文章编号:1007-9629(2024)05-0446-08

高分子活性剂改良盐渍土力学特性及机理研究

车文越1, 刘 瑾1,*, 郝社锋2, 卜 凡1, 任静华2

(1.河海大学地球科学与工程学院,江苏南京 211100; 2.自然资源部国土(耕地)生态监测与修复工程技术创新中心 江苏省地质调查研究院,江苏南京 210018)

摘要:基于三轴剪切试验与可溶盐含量测试,探究高分子活性剂掺量与养护时间对硫酸型盐渍土力 学性能与可溶盐含量的影响,揭示土体微观特性及其改良机理.结果表明:CLI型高分子活性剂的掺 入能有效提升硫酸型盐渍土的力学强度和抗变形能力,其最佳掺量为8%;活性剂与盐渍土发生置 换反应,从而增强盐渍土的保水性能,有效降低盐渍土的可溶盐含量,CLI型高分子活性剂掺量越 大,改良效果越好;养护时间达到7d时,盐渍土的可溶盐含量趋于稳定.

关键词:硫酸型盐渍土;高分子活性剂;力学性能;可溶盐含量;机理分析

中图分类号:TU411 文献标志码:A **doi:**10.3969/j.issn.1007-9629.2024.05.009

Improvement of Mechanical Properties of Saline Soil by Polymer Active Agent and Its Mechanism

CHE Wenyue¹, LIU Jin^{1,*}, HAO Shefeng², BU Fan¹, REN Jinghua²

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. Ministry of Natural Resources Geological Survey of Jiangsu Province, Technology Innovation Center for Ecological Monitoring & Restoration Project on Land(Arable), Nanjing 210018, China)

Abstract: The effects of polymer active agent content and curing time on the mechanical properties and salinity changes of sulfate saline soil were investigated by triaxial shear test and soluble salt content test. The microscopic characteristics and improvement mechanism of CLI polymer active agent surfactant were also investigated. The results show that the addition of CLI polymer active agent can effectively improve the mechanical strength and anti-deformation ability of sulfate saline soil, and its optimal dosage is 8%. The pores are filled by the displacement reactions between CLI polymer active agent and the saline soil, improving the water retention performance. It can also effectively reduce the soluble salt content in the saline soil. The higher the CLI polymer active agent content, the better the improvement. The soluble salt content tends to be stable after 7 days.

Key words: sulfate saline soil; polymer active agent; mechanical property; soluble salt content; mechanism analysis

硫酸型盐渍土可作为路基工程中的主要填筑材料,由于土体中存在大量的可溶盐,其侵蚀作用易造成土体溶陷破坏或结构件损伤^[1-2].并且高含盐量的土体会抑制植被与作物的生长,导致区域生态功能退化^[34].采用传统加固材料如水泥、石灰等对盐渍土

进行改良时,能有效提升其强度^[5-6];但是对于硫酸型 盐渍土,其中的硫酸根离子会与水泥反应生成钙矾 石(AFt·32H₂O),导致土壤体积膨胀,降低其强度与 耐久性.针对这一问题,张佳兴等^[7]研发了一种盐胀 抑制剂,可在提升硫酸型盐渍土强度的同时,增强加

基金项目:自然资源部国土(耕地)生态监测与修复工程技术创新中心开放课题(GTST2021-006)

收稿日期:2023-06-10;修订日期:2023-09-26

第一作者:车文越(1992—),男,江苏镇江人,河海大学博士生. E-mail: chewy920728@163.com

通讯作者:刘 瑾(1983—),女,福建漳州人,河海大学教授,博士生导师,博士. E-mail: jinliu920@163.com

固土的抗膨胀性.另外,研究发现通过利用丙烯酰胺 (AM)原位聚合物、高分子SH固土剂与生石灰粉联 用等方法改良的滨海地区盐渍土,其土壤物理力学 性能与水稳定性均有所提升^[8-9].此外,由蚯蚓粪、活 性酶调理剂与内生菌根菌剂组成的生物基改良剂也 可有效降低盐渍土的含盐量,提升土壤速效养分含 量,以增强区域土壤的生态功能^[10].然而,改良盐渍土 的研究主要集中在改良材料的有效性验证,缺乏对 其机理的进一步探讨.

综上所述,改良盐渍土作为建筑材料使用时需 要对其强度性能进行改良.因此,本文引入一种CLI 型高分子活性剂对新疆地区盐渍土进行改良,探究 该活性剂对盐渍土力学性能和含盐量改良的可行 性,为新疆地区盐渍土区域工程建设提供一定的参 考依据.通过设置不同活性剂掺量与养护时间,探究 改良盐渍土力学强度及含盐量的变化规律,并通过 微观测试来揭示其改良机理,为盐渍土的地基及路 基处理设计提供理论和实践指导.

1 试验

1.1 试验材料

试验所用土体均取自新疆巴音郭楞蒙古自治州 尉犁县农二师三十三团某工地,取土深度约为1m. 经测试得到原状土中含多种盐分,其中无水硫酸钠 的含量¹¹约为3.82%,根据盐渍土的分类标准可知其 为强硫酸盐盐渍土.为了保证整个试验所有试样的 基本状况一致,采用人工调配的方法来控制试样含 盐量.先对原状土进行脱盐处理,烘干后过2mm筛, 得到干土.再进行人工调配,使其无水硫酸钠晶体含 量占到盐渍土质量的4.00%,得到硫酸型盐渍土素 土试样,其中砂土、粉土及黏土的含量分别为 12.81%、71.77%、15.42%,基本物理参数见表1.

表 1 硫酸型盐渍土的基本物理参数 Table 1 Basic physical parameters of sulfate saline soil

Specific gravity	Dry density/($g \cdot cm^{-3}$)	Optimum moisture content(by mass)/%	Liquid limit(by mass)/%	Plastic limit(by mass)/ %
2.72	1.73	14.12	25.52	15.32
采用一种自	目制的 CLI 型高分子	活性剂(后文简 物理参数	如表2所示.CLI具有	较强的黏结性,可作

称 CLI) 对盐渍土进行改良. CLI 由造纸废液提纯并 干燥后制得, 在常温条件下呈棕黄色粉末状, 其基本 物理参数如表2所示.CLI具有较强的黏结性,可作 为禽畜饲料的黏结剂,由此也可推测其在改良盐渍 土的过程中不会对环境造成负面影响.

表 2 CLI的基本物理参数 Table 2 Basic physical parameters of CLI

Appearance	Relative molecular mass	Solid content(by mass)/%	Specific gravity	Water insoluble content(by mass)/ %	PH value	Water content (by mass)/ %
Brownish yellow powder	2 500	45	1.2	0.5	7	1.0

在试样制备过程中,根据设置的土体干密度(ρ_{d} , ρ_{d} =1.5、1.6、1.7、1.8、1.9 g/cm³)、最优含水率(w_{op} , w_{op} =14.1%)及CLI掺量(w_{c} , w_{c} =0%、4%、8%、 12%),称取适量的干土、无水硫酸钠晶体、CLI及蒸 馏水,将无水硫酸钠晶体与CLI均匀混合并溶于水 后,与干土进行充分拌和,依次倒入模具,击实至相 同高度.制备完毕的试样均置于25℃的恒温养护箱 中进行风干养护.CLI掺量为0%、4%、8%、12%的 试样分别记作S0、S4、S8、S12.相同参数的试样需制 备3个,结果取平均.

1.2 试验方案

1.2.1 三轴剪切试验

通过三轴剪切试验研究不同CLI掺量及养护时 间下盐渍土的强度(峰值偏应力).所设围压分别为 100、200、300 kPa,试验过程按照GB/T 50123— 2019《土工试验方法标准》进行,控制剪切仪的应变 速率为0.8 mm/min.试验所用仪器为TSZ-1型全自 动三轴剪切仪.

1.2.2 含水率测定

采用称重法对不同CLI掺量及养护时间下盐渍 土的保水性能进行研究,测定不同条件下盐渍土的 含水率.

1.2.3 可溶盐含量测定

参照文献[11],采用分光光度法对试样中硫酸 根离子的含量(可溶盐含量)进行测试,得到不同CLI 掺量与养护时间下试样中所生成的硫酸钡沉淀质量 m(BaSO₄).硫酸钡沉淀质量越大,表征可溶盐含量越 多,以此来反应改良后盐渍土的脱盐效果.

¹⁾文中涉及的含量、掺量等均为质量分数.

1.2.4 微观测试

将经三轴剪切试验后的盐渍土试样破碎后烘干,取其中尺寸为10mm×10mm×2mm的碎片进行微观测试.采用SU3500扫描电子显微镜(SEM)观察盐渍土改良前后的微观特征,并结合能谱(EDS)测试,确定盐渍土改良前后的元素组成.

通过行星式研磨机对试样碎片进行研磨,采用 DX-2700型X射线衍射仪(XRD)对研磨后的盐渍土 粉末进行观测,对比分析盐渍土试样改良前后的矿 物成分变化.

1.2.5 Zeta电位测定

采用美国Brookhaven公司生产的90 Plus Zeta

型电位分析仪,测定不同CLI掺量下盐渍土养护7d时的Zeta电位.

2 结果与分析

2.1 偏应力与轴向应变

不同围压条件下养护1d时各试样偏应力-轴向 应变曲线如图1所示.由图1可见:随着围压和CLI 掺量的增加,改良盐渍土的偏应力-轴向应变曲线由 弱硬化型向一般硬化型发展;当CLI掺量为0%和 4%时,偏应力-轴向应变曲线上未出现明显峰值点; 在高CLI掺量(8%和12%)条件下,偏应力-轴向应 变曲线仍为应变硬化型,但达到峰值强度后,偏应力 仅存在小幅度降低.



Fig. 1 Deviatoric stress-axial strain curves of samples after curing for 1 day under various confining pressures

不同养护时间及围压下各试样的峰值偏应力如 表3所示.由表3可见:(1)与未改良的试样相比,掺 加CLI后试样的峰值偏应力明显提升;但在相同围 压条件下,改良后的盐渍土峰值偏应力随着CLI掺 量的增加呈先增大后减小的趋势;当CLI掺量达到 8%时,试样偏应力峰值的整体水平最高,说明超过 最佳掺量后,盐渍土内部的CLI会因相互交联引起 堆叠和聚集,增大土颗粒的孔隙和间距,降低土颗 粒间的胶结作用,从而导致盐渍土试样的强度降低,但降低后的强度仍显著高于S0试样.(2)在同一掺量条件下,改良盐渍土的峰值偏应力随着围压的增加呈单调增加,这是因为随着围压的增加,改良土体的内部颗粒排列更加紧密,颗粒间的咬合和接触程度增加;但不同CLI掺量对围压增幅的响应是有区别的,围压从100 kPa增加到300 kPa时,CLI掺量为0%、4%、8%、12%的试样1d峰值偏应

力增长分别为 327.03、401.70、488.95、319.43 kPa, 说明适量 CLI 的掺入提高了围压引起的峰值偏应 力增长程度, CLI 的胶结作用增加了颗粒的挤密效 果,提升了盐渍土的力学强度.(3)随着养护时间的 增加,过高 CLI 掺量引起的强度降低幅度逐渐减 小;在同一掺量下,试样峰值偏应力随养护时间延 长而增加,但整体增加幅度较小,仅在前7d有着较 为明显的提升;而养护至14d时试样的峰值偏应力 与养护7d时相差较小.因此,养护时间达到7d时, 土体养护过程基本完成.

Confining angeouse /hDo	Curing time/d	Peak deviatoric stress/kPa			
Contining pressure/ kPa		S0	S4	S8	S12
	1	437.25	553.01	974.48	605.53
100	3	444.22	528.37	1 159.71	1 004.82
100	7	532.38	658.66	1 294.08	1 111. 63
	14	501.67	708.78	1 292.26	1 167.07
	1	625.73	680.43	1 269.43	753.54
000	3	632.36	753.06	1 442.02	1 172. 51
200	7	678.27	890.29	1 629.68	1 378.64
	14	703.57	1 048.52	1 766.22	1 460. 54
	1	764.28	954.71	1 463. 43	924.96
200	3	819.92	1 003.92	1 707.21	1 443. 21
300	7	859.43	1 169.89	1 927.41	1 531.76
	14	857.73	1 165.35	1 950.86	1 546.77

表 3 不同养护时间及围压条件下各试样的峰值偏应力 Table 3 Peak deviatoric stress of samples under different curing times and confining pressures

2.2 抗剪强度参数

图 2 给出了不同养护时间和 CLI 掺量下试样的 内聚力和内摩擦角.由图 2(a)可见:在相同养护时间 下,试样的内聚力随 CLI 掺量增加呈先增后减的变 化趋势,并在 8% CLI 掺量下达到峰值,此时试样的 内聚力较素土试样最大可提升 113.77 kPa,说明改良



盐渍土在CLI掺量为8%时,颗粒间的胶结和黏附作 用最强;在相同CLI掺量下,试样的内聚力随养护时 间延长呈先增后减的变化趋势,并在7d时达到峰 值;以CLI掺量为8%的试样为例,养护7、14d时内 聚力与养护1d时相比分别提升了约87.39%与 75.14%.





由图 2(b)可见:(1)在养护1d时,不同CLI掺量 下试样的内摩擦角基本相等;在养护7、14d时,内摩 擦角随CLI掺量增加呈先增后减的趋势,在CLI掺量 为8%时达到峰值.这可能是因为CLI的掺入填充 了盐渍土的孔隙空间,减缓了试样失水过程.(2)随 着养护时间的增加,掺加CLI的试样内摩擦角增大. 例如,CLI掺量为8%、12%的试样在养护14d时, 内摩擦角与1d时相比分别增加了约37.71%、 28.47%.

改良后试样内聚力的增长幅度明显高于内摩擦 角,说明CLI主要通过在颗粒间建立聚合物线束或 聚合物膜来增强颗粒间的胶结作用,从而引起试样 内聚力的显著提升;并且聚合物的粒间胶结及表面 黏附使得颗粒咬合程度和表面摩擦角提升,从而引 起内摩擦角的增大.

养护7d时,不同干密度下改良盐渍土试样S8的 内聚力与内摩擦角见图3.由图3(a)可见,试样S8的 内聚力随干密度增加而增大,但内聚力的增幅随干 密度增加而减小.这是因为盐渍土的内聚力主要由 颗粒间的CLI胶结作用、颗粒间静电力及范德华力 和结合水的连接作用力引起,随着干密度的增加,颗 粒间的间距缩小,盐渍土中固相成分增加,增加了 CLI胶结作用的效率和强度,导致颗粒间黏结力升 高.由图3(b)可见,试样S8的内摩擦角随干密度增 加而增大,但增幅均小于4°.这是因为颗粒间胶结作 用的提升和间距的缩小,在一定程度上促进了颗粒 间的咬合程度和摩擦强度,从而引起了宏观试样内 摩擦角的变化.

2.3 可溶盐含量

图4给出了各试样的含水率与可溶盐含量.由图 4(a)可知:掺加合适掺量的CLI可在有效提升盐渍土 强度的同时,也可在一定程度上提升其水分保持能 力,延缓水分蒸发;在相同养护时间下,随着CLI掺 量的增加,试样含水率先增后减,CLI掺量为8%时 试样S8的含水率最高;养护14d时,试样S8含水率 较素土试样S0提升了约69.02%;养护7d时,试样内 部水分蒸发过程已基本停止.

由图4(b)可见:硫酸钡质量随CLI掺量增加而 增大,并且随养护时间延长而趋于稳定;当CLI掺量 为12%且养护14d时,硫酸钡质量约为6.93g,相比 于素土试样减少约44.44%.结合图4(a)分析可知,当 养护时间大于7d时,由于试样内部的水分蒸发过程 基本停止,导致其含水率不再发生改变,因此硫酸钡 质量也趋于稳定.





3 机理讨论

为了确认CLI与硫酸型盐渍土作用是否有新的 矿物生成,对改良前后的盐渍土试样S0、S8(养护时 间为7d)进行XRD和EDS分析,结果如图5、6所示, 其中EDS分析采用面扫描和点扫描方式,面扫描具 体位置已在图中标注.

由图5可见:S0和S8的XRD图谱中特征衍射峰





矿物成分并未因为CLI的掺入而发生改变,区别于 传统的水泥、石灰等材料^[12]. 由图6可见:盐渍土试样S0中主要含有O、Si、 Na、S、Al、Fe等元素;而CLI中主要存在C、O、Na、Si 和S元素^[13],改良后的盐渍土试样S8中O和Si元素

> 的含量增加,其化学元素组成是素土与CLI之和^[13], 而S和Na元素的含量降低,表明CLI与盐渍土中硫 酸根离子反应生成硫酸钙沉淀,降低了盐渍土的含 盐量.

> 值出现的位置一致,峰强大小也未发生改变,所含矿

物主要为石英和磷酸铝石;改良后的盐渍土试样S8 的XRD图谱中并无新的峰出现,说明盐渍土内部的



图 6 试样 S0和 S8的 EDS 扫描分析 Fig. 6 EDS scanning analysis of S0 and S8 samples(7 d)

图 7 给出了 CLI 改良前后盐渍土试样 S0 和 S8 养护 7 d的 SEM 照片,是通过 Image J软件将不同重 要部位进行染色处理之后的照片.由图 7 可见:在未 经改良的盐渍土 SEM 照片中可以明显观察出土颗 粒表面的晶体明显区别于土体的团聚体,其EDS 点 扫描结果显示该晶体中 Na 元素含量达到 87.1%,远 高于周围土体中Na元素的含量,因此认为该晶体是 盐分结晶体;改良后,土颗粒表面未发现明显晶体, CLI反应后的细小颗粒填充于土壤颗粒间的孔隙,并 且由于CLI具有黏结性和螯合性,其生成的细小颗 粒聚集成团粒,通过物理吸附作用黏附于土壤颗粒 表面和粒间连接处,形成相对致密的土体结构.



图 7 试样 S0 和 S8 的 SEM 照片 Fig. 7 SEM images of S0 and S8 samples(7 d)

根据土壤的双电层理论,当黏土颗粒表面电荷 恒定时,离子浓度越高,离子价数越大,土颗粒的双 电层厚度越薄^[14].图8为硫酸型盐渍土与CLI反应原 理示意图.见图8可见,在水、土及离子(钠离子与钙

20

离子分别由无水硫酸钠与CLI提供)环境中,由于钙 离子的电荷数高于钠离子,因此钙离子的水化膜以 及其双电层厚度均小于钠离子,具备更强的絮凝土 颗粒的能力.经一系列反应,土颗粒的双电层厚度减小,颗粒间的斥力减小,由于离子交换和静电作用产 生团聚,从而达到密实土体的效果.



图 8 硫酸型盐渍土与CLI反应原理示意图 Fig. 8 Schematic diagram of reaction between sulphuric acid saline soil and CLI

CLI掺量对盐渍土Zeta电位的影响如图9所示. 由图9可见,掺加CLI后,盐渍土颗粒的Zeta电位出现负电荷数量减小的趋势.通常Zeta电位被认为是 胶体滑动面上的电位,表面电荷情况决定其数值与 正负^[15].电位绝对值越大,颗粒间的静电斥力越大,其 颗粒越容易分散^[16].因此,CLI的掺入使得盐渍土颗 粒间斥力减小,凝聚力增大.

当土壤中的CLI掺量过高时,CLI将与土颗粒发 生过量反应,导致短时间内团聚体数量剧增,反而在 一定程度上增大了土壤的孔隙度,降低了土壤结构 的整体稳定性,从而提升了水分的蒸发量,并使试样 的强度降低.

此外,在水、土及电解质环境中,游离的钙离子





能够与钠离子发生置换反应而形成硫酸钙沉淀(见 图 8).然而,随着试样中水分的不断流失,上述置换 反应将逐渐停止,说明该反应需在含有适量水分的 环境中方可进行,表现为试样中硫酸钡沉淀质量与 含水率的变化趋势一致(见图 4),均随着养护时间的 延长而趋于稳定.综上,经CLI改良后的硫酸型盐渍 土在强度得到有效提升的同时,土壤中的含盐量也 降低,而土壤中硫酸盐含量的降低也可在一定程度 上减少因低温产生的盐胀灾害.

4 结论

(1)CLI型高分子活性剂的掺入可以有效提升硫酸型盐渍土的力学强度,其最佳掺量为8%,此时试样的内聚力较素土试样最大可提升113.77 kPa.

(2)养护时间对 CLI 型高分子活性剂改良效果 有重要影响,随着养护时间的延长,改良后的试样力 学性能呈先增加后稳定的趋势,养护7d时试样力学 性能基本稳定.

(3)改良盐渍土保水性能随CLI型高分子活 化剂掺量增加而先增大后减小,掺量为8%时试 样保水性能最强,其含水率较素土试样提升约 69.02%.

(4)CLI型高分子活化剂可以有效地降低盐渍土的含盐量.其掺量越高,离子置换反应能力越强,随养护时间的增加,置换效果在7d后趋于稳定.

(5)CLI型高分子活化剂降低了土颗粒双电层厚度,增加了颗粒间的静电作用和离子桥接,改善了盐 渍土的力学性质,生成的絮凝物质可填充孔隙,增强 土体结构,提升其保水性能.

参考文献:

- [1] 汪林萍,杨全兵.NaCl-MgCl₂复合除冰盐对混凝土盐冻破坏的 影响及其作用机理[J].建筑材料学报, 2023, 26(2): 129-136,149.
 WANG Linping, YANG Quanbing. Effect and mechanism of NaCl-MgCl₂ compounded deicing salt on the salt-frost scaling of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(2):129-136, 149. (in Chinese)
- [2] 乔宏霞,杨振清,王鹏辉,等.利用Wiener过程探究镁水泥混凝 土中涂层钢筋在盐类环境下的腐蚀寿命[J].建筑材料学报,2021, 24(5):986-993.

QIAO Hongxia, YANG Zhenqing, WANG Penghui, et al. Corrosion life investigation of coated steel bars in magnesium cement concrete under salt solution environment using Wiener process[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(5):986-993. (in Chinese)

- [3] ABSWNNOUE M A, DOUAOUI A, BARRENA J, et al. Geochemical characterization of the salinity of irrigated soils in arid regions(Biskra, SE Algeria)[J]. Acta Geochimica, 2021,40 (2):234-250.
- [4] 郑毅,王爱国,刘开伟,等.不同地聚物砂浆抗硫酸盐侵蚀性能及其机理分析[J].建筑材料学报,2021,24(6):1224-1233.
 ZHENG Yi, WANG Aiguo, LIU Kaiwei, et al. Sulfate resistance and mechanism analysis of different geopolymer mortars
 [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6):1224-1233. (in Chinese)
- [5] 赵庆新,才鸿伟,安赛,等.水泥磨细矿渣固化滨海盐渍土强度及机理[J].建筑材料学报,2020,23(3):625-630.
 ZHAO Qingxin, CAI Hongwei, AN Sai, et al. Strength and mechanism of stabilized coastal saline soil by cement and fine slag
 [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(3):625-630. (in Chinese)
- [6] 张鹏,庄智杰,鲍玖文,等.人工模拟海洋潮汐区应变硬化水泥
 基复合材料抗氯盐侵蚀性能[J].建筑材料学报,2021,24(1):
 1-6,21.

ZHANG Peng, ZHUANG Zhijie, BAO Jiuwen, et al. Chloride resistance of strain hardening cementitious composites under the artificially simulated marine tidal zone[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(1):1-6,21. (in Chinese)

[7] 张佳兴,裴向军,韦璐.硫酸盐渍土水泥加固盐胀抑制剂研究[J]. 岩土工程学报,2018,40(1):155-161.

ZHANG Jiaxing, PEI Xiangjun, WEI Lu. Salt expansion inhibitors for sulphated salty soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(1):155-161. (in Chinese)

- [8] 廖晓兰,杨久俊,张磊,等.丙烯酰胺聚合固化盐渍土试验研究
 [J].岩土力学, 2015,36(8):2216-2222.
 LIAO Xiaolan, YANG Jiujun, ZHANG Lei, et al. An experimental study of acrylamide polymerized solidification of saline soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36 (8): 2216-2222. (in Chinese)
- [9] 柴寿喜,王沛,韩文峰,等.高分子材料固化滨海盐渍土的强度 与微结构研究[J].岩土力学,2007(6):1067-1072.
 CHAI Shouxi, WANG Pei, HAN Wenfeng, et al. Research on strength and microstructure feature of solidified saline soil in inshore with polymer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007(6): 1067-1072. (in Chinese)
- [10] 黄婷,李媛,甘泉峰,等.生物基复合改良剂对滨海盐渍土综合 地力的提升作用[J]水土保持通报,2022,42(4):99-106.
 HUANG Ting, LI Yuan, GAN Quanfeng, et al. Effects of bio-based compound amendments on overall soil fertility of coastal saline soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42 (4):99-106. (in Chinese)
- [11] 孙好芬,巫崇婷,黄振,等.土壤中硫酸根离子的测定[J].广州化 工,2018,46(9):83-85.
 SUN Haofen, WU Chongting, HUANG Zhen, et al. Determination of trace sulfate ion in soil[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2018, 46(9):83-85. (in Chinese)
- [12] 杨西锋,尤哲敏,牛富俊,等.固化剂对盐渍土物理力学性质的 固化效果研究进展[J].冰川冻土,2014,36(2):376-385.
 YANG Xifeng, YOU Zhemin, NIU Fujun, et al. Research progress in stabilizers and their effects in improving physical and mechanical properties of saline soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(2):376-385. (in Chinese)
- PEI X J, ZHANG F Y, WU W J, et al. Physicochemical and index properties of loess stabilized with lime and fly ash piles[J]. Applied Clay Science, 2015, 114:77-84.
- [14] 柳艳华,张宏,齐文廷.石灰改良滨海氯盐渍土的室内试验研究
 [J].建筑材料学报,2011,14(2):217-221.
 LIU Yanhua, ZHANG Hong, QI Wenting. Treatment of coastal chloride saline soil by lime addition [J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(2):217-221. (in Chinese)
- [15] 吴军虎,李玉晨,邵凡凡,等.生化黄腐酸对土壤物理性质及水 分运动特性的影响[J].水土保持学报,2021,35(4):159-164,171.
 WU Junhu, LI Yuchen, SHAO Fanfan, et al. Effects of biochemical fulvic acid on physical properties and water movement characteristics[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4):159-164,171. (in Chinese)
- [16] 宋孝帅,李强,夏红霞,等.可溶性有机质对三峡库区土壤胶体 颗粒凝聚的影响[J].生态与农村环境学报,2023,39(3): 378-385.

SONG Xiaoshuai, LI Qiang, XIA Hongxia, et al. Effect of dissolved organic matter on aggregation of soil colloidal particles in the three gorges reservoir area[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023, 39(3):378-385. (in Chinese)