

酸化对水稻-土壤系统氮分配和 N_2O 排放的影响

张宗祥, 李华玮, 尚文鼎, 曹传莉, 孙梦雨, 李笑笑, 董召荣, 宋贺

引用本文:

张宗祥, 李华玮, 尚文鼎, 曹传莉, 孙梦雨, 李笑笑, 董召荣, 宋贺. 酸化对水稻-土壤系统氮分配和 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(2): 452-461.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0586>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

清液肥对滴灌棉田 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响

王方斌, 刘凯, 殷星, 廖欢, 孙嘉璘, 闵伟, 侯振安

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2354-2362 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0067>

有机无机肥配施对苹果园温室气体排放的影响

马艳婷, 赵志远, 冯天宇, SOMPOUVISETThongsouk, 孔旭, 翟丙年, 赵政阳

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 2039-2048 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1477>

包膜/抑制剂联合调控对农田土壤 N_2O 排放和氨挥发的影响

巴闯, 杨明, 邹洪涛, 蒋一飞, 王丹蕾, 陈松岭, 虞娜, 张玉玲

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1291-1299 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1538>

水氮耦合对设施土壤 N_2O 和 NO 排放的影响

吕金东, 张丽媛, 虞娜, 邹洪涛, 张玉玲, 张玉龙

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1366-1376 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1217>

巢湖圩区再生稻田甲烷及氧化亚氮的排放规律研究

王天宇, 樊迪, 宋开付, 张广斌, 徐华, 马静

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1829-1838 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0181>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张宗祥, 李华玮, 尚文鼎, 等. 酸化对水稻-土壤系统氮分配和 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(2): 452–461.

ZHANG Z X, LI H W, SHANG W D, et al. Effects of acidification on nitrogen allocation in rice-soil system and N_2O emission[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(2): 452–461.



开放科学 OSID

酸化对水稻-土壤系统氮分配和 N_2O 排放的影响

张宗祥, 李华玮, 尚文鼎, 曹传莉, 孙梦雨, 李笑笑, 董召荣, 宋贺*

(农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室/安徽农业大学农学院, 合肥 230036)

摘要:为研究土壤酸化对水稻-土壤系统氮转化、分配和氮损失的影响,以水稻-土壤系统为研究对象,设置中性(pH 7, CK)、弱酸(pH 6, T1)、中强酸(pH 5, T2)和强酸(pH 4, T3)4个土壤递增酸度处理,比较了不同酸度下水稻产量、氮素积累量、氮代谢酶活性、氮素利用效率、氮平衡和 N_2O 排放等指标的差异。结果表明,随着土壤酸度增加,水稻植株氮素积累、利用效率和产量呈现先增加后降低的趋势。相关性分析表明,拔节期氮素积累量与叶片中硝酸还原酶(NR)、谷氨酰胺合成酶(GS)、谷氨酸合成酶(GOGAT)和谷氨酸脱氢酶(GDH)以及茎秆中GS和GOGAT活性呈显著正相关;开花期氮素积累量与穗中的NR、GS、GOGAT和GDH活性呈显著正相关。T1、T2和T3处理 N_2O 累积排放量与CK处理相比分别降低20.3%、58.0%和76.7%;单位产量下的 N_2O 排放量呈现递减的趋势。氮平衡分析表明,相比于CK处理,T2和T3处理氮素表观损失分别降低15.8%和21.1%,水稻氮吸收量分别降低1.5%和15.3%,土壤无机氮残留量分别增加41.2%和88.2%,氮素盈余率分别提高2.2个和7.1个百分点。土壤酸化至中强酸和强酸时,会分别通过抑制水稻拔节期茎叶和开花期穗部的氮代谢过程降低氮素积累量、利用效率和产量。土壤酸化会降低稻田 N_2O 累积排放量,同时也会降低单位产量 N_2O 排放量。此外,中强酸和强酸度土壤还会通过降低水稻氮吸收量和增加播前土壤无机氮量,提高土壤无机氮残留量和氮素盈余率,增加环境风险。

关键词:土壤酸化;水稻;氮素利用效率;产量; N_2O ;土壤氮平衡

中图分类号:S154.4;S156.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)02-0452-10 doi:10.11654/jaes.2023-0586

Effects of acidification on nitrogen allocation in rice-soil system and N_2O emission

ZHANG Zongxiang, LI Huawei, SHANG Wending, CAO Chuanli, SUN Mengyu, LI Xiaoxiao, DONG Zhaorong, SONG He*

(Anhui Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention and Control/College of Agriculture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: Soil acidification is a significant factor constraining rice production in China. Severe soil acidification can lead to imbalance in crop-soil nitrogen (N) transformation, which reduces rice yields and increases environmental risks. However, there is a lack of systematic research related to the impact of soil acidification on N transformation, allocation, and N losses in rice-soil systems. In this study, rice-soil systems with four soil acidity treatments were investigated: neutral (pH 7, CK), weakly acidic (pH 6, T1), moderately acidic (pH 5, T2), and strongly acidic (pH 4, T3). Differences in rice yield, N accumulation, N metabolic enzyme activities, N use efficiency, N balance, and nitrous oxide (N_2O) emissions were compared. With increasing soil acidity, N accumulation, utilization efficiency, and yield of rice plants displayed trends of increase followed by decrease. Correlation analysis indicated that N accumulation at the jointing stage was significantly positively correlated with the activities of nitrate reductase (NR), glutamine synthetase (GS), glutamate synthetase (GOGAT), and

收稿日期:2023-07-21 录用日期:2023-11-19

作者简介:张宗祥(1997—),男,安徽宿州人,硕士研究生,主要从事耕作与农业生态系统研究。E-mail:zhangzongxinag@ahau.edu.cn

*通信作者:宋贺 E-mail:songhevip@163.com

基金项目:安徽省高等学校科学研究项目(2022AH050876);安徽农业大学人才科研资助项目(rc312104);农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室开放基金项目(FECP202202);沿淮气候智慧型稻麦系统丰产栽培技术研发项目(FYHT20230036)

Project supported: Scientific Research Project of Anhui Higher Education Institutions (2022AH050876); Anhui Agricultural University Talent Research Grant Program (rc312104); Open Fund Project of Anhui Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention and Control (FECP202202); Research and Development Project on Cultivation Technology of Climate-Smart Rice and Wheat Systems Along the Huaihuai River (FYHT20230036)

glutamate dehydrogenase (GDH) in leaves, as well as GS and GOGAT activities in stems. Similarly, N accumulation at the flowering stage was significantly positively correlated with NR, GS, GOGAT, and GDH activities in panicles compared to the CK treatment. N₂O cumulative emissions in the T1, T2, and T3 treatment groups were reduced by 20.3%, 58.0%, and 76.7%, respectively. The N₂O emissions per unit yield exhibited a decreasing trend followed by an increase. N balance analysis showed that, compared with CK, the apparent loss of N in the T2 and T3 treatments was reduced by 15.8% and 21.1%, respectively; rice N uptake was reduced by 1.5% and 15.3%, respectively; soil inorganic N residue was increased by 41.2% and 88.2%, and the N surplus rate was increased by 2.2 and 7.1 percentage points, respectively. When soil acidification develops to moderately and strongly acidity levels, it could reduce N accumulation, utilization efficiency, and yield by inhibiting N metabolism processes in the stem and leaves at the nodulation stage, and in the panicles at the flowering stage, respectively. Soil acidification reduced cumulative N₂O emissions and N₂O emission per unit yield. In addition, moderately and strongly acidity level soils raised environmental risks by reducing rice N uptake and increasing pre-planting soil inorganic N content, leading to higher soil inorganic N residue and N surplus rates.

Keywords: soil acidification; rice; N use efficiency; yield; N₂O; soil N balance

土壤酸化是制约我国粮食生产的重要因素^[1]。受氮肥过量施用和大气酸沉降的影响,我国农田土壤酸化情况日益严重^[2-3]。20世纪80年代以来,酸化的土地面积已扩大到全国耕地面积的40%以上^[4],其中,稻田土壤酸化问题尤为突出。我国南方稻区,大部分土壤pH已经低于5.5,且酸化面积与强度仍在不断加剧^[5-6]。土壤酸化会造成土壤质量下降、保肥供肥能力变差和有害金属含量增加,进而导致水稻生长发育受阻和产量下降^[7]。作为土壤酸化重要诱因,氮在水稻-土壤系统中的转化和利用效率,在一定程度上决定着土壤酸化的程度^[8]。同时,土壤酸化的程度又会反过来影响氮在水稻-土壤系统中的转化^[9]。氮是影响水稻生长和产量最重要的营养物质之一,也是导致水体富营养化和全球气候变暖的主要元素^[10]。因此,探究土壤酸化对水稻-土壤系统氮素转化和分配的影响,对促进水稻可持续生产、提高氮素利用效率以及降低环境污染和温室气体排放具有重要意义。

氮素在水稻-土壤系统中的转化主要包括植株氮代谢和土壤氮转化。植株氮代谢主要包括氮素的吸收、转运、同化和转化等过程。硝态氮(NO₃⁻)和铵态氮(NH₄⁺)是植物吸收的主要氮源。在硝酸还原酶(NR)的催化下,NO₃⁻被还原为NH₄⁺,然后通过谷氨酰胺合成酶/谷氨酸合成酶(GS/GOGAT)途径,或在谷氨酸脱氢酶(GDH)的作用下被同化为氨基酸,为植物提供所需的氮源^[11-12]。前人研究发现,土壤酸化会使小麦NR与GOGAT活性降低,并抑制游离氨基酸的合成^[13]。但也有研究认为,土壤酸化会提高玉米植株NR、GDH和GOGAT的活性,以便产生更多的游离氨基酸、可溶性蛋白等渗透调节物质以抵御酸胁迫^[14]。可见,土壤酸化对作物氮代谢的影响并不明晰。目前酸化对氮代谢的影响研究主要于小麦、玉米等旱地作

物,对水稻等水田作物研究尚未见报道^[15]。同时,前人研究通常关注酸化对作物某一时期或整个植株氮代谢的影响,但对不同时期与植株关键器官的综合研究较少。

土壤氮转化主要包括矿化、硝化和反硝化过程。作为土壤氮转化过程的副产品,氧化亚氮(N₂O)既是一种重要的温室气体,也是大气臭氧层的主要破坏因子^[16]。N₂O排放量在一定程度上能够反映出土壤氮转化强度^[17]。研究发现,土壤酸化会导致硝化和反硝化微生物活性降低,进而造成N₂O排放下降^[18]。但也有研究表明,土壤pH的降低可能会促进N₂O的产生。这主要是因为相比于中性和碱性土壤,酸性条件会减少N₂O的消耗^[19]。可见,目前土壤酸化对N₂O排放的影响还存在争议。且前人研究主要集中于旱地,缺乏酸化对水田N₂O排放的研究。土壤酸化对水稻-土壤系统的氮转化产生的影响会进一步改变系统的氮平衡。

本研究以水稻-土壤系统为研究对象,设置4个土壤递增酸度处理,通过比较不同土壤酸度下水稻产量、氮素积累量、氮代谢酶活性、氮素利用效率、土壤氮平衡和N₂O排放等指标的差异,旨在明确土壤酸化对水稻-土壤系统氮分配和N₂O排放的影响,为我国南方水稻绿色低碳生产提供合理的土壤pH范围。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与供试材料

试验于2018年3月27日至7月25日在安徽省合肥市安徽农业大学农萃园试验基地(31°52' N, 117°14' E)进行。该试验基地位于亚热带湿润季风区,年均温度和降水量分别为15.3℃和998 mm。供试水稻品种为中早25。供试土壤为黄褐土源水稻土,基础理化性质为:有机质16.22 g·kg⁻¹,全氮1.20 g·kg⁻¹,碱

解氮 114.67 mg·kg⁻¹, 有效磷 8.20 mg·kg⁻¹, 速效钾 144.42 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计与田间管理

试验采用裂区设计, 主区为土壤酸度, 设置4个酸度水平, 分别为CK(pH 7)、T1(pH 6)、T2(pH 5)和T3(pH 4); 副区为氮肥处理, 分别为施氮和不施氮处理。参照Chen等^[20]方法对土壤pH值进行调节: 以6、9、12 mol·L⁻¹共3个浓度的HCl溶液与6 mol·L⁻¹的Ca(OH)₂溶液对土壤pH进行调节。每次调节后, 隔7 d测定一次土壤pH值, 直到土壤酸度为设定酸度并稳定后不再调整。每个处理15个重复, 每桶装土17 kg。施氮处理中, 氮肥采用尿素作为肥源, 施用量为232.5 kg·hm⁻²(以N计), 按照6:4的比例分别作基肥和追肥施用。磷肥(以P₂O₅计)和钾肥(以K₂O计)分别采用过磷酸钙和硫酸钾为肥源, 施用量分别为84.2 kg·hm⁻²和138.3 kg·hm⁻², 作基肥一次性施入。水稻于3月27日采用育秧盘培育秧苗, 4月29日进行移栽, 每桶3穴、每穴2株, 最终于7月25日收获。在返青期盆栽保持2~3 cm的水层, 分蘖期盆栽保持1~2 cm的薄水, 6月7日晒田3 d后覆水, 孕穗期至抽穗期盆栽水面保持2~3 cm的水层, 抽穗后田间自然落干再进行覆水, 为干湿交替覆水。盆栽埋于土壤中使得盆栽与大田环境相近, 其他管理条件与田间管理一致。

1.3 样品采集与分析

1.3.1 产量与产量构成因子

于成熟期在每个处理中随机选取3桶盆栽, 并对有效穗数、穗粒数、千粒质量和结实率进行测定。

1.3.2 氮代谢酶活性测定

分别于水稻拔节期和开花期在每个处理3桶盆栽中随机选取10株单茎, 用锡纸包裹后放置于液氮罐中保存并带回实验室。将植株分为叶片、茎秆(鞘)和穗(开花期)三部分后分别切碎混匀, 用于氮代谢酶活性的测定。参照伍素辉等^[21]的方法测定硝酸还原酶(NR)活性。谷氨酰胺合成酶(GS)和谷氨酸合成酶(GOGAT)分别参照Zhang等^[22]和U Hecht等^[23]的方法测定。谷氨酸脱氢酶(GDH)活性使用试剂盒(南京建成生物工程研究所)测定。

1.3.3 N₂O的采集与测定

采用静态箱-色谱法对N₂O气体进行采集和测定。静态箱分为底座和采样箱两部分, 柱形底座半径为15 cm, 高度为10 cm。柱形采样箱半径为14 cm, 高度为90 cm。水稻移栽后每隔7 d采样1次。采样

时, 在底座上扣好采样箱, 用50 mL注射器先将箱体内气体混匀, 后于0、7、14 min和21 min各抽取气体20 mL, 带回实验室用气相色谱仪(Agilent 7890A, 美国)测定N₂O含量。抽取气体时记录静态箱内温度用于后续计算。参照冯小平等^[24]的方法计算N₂O排放通量。

1.3.4 氮含量测定与相关指标计算方法

在拔节、开花和成熟期, 对水稻植株样品进行采集。取叶片、茎秆(鞘)和穗后, 将其分开装袋, 在105 ℃的烘箱中进行30 min的杀青处理, 随后在80 ℃的烘箱中烘干至质量恒定并称量。经过粉碎和过1 mm筛处理后, 采用H₂SO₄-H₂O₂消煮法制备待测液, 通过凯氏定氮仪(KN520, 中国)对样品全氮含量进行测定, 并计算氮素积累量。于水稻成熟期采集土壤样品, 经2 mm筛过滤混匀。采用1 mol·L⁻¹ KCl进行浸提(水:土=5:1), 匀速搅拌30 min, 静置后过滤的上清液, 通过全自动间断化学分析仪(CleverChem380plus, 德国)测定土壤中NO₃⁻和NH₄⁺的含量。土壤全氮含量的测定参照鲍士旦^[25]的方法。籽粒氮素积累量(g·pot⁻¹)、氮素吸收总量(g·pot⁻¹)、氮肥利用效率(%)、氮收获指数(%)、氮素籽粒生产效率(g·g⁻¹)、土壤无机氮量(g·pot⁻¹)、土壤氮素净矿化量(g·pot⁻¹)、氮素表观损失量(g·pot⁻¹)参照鲁艳红等^[26]方法进行计算。氮素盈余率(%)=(氮素收入-氮素支出)/氮素收入×100; 单位产量N₂O排放量(g·kg⁻¹)=N₂O累积排放量/产量。

1.4 数据整理与分析

数据整理和绘图使用Excel 2016和R(4.1.3)软件进行, 图表中的数值表示为平均值±标准偏差(SD)。使用SPSS 23进行统计分析: 采用最小显著差异法(LSD<0.05)比较不同处理间的差异。

2 结果与分析

2.1 土壤酸化对水稻产量和氮素利用效率的影响

由表1可知, 随着土壤酸度的增加, 产量呈先增加后降低的趋势。相比于CK, T1处理产量增加16.4%。但随着土壤酸度的不断加深, 产量呈下降趋势。相比于CK, T2和T3处理产量分别降低5.1%和28.4%。从产量构成的角度分析可知, 随着土壤酸度的增加, 穗数和穗粒数没有显著差异, 结实率和千粒质量则呈下降趋势。相比于CK和T1, T2处理结实率分别降低7.8个和7.2个百分点, T3处理分别降低9.6个和9.0个百分点。千粒质量在T3处理显著降低, 相

表1 土壤酸化对水稻产量和产量构成因子的影响

Table 1 Effects of soil acidification on rice yield and yield component factors

处理 Treatment	理论产量 Yield/(g·pot ⁻¹)	穗数 Panicle	穗粒数 Spike	结实率 Grain filling rate/%	千粒质量 1000-grain weight/g
CK	72.78±2.59b	31.33±2.52a	144.33±12.10a	75.90±4.95a	21.32±0.41a
T1	84.72±5.53a	33.67±1.53a	155.00±13.45a	75.32±3.19a	21.61±0.57a
T2	69.06±5.41b	33.00±2.65a	148.33±10.69a	68.08±4.44b	20.79±0.26a
T3	52.09±3.75c	30.33±2.52a	143.00±16.64a	66.30±1.91b	18.29±2.01b

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same below.

比于CK、T1和T2处理分别降低14.2%、15.4%和12.0%。

由表2可知,随着土壤酸化程度的增加,REN、NHI和NUE_g呈现出先增加后降低的趋势。相比于CK,T1处理下,REN和NHI分别增加2.5个和4.0个百分点,NUE_g增加7.7%。但随着土壤酸度的进一步加深,REN、NHI和NUE_g则呈递减趋势。相比于CK,T2和T3处理,REN、NHI和NUE_g分别降低6.0个和8.6个百分点、4.3个和13.0个百分点、3.8%和15.6%。

2.2 土壤酸化对水稻植株氮素积累量和氮代谢酶活性的影响

由图1可知,随着土壤酸度增加,植株氮素积累量在拔节期、开花期和成熟期均呈现先增加后降低趋势。相比于CK,T1处理植株氮素积累量在拔节期、开花期和成熟期分别增加11.2%、17.0%和8.0%。但随着土壤酸度的进一步增加,植株氮素积累量呈下降趋势。相比于CK,T2和T3处理植株氮素积累量在拔节期分别降低6.0%和12.2%,在开花期分别降低2.3%和5.1%。成熟期植株氮素积累量在T3处理显著降低,相比于CK、T1和T2处理分别降低15.2%、21.3%和14.0%。

由图2可知,在水稻拔节期,T1处理叶片中的NR、GS、GOGAT、GDH活性均显著高于其他处理。相比于CK,T1处理叶片中的NR、GS、GOGAT、GDH活性分别增加14.1%、25.9%、12.8%和50.0%。但随着土壤酸度的进一步增加,叶片中氮代谢酶活性则出现不同程度的降低。相比于CK,T2和T3处理NR、GS、

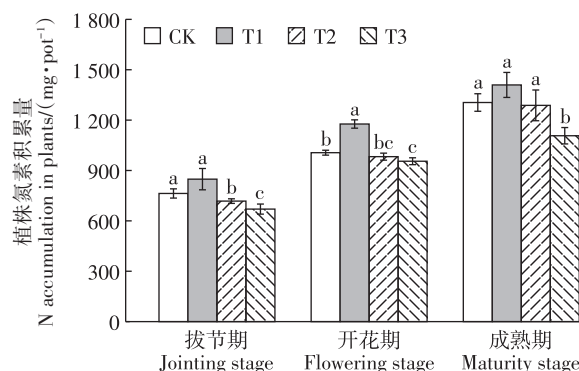


图1 土壤酸化对水稻植株氮素积累量的影响

Figure 1 Effects of soil acidification on nitrogen accumulation in rice plants

GOGAT、GDH活性分别降低20.8%和27.2%、4.3%和0.9%、26.6%和36.5%、64.3%和35.7%。与叶片类似,在茎秆中,GS和GOGAT活性整体呈现出先增加后降低的趋势。相比于CK,T1处理下GS和GOGAT活性分别提高26.0%和12.8%,其中GS活性提高达到显著水平。但随着土壤酸度的增加,GS和GOGAT活性则显著降低,相比于T1处理,T2和T3分别降低4.0%和35.0%、26.4%和21.7%。

由图3可知,在水稻开花期,不同处理中NR活性在叶片、茎秆和穗中均没有显著差异。在叶片中,GS、GOGAT和GDH活性均呈现先增加后降低的趋势。相比于CK,T1和T2处理中GS、GOGAT、GDH活性分别增加16.7%和40.3%、35.0%和36.3%、54.8%和125.1%。相比于CK,T3处理中GS活性显著降低,GOGAT和GDH活性则无显著差异。在茎秆中,GS、GOGAT和GDH活性随土壤酸度的加深呈现先增加后降低再增加的趋势。相比于CK,T1处理GS、GOGAT和GDH活性分别增加74.6%、41.5%和18.2%。T2处理酶活性最低,相比于CK,GS、GOGAT和GDH活性分别降低31.8%、19.7%和18.2%。T3处理与CK相比GS活性显著升高,GOGAT和GDH活性则无显著差异。在穗中,相比于CK,T1处理下GS、GOGAT

表2 土壤酸化对水稻氮利用效率的影响

Table 2 Effects of soil acidification on N use efficiency of rice

处理 Treatment	氮肥利用率 REN%	氮素收获指数 NHI%	氮素籽粒生产效率 NUE _g /(g·g ⁻¹)
CK	28.67±2.17a	66.07±4.17ab	55.79±1.19b
T1	31.21±0.57a	70.07±2.98a	60.08±0.85a
T2	22.68±1.68b	61.75±5.02b	53.67±3.50bc
T3	20.05±0.57c	53.15±3.80c	47.10±3.46c

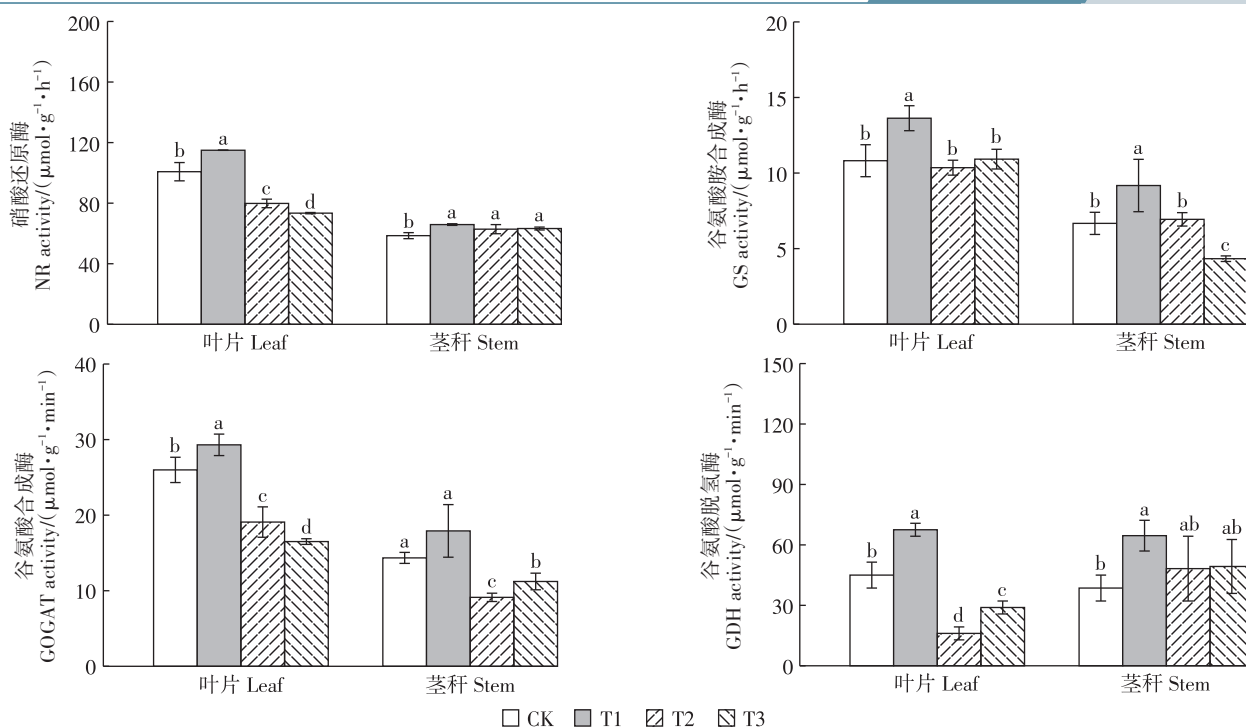


图2 土壤酸化对拔节期水稻氮代谢酶活性的影响

Figure 2 Effects of soil acidification on enzyme activity of nitrogen metabolism in rice at the jointing stage

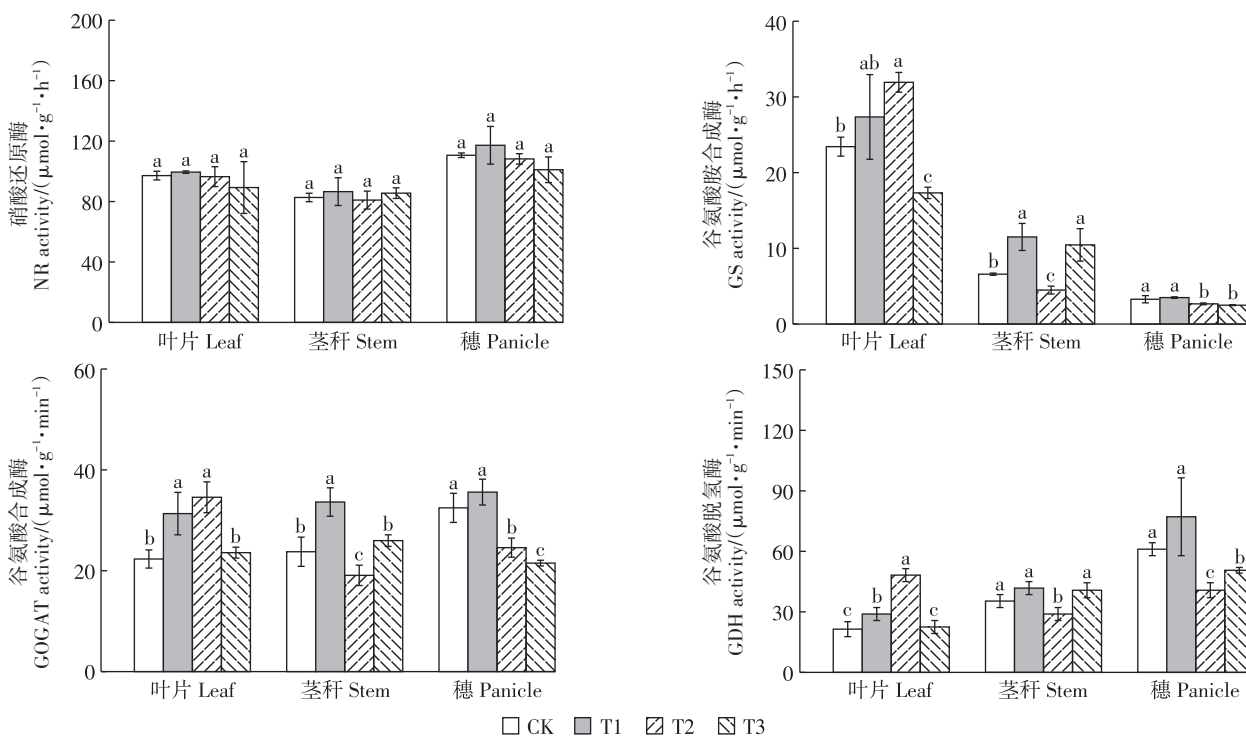


图3 土壤酸化对开花期水稻氮代谢酶活性的影响

Figure 3 Effects of soil acidification on enzyme activity of nitrogen metabolism in rice at the flowering stage

和GDH活性均没有显著变化。但随着酸化程度的加深,GS、GOGAT和GDH活性则显著降低。相比于CK,T2和T3处理中GS、GOGAT、GDH活性分别降低18.7%和23.9%、24.3%和33.7%、33.3%和17.1%。

2.3 土壤酸化对 N_2O 排放和无机氮含量与残留量的影响

由图4可见,不同土壤酸度下,稻田土壤 N_2O 排放通量变化趋势一致。在施基肥(04-29)、分蘖肥

(05-09)和烤田(06-07)后N₂O排放通量出现峰值,烤田复水后逐步降低。土壤酸化能够不同程度地降低稻田N₂O排放通量,相比于CK,T1、T2和T3处理N₂O排放通量在施基肥后的峰值分别降低42.4%、47.0%和61.0%,在施分蘖肥后分别降低14.6%、74.0%和204.7%,在烤田后分别降低6.5%、29.4和42.4%。由图5可知,随着土壤酸度的增加,N₂O累积排放量和单位产量N₂O排放量均呈递减趋势。相比于CK,T1、T2和T3处理N₂O累积排放量分别降低20.3%、58.0%和76.7%;单位产量下N₂O排放量分别降低31.7%、56.1%和67.8%。

由图6可见,不同土壤酸度下,稻田土壤无机氮含量变化趋势一致。随着土壤酸度的加深,无机氮含量整体呈递增趋势。施基肥(04-29)后无机氮含量首先呈递增趋势,在施用基肥后第10天(05-09),相比于CK,T1、T2和T3处理无机氮含量分别增加4.4%、31.7%和46.4%。施分蘖肥(05-09)后第4天(05-13)无机氮含量出现峰值,而后逐渐下降。峰值时相比于CK,T2和T3处理无机氮含量分别增加7.9%和12.0%。由图7可知,稻田中残留的无机氮以

NH₄⁺为主,且在中强酸和强酸条件下无机氮残留量显著增加。相比于CK,T2和T3处理无机氮残留量分别增加41.1%和88.2%。

2.4 土壤酸化对水稻-土壤系统氮素营养平衡的影响

根据氮输入、输出平衡模型计算不同土壤酸度下稻田的氮平衡状况。由表3可知,土壤酸度能够显著影响稻田土壤氮平衡。在氮输入中,播前土壤无机氮量随土壤酸度的加深呈递增趋势。相比于CK,T1、T2和T3处理无机氮量分别增加40.0%、40.0%和50.0%。氮素净矿化量随土壤酸度的加深呈现降低趋势。相比于CK,T1处理中氮素净矿化量无显著差异;T2和T3处理中氮素净矿化量则分别降低7.1%和20.0%。在氮输出中,水稻氮吸收量呈现出先增加后降低的趋势。相比于CK,T1处理中水稻氮吸收量增加7.6%;T2和T3处理中水稻氮吸收量则分别降低1.5%和15.3%。就氮素表观损失而言,CK与T1处理中氮素表观损失无显著差异,但显著高于T2和T3处理。相比于CK处理,T2和T3氮素表观损失分别降低15.8%和21.1%。氮素盈余率呈现先降低后升高的趋势。相比于CK,T1处理氮素盈余率降低1.8个百分点;T2

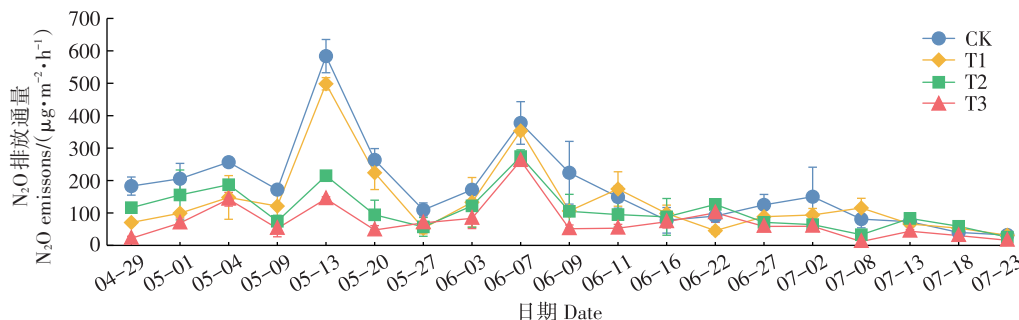


图4 土壤酸化对N₂O排放通量的影响

Figure 4 Effects of soil acidification on N₂O flux

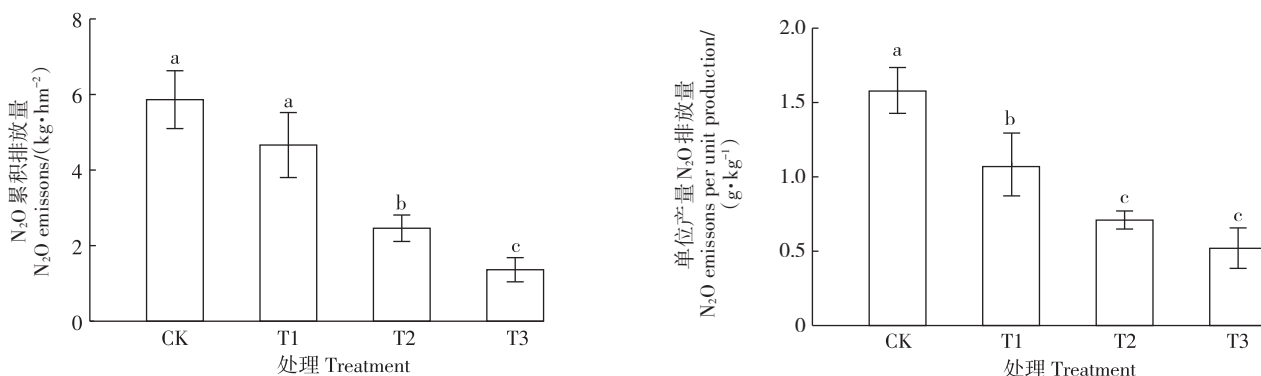


图5 土壤酸化对N₂O累积排放量和单位产量N₂O排放量的影响

Figure 5 Effects of soil acidification on cumulative N₂O emission and N₂O emissions per unit production

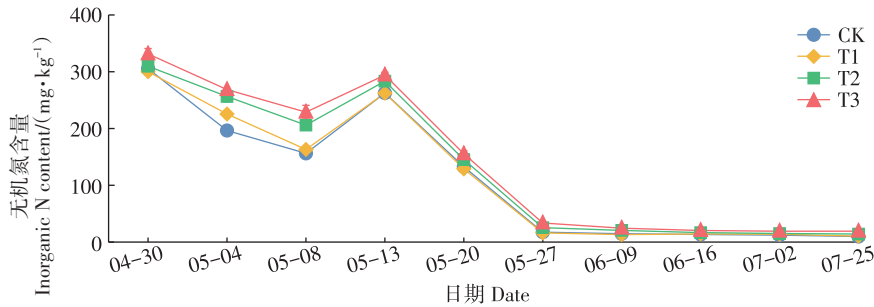


图6 土壤酸化对无机氮含量的影响

Figure 6 Effects of soil acidification on inorganic N content

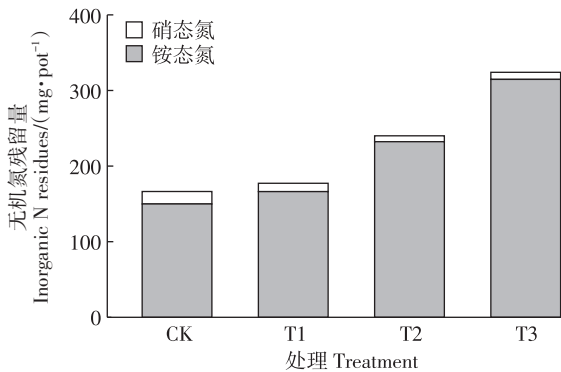


图7 土壤酸化对无机氮残留量的影响

Figure 7 Effects of soil acidification on inorganic N residues

和T3处理分别提高2.2个和7.1个百分点。
2.5 产量和产量构成因子与氮积累和氮代谢酶活性的相关性分析

由图8可知,产量与千粒质量和结实率呈显著正相关,与穗数和穗粒数无显著相关性。植株氮素积累量与拔节期叶片NR、GS、GOGAT、GDH以及茎秆中GS和GOGAT呈显著正相关,与开花期穗中的NR、GS、GOGAT和GDH呈显著正相关。

3 讨论

3.1 土壤酸化对水稻氮代谢、利用效率和产量的影响

随着土壤酸度增加,水稻氮素积累量呈先增加后降低的趋势(图1)。研究表明,土壤酸化能够通过影

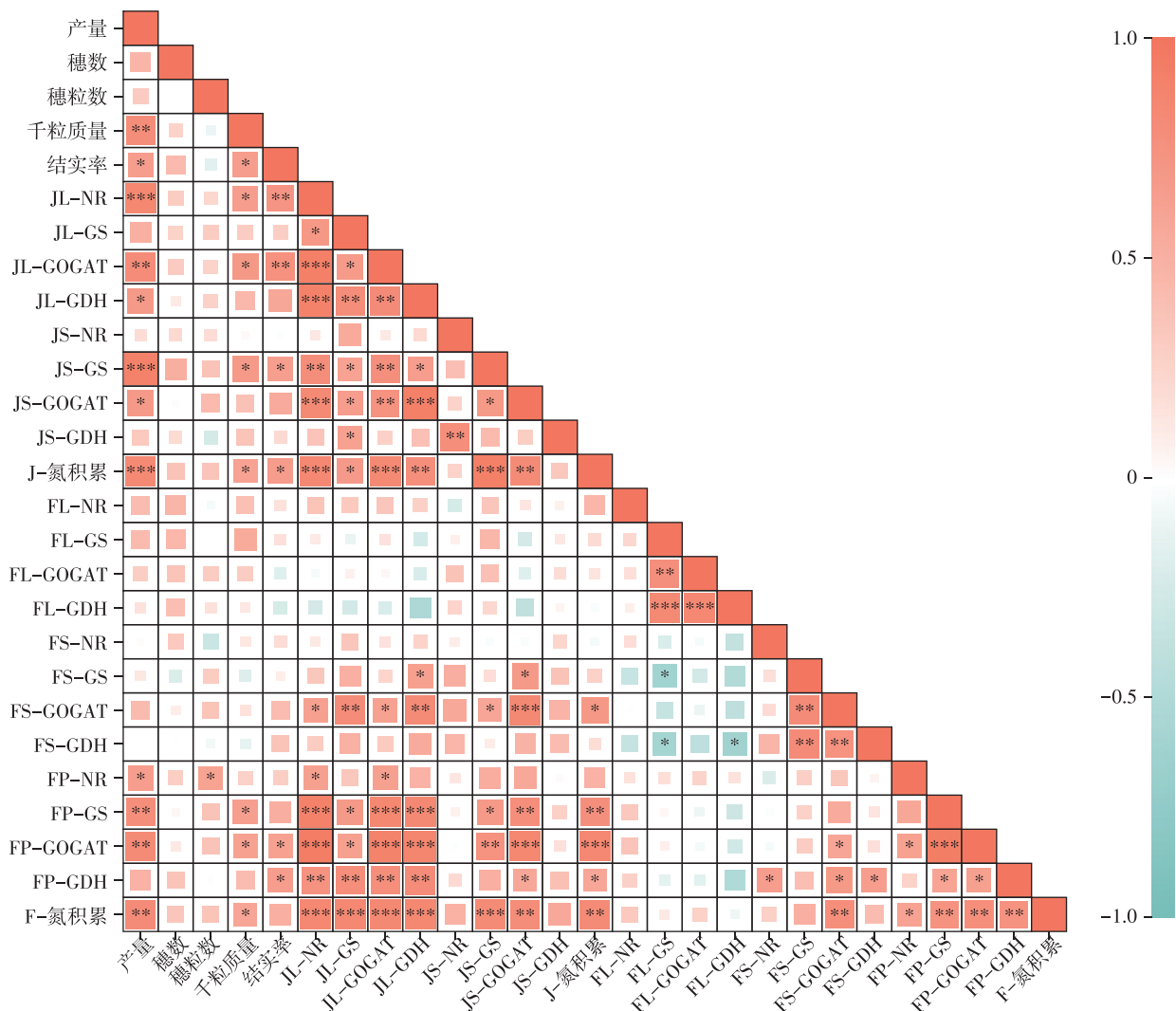
响氮代谢关键酶活性进而影响氮积累^[14,27]。在本研究中,氮代谢酶活性和氮积累在不同时期的水稻器官中对土壤酸化的响应有所不同(图2、图3);拔节期和开花期氮素积累量分别与茎叶和穗中的氮代谢酶活性密切相关(图8)。这说明土壤酸化主要通过调控水稻拔节期茎叶和开花期穗氮代谢过程影响氮积累。主要原因是水稻不同器官在不同时期的生理状态和代谢活动不同,因而它们对土壤酸化的敏感性和适应性也会不同^[28]。在未来的研究中,应着重探究水稻不同生长发育阶段关键器官对于土壤酸化的响应,加深土壤酸化对水稻生长影响的理解,以利于酸胁迫下水稻生长的营养调控。

此外,本研究还发现,相比于中性,弱酸性土壤条件更有利于水稻氮素积累、利用效率和产量的增加。但随着土壤的进一步酸化,氮素积累、利用效率和产量则呈快速下降趋势(表2)。这可能是因为弱酸性土壤环境下氮代谢酶活性升高有利于水稻植株内含氮化合物的合成与积累^[29-30],进而提高了氮素积累、利用效率和产量。然而,随着土壤的进一步酸化,水稻氮吸收与氮代谢酶活性在受到抑制的同时^[31],还需要产生更多的游离氨基酸、可溶性蛋白等渗透调节物质用以抵御酸胁迫,因此导致了水稻氮素积累量、利用效率和产量的降低^[14,32]。以上现象也揭示土壤酸化对水稻生长的影响存在一定的隐蔽性,在土壤酸化前期促进产量提高的同时,需防范酸化进一步加重对

表3 土壤酸化对稻田土壤氮素养分平衡的影响(g·pot⁻¹)

Table 3 Effects of soil acidification on nitrogen balance in soil-crop system of rice(g·pot⁻¹)

处理 Treatment	氮输入			氮输出			氮素盈余/%
	施氮量	播前土壤无机氮量	氮素净矿化量	水稻氮吸收量	无机氮残留量	氮素表观损失	
CK	1.06	0.10±0.01b	0.70±0.09ab	1.31±0.06a	0.17±0.02c	0.38±0.01a	3.88±1.30c
T1	1.06	0.14±<0.01a	0.77±0.04a	1.41±0.04a	0.18±0.01c	0.38±0.04ab	2.04±0.29d
T2	1.06	0.14±0.01a	0.65±0.02b	1.29±0.09a	0.24±0.01b	0.32±0.03b	6.03±0.96b
T3	1.06	0.15±<0.01a	0.56±0.07b	1.11±0.05b	0.32±0.01a	0.34±0.02b	10.94±0.56a



JL:拔节期叶片;JS:拔节期茎秆;FL:开花期叶片;FS:开花期茎秆;FP:开花期穗;NR:硝酸还原酶;GS:谷氨酰胺合成酶;GOGAT:谷氨酸合成酶;GDH:谷氨酸脱氢酶;J-氮积累:拔节期植株氮积累;F-氮积累:开花期植株氮积累。*、**和***分别表示 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 的显著性水平。

JL:leaf at jointing stage;JS:stem at jointing stage;FL:leaf at flowering stage;FS:stem at flowering stage;FP:panicle at flowering stage;NR:nitrate reductase;GS:glutamine synthetase;GOGAT:glutamate synthase;GDH:glutamate dehydrogenase;J-N accumulation:N accumulation at jointing stage;F-N accumulation:N accumulation at flowering stage.*,* and *** represented significant correlation levels $P<0.05$, $P<0.01$ and $P<0.001$, respectively.

图8 产量和产量构成因子与氮积累量和氮代谢酶活性的相关性分析

Figure 8 Correlation analysis of yield, N accumulation and N use efficiency with N metabolizing enzyme activity

产量的剧烈影响。从产量构成因素上看,土壤酸化主要通过影响结实率和千粒质量,而不是穗数和穗粒数影响产量(图8)。这可能是因为土壤酸化会抑制养分向籽粒中转运,进而导致籽粒灌浆不充分、结实率和千粒质量低^[33]。由此可见,水稻籽粒灌浆速率的调控是应对土壤酸化胁迫的重要方向和路径。

3.2 土壤酸化对稻田 N₂O 排放和氮平衡的影响

土壤酸化会抑制 N₂O 排放通量和累积排放量(图4、图5)。这与 Shaaban 等^[34]的研究结果相一致。硝化和反硝化主要是微生物过程,分别受到硝化和反硝化微生物菌群的驱动。一般认为土壤酸化会抑制硝化和反硝化微生物菌群丰度并引起活性降低^[35-36]。前

期研究也发现,土壤酸化会分别通过降低氨氧化细菌和 *nirK* 型反硝化菌丰度来削弱硝化和反硝化过程^[37]。由此推测,在酸化不断加重条件下,pH 值可能是硝化和反硝化的限制因子,进而降低了 N₂O 排放。此外,本研究还发现,随着酸度加深,土壤无机氮含量和残留量呈递增趋势(图6、图7)。这除了与土壤酸化会抑制水稻氮素吸收有关外,也可能是因为酸化会导致硝化和反硝化微生物活性降低,进而减少了底物的消耗^[35]。但值得注意的是,稻田土壤酸化会降低稻田 N₂O 累积排放量,同时也会降低单位产量 N₂O 排放量。

土壤氮平衡是指作物-土壤系统中氮输入与输出之间的平衡关系,关乎作物生产和土壤健康的可持

续性^[38]。本研究发现,相比于中性土壤,氮素表观损失在弱酸条件下无显著差异,在中强酸和强酸条件下显著降低,这与前人研究结果类似^[39]。土壤酸化能够通过抑制 N_2O 等气体排放减少氮素表观损失^[40]。此外,本研究还发现,与中性土壤相比,在弱酸条件下土壤无机氮残留量无显著差异,氮素盈余率显著降低,但在中强酸和强酸条件下则均显著增加,这主要与土壤酸化会抑制水稻氮吸收有关(表3)。相比于中性土壤,中强酸和强酸条件下水稻氮素吸收量分别降低1.5%和15.3%(表3)。未被吸收的氮会以无机氮的形式残留于土壤中^[26]。同时,因土壤酸化而造成的播前土壤无机氮含量增加也可能是无机氮残留量增加的另一原因^[41]。综上所述,土壤酸化虽会减少氮素表观损失,但由于水稻氮素吸收量的减少和播前土壤无机氮含量的增加,土壤无机氮残留量和氮素盈余率也会随之增加。土壤氮素大量盈余会增加周边环境污染风险,需引起高度关注。

4 结论

(1)土壤酸化会分别通过调节水稻拔节期茎叶和开花期穗部的氮代谢过程影响氮素积累量、利用效率和产量。

(2)相比于中性土壤,氮素积累量、利用效率和产量在弱酸性条件呈升高趋势,在中强酸和强酸条件下呈降低趋势。

(3)土壤酸化会降低稻田土壤 N_2O 累积排放量,单位产量 N_2O 排放量也会随之降低。

(4)土壤酸化可降低氮素表观损失量,也会降低水稻氮素吸收量且增加播前土壤无机氮含量,提高中强酸和强酸条件下土壤无机氮残留量和氮素盈余率,增加环境污染的风险。

参考文献:

- [1] LU X, ZHANG X, ZHAN N, et al. Factors contributing to soil acidification in the past two decades in China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2023, 82(3):74.
- [2] ZHU Q, DEV W, LIU X, et al. Enhanced acidification in Chinese croplands as derived from element budgets in the period 1980—2010[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1497–1505.
- [3] LI A, LI C, ZHANG Y, et al. The driving factors and buffering mechanism regulating cropland soil acidification across the Sichuan Basin of China[J]. *Catena*, 2023, 220: 106688.
- [4] 李勇. 茶树响应铝的遗传变异及铝富集候选基因挖掘[D]. 武汉:华中农业大学, 2017: 1–2. LI Y. The genetic variation of tea plant [*Camellia sinensis* (L.) O. Ktze.] in response to aluminum and candidate genes related to its Al accumulation[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017: 1–2.
- [5] 姜冠杰, 何小林, 刘敏, 等. 江西省主要土地利用方式下土壤酸化现状探究[J]. 江西农业学报, 2021, 33(5): 46–55. JIANG G J, HE X L, LIU M, et al. Research on current situation of soil acidification under main land use modes in Jiangxi Province[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2021, 33(5): 46–55.
- [6] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327: 1008–1010.
- [7] CHEN L, GUO L, ZHOU Q, et al. Response of soil fertility and Cu and Cd availability to biochar application on paddy soils with different acidification levels[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2022, 12(5): 1493–1502.
- [8] ZHU Q, LIU X, HAO T, et al. Cropland acidification increases risk of yield losses and food insecurity in China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 256: 113145.
- [9] XIANG J, HADENV R, PENG S, et al. Improvement in nitrogen availability, nitrogen uptake and growth of aerobic rice [*Oryza sativa*] following soil acidification[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2009, 55(5): 705–714.
- [10] MARTÍNEZ-DALMAU J, BERBEL J, ORDÓÑEZ-FERNÁNDEZ R. Nitrogen fertilization. a review of the risks associated with the inefficiency of its use and policy responses[J]. *Sustainability*, 2021, 13(10): 5625.
- [11] YIN H, YANG F, HE X, et al. Advances in the functional study of glutamine synthetase in plant abiotic stress tolerance response[J]. *The Crop Journal*, 2022, 10(4): 917–923.
- [12] CAO L, XU C, SUN Y, et al. Genome-wide identification of glutamate synthase gene family and expression patterns analysis in response to carbon and nitrogen treatment in *Populus*[J]. *Gene*, 2023, 851: 146996.
- [13] 童贯和, 梁惠玲. 模拟酸雨及其酸化土壤对小麦幼苗体内可溶性糖和含氮量的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(8): 1487–1492. TONG G H, LIANG H L. Effects of simulated acid rain and its acidified soil on soluble sugar and nitrogen contents of wheat seedlings[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(8): 1487–1492.
- [14] 张宗祥, 黄峥嵘, 吴雪凡, 等. 土壤酸化对玉米产量、氮代谢及相关基因表达的影响[J]. 华北农学报, 2022, 37(3): 94–103. ZHANG Z X, HUANG Z R, WU X F, et al. Effects of soil acidification on yield, nitrogen metabolism and related gene expression of maize[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2022, 37(3): 94–103.
- [15] WANG F, GAO J, TIAN Z, et al. Adaptation to rhizosphere acidification is a necessary prerequisite for wheat (*Triticum aestivum* L.) seedling resistance to ammonium stress[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2016, 108: 447–455.
- [16] RAVISHANKARA A, DANIEL J, PORTMANN R. Nitrous oxide (N_2O): the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century[J]. *Science*, 2009, 326(5949): 123–125.
- [17] MENG C, XING Y, DING Y, et al. Soil acidification induced variation of nitrifiers and denitrifiers modulates N_2O emissions in paddy fields[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 882: 163623.
- [18] 张怡彬, 徐洋, 王洪媛, 等. 稻蟹共生系统温室气体排放特征及其影响因素[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(5): 931–939. ZHANG

- Y B, XU Y, WANG H Y, et al. Greenhouse gas emission characteristics and influencing factors of rice-crab symbiosis system[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(5):931-939.
- [19] 赵光昕, 刘杏认, 张晴雯, 等. 施用生物炭对农田土壤 N₂O 的减排效应[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(12):2872-2880. ZHAO G X, LIU X R, ZHANG Q W, et al. Effect of biochar on N₂O emissions from agricultural soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(12):2872-2880.
- [20] CHEN D, LAN Z, BAI X, et al. Evidence that acidification-induced declines in plant diversity and productivity are mediated by changes in below-ground communities and soil properties in a semi-arid steppe[J]. *Journal of Ecology*, 2013, 101(5):1322-1334.
- [21] 伍素辉, 李合生. 光对湖北光敏核不育水稻硝酸还原酶诱导的影响[J]. 华中农业大学学报, 1992, 11(3):208-212. WU S H, LI H S. Effect of light on photosensitive nuclear sterile rice in Hubei Province effect of nitrate reductase induction[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 1992, 11(3):208-212.
- [22] ZHANG C, PENG S, BENNETT J. Glutamine synthetase and its isoforms in rice spikelets and rachis during grain development[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2000, 156(2):230-233.
- [23] U HECHT, R OELMULLER, S SCHMIDT, et al. Action of light, nitrate and ammonium on the levels of NADH- and ferredoxin-dependent glutamate synthases in the cotyledons of mustard seedlings[J]. *Planta*, 1988, 175:130-138.
- [24] 冯小平, 余磊, 韩自强, 等. 氮素调控对冬小麦-夏玉米一年两熟 N₂O 排放及产量的影响[J]. 云南农业大学学报, 2023, 38(1):9-17. FENG X P, YU L, HAN Z Q, et al. Effects of nitrogen regulation on N₂O emission and yield of wheat-maize double cropping system[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2023, 38(1):9-17.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000:13-14. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000:13-14.
- [26] 鲁艳红, 聂军, 廖育林, 等. 氮素抑制剂对双季稻产量、氮素利用效率及土壤氮平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1):95-104. LU Y H, NIE J, LIAO Y L, et al. Effects of urease and nitrification inhibitor on yield, nitrogen efficiency and soil nitrogen balance under double-rice cropping system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1):95-104.
- [27] WANG X, REN Y, ASHRAF U, et al. Optimization of liquid fertilizer management improves grain yield, biomass accumulation, and nutrient uptake of late-season indica fragrant rice[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 103(14):6800-6813.
- [28] ZHANG M, TANG S, YANG S, et al. Genotypic differences in the antioxidant and carbon-nitrogen metabolism of acid-tolerant and acid-sensitive rice (*Oryza sativa* L.) cultivars under acid stress[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2015, 61(5):808-820.
- [29] 陈常瑜, 窦玉青, 沈晗, 等. 土壤 pH 对烤烟氮代谢酶活性及化学成分的影响[J]. 分子植物育种, 2020, 18(11):3736-3742. CHEN C Y, DOU Y Q, SHEN H, et al. Effects of soil pH on nitrogen metabolism enzyme activity and chemical composition of flue-cured tobacco [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2020, 18(11):3736-3742.
- [30] 陈平平, 郭莉莉, 唐利忠, 等. 土壤 pH 对不同酸性敏感型水稻品种氮利用效率与根际土壤生物学特性的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(4):757-767. CHEN P P, GUO L L, TANG L Z, et al. Effect of soil pH on nitrogen utilization efficiency and biological characters of rhizosphere soil of rice varieties with different acid-sensitivity[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(4):757-767.
- [31] KHANDAKER A, HORIUCHI T, MIYAGAWA S. Effects of powdered rice chaff on growth and yield of rice under different soil pH conditions[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2004, 35(9/10):1469-1484.
- [32] ZHANG Y, LIANG C. Improving yield and quality of rice under acid rain stress by regulating nitrogen assimilation with exogenous Ca²⁺[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2023, 30(5):12085-12097.
- [33] 曾勇军, 周庆红, 吕伟生, 等. 土壤酸化对双季早、晚稻产量的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(5):899-907. ZENG Y J, ZHOU Q H, LV W S, et al. Effects of soil acidification on the yield of double season rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(5):899-907.
- [34] SHAABAN M, WU Y, WU L, et al. The effects of pH change through liming on soil N₂O emissions[J]. *Processes*, 2020, 8(6):702.
- [35] ROBINSON A, DI H, CAMERON K, et al. Effect of soil pH and dicyandiamide (DCD) on N₂O emissions and ammonia oxidiser abundance in a stimulated grazed pasture soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(8):1434-1444.
- [36] RUSSENE A, KORSÆTH A, BAKKEN L, et al. Spatial variation in soil pH controls off-season N₂O emission in an agricultural soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 99:36-46.
- [37] SONG H, CHE Z, JIN W, et al. Changes in denitrifier communities and denitrification rates in an acidifying soil induced by excessive N fertilization[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2020, 66(9):1203-1217.
- [38] 寇长林, 骆晓声, 巨晓棠. 优化施肥对设施番茄土壤硝态氮残留及土壤氮平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(5):837-848. KOU C L, LUO X S, JU X T. Effects of optimal nitrogen fertilization on N balance and nitrate-N accumulation in greenhouse tomato fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(5):837-848.
- [39] HAO T, ZHU Q, ZENG M, et al. Quantification of the contribution of nitrogen fertilization and crop harvesting to soil acidification in a wheat-maize double cropping system[J]. *Plant and Soil*, 2019(434):167-184.
- [40] 安婉丽, 曾从盛, 王维奇. 模拟酸雨对福州平原水稻田温室气体排放的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(10):3984-3994. AN W L, ZENG C S, WANG W Q. Simulation of effect of acid rain on greenhouse gases emissions in paddy field of Fuzhou plain[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(10):3984-3994.
- [41] 陈高起, 傅瓦利, 罗亚晨, 等. 氮添加对生长期寒温带针叶林土壤有效氮和酸化的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(12):4686-4694. CHEN G Q, FU W L, LUO Y C, et al. Effects of nitrogen addition on available nitrogen content and acidification in cold-temperate coniferous forest soil in the growing season[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(12):4686-4694.

(责任编辑:叶飞)