

李红强, 姚荣江, 杨劲松, 等. 滨海盐渍农田土壤硝化势特征及其影响因素. 应用生态学报, 2022, 33(8): 2205-2212

Li H-Q, Yao R-J, Yang J-S, et al. Characteristics and influencing factors of soil nitrification potential in coastal salinized farmland. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(8): 2205-2212

滨海盐渍农田土壤硝化势特征及其影响因素

李红强^{1,2} 姚荣江^{1*} 杨劲松¹ 王相平¹ 谢文萍¹ 张新¹

(¹中国科学院南京土壤研究所, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; ²中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 明确滨海盐渍农田土壤的硝化能力, 探究土壤环境中影响硝化过程的主要因子, 对调控农田土壤硝化作用和提高氮肥利用率具有重要意义。通过野外调查和室内分析相结合的方法, 研究了滨海淤泥质滩涂盐渍区域(东营市和东台市)农田土壤硝化势和土壤物理、化学、生物学性质, 运用多元逐步回归分析和结构方程模型(SEM)建立了土壤性质与土壤硝化势的相关关系。结果表明: 滨海盐渍农田土壤除 pH 值较稳定外, 其他土壤性质和土壤硝化势变化差异较大。土壤硝化势范围为 0.04~10.42 mg·kg⁻¹·d⁻¹, 随土壤盐渍化程度增加而降低。相关分析表明, 土壤硝化势与土壤有机质、阳离子交换量和 Cl⁻ 的相关性最强, 相关系数分别为 0.409、0.397 和 -0.337; 而多元逐步回归分析表明, Na⁺、粉粒、阳离子交换量、CO₃²⁻+HCO₃⁻ 为土壤硝化势的主要影响因子。SEM 分析结果表明, Na⁺、粉粒、阳离子交换量、CO₃²⁻+HCO₃⁻ 为影响土壤硝化势的直接因子, 有机质、黏粒、Cl⁻、SO₄²⁻ 为影响土壤硝化势的间接因子。总之, 土壤 Na⁺ 和阳离子交换量是影响硝化作用的两个主要因素, 在该区域调控土壤 NaCl 含量和阳离子交换量为调节土壤硝化过程的有效手段。

关键词 硝化势; 盐渍农田; 结构方程模型

Characteristics and influencing factors of soil nitrification potential in coastal salinized farmland. LI Hong-qiang^{1,2}, YAO Rong-jiang^{1*}, YANG Jing-song¹, WANG Xiang-ping¹, XIE Wen-ping¹, ZHANG Xin¹ (¹State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China).

Abstract: Understanding the nitrification capacity of coastal saline farmland soils and its main drivers is of great significance to regulate soil nitrification and improve the utilization efficiency of nitrogen fertilization in farmland. Using a combination of field investigations and laboratory analyses, we examined farmland soil nitrification potential and soil physical, chemical, and biological properties in the coastal muddy tidal flat saline soil area (Dongying and Dongtai). We established the correlation between soil properties and soil nitrification potential with multiple stepwise regression analyses and structural equation modeling (SEM). The results showed that soil pH value was relatively stable and other soil properties and soil nitrification potential varied in coastal saline farmland. The soil nitrification potential ranged from 0.04 to 10.42 mg·kg⁻¹·d⁻¹ and decreased with the increases of soil salinization level. Soil nitrification potential had the strongest correlation with soil organic matter, cation exchange capacity, and Cl⁻, with the correlation coefficient being 0.409, 0.397 and -0.337, respectively. The results of multiple stepwise regression analysis showed that Na⁺, silt, cation exchange capacity, and CO₃²⁻+HCO₃⁻ were the main influencing factors of soil nitrification potential. The results from the SEM analysis suggested that Na⁺, silt, cation exchange capacity, and CO₃²⁻+HCO₃⁻ directly affected soil nitrification potential, and soil organic matter, clay, Cl⁻ and SO₄²⁻ had indirect effects. In all, soil Na⁺ and cation exchange capacity were the two main factors affecting nitrification. Adjusting soil NaCl content and cation exchange capacity was an effective means of regulating soil nitrification.

Key words: nitrification potential; salinized farmland; structural equation model.

硝化作用是连接铵态氮和硝态氮的重要过程, 其强弱对铵态氮、硝态氮在土壤中的分配比例有重要影响。硝化作用增强可增加土壤硝态氮含量, 同

时增加硝态氮反硝化和淋失风险^[1-2], 而硝化作用减弱可增加土壤铵态氮含量, 增加氨挥发损失风险^[3-4]。硝化过程由微生物主导, 受硝化微生物数量、活性和种群结构的影响^[5], 而土壤水分、温度、pH 值、质地、有机质和盐分等可间接影响土壤硝化过程^[6-7]。目前, 有关土壤物理和化学性质与硝化

本文由国家自然科学基金项目(42077084, U1906221, U1806215)和国家重点研发计划项目(2019YFD1002702, 2019YFD0900702)资助。
2021-09-16 收稿, 2022-05-14 接受。

* 通讯作者 E-mail: rjyao@issas.ac.cn

作用的相关关系已有较多研究^[8-9],但在不同类型土壤中,与硝化作用显著相关的指标具有较大差异。

目前,可以对硝化作用强度进行量化的指标有净硝化速率、总硝化速率、硝化势、硝化强度等。硝化强度是土壤在短时间内把铵态氮转化为硝态氮的最大能力,时间一般为 24 h,主要体现土壤在一定时间内某种状态下的硝化活性^[10]。硝化势(nitrification potential, N_p)是通过提供最适的温度、水分和充足的铵态氮等,经过培养来估计土壤硝化作用的潜力^[11]。在培养过程中硝化微生物的数量将增加,硝化作用逐渐增强,直到其他土壤性质成为限制因素,因此, N_p 可以有效模拟施肥阶段土壤的硝化过程,反映硝化过程的强弱,有助于对施肥状态下土壤硝化过程进行深入了解。

盐渍土作为我国主要的中低产土壤类型之一,其过高的盐分和 pH 值导致植物氮素利用率低。一般认为,土壤盐分是硝化作用的主要影响因子,但其他土壤指标对硝化作用的影响暂不明确。在盐渍土改良过程中,主要通过减盐和养分增效来进行综合改良,明确土壤各指标对硝化作用的影响程度,有助于了解土壤硝化过程的变化,进而有针对性地进行土壤改良。本研究以滨海盐渍农田为对象,基于结构方程模型(structural equation modeling, SEM)探讨土壤基本理化性质对土壤 N_p 影响的可能路径和权重大小,以期为提高盐渍土壤生产力提供理论基础。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

土壤样品于 2020 年采集于山东省东营市(37°17'04"—37°46'01" N, 118°36'21"—118°59'49" E)和江苏省东台市(32°45'40"—32°52'55" N, 120°55'42"—120°57'56" E),两地土壤盐分组成均以氯化钠为主,属于淤泥质海岸滩涂盐渍土。其中,东营盐渍土壤主要是由黄河所带泥沙注入渤海后逐渐堆积形成,发育于黄河冲积沉积物;东台地区沉积物质主要来自黄河、淮河带来的泥沙和长江向北流的潮流带来的泥质悬浮物共同堆积而成,发育于长江和黄河两者冲积沉积物。东营和东台盐渍土壤区域分别为黄河下游三角洲和长江下游三角洲代表性盐化潮土。东营地处温带大陆性季风气候,年平均气温为 12.1 °C,降雨量为 551.6 mm,年降雨的 50%~70%集中在 7—8 月。东台地处亚热带地区,年平均气温在 15.0 °C 左右,降雨量为 1045.8 mm,年降雨的 70%集中在 5—9 月。

1.2 样品采集

共随机采集 83 个土壤样品,其中,东台 48 个,东营 35 个。在每块农田选择典型部位,在 15 m 范围内随机选取 5 个位点采集 0~20 cm 土层土壤样品,混合均匀后采取四分法取样,作为一个取样点,详细记录取样点坐标(图 1)。每个取样点土壤分为 3 种方式进行保存:1) 阴凉处风干,剔除砾石和动植物残体等杂物后混匀磨碎,过 2、1、0.25、0.149 mm 的筛后,进行土壤理化性质分析;2) 剔除杂物后于 4.0 °C 保存,用于土壤酶活性、微生物生物量碳氮、硝态氮、铵态氮含量测定;3) 简单风干,剔除杂物过 2 mm 筛后,用于土壤 N_p 测定。

1.3 土壤理化性质测定

1.3.1 土壤物理指标测定 土壤颗粒组成采用激光粒度仪(Beckman Coulter, LS13320, 美国)测定,土壤颗粒分级采用美国农业部标准:黏粒(<2 μm)、粉粒(2~50 μm)、砂粒(>50 μm)^[12];土壤含水量采用烘干法测定^[13]。

1.3.2 土壤化学指标测定 以 1:5 土水比制备土样浸提液,土壤 pH 值和电导率(EC)分别用 pH 计和电导率仪测定,Na⁺用火焰光度法测定,Cl⁻用 AgNO₃滴定法测定,SO₄²⁻用 EDTA 间接络合滴定法测定,CO₃²⁻和 HCO₃⁻用双指示剂-中和滴定法测定^[13];NO₃⁻-N 采用镉柱还原法测定,NH₄⁺-N 采用靛酚蓝法,全自动间断化学分析仪(DeChem-Tech.

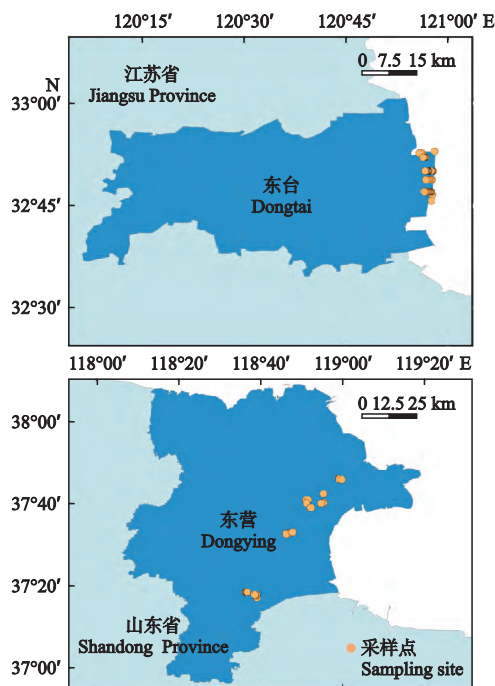


图 1 取样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites.

GmbH, Cleverchem Anna, 德国)测定;土壤阳离子交换量(CEC)采用乙酸钠-火焰光度法测定^[13];土壤有机质(SOM)采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定^[13]。

1.3.3 土壤生物指标测定 微生物生物量氮(MBN)和微生物生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸浸提法测定^[13];氨单加氧酶(AMO)、羟胺氧化还原酶(HAO)和亚硝酸盐氧化还原酶(NXR)活性采用 ELISA 检测试剂盒测定,购自上海江莱生物科技有限公司。

1.4 土壤硝化势(N_p)测定

土壤 N_p 的测定采用好气培养法^[13]。将新鲜土壤样品简单风干,挑出大的结块和可见的作物残体,并过 2 mm 筛。培养瓶容积为 250 mL,每个培养瓶装过筛土壤样品 100 g,并均匀填充,使其表面平整。以 $106 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1}$ 烘干土重的比例加入 $25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液 2 mL,混匀后加入蒸馏水使土壤含水量至田间持水量的 60%,为避免水分快速流失,用保鲜膜封住培养瓶口,并用皮筋进行固定,用针头在保鲜膜上扎出 8 个小孔进行气体交换,之后对培养瓶进行称重并记录数据。将培养瓶放置在培养箱中,在 $25.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 避光培养 3 周。期间每 2~3 d 对其称重并根据重量补充水分,使土壤含水量保持在田间持水量的 60% 左右。培养结束后,对每个培养瓶土壤进行充分搅拌混合,之后采集土壤样品。分别对培养前简单风干土壤和培养后土壤进行 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量测定。每个样点土壤 N_p 测定均重复 3 次, N_p 计算公式如下:

$$N_p = \frac{\omega(\text{NO}_3^- \text{-N})_2 - \omega(\text{NO}_3^- \text{-N})_1}{t}$$

式中: N_p 为硝化势($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$); $\omega(\text{NO}_3^- \text{-N})_1$ 为培养前土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); $\omega(\text{NO}_3^- \text{-N})_2$ 为培养 21 d 后土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); t 为培养时间(d)。

1.5 数据处理

运用 SPSS 25 统计分析软件对不同盐渍化程度土壤 N_p 进行单因素方差分析,采用 Dunnett's T3 法对不同数据组进行差异显著性检验,采用 Kendall's tau-b 法对土壤基本理化性质和 N_p 进行相关性分析,运用 SPSS 25 统计分析软件,以 N_p 为因变量,土壤基本理化性质为自变量,进行多元逐步回归分析。利用 Excel 2016 软件作图。图中数据为平均值 \pm 标准误。

结构方程模型(SEM)为使用两个或多个因果方程来模拟多元关系,能将复杂的关系网络用图形

直观地表示,并检验各因素间的直接和间接关系^[14]。本研究结合土壤形成因素和土壤理化性质的相互关系,利用 Amos 软件建立土壤理化性质与土壤 N_p 的结构方程模型。

2 结果与分析

2.1 土壤 N_p 与土壤基本性质的描述性统计特征

由表 1 可以看出,土壤 pH 值在 8.02~9.30,变异系数为 3.1%,属于弱变异。除 pH 值外,所有指标变异系数均大于 10%,为中等变异或强变异,其中,电导率、 Cl^- 、 Na^+ 和 NO_3^- 变异性最强,属于强变异。

N_p 范围为 $0.04 \sim 10.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,平均为 $6.86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,样点间差异明显。根据美国土壤质地分类标准,东台农田土壤质地主要为沙壤土、粉壤土、壤土和粉黏壤土,东营农田土壤质地主要为粉壤土和粉黏土,少部分为沙壤和粉黏壤土,在所有样品中,沙壤土和粉壤土占比 60%。土壤电导率范围在 $0.10 \sim 6.91 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$,所取土壤中包含非盐化土壤、轻度盐化土壤、中度盐化土壤、强度盐化土壤和盐土。根据 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 可以区分不同盐渍化类型,其中, $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-} < 0.2$ 为硫酸盐型, $0.2 < \text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-} < 1.0$ 为氯化物-硫酸盐型, $1.0 < \text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-} < 2.0$ 为硫酸盐-氯化物型, $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-} > 2.0$ 为氯化物型。所取土壤中 34.9% 为氯化物-硫酸盐型土壤,33.7% 为硫酸盐-氯化物型土壤,30.1% 为氯化物型土壤,1 个样点为硫酸盐型土壤。

根据《耕地质量等级》(GB/T 33469—2016)^[15] 中区域耕地质量等级划分标准,东台地区按照长江中下游区耕地质量等级划分指标,东营地区按照黄淮海区耕地质量等级划分指标,对土壤有机质进行等级划分,东台地区只有一个采样点土壤有机质为 $15.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,大于 $15.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,其余全部小于 $15.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,处于九等、十等最低水平,土壤有机质匮乏。按照黄淮海区耕地质量等级划分指标,一、二、三等土壤有机质水平应在 $12.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,东营有 51.4% 的采样点符合要求,土壤有机质水平较高。氨单加氧酶(AMO)、羟胺氧化还原酶(HAO)和亚硝酸盐氧化还原酶(NXR)是硝化过程进行的催化剂,其活性平均分别为 3.58 、 1.85 、 $0.94 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$,最小值与最大值之间相差 2 倍左右,差异不明显。

2.2 不同盐渍化程度下土壤 N_p 特征

根据刘广明等^[16]对滨海盐渍土壤盐分与电导率的线性关系: $Y = 3.617X + 0.0199$ [Y 为盐分含量

表 1 土壤基本理化性质统计学特征

Table 1 Statistical characteristics of soil basic physical and chemical properties

项目 Item	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 SD	中位数 Median	变异系数 CV (%)
硝化势 Nitrification potential ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	0.04	10.42	6.86	2.00	7.21	29.1
物理指标 Physical indicator						
Cl (%)	7	54	20	14	12	72.0
Si (%)	21	73	49	11	51	22.0
Sa (%)	2	71	32	20	31	63.0
化学指标 Chemical indicator						
EC ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)	0.10	6.91	1.00	1.30	0.59	130.0
pH	8.02	9.30	8.65	0.27	8.63	3.1
$\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.07	0.89	0.30	0.18	0.21	61.8
Cl^- ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.04	11.18	1.20	2.03	0.48	169.1
SO_4^{2-} ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.01	1.78	0.57	0.34	0.49	59.9
Na^+ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.01	4.42	0.66	0.93	0.33	140.4
SOM ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	2.73	22.38	9.89	4.71	8.59	47.7
CEC ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	3.18	27.26	9.63	6.83	6.47	70.9
NH_4^+ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.48	14.70	3.60	2.68	2.68	74.4
NO_3^- ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.04	65.64	8.87	13.51	3.14	152.3
生物指标 Biological indicator						
MBC ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	7.07	319.09	92.26	79.67	66.42	86.4
MBN ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	2.96	91.87	28.52	25.31	19.16	88.7
AMO ($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$)	2.10	4.94	3.58	0.83	3.60	23.2
HAO ($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$)	1.14	2.53	1.85	0.41	1.88	22.0
NXR ($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$)	0.69	1.18	0.94	0.14	0.94	14.8

Cl: 黏粒 Clay; Si: 粉粒 Silt; Sa: 砂粒 Sand; EC: 电导率 Electric conductivity; SOM: 有机质 Soil organic matter; CEC: 阳离子交换量 Cation exchange capacity; MBC: 微生物生物量碳 Microbial biomass carbon; MBN: 微生物生物量氮 Microbial biomass nitrogen; AMO: 氨单加氧酶 Ammonia monooxygenase; HAO: 羟胺氧化还原酶 Hydroxylamine oxidoreductase; NXR: 亚硝酸盐氧化还原酶 Nitrite oxidoreductase. 下同 The same below.

($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), X 为电导率 ($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)] ,并结合《中国盐渍土》^[17] 中对滨海盐渍土壤盐渍化程度的分类,把所有样品根据电导率进行盐渍化程度分类: $\text{EC} < 0.27 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 为非盐化土壤, $0.27 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1} < \text{EC} < 0.55 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 为轻度盐化土壤, $0.55 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1} < \text{EC} < 1.10 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 为中度盐化土壤, $1.10 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1} < \text{EC} < 1.65 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 为强度盐化土壤, $\text{EC} > 1.65 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 为盐土。在 83 个土壤样品中,非盐化土壤 18 个,轻度盐化土壤 23 个,中度盐化土壤 23 个,强度盐化土壤 6 个,盐土 13 个。

按照狄克逊准则对数据异常值进行检测和剔除后,得出不同盐渍化程度土壤 N_p 的分布情况(图 2)。由于数据方差齐性检验显著性小于 0.05,各水平不满足方差齐性,所以单因素方差分析使用 Dunnett's T3 法。随着土壤盐渍化程度加剧, N_p 呈降低趋势,其中轻度盐渍化土壤和盐土 N_p 显著低于非盐渍化土壤 N_p ,中度和强度盐渍化土壤与非盐渍化土壤 N_p 无显著性差异,轻度、中度、强度盐渍化土壤和盐土相互之间无显著差异。盐土 N_p 平均值低于轻度、中度、强度盐渍化土壤,强度盐渍化土壤 N_p 平均值低于轻度和中度盐渍化土壤 N_p 平均值,轻度和中度盐渍化土壤 N_p 平均值之间差异相对较小。

2.3 影响土壤 N_p 的环境因素

对土壤 N_p 、黏粒、粉粒等 17 组数据进行正态分

布检验,只有粉粒和 pH 组数据满足正态分布,其他组数据进行简单转换后仍然为非正态分布,所以采用 Kendall's tau-b 方法^[18] 对所有数据进行相关性分析。从表 2 可以看出, N_p 与土壤黏粒、有机质、阳离子交换量和微生物生物量氮呈极显著正相关关系,与砂粒、电导率、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量呈极显著负相关关系,与粉粒含量、pH 值、 $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ 含量、 Na^+ 含量、微生物生物量碳、AMO、HAO、NXR 活性无相关关系。土壤理化指标中,有机质、阳离子交换量和 Cl^- 含量与土壤 N_p 的相关性最强,但是土壤有机质

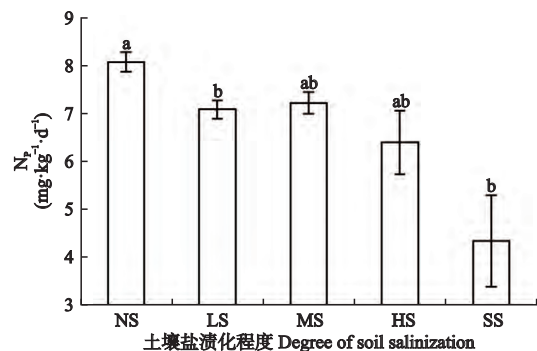


图 2 不同盐渍化土壤硝化势

Fig.2 Nitrification potential of different saline soils.

N_p : 硝化势 Nitrification potential. 下同 The same below. NS: 非盐化土壤 Non-salinized soil; LS: 轻度盐渍化土壤 Lightly salinized soil; MS: 中度盐渍化土壤 Moderately salinized soil; HS: 强度盐渍化土壤 Highly salinized soil; SS: 盐土 Saline soil. 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters meant significant difference at 0.05 level.

表 2 土壤 N_p 与土壤基本理化性质之间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between soil nitrification potential and basic physical and chemical properties of soil

	Si	Sa	EC	pH	$CO_3^{2-}+HCO_3^-$	Cl^-	SO_4^{2-}	Na^+	SOM	CEC	MBC	MBN	AMO	HAO	NXR	N_p
Clay	0.369**	-0.832**	-0.214**	0.285**	0.741**	-0.235**	-0.278**	-0.127*	0.601**	0.788**	0.434**	0.424**	0.012	-0.081	-0.004	0.321**
Si		-0.537**	0.082	-0.023	0.249**	0.096	0.034	0.124	0.240**	0.317**	0.212**	0.119	-0.145	0.016	-0.097	0.165*
Sa			0.179**	-0.206**	-0.651**	0.195**	0.242**	0.087	-0.594**	-0.746**	-0.466**	-0.422**	0.053	0.094	0.013	-0.310**
EC				-0.219**	-0.313**	0.910**	0.697**	0.855**	-0.370**	-0.237**	-0.183**	-0.357**	-0.066	0.045	-0.076	-0.321**
pH					0.411**	-0.216**	-0.326**	-0.103	0.089	0.201**	0.066	0.098	0.153*	-0.039	0.043	0.074
$CO_3^{2-}+HCO_3^-$						-0.330**	-0.396**	-0.206**	0.524**	0.654**	0.357**	0.408**	0.032	-0.074	0.025	0.277**
Cl^-							0.648**	0.833**	-0.387**	-0.255**	-0.221**	-0.394**	-0.061	0.054	-0.084	-0.337**
SO_4^{2-}								0.617**	-0.335**	-0.281**	-0.162*	-0.297**	-0.048	0.049	-0.022	-0.312**
Na^+									-0.293**	-0.150*	-0.145*	-0.309**	-0.057	0.032	-0.055	-0.276**
SOM										0.658**	0.441**	0.518**	-0.043	-0.122	0.051	0.409**
CEC											0.486**	0.484**	0.015	-0.116	0.010	0.397**
MBC												0.552**	-0.009	-0.118	0.138*	0.292**
MBN													0.075	-0.117	0.094	0.309**
AMO														-0.120	-0.015	-0.007
HAO															-0.009	-0.025
NXR																-0.029

N_p : 硝化势 Nitrification potential. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

与阳离子交换量和 Cl^- 含量同样呈显著相关, 存在间接影响的可能。作为硝化过程正常进行必须的 AMO、HAO 和 NXR 与 N_p 无显著相关关系, 这可能是因为酶活性测定选取培养前土壤, 而培养前土壤的硝化酶活性较低, 培养期间硝化过程的正常进行是土壤微生物快速分泌相关酶的结果, 培养前土壤的硝化酶活性对培养期间硝化过程的影响很小。

通过相关性分析可以发现, 土壤 N_p 的影响因素较多, 由于各项指标之间也会有相关关系, 因此无法分辨各项指标对 N_p 是直接还是间接影响。通过多元逐步回归分析可以筛选出影响土壤 N_p 的主要因子。土壤 N_p 与 Na^+ 、粉粒、阳离子交换量、 $CO_3^{2-}+HCO_3^-$ 的回归方程为: $N_p = 5.493 - 1.702Na^+ + 0.047Si + 0.153CEC - 4.231(CO_3^{2-} + HCO_3^-)$ ($R^2 = 0.717$, $P < 0.01$), 表明 Na^+ 、粉粒、阳离子交换量、 $CO_3^{2-}+HCO_3^-$ 为 N_p 的主要影响因子。4 个自变量的 β 值分别为 -0.792 、 0.251 、 0.522 、 -0.391 , 通过对比 β 值的绝对值, 土壤性质对土壤 N_p 的影响从大到小依次为 Na^+ 、阳离子交换量、 $CO_3^{2-}+HCO_3^-$ 、粉粒。与表 2 的相关性分析结果进行对比发现, 除阳离子交换量外, Na^+ 、粉粒和 $CO_3^{2-}+HCO_3^-$ 在相关性分析中均与土壤 N_p 无显著性相关关系, 这可能是受到多组具有显著相关指标的共同影响, 相关性系数相互抵消的结果。相关性分析中, Na^+ 与电导率、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和微生物生物量氮呈显著相关, 其中与电导率、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 呈显著正相关, 与微生物生物量氮呈显著负相关; 粉粒与黏粒、阳离子交换量呈显著正相关, 与砂粒呈显

著负相关; 阳离子交换量与黏粒、有机质、微生物生物量氮呈显著正相关, 与砂粒呈显著负相关; $CO_3^{2-}+HCO_3^-$ 与黏粒、有机质、阳离子交换量、微生物生物量氮呈显著正相关, 与砂粒、电导率、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量呈显著负相关。土壤黏粒、有机质、微生物生物量氮、砂粒、电导率、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 可能是通过 Na^+ 、粉粒、阳离子交换量、 $CO_3^{2-}+HCO_3^-$ 对 N_p 产生间接影响。

2.4 土壤 N_p 与土壤理化性质的结构方程模型

结构方程模型可以使土壤环境因素与土壤 N_p 之间的关系可视化, 并能计算出各关系间的相关系数。对相关分析和回归分析筛选出的影响因子 (Na^+ 、粉粒、阳离子交换量、 $CO_3^{2-}+HCO_3^-$ 等) 进行模型假设, 初始模型中假设土壤物理性质、化学性质通过影响相关微生物的活性间接对 N_p 产生影响, 模型估计方法使用广义最小二乘法 (generalized least squares) [19]。对模型进行修订检验, 剔除无显著作用且无重要实际意义的路径, 结果如图 3 所示。该模型的近似均方根误差 ($RMSEA = 0.000 < 0.05$) 和 χ^2 自由度之比 ($\chi^2/df = 0.796 < 3$) 表明, 观测数据与模型拟合较好。

由图 3 可知, N_p 受 $CO_3^{2-}+HCO_3^-$ 、 Na^+ 、粉粒和阳离子交换量的直接影响, 其中, $CO_3^{2-}+HCO_3^-$ 和 Na^+ 对 N_p 有显著负效应, 通径系数分别为 -0.38 和 -0.78 , 粉粒和阳离子交换量对 N_p 具有显著正向作用, 通径系数分别为 0.25 和 0.55 。但是微生物生物量氮、微生物生物量碳、AMO、HAO 和 NXR 对 N_p 无

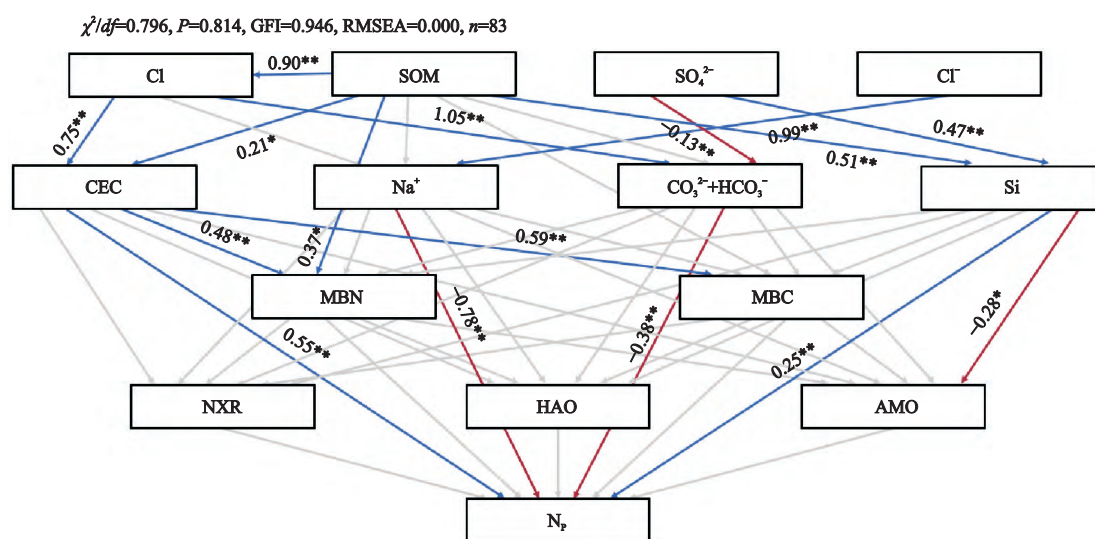


图3 土壤环境因子对硝化势影响的结构方程模型(SEM)

Fig.3 Structural equation model (SEM) of effects of soil environmental factors on nitrification potential.

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

显著影响。有机质、黏粒、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 对 N_p 具有间接影响,并且间接影响路径非唯一,如黏粒一方面通过影响阳离子交换量来间接影响 N_p ,另一方面也通过 $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ 来间接影响 N_p 。因此,各土壤基本性质对 N_p 的影响应按结构方程模型综合所有直接效应与间接效应进行综合评价。黏粒通过阳离子交换量和 $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ 对土壤 N_p 的间接效应分别为 0.4125 和 -0.399,总效应为 0.0135; SO_4^{2-} 通过粉粒和 $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ 对土壤 N_p 的间接效应分别为 0.1175 和 0.0494,总效应为 0.1669;有机质对土壤 N_p 影响的路径较为复杂,总效应为 0.25515。 Cl^- 与 Na^+ 之间的路径系数为 0.99, Na^+ 对 N_p 的负效应主要是 NaCl 的作用, NaCl 对土壤 N_p 的总效应为 -0.7722。在对 N_p 产生负效应的指标中,影响从大到小依次为 Na^+ 、 Cl^- 、 $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$,产生正效应的指标中,影响从大到小依次为阳离子交换量、有机质、粉粒、 SO_4^{2-} 、黏粒。

3 讨 论

3.1 不同盐渍化农田土壤硝化势

随着土壤盐渍化程度加深,土壤 N_p 呈降低趋势,硝化作用减弱,这与 Akhtar 等^[20]的研究结果一致。与非盐渍化土壤相比,轻度和中度盐渍化土壤硝化作用减弱,主要是由于盐分对氨氧化细菌(AOB)、氨氧化古菌(AOA)和硝化细菌(NO_B)的丰度产生抑制^[21-22],且对 NO_B 的抑制强度大于对 AOA 和 AOB 的抑制强度^[23]。高度盐渍化土壤和盐

土硝化作用减弱主要是由于盐分对 AOB 有更强的抑制作用^[24]。土壤养分和微生物结构、丰度的差异性使较高土壤盐分土壤的 N_p 水平可能高于低盐分土壤。其原因可能包括以下两点:一方面,盐分并非是影响土壤 N_p 的唯一因素,通过改变土壤其他性质可以提高土壤微生物丰度和活性^[25-26],进而降低盐分对土壤 N_p 的抑制效果;另一方面,土壤微生物群落组成的差异性导致不同土壤对盐分升高的响应不同。如 Zeng 等^[27]和 Zhou 等^[28]对红壤和河口沉积物的研究表明,较低的盐分对硝化作用具有促进作用,高于盐分阈值对硝化作用产生抑制作用。

3.2 滨海盐渍农田土壤 N_p 的驱动因素

关于土壤理化性质对硝化作用的影响目前已有较多研究。Li 等^[29]对全球硝化数据的分析表明,土壤硝化率随年均温度、全氮、微生物生物量碳氮、铵态氮和 pH 值的增加而增加,随土壤碳氮比和微生物生物量碳氮比的增加而降低。刘君政等^[30]对我国总硝化速率的研究表明,pH 值是北方土壤硝化作用的主要影响因素,土壤铵态氮是南方土壤硝化作用的主要影响因子。王萍萍等^[31]研究表明,在潮土土壤中微生物生物量碳氮、硝态氮、总氮是土壤硝化作用的主要影响因素。在不同区域尺度上硝化作用的驱动因素具有很大差别。本研究中,东营和东台两地盐渍土硝化势的主要影响因子基本相同,硝化作用与土壤有机质、阳离子交换量和 Cl^- 的相关性最强,其中,有机质和阳离子交换量与 N_p 具有显著正相关关系, Cl^- 与 N_p 具有显著负相关关系。土壤

有机质作为微生物的能量物质,其不同类型的含量会影响 AOA 和 AOB 的群落丰度,如 AOA 群落在可溶性有机质含量高的土壤中可快速生长^[32]。阳离子交换量体现了土壤对阳离子的吸附性能以及对肥力的缓冲性能,其对硝化作用的影响机制暂不明确,但很多研究均发现,阳离子交换量与硝化作用具有显著相关性^[33-34]。刘敏等^[35]对不同类型农田土壤研究时也发现,土壤有机质和阳离子交换量与硝化作用密切相关。 Cl^- 在滨海盐渍农田土壤中主要以氯化钠的形式存在,为土壤盐分的主要形式之一,已有研究表明,与施加尿素和硫酸铵相比,施加氯化铵延缓了土壤的硝化作用, Cl^- 对 AOB 的 *amoA* 功能基因拷贝数具有显著抑制作用^[36]。

本研究结构方程模型分析表明, Na^+ 、 Cl^- 和 $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ 是抑制盐渍土硝化作用的主要因子。前人研究发现,灌溉含有 NaCl 和 CaCl_2 的盐水能显著降低土壤 AOA 和 AOB 的 *amoA* 功能基因拷贝数,降低土壤的 N_p ^[21];Duan 等^[37]通过对土壤添加氯化钠发现了同样的结果。阳离子交换量、粉粒、有机质、 SO_4^{2-} 、黏粒均对土壤硝化作用具有促进作用,其中阳离子交换量和粉粒对 N_p 具有直接影响。刘敏等^[35]研究也发现,阳离子交换量和黏粒对 N_p 有正向效应。土壤 SO_4^{2-} 含量的增加可以促进氨基酸、维生素、硫脂和其他几种必需有机化合物的微生物合成,降低微生物细胞内外的渗透压,减少盐分的危害,并且添加 Na_2SO_4 可以使土壤硝化率提高 23.8%,而添加 NaCl 则使土壤硝化率降低 44.0%^[38]。

4 结 论

灌溉和地下水导致的盐分变化和人工土壤管理措施的多样性,使得滨海盐渍农田土壤物理、化学、生物指标具有强烈的空间变异性,同时造成了土壤硝化潜力的差异化。随着土壤盐渍化程度加深,土壤硝化潜力整体呈降低趋势,其中,土壤盐分含量的升高为主要原因,土壤盐分中氯化钠和重碳酸盐对硝化过程产生抑制作用,土壤阳离子交换量和有机质含量的降低进一步抑制了硝化过程。土壤盐渍化程度加深过程中并非所有物质都朝着抑制硝化过程的方向变化,随盐渍化程度加深,硫酸盐含量升高,而硫酸盐对盐渍农田土壤硝化过程具有促进作用,且随着电导率增加,重碳酸盐含量降低,其抑制作用减弱。

参考文献

[1] Giacometti C, Mazzon M, Cavani L, et al. A nitrifica-

- tion inhibitor, nitrapyrin, reduces potential nitrate leaching through soil columns treated with animal slurries and anaerobic digestate. *Agronomy*, 2020, **10**: 865
- [2] Giltrap DL, Kirschbaum MUF, Liang LYL. The potential effectiveness of four different options to reduce environmental impacts of grazed pastures: A model-based assessment. *Agricultural Systems*, 2021, **186**: 102960
- [3] Castellano-Hinojosa A, Gonzalez-Lopez J, Vallejo A, et al. Effect of urease and nitrification inhibitors on ammonia volatilization and abundance of N-cycling genes in an agricultural soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2020, **183**: 99-109
- [4] Wu D, Zhang YX, Dong G, et al. The importance of ammonia volatilization in estimating the efficacy of nitrification inhibitors to reduce N_2O emissions: A global meta-analysis. *Environmental Pollution*, 2021, **271**: 116365
- [5] Osburn ED, Barrett JE. Abundance and functional importance of complete ammonia-oxidizing bacteria (comammox) versus canonical nitrifiers in temperate forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, **145**: 107801
- [6] 李红强,姚荣江,杨劲松,等.盐渍化对农田氮素转化过程的影响机制和增效调控途径.应用生态学报,2020,**31**(11):3915-3924
- [7] 徐婷婷,郑俊强,韩士杰,等.长白山阔叶红松林土壤氮转化过程对长期施氮和降水变化的响应.应用生态学报,2018,**29**(9):2797-2807
- [8] Cai FF, Luo PY, Yang JF, et al. Effect of long-term fertilization on ammonia-oxidizing microorganisms and nitrification in brown soil of northeast China. *Frontiers in Microbiology*, 2021, **11**: 622454
- [9] Zhang Q, Li Y, He Y, et al. Nitrosospira cluster 3-like bacterial ammonia oxidizers and nitrospira-like nitrite oxidizers dominate nitrification activity in acidic terrace paddy soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, **131**: 229-237
- [10] Gao SJ, Zhou GP, Liao YL, et al. Contributions of ammonia-oxidising bacteria and archaea to nitrification under long-term application of green manure in alkaline paddy soil. *Geoderma*, 2020, **374**: 114419
- [11] Zhong WH, Cai ZC, Zhang H. Effects of long-term application of inorganic fertilizers on biochemical properties of a rice-planting red soil. *Pedosphere*, 2007, **17**: 419-428
- [12] 吴克宁,赵瑞.土壤质地分类及其在我国应用探讨.土壤学报,2019,**56**(1):227-241
- [13] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法.北京:中国农业科技出版社,1999:22-290
- [14] Eisenhauer N, Bowker MA, Grace JB, et al. From patterns to causal understanding: Structural equation modeling (SEM) in soil ecology. *Pedobiologia*, 2015, **58**: 65-72
- [15] 中华人民共和国国家标准.耕地质量等级[EB/OL].(2016-12-30)[2021-12-18].<http://c.gb688.cn/bzgk/gb/showGb?type=online&hcno=7A4B6AOE4-EB682326EFF26C338F10698>

- [16] 刘广明, 杨劲松, 姜艳. 江苏典型滩涂区地下水及土壤的盐分特征研究. *土壤*, 2005, **37**(2): 163-168
- [17] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土. 北京: 科学出版社, 1993: 130-136
- [18] 卢纹岱. SPSS for Windows 统计分析. 北京: 电子工业出版社, 2006: 267-280
- [19] 吴明隆. 结构方程模型——方法与实务应用. 重庆: 重庆大学出版社, 2009: 24-27
- [20] Akhtar M, Hussain F, Ashraf MY, *et al.* Influence of salinity on nitrogen transformations in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2012, **43**: 1674-1683
- [21] Guo HJ, Ma LJ, Liang YC, *et al.* Response of ammonia-oxidizing bacteria and archaea to long-term saline water irrigation in alluvial grey desert soils. *Scientific Reports*, 2020, **10**: 489
- [22] Li XR, Xiao YP, Ren WW, *et al.* Abundance and composition of ammonia-oxidizing bacteria and archaea in different types of soil in the Yangtze River estuary. *Journal of Zhejiang University-Science B*, 2012, **13**: 769-782
- [23] Li YW, Xu JZ, Liu XY, *et al.* Nitrification inhibitor DMPP offsets the increase in N₂O emission induced by soil salinity. *Biology and Fertility of Soils*, 2020, **56**: 1211-1217
- [24] 周慧, 史海滨, 张文聪, 等. 有机无机氮配施对不同程度盐渍土硝化和反硝化作用的影响. *环境科学*, 2021, **42**(10): 5010-5020
- [25] Yao RJ, Yang JS, Wang XP, *et al.* Response of soil characteristics and bacterial communities to nitrogen fertilization gradients in a coastal salt-affected agroecosystem. *Land Degradation & Development*, 2021, **32**: 338-353
- [26] Yao RJ, Yang JS, Zhu W, *et al.* Impact of crop cultivation, nitrogen and fulvic acid on soil fungal community structure in salt-affected alluvial fluvo-aquic soil. *Plant and Soil*, 2021, **464**: 539-558
- [27] Zeng WZ, Xu C, Wu JW, *et al.* Effect of salinity on soil respiration and nitrogen dynamics. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 2013, **20**: 519-530
- [28] Zhou MH, Butterbach-Bahl K, Vereecken H, *et al.* A meta-analysis of soil salinization effects on nitrogen pools, cycles and fluxes in coastal ecosystems. *Global Change Biology*, 2017, **23**: 1338-1352
- [29] Li ZL, Zeng ZQ, Tian DS, *et al.* Global patterns and controlling factors of soil nitrification rate. *Global Change Biology*, 2020, **26**: 4147-4157
- [30] 刘君政, 王鹏, 肖汉玉, 等. 中国陆地生态系统土壤氮矿化速率和硝化速率及影响因素——基于文献数据的统计分析. *生态学报*, 2020, **40**(12): 4207-4218
- [31] 王萍萍, 段英华, 徐明岗, 等. 不同肥力潮土硝化潜势及其影响因素. *土壤学报*, 2019, **56**(1): 124-134
- [32] Wessen E, Nyberg K, Jansson JK, *et al.* Responses of bacterial and archaeal ammonia oxidizers to soil organic and fertilizer amendments under long-term management. *Applied Soil Ecology*, 2010, **45**: 193-200
- [33] Shan ZJ, Yin Z, Yang H, *et al.* Long-term cultivation of fruit plantations decreases mineralization and nitrification rates in calcareous soil in the karst region in Southwestern China. *Forests*, 2020, **11**: 1282
- [34] Xie Y, Yang L, Zhu TB, *et al.* Rapid recovery of nitrogen retention capacity in a subtropical acidic soil following afforestation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **120**: 171-180
- [35] 刘敏, 刘爱菊, 李梦红, 等. 土壤理化性质与土壤硝化势相关性研究. *山东理工大学学报: 自然科学版*, 2012, **26**(5): 100-103
- [36] 赵伟焯, 王智慧, 曹彦强, 等. 石灰性紫色土硝化作用及硝化微生物对不同氮源的响应. *土壤学报*, 2018, **55**(2): 479-489
- [37] Duan M, House J, Liu Y, *et al.* Contrasting responses of gross and net nitrogen transformations to salinity in a reclaimed boreal forest soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, **54**: 385-395
- [38] Jia J, Bai JH, Gao HF, *et al.* Different effects of NaCl and Na₂SO₄ on soil net nitrogen mineralization in coastal wetlands. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **199**: 110678

作者简介 李红强, 男, 1997年生, 硕士研究生。主要从事盐渍农田养分循环过程及其生态效应研究。E-mail: hongqiangl@163.com

责任编辑 宇万太

责任编辑 张凤丽
