

季节性冻融期土壤微生物数量与土壤盐分环境响应关系^①

杨跃发^{1,2}, 王春霞^{1,2*}, 汪思佳^{1,2}, 俞芷若^{1,2}, 范子康^{1,2}

(1 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆石河子 832000; 2 现代节水灌溉兵团重点实验室, 新疆石河子 832000)

摘要: 在季节性冻融期, 设置 19 个不同的氯化盐和硫酸盐浓度梯度, 跟踪监测土壤微生物数量及土壤盐度环境因子, 探讨土壤微生物数量与盐分环境的相互作用关系。结果表明: 季节性冻融期硫酸盐和氯化盐两种土壤盐分类型对土壤微生物数量影响差异不显著, 但土壤 pH 极显著影响土壤微生物数量; Logistic 模型显示, 土壤盐分浓度为 1.3 g/kg 时, 土壤微生物数量呈快速下降趋势, 之后趋于平稳; OLS 回归分析表明, 相比细菌, 真菌对恶劣环境具有更强的适应能力($\beta = -504.193$, $P < 0.0001$)。基于 PCoA 和 OLS 的综合分析发现, 季节性冻融作用下, 土壤盐分浓度 ≥ 1.3 g/kg 会引发土壤环境的逐步劣化。

关键词: 季节性冻融; 土壤微生物; 硫酸盐; 氯化盐; 响应关系

中图分类号: S182 文献标志码: A

Response Relationship Between Soil Microbial Abundance and Salinity Environment During Seasonal Freeze-Thaw Periods

YANG Yuefa^{1,2}, WANG Chunxia^{1,2*}, WANG Sijia^{1,2}, YU Zhiruo^{1,2}, FAN Zikang^{1,2}

(1 College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China; 2 Key Laboratory of Modern Water-saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: In this study, nineteen salinity gradients of chloride and sulfate salts were established during seasonal freeze-thaw cycles. By continuously monitoring soil microbial populations and salinity-related environmental factors, the interactive relationships between them were investigated. The results demonstrated that sulfate and chloride salts exhibited comparable effects without significant difference on soil microbial populations, while soil pH emerged as a statistically significant determinant. Logistic regression analysis identified a critical threshold at 1.3 g/kg salt concentration, beyond which microbial abundance declined sharply before stabilizing. Comparative analysis using Ordinary Least Squares (OLS) regression revealed significantly greater environmental stress tolerance in fungal communities relative to bacterial populations ($\beta = -504.193$, $P < 0.0001$). Multivariate analysis integrating Principal Coordinates Analysis (PCoA) and OLS modeling indicated that salt concentration exceeding 1.3 g/kg under freeze-thaw conditions initiated progressive soil ecosystem deterioration.

Key words: Seasonal freeze-thaw; Soil microorganisms; Sulfate; Chloride salt; Response relationship

土壤盐渍化问题影响全球生态环境和农业生产的稳定发展^[1-3]。目前, 我国盐渍化土壤总面积为 3 600 万 hm^2 , 其中 26% 是盐渍化耕地面积^[4]。第二次全国土壤普查显示, 山西省盐碱地耕地面积为 30.13 万 hm^2 , 约为非耕地盐碱地的 3 倍^[5]。土壤盐分一般以氯化盐和硫酸盐为主。季节性冻融期是土壤从休耕期向春播期过渡、恢复地力的关键时期。此

时, 土壤微生物参与有机碳的转化和固存过程, 驱动土壤氮素养分循环^[6], 是土壤生态系统中保持地力的关键环节。在土壤生态系统中, 土壤微生物、酶活性以及理化性质三者紧密关联, 任一方面的变化都会影响其余方面^[7]。较高盐分含量会恶化土壤理化性质, 抑制土壤微生物和酶活性^[8], 从而严重影响土壤养分循环过程。因此, 探讨季节性冻融期土壤微生物生存

①基金项目: 国家自然科学基金地区项目(52369012)、“十四五”国家重点研发项目(2022YFD1900800)和新疆维吾尔自治区重大科技专项(2024A03006-5)资助。

* 通信作者(wangchunxia1979@139.com)

作者简介: 杨跃发(1995—), 男, 山西临汾人, 博士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: 1131183413@qq.com

的盐分阈值,可为农业管理提供理论参考。

土壤盐渍化问题涉及土壤微生物、理化性质等诸多因素^[9]。目前,国内外学者更多趋向于作物生长期的农田、湿地生态系统中土壤盐分与微生物之间的关系研究^[10],而季节性冻融期土壤盐分与微生物之间的关系研究报道较少。Hamilton等^[11]研究发现,过高的Na⁺含量会降低土壤孔隙度,部分有毒的盐分离子会导致土壤物理环境发生改变。路海玲等^[12]研究表明,土壤盐分含量的高低会直接影响微生物的生长,降低微生物多样性。Wu等^[13]研究发现,土壤盐分(EC_{1:5}=12.5 dS/m)对脱氢酶活性不会产生显著的影响。马丽娟等^[14]和井大炜等^[15]研究表明,盐分浓度过高会影响到土壤微生物群落的组成、数量、分布和活性,与潘媛媛等^[16]研究观点一致。此外,季节性冻融期土壤温度在0℃上下浮动产生的冻融循环,也会强烈影响农田土壤环境以及土壤微生物的活性^[17]。综上所述,尽管已有大量研究表明作物生育期土壤盐分含量过高会对土壤微生物产生影响,但有关季节性冻融期农田土壤微生物数量与盐分环境的响应关系研究还不足。

本研究通过设计19个不同的氯化盐和硫酸盐浓度梯度,分析季节性冻融期土壤细菌和真菌数量及土壤总盐、pH、有机质、硝态氮、土壤温度、酶活性的变化特征,进而探究季节性冻融期土壤细菌和真菌与各土壤环境因子的关系,并明确土壤细菌和真菌适宜的土壤盐分环境,以期气候变化下土壤生态系统的响应机制及盐渍化土壤的生态修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于山西省临汾市曲沃县景明村,地处山西中南部(35°33'N~35°51'N, 111°24'E~111°37'E)。该区域属暖温带半干旱大陆性气候,四季分明,光照充足,全年无霜期210 d,年平均气温12.6℃,年平均降水量500 mm,降水主要集中在7—9月。冬季(集中在12月至次年2月)干燥寒冷,雨雪较少,历年最大冻土深度52 cm。试验区土壤类型为黏壤土,容重为1.30 g/cm³,pH 7.4,含盐量0.3 g/kg,有机质含量15.9 g/kg,硝态氮含量26.13 mg/kg。试验期间降水量较少,最大日降水量14.2 mm,日平均温度最高15.8℃,最低-9.8℃(图1)。

1.2 试验设计

本试验于2022年11月至2023年3月进行,取

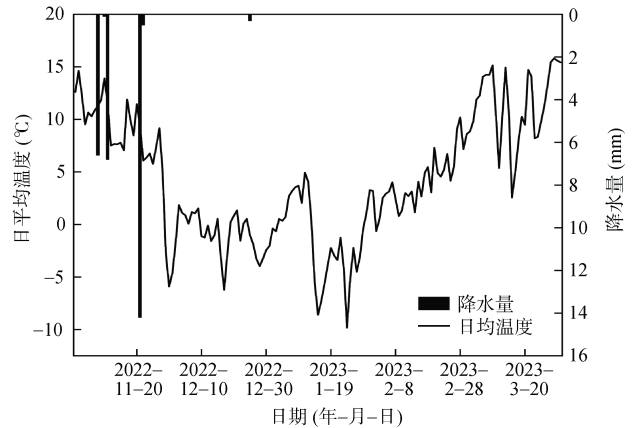


图1 试验区气象数据

Fig. 1 Meteorological data of test area

试验区0~20 cm表层土壤,风干,过2 mm筛后备用。分别使用CaCl₂和NaCl(摩尔比1:1)模拟氯化盐环境,以及Na₂SO₄和CaCl₂(防止土壤碱化)模拟硫酸盐环境(保证Cl⁻与SO₄²⁻摩尔比为3:1),共设置2种盐分类型,与风干土按比例配置后分装至直径7 cm、高20 cm,体积为769.3 cm³的纸杯中。试验处理包括CK组(无盐分处理),以及氯化盐和硫酸盐浓度处理,两者均设置1.0~10.0 g/kg的浓度梯度(每0.5 g/kg为一个梯度),每种盐各19个浓度梯度。每个试验处理重复3次。试验于2022年11月15日将配好盐分的纸杯埋置于大田20 cm深处,纸杯上口与地表平齐,间距10 cm。试验期间不进行灌溉,于2023年3月20日土壤完全解冻后,取回所有土样进行分析。

1.3 测定指标及方法

土壤温度采用i500-T土壤温度记录仪监测;土壤pH采用型号PHS-25pH计测定(土水质量比1:10)^[18];土壤有机质使用N5S分光光度计测定^[19];土壤硝态氮参照GB/T 32737—2016《土壤硝态氮的测定 紫外分光光度法》测定^[20];土壤过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定^[21];土壤微生物数量采用稀释平板法测定^[22]。

1.4 数据统计分析

使用SPSS Statistics 25进行数据统计分析。采用普通最小二乘法(OLS)回归综合评估微生物数量的影响因素,其中分类变量编码为:微生物类型(1=细菌,2=真菌)、土层深度(1=0~5 cm,2=5~20 cm)、盐分类型(1=硫酸盐,2=氯化盐),其他连续变量按实测值输入,并建立了相应的回归方程: $\text{bpsystol}_i = \beta_0 + \beta_1 \text{盐度} + \beta_2 \text{微生物} + \beta_3 \text{土层深度} + \beta_4 \text{pH} + \beta_5 \text{钙离子} + \beta_6 \text{钠离子} + \beta_7 \text{氯离子} + \beta_8 \text{硫酸根离子} + \beta_9 \text{硝态氮} + \beta_{10} \text{有机质} + \beta_{11} \text{过氧化氢酶} + \epsilon_i$ 。同时,采用偏最小二乘法(PLS)进行

标准化回归分析。结构方程模型(SEM)的构建使用 SPSS Amos 26 Graphics 完成。主坐标分析(PCoA)和文中图件制作均使用 Origin 2021 完成。

2 结果与分析

2.1 季节性冻融期土壤微生物数量变化特征

季节性冻融期不同氯化盐与硫酸盐浓度梯度下,不同土层土壤细菌和真菌数量的响应特征如图 2 所示。结果表明,盐分胁迫对土壤微生物群落具有显著抑制作用,且不同类群、土层及盐型间存在显著差异。

细菌对盐胁迫高度敏感,在 1.5 g/kg 盐分浓度下,氯化盐和硫酸盐处理的细菌总数分别较对照(CK)下降 74.5% 和 73.6%,并随盐分浓度的升高未出现明显回升。真菌表现出更强的适应性,在 5.0 g/kg 中高盐浓度下出现显著数量回升,氯化盐组和硫酸盐组的真菌总数分别较 4.5 g/kg 浓度下回升 150% 和

140%,说明部分耐盐真菌类群在中等胁迫下成为优势种群。土层深度对微生物分布具有显著调控作用,5~20 cm 土层的细菌和真菌数量在所有盐分浓度梯度下均高于 0~5 cm 浅土层。在高盐胁迫下,深土层对真菌的保护效应更为突出,5~20 cm 土层微生物的数量与 0~5 cm 土层微生物的数量比值可达 1.5~2.0,说明深土层更有利于微生物的生存。盐分类型对比下,氯化盐与硫酸盐对土壤细菌的抑制趋势高度一致,均表现为随盐分浓度升高而持续下降,且在各浓度梯度下的数量变化幅度相近;而硫酸盐对真菌的胁迫效应相对温和,在 5.5 g/kg 浓度下,硫酸盐处理真菌数量的峰值高于氯化盐处理,可能是硫酸盐作为植物必需营养元素,一方面作为盐分产生胁迫,另一方面可被植物和微生物利用,从而缓解部分抑制作用。在>7.5 g/kg 盐分浓度胁迫下,两种盐分类型对微生物的抑制效应趋于一致。

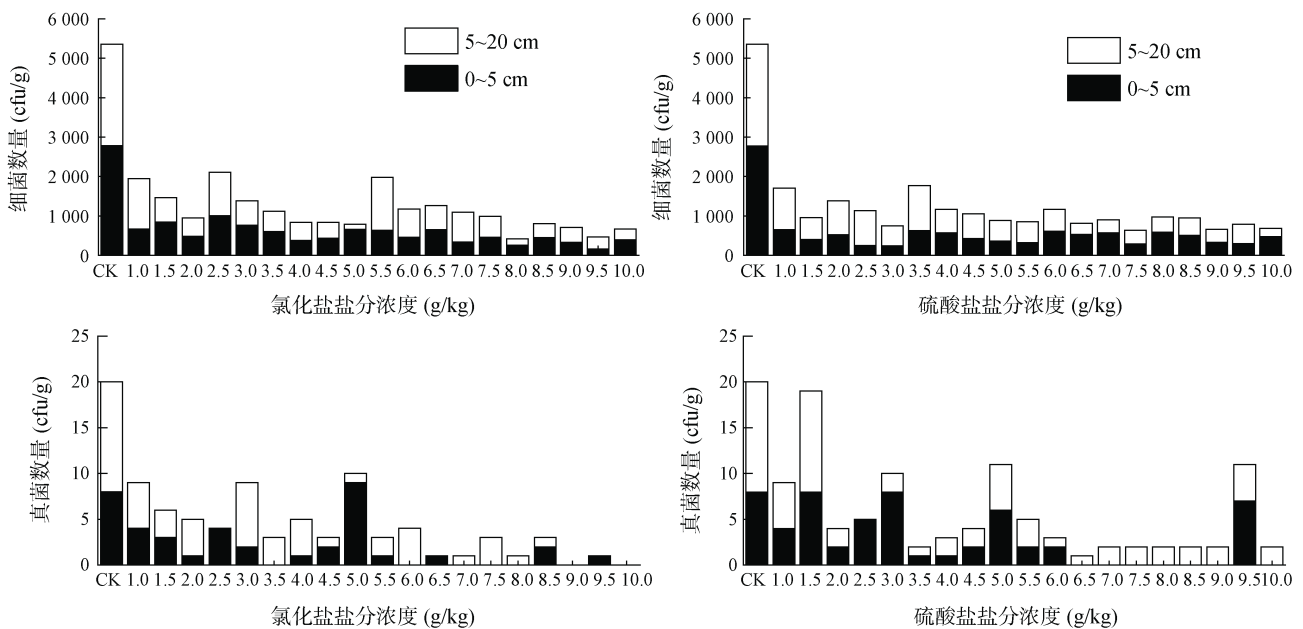


图 2 不同盐分浓度梯度下土壤细菌和真菌的数量变化

Fig. 2 Changes in abundance of soil bacteria and fungi under different salinity gradients

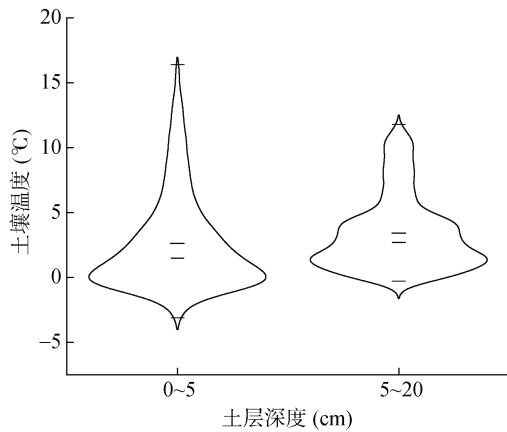
2.2 季节性冻融期土壤环境因素变化特征

季节性冻融期硫酸盐迁移较慢,盐分的分布相对稳定;氯化盐则溶解度较高,迁移性较强。研究区试验期间降水较少,在温度波动的情况下,不同硫酸盐和氯化盐盐分浓度下土壤 pH、有机质、硝态氮呈现显著的变化。

季节性冻融期土壤温度的变化如图 3 所示。整个季节性冻融期,0~5 cm 土层温度主要集中在 0 °C,最高温度和最低温度分别为 16.4 °C 和 -3.1 °C,平均温度为 2.6 °C;5~20 cm 土层温度主要集中在 0~5 °C,

最高温度和最低温度分别为 11.8 °C 和 -0.3 °C,平均温度为 3.4 °C。随着土层深度的增加,土壤最高温度下移,最低温度上移。

季节性冻融期,土壤盐分浓度对土壤 pH 的影响显著,且氯化盐和硫酸盐的影响模式不同(图 4)。在 0~5 cm 土层,氯化盐浓度增加使土壤 pH 呈现“上升-平稳”趋势,在 9.5 g/kg 时达到最大值 9.16;而 5~20 cm 土层则呈现“上升-下降”趋势,在 9 g/kg 时 pH 达到最大值 8.96。硫酸盐对土壤 pH 的影响更为显著,0~5 cm 土层在 9.5 g/kg 时 pH 达到最大值 9.29;5~



(图中上、下线条分别表示最大值和最小值，中间两条上、下线分别是均值线和中位线)

图 3 土壤温度变化

Fig. 3 Changes in soil temperature

20 cm 土层则呈“上升-下降”波动变化，最终在 10 g/kg 时 pH 达到最大值。总体来看，硫酸盐对土壤 pH 的影响更大，且 5~20 cm 土层 pH 的变化更为复杂。

季节性冻融期不同盐分梯度下土壤 Na⁺、Ca²⁺、SO₄²⁻、Cl⁻ 含量的变化如图 5 所示。结果表明，土壤中 Na⁺、Ca²⁺、SO₄²⁻、Cl⁻ 的含量随着盐分浓度增加

而增加。0~5 cm 土层 Na⁺、Ca²⁺、Cl⁻ 的含量大于 5~20 cm 土层；在高盐分浓度下，0~5 cm 土层的 SO₄²⁻ 含量小于 5~20 cm 土层。由此可知，经过季节性冻融期，土壤 Na⁺、Ca²⁺、Cl⁻ 被表层吸附的能力强于 SO₄²⁻。

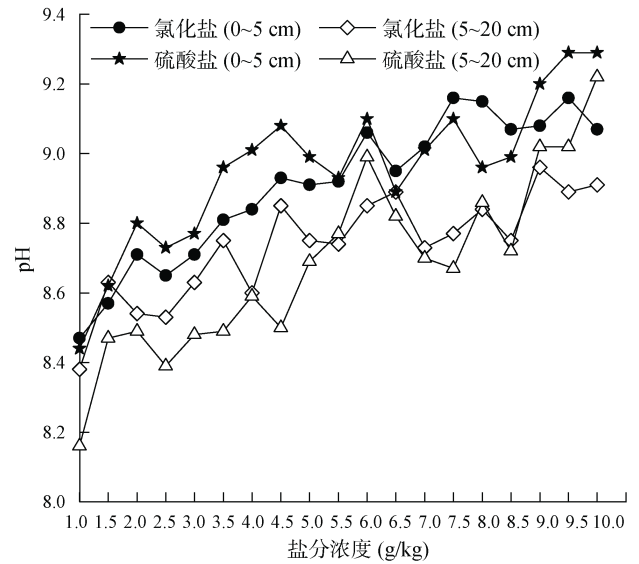


图 4 土壤 pH 的变化

Fig. 4 Changes in soil pH

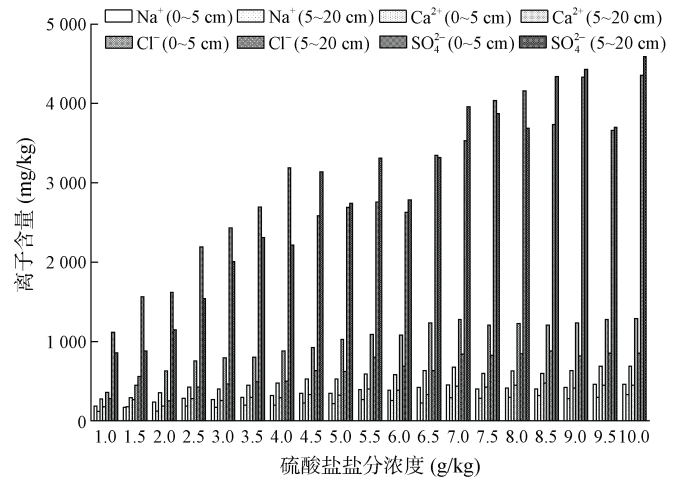
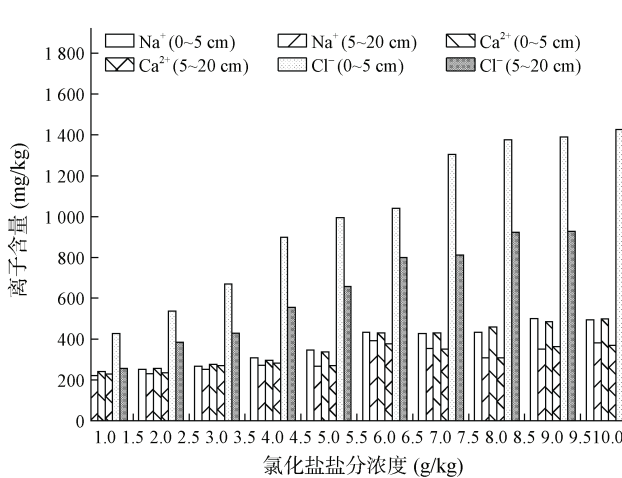


图 5 土壤 Na⁺、Ca²⁺、SO₄²⁻、Cl⁻ 变化

Fig. 5 Changes in soil Na⁺, Ca²⁺, SO₄²⁻, and Cl⁻ concentrations

季节性冻融期不同盐分梯度下土壤有机质的变化如图 6 所示。随着氯化盐盐分浓度的增加，0~5 cm 土层有机质含量高于 5~20 cm 土层；0~5 cm 土层在盐分浓度为 2.5 g/kg 时，土壤有机质含量最高，相比 CK 增加了 13.89%。随着硫酸盐盐分浓度增加，0~5 cm 土层有机质含量低于 5~20 cm 土层；0~5 cm 土层有机质含量在盐分浓度 4、5.5、7 g/kg 出现峰值，在 10 g/kg 浓度下最低，相比 CK 减少 5.42%；5~20 cm 土层在盐分浓度为 2.5 g/kg 时有机质含量最高，相比

CK 增加了 31.48%。在季节性冻融期，盐分促进了土壤有机质的积累，当氯化盐盐分浓度在 4.5 g/kg，硫酸盐盐分浓度在 2.5 g/kg 时，土壤有机质含量相对较高。参照土壤养分分级标准^[23]，初步判断该含量处于中等水平。

不同盐分梯度下土壤硝态氮的变化趋势如图 7 所示。整个季节性冻融期，氯化盐处理 0~5 cm 土层硝态氮含量大于 5~20 cm 土层；盐分浓度 ≤ 7.5 g/kg 时，土壤硝态氮含量变化幅度不大，盐分浓度 ≥ 8 g/kg

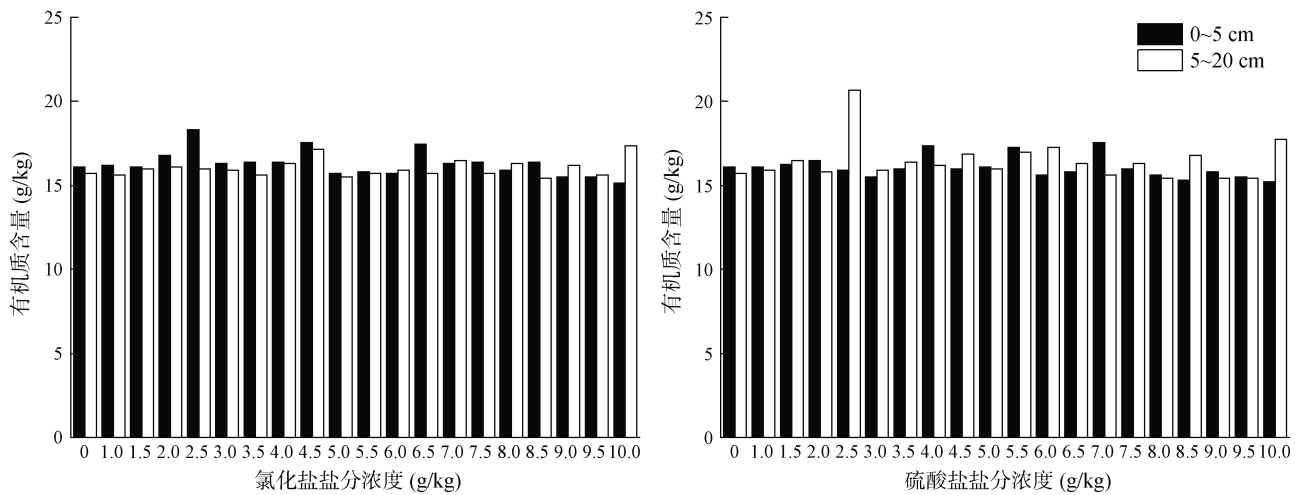


图 6 土壤有机质的变化
Fig. 6 Changes in soil organic matter

时,土壤硝态氮含量急剧下降,最后趋于平稳。硫酸盐处理对土壤硝态氮的影响更为显著:0~5 cm 土层在 0~4.5 g/kg 盐分浓度下,土壤硝态氮含量变化幅度较小,5.0 g/kg 盐分浓度下,土壤硝态氮含量较 CK 减少 69%,5.5 g/kg 盐分浓度时回升;5~20 cm 土层硝态氮含量在 CK 时约为 15 mg/kg,在 1~7 g/kg 盐分浓度区间波动于 12~38 mg/kg,整体

低于 0~5 cm 土层,大于 1.5 g/kg 盐分浓度波动更为平缓,在 7~9 g/kg 区间波动于 10~20 mg/kg,在 10 g/kg 处升至约 18 mg/kg,始终低于 0~5 cm 土层。整体分析,经过季节性冻融期,在盐分的胁迫下,0~5 cm 土层硝态氮含量高于 5~20 cm 土层,且在 0~7.5 g/kg 盐度时,硫酸盐比氯化盐对土壤硝态氮的影响更明显。

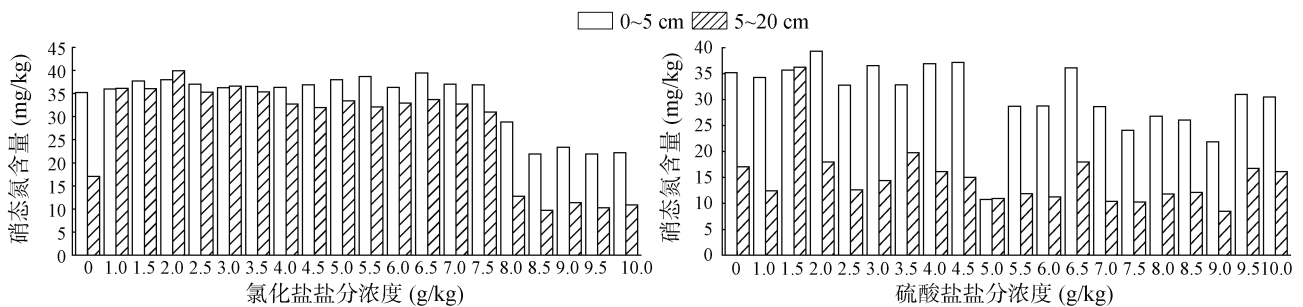


图 7 土壤硝态氮的变化
Fig. 7 Changes in soil nitrate nitrogen

不同盐分梯度下土壤过氧化氢酶活性的变化如图 8 所示。整个季节性冻融期,氯化盐对 5~20 cm 土层土壤过氧化氢酶活性影响较大,在 4.5 g/kg 盐分浓度下,酶活性达到峰值,之后急剧下降并趋于稳定。硫酸盐处理下,0~5 cm 和 5~20 cm 土层过氧化氢酶活性的变化规律基本一致,在 3.5 g/kg 盐分浓度时酶活性最高,之后下降;在 8.5 g/kg 盐分浓度时再次达到峰值。综合分析,盐分促进了土壤过氧化氢酶的产生,氯化盐浓度 4.5 g/kg 时酶活性达到峰值,硫酸盐浓度 4.0 g/kg 时酶活性达到峰值。

2.3 土壤微生物数量与环境因素的响应关系

通过 SEM 分析了不同盐分梯度土壤环境因子之间的相互关系(图 9)。氯化盐处理下,土壤盐分浓度

对土壤细菌数量有极显著的负向影响(-0.979 , $P<0.001$),对土壤 pH 有极显著的正向影响(1.031 , $P<0.001$);土壤 pH 对土壤细菌和真菌数量有极显著的负向影响(-0.017 和 -1.312 , $P<0.001$),对土壤硝态氮也有极显著的负向影响(-0.116 , $P<0.001$);土壤过氧化氢酶对土壤真菌数量产生极显著的负向影响(-0.236 , $P<0.001$);真菌和细菌数量之间也存在极显著的负向影响(-1.536 , $P<0.001$)。

硫酸盐处理下,土壤 pH 对土壤过氧化氢酶活性和土壤细菌数量有显著的负向影响(-1.321 、 -0.876 , $P<0.05$);土壤有机质对土壤过氧化氢酶活性有极显著的负向影响(-1.321 , $P<0.01$),对土壤硝态氮有极显著的正向影响(1.223 , $P<0.001$);土壤过氧化氢酶

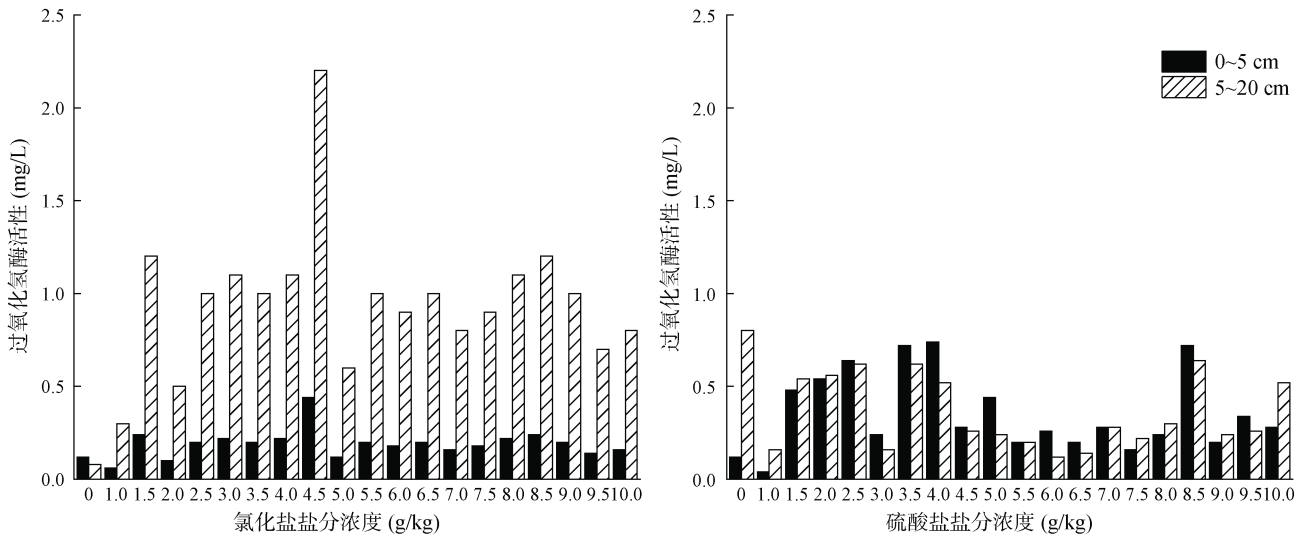
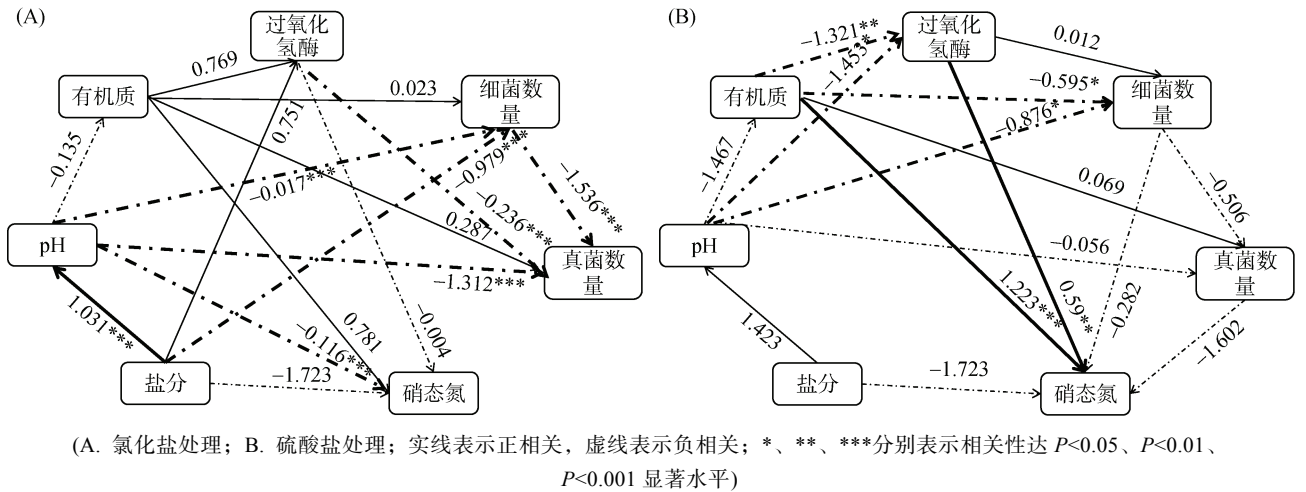


图 8 土壤过氧化氢酶活性的变化
Fig. 8 Changes in soil catalase activity



(A. 氯化盐处理; B. 硫酸盐处理; 实线表示正相关, 虚线表示负相关; *, **, ***分别表示相关性达 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.001$ 显著水平)

图 9 土壤微生物数量与土壤环境因子 SEM 模型图

Fig. 9 Structural equation modeling (SEM) of relationships between soil microbial abundance and salinity-related environmental factors

对土壤硝态氮有极显著的正向影响(0.59, $P<0.01$)。PLS 分析证明了不同土壤盐分梯度下各环境因子对土壤微生物数量有负面影响(图 10)。其中, 土壤 pH 对细菌和真菌数量均具有显著的抑制作用, 而土壤硝态氮则表现出显著的正向促进效应。

综合分析, 土壤盐分过高通常会伴随土壤 pH 升高, 土壤 pH 过高破坏土壤结构, 降低土壤孔隙度, 抑制土壤养分分解, 导致土壤微生物活性下降, 从而减少土壤微生物数量和多样性, 使得土壤氮素含量增加, 存活的土壤微生物再次利用氮素繁殖。

采用 OLS 和 PCoA 方法对季节性冻融期土壤微生物数量对土壤盐分环境的响应关系进行分析。

根据表 1 的回归结果得出其表达式为:
 $bpsystol_i = 2\ 842.789 - 3.009 \text{ 盐度} - 504.193 \text{ 微生物} + 74.467 \text{ 土层深度} - 223.847 \text{ pH} + 1.647 \text{ 钙离子} + 0.296 \text{ 钠}$

离子 -0.604 氯离子 -0.052 硫酸根离子 -2.179 硝态氮 -6.522 有机质 $+136.447$ 过氧化氢酶, $N=228$, $AdjR^2=21.80\%$ 。

由表 1 及表达式可知, 土壤盐度的回归系数为 -3.009 , 与 $bpsystol$ 显著负相关($P<0.05$), 说明在其他变量不变的情况下, 增加土壤盐分浓度, 微生物数量减少。通过 PCoA 图(图 11)发现, 在 0~5、5~20 cm 土层深度, 土壤氯化盐和硫酸盐的最优盐分梯度都是 1 g/kg, 随着土壤盐分浓度的增加越不利于土壤生态环境的发展。土壤微生物的回归系数是 -504.193 , 与 $bpsystol$ 显著负相关($P<0.01$), 依据不含交乘项的估计模型结果, 表明细菌的耐盐性一般低于真菌。土层深度对土壤微生物数量的影响不显著。通过 PCoA 的置信椭圆显示, 土壤氯化盐重叠椭圆部分大于硫酸盐重叠部分, 重叠部分越大, 组间差异越不显著, 表

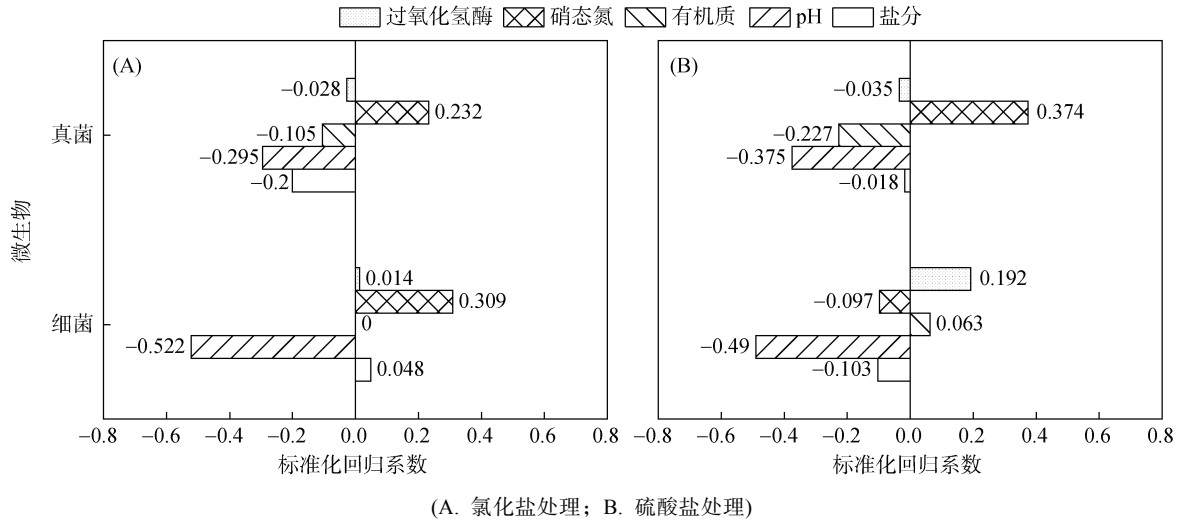


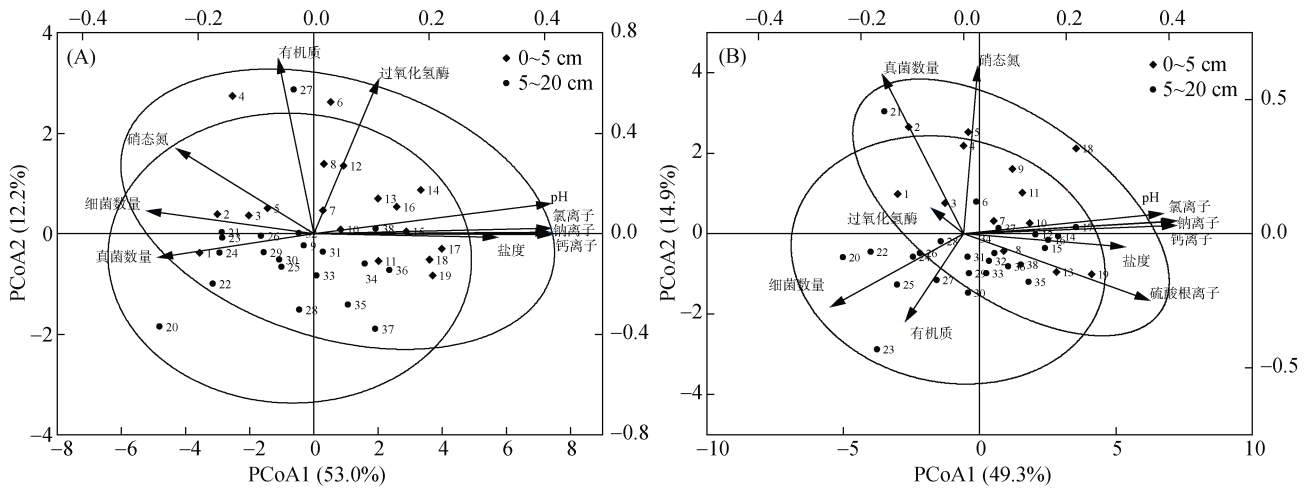
图 10 土壤微生物数量与土壤盐分环境因子的 PLS 分析

Fig. 10 Partial least squares (PLS) analysis of soil microbial abundance and salinity-related environmental factors

表 1 不含交互项的估计模型结果

Table 1 Modeled results without interaction terms

指标	回归系数	标准方差	t	P> t	95% 置信区间	
盐度	-3.009	0.009	-334.333	0.035 9	-0.027	0.01
微生物	-504.193	31.466	-16.023	0.000	-567.054	-441.332
土层深度	74.467	84.558	0.881	0.382	-94.458	243.393
pH	-223.847	127.743	-1.752	0.015	-479.043	31.349
Ca ²⁺	1.647	2.222	0.741	0.461	-2.792	6.086
过氧化氢酶	136.447	93.32	1.462	0.149	-49.982	322.876
CO ₃ ²⁻	-0.052	0.036	-1.432	0.157	-0.124	0.02
Cl ⁻	-0.604	0.459	-1.315	0.193	-1.521	0.313
Na ⁺	0.296	3.042	0.097	0.923	-5.782	6.373
硝态氮	-2.179	2.934	-0.743	0.46	-8.041	3.683
有机质	-6.522	19.067	-0.342	0.733	-44.613	31.568
常数项	2 842.789	1 138.323	2.497	0.015	568.727	511.685



(A. 氯化盐处理; B. 硫酸盐处理; 样本点 1~19 是 0~5 cm 土层的盐分梯度; 样本点 20~38 是 5~20 cm 土层的盐分梯度)

图 11 不同盐分梯度 PCoA 分析

Fig. 11 Principal coordinates analysis (PCoA) under different salinity gradients

明氯化盐不同盐分梯度土层组间差异显著性低于硫酸盐。OLS 分析表明, 土壤 pH 的回归系数为 -223.847 , 与 bpsystol 显著负相关 ($P < 0.05$), 说明在其他变量不变的情况下, 土壤 pH 越大, 土壤微生物的数量越少。PCoA 综合分析也表明土壤 pH 的增加对土壤环境的破坏较大。表 1 最终未显示盐分类型, 说明氯化盐和硫酸盐的类型与土壤微生物数量无显著相关性。通过拟合土壤盐分和微生物的数量显示它们之间的关系符合 Logistic 函数模型(图 12), 属于倒“S”型趋势走向。土壤微生物数量在盐分浓度大于 1.3 g/kg 时显著下降, 之后趋于平稳, 说明盐分浓度大于 1.3 g/kg 不利于微生物生长繁殖。

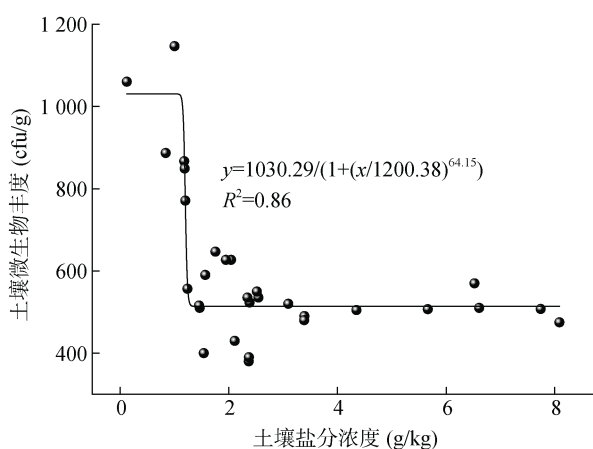


图 12 土壤盐分浓度与微生物数量的关系

Fig. 12 Relationship between soil salinity and microbial abundance

3 讨论

3.1 影响土壤微生物的盐分环境因素

细菌和真菌是土壤中的重要组成部分。有研究表明, 土壤微生物数量可作为土壤碱性测试和土壤质量恢复的生物学指标^[18]。一般情况下, 盐碱地的微生物数量低于普通农田土壤, 原因是盐分改变了土壤微生物适宜的生存环境。也有研究表明, 盐胁迫首先抑制植物的正常生长, 降低植物生物量、减少根系分泌物与凋落物输入, 进而减少土壤中可供微生物利用的营养物质; 同时, 盐分改变土壤渗透压、通气状况等微生境条件, 影响微生物的生存与繁殖, 使得土壤微生物数量发生变化^[24]。盐分浓度过高会破坏土壤微生物细胞渗透压, 但一定程度的盐分浓度也会促进微生物的生长^[25]; 也有学者对滨海和内陆盐碱地的微生物数量研究发现, 随着盐分浓度的增加, 微生物数量显著降低^[26]。本研究表明, 整个季节性冻融过程中, 氯化盐与硫酸盐两种盐分类型间土壤微生物数量

无明显差异; 随着盐分浓度升高, 与对照相比, 盐分处理下土壤微生物数量显著降低, 后期则略有回升。本研究表明, 在季节性冻融期, 当土壤盐分浓度处于 $1.1 \sim 1.3 \text{ g/kg}$ 时, 微生物数量呈快速下降趋势, 随后逐渐趋于平稳; 土壤中嗜盐微生物的存在, 有助于维持土壤生态系统的稳定, 对越冬作物生长具有积极作用^[27]。土壤微生物主要包括细菌和真菌, 盐分胁迫改变土壤的渗透压, 和真菌相比, 细菌耐受性较小, 离子之间的反应产生毒性, 但部分真菌对其耐受性较强, 真菌在逆境中更具有竞争优势^[28]。

季节性冻融期作为土壤恢复地力的重要时期, 过高的土壤盐分会影响来年播种。随着盐分浓度的增加, 相比 CK 组, 土壤 pH 明显提高。土壤 pH 过高, 会抑制土壤细菌和真菌的生长, 导致细菌和真菌活性降低, 破坏土壤结构^[29]。但是本研究表明, 随着盐分浓度的增加, 经过整个季节性冻融期提高了土壤有机质、硝态氮含量以及土壤过氧化氢酶活性, 可能是因为盐分浓度过高导致土壤微生物死亡, 分解养分。土壤中的离子对微生物的数量也有很大影响, 土壤 Ca^{2+} 的增加会提高土壤团聚体的稳定性, 增强土壤的透水性能; Na^{+} 的增多则会导致土壤碱化, 产生 Na^{+} 毒害, 减少微生物的数量。

综上所述, 季节性冻融期, 盐分类型对土壤微生物无显著影响, 但盐分浓度的增加不利于土壤生态环境的可持续发展。尽管部分养分指标在短期内有所提升, 但这种效应难以长期维持土壤生态系统的稳定。土壤微生物和植物之间存在复杂的相互作用^[30]。在特定条件下, 植物可通过向土壤中分泌代谢产物, 吸引有益微生物在根系定殖, 从而提高植物对非生物胁迫的适应能力。在无作物种植情况下, 土壤微生物数量主要受盐分浓度和冻融循环的影响, 高盐分可能抑制部分微生物, 而冻融过程则可能改变土壤结构, 从而影响微生物生存环境; 在种植作物情况下, 作物根系分泌物可能缓解盐分胁迫, 促进特定微生物(如植物根际促生菌)增殖, 耐盐作物(如盐角草、碱蓬)可能通过调控根际微环境, 减少盐分对微生物的负面影响。

3.2 土壤细菌和真菌数量与土壤盐度环境响应关系

已有研究表明, 土壤微生物数量与土壤全盐含量呈显著负相关^[31]。本研究则发现, 在季节性冻融期, 不同盐分浓度通过改变土壤 pH 和阴阳离子的浓度间接影响土壤微生物数量。王世强等^[32]和沈晨等^[33]的研究表明, 土壤 pH 直接影响土壤微生物活力。他们

发现, 茶园土壤 pH 为 4.5 时, 土壤基础呼吸速率最高, 表明此时土壤微生物活性最强。本研究结果表明, 随着盐分浓度的增加, 土壤 pH 明显提高, 不利于微生物生长。但有学者表明, 土壤放线菌数量与 pH 密切相关, 在 pH 6.8~8.5 之间放线菌数量最多^[34]。秦璐等^[35]在艾比湖的研究发现, 冻融期间对微生物数量贡献较大的是土壤有机质和 pH。本研究结果表明, 季节性冻融期间, 盐分胁迫显著提升了土壤有机质含量与 pH, 进而改变了土壤有机质与微生物数量之间的关系。牛世全等^[36]对春季河西走廊不同盐碱土壤的研究发现, 土壤过氧化氢酶活性与微生物因子有良好的相关性。本研究则发现, 在季节性冻融期, 盐分类型对土壤微生物数量无显著影响。进一步分析表明, 在氯化盐胁迫下, 土壤 pH 升高, 与细菌和真菌数量呈显著负相关。总体而言, 土壤理化性质作为土壤养分的基础, 微生物数量直接影响养分的转化。在季节性冻融期, 盐分胁迫下土壤理化性质的改变对土壤细菌和真菌数量影响显著。本研究中, 季节性冻融期在施加盐分条件下, 对土壤细菌和真菌数量影响最显著的因子是 pH, 而有机质的影响不明确。本试验采用的是风干土, 且试验期间降水过少, 故土壤水分的影响排除在外, 试验可能存在一定的局限性。未来可能需要考虑在不同冬灌条件下开展研究, 以更全面地评估盐分胁迫对土壤微生物的影响。

4 结论

1) 在季节性冻融期, 盐分类型(硫酸盐和氯化盐)对土壤微生物数量的影响无显著差异。土壤盐分浓度为 1.1~1.3 g/kg 时, 微生物数量急剧下降, 之后趋于平稳。微生物数量与盐分浓度关系符合 Logistic 函数模型。

2) 盐分浓度的增加提高土壤 pH; 冻融循环与盐分胁迫降低土壤有机质的分解, 影响土壤硝态氮转化, 并降低土壤微生物数量和酶活性; 相比细菌, 土壤真菌耐盐性更强, 更适应恶劣生境。

3) 综合 PCoA 和 PLS 分析表明, 季节性冻融期土壤盐分浓度大于 1.3 g/kg 时, 土壤微生物的繁殖过程受到明显干扰。

参考文献:

[1] 霍伟歌, 彭懿, 张少民, 等. 滴灌条件下盐碱地垦殖对土壤盐度和肥力影响的长期观测[J]. 土壤学报, 2025, 62(1): 69–80.

[2] Amundson R, Berhe A A, Hopmans J W, et al. Soil and human security in the 21st century[J]. *Science*, 2015, 348(6235): 1261071.

[3] 张雅贞, 李跃进, 景宇鹏, 等. 施用有机肥对土默川平原盐碱土壤盐分及养分特征的影响[J]. 北方农业学报, 2019, 47(6): 34–41.

[4] 刘强, 袁延飞, 刘一帆, 等. 生物炭对盐渍化土壤改良的研究进展[J]. 地球科学进展, 2022, 37(10): 1005–1024.

[5] 赵耀巍, 贾彬良. 山西省盐碱地改造利用实践与探索[J]. 农业技术与装备, 2024(10): 42–44.

[6] 吕慧捷, 袁小伟, 何红波. 玉米不同生育期土壤氨基糖动态变化特征[J]. 中国土壤与肥料, 2018(5): 147–153.

[7] 高乾程, 李红强, 李殿兴, 等. 盐渍农田有机碳周转过程与土壤增碳调控研究展望[J]. 环境科学, 2025, 46(11): 6994–7005.

[8] 孙慧, 张建锋, 许华森, 等. 余姚滨海不同盐碱度土壤微生物群落组成及土壤酶活性的变化[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3361–3370.

[9] 吴同亮, 刘存, 周东美, 等. 环境土壤学——回顾与展望[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1324–1338.

[10] 张丹丹, 郑向群, 李厚禹, 等. 含盐农村生活污水灌溉对土壤微生物的影响[J]. 环境科学研究, 2022, 35(8): 1873–1884.

[11] Hamilton A J, Stagnitti F, Xiong X Z, et al. Wastewater irrigation: The state of play[J]. *Vadose Zone Journal*, 2007, 6(4): 823–840.

[12] 路海玲, 孟亚利, 周玲玲, 等. 盐胁迫对棉田土壤微生物量和土壤养分的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1): 197–201.

[13] Wu Y, Xu G, Shao H B. Furfural and its biochar improve the general properties of a saline soil[J]. *Solid Earth*, 2014, 5(2): 665–671.

[14] 马丽娟, 张慧敏, 侯振安, 等. 长期咸水滴灌对土壤氨氧化微生物丰度和群落结构的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(12): 2797–2807.

[15] 井大炜, 马海林, 刘方春, 等. 盐胁迫环境下接种根际促生细菌对碱蓬根际土壤微环境特征的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(4): 34–39.

[16] 潘媛媛, 黄海鹏, 孟婧, 等. 松嫩平原盐碱地中耐(嗜)盐菌的生物多样性[J]. 微生物学报, 2012, 52(10): 1187–1194.

[17] 丁慧慧, 陈文盛, 李江荣. 季节性冻融对色季拉森林土壤团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 120–127.

[18] 杨跃发, 王春霞, 梁飞, 等. 冬灌条件下季节性冻融期农田土壤可培养微生物数量变化及其影响因素[J]. 土壤, 2023, 55(3): 569–577.

[19] 魏正贵. 环境化学[M]. 南京: 南京大学出版社, 2023.

[20] 连腾祥. 农田土壤微生物生态学实验教程[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2024.

[21] 裴玲芳, 范贵鹏, 肖美玲, 等. 两种方法测定土壤中过氧化氢酶比较[J]. 科技创新与应用, 2019(15): 145–146, 149.

[22] 沈萍, 陈向东. 微生物学实验[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2007.

[23] 汪宗兰, 王春霞, 马建江, 等. 库尔勒香梨园土壤肥力空间变异特征与综合评价分析[J]. 节水灌溉, 2024(3): 83–90, 98.

- [24] Khan K S, Gattinger A, Buegger F, et al. Microbial use of organic amendments in saline soils monitored by changes in the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(5): 1217–1224.
- [25] 张慧敏. 不同盐碱胁迫对土壤氮素转化和氨氧化微生物的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2018.
- [26] 李凤霞, 王学琴, 郭永忠, 等. 宁夏不同类型盐渍化土壤微生物区系及多样性[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(5): 107–111.
- [27] Huang A C, Jiang T, Liu Y X, et al. A specialized metabolic network selectively modulates *Arabidopsis* root microbiota[J]. *Science*, 2019, 364(6440): eaau6389.
- [28] 徐扬, 张冠初, 丁红, 等. 干旱与盐胁迫对花生根际土壤细菌群落结构和花生产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(4): 1305–1313.
- [29] Ali S, Charles T C, Glick B R. Amelioration of high salinity stress damage by plant growth-promoting bacterial endophytes that contain ACC deaminase[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2014, 80: 160–167.
- [30] 李欣冉, 林浩, 曹平丽, 等. 长期施氮加剧亚热带米楮天然林不同深度土壤磷限制: 基于土壤胞外酶活性及其化学计量比角度[J]. *土壤*, 2024, 56(5): 963–974.
- [31] 卢鑫萍, 杜茜, 闫永利, 等. 盐渍化土壤根际微生物群落及土壤因子对 AM 真菌的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(13): 4071–4078.
- [32] 王世强, 胡长玉, 程东华, 等. 调节茶园土壤 pH 对其土著微生物区系及生理群的影响[J]. *土壤*, 2011, 43(1): 76–80.
- [33] 沈晨, 范利超, 韩文炎. pH 和肥料对茶园土壤基础呼吸的影响[J]. *土壤通报*, 2017, 48(5): 1226–1232.
- [34] 姜成林, 徐丽华. 哀牢山土壤放线菌的组成研究[M]. 昆明: 云南大学出版社, 1985: 53–57.
- [35] 秦璐, 吕光辉, 何学敏. 艾比湖地区冻融作用对土壤微生物数量和群落结构的影响[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(6): 1590–1599.
- [36] 牛世全, 杨建文, 胡磊, 等. 河西走廊春季不同盐碱土壤中微生物数量、酶活性与理化因子的关系[J]. *微生物学通报*, 2012, 39(3): 416–427.

(责任编辑: 毛小芳)