DOI：10.16285/j.rsm.2024.0940 CSTR:32223.14.j.rsm.2024.0940

基于响应面法的生物基质改良膨胀土配比优化研究

欧阳淼[1]，张红日[2,3]，王桂尧[1]，邓人睿[1]，郭 鸥[3]，汪 磊[3,4]，高 游[5]

（1. 长沙理工大学 土木工程学院，湖南 长沙 410114；2. 广西交科集团有限公司，广西 南宁 530007；
3. 上海交通大学 土木工程系，上海 200240；4. 上海工程技术大学 轨道交通学院，上海 201620；
5. 宁波大学 土木与环境工程学院，浙江 宁波 315832）

摘 要：针对膨胀土易开裂且不利于植被生长的问题，提出采用黄原胶-生物炭-椰壳纤维复合（简称生物基质）对膨胀土填方边坡表层土体进行改良。基于响应面法（response surface methodology，简称 RSM）对干湿循环作用下不同配比的生物基质改良膨胀土的裂隙性和强度特性进行分析，探明了各因素及其交互作用对膨胀土裂隙率和抗剪强度的影响规律，并结合扫描电子显微镜（scanning electron microscope，简称 SEM）试验、X 射线衍射（X-ray diffraction，简称 XRD）试验和拉伸试验等揭示了其影响机制。结果表明，各影响因素对膨胀土裂隙率和抗剪强度均有显著影响，而各因素间的交互作用主要以黄原胶和椰壳纤维为主，其他两两因素无明显交互作用；黄原胶水化后具有较高的黏度和胶凝性能，可以有效增强土颗粒-纤维之间的界面作用力，并与椰壳纤维黏合交织，形成稳定的三维结构网，整体提升土体的抗拉强度。采用多目标满意度函数优化后，生物基质改良膨胀土的最优配比如下：黄原胶掺量为 0.60%，生物炭掺量为 3.60%，椰壳纤维掺量为 0.24%。与素膨胀土相比，其裂隙率降低了 71.04%，抗剪强度提高了 93.73%，植被覆盖率提高了 223.77%。研究结果可为生物基质在膨胀土边坡生态防护中的应用提供理论基础。

关 键 词：膨胀土；生物基质；响应面法；裂隙率；抗剪强度；满意度
中图分类号：TU 411 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2025) 05－1368－11

Optimization of the ratio of expansive soil improved by biological matrix based on response surface method

OUYANG Miao[1], ZHANG Hong-ri[2,3], WANG Gui-yao[1], DENG Ren-rui[1],
GUO Ou[3], WANG Lei[3,4], GAO You[5]

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. Guangxi Transportation Science and Technology Group Co., Ltd., Nanning, Guanxi 530007, China; 3. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 4. School of Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 5. School of Civil and Environmental Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315832, China)

Abstract: This study proposes using a xanthan gum-biochar-coconut fiber composite, termed bio-matrix, to amend the topsoil of expansive soil fill slopes, addressing issues of cracking and poor vegetation growth. The response surface methodology (RSM) was employed to analyze the cracking and strength characteristics of expansive soil amended with bio-matrix at different ratios during dry-wet cycles. The analysis revealed the effects of individual factors and their interactions on the crack ratio and shear strength of expansive soil. Underlying mechanisms were further investigated using scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD), and tensile tests. Results indicated that all factors significantly influenced the crack ratio and shear strength of expansive soil. The primary interactions were observed between xanthan gum and coconut fiber, with negligible interaction among other factor pairs. The high viscosity and colloidal properties of hydrated xanthan gum enhanced the interfacial bonding between soil particles and fibers, intertwining with coconut fiber to form a stable three-dimensional network, thus improving soil tensile strength. Multi-objective satisfaction function optimization identified the optimal bio-matrix ratio: 0.60% xanthan gum, 3.60% biochar, and

收稿日期：2024-07-28 录用日期：2024-10-22
基金项目：国家自然科学基金重点项目（No. 42330701）；国家自然科学基金项目（No. 42477143）；广西重点研发计划项目（No. AB23075184）；湖南省研究生科研创新项目（No. QL20220195）；交通运输行业重点科技项目（No. 2022-MS5-125）。
This work was supported by the Key Project of the National Natural Science Foundation of China (42330701), the National Natural Science Foundation of China (42477143), Guangxi Key Research and Development Program Project (AB23075184), the Hunan Provincial Graduate Student Research Innovation Project (QL20220195) and the Key Scientific & Technological Project of the Transportation Industry (2022-MS5-125).
第一作者简介：欧阳淼，男，1996 年生，博士研究生，主要从事边坡生态防护等方面的研究工作。E-mail: 21002020031@stu.csust.edu.cn
通讯作者：张红日，男，1983 年生，博士（后），研究员，主要从事特殊土处治方面的研究工作。E-mail: sjtu8057258@sjtu.edu.cn

0.24% coconut fiber. Compared to unmodified expansive soil, the optimized bio-matrix reduced the crack ratio by 71.04%, increased shear strength by 93.73%, and enhanced vegetation coverage by 223.77%. These findings enhanced a theoretical foundation for the application of bio-matrix in ecological protection of expansive soil slopes.

Keywords: expansive soil; biological matrix; response surface method; crack rate; shear strength; satisfaction

1　引　言

膨胀土是一种特殊的黏性土，具有吸水膨胀和失水收缩的特性，在干湿循环作用下极易产生大量裂隙[1]。这些裂隙不仅降低了膨胀土的抗剪强度，也为雨水入渗提供优势通道，是膨胀土边坡发生浅层失稳和垮塌的主要原因[2-3]。目前，抑制膨胀土裂隙发育及其强度劣化的方法主要包括：换填法，柔性加筋法，石灰、水泥以及离子固化剂改良等[4-5]，但这些方法的工期较长且工程费用较高，或易对环境造成污染，不符合生态环保的理念。因此，更加经济环保的植被生态护坡技术日益得到了学术界的重视。植被生态护坡技术，通过植被茎叶的水文效应和根系的力学效应，可以有效地减小季节性干湿循环的影响，提高土体的抗剪强度，降低边坡浅层失稳的概率[6]。然而，在膨胀土边坡中种植植被后发现，膨胀土十分贫瘠，植被生长初期的茎叶稀疏，根系短浅，且较长时间内难以形成有效的加筋作用，对边坡的防护效果较差[7]。因此，寻求一种既可抑制膨胀土裂隙扩展，又利于植物生长，能弥补上述不足的膨胀土边坡植被生态防护材料十分必要。

近些年来，植物纤维凭借强度高、易于施工和生态环保等优点，在岩土材料领域获得广泛关注。Tiwari[8]、郝建斌[9]等利用植物秆纤维对膨胀土进行改良发现，纤维的掺入能够明显提高土体的抗剪强度和抗裂性能。Tang 等[10-11]通过开展纤维加筋土的龟裂试验发现，纤维通过加筋作用可以显著提高土体的抗拉强度，对膨胀土的裂隙发育有较好抑制效果，但经历多次干湿循环后，土颗粒−纤维之间的界面黏结强度和摩擦力开始减弱，纤维加筋土的裂隙率逐渐增大。可见，土颗粒−纤维之间的界面作用力是抑制裂隙发育的关键因素。生物聚合物是由植物或微生物发酵产生的天然大分子化合物，水化后具有较高的黏度和胶凝性能。贾卓龙等[12-13]对瓜尔胶固化纤维黄土开展三轴试验发现，瓜尔胶水化后能够显著增强土粒−纤维之间的界面作用力，使土体的黏聚力增大 230.6%。贾卓龙等[14]研究表明，瓜尔胶的掺入有效提升了纤维加筋土的抗侵蚀特性和水土保持能力。由此可见，生物聚合物可与植物纤维协同作用，增强土体的强度和整体性，降低干湿循环作用的影响，进而抑制裂隙的扩展。此外，生物炭是由农林废弃物热解而成的多孔材料，含有植被生长所需的营养元素，且具有良好的保水性能。Van[15]、Pren[16]等研究表明，生物炭的掺入可以持续改善土壤肥力，促进土壤微生物活性，为植被提供良好的生长环境。因此，若能将黄原胶、植物纤维和生物炭进行合理搭配，则有望在抑制膨胀土裂隙发育、强度衰减的同时，促进植物生长，实现膨胀土边坡的生态防护。

鉴于此，本文基于响应面法，对干湿循环作用下不同配比的黄原胶−生物炭−椰壳纤维复合（生物基质）改良膨胀土的裂隙性和强度特性进行分析，探明各种因素及其交互作用对膨胀土裂隙率和抗剪强度的影响规律，并结合扫描电子显微镜（scanning electron microscope，简称 SEM）试验、X 射线衍射（X-ray diffraction，简称 XRD）试验和拉伸试验，揭示其影响机制，提出生物基质改良膨胀土的最佳配比，以期为生物基质在膨胀土边坡生态防护中的应用提供理论基础。

2　试验材料与方法

2.1　试验材料

试验所用膨胀土，取自广西上思至峒中高速公路。膨胀土的颗粒级配，如图 1 所示。该膨胀土的基本物理性质指标，如表 1 所示。

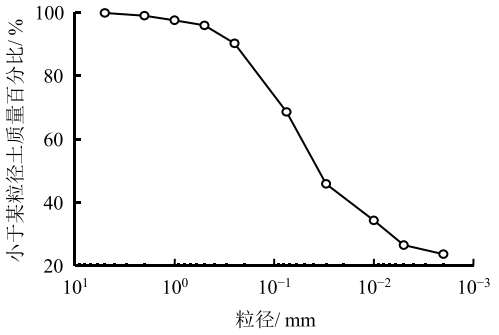


图 1　膨胀土的颗粒级配曲线

Fig.1　Grain grading curve of expansive soil

表 1　膨胀土基本物理性质指标

Table 1　Basic physical property indices of expansive soil

土样名称	自由膨胀率/ %	塑限/ %	液限/ %	塑性指数	最大干密度/ (g・cm^{-3})	最优含水率/ %
膨胀土	62.4	22.4	51.5	29.1	1.6	24.6

试验所用黄原胶（CAS: 11138-66-2）为淡黄色粉末，是由黄单胞杆菌以碳水化合物为主要原料经发酵后产生的微生物胞外多糖，其化学结构式如图 2 所示。从图 2 中可以发现，黄原胶主要由 D-葡萄糖、D-甘露糖和 D-葡萄糖醛酸等所组成。其中，含有大量的羟基基团（−OH）、甲醇基团（$-CH_2OH$）和羧基基团（−COOH）。黄原胶溶于水中形成黏稠状乳液，具有低浓度高黏度的特性，并在干燥失水后形成具有弹性的高分子薄膜，如图 3 所示。

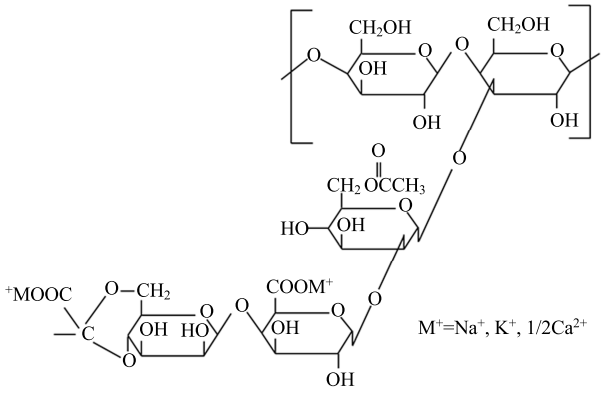
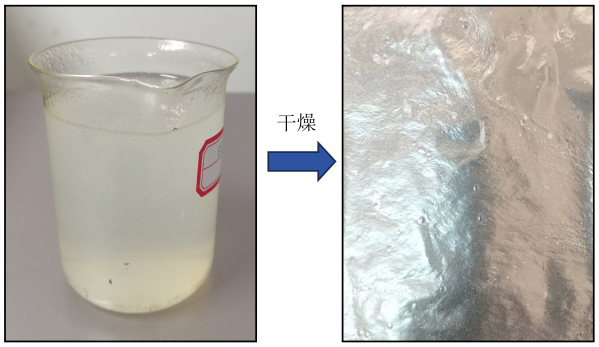


图 2 黄原胶的化学结构式

Fig.2 Chemical structure formula of xanthan gum



(a) 黄原胶溶液 (b) 高分子薄膜

图 3 黄原胶溶液及其高分子薄膜

Fig.3 Xanthan gum solution and its polymer film

试验所用的生物炭，是由稻壳在 600 ℃缺氧条件下热解 5 h 而得到的，其中包含碳、氧、氮、钙和镁等多种元素，但碳元素的占比最高。生物炭颗粒，如图 4 所示。生物炭的基本物理化学性质，如表 2 所示。试验所用椰壳纤维，取自于成熟椰子的外壳，主要由木质素、纤维素、半纤维素及其他水溶性物质组成。椰壳纤维如图 5 所示。椰壳纤维的物理力学参数，如表 3 所示。

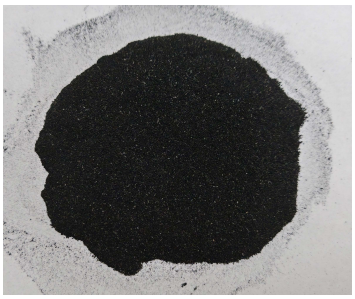


图 4 生物炭颗粒

Fig.4 Biochar particle

表 2 稻壳生物炭的基本物理参数

Table 2 Basic physical parameters of rice husk biochar

生物质	热解温度/ ℃	热解时间/ h	灰分含量/ %	pH 值	比表面积 / ($m^2 \cdot g^{-1}$)	密度 / ($g \cdot cm^{-3}$)
稻壳	600.0	5.0	31.3	10.3	51.5	0.5



图 5 椰壳纤维

Fig.5 Coir fiber

表 3 椰壳纤维的基本物理力学参数

Table 3 Basic physical and mechanical parameters of coir fiber

纤维种类	直径 / mm	密度 / ($g \cdot cm^{-3}$)	长度 / mm	弹性模量 / GPa	抗拉强度 / MPa
椰壳纤维	0.1	1.2	30.0	4.5	248.2

2.2 BBD 试验设计

效应面设计（box-Behnken design，简称 BBD）是一种基于响应面理论的试验方法，被广泛应用于多因素影响研究。在试验研究中，黄原胶掺量、生物炭掺量和椰壳纤维掺量（质量分数%）为影响因素，分别用 X_1、X_2 和 X_3 表示。膨胀土的裂隙率和抗剪强度为响应值，分别用 Y_1 和 Y_2 表示。根据本课题组前期的试验结果，初步确定黄原胶的掺量为 0.2%～0.6%，生物炭的掺量为 3.0%～9.0%，椰壳纤维的掺量为 0.1%～0.5%。每个因素取 3 个水平，分别采用编码值 0、−1 和 1 表示。试验因素及水平，如表 4 所示。

表 4　试验因素及水平

Table 4　Test factors and levels

因素	不同水平的试验因素掺量		
	−1	0	1
X_1	0.2	0.4	0.6
X_2	3.0	6.0	9.0
X_3	0.1	0.3	0.5

2.3　干湿循环试验

试样尺寸越小，裂隙越不易出现，干湿循环试验的误差越大[17]。因此，选用较大尺寸（35 cm×25 cm×4 cm）的亚克力容器，进行试样的干湿循环试验。采用干混法，制备生物基质改良膨胀土试样，首先将预计质量的黄原胶、椰壳纤维和生物炭与过 2 mm 筛的干膨胀土均匀混合，再加入一定质量的去离子水，充分搅拌后密封并静置 48 h。静置期间每 12 h 翻动 1 次。采用静压法将土样压入亚克力容器，土样的压实度为 90%，含水率为 24.6%，厚度为 2 cm。干湿循环过程分为增湿和脱湿 2 个步骤。在增湿过程中，将试样表面均匀洒水，使其含水率达到 36%，接近饱和。在脱湿过程中，将试样放入恒温（温度为 40 ℃）烘箱蒸发干燥 24 h。重复上述的增湿和脱湿过程，实施 8 次干湿循环。8 次干湿循环结束后，使用数码相机对试样表面进行定点拍照。拍照时用 LED 灯补光，同时遮蔽其他光源。

利用颗粒与裂隙图像识别与分析软件 PCAS（particles and cracks analysis system），依次对原始图像进行灰度化、二值化、去噪、骨架化和统计等步骤，获取裂隙的形态指标裂隙率[18]。裂隙图像的处理流程，如图 6 所示。裂隙率为试样表面的裂隙面积与总面积的比值，反映了试样裂隙的整体发育程度。

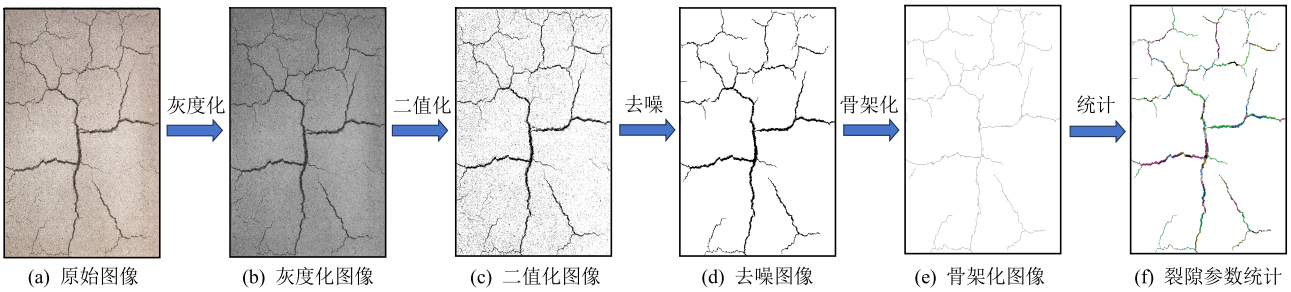


图 6　裂隙图像的处理流程

Fig.6　Processing flow for crack images

2.4　直剪试验

经过 8 次干湿循环后，首先对 17 组试样进行喷水饱和。然后利用直剪环刀分别在每组试样上定点取样（共取 5 个）。直剪试样的取样位置，如图 7 所示。

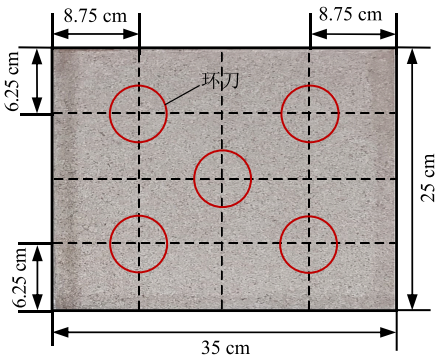


图 7　直剪试样的取样位置

Fig.7　Sampling position for direct shear sample

取样后采用 DJ-1 型电动等应变直剪仪，对试样进行快剪试验。膨胀土边坡的失稳多为浅层破坏，滑塌面的上覆压力一般不超过 50 kPa[19-20]。因此，设定试验中的剪切速率恒定为 0.8 mm/min，施加的上覆荷载为 50 kPa。以 5 个直剪试样的平均抗剪强度，等效为每组干湿循环试样的整体抗剪强度。

3　试验结果与分析

3.1　模型的建立及方差分析

经历 8 次干湿循环后，17 组试样的试验结果，如表 5 所示。利用 Design-Expert 软件对表 5 中的试验结果进行多元回归分析，建立了裂隙率和抗剪强度响应面模型为

$$Y_1 = 7.38 - 2.77X_1 - 0.60X_2 - 5.61X_3 + 0.13X_1X_2 + 5.56X_1X_3 + 0.17X_2X_3 - 5.15X_1^2 + 0.05X_2^2 + 7.47X_3^2 \quad (1)$$

表 5 干湿循环试验及直剪试验结果

Table 5 Dry-wet cycle test and direct shear test results

试验号	水平			裂隙率	抗剪强度
	X_1	X_2	X_3	/ %	/ kPa
1	−1	−1	0	4.82	27.51
2	1	−1	0	3.02	32.35
3	−1	1	0	5.06	22.71
4	1	1	0	3.58	27.47
5	−1	0	−1	4.76	22.47
6	1	0	−1	2.41	29.04
7	−1	0	1	5.11	20.75
8	1	0	1	3.65	24.61
9	0	−1	−1	3.94	27.01
10	0	1	−1	4.39	21.89
11	0	−1	1	4.65	24.85
12	0	1	1	5.52	18.68
13	0	0	0	3.96	26.76
14	0	0	0	3.76	27.12
15	0	0	0	3.82	25.87
16	0	0	0	4.07	26.49
17	0	0	0	3.84	27.43

$$Y_2 = 21.55 + 1.06X_1 - 0.51X_2 + 54.09X_3 - 0.03X_1X_2 - 16.94X_1X_3 - 0.44X_2X_3 + 23.57X_1^2 - 0.02X_2^2 - 86.49X_3^2 \quad (2)$$

对上述回归模型进行方差分析，得到的分析结果，如表 6 所示。

表 6 回归模型的方差分析结果

Table 6 Analysis of variance for regression model

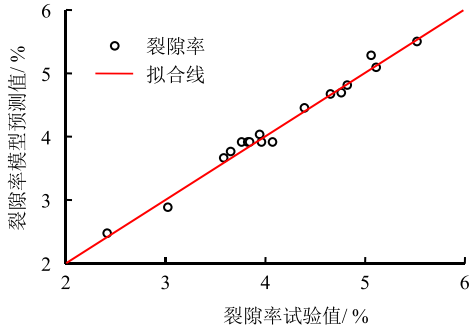
来源	裂隙率			抗剪强度		
	均方	F 值	P 值	均方	F 值	P 值
Y	1.10	55.88	<0.000 1	19.670 0	71.490 0	<0.000 1
X_1	6.28	317.98	<0.000 1	50.150 0	182.240 0	0.000 1
X_2	0.56	28.43	0.001 1	54.970 0	199.750 0	0.007 8
X_3	1.47	74.42	0.000 1	16.590 0	60.280 0	<0.000 1
X_1X_2	0.03	1.30	0.292 5	0.001 6	0.005 8	0.941 4
X_1X_3	0.19	10.02	0.015 8	1.840 0	6.670 0	0.036 3
X_2X_3	0.04	2.23	0.178 8	0.280 0	1.000 0	0.350 3

注：F 为 Fisher 的统计量，P 为概率值。

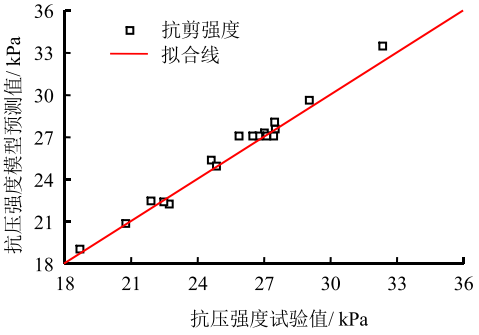
由表 6 中可以发现，Y_1 和 Y_2 模型的 F 值分别为 55.88 和 71.49，P 值均小于 0.000 1，说明模型回归效果显著，具有较高的可靠度。X_1、X_2 和 X_3 的 P 值均 < 0.05，说明各因素对膨胀土裂隙发育和强度衰减均有显著影响。但是，各因素对 Y_1 和 Y_2 影响的显著性并不相同，对于 Y_1 而言，显著性影响的顺序为 $X_2 < X_3 < X_1$，即黄原胶的影响最为显著。对 Y_2 而言，显著性影响的顺序为 $X_2 < X_1 < X_3$，即椰壳纤维的影响最为显著。不同因素的交互作用显著性影响顺序为 $X_1X_2 < X_2X_3 < X_1X_3$，X_1X_3 的 P 值<0.05，X_1X_2 和 X_2X_3 的 P 值>0.05，说明因素间的交互作用主要以黄原胶和椰壳纤维为主。

为进一步验证响应面回归模型的准确性和有效性，将裂隙率、抗剪强度的试验值与模型预测值进行对比，如图 8 所示。

由图 8 可以看出，各散点沿 45° 对角线近似直线分布，说明模型预测值和试验值的吻合程度高，模型拟合效果好，与方差分析结果相互印证。



(a) 裂隙率对比



(b) 抗剪强度对比

图 8 试验值与模型预测值对比

Fig.8 Comparison of tested and model predicted values

3.2 裂隙率和抗剪强度的响应面分析

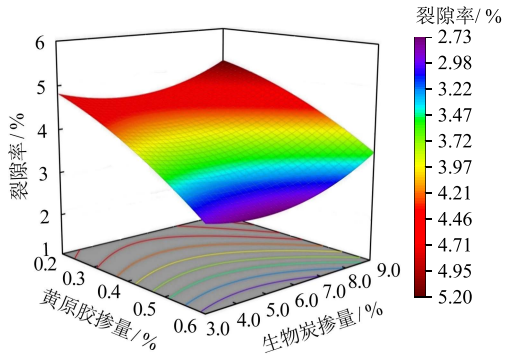
为了更直观地发现黄原胶、生物炭和椰壳纤维掺量，对膨胀土裂隙率和抗剪强度的影响规律，基于上述回归模型得到裂隙率和抗剪强度的响应曲面，分别如图 9 和图 10 所示。

由图 9(a)和图 9(c)中可以发现，当椰壳纤维掺量和生物炭掺量固定时，裂隙率随着黄原胶掺量的增大而减小，直至达到响应曲面的最低点，说明黄原胶是影响膨胀土裂隙发育最显著的因素。该结论与方差分析的结果是一致的。说明黄原胶对土颗粒具有聚集致密作用和胶结作用，能够有效提高土体的抗拉强度。由图 9(b)中可以发现，当黄原胶掺量固定时，裂隙率随着生物炭或椰壳纤维掺量的增大

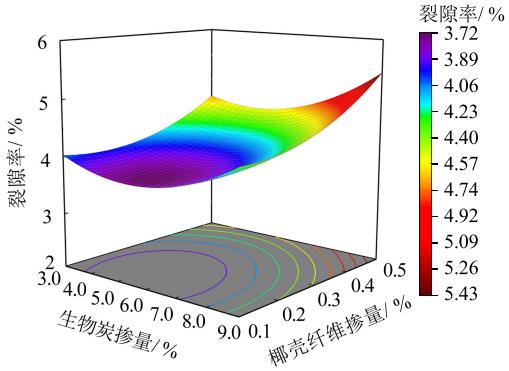
呈先减小后增大的趋势。在生物炭掺量约为 6.0%和椰壳纤维掺量约为 0.3%时，裂隙率达到最小值。说明椰壳纤维和生物炭的掺量存在一个阈值，过大的椰壳纤维掺量或生物炭掺量均会降低其抑制裂隙发育的效果。其原因是当椰壳纤维和生物炭掺量超过阈值后，容易出现自聚集现象，在土体中的分散性变差，从而使得土体的结构被破坏，整体性降低。

从图 10(a)和图 10(b)中可以发现，当黄原胶掺量和椰壳掺量固定时，抗剪强度随着生物炭掺量的增大呈不断减小的趋势。说明生物炭虽然可以抑制土体的裂隙发育，但会在一定程度上降低土体的初始抗剪强度。从图 10(c)中可以发现，当椰壳纤维掺量固定时，抗剪强度随着黄原胶掺量的增大而增大；当黄原胶掺量固定时，抗剪强度随着椰壳纤维掺量的增大呈先增大后减小的趋势，与前期的裂隙率变化趋势相反。说明裂隙率是影响土体强度的重要因素，裂隙率越大，抗剪强度相应越低。这是由于裂隙给土体造成了不可逆的损伤，即使裂隙遇水完全愈合，该位置处的黏聚力仍显著小于其他部位，当受到剪切力作用时，剪力不能均匀地在土体中传递，从而降低了土体抵抗剪切变形的能力。

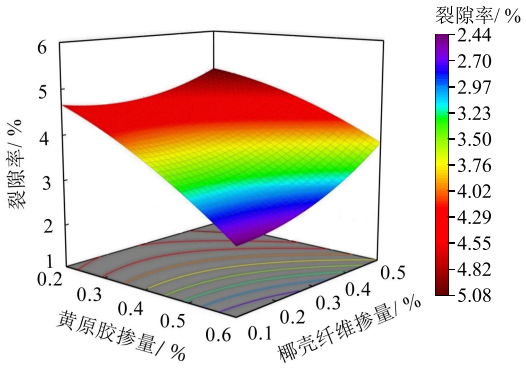
由方差分析和响应面分析可知，各因素间的交互作用，主要以黄原胶和椰壳纤维为主。这主要是由于黄原胶水化后具有较高的黏度和胶凝性能，能够黏附于椰壳纤维与土颗粒之间，提高其接触界面的力学强度，并使得椰壳纤维之间更容易形成三维



(a) 黄原胶与生物炭相互作用



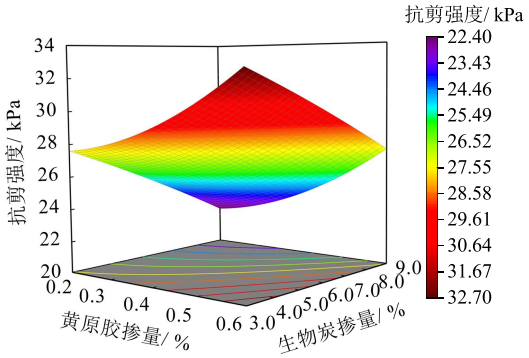
(b) 生物炭与椰壳纤维相互作用



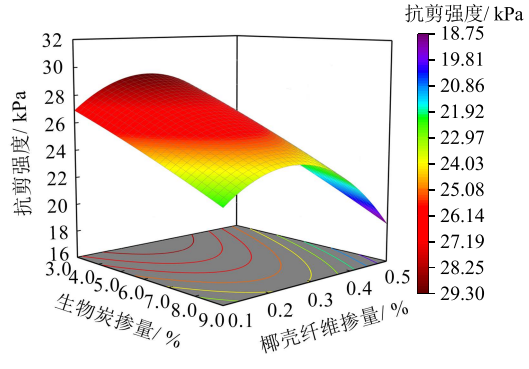
(c) 黄原胶与椰壳纤维相互作用

图 9　裂隙率响应曲面

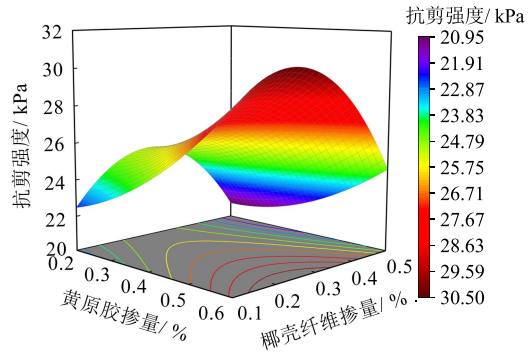
Fig.9　Crack ratio response surfaces



(a) 黄原胶与生物炭相互作用



(b) 生物炭与椰壳纤维相互作用



(c) 黄原胶与椰壳纤维相互作用

图 10　抗剪强度响应曲面

Fig.10　Shear strength response surfaces

网状结构，提升试样的整体强度。

3.3 生物基质改良膨胀土配比优化

采用 Candioti 等[21]提出的满意度多目标优化算法，对生物基质改良膨胀土配比进行优化。首先基于各响应面回归模型建立单满意度函数，即

$$d_i(Y_i)=\begin{cases}0, & Y_i<L_i\\ \dfrac{Y_i-L_i}{H_i-L_i}, & L_i\leqslant Y_i\leqslant H_i\\ 1, & Y_i>H_i\end{cases} \tag{3}$$

$$d_i(Y_i)=\begin{cases}0, & Y_i>H_i\\ \dfrac{Y_i-H_i}{L_i-H_i}, & L_i\leqslant Y_i\leqslant H_i\\ 1, & Y_i<L_i\end{cases} \tag{4}$$

式中：d_i 为第 i 个响应面的满意度函数；Y_i 为第 i 个响应值；L_i 和 H_i 分别为第 i 个响应值的下限值和上限值。式（3）适用于响应值越大，满意度越高的响应量，式（4）适用于响应值越小，满意度越高的响应量。

各响应量的单满意度计算完成后，建立各单满意度函数加权几何平均多目标优化函数，即整体满意度函数：

$$D=\left(\prod_{i=1}^{s}d_i^{e_i}\right)^{\frac{1}{\sum e_i}} \tag{5}$$

式中：D 为整体满意度；s 和 e_i 分别为响应量个数和权值，权值表示该响应量的重要程度。

土体的裂隙率和抗剪强度均是影响边坡浅层稳定性的关键因素，因此假定其两者在膨胀土边坡浅层稳定性评价中具有同等的重要性，即 $e_1=e_2=0.5$。根据式（3）～（5）计算单因素整体满意度，结果如图 11 所示。

由图 11 可以看出，各因素对整体满意度的影响顺序为黄原胶>椰壳纤维>生物炭，黄原胶对整体满意度的影响最显著。因此，固定黄原胶掺量为 0.60%，进行多因素整体满意度分析，结果如图 12 所示。从图 12 可以发现，当生物炭掺量为 3.60%、椰壳纤维掺量为 0.24%时，整体满意度达到最大值 0.78。因此，生物基质改良膨胀土的最优配比为黄原胶掺量为 0.60%、生物炭掺量为 3.60%、椰壳纤维掺量为 0.24%。对最优配比改良的膨胀土试样进行干湿循环试验和饱和快剪试验，得到试样的裂隙率为 2.45%，抗剪强度为 32.74 kPa。与素膨胀土相比，其裂隙率降低 71.04%，抗剪强度提高了 93.73%。

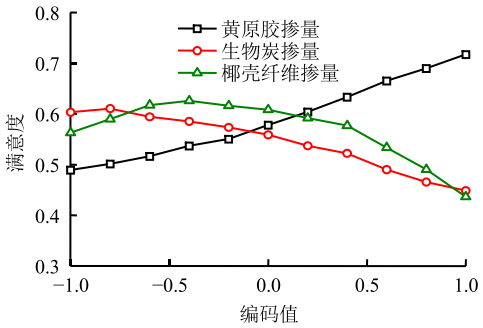


图 11 单因素对整体满意度的影响

Fig.11 Influences of single factor on overall satisfaction

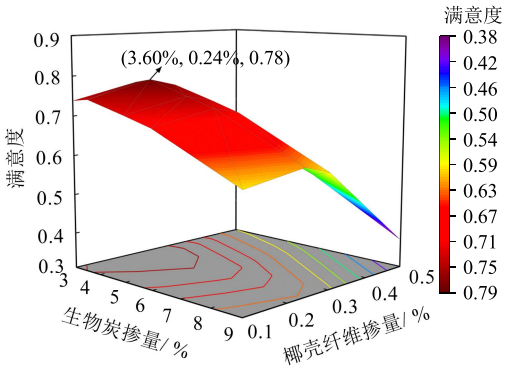


图 12 多因素对整体满意度的影响

Fig.12 Influences of multiple factors on overall satisfaction

4 生物基质改良膨胀的微观机制及其植生特性

4.1 生物基质改良膨胀土机制分析

椰壳纤维改良土体的机制已十分明确，但黄原胶和生物炭对膨胀土的影响机制尚有待于深入探讨。因此，对黄原胶改良膨胀土和生物炭改良膨胀土分别开展 XRD 试验和 SEM 试验。根据 XRD 试验，得到黄原胶改良膨胀土和生物炭改良膨胀土的 X 射线衍射图谱，如图 13 所示。

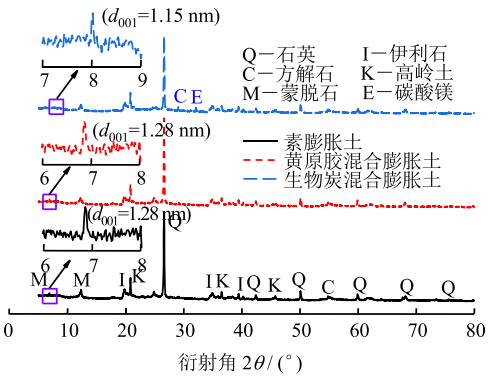


图 13 X 射线衍射图谱

Fig.13 X-ray diffraction patterns

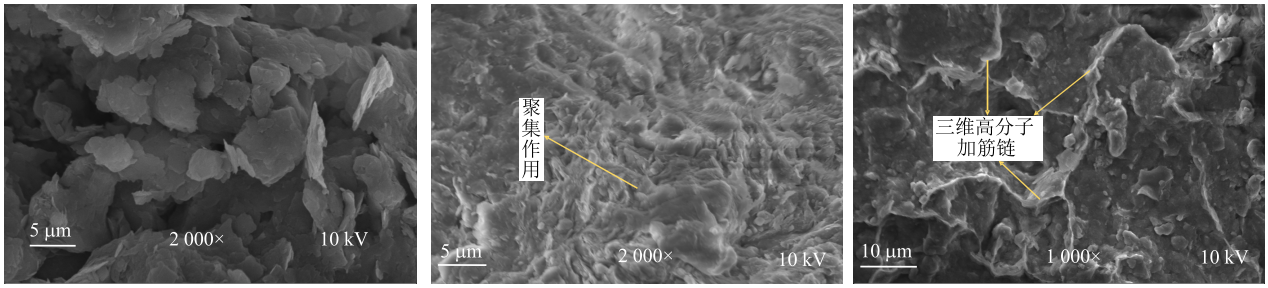
由图 13 中可以发现，黄原胶的掺入并没有产生新的衍射峰，衍射峰强度也无明显变化，说明黄原胶与膨胀土之间未发生矿物合成或分解的化学反应。为进一步探究黄原胶与膨胀土中的蒙脱石是否发生离子交换，利用布拉格方程计算黄原胶掺入前后蒙脱石晶体的层间距 d_{001}。布拉格方程为

$$n\lambda = 2d\sin\theta \tag{6}$$

式中：n 为波长的倍数；λ 为波长（nm）；d 为晶层间距（nm）；θ 为入射角（°）。

根据式（6），计算得到黄原胶掺入前后蒙脱石晶体的层间距 d_{001} 均为 1.28 nm，说明黄原胶与膨胀土之间没有发生离子交换。而当生物炭掺入后，X 射线衍射图谱中增加了新的方解石（碳酸钙）衍射峰和美菱矿（碳酸镁）衍射峰，蒙脱石晶体的层间距 d_{001} 由 1.28 nm 减小为 1.15 nm。该结果说明生物炭中含有一定的钙离子和镁离子等高价阳离子。这些高价阳离子能够置换黏土颗粒表面或蒙脱石晶格层间的低价阳离子，降低了膨胀土的胀缩性。

根据 SEM 试验，得到素膨胀土和黄原胶改良膨胀土的微观结构，如图 14 所示。对比图 14(a)和 14(b)可以发现，素膨胀土表面粗糙，土颗粒间的孔隙较大，而经黄原胶改良后的膨胀土表面较平整，土颗粒间的孔隙较少，说明黄原胶对膨胀土颗粒具有聚集致密的效果。由图 14(c)中还可以发现，黄原胶能够将膨胀土颗粒黏聚在一起，形成三维高分子加筋链，显著增强颗粒间的抗拉强度及整体性。



(a) 素膨胀土　(b) 黄原胶改良膨胀土（聚集致密）　(c) 黄原胶改良膨胀土（网状交联）

图 14　素膨胀土和黄原胶改良膨胀土的微观结构

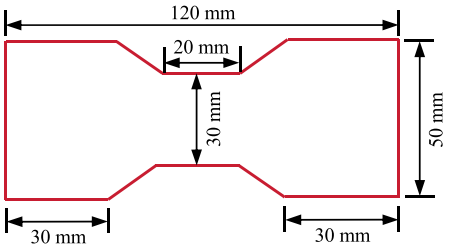
Fig.14　Microstructures of unimproved expansive soil and expansive soil improved by xanthan gum

现有的研究表明[22-23]，当土体内部的张拉应力大于自身的抗拉强度时，开始产生裂隙。因此，土体的抗拉强度是影响裂隙张开和发育的核心因素之一。利用自制水平拉伸装置，对生物基质改良膨胀土开展拉伸试验（当某一个影响因素变化时，其他两个影响因素均固定在 0 水平），试样的形状和尺寸如图 15 所示。单轴拉伸试验装置，由支架、位移控制器、夹具、数显测力机、数显百分表和计算机等组成，如图 16 所示。数字测力计的测量范围为 200 N，精度为 0.1 N，数显百分表的最大位移为 12.7 mm，精度为 0.01 mm。以 0.5 mm/min 的速率张拉试样，得到了在不同配比条件下生物基质改良膨胀土的单轴抗拉强度，如图 17 所示。

由图 17 中可以发现，生物基质改良膨胀土的抗拉强度均在素膨胀土之上。与素膨胀土相比，生物基质改良膨胀土的抗拉强度最高提高了 75.18%。该试验结果说明生物基质的掺入，有效地提高了膨胀土的抗拉强度，增大了膨胀土开裂的临界张拉应力。



(a) 哑铃状试样



(b) 试样的具体尺寸

图 15　试样的形状和尺寸

Fig.15　Shape and size of test specimens

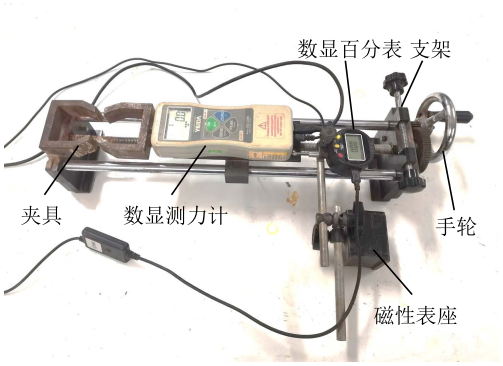


图 16 单轴拉伸试验装置
Fig.16 Uniaxial tensile test device

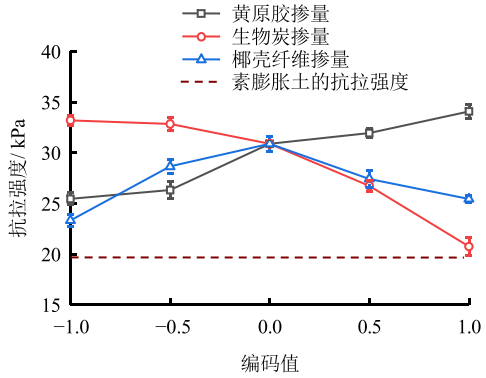
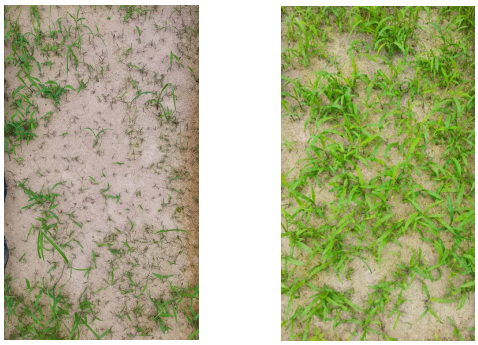


图 17 改良膨胀土的单轴抗拉强度
Fig.17 Uniaxial tensile strength of improved expansive soil

随着黄原胶掺量的增加，膨胀土的抗拉强度呈增长趋势。这是由于黄原胶一方面可以增强椰壳纤维与土体间的界面黏结力，另一方面可以填充土颗粒间的孔隙，将土颗粒链接为一个整体，提升土体的黏结程度及结构稳定性。随着椰壳纤维掺量的增加，膨胀土的抗拉强度呈先增大后减小的变化趋势。这是因为当椰壳纤维掺量较小时，纤维可以均匀地分布在土体各个部位，形成有效加筋。但是，当椰壳纤维掺量过大时，椰壳纤维分散性降低，部分纤维簇成一团，椰壳纤维与土体间的界面黏结力反而减弱，对抗拉强度产生了不利的影响。

4.2 生物基质改良膨胀土的植生特性

膨胀土填方边坡浅层改良材料不仅需具有抑制土体裂隙发育和强度衰减的性能，还需具备促进护坡植被生长的作用。因此，对素膨胀土和最优生物基质配比的改良膨胀土开展了植被生长试验。以90%的压实度分层填筑试验边坡，边坡的坡比为1:1.75，坡面尺寸为 80 cm×140 cm。填筑完成后，在边坡表层土体中均匀撒入白喜草种子，草种密度（单位面积上草种的质量）为 25 g/m^2。每天定时定量浇水，养护 45 d 后观察植被生长情况。膨胀土边坡的植被生长情况，如图 18 所示。



(a) 素膨胀土 (b) 改良膨胀土

图 18 素膨胀土和改良膨胀土的植被生长情况
Fig.18 Vegetation growth of expansive soil and improved expansive soil

利用基于 MATLAB 软件自主编写的植被茎叶识别与定量分析程序对原始彩色图像进行处理，获取茎叶数量、茎叶面积和植被覆盖率等相关参数。图像处理流程，如图 19 所示。

图像处理的主要步骤为：①增强识别，拉伸图像中的像素值范围，使得图像的动态范围更广，从而提升图像的视觉质量和细节可见度。②茎叶提取，将 RGB（red 红，green 绿，blue 蓝）颜色图像转换为 Lab 模式色彩空间（CIELAB）后，通过 K-means 算法对图像像素点进行分类，提取图片中的茎叶部分，将其转化为绿色，其他区域转化为白色。③降噪除杂，利用中值滤波和双边滤波去除图片中的绿色小点。④统计图像的总像素点数量和茎叶的像素点数量，计算植被覆盖率。根据植物学原理，植被覆盖率为

$$\zeta = \frac{k_a}{k_a + k_b} \tag{7}$$

式中：ζ 为植被率；k_a 为绿色像素点面积；k_b 为白色像素点面积。

通过 MATLAB 程序计算可得，素膨胀土边坡的植被覆盖率为 13.63%，改良膨胀土边坡的植被覆盖率为 44.13%。可见，膨胀土被生物基质改良后，边坡的植被覆盖率提高了 223.77%。结合前期的干湿循环试验结果和直剪试验结果可以发现，生物基质既可抑制膨胀土的裂隙发育、强度衰减，又可促进护坡植被生长，是一种良好的膨胀土边坡生态防护材料。

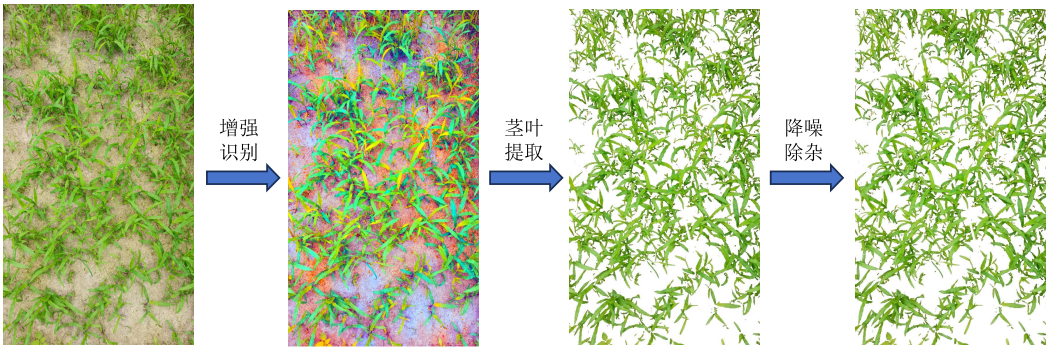


图 19　图像处理流程

Fig.19　Image processing flow

5　结　论

（1）3 种影响因素对膨胀土的裂隙率和抗剪强度均有显著影响，对膨胀土裂隙率的影响显著性顺序依次为黄原胶、椰壳纤维、生物炭，对抗剪强度的影响显著性顺序依次为椰壳纤维、黄原胶、生物炭。3 种影响因素间的交互作用，主要以黄原胶和椰壳纤维为主，其他两两因素无明显交互作用。

（2）根据 17 组生物基质配比试验结果，分别建立了裂隙率和抗剪强度响应面模型。将膨胀土裂隙率和抗剪强度的试验结果与模型预测结果进行对比，相对误差均小于 8%，验证了响应面回归模型的准确性和可靠性。

（3）采用多目标满意度函数优化后，整体满意度最高的 3 种生物基质配比：黄原胶掺量为 0.60%，生物炭掺量为 3.60%，椰壳纤维掺量为 0.24%。与素膨胀土相比，此配比改良后的膨胀土裂隙率降低了 71.04%，抗剪强度提高了 93.73%，植被覆盖率提高了 223.77%。

（4）生物基质抑制膨胀土裂隙发育的主要原因是，一方面黄原胶与椰壳纤维黏合交织，形成稳定的三维结构网，显著增强了膨胀土的抗拉强度和整体性；另一方面生物炭中的高价阳离子置换黏土颗粒表面或蒙脱石晶格层间的低价阳离子，降低了膨胀土的胀缩性。

参 考 文 献

[1] ZHANG H, YANG J, WANG L, et al. Model test on the dynamic characteristics of crack formation in expansive soil slopes under alternate drying and wetting[J]. **Acta Geotechnica**, 2023, 18(4): 2097-2115.

[2] ZHANG H R, YANG J, WANG L, et al. Experimental and numerical investigation on failure mechanism of expansive soil subgrade slope[J]. **Scientific Reports**, 2023, 13(1): 19795.

[3] 陈正汉, 郭楠. 非饱和土与特殊土力学及工程应用研究的新进展[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 1-54.
CHEN Zheng-han, GUO Nan. New progress in mechanics and engineering applications of unsaturated soils and special soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(1): 1-54.

[4] 刘清秉, 项伟, 崔德山, 等. 离子土固化剂改良膨胀土的机制研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 648-654.
LIU Qing-bing, XIANG Wei, CUI De-shan, et al. Study on mechanism of modified expansive soil by ionic soil curing agent[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(4): 648-654.

[5] 黎宇, 胡明鉴, 郑思维, 等. 电石渣−矿渣固化膨胀土强度及微观机制研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(增刊 1): 461-470.
LI Yu, HU Ming-jian, ZHENG Si-wei, et al. Study on strength and microscopic mechanism of calcium-slag solidified expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(Suppl.1): 461-470.

[6] 吴宏伟. 大气−植被−土体相互作用:理论与机制[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(1): 1-47.
WU Hong-wei. Atmosphere-plant-soil interactions: theories and mechanisms[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(1): 1-47.

[7] 周炳生, 王保田, 张海霞, 等. 基于整体刚体平衡法的膨胀土边坡稳定分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 525-532.
ZHOU Bing-sheng, WANG Bao-tian, ZHANG Hai-xia, et al. Stability analysis of expansive soil slopes based on the overall rigid body equilibrium method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Suppl.2): 525-532.

[8] TIWARI N, SATYAM N, PUPPALA A J. Strength and durability assessment of expansive soil stabilized with recycled ash and natural fibers[J]. **Transportation Geotechnics**, 2021, 29: 100556.

[9] 郝建斌, 李耕春, 刘志云, 等. 干湿循环作用下剑麻纤维加筋膨胀土的抗裂作用及影响因素[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(1): 147-158.
HAO Jian-bin, LI Geng-chun, LIU Zhi-yun, et al. Anti-cracking effect and influencing factors of sisal fiber reinforced expansive soil under dry and wet cycling[J]. **Journal of Hunan University (Natural Science Edition)**, 2019, 51(1): 147-158.

[10] TANG C S, SHI B, GAO W, et al. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2007, 25(3): 194-202.

[11] TANG C S, SHI B, CUI Y J, et al. Desiccation cracking behavior of polypropylene fiber–reinforced clayey soil[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2012, 49(9): 1088-1101.

[12] 贾卓龙, 晏长根, 包含, 等. 生物胶-纤维固化黄土的三轴剪切特性研究[J]. 中国公路学报, 2024, 37(6): 122-131.
JIA Zhuo-long, YAN Chang-gen, BAO Han, et al. Triaxial shear characteristics of biological gum fiber-reinforced loess[J]. **China Journal of Highway and Transportation**, 2024, 37(6): 122-131.

[13] JIA Z L, YAN C G, LI B, et al. Performance test and effect evaluation of guar gum-stabilized loess as a sustainable slope protection material[J]. **Journal of Cleaner Production**, 2023, 408: 137085.

[14] 贾卓龙, 晏长根, 李博, 等. 瓜尔豆胶固化纤维黄土的抗侵蚀特性及生态护坡试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(10): 1881-1889.
JIA Zhuo-long, YAN Chang-gen, LI Bo, et al. Experimental study on erosion resistance and ecological slope protection of guar gum solidified fiber loess[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2022, 44(10): 1881-1889.

[15] VAN Z L, KIMBER S, MORRIS S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. **Plant and Soil**, 2010, 327: 235-246.

[16] PREN M T, DUVALL M, et al. Biochar-root interactions are mediated by biochar nutrient content and impacts on soil nutrient availability[J]. **European Journal of Soil Science**, 2014, 65(1): 173-185.

[17] 罗冲, 殷坤龙, 周春梅, 等. 膨胀土在不同约束状态下的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 635-638.
LUO Chong, YIN Kun-long, ZHOU Chun-mei, et al. Experimental study on expansive soil under different confinement conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(3): 635-638.

[18] 欧阳淼, 张红日, 邓人睿, 等. 黄原胶生物聚合物改良膨胀土裂隙演化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(1): 106-114.
OUYANG Miao, ZHANG Hong-ri, DENG Ren-rui, et al. Study on development of expansive soil improved by xanthan gum biopolymer[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2025, 47(1): 106-114.

[19] 杨和平, 王兴正, 肖杰. 干湿循环效应对南宁外环膨胀土抗剪强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5): 949-954.
YANG He-ping, WANG Xing-zheng, XIAO Jie. Effects of dry and wet cycling on the shear strength of expansive soil in Nanning outer ring[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(5): 949-954.

[20] 张红日, 杨济铭, 徐永福, 等. 基于数字图像相关技术的膨胀土三维裂隙扩展特性研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(增刊 1): 309-323.
ZHANG Hong-ri, YANG Ji-ming, XU Yong-fu, et al. Research on three-dimensional crack expansion characteristics of expansive soil based on digital image correlation technology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(Suppl.1): 309-323.

[21] CANDIOT L V, DE Z M, et al. Experimental design and multiple response optimization using the desirability function in analytical methods development[J]. **Talanta**, 2014, 124: 123-138.

[22] TOLLENAA R N, VAN L A, et al. Observations on the desiccation and cracking of clay layers[J]. **Engineering Geology**, 2017, 230: 23-31.

[23] 周振华, 孔令伟, 李甜果, 等. 原状膨胀土裂隙演变性状的环境效应与表征[J]. 岩土力学, 2025, 46(2):402-412.
ZHOU Zhen-hua, KONG Li-wei, LI Tian-guo, et al. Environmental effects and characterization of crack evolution in undisturbed expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2025, 46(2): 402-412.