度分析仪测定材料的颗粒级

配,颗粒级配曲线如图 1 所示。试验所用黄河泥沙的基本性质见表 1,通过 X 射线荧光光谱仪(X-ray Fluorescence Spectrometer, XRF)测定黄河泥沙和活性氧化镁的主要化学成分,结果见表 2。

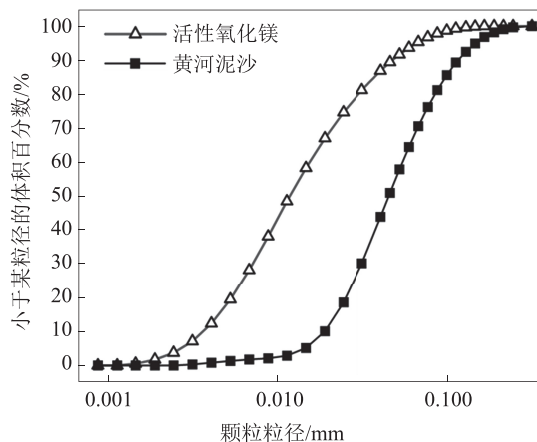


图 1 材料的颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain size distribution curves of materials

表 1 试验用土的基本性质

Tab. 1 Basic properties of test soil

液限/%	塑限/%	土粒比重	最大干密度/(g/cm^3)	最优含水率/%	天然含水率/%	天然干密度/(g/cm^3)
28.35	19.78	2.70	1.68	17.10	20.50	1.43

表 2 原材料的化学组成

Tab. 2 Chemical composition of raw materials

成分	成分含量/%	
	黄河泥沙	活性氧化镁
SiO_2	64.50	1.19
Al_2O_3	12.72	—
CaO	8.87	1.50
Fe_2O_3	4.82	0.19
MgO	2.41	96.27
Na_2O	1.91	—
其他	4.77	0.85

1.2 试验装置

1.2.1 碳化试验装置

试验所用碳化装置是基于普通反应釜改进而成。针对常温常压下碳化松散土,在反应釜内增加了“工”字形塑料平台。改进后的碳化装置由反应釜、“工”字形塑料平台、 CO_2 储气罐以及 CO_2 调压阀组成,试验装置如图 2 所示。盖子左侧和中央各设有一个出气口,左侧出气口 1 上方套有一个气球,通过气球的鼓起状况体现反应釜内气体消耗以及气压情况。若气球略微鼓起,则表明反应釜内 CO_2 充足;若气球收缩,则说明反应釜内 CO_2 被消

耗或者已经泄漏。在碳化过程中需始终保持气球处于略微鼓起状态,若发现气球收缩,应当及时通入 CO_2 ,以确保反应釜内始终处于 CO_2 饱满状态。

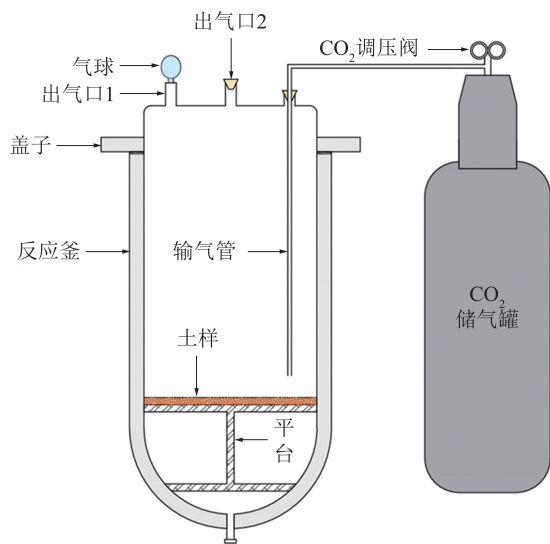


图 2 碳化装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of carbonation apparatus

1.2.2 持水试验装置

持水试验装置由烧杯、内径为 60 mm 的布氏漏斗以及直径为 60 mm 的滤纸组成。试验装置如图 3 所示。



图 3 持水试验装置

Fig. 3 Water retention test apparatus

1.3 试验方案

所有试验均在常温常压条件下进行,试验参数见表 3。每组试验均进行 3 次平行试验,试验结果取 3 次试验数据的算术平均值。基于此表的试验参数,CO₂ 吸收量采用黄河泥沙碳化前后的质量差表示^[22-23]并体现固碳能力的变化。黄河泥沙持水

性能通过其持水率表征。

碳化试验具体步骤如下:①对拌合好的土样进行称量,随后将其平铺于反应釜内的平台上,持续通入 CO₂,使 CO₂ 充盈整个反应釜;②反应釜密封好后继续通入 CO₂,直至气球呈现略微鼓起的状态,此时碳化正式开始;③在碳化过程中,气球一旦出现收缩,表明反应釜内 CO₂ 已经不再饱满,应及时通入 CO₂,始终保持反应釜内 CO₂ 处于饱满状态,直至碳化结束;④碳化结束,称量碳化后的土样质量,通过碳化前后土体质量差得出 CO₂ 吸收量。碳化试验的技术路线如图 4(a) 所示。

表 3 试验方案

Tab. 3 Test schemes

活性氧化镁 掺量/%	碳化 时间/min	初始 含水率/%
0、10、15、20、25	30	20
20	0、15、30、45、60	20
20	30	0、10、15、20、25

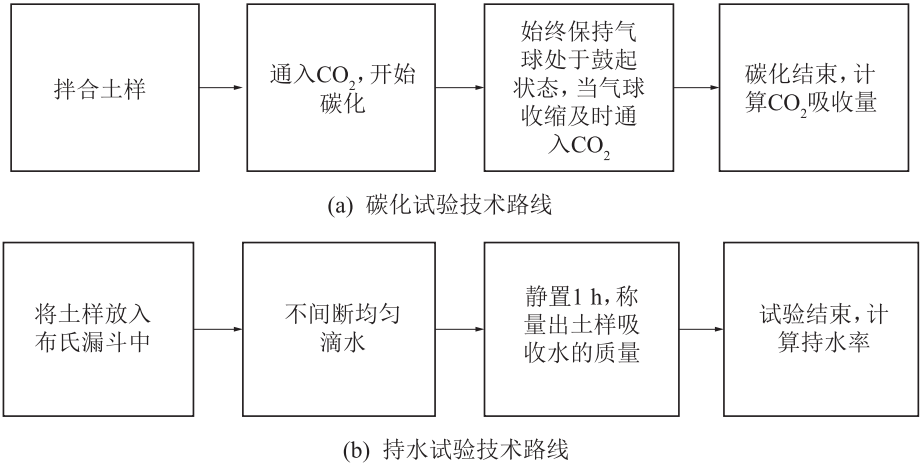


图 4 试验技术路线

Fig. 4 Experimental workflow

碳化试验结束后,称取一定量的碳化土进行持水试验,持水试验具体步骤如下:①称取 50 g 碳化后的土样($M=50\text{ g}$)置于铺有滤纸的布氏漏斗中,称取漏斗、滤纸、土样的总质量 M_1 ;②不间断均匀滴水,直至达到设定的注水量(50 g);③注水完成后,静置 1 h,此时漏斗内已没有水滴出,称量漏斗、滤纸、土样以及土样吸收水的总质量 M_2 ;④采用式(1)计算持水率,持水试验的技术路线如图 4(b) 所示。

$$\text{持水率} = \frac{M_2 - M_1}{M} \times 100\%。$$
 (1)

式中: M 为土样质量, g; M_1 为注水前漏斗、滤纸和土样总质量, g; M_2 为注水后漏斗、滤纸、土样以及土样吸收水的总质量, g。

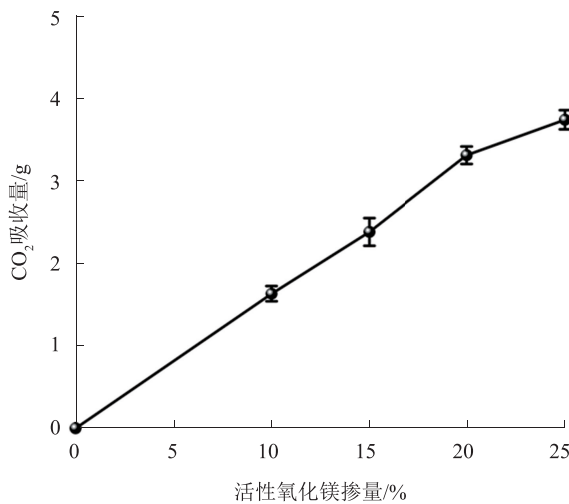
采用 Nova NanoSEM 450 型扫描电镜仪对碳化后的土样进行微观结构观测,化学组成通过 D8-Advance 型 X 射线衍射仪进行测试。

2 结果分析

2.1 活性氧化镁掺量对固碳能力和持水率的影响

活性氧化镁掺量对黄河泥沙 CO₂ 吸收量以及持水率变化的影响如图 5 所示,土样初始含水率均

为20%,碳化时间均为30 min。活性氧化镁水化和碳化反应见化学方程式(2)~(5)。根据图5(a)所示结果,CO₂吸收量随活性氧化镁掺量的增加而上升,具体原因可通过式(2)~(5)的反应过程解释。活性氧化镁这一固化剂加入到黄河泥沙中,先经历水化反应,后参与碳化反应。针对该反应过程,当活性氧化镁掺量增加时,黄河泥沙中生成的水化产物(主要是Mg(OH)₂)随之增多,水化产物与CO₂发生碳化反应,增加了黄河泥沙的CO₂吸收量,生成一系列碳化产物。另外,图5(a)也进一步表明,活性氧化镁掺量增加时,黄河泥沙对CO₂吸收量的提升幅度先增加后降低,其中活性氧化镁掺量从15%增至20%时,黄河泥沙CO₂吸收量提升幅度最大。原因是,活性氧化镁掺量持续增加时,黄河泥沙的初始含水率有限,超出碳化反应所需的活性氧化镁无法被利用,导致CO₂吸收量提升幅度随之减小。



(a) 每100 g土样的CO₂吸收量变化曲线

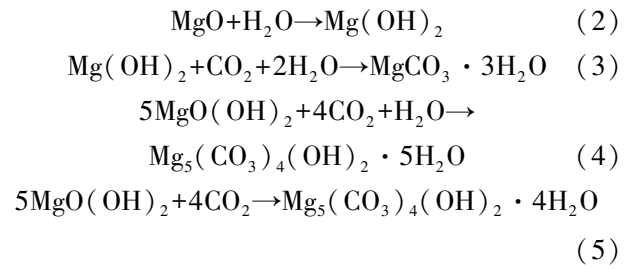
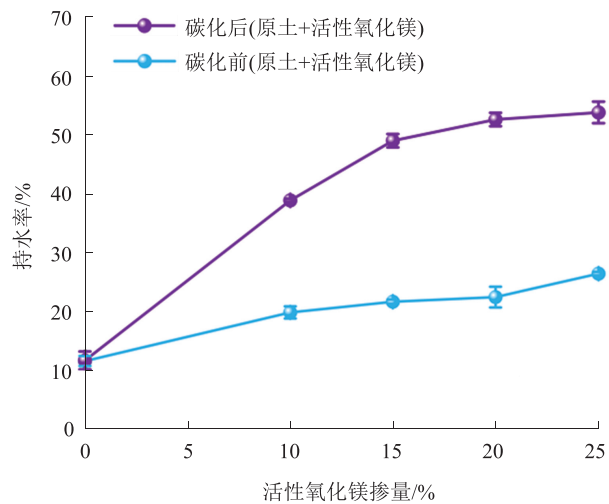


图5(b)表明,黄河泥沙的持水率与活性氧化镁掺量呈正相关,碳化后黄河泥沙的持水率高于碳化前的数值,表明碳化反应能够进一步提升黄河泥沙持水率。另外,图5(b)中碳化前的持水率曲线表明,相较于未掺入活性氧化镁的原土(活性氧化镁掺量为0%的点),活性氧化镁的掺入可小幅提升黄河泥沙的持水率,原因在于活性氧化镁作为一种类似生石灰的碱性物质,易吸收水分并发生水化反应,生成体积膨胀的水化产物Mg(OH)₂。在此基础上,碳化反应能够进一步提升黄河泥沙的持水率。



(b) 持水率变化曲线

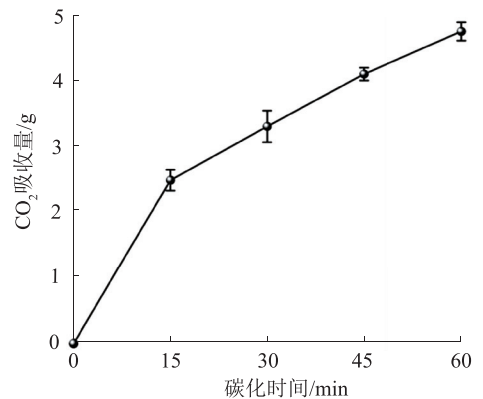
图5 不同活性氧化镁掺量下黄河泥沙CO₂吸收量和持水率变化曲线

Fig. 5 Variation curves of CO₂ absorption amount and water retention rate Yellow River sediment under different reactive magnesium oxide contents

2.2 碳化时间对固碳能力和持水率的影响

碳化时间对黄河泥沙CO₂吸收量以及持水率变化的影响特征如图6所示,土样中活性氧化镁掺量、初始含水率均为20%。在图6(a)中能够观测到,CO₂吸收量随着碳化时间的延长呈上升趋势,这是由于碳化反应会随着时间的推移而逐步加深,从而使CO₂吸收量不断增加。

图6(b)的试验结果表明,黄河泥沙持水率与碳化时间为非线性关系,黄河泥沙持水率随着碳化时间的增加逐渐提高,但其提升幅度却随之逐渐减小。



(a) 每100 g土样的CO₂吸收量变化曲线

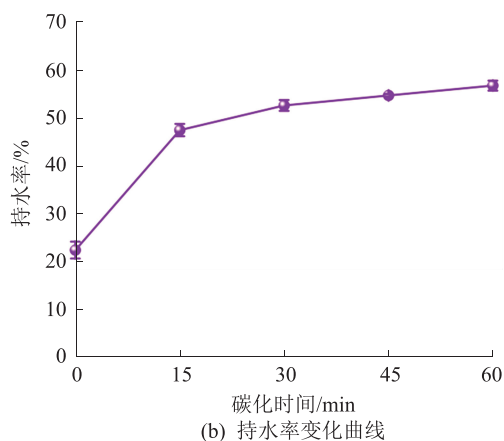


图 6 不同碳化时间下黄河泥沙 CO_2 吸收量和持水率变化曲线

Fig. 6 Variation curves of CO_2 absorption amount and water retention rate of Yellow River sediment under different carbonation durations

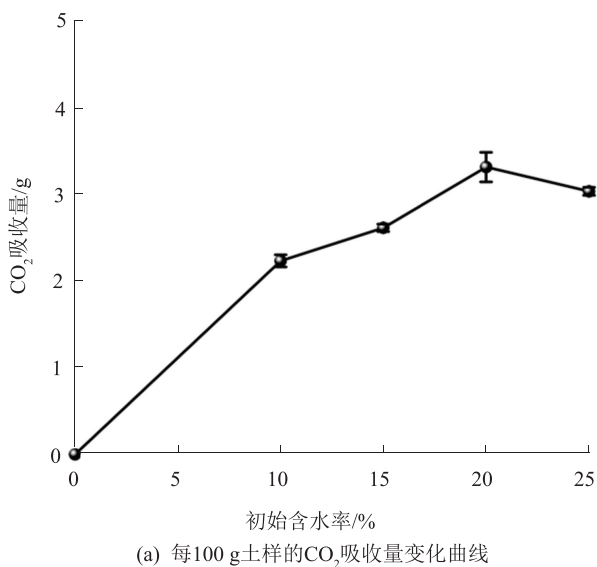
碳化时间从 0 min 增至 15 min 时,黄河泥沙持水率提升幅度较大,持水率从 23% 提升到 48%,增长率为 108%。然而,黄河泥沙持水率的增长率随时间持续降低。该现象揭示了黄河泥沙持水性能不会随碳化时间的增加而无限提高,而是存在一定的阈值。

2.3 初始含水率对固碳能力和持水率的影响

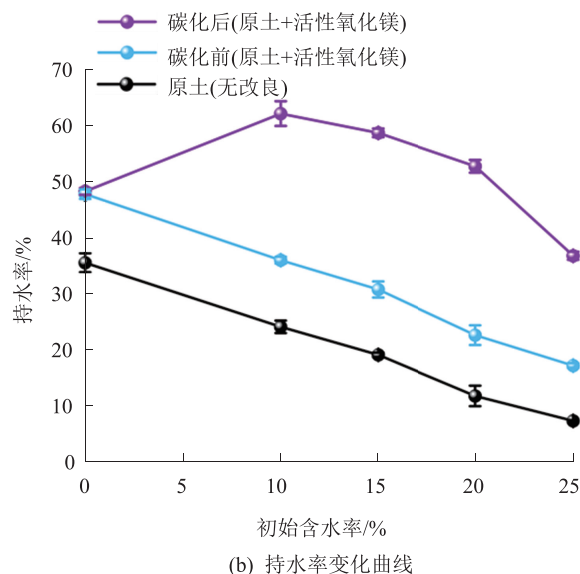
初始含水率对黄河泥沙 CO_2 吸收量以及持水率变化的影响如图 7 所示,土样中活性氧化镁掺量

均为 20%,碳化时间均为 30 min,作为对照组的原土未掺入活性氧化镁也未经过碳化。从图 7(a)可以观测到, CO_2 吸收量呈现出先增后减的态势,这表明存在最优初始含水率,使 CO_2 吸收量达到最大。这是由于在初始低含水率情况下,活性氧化镁的水化不够充分,水化生成的 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 较少,而在高初始含水率情况下,水会堵塞一部分气体运移通道,减缓了 CO_2 在黄河泥沙中的扩散与渗透^[12]。此外,当初始含水率过高时,微溶于水的 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 表面会形成一层水膜,阻碍了 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 与 CO_2 之间的反应,进一步减少了 CO_2 的吸收^[12]。

随着黄河泥沙初始含水率的升高,其持水率会随之降低。但在图 7(b)中,当初始含水率从 0% 增加到 10% 时,碳化后的持水率先增加后降低,原因在于水分是水化和碳化反应能否启动的关键,2.1 和 2.2 节证明了碳化可以提升黄河泥沙持水率,所以当水存在时,黄河泥沙发生了水化和碳化反应,致使持水率先增加后降低。当初始含水率为 25% 时,碳化后的持水率大幅降低,这是因为初始含水率较高,土颗粒形成了较大的团聚体,随后进行碳化,在碳化产物的胶结作用下,团聚体变得不易分散,形成更大的团聚体,使得黄河泥沙中大孔隙增多,水分更容易流失,从而造成持水率的大幅降低。



(a) 每 100 g 土样的 CO_2 吸收量变化曲线



(b) 持水率变化曲线

图 7 不同初始含水率下黄河泥沙 CO_2 吸收量和持水率变化曲线

Fig. 7 Variation curves of CO_2 absorption amount and water retention rate of Yellow River sediment under different initial water contents

将图 7(b)中碳化前与原土的持水率曲线进行对比,进一步证明了掺入活性氧化镁能小幅提升黄

河泥沙的持水率,这与 2.1 节中的研究结果一致。碳化前与碳化后的试验结果可进一步证明,碳化过

程能够显著提升黄河泥沙的持水率。此次研究发现,松散状黄河泥沙经过碳化后,其持水性能得到了提升。这一发现是对碳化改良黄河泥沙水力性能的新认识。王亮等^[12]发现,碳化过程降低了粉土和黏土的渗透系数,本研究则直接揭示了碳化过程对黄河泥沙持水性能的提升机理。基于此,可以推断,碳化方法不仅对有较高压实度的粉土和黏土有效,对松散状黄河泥沙同样有效。

3 微观测试

为证实黄河泥沙中发生了碳化反应,本研究开展了微观测试。微观测试所选取的土样中活性氧

化镁掺量 20%、初始含水率 20%、碳化时间 30 min。

黄河泥沙碳化前、后电子显微镜成像如图 8 所示。图 8(a)为黄河泥沙碳化前的状态,揭示了土颗粒的原始松散状态;图 8(b)为黄河泥沙碳化后的状态,揭示了原本松散的土颗粒局部被胶结在一起,胶结物为碳化反应的产物。该图中的块状土体直观证实了黄河泥沙中碳化反应的存在。碳化后黄河泥沙的 XRD 图谱如图 9 所示,物相检测汇总见表 4。该图谱进一步表明,黄河泥沙中碳化反应的产物主要由水碳镁石(Nesquehonite)、球碳镁石(Dypingite)和水菱镁石(Hydromagnesite)组成。该测试结果与既有研究的发现一致^[24-26]。

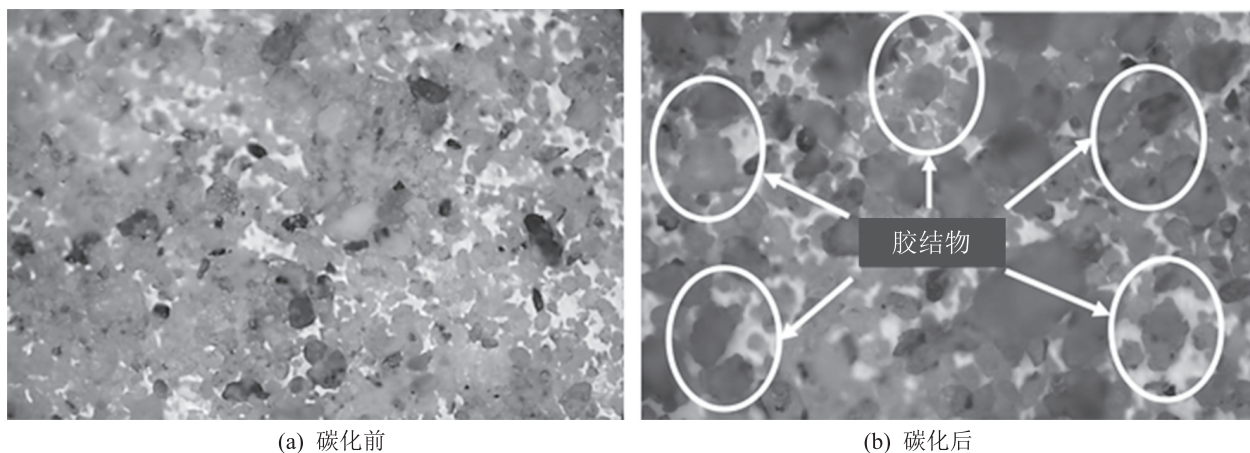


图 8 黄河泥沙碳化前、后电子显微镜图

Fig. 8 Electron microscopy images of Yellow River sediment before and after carbonation

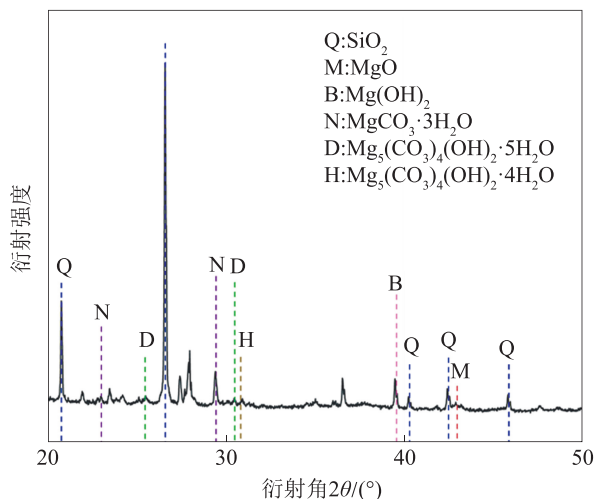


图 9 碳化后黄河泥沙 XRD 图谱

Fig. 9 XRD pattern of carbonated Yellow River sediment

图 10 为碳化后黄河泥沙的 SEM 成像。由图可知,土颗粒表面及颗粒之间存在许多棱柱状的水碳镁石以及片状的球碳镁石和水菱镁石,这些是黄

河泥沙碳化后的主要产物,其形态与既有研究的发现完全一致^[24-26]。碳化产物之间相互交叉生长,具有较强的胶结能力,能够将松散的土颗粒胶结在一起,形成致密结构。胶结在一起的土颗粒在电子显微镜下表现为块状土,如图 8(b)所示,胶结物的形成使黄河泥沙变得密实,是黄河泥沙持水性能改善的主要原因。

表 4 XRD 物象检测汇总

Tab. 4 Summary of phases indentified by XRD

名称	化学式	符号
石英	SiO_2	Q
方镁石	MgO	M
氢氧化镁	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	B
水碳镁石	$\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	N
球碳镁石	$\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	D
水菱镁石	$\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	H

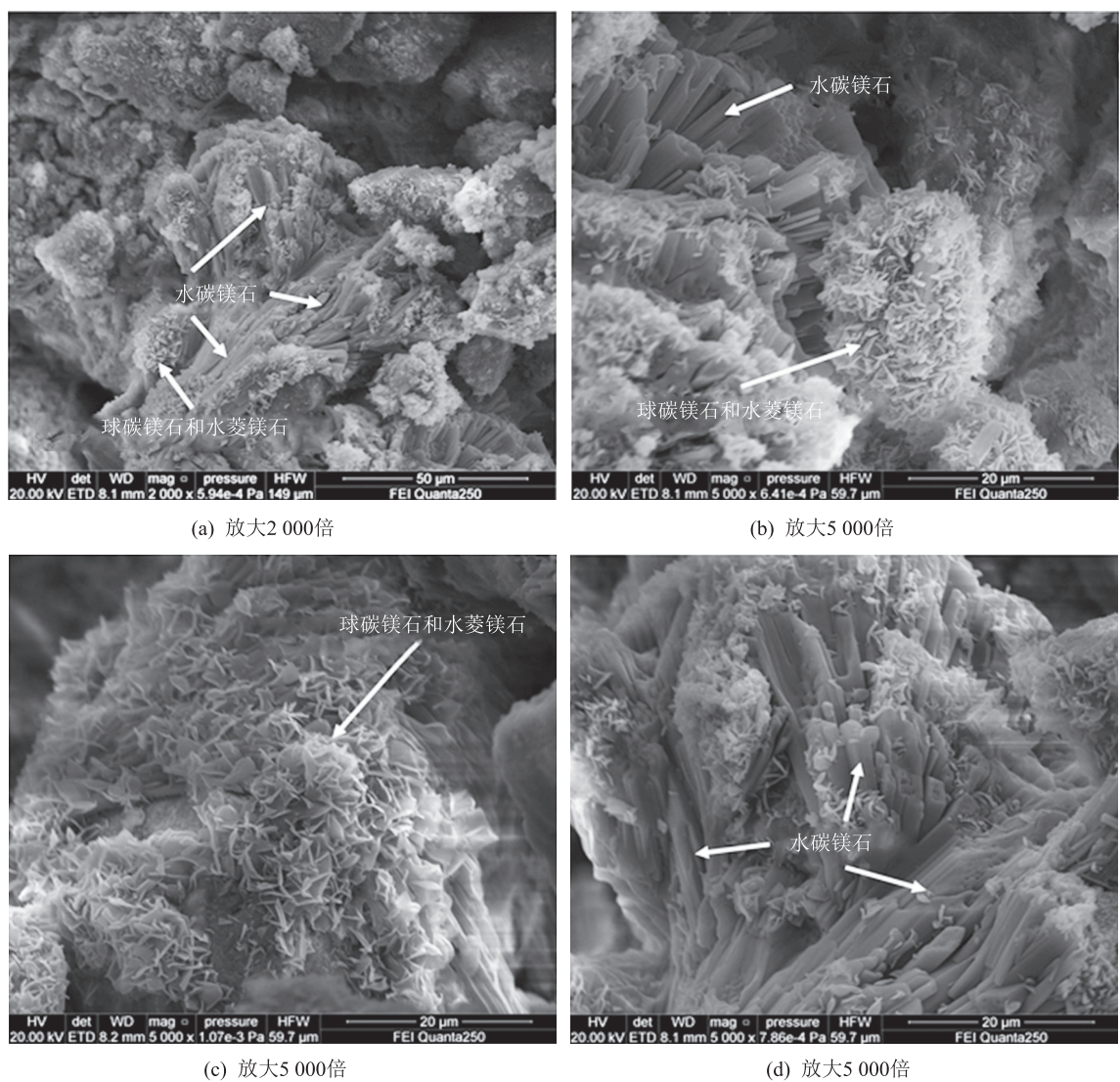


图 10 碳化后黄河泥沙扫描电镜图

Fig. 10 SEM images of carbonated Yellow River sediment

4 结论

通过对碳化后黄河泥沙的固碳能力和持水性能的研究,得出以下结论:

- 1)引入固化剂后,未经碳化即可小幅改善黄河泥沙的孔隙结构和持水性能,经过碳化后孔隙结构和持水性能会得到更显著的改善。
- 2)黄河泥沙的固碳能力与碳化因素(固化剂掺量、碳化时间等)呈正相关,存在一个最优初始含水率,使得黄河泥沙的固碳能力达到最佳。
- 3)黄河泥沙的持水性能与固碳能力呈正相关,但其持水性能的提升幅度随固化剂掺量和碳化时间的增加而降低。
- 4)初始含水率较低时,固碳过程促进了黄河泥沙持水性能的提升,而较高的初始含水率则显著降低了黄河泥沙固碳后的持水性能。
- 5)相互交叉生长的镁碳酸盐将松散的土颗粒

胶结成块,使黄河泥沙变得更加密实,进而提升了黄河泥沙的持水性能。

6)经过碳化后的黄河泥沙的固碳能力在得到提升的同时,其持水性能也得到了提升。碳化方法在提升黄河泥沙的固碳能力与持水性能方面取得了初步成效,为后续黄河泥沙的资源化利用提供了一定的技术和理论参考依据。

未来将进一步研究不同含水率对黄河泥沙固碳效果及持水性能的影响,并探究固碳效果与持水性能在含水率、长周期碳化时间、固化剂掺量等因子交互作用下的变化规律。

参 考 文 献

[1] 汪安南. 深入推进黄河流域生态保护和高质量发展战略努力谱写水利高质量发展的黄河篇章[J]. 人民黄河, 2021, 43(9): 1-8. [Wang Annan. Promoting national strategy

- of ecological protection and high-quality development of the Yellow River basin, endeavor to compose new Yellow River chapter of China's high-quality water resources development [J]. Yellow River, 2021, 43(9): 1-8.]
- [2] Zhang Jinliang, Shang Yizi, Liu Jinyong, et al. Optimisation of reservoir operation mode to improve sediment transport capacity of silt-laden rivers [J]. Journal of Hydrology, 2021, 594: 125951.
- [3] 江恩慧, 屈博, 王远见, 等. 基于流域系统科学的黄河下游河道系统治理研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(4): 7-15. [Jiang Enhui, Qu Bo, Wang Yuanjian, et al. Research on synergistic regulation of the lower Yellow River based on watershed system science[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, 42(4): 7-15.]
- [4] 邢译丹, 花玉凤, 唐磊, 等. 基于土地利用变化的黄河流域河南段景观生态风险评估[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2025, 46(4): 10-18. [Xing Yidan, Hua Yufeng, Tang Lei, et al. Landscape ecological risk assessment of Henan section of the Yellow River Basin based on land use change[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2025, 46(4): 10-18.]
- [5] 刘慧, 柴泉雄, 李长明, 等. 黄河泥沙物化特性与改性利用研究进展[J]. 人民黄河, 2023, 45(5): 41-45, 50. [Liu Hui, Chai Xiaoxiong, Li Changming, et al. Research progress of physical-chemical characteristics and modification utilization of sediment in Yellow River[J]. Yellow River, 2023, 45(5): 41-45, 50.]
- [6] 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.]
- [7] 胡振琪, 多玲花, 王晓彤. 采煤沉陷地夹层式充填复垦原理与方法[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 198-206. [Hu Zhenqi, Duo Linghua, Wang Xiaotong. Principle and method of reclaiming subsidence land with inter-layers of filling materials[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 198-206.]
- [8] Mao Weibing, Kang Shaozhong, Wan Yongshan, et al. Yellow River sediment as a soil amendment for amelioration of saline land in the Yellow River Delta[J]. Land Degradation & Development, 2016, 27(6): 1595-1602.
- [9] 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.]
- [10] 张雷, 王晓雪, 叶勇, 等. 水泥土抗渗性能室内试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊2): 1192-1196. [Zhang Lei, Wang Xiaoxue, Ye Yong, et al. Study on anti-permeability performance of soil-cement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(S2): 1192-1196.]
- [11] 张俊然, 赵鑫鑫, 姜彤. 3种生物聚合物改良粉土的持水特性研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(8): 2157-2164. [Zhang Junran, Zhao Xinxin, Jiang Tong. Water retention characteristics of silt improved by three types of biopolymer [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(8): 2157-2164.]
- [12] 王亮, 刘松玉, 蔡光华, 等. 活性 MgO 碳化固化土的渗透特性研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(5): 953-959. [Wang Liang, Liu Songyu, Cai Guanghua, et al. Permeability properties of carbonated reactive MgO-stabilized soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(5): 953-959.]
- [13] 孔祥辉, 梁允鹏, 崔帅, 等. 活性 MgO 碳化固化疏浚底泥的影响因素及作用机理[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(7): 620-628. [Kong Xianghui, Liang Yunpeng, Cui Shuai, et al. Influencing factors and mechanism of dredged sediment carbonated and solidified with reactive MgO [J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(7): 620-628.]
- [14] 张鹤年, 陈亮, 李雄威, 等. 活性 MgO 碳化生土砌块材料配比与机理研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊2): 233-236. [Zhang Henian, Chen Liang, Li Xiongwei, et al. Ratio and mechanism of activated magnesium oxide carbonized raw earth block materials [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S2): 233-236.]
- [15] 钟煜清, 蔡光华, 王俊阁, 等. GGBS-活性 MgO 碳化/稳定化锌污染土的强度及电导率特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊2): 221-224. [Zhong Yuqing, Cai Guanghua, Wang Junge, et al. Strength and electrical conductivity characteristics of zinc contaminated soil carbonated/stabilized with GGBS-reactive MgO [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S2): 221-224.]
- [16] Li Wentao, Chen Yin, Li Runxiang, et al. A new method for carbonating magnesite and its possible application to soil stabilization and CO₂ capture [J]. Construction and Building Materials, 2023, 383: 131263.
- [17] Yang Yang, Ruan Shaoqin, Wu Shifan, et al. Biocarbonation of reactive magnesite for soil improvement [J]. Acta Geotechnica, 2021, 16: 1113-1125.
- [18] Onyekwena C C, Li Qi, Wang Yong, et al. Impacts of bio-char and slag on carbon sequestration potential and sustainability assessment of MgO-stabilized marine soils: insights from MIP analysis [J]. Environmental Science: Advances, 2024, 3(11): 1564-1577.
- [19] 郑旭, 刘松玉, 蔡光华, 等. 活性 MgO 碳化固化土的冻融循环特性试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2015, 45(3): 595-600. [Zheng Xu, Liu Songyu, Cai Guanghua, et al. Experimental study on freeze-thaw properties of carbonated reactive MgO-stabilized soils [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2015, 45

- (3):595–600.]
- [20] 刘松玉,郑旭,蔡光华,等. 活性 MgO 碳化固化土的抗硫酸盐侵蚀性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(11): 3057–3064. [Liu Songyu, Zheng Xu, Cai Guanghua, et al. Study of resistance to sulfate attack of carbonated reactive MgO-stabilized soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(11): 3057–3064.]
- [21] 王东星,肖杰,肖衡林,等. 武汉东湖淤泥碳化-固化试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(5): 1805–1812. [Wang Dongxing, Xiao Jie, Xiao Henglin, et al. Experimental study of carbonated-solidified sludge in East Lake, Wuhan[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(5): 1805–1812.]
- [22] Onyekwena C C, Li Qi, Wang Yong, et al. Dredged marine soil stabilization using magnesia cement augmented with biochar/slag[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2024, 16(3): 1000–1017.
- [23] Wang Dongxing, Zhu Jiaye, He Fujin. Quantification and micro-mechanisms of CO₂ sequestration in magnesia-lime-fly ash/slag solidified soils [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2019, 91: 102827.
- [24] Yi Yaolin, Liska M, Unluer C, et al. Carbonating magnesia for soil stabilization [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(8): 899–905.
- [25] 吴丹,王玉琪,武海虹,等. 三水碳酸镁合成与形貌演变过程研究[J]. 人工晶体学报, 2014, 43(3): 606–613. [Wu Dan, Wang Yuqi, Wu Haihong, et al. Research on preparation and morphology evolution of magnesium carbonate tri-hydrate [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2014, 43(3): 606–613.]
- [26] Cai Guanghua, Liu Songyu, Zheng Xu. Influence of drying-wetting cycles on engineering properties of carbonated silt admixed with reactive MgO [J]. Construction and Building Materials, 2019, 204: 84–93.

Research on Carbon Sequestration Capacity and Water Retention Capacity of Yellow River Sediment

GUO Dehui¹, ZHANG Min¹, FENG Jinhua¹, ZHANG Jianwei¹, HE Zhongying¹, LI Xiaochun²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475004, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: [Objective] This study aims to clarify the carbon sequestration capacity and water retention capacity of the modified Yellow River sediment, thereby providing a theoretical basis and technical reference for subsequent high-value utilization of Yellow River sediment. [Methods] Based on the carbonation method using reactive magnesium oxide, CO₂ absorption amount tests, water retention rate measurements, and microscopic analyses were conducted to examine the effects of curing agent content, carbonation duration, and initial water content on the carbon sequestration capacity, water retention capacity, and microstructure of Yellow River sediment. [Results] (1) The carbon sequestration capacity of Yellow River sediment exhibited positive correlations with factors such as curing agent content and carbonation duration, with an optimal initial water content identified to maximize its carbon sequestration capacity. (2) The water retention capacity of Yellow River sediment showed a positive correlation with the carbon sequestration capacity, but the magnitude of improvement in water retention capacity decreased as curing agent content and carbonation duration increased. (3) At lower initial water content, the carbon sequestration process enhanced the water retention capacity of Yellow River sediment, while higher initial water content significantly reduced the water retention capacity of the carbonated sediment. (4) Prismatic nesquehonite, lamellar dypingite, hydromagnesite, and other magnesium carbonates generated during carbonation of Yellow River sediment functioned as cementitious agents, effectively binding loose soil particles into compact aggregates. This cementation mechanism not only densified the soil matrix but also improved the water retention capacity of the originally loose sediment. [Conclusions] The carbonation method enhances both the carbon sequestration capacity and the water retention capacity of Yellow River sediment, providing technical and theoretical references for its innovative utilization.

Keywords: Yellow River sediment; curing agent content; CO₂ absorption amount; water retention capacity; microstructure
(编辑:韩小燕)