

DOI: 10.11766/trxb201907190315

李九玉, 邓开英, 章威, 桑存星, 赵悦彤, 徐仁扣. 添加葡萄糖对红壤农田肥料氮转化及其酸化的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 162–168.
LI Jiuyu, DENG Kaiying, ZHANG Wei, SANG Cunxing, ZHAO Yuetong, XU Renkou. Effects of Amendment of Glucose on Fertilizer Nitrogen Transformation and Acidification in Ultisol Cropland [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(1): 162–168.

添加葡萄糖对红壤农田肥料氮转化及其酸化的影响^{*}

李九玉¹, 邓开英¹, 章威², 桑存星², 赵悦彤², 徐仁扣^{1†}

(1. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2. 南京林业大学生物与环境学院, 南京 210037)

摘要: 采用室内培养实验, 初步研究了外加葡萄糖对红壤肥料氮素转化及其酸化作用的影响, 其中葡萄糖添加量充足, 为 $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土, 氮肥以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 KNO_3 为例。结果表明, 在对照、单施 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 或 KNO_3 处理中, 土壤中氮转化过程主要以有机氮净矿化和铵态氮净硝化为主, 这主要是由于红壤可利用碳源较少。而外加足够葡萄糖碳源可快速 (2 d 内) 促进土壤及其 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 氮肥中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 几乎全部被微生物同化, 30 d 培养期间微生物同化促进 28%~50% 的肥料氮迅速转化为固相有机态氮。单施 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 或 KNO_3 主要通过硝化作用和盐效应降低土壤 pH, 但微生物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的生物固定可抑制其硝化导致的酸化作用, 而微生物对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的生物固定可提高土壤 pH 高达 0.78 个单位。因此, 添加葡萄糖等碳源可促进农田土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的微生物同化, 缓解氮肥引起的土壤酸化作用。研究结果对提高农田土壤的保氮能力和氮肥利用率、抑制土壤酸化等具有重要意义。

关键词: 葡萄糖; 硝化作用; 微生物同化; 土壤酸化; 红壤

中图分类号: S153 **文献标志码:** A

Effects of Amendment of Glucose on Fertilizer Nitrogen Transformation and Acidification in Ultisol Cropland

LI Jiuyu¹, DENG Kaiying¹, ZHANG Wei², SANG Cunxing², ZHAO Yuetong², XU Renkou^{1†}

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;
2. College of Biology and Environment, Nanjing Forest University, Nanjing 210037, China)

Abstract: [Objective] Soil acidification intensifies extensively in cropland due to anthropogenic activities, thus restraining sustainable development of agriculture on the soil and affecting environmental safety. Long-term excessive application of ammonium nitrogen fertilizer results in strong nitrification, and intensive leaching of nitrate accompanied with base cations, which are the main mechanisms of soil acidification in cropland. However, so far little has been reported in the literature on effective methods to exert source control over soil acidification triggered by nitrogen fertilizer application. It has been reported that amendment of readily utilizable carbon sources, such as glucose and sucrose, can promote microbial assimilation of soil inorganic

^{*} 国家自然科学基金项目 (41878102)、中国科学院创新交叉团队和创新促进会项目 (2014272) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41878102), the Interdisciplinary Innovation Team, and the Youth Innovation Promotion Association of CAS (No. 2014272)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: rkxu@issas.ac.cn

作者简介: 李九玉 (1979—), 女, 湖南郴州人, 研究员, 主要从事土壤酸化与调控研究, E-mail: jyli@issas.ac.cn

收稿日期: 2019-07-19; 收到修改稿日期: 2019-09-25; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-07-17

nitrogen and reduce N mineralization and nitrification in forest soils. Based on the relationship of nitrogen transformation and proton flux, this type of organic-carbon-promoted microbial assimilation of inorganic nitrogen could also retard N-fertilization-induced soil acidification. Does the amendment of this type of readily utilizable carbon sources also have the effect of controlling or retarding nitrogen transformation and soil acidification in cropland? This question deserves further investigation. 【 Method 】 For this study, an in-door incubation experiment was carried out to explore effects of extraneous carbon on N transformation and soil acidification. Glucose was amended as model carbon source at a rate of $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, and $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ or KNO_3 applied as model nitrogen fertilizer at a rate of $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 【 Result 】 Results show that in the treatments of CK, application of $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ and application of KNO_3 only, net mineralization of organic N and nitrification of ammonia N dominated the process of N transformation in the soil, which is attributed mainly to the lack of usable carbon sources in Ultisol. Amendment of adequate glucose as extraneous carbon source promoted rapid microbial assimilation of almost all the $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ native in the soil and amended in the form of fertilizer within 2 days. Within 30 days of incubation, N microbial assimilation quickly transformed 28%~50% of fertilizer N into solid organic N. However, application of glucose might trigger the risk of N loss through denitrification. Change in soil pH was closely related to chemical reaction of chemical fertilizer on the surface of the soil and transformation of C and N in the cropland. Application of $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ or KNO_3 alone lowered soil pH through nitrification and salt effect. Decomposition of glucose generated some mid products like organic acids, such as lactic acid, pyruvic acid, citric acid, etc., thus lowering soil pH. However, these organic acids consumed protons when decarboxylating, thus neutralizing soil acidity. Addition of glucose induced microbial assimilation or fixation of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and NO_3^- , thus inhibiting $\text{NH}_4^+\text{-N}$ -nitrification-triggered soil acidification, which could raise soil pH by up to 0.78. 【 Conclusion 】 Consequently, amendment of extraneous readily utilizable carbon sources, such as glucose, can promote microbial assimilation of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in the soil and mitigate the soil acidification induced by N transformation in the cropland. All the findings in this study are of important significance for building up soil N retention capacity, improving N fertilizer use efficiency, and inhibiting soil acidification in croplands of acid soil.

Key words: Glucose; Nitrification; Microbial assimilation; Soil acidification; Ultisol

近年来,人为因素导致我国农田土壤普遍酸化加剧,严重制约了土壤农业可持续发展和生态环境安全。研究^[1-4]表明,长期过量施用化学氮肥是集约化农业生产条件下加速土壤酸化的主要根源。铵态氮肥的硝化作用和硝酸根携带盐基离子快速淋失是氮肥造成土壤酸化的主要机制。长期施用化学氮肥后的土壤在近20年时间内,土壤pH可由5.7显著降低至4.2^[5]。大量施用化学氮肥不仅加速土壤酸化过程,增加农业生产成本,还导致氮素在土壤中过量累积或发生挥发及淋溶进入水体,由此带来的一系列生态环境问题,已引起人们广泛的关注。如何针对氮肥导致土壤酸化的问题找到有效的源头阻控方法,是目前亟待解决的难题。

已有研究^[6]发现,林地土壤添加葡萄糖能够促进土壤微生物对无机态氮的固持,抑制土壤氮的净矿化速率,减少氮损失。马启翔等^[7]研究表明,添加高浓度葡萄糖碳源使油松林土壤微生物对氮的需求增加,倾向于固持更多的无机态氮,而减弱矿化过程;向阔叶林土壤中添加蔗糖,导致原来高矿化和硝化

作用也显著降低,微生物固氮作用增强^[8];甚至添加葡萄糖增加氮的固定效率远高于树叶提取物、腐植酸等碳源^[9]。以上结果表明,林地土壤中丰富的有机碳源可促进无机氮的微生物同化和土壤固持。根据氮素转化与质子产消的关系,这种有机碳促进无机氮的微生物同化作用也可减缓氮肥造成的土壤酸化作用^[10]。然而,有关葡萄糖等碳源对旱地农田土壤氮素转化及其酸化作用的研究鲜见报道。

因此,本研究以葡萄糖作为模式碳源,初步分析外加碳源对农田土壤 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 KNO_3 等肥料氮的微生物同化作用,及其阻控氮转化引起土壤酸化的耦合作用。研究结果对提高氮肥利用率、阻控土壤酸化、制定合理的农田土壤氮素管理措施、降低其对环境的负面效应等均具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为第四纪红黏土发育的红壤,采自

安徽郎溪县飞鲤镇 (31° 6'N, 119° 8'E) 红壤酸化阻控长期定位田间试验地空白处理的表层土壤 (0~20 cm), 该旱地主要进行花生或红薯与油菜轮作, 已长达 20 多年。土壤基本性状为: pH (土水比 1:2.5) 为 4.32, 有机质 18.6 g·kg⁻¹, 交换性酸 55.0 mmol·kg⁻¹, 可溶性碳 35.6 mg·kg⁻¹, 水解性氮 88.3 mg·kg⁻¹, NO₃⁻-N 2.6 mg·kg⁻¹, NH₄⁺-N 4.8 mg·kg⁻¹, 有效磷 175.7 mg·kg⁻¹, 速效钾 3.7 mmol·kg⁻¹; 属于黏质壤土。

1.2 实验设计

称取 200.0 g 风干土样 (过 2 mm 筛) 置于塑料杯中, 参照 Quan 等^[11] 的实验方法, 用去离子水调节土壤含水量至土壤田间持水量的 40%, 将土样充分拌匀, 塑料杯用塑料保鲜膜封口, 并在保鲜膜中间留一小孔, 以便气体交换并减少水分损失。然后将塑料杯置于 25 °C 的恒温培养箱中预培养 7 d, 每隔 2~3 天称重 1 次并补充水分, 以保持土壤含水量恒定。

为研究添加碳源调控土壤酸化的潜力, 提供了充足的碳源供应, 按照 C/N 比为 80 的比例添加了葡萄糖和氮肥 (NH₄)₂SO₄ 或 KNO₃。土壤预培养结束后, 设置以下 6 个处理: 1) 对照 (CK); 2) (NH₄)₂SO₄ (AS); 3) KNO₃ (PN); 4) 葡萄糖 (G); 5) (NH₄)₂SO₄+葡萄糖 (AS+G); 6) KNO₃+葡萄糖 (PN+G), 每个处理 3 次重复。其中葡萄糖粉末添加量为 8.0 g·kg⁻¹ 干土, 与土壤混合均匀后添加氮肥 (N) 量为 100.0 mg·kg⁻¹ 干土, 用适量蒸馏水将 (NH₄)₂SO₄ 或 KNO₃ 完全溶解加入土样中, 再补充水分至 60% 田间持水量, 空白添加去离子水保持 60% 田间持水量, 土样充分拌匀。每个处理的样品再平均分成 6 份 (鲜土重约 53 g) 装在 100 mL 离心管中, 置于 25 °C 恒温培养箱中培养, 每隔 2~3 天称重 1 次并补充水分, 以保持土壤含水量恒定。培养时间为 30 d, 在培养的第 0、2、5、10、18、30 天分别破坏性采样, 每次各处理取 1 份样品测定新鲜土样 pH 及各种形态 N 含量。

1.3 测定方法

pH 的测定: 称取 10.0 g 鲜土, 按照 1:2.5 (风干土:水) 加入去离子水, 涡旋搅拌 5 min, 静置 30 min, 用 pH 计 (Thermo Scientific Orion Star A211, 美国) 测定样品上清液。

土壤微生物生物量氮 (MBN) 的测定: 称取 10.0 g 鲜土, 参照鲁如坤^[12] 的氯仿熏蒸浸提方法,

浸提的全氮采用连续流动分析仪 (San++System, SAKLAR, 荷兰) 测定, 土壤微生物生物量氮含量以熏蒸和不熏蒸土壤浸提液中全氮的差值除以转化系数 (0.45) 得到。

土壤中各种形态氮的测定: 称取 10.0 g 鲜土于 100 mL 塑料离心管中, 按 1:4 的干土水比加入 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 溶液 32 mL, 震荡 1 h, 离心, 上清液滤膜过滤, 滤液 -20 °C 冻存。浸提液中的 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 采用流动分析仪测定, NH₄⁺-N 与 NO₃⁻-N 之和为可溶性无机氮。土样残渣风干, 研磨过 60 目筛, 用于测定难提取态氮, 包括固相有机态氮、固定态铵、MBN。难提取态氮的测定: 称取提取完可溶性氮的风干残渣土样, 采用凯氏消煮法, 蒸馏定氮测定; 用 KOBr-KOH 法提取固定态铵^[12], 难提取态氮减去固定态铵和 MBN 即为固相有机态氮^[11]。

1.4 数据处理

采用 SPSS20.0 中邓肯 (Duncan) 法对葡萄糖及氮肥处理中不同氮形态的含量以及 pH 进行差异显著性分析, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与讨论

2.1 添加葡萄糖/无机氮肥对土壤 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和总无机氮的影响

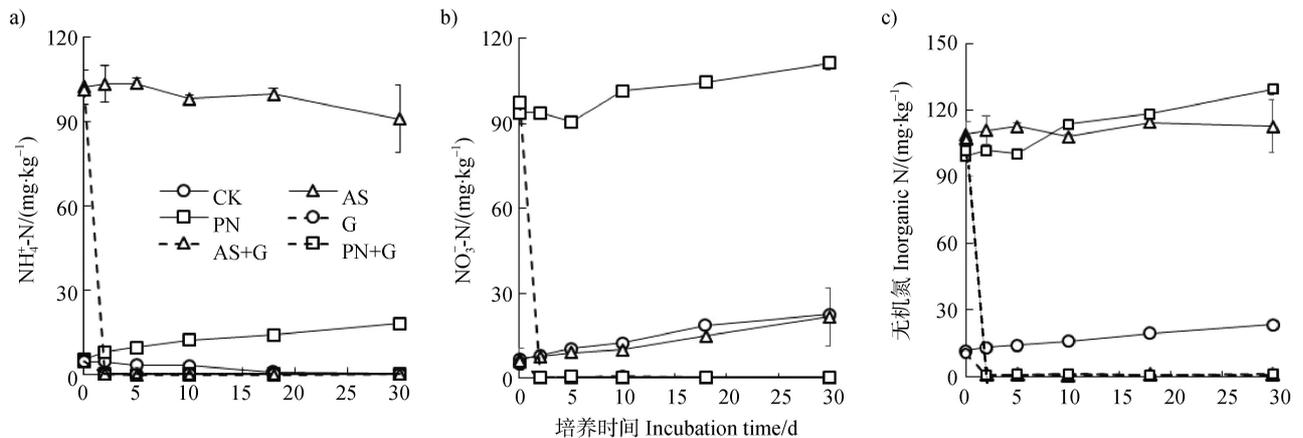
NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 是土壤中无机氮的 2 种主要形式, 其含量变化可全面反映不同处理土壤中有有机氮的矿化与无机氮的固定过程及其相对强弱。图 1 结果表明, 在不添加葡萄糖的处理中, 对照和 AS 处理的 NH₄⁺-N 含量随培养时间有小幅降低 (图 1a)), 但 NO₃⁻-N 含量逐渐升高 (图 1b)), 30 d 培养结束时增量约为 16 mg·kg⁻¹, 无机氮也有小幅增加, 培养结束时增量为 3.7~9.8 mg·kg⁻¹ (图 1c))。PN 处理的 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和无机氮含量均随培养时间呈现逐渐升高的趋势, 培养结束时无机氮增量为 30.1 mg·kg⁻¹, 结果说明不添加葡萄糖时, 单纯添加肥料氮主要促进红壤中有机氮的净矿化和 NH₄⁺-N 的净硝化过程。由于本研究所采集的农田红壤 pH 低至 4.32, 在如此强酸性条件下, 由氨氧化细菌驱动硝化过程明显受到抑制, 主要由氨氧化古菌驱动^[13]。因此在该红壤中虽然存在硝化作用, 但作用不强烈。

而在添加葡萄糖的处理中,与 CK 相比,G、PN+G 和 AS+G 处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和无机氮积累量均显著降低,土壤溶液的无机氮浓度从培养开始时的 10.0、107.0 和 102.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,于实验第 2 天降至含量均低于 1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而且在接下来的 28 d 培养期间基本保持在这一低无机氮浓度(图 1)。以上结果说明,充足的葡萄糖能快速促进红壤无机氮的固持,而且无明显有机氮的再矿化作用,这对促进土壤保氮具有重要意义。目前,无机氮的微生物同化作用在森林和草地土壤中已被广泛关注,被认为是这类生态系统氮素相对富集的主要机制^[14]。森林和草地土壤的有机质含量高,而农田土壤所含的可利用碳数量较少,可能限制了微生物对硝态氮的利用;在农田生态系统,受微生物优先利用铵态氮这一传统观点的影响,人们普遍认为农田土壤微生物不利用硝态氮^[15-16]。但本研究结果表明,加入足够的葡萄糖不仅可快速促进 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的微生物同化,而且也可快速促进 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的微生物固持。土壤中可利用碳源的数量和质量可能是限制农田土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$

同化的关键因子,有研究发现当土壤有机碳源不足时,微生物对铵态氮的吸收同化能力强于硝态氮;当有充足的有机碳源时,土壤微生物对这两种形态氮素的固定能力几乎相当^[8, 17]。

2.2 添加葡萄糖/无机氮肥对土壤微生物生物量氮、固相有机态氮和总氮的影响

土壤单纯添加 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 或 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 后,培养第 2 天后微生物生物量氮(MBN)含量均低于 CK 处理(图 2a)),说明该条件下微生物仍保持低活性状态,但随培养时间呈增加趋势,培养 10 d 后,微生物氮含量与 CK 相差不显著($P>0.05$)。土壤添加葡萄糖后,微生物氮含量均显著高于 CK,特别是当葡萄糖和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 或 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 同时添加土壤后,培养初期土壤微生物生物量氮迅速增加,培养第 5 天达最大值,其中 PN+G 处理效果最明显,MBN 含量可达 143.9 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,是 CK (78.53 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的 1.8 倍。这一结果与前面无机氮转化的结果一致,说明葡萄糖作为良好的碳源和能源物质,加入土壤中可刺激微生物的生长,并快速利用红壤中的无机氮满足自身繁殖。



注: CK, 对照; AS, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$; PN, KNO_3 ; G, 葡萄糖; AS+G, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ +葡萄糖; PN+G, KNO_3 +葡萄糖。下同。Note: CK, Control; AS, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$; PN, KNO_3 ; G, glucose; AS+G, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ + glucose; PN+G, KNO_3 + glucose. The same below.

图 1 添加葡萄糖和无机氮肥对土壤可溶性 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (a)、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (b) 和总无机氮 (c) 30 天培养期间的动态影响

Fig. 1 Effects of application of glucose and inorganic N fertilizer on dynamics of soluble $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (a), $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (b), and total inorganic N (c) content during the 30-day incubation

但随着培养时间的增长,添加葡萄糖处理中的 MBN 量逐渐下降,增幅变小,培养结束时各处理差异不显著($P>0.05$)。这主要是添加碳源后,微生物能够迅速利用养分进行生命活动和大量繁殖,当碳源或养分被利用完后,微生物无法摄取足够能源进行生命活动和大量繁殖,遂逐渐死亡,导致 MBN

含量逐渐降低^[18]。

Quan 等^[11]将直接用中性盐难提取的土壤氮进一步区分为微生物生物量氮、固定态铵和固相有机态氮三种类型。发现本研究中固定态铵含量较低(均小于 130 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),且不同处理间无明显差异(数据未列出)。但添加葡萄糖处理显著提高了土壤固相

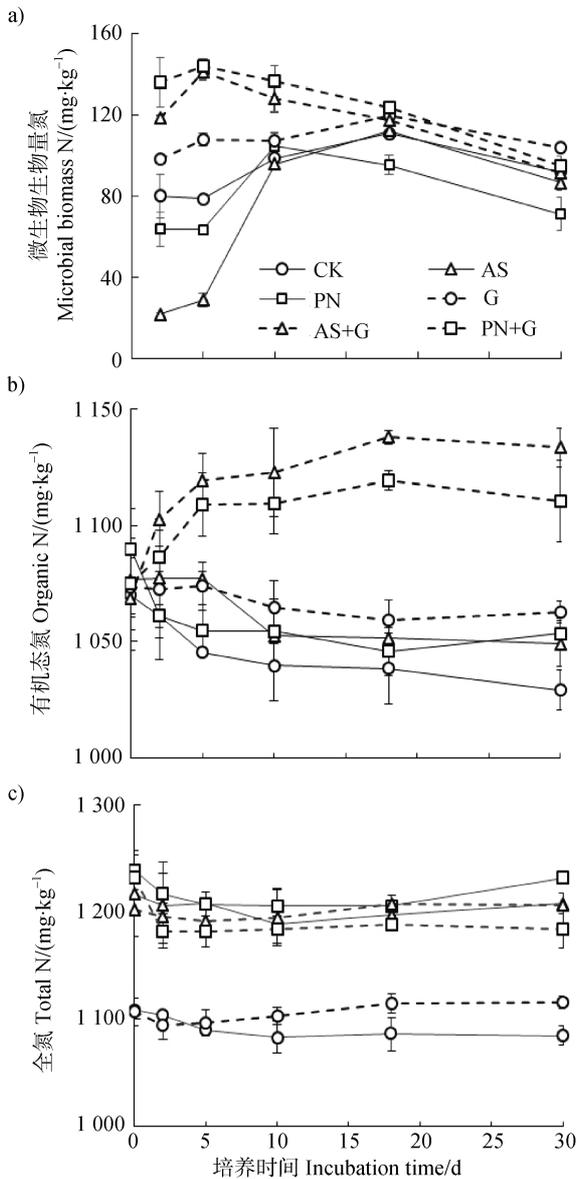


图2 添加葡萄糖和无机氮肥处理对土壤微生物生物量氮 (MBN, a)、有机态氮 (b) 和全氮 (c) 的动态影响
 Fig. 2 Effects of application of glucose and inorganic N fertilizer on dynamics of in microbial biomass N (MBN, a), organic N (b) and total N (c) during the 30-day incubation

有机氮的含量,特别是与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 或 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 配施的处理,土壤固相有机态氮含量在培养前 18 d 显著增加 (图 2b)); AS+G 处理在培养第 18 天,土壤有机态氮达到最大值 $1138 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,较 CK 和 AS 处理分别增加 9.6% 和 8.2%。培养 18 d 后,土壤固相有机态氮含量有下降趋势,但 30 d 培养期结束时,添加葡萄糖的 G、AS+G 和 PN+G 处理均较相应的 CK、AS 和 PN 处理固相有机态氮分别增加了 33.7、84.2 和 $61.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,添加的无机氮 28%~50% 均转化为更

稳定的固相有机态氮。因此,添加足够葡萄糖可在短期内促进无机氮的微生物同化,并迅速转化为土壤固相有机氮。Quan 等^[11]的研究表明,绿肥和铵态氮肥同时施入土壤中,无机氮肥初期主要转化为 MBN,但培养 3 d 后,微生物生物量碳含量逐渐下降,而固相有机氮含量则明显增加,最终 23%~28% 的无机氮转化为固相有机态氮从而促进土壤中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的固持,这与本实验结果相一致。这一结果也证实了图 2a) 中微生物的结果,葡萄糖的添加可快速促进微生物的繁殖,微生物的失活有利于微生物固持的无机氮转化为更稳定的红壤固相有机态氮。此外,添加葡萄糖等易利用碳源可促进农田中大量 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 以及 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的在土壤中的固持,后期有机氮可矿化再被生物利用,这对减少红壤农田无机氮的损失、提高氮肥利用效率具有重要意义。

此外,从土壤全氮的结果看出,添加肥料氮的处理较不加氮的处理约高 $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,但各处理全氮含量变化不大,添加葡萄糖和肥料氮的处理全氮含量有低于相应不加葡萄糖的趋势 (图 2c))。这些结果表明添加葡萄糖可在短期内促进无机氮的微生物同化,并进一步转化为土壤固相有机氮,但葡萄糖的大量添加有导致氮损失的风险,比如反硝化,特别在葡萄糖与硝态氮配施的处理更加明显,这主要是葡萄糖等易利用碳源可为氮的反硝化提供电子供体^[19]。

2.3 添加葡萄糖/无机氮肥处理下土壤 pH 的动态变化

由图 3 可知,葡萄糖和氮肥单加或配合施用均对土壤 pH 产生不同程度的影响。与培养初始的 pH 相比,CK、AS 和 PN 处理在整个 30 d 的培养期间土壤 pH 均降低了,特别是培养的第 18~30 天内;其中整个培养期内 CK 和 AS 分别降低了 0.41 和 0.21 个 pH 单位,这主要是氮的硝化作用产生了大量质子,这与图 1b)) 的结果相印证。与 CK 相比,单加葡萄糖 (G) 在培养前 5 天并未对 pH 产生明显影响,培养中期 (第 10~18 天) 显著降低了 pH,而 18 d 后 pH 呈增加趋势,最终 pH 略高于对照; AS 和 PN 加入土壤当天就显著了降低土壤的 pH,由对照处理的 4.32 分别降低至 4.05 和 3.85。葡萄糖和氮肥配合施用与氮肥单施的处理相比,培养当天 pH 无明显差异,但在培养过程中 AS+G 较 AS 处理更加显著

降低了土壤 pH，培养初期差异不断增大，第 5 天 pH 差值最大达 0.5 个 pH 单位，但培养结束时两个处理的差异不显著 ($P>0.05$)。与之相反，PN+G 与 PN 处理相比，在第 2 天就显著增加了土壤 pH，然后 pH 差值维持在 0.68~0.78 单位之间。

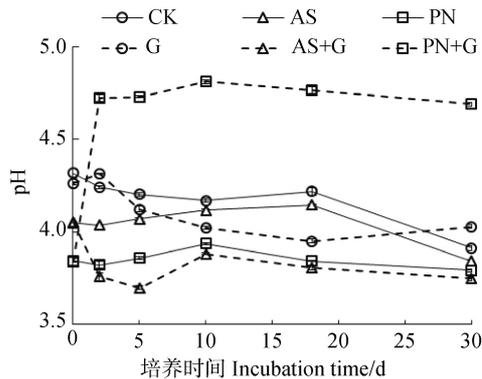


图 3 添加葡萄糖或无机氮肥对土壤 pH 的动态影响(数据标准偏差小，因此图中不易显示)

Fig. 3 Effect of application of glucose and inorganic N fertilizer on dynamics of soil pH

土壤 pH 变化与化学氮肥在土壤表面的化学反应以及碳氮转化过程等相关。首先是 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 KNO_3 加入红壤， NH_4^+ 和 K^+ 会与土壤表面的交换性 Al^{3+} 和 H^+ 发生交换反应， Al 进入溶液很容易水解并释放出 H^+ ，因此这种盐效应是两种肥料加入红壤后土壤 pH 在实验开始当天就显著降低的主要原因^[20]。此外， $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 中的 SO_4^{2-} 在红壤中会发生专性吸附，并释放出 OH^- ，起着一定的酸度中和作用^[20]，因此，单加 KNO_3 较单加 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 的土壤 pH 更低(图 3)。而土壤 pH 在培养过程的波动则主要与碳氮转化过程有关。在不添加葡萄糖的处理中，由于有机氮的矿化会消耗等当量的质子，而 $1 \text{ mol NH}_4^+\text{-N}$ 的硝化会产生 2 mol H^+ ，因此各处理中 pH 均降低了，特别是第 18~30 天的培养期间(图 1b)和图 3)。单纯添加葡萄糖在第 5~18 天也明显降低了土壤 pH，由于大量葡萄糖分解产生有机酸、促进土壤 pH 下降。Rukshana 等^[21]的结果表明，土壤中添加葡萄糖后微生物活性增强，葡萄糖分解时糖酵解、三羧酸循环等过程会产生中间产物有机酸，如乳酸、丙酮酸、柠檬酸等，促进土壤 pH 下降。而第 18~30 天内，主要是有机碳矿化成 CO_2 过程会消耗等当量的 H^+ ，因此 pH 有明显的上升趋势。而在葡萄糖与无机氮配施的处理中， $1 \text{ mol NH}_4^+\text{-N}$ 的微生物同化同样会产生

1 mol H^+ ，因此，培养前 5 天微生物同化作用强的阶段显著降低了土壤 pH，而后期有机碳的矿化作用同样提高了土壤 pH。虽然葡萄糖与 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 配施处理中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 基本全被微生物同化固定，而单施 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 处理由于红壤酸性强，仅有约 10% 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 发生了硝化作用，但两个处理的 pH 相差不明显。因此，可以想象在硝化作用强烈的土壤中， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的微生物同化作用相比大量 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 硝化作用，有明显抑制土壤酸化的作用。而葡萄糖与 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 的配施处理中微生物同化和有机碳矿化作用均有利于 OH^- 的释放或 H^+ 的消耗，因此，这一处理土壤 pH 提高 0.68~0.78 个单位，显著降低了土壤酸度。添加葡萄糖与氮肥的处理中，微生物同化作用主要发生在实验开始的前 2 天，而单加葡萄糖处理在培养第 5 天后才出现有机酸导致土壤 pH 降低的现象，因此，推测微生物同化是 NH_4^+ 或 NO_3^- 转化与葡萄糖共同作用的结果。而且，利用葡萄糖等碳源促进肥料氮的微生物同化，应该可以减少铵态氮的硝化和硝态氮淋失造成的土壤酸化作用，促进土壤保氮的作用。但如何调控碳源的数量和质量，达到既促进土壤保氮、氮肥供应与植物需要相匹配，又抑制土壤酸化的作用，尚需更系统、深入的研究。

3 结 论

在强酸性农田红壤中添加足够的葡萄糖等易利用碳源，可快速促进微生物对肥料中铵态氮和硝态氮的同化，并同时转化为土壤固相有机氮。这一过程不但具有提高红壤保氮能力和氮肥利用率的潜力，同时可削弱由于铵态氮的硝化及硝态氮淋失导致的土壤酸化作用。因此，本研究结果对提高农田氮肥利用和阻控酸化具有重要意义，但实际条件下如何控制有机碳源的数量和质量、实现双赢的目标尚需系统的研究。

参考文献 (References)

- [1] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327 (5968): 1008—1010.
- [2] Barak P, Jobe B O, Krueger A R, et al. Effects of long-term soil acidification due to nitrogen fertilizer inputs in Wisconsin[J]. Plant and Soil, 1997, 197 (1): 61—69.

- [3] Zhao W, Cai Z C, Xu Z H. Does ammonium-based N addition influence nitrification and acidification in humid subtropical soils of China?[J]. *Plant and Soil*, 2007, 297 (1/2): 213—221.
- [4] Zhao X, Xing G X. Variation in the relationship between nitrification and acidification of subtropical soils as affected by the addition of urea or ammonium sulfate[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41 (12): 2584—2587.
- [5] Cai Z J, Wang B R, Xu M G, et al. Intensified soil acidification from chemical N fertilization and prevention by manure in an 18-year field experiment in the red soil of Southern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15 (2): 260—270.
- [6] Gilliam F S, Lyttle N L, Thomas A, et al. Soil variability along a nitrogen mineralization and nitrification gradient in a nitrogen-saturated hardwood forest[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 69 (4): 1262—1271.
- [7] Ma Q X, Li W, Pan K W, et al. Effect of continuous glucose addition on soil N transformation of the *Pinus tabulaeformis* and *Cercidiphyllum japonicum* plantations[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2013, 19 (3): 426—433. [马启翔, 李伟, 潘开文, 等. 持续碳源添加对油松和连香树林地土壤氮转化的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2013, 19 (3): 426—433.]
- [8] Dong D Y, Wang D T, Ma H L, et al. Effects of adding glucose on soluble and microbial nitrogen in subtropical broad-leaved forest soil[J]. *Soils*, 2019, 51 (1): 19—24. [董冬玉, 王丹婷, 马红亮, 等. 添加葡萄糖对中亚热带阔叶林土壤氮转化的影响[J]. *土壤*, 2019, 51 (1): 19—24.]
- [9] Magill A H, Aber J D. Variation in soil net mineralization rates with dissolved organic carbon additions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32 (5): 597—601.
- [10] Bolan N S, Hedley M J, White R E. Processes of soil acidification during nitrogen cycling with emphasis on legume based pastures[J]. *Plant and Soil*, 1991, 134 (1): 53—63.
- [11] Quan Z, Huang B, Lu C Y, et al. The fate of fertilizer nitrogen in a high nitrate accumulated agricultural soil[J]. *Scientific Reports*, 2016, 5: 21539.
- [12] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.]
- [13] Lu L, Han W Y, Zhang J B, et al. Nitrification of archaeal ammonia oxidizers in acid soils is supported by hydrolysis of urea[J]. *The ISME Journal*, 2012, 6 (10): 1978—1984.
- [14] Zogg G P, Zak D R, Pregitzer K S, et al. Microbial immobilization and the retention of anthropogenic nitrate in a northern hardwood forest[J]. *Ecology*, 2000, 81 (7): 1858—1866.
- [15] Burger M, Jackson L E. Microbial immobilization of ammonium and nitrate in relation to ammonification and nitrification rates in organic and conventional cropping systems[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35 (1): 29—36.
- [16] Wang J, Sun N, Xu M G, et al. The influence of long-term animal manure and crop residue application on abiotic and biotic N immobilization in an acidified agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2019, 337: 710—717.
- [17] Cheng Y, Huang R, Yu Y F, et al. Role of microbial assimilation of soil NO_3^- in reducing soil NO_3^- concentration[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (6): 1326—1331. [程谊, 黄蓉, 余云飞, 等. 应重视硝态氮同化过程在降低土壤硝酸盐浓度中的作用[J]. *土壤学报*, 2017, 54 (6): 1326—1331.]
- [18] Szili-Kovács T, Török K, Tilston E L, et al. Promoting microbial immobilization of soil nitrogen during restoration of abandoned agricultural fields by organic additions[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 43 (6): 823—828.
- [19] Cheng Y, Cai Z C, Chang S X, et al. Wheat straw and its biochar have contrasting effects on inorganic N retention and N_2O production in a cultivated Black Chernozem[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48 (8): 941—946.
- [20] Li J Y, Wang N, Xu R K, et al. Potential of industrial by-products in ameliorating acidity and aluminum toxicity of soils under tea plantation[J]. *Pedosphere*, 2010, 20 (5): 645—654.
- [21] Rukshana F, Butterly C R, Baldock J A, et al. Model organic compounds differ in their effects on pH changes of two soils differing in initial pH[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47 (1): 51—62.

(责任编辑: 陈荣府)