

添加葡萄糖对杉木人工林土壤氮素转化及净矿化和硝化的影响

马红亮^{1,2}, 魏春兰^{1,2}, 李磊^{1,2}, 高人^{1,2*}, 尹云峰^{1,2}, 杨玉盛^{1,2}

(1. 湿润亚热带生态-地理过程省部共建教育部重点实验室, 福建 福州 350007;

2. 福建师范大学地理科学学院, 福建 福州 350007)

摘要:以亚热带杉木人工林为研究对象,研究添加葡萄糖(C量水平分别是0, 100, 300, 1 000, 2 000, 5 000 mg · kg⁻¹)对土壤氮含量、氮素矿化和硝化的影响。结果表明,葡萄糖添加降低土壤无机氮含量和比例,硝态氮的降低幅度大于铵态氮;但是没有降低可溶性有机氮(SON)和pH值,甚至提高SON的比例。添加葡萄糖降低氮素净矿化和硝化速率,氮素矿化作用受到抑制。结果显示,随着葡萄糖添加,亲水性氮所占比例显著降低,这与氮的固持和转化有关,导致SON比例增加;分析表明,硝态氮和可溶性有机氮在提取液全氮中所占比例成显著的线性负相关关系($R^2 = 0.902$)。研究发现,1 000 mg · kg⁻¹的葡萄糖C添加量可能是影响杉木人工林土壤氮素转化的分界点。

关键词:氮沉降;可溶性有机碳;凋落物;杉木林;碳源

中图分类号:S791.27

文献标识码:A

Effects of Glucose Addition on Soil Nitrogen Transformation and Net Mineralization and Nitrification in Chinese Fir Plantation

MA Hong-liang^{1,2}, WEI Chun-lan^{1,2}, LI Lei^{1,2}, GAO Ren^{1,2}, YIN Yun-feng^{1,2}, YANG Yu-sheng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Process of Ministry of Education, Fuzhou 350007, Fujian, China;

2. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, Fujian, China)

Abstract: In view of the significant role of litter played in regulating forest soil nitrogen transformation, simulating the influence of matrix carbon sources on nitrogen transform in the subtropical coniferous forest acid soil is helpful to deeply understand the mechanism between carbon and nitrogen. The effects of glucose addition (as C of 0, 100, 300, 1 000, 2 000, and 5 000 mg · kg⁻¹) on soil nitrogen content, nitrogen mineralization and nitrification were studied in the soil under subtropical Chinese fir plantation. The results showed that the glucose addition reduced the soil inorganic nitrogen content and proportion in total soluble nitrogen, and the nitrate nitrogen decreased more than ammonium nitrogen; but the decrease of soluble organic nitrogen (SON) and pH was not found, even the ratio of SON in total soluble nitrogen increased. Glucose addition decreased the net nitrogen mineralization and the nitrification rates for nitrogen mineralization were inhibited. The results showed that hydrophilic nitrogen proportion decreased significantly with the addition of glucose, which was related to nitrogen immobilization and transformation to result in the enhancement of SON proportion. Correlation analysis showed that there was a significantly negative linear relationship ($R^2 = 0.902$) between the proportions of nitrate and dissolved organic nitrogen in the total nitrogen

收稿日期:2013-04-28

基金项目:国家自然科学基金项目(40901115,31070548,31070549,31170578)、教育部创新团队项目(IRT0960)、福建省高校杰出青年科研人才培育计划(JA12058)、福建师范大学优秀青年骨干教师培养基金(fjsdjk2012069)和福建省大学生创新性实验计划项目(Sjly-2012014)资助

作者简介:马红亮(1978—),男,博士,副教授,主要从事森林生态系统土壤碳、氮循环与全球变化研究,E-mail:mhl936@163.com

* 通讯作者:E-mail:ren.gao@fjnu.edu.cn

of the extract from soil, which indirectly give a evidence of glucose likely promoting the nitrate retaining and transformation by microorganisms involved in soil. The research discovered that the glucose amount (as C) of $1\ 000\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ was the threshold affecting the nitrogen transforms in forest soil under subtropical Chinese fir plantation.

Key words: nitrogen deposition; soil soluble organic carbon; forest litter; Chinese fir plantation; carbon source

近年来,不少调查研究表明,工农业的集约化生产造成大气氮沉降加剧^[1-2],生态环境正承受氮沉降增加的影响,特别是我国的南方,氮沉降达到 $12.9 \sim 100\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[3],远高于森林在生长季对氮的需求量($5 \sim 8\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[4],也高于世界其他地方的水平^[5]。施入土壤中的氮素在土壤中受微生物的作用进行转化分配,转化程度除受土壤本身性质影响外,还受外源物质尤其是碳源的影响^[6]。由于有机物质向微生物提供了可利用的碳源和能源,其种类和浓度对土壤氮素转化具有重要影响^[7-9]。研究表明,外源碳添加刺激了异养微生物的活性^[10-11],添加葡萄糖和硝酸铵增加总磷脂脂肪酸(PLFA)含量达3倍^[12],添加葡萄糖和氮肥后, NO_3^- -N下降, NO_2^- -N上升^[13]。土壤碳调控氮的矿化和固持,有效性碳的增加将有利于异养菌固定铵态氮和硝态氮,导致氮储量的增加^[14],影响微生物对不同形态氮的吸收同化^[15],对不同肥力水平土壤氮素转化产生显著影响^[8-9]。

亚热带生态系统由于环境高温、高湿,有机质分解快,相对于其他元素而言,氮素不是限制因素^[16]。在森林生态系统,大气沉降氮是直接落在森林地被物上^[17],森林地被物中含有高浓度的养分,特别是水溶性物质和碳水化合物,它们既作为土壤矿物层氮素的源和库,也对氮素动态和转化有着重要的影响^[18]。在南北的不同地域,温度、降水、森林植被类型、土壤理化性质等存在差异,使得凋落物在影响土壤氮素转化过程中表现出复杂、不确定的效果^[19-21];研究表明,不同形态氮的加入对土壤氮形态的影响也因土壤有机碳含量的差异而变得趋势不一^[22],甚至,沉降氮在不同树种凋落物层的转化也差异较大^[23]。亚热带不同植被,比如杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)、阔叶林、马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)林、混交林等生境下土壤原有的全氮、速效氮和碳的状态有别,影响氮素转化^[24-27]。众所周知,土壤中主要氮素形态转化和 N_2O 排放等过程与碳的关系是碳氮循环的最基本内容之一,但是,目前针对亚热带森林土壤有效碳对土

壤氮素转化的调控研究还鲜见报道。

本文假设葡萄糖添加降低氮含量、抑制矿化和硝化。拟采用室内培养试验,选择亚热带杉木针叶林,研究添加不同浓度的葡萄糖后氮素转化,分析外加碳源对氮素转化的调节作用和影响机制。

1 材料和方法

1.1 供试土壤

供试土壤采自福建省建瓯万木林自然保护区,其经纬度是 $27.05^\circ\ \text{N}$, $118.15^\circ\ \text{E}$,地处武夷山脉东南、鹫峰山脉西北,海拔高度 $230 \sim 556\ \text{m}$ 。本地属中亚热带季风气候,年均气温 $19.4^\circ\ \text{C}$,年均降水量 $1\ 731.4\ \text{mm}$,年均蒸发量 $1\ 466\ \text{mm}$,相对湿度 81% ,全年无霜期达 $277\ \text{d}$;土壤为花岗岩发育的红壤。该地区植被为亚热带暖湿地区的常绿双子叶植物阔叶树种,杉木林坡向 300° ,坡度 21° ,海拔 $350\ \text{m}$,树龄 $37\ \text{年}$,树高 $18\ \text{m}$,胸径 $18.3\ \text{cm}$,凋落物现存量 $4.8\ \text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;土壤pH值 5.7 ,全碳 $30.3\ \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $2.7\ \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。为1969年杉木幼苗造林形成的人工林,树种单一,林分结构简单,灌木层以杜茎山(*Maesa japonica* (Thunb.) Moritzi)、狗骨柴(*Tricalysia dubia* (Lindl.) Ohwi)为主,草本有狗脊蕨(*Woodwardia japonica* (L. f.) Sm.)、草珊瑚(*Sarcandra glabra* (Thunb.) Nakai)等。

于2009年9月起连续3年在杉木林地样地开展模拟氮沉降试验。分别设置3个氮沉降处理水平:CK(对照, $0\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、LN(低氮, $30\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)和HN(高氮, $100\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),每个处理重复3次,共9个试验小区。每个试验小区大小为 $2\ \text{m} \times 2\ \text{m}$,各处理之间间隔 $10\ \text{m}$ 以上,以防止互相干扰。模拟氮沉降施肥情况见表1,由于氮沉降主要来自降水的湿沉降,所以,每年度(上一年9月到第二年9月)氮处理总量按照表1分3次添加。将 NH_4NO_3 溶解于 $2\ \text{L}$ 蒸馏水制备成所需的模拟氮沉降的溶液,用喷壶均匀喷洒在土壤表面,CK处理则采用等量的蒸馏水进行喷洒。

表1 试验样地施肥时间与施肥量

 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

氮水平	时间(年-月)									
	2009-09	2009-12	2010-08	2010-11	2011-02	2011-06	2011-09	2011-12	2012-05	2012-08
CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LN	7.5	10	12.5	7.5	10	12.5	7.5	10	12.5	7.5
HN	25	32.5	42.5	25	32.5	42.5	25	32.5	42.5	25

1.2 试验设计与分析方法

于2012年5月施肥前进行土样采集,使用土钻分别取0~10 cm层次土样,每个小区选取3个采样点进行采集,采集后将同一处理土样混合作为该层次土样。将样品带回实验室,去除可见根系和碎石,磨碎过筛(孔径2 mm),装瓶供分析。按照6水平 \times 3重复 \times 3个氮水平=54个样品,在25℃培养21d。在100 g土样中加入土壤葡萄糖溶液15 mL,15 mL溶液中含有的葡萄糖量,按照碳(C)量添加水平分别是0、100、300、1 000、2 000、5 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在开始培养之前,土壤样品要分析碳氮。培养结束后,取7 g鲜样,用50 mL 0.5 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ K_2SO_4 溶液,并在300 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速下震荡1 h,在4 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速下离心15 min,定量滤纸过滤。滤液用连续流动分析仪(SKALAR San⁺⁺荷兰)直接测定铵态氮和硝态氮,提取液全氮用在线紫外高温消解测定,可溶性有机氮(SON)=提取液全氮-无机氮。氮素分析完后,提取液中加入XAD-8树脂,振荡器充分振荡40 min,过滤后,再次上仪器分析全氮,即为亲水性氮,通过前后全氮差值计算疏水性氮。

1.3 数据处理

运用软件SPSS13.0和Excel 2007对数据进行分析,采用单因素方差分析和多重比较分析不同处理下土壤可溶性有机碳含量的差异显著性($P < 0.05$),所有数据均为3个重复的平均值 \pm 标准偏差。

2 结果与分析

2.1 对氮含量的影响

不同氮水平对各形态氮和pH值的影响不大(图1),但也发现,第一,葡萄糖C量添加1 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之前,硝态氮在HN水平下比CK和LN显著($P < 0.01$)高61%~86%;第二,在0~300 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 浓度下,可溶性有机氮在LN水平最高,HN最低;而1 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以后,它在LN持续降低,在CK和HN则开始升高。pH值也在1 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以后不同氮水平下开始出现差异,HN下持续升高,CK和LN下保持在5.17左右。铵态氮、硝态氮和全氮随添加葡萄糖水平升高而降低,它们分别从葡萄糖C量水平0到1 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 平均降低61.9%、99.8%和52.5%;可溶性有机氮变化不大,而pH值

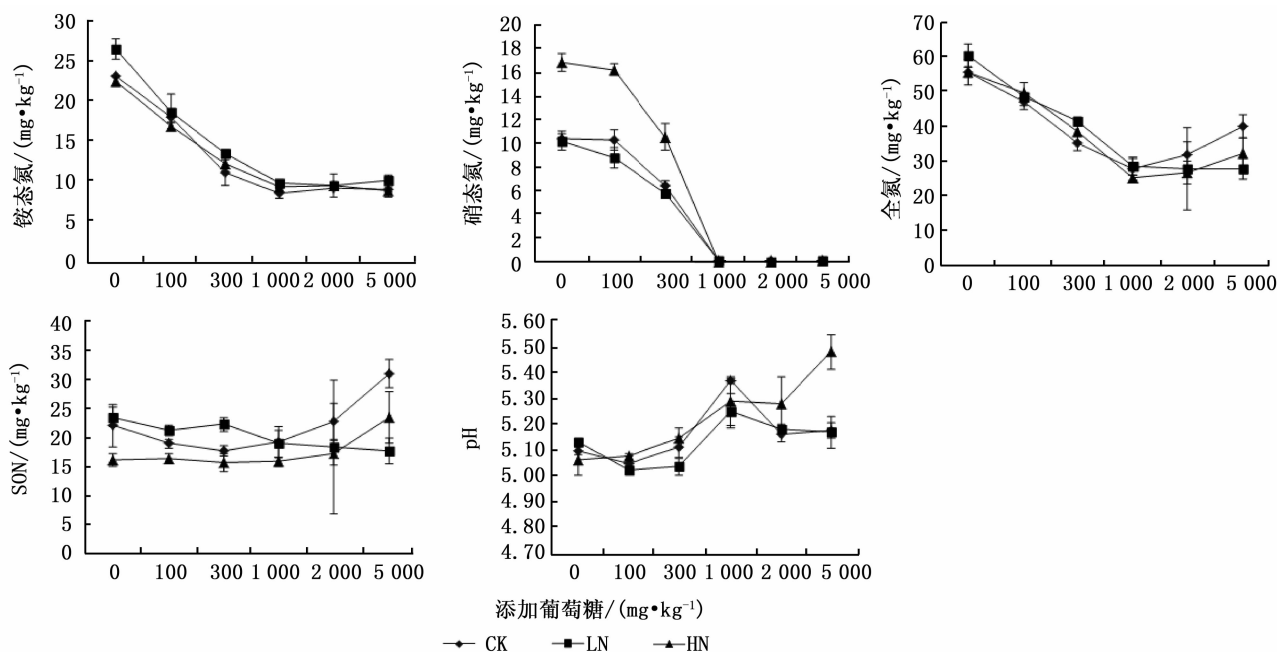


图1 葡萄糖C量对土壤铵态氮、硝态氮、可溶性有机氮、全氮和pH的影响

则平均升高 4.1% (图 1); 结果显示, 葡萄糖 C 量添加量 $1\ 000\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 是一个关键的分界点, 各氮形态在此以后或下降停止, 或略有升高, 或不再升高。铵态氮和硝态氮在提取液全氮中所占比例随葡萄糖添加而降低, 从 0 到 $1\ 000\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 平均降低 19.6% 和 99.6%, 而铵态氮所占比例在 CK 降低幅度最大 (26.6%), HN 最小 (8.9%); 可溶性有机氮所占比例持续升高且在添加量 $1\ 000\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 后升

幅放缓 (图 2), 从 0 到 $1\ 000\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 平均升高 87.0%, 而且 HN 水平下降幅度最大, 葡萄糖 C 量水平从 $1\ 000$ 到 $5\ 000\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, CK 和 HN 水平平均升高 13.3%, LN 没有再继续升高。结果显示, 硝态氮和可溶性有机氮在提取液全氮中所占比例成显著的线性负相关关系 ($R^2=0.902$) (图 3d)。硝态氮和铵态氮的关系显示它们成非线性关系, 而铵态氮和硝态氮与全氮分别成线性关系 (图 3)。

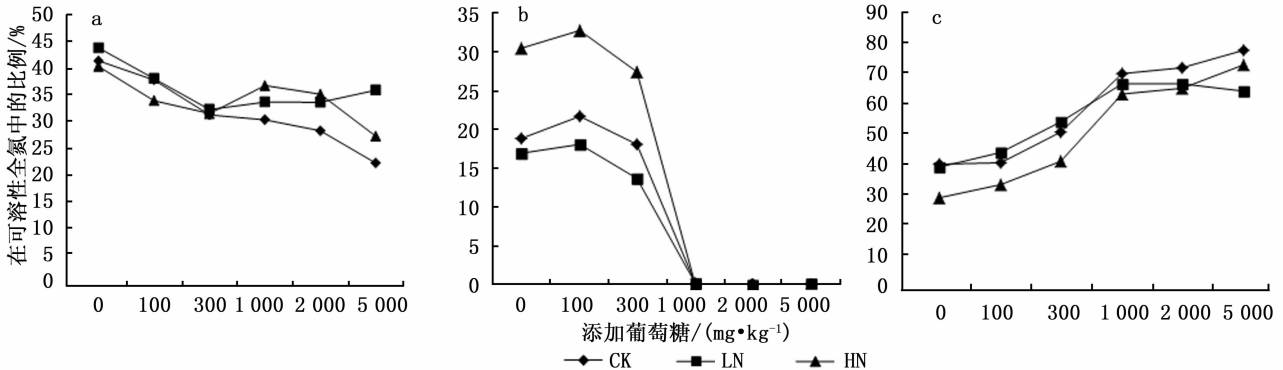


图 2 铵态氮(a)、硝态氮(b)和可溶性有机氮(c)在全氮中的比例

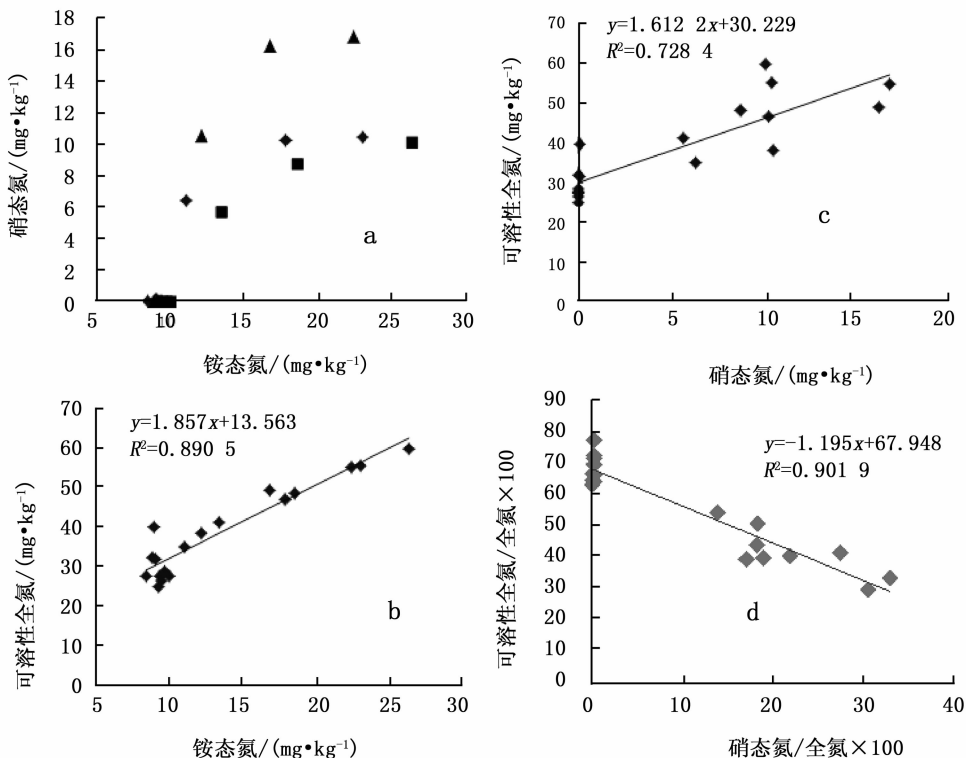


图 3 铵态氮与硝态氮(a)、铵态氮与全氮(b)、硝态氮与全氮(c)、硝态氮和可溶性有机氮在全氮中所占比例(d)的关系

2.2 对净矿化和硝化的影响

图 4 表明, 不同氮水平下氮矿化速率没有差异, 但是 HN 水平下氮硝化速率显著 ($P < 0.01$) 低于 CK 和 LN 水平。随葡萄糖添加增加, 矿化和硝化速率降低, 到 $1\ 000\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 不再降低。葡萄糖 C 量水

平从 0 到 $1\ 000\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 在 CK、LN 和 HN 下矿化速率分别显著 ($P < 0.01$) 降低 108.7%、150.9% 和 170.7%, 硝化速率分别显著 ($P < 0.01$) 降低 1408.1%、472.4% 和 406.7%。可见, 葡萄糖 C 量 $1\ 000\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 也是影响氮矿化和硝化的关键分界点。

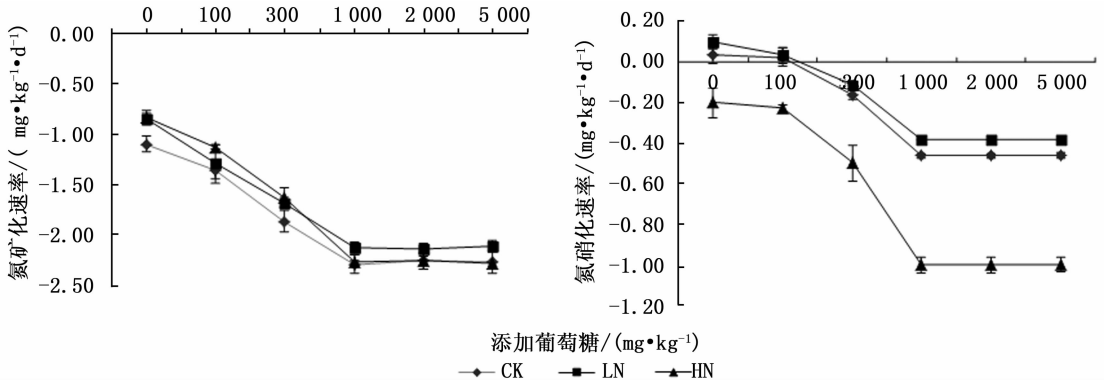


图4 不同葡萄糖C量梯度下土壤氮矿化和氮硝化速率

2.3 对亲水性和疏水性氮含量的影响

添加葡萄糖培养后平均亲水性氮占79.4%，疏水性占20.6%（图5），而培养前分别是83.4%和16.6%，表明培养后促进疏水性氮的增加。结果显示，CK和HN水平下，亲水性氮所占比例在葡萄糖C量1000 mg·kg⁻¹达到最低，分别为77.0%和73.7%，而LN水平下在2000 mg·kg⁻¹达到最低，为74.7%。然而CK水平下，亲水性氮在1000 mg·kg⁻¹后又开始升高，LN和HN水平下则维持较低比例。总体上，葡萄糖C量1000 mg·kg⁻¹的添加量也是影响疏水性氮所占比例的分界点。

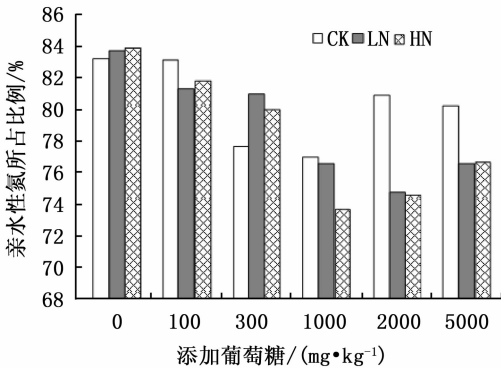


图5 不同葡萄糖C量梯度下土壤亲水性氮所占比例

3 结论与讨论

增加葡萄糖添加量，降低土壤无机氮含量和比例，但是没有降低可溶性有机氮(SON)和pH值，甚至提高SON的比例。可见，土壤氮素转化与土壤碳有效性等因子有关^[28]，施入土壤外源氮的转化受碳源的影响^[6]。Dendooven等^[13]发现，盐碱土添加葡萄糖和氮肥后，由于受氮固定、硝化反硝化作用的影响，NO₃⁻-N下降，NO₂⁻-N上升，这一结果与作者的研究类似。而氮沉降背景下大量碳的输入^[29]，以及氮沉降对土壤氮素转化的影响^[28]，均明确了凋落物

在其中扮演着重要的角色，尤其是可溶性碳的作用^[10-12]。由于森林生态系统中每年大量凋落物的输入，以及地被物对氮素动态和转化的影响，不同树种对土壤碳氮的影响主要集中在0~30 cm，而树种间的这种差异也主要是由于凋落物层的转化速率差异引起的^[18,30-31]，凋落物层碳氮转化的差异与不同森林生态系统植被、土壤等状况有关^[24-27]。研究显示，阔叶林凋落物降低氮素损失、增加土壤氮保持，而且硝态氮降低幅度大于铵态氮^[20]。向阔叶林土壤中添加蔗糖，导致原来较高的矿化和硝化，也显著降低，表明微生物固氮增加^[32]，甚至葡萄糖添加增加氮的固定效率远高于叶提取物、腐植酸等碳源^[33]。这些都很好的佐证了本研究结果：添加葡萄糖确实是降低硝态氮的幅度大于铵态氮，说明凋落物中碳含量的淋出对土壤氮转化发挥着重要的调节作用。另一方面，已有的研究表明，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^[15]，但是本文硝态氮降低幅度大于铵态氮的结果，可能与土壤碳含量较高有关。实验结果表明，添加葡萄糖降低氮素净矿化和硝化速率，土壤中加入葡萄糖，以外源方式提供了微生物可利用的活性碳源，土壤中矿质氮含量降低，微生物对矿质氮的固持作用增强，矿化作用相对受到抑制，在其他相关研究中也发现与我们类似的结果^[6,9]。因此，针对本文提出的假设，显然在中亚热带森林有一定的合理性，但就SON而言，又存在较多的变数；虽然土壤中亲水性氮占79.4%，疏水性占20.6%，但是随着葡萄糖添加，亲水性氮所占比例显著降低，从另一方面证实了矿化降低，这与氮的固持和转化有关，导致SON比例增加(图2)。硝态氮和可溶性有机氮在提取液全氮中所占比例成显著的线性负相关关系($R^2=0.902$) (图3d)间接地证明，很可能

微生物参与了硝态氮的固持和转化,根据本文的研究,可以假设,葡萄糖促进了微生物氮代谢。

供试红壤 pH 值为 5.7,在此 pH 值下,硝化作用以异养硝化为主^[34],碳源通过对异养硝化作用的调节对整体硝化作用产生较大的影响,这点不同于以自养硝化为主的土壤^[9],碳源主要通过影响微生物在硝化作用发生过程中需要的铵态氮含量,间接影响土壤的硝化作用^[35]。随着葡萄糖添加量的增加,铵态氮含量降低,因此硝化作用减弱,导致硝态氮含量降低;而结果表明硝态氮的快速降低,也可能还与反硝化有一定关系。反硝化细菌是土壤生物反硝化的主要作用者,土壤中有有机物质的生物有效性是调控土壤生物反硝化速率和作用强度的重要因子^[36]。土壤中添加葡萄糖,加入了化能异养型反硝化细菌所能利用的碳源,提高了土壤反硝化活性。Zhang^[34]报道,在 pH 值 <4.5,土壤含水量在 40%~52% 时,反硝化产生的 N₂O 占 50% 以上,葡萄糖添加促进湿地土壤反硝化和硝酸盐的损失^[37-38]。但是,本研究还没有发现明显的 N₂O 排放增加,考虑到硝态氮含量的显著降低到几乎为零,而 SON 又没有太多的增加,这样的结果可能与有效性碳的增加将有利于异养菌固定有效性铵态氮和硝态氮,导致氮储量的增加^[14]有关。同时也有可能是本文在观测 N₂O 排放时选择的观测点有问题,因此,下一步将就葡萄糖添加对土壤 N₂O 排放、土壤微生物和总氮含量的影响继续开展相关工作。已有的研究显示,北方针叶林凋落物促进氮矿化和硝化速率^[19],而凋落物等有机物对温带森林土壤氮转化的影响则很小^[21],因此必须考虑不同研究区域气温、降水和肥力差异带来的影响^[6,9,39]。

虽然通过模拟研究显示葡萄糖降低无机氮含量,但是综合已有的凋落物和多酚、单宁添加对氮素的影响研究成果^[40-42],由于多酚和单宁等也是含碳化合物,而酚酸碳与潜在反硝化速率成负相关,多糖碳葡萄糖与其成正相关^[43],所以葡萄糖还不能完全模拟全部复杂的可溶性碳形式在土壤氮素转化中的作用。即使如此,葡萄糖添加为我们认识碳对氮的影响,提供了研究思路。本文结果表明,添加葡萄糖降低无机氮含量、净矿化和净硝化速率,但是在试验添加范围内,并没有呈现线性或曲线形的持续变化,而是在葡萄糖 C 添加量为 1 000 mg·kg⁻¹ 后变化趋势停止或变缓。虽然类似的研究表明,葡萄糖 C 添加(600 mg·kg⁻¹)降低红壤水稻土氮矿化和反硝化速率的幅度在低肥力土壤远高于高肥力土壤^[8],张

乐等^[6]用低量葡萄糖 C 和高量葡萄糖 C 分别为 1 000 和 3 000 mg·kg⁻¹,也证实碳源的存在促进土壤氮素转化和截获;且添加蔗糖 C 量 230 和 2 300 mg·kg⁻¹ 也有类似的效果^[32],但是这些研究并未指出或涉及添加碳源不同水平的可能影响趋势,也没有研究葡萄糖或其他碳源是否都会有类似规律,而本文结果完善了人们对碳影响氮的理解。研究显示碳源无论来自哪里,其形式和含量始终是控制氮素转化的关键因子^[30-31,33,44-45],间接显示了凋落物在调控不同肥力环境下森林土壤氮素转化中的重要性。针对不同的土壤类型、植被类型以及不同的人为干扰等活动下,碳对氮影响的这种规律能否再现、影响的机理以及响应差异的原因和调控因子等科学问题,都涉及碳氮循环之间的关系。因此,基于目前的研究进展,模拟基质含量对亚热带森林土壤氮素转化的影响还有待更多研究,结果将有助于推动对碳氮关系机理的深入认识。

参考文献:

- [1] Kaiser J. The other global pollutant; nitrogen proves tough to curb [J]. *Science*, 2001, 294: 268-269
- [2] Bobbink R, Hicks K, Galloway J, *et al.* Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: a synthesis [J]. *Ecological Applications*, 2010, 20: 30-59
- [3] 李德军,莫江明,方运霆,等. 模拟氮沉降对南亚热带两种乔木幼苗生物量及其分配的影响[J]. *植物生态学报*, 2005, 29(4): 543-549
- [4] 郝吉明,谢绍东,段雷,等. 酸沉降临界负荷及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2001
- [5] Chen X Y, Mulder J. Atmospheric deposition of nitrogen at five subtropical forested sites in South China [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 378: 317-330
- [6] 张乐,何红波,章建新,等. 不同用量葡萄糖对土壤氮素转化的影响[J]. *土壤通报*, 2008, 39(4): 775-778
- [7] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(1): 1-6
- [8] 贾俊仙,李忠佩,车玉萍. 添加葡萄糖对不同肥力红壤性水稻土氮素转化的影响[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(8): 1617-1624
- [9] 贾俊仙,李忠佩,车玉萍. 添加葡萄糖对不同肥力黑土氮素转化的影响[J]. *土壤学报*, 2011, 48(1): 207-211
- [10] Joergensen R G, Scheu S. Response of soil microorganisms to the addition of carbon, nitrogen and phosphorus in a forest Rendzina [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(6): 859-866
- [11] Joergensen R G, Raubuch M. Adenylate energy charge of a glucose-treated soil without adding a nitrogen source [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34: 1317-1324
- [12] Yoshitake S, Sasaki A, Uchida M, *et al.* Carbon and nitrogen limi-

- tation to microbial respiration and biomass in an acidic solfatara field[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2007, 43:1-13
- [13] Dendooven L, Alcántara-Hernández R J, Valenzuela-Encinas C, *et al.* Dynamics of carbon and nitrogen in an extreme alkaline saline soil: A review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42: 865-877
- [14] Venterea R T, Groffman P M, Verchot L V, *et al.* Gross nitrogen process rates in temperate forest soils exhibiting symptoms of nitrogen saturation[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196: 129-142
- [15] 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 of Fertility and Soils*, 2007, 43: 823-828
- [16] Chen X Y, Mulder J, Wang Y H, *et al.* Atmospheric deposition, mineralization and leaching of nitrogen in subtropical forested catchments, South China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26:179-186
- [17] Bouwman A F, Van Drecht G, Van der Hoek K W. Global and regional surface nitrogen balances in intensive agricultural production systems for the period 1970-2030 [J]. *Pedosphere*, 2005, 15: 137-155
- [18] Kanerva S, Smolander A. Microbial activities in forest floor layers under silver birch, Norway spruce and Scots pine [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39:1459-1467
- [19] Tan X, Chang S X. Soil compaction and forest litter amendment affect carbon and net nitrogen mineralization in a boreal forest soil [J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 93:77-86
- [20] Huang Z Q, Xu Z H, Blumfield T J, *et al.* Soil nitrogen mineralization and fate of ($^{15}\text{NH}_4$) $_2\text{SO}_4$ in field incubated soil in a hardwood plantation of subtropical Australia; the effect of mulching [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2008, 8:389-397
- [21] Holub S M, Lajtha K, Spears J D H, *et al.* Organic matter manipulations have little effect on gross and net nitrogen transformations in two temperate forest mineral soils in the USA and central Europe [J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 214: 320-330
- [22] Xu X L, Ouyang H, Cao G M. Nitrogen retention patterns and their controlling factors in an alpine meadow: implications for carbon sequestration [J]. *Biogeosciences Discuss*, 2007, 4: 2641-2665
- [23] Ste-Marie C, Houle D. Forest floor gross and net nitrogen mineralization in three forest types in Quebec, Canada [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38: 2135-2143
- [24] 向升华, 高人, 马红亮, 等. 不同年龄杉木人工林土壤无机氮比较研究[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2008, 3(1): 24-30
- [25] Zhang W, Mo J, Yu G, *et al.* Emissions of nitrous oxide from three tropical forests in Southern China in response to simulated nitrogen deposition [J]. *Plant and Soil*, 2008, 306:221-236
- [26] Zhao W, Cai Z, Xu Z. Does ammonium-based N addition influence nitrification and acidification in humid subtropical soils of China [J]. *Plant Soil*, 2007, 297:213-221
- [27] DeForest J L, Zak D R, Pregitzer K S, *et al.* Atmospheric nitrate deposition, microbial community composition, and enzyme activity in northern hardwood forests [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68:132-138
- [28] 方运霆, 莫江明, Gundersen P, 等. 森林土壤氮素转换及其对氮沉降的响应[J]. *生态学报*, 2004, 24(7): 1523-1531
- [29] 邓小文, 韩士杰. 氮沉降对森林生态系统土壤碳库的影响[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(10): 1622-1627
- [30] Vesterdal L, Schmidt I K., Callesen I, *et al.* Carbon and nitrogen in forest floor and mineral soil under six common European tree species[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255: 35-48
- [31] 罗献宝, 张颖清, 徐浩, 等. 温带阔叶红松林中不同树种和倒木对土壤性质的影响[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(12): 1841-1845
- [32] 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 American Journal*, 2005, 69:247-256
- [33] Magill A H, Aber J D. Variation in soil net mineralization rates with dissolved organic carbon additions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32:597-601
- [34] Zhang J B, Cai Z C, Zhu T B. N_2O production pathways in the subtropical acid forest soils in China[J]. *Environmental Research*, 2011, 111: 643-649
- [35] 钱琛. 亚热带红壤的硝化作用及其对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋溶和土水酸化的影响[D]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2008
- [36] 俞慎, 李振高. 稻田生态系统生物硝化-反硝化作用与氮素损失[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(5): 630-634
- [37] Lu S, Hu H, Sun Y, *et al.* Effect of carbon source on the denitrification in constructed wetlands[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21: 1036-1043
- [38] Jordan T E, Weller D E, Correll D L. Denitrification in surface soils of a riparian forest: Effects of water, nitrate and sucrose additions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30:833-843
- [39] 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 等. 不同林龄马尾松凋落物基质质量与土壤养分的关系[J]. *生态学报*, 2012, 32(3): 852-862
- [40] 刘维丽, 马红亮, 彭秀明, 等. 凋落物中次生代谢物对森林土壤可溶性氮的影响[J]. *土壤*, 2010, 42(4): 564-568
- [41] 王杰, 马红亮, 高人, 等. 添加酚类物质对森林土壤无机氮的影响[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(10): 5184-5187
- [42] 马红亮, 刘维丽, 高人, 等. 凋落物与单宁酸对森林土壤无机氮的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(1): 61-65
- [43] Dodla S K, Wang J J, DeLaune R D, *et al.* Denitrification potential and its relation to organic carbon quality in three coastal wetland soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 407: 471-480
- [44] Ma H L, Gao R, Wang J, *et al.* Response of soil NH_4^+ and NO_3^- transformations to nitrogen deposition under addition of litters and tannin [M]// Li S C, Wang W Y, Niu P H, *et al.* *Progress in Environmental Science and Technology (VOL. III)*. Beijing Jiaotong University, Science Press, 2011, 54-59
- [45] Lummer D, Scheu S, Butenschon O. Connecting litter quality, microbial community and nitrogen transfer mechanisms in decomposing litter mixtures [J]. *Oikos*, 2012, 121: 1649-1655