北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

不同水分条件下氨基酸添加对温带暗棕壤碳氮含量和甲烷排放的影响

李颖 郭亚芬 崔晓阳

Effects of amino acid addition on carbon and nitrogen content and CH_4 emission in temperate dark brown soil under different water conditions

Li Ying, Guo Yafen, Cui Xiaoyang

引用本文:
李颖, 郭亚芬, 崔晓阳. 不同水分条件下氨基酸添加对温带暗棕壤碳氮含量和甲烷排放的影响[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(5):103–113. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230290
Li Ying, Guo Yafen, Cui Xiaoyang. Effects of amino acid addition on carbon and nitrogen content and CH_4 emission in temperate dark brown soil under different water conditions[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(5):103–113. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230290

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230290

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

氮素化学形态及添加剂量对温带森林土壤N_2O排放的影响
Effects of different nitrogen addition forms and levels on N_2O emission in the temperate forest soil
北京林业大学学报, 2017, 39(3): 74–80. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20160103

寒温带林区不同林型下土壤中氮矿化特征
Characteristics of nitrogen mineralization in soils under different forest types in cold–temperate forest region
北京林业大学学报, 2019, 41(9): 122–129. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180276

坡位对寒温带天然樟子松林土壤微生物生物量碳氮的影响
Effects of slope position on soil microbial biomass carbon and nitrogen in natural *Pinus sylvestris* var. *mongolia* forest in the cold temperature zone
北京林业大学学报, 2020, 42(2): 31–39. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190309

不同土壤水分和养分条件下筇竹竹秆解剖特征及其适应可塑性
Anatomical characteristics and adaptability plasticity of *Qiongzhuea tumidinoda* stalk under different soil water and nutrient conditions
北京林业大学学报, 2020, 42(4): 80–90. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190290

小兴安岭地区典型红松林下不同形态土壤氮的动态变化
Dynamic changes of multi–form nitrogen in typical *Pinus koraiensis* forest of Xiaoxing'an Mountains of northeastern China
北京林业大学学报, 2017, 39(12): 52–60. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170241

春季冻融期寒温带主要森林类型土壤氮矿化特征
Characteristics of soil nitrogen mineralization in the main forest types in cold temperate zone during the spring freezing–thawing period
北京林业大学学报, 2020, 42(3): 14–23. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190359

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230290

不同水分条件下氨基酸添加对温带暗棕壤碳氮含量和甲烷排放的影响

李 颖　郭亚芬　崔晓阳
（东北林业大学林学院，黑龙江 哈尔滨 150040）

摘要:【目的】解析土壤 pH 值与土壤氮以及 CH_4 排放速率与土壤碳氮含量间的相互关系，为明确碳氮转化及温室气体排放规律、优化温带森林暗棕壤的水分管理提供依据。**【方法】**以温带森林暗棕壤为研究对象，采用室内培养法，设置水分条件为土壤饱和持水量（WHC）的 40%、60%、90%，通过向温带暗棕壤中添加两种不同性质的氨基酸，探讨其对土壤碳氮含量及 CH_4 排放的潜在影响，运用 Pearson 相关分析法分析土壤碳氮含量、pH 值及 CH_4 排放速率间的相关性。**【结果】**（1）氨基酸处理显著增加了土壤可溶性有机碳（DOC）含量、铵态氮（NH_4^+-N）含量及 CH_4 排放速率。亮氨酸处理使 DOC、NH_4^+-N 含量分别升高 21.39%、45.10%，CH_4 排放速率较 CK 升高 3.20 倍，甲硫氨基酸使 DOC、NH_4^+-N 含量分别升高 21.39%、72.71%，CH_4 排放速率较 CK 升高 7.00 倍；（2）不同氨基酸对土壤硝态氮（NO_3^--N）含量的影响存在差异。亮氨酸处理使土壤NO_3^--N 含量升高了 8.41%，但其对于土壤硝化作用的影响可能存在滞后性，而甲硫氨基酸能够显著抑制土壤硝化作用，NO_3^--N 含量显著降低了 37.90%；（3）土壤不同水分条件对土壤 DOC、NH_4^+-N、NO_3^--N 含量及 CH_4 排放速率均存在显著影响。90%WHC 使 DOC 含量升高 11.95%～19.91%，使NH_4^+-N 升高 19.83%～35.46%，使NO_3^--N 降低 10.05%～23.79%，使 CH_4 排放速率升高至另外两种水分条件的 1.48～2.06 倍。60%WHC 条件使NH_4^+-N 升高 13.05%，使NO_3^--N 含量升高 24.62%。60%WHC 可能是温带暗棕壤硝化作用的最适含水量，90%WHC 条件有利于 DOC 积累，同时对NO_3^--N 的产生存在明显抑制作用；（4）土壤 pH 与NH_4^+-N 含量呈极显著正相关，与NO_3^--N 含量呈正相关。CH_4 排放速率与NO_3^--N 含量呈极显著负相关，与NH_4^+-N 含量呈负相关，与 DOC 含量呈极显著正相关。**【结论】**不同性质氨基酸添加在温带森林暗棕壤碳氮含量及 CH_4 排放中发挥的作用不尽相同。一定范围内，土壤水分含量的升高有利于土壤NH_4^+-N、NO_3^--N、DOC 的积累及 CH_4 的排放，但土壤高含水量条件对NO_3^--N 的产生具有抑制作用。因此，在研究温带森林暗棕壤碳含量、CH_4 排放及氮转化机制时，建议关注不同氨基酸的差异性作用，同时考虑水分的变化。

关键词：土壤水分；氨基酸态氮；碳氮含量；甲烷；温带暗棕壤
中图分类号：S714　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2024)05−0103−11
引文格式：李颖，郭亚芬，崔晓阳. 不同水分条件下氨基酸添加对温带暗棕壤碳氮含量和甲烷排放的影响［J］. 北京林业大学学报，2024，46(5)：103−113. Li Ying, Guo Yafen, Cui Xiaoyang. Effects of amino acid addition on carbon and nitrogen content and CH_4 emission in temperate dark brown soil under different water conditions［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(5): 103−113.

Effects of amino acid addition on carbon and nitrogen content and CH_4 emission in temperate dark brown soil under different water conditions

Li Ying　Guo Yafen　Cui Xiaoyang
(School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract:［**Objective**］To clarify the response of carbon and nitrogen content and CH_4 emission to different soil moisture conditions and the additions of amino acid in the dark brown soil of temperate forests, this

收稿日期: 2023−10−24　**修回日期:** 2023−12−01
基金项目: 国家自然科学基金项目（31370617）。
第一作者: 李颖。主要研究方向：森林土壤学。Email: 1919782323@qq.com　地址：150040 黑龙江省哈尔滨市和兴路 26 号东北林业大学林学院。
责任作者: 郭亚芬，博士，教授。主要研究方向：森林土壤学与植物营养学。Email: guoyafen@sohu.com　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

study analyzed the relationship between soil pH and nitrogen, CH_4 emission rate and soil carbon and nitrogen content, to assist related research on water management, carbon and nitrogen transformation, and greenhouse gas emission in temperate forest dark brown soil. [**Method**] In this study, an indoor soil incubation was conducted with 40%, 60%, and 90% of the soil water holding capacity (WHC). Additionally, the potential effects of adding two amino acids on soil carbon and nitrogen content and CH_4 emissions were explored. The Pearson correlation analysis was used to analyze the correlation between soil carbon and nitrogen content, pH and methane emission rate. [**Result**] (1) Amino acid addition increased soil dissolved organic carbon (DOC) content, and meanwhile significantly increased NH_4^+-N content and CH_4 emission rate. Leucine treatment increased the contents of DOC and NH_4^+-N by 21.39%−45.10%, respectively, and the CH_4 emission rate was 3.20 times higher than that of CK, methionine treatment increased the contents of DOC and NH_4^+-N by 21.39%−72.71%, respectively. and the CH_4 emission rate was 7.00 times higher than that of CK. (2) The influence of different amino acids on soil NO_3^--N content was different. Leucine treatment increased NO_3^--N content in soil by 8.41%, but its effect on nitrification in soil may have a lag, while methionine can significantly inhibit nitrification in soil, and NO_3^--N content was significantly reduced by 37.90%. (3) Different soil moisture conditions had significant effects on soil DOC, NH_4^+-N, NO_3^--N and CH_4 emission rates. 90% WHC increased DOC content by 11.95%−19.91%, NH_4^+-N by 19.83%−35.46%, NO_3^--N by 10.05%−23.79%, and CH_4 emission rate increased to 1.48−2.06 times of the other two water conditions. Under 60% WHC condition, NH_4^+-N increased by 13.05%, NO_3^--N content increased by 24.62%. 60% WHC may be the optimum water content for nitrification in temperate dark brown soil. The 90% WHC condition was conducive to the accumulation of DOC, and had an obvious inhibitory effect on NO_3^--N production. (4) Soil pH was significantly positively correlated with NH_4^+-N content, positively correlated with NO_3^--N content. The CH_4 emission rate was significantly negatively correlated with NO_3^--N content and NH_4^+-N content, and significantly positively correlated with DOC content. [**Conclusion**] Addition of different types of amino acids plays different roles on the carbon and nitrogen content and CH_4 emissions of dark brown soil in temperate forests. Within a certain range, the increase of soil moisture content is beneficial to soil NH_4^+-N, NO_3^--N, DOC accumulation and CH_4 emission, but high soil moisture content inhibits the production of NO_3^--N. Therefore, the role of amino acids and changes in moisture should be considered when studying carbon content, CH_4 emissions and nitrogen transformation mechanisms in temperate forest dark brown soils.

Key words: soil moisture; amino acid nitrogen; carbon and nitrogen content; methane; temperate dark brown soil

森林土壤中的氮主要来源于大气氮沉降和凋落物分解[1]，而氨基酸作为大气氮沉降的重要组分，同时也是凋落物归还土壤中有机氮分解的重要产物[2]，其含量变化受上述两过程调节。Campbell 等[3]将土壤中的氨基酸分为 4 类：酸性、碱性、中性和含硫氨基酸。Jones 等[4]提出不同性质氨基酸在土壤中的行为存在差异，而氨基酸作为碳氮耦合体，必然与碳氮循环密切相关。全球气候背景下，降水格局发生明显改变[5]，直接影响土壤水分状况。未来，受全球气候变化调节的土壤氨基酸含量以及土壤水分条件在土壤碳氮循环过程及甲烷（CH_4）等温室气体排放过程中发挥的作用不可忽视。

土壤可溶性有机碳（dissolved organic carbon，DOC）是土壤有机质的重要组成部分，对土壤养分循环具有重要意义，此外，因其具有活性高、移动快等特点，所以极易受施氮、水分等环境变化的影响[6]。Deforest 等[7]在美国密歇根的试验结果表明，施氮使土壤中可溶性酚类物质积累，间接导致 DOC 含量增加。也有研究结果显示，施氮促进了微生物对 DOC 的利用，使土壤 DOC 含量显著降低[8]。关于施氮对土壤 DOC 影响的研究在理论和试验结果方面仍存在很多不确定性，且多数研究以无机氮处理为主，关于有机氮输入对土壤 DOC 影响的研究鲜有报道，有机氮作为土壤氮素的重要组分，在土壤 DOC 含量变化中发挥的作用不容忽视。裴广廷等[9]在我国亚热带地区的研究结果表明，氨基酸处理显著促进了土壤 DOC 积累。关于温带森林土壤 DOC 含量对氨基酸添加响应特征的研究还较为缺乏。除氮输入外，

水分是影响 DOC 的另一个因子。水分主要通过影响微生物活性[10]、促进团聚体分散和有机碳溶出[11]、影响土壤有机质的水化作用[12]等形式对 DOC 含量产生影响。此类研究大多针对高寒草地[10]及农田土壤[13]，温带森林土壤中水分条件对 DOC 含量的影响还不明确。

氮素输入对森林土壤氮矿化起着关键作用。通常情况下，土壤氮最主要的来源是凋落物的归还[1]，已有研究表明，氨基酸是凋落物归还土壤过程中有机氮分解的重要产物[2]，森林土壤中的氨基酸氮相对于土壤中大分子有机氮组分而言，具有优先被矿化的特性，因此氨基酸可参与并调控土壤氮素转化过程，与无机氮存在着密切的动态转化关系，深刻影响铵态氮（NH_4^+-N）、硝态氮（NO_3^--N）含量[14]，与土壤供氮能力密切相关，同时在土壤氮素保持和迁移转化中起重要作用。由于不同性质氨基酸侧链结构、分子量、分解过程等存在差异，因此可能会对土壤无机氮含量产生差异性的影响，目前相关研究还较为缺乏。甲硫氨基酸（Met）作为土壤中较为常见的含硫氨基酸，其在酸性土壤中对土壤硝化作用的影响还不明确。氨基酸氮在土壤氮循环中的地位和作用还需要进一步深入认识。土壤水分条件是影响土壤氮矿化作用的另一个重要因子。有研究表明，土壤水分增加有利于反应底物扩散，从而加大微生物与底物接触概率，刺激土壤有机氮矿化，间接增加土壤 NH_4^+-N、NO_3^--N 含量[15]。因此，探究温带暗棕壤不同水分条件下的土壤氮矿化特征，对于了解温带森林生态系统氮素循环与转化具有重要的意义，同时可为提高森林生产力、水分管理等提供参考依据。

森林土壤是大气 CH_4 最有效的陆地生物汇，CH_4 作为森林生态系统碳收支的重要一环，其排放速率的变化取决于土壤 CH_4 排放和吸收过程的强弱，上述两个过程受氮素、底物有效性、水分等多种环境因子的联合控制，其中施氮、水分以及基质有效性占主要地位。多数研究显示，施氮能够抑制土壤对 CH_4 的吸收，使土壤 CH_4 表现为排放[16−17]。如刘超等[16]研究表明，施氮通过增加有机碳对产甲烷菌的供给来增加 CH_4 排放速率。也有学者认为施氮对土壤 CH_4 排放速率的促进作用是通过影响土壤无机氮含量实现的[17]。除施氮外，土壤水分条件是影响土壤 CH_4 排放的另一因素。李平等[18]采用室内培养法，探究 60%、100% 土壤饱和持水量（water holding capacity，WHC）及淹水 3 种水分条件对砂壤土 CH_4 排放的影响，结果表明，水分从 60%WHC 升高到 100%WHC 对 CH_4 排放无显著影响，淹水条件显著促进了 CH_4 的排放。Castro 等[19]却强调 100%WHC 为产 CH_4 菌提供了良好的生存条件，使 CH_4 排放速率显著升高，且显著高于 60%WHC，同时提出土壤 CH_4 排放速率和土壤水分条件呈显著负相关关系。由此可见，不同水分条件在不同土壤环境中对 CH_4 排放的影响存在差异。此外，有研究表明有机质作为 CH_4 产生的底物，与 CH_4 排放速率呈极显著正相关[20]。最新研究指出，DOC 作为高质量的活性底物，是决定土壤 CH_4 生产潜能和产量的关键因素[16]。尽管国外在 DOC 和 CH_4 排放速率相关性的研究方面已取得了一定成果，但国内此类研究相对较少。

目前关于氨基酸的研究主要集于其吸收动力学和周转半衰期等方面[21−23]，而 DOC 与土壤 CH_4 排放速率间相关关系的研究则较为缺乏。此外，由于对大气降水的大规模调控难以实现，模拟不同水分条件下森林生态系统对 CH_4 排放速率影响的研究也相对有限，现有研究尚未明确土壤碳氮含量及 CH_4 排放速率对不同水分条件和氨基酸态氮添加的响应模式。因此，本文选择温带森林暗棕壤为研究对象，设置 40%WHC、60%WHC、90%WHC 3 个水分梯度[15]，添加所选林地土壤中的中性优势氨基酸：亮氨酸（Leu，代表常规氨基酸）[24]和甲硫氨基酸（Met，代表含硫氨基酸），进行室内培养试验。通过分析土壤中 NH_4^+-N、NO_3^--N、DOC 含量、土壤 pH 值及 CH_4 排放速率的变化特征及其相关性，旨在探讨土壤水分状况和不同性质氨基酸态氮在温带森林暗棕壤碳氮含量及 CH_4 排放中的差异性作用及可能的机理。

1　研究区概况及研究方法

1.1　供试土壤与试验设计

供试土壤于 2022 年 6 月在黑龙江省帽儿山森林生态系统国家野外科学观测研究站的红松（*Pinus koraiensis*）人工林采集（45°24′N，127°40′E）。该区属温带大陆性季风气候，年均气温 2.8 ℃，降水多集中于 7—8 月，年均降水量 600 ~ 800 mm，无霜期 120 ~ 140 d，地带性土壤为暗棕壤。

选择红松人工林中的典型地段，设置面积为 50 m × 50 m 的样地，在样地中随机设置 5 个样方（10 m × 10 m），每个样方采用 5 点取样法，去除地表凋落物后，用土钻采集表层土壤，同时用环刀采集原状土，用于测定土壤饱和持水量，将土钻采集所得土壤剔除石块和可见植物根系后混匀，过 2 mm 筛，置于 4 ℃ 保存，备用。

试验包括水分（40%WHC、60%WHC、90%WHC）和氨基酸态氮（对照、亮氨酸处理、甲硫氨基酸处理）2 个因素，完全随机设计共得 9 个处理，每个处理包括 18 个重复，试验总样本数为 162 个。正式培养前

将土壤样品进行风干、测定其吸湿水含量。称取 30 g 土样(干基计)置于 500 mL 塑料培养瓶中，用移液枪均匀滴加蒸馏水将土壤水分调节至 20%WHC[15]，此步骤所加水量根据风干土含水量及新鲜土样饱和持水量(658.6 g/kg)计算得到，瓶口用保鲜膜密封，橡皮筋系紧，用牙签在封口膜上均匀地扎 3 个小孔，以便气体交换同时减少水分损失，将培养瓶放于 25 ℃(室温)预培养 7 d，激活微生物活性。期间每隔 2 d 称量培养瓶质量，补足水分损失，同时便于正式培养时土壤水分的调节。

正式培养时，向每个培养瓶中均匀等量添加氨基酸溶液(40 mg/kg，以 N 计)[4]，对照添加等量去离子水，由于预培养后每个培养瓶中土壤水分含量均为 20%WHC，因此，在此基础上再次对土壤水分进行调节，拧紧瓶盖，将培养瓶置于 25 ℃ 生化培养箱中培养，培养过程中每隔 2 d 称量培养瓶质量、补水，保证瓶内土壤含水量恒定，各处理于培养的第 0、2、8、12、16、36 天随机取出 3 个培养瓶(每个培养瓶作为一个重复)，用注射器抽取 50 mL 气体，转移到铝膜气袋(大连，海得)中贮存，用于测定气体样品中的 CH_4 浓度，气体取样结束后，向培养瓶中加入 150 mL 中性盐溶液(土水体积比 = 1∶5)，振荡浸提 1 h 后用 0.45 μm 微孔滤膜抽滤，得到的滤液用于 NH_4^+-N、NO_3^--N、DOC 的测定[25]。所用氨基酸基本理化性质见表 1。

1.2 测定项目与方法

土壤NH_4^+-N、NO_3^--N 含量采用连续流动分析仪(AA3 型，德国)测定；气体样品中的 CH_4 浓度通过气相色谱仪(岛津 GC-2010PLUS，日本)测定，采用体积浓度(mL/m^3)表示；DOC 含量测定参考 Li 等[26]的方法；土壤 pH 值采用中性盐溶液浸提，电位法(雷磁，pHSJ-3F 型)测定，土壤吸湿水含量采用烘干法测定，土壤饱和持水量采用环刀法测定[27]。

$$F = k\,v\,m^{-1}\,\Delta c\,\Delta t^{-1} \times 273 \times (273 + T)^{-1}$$[9]

式中：F 表示 CH_4 排放速率(mg/(kg·d))，k 表示 CH_4 在标准状态下的气体密度，为常数，取值 0.714 kg/m^3；v 为培养瓶容量体积(m^3)；m 为干土质量(kg)；$\Delta c/\Delta t$ 为观测期内 CH_4 浓度随时间变化的直线斜率；T 为培养温度(℃)。

1.3 数据统计与分析

采用 Excel 2016 和 SPSS 23.0 软件对数据进行整理和统计分析，采用 Origin 2023b 软件作图。不同处理间的差异运用 SPSS 23.0 中的单因素(one-way ANOVA)和 Duncan 法进行方差分析和多重比较，运用多因素方差分析检验氨基酸、土壤水分状况以及培养时间对土壤碳氮含量、pH 以及 CH_4 排放速率的影响，运用 Pearson 相关分析法分析指标间的相关性。

2 结果与分析

2.1 不同水分条件下氨基酸处理对 DOC 含量的影响

由表 2 可知，氨基酸处理均显著增加了土壤 DOC 含量($P < 0.05$)。3 种水分条件下，各处理的 DOC 含量均呈现先升高再降低而后又升高的趋势。40%WHC 条件下，在培养的第 8 天、第 12 天、第 36 天，氨基酸处理下的 DOC 含量与 CK 达显著差异($P < 0.05$)(图 1)。60%WHC 条件下，除第 0 天外，氨基酸处理下的 DOC 含量均与 CK 达显著差异($P < 0.05$)(图 1)。90%WHC 条件下，在培养的第 8 天、第 12 天、第 36 天，氨基酸处理下的 DOC 含量与

表 1 氨基酸基本理化性质

Tab. 1 Physicochemical characteristics of amino acids

氨基酸名称 Amino acid name	含氮量 Nitrogen content/%	C/N	等电点 Iso-electric point	侧链结构性质 Side-chain chemistry	性质 Property
亮氨酸 Leucine	10.7	5.14	5.98	1氨基1羧基 An amino group and a carboxyl group	中性 Neutral
甲硫氨基酸 Methionine	9.4	4.29	5.74	1氨基1羧基(含S) An amino group and a carboxyl group (including sulphur)	含硫类 Sulfur-containing

表 2 不同氨基酸处理对土壤碳氮含量、pH 及 CH_4 排放速率的影响

Tab. 2 Effects of different amino acid treatments on carbon and nitrogen content, pH and CH_4 emission rate in soil

处理 Treatment	可溶性有机碳 DOC/(g·kg^{-1})	铵态氮 NH_4^+-N/(mg·kg^{-1})	硝态氮 NO_3^--N/(mg·kg^{-1})	pH	甲烷排放速率 CH_4 emission rate/(mg·kg^{-1}·d^{-1})
CK	2.01 ± 0.86b	31.33 ± 9.48c	24.25 ± 12.24b	5.36 ± 0.06c	0.05 ± 0.65c
Leu	2.44 ± 0.96a	45.46 ± 15.39b	26.29 ± 14.17a	5.45 ± 0.09b	0.21 ± 0.72b
Met	2.44 ± 1.05a	54.11 ± 21.59a	15.06 ± 8.00c	5.52 ± 0.12a	0.40 ± 0.72a

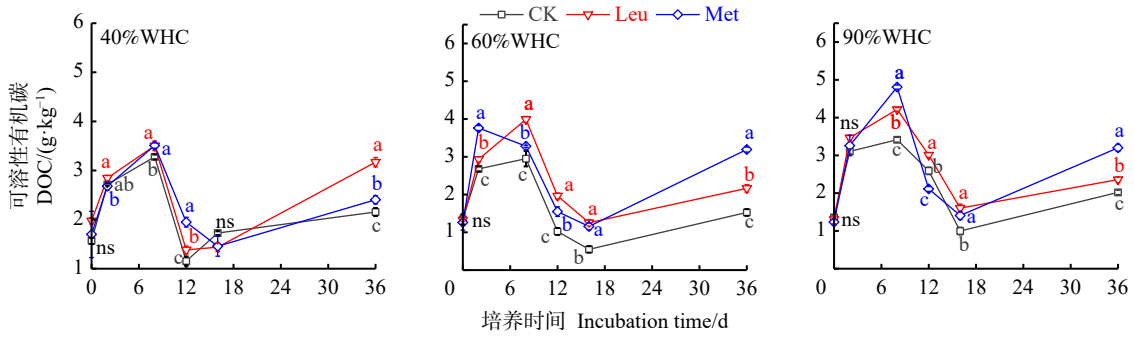
注：不同字母代表同一列不同处理间存在显著差异($P < 0.05$)。Note: different letters indicate significant differences between varied treatments in the same column ($P < 0.05$).

CK 达显著差异（$P < 0.05$）（图 1）。土壤水分条件对 DOC 含量具显著影响（$P < 0.05$），表现为：90%WHC > 40%WHC > 60%WHC（表 3）。

2.2　不同水分条件下氨基酸处理对无机氮含量的影响

由表 2 可知，氨基酸处理均显著增加了土壤 NH_4^+-N 含量（$P < 0.05$），且 Met 的作用更为明显（$P < 0.05$）。3 种水分条件下土壤 NH_4^+-N 含量均在培养的第 2 天急剧升高，随后上升缓慢，从第 2 天开始，氨基酸处理下的 NH_4^+-N 含量与 CK 达显著差异（$P < 0.05$）（图 2）。水分对土壤 NH_4^+-N 含量存在显著影响（$P < 0.05$），表现为：90%WHC > 60%WHC > 40%WHC（表 3）。

由表 2 可知，两种氨基酸对土壤 NO_3^--N 含量的影响存在明显差异，Leu 处理使 NO_3^--N 含量显著升高（$P < 0.05$），而 Met 处理使 NO_3^--N 含量显著降低（$P < 0.05$）。3 种水分条件下，土壤 NO_3^--N 含量均随培养时间的延长呈增长趋势（图 3）。40%WHC 条件下，从第 2 天开始，Met 处理下的 NO_3^--N 含量显著低于 CK（$P < 0.05$），但 Leu 与 CK 间无显著差异（$P > 0.05$）（图 3）。60%WHC 条件下，Met 在第 8 天时开始显著低于 CK（$P < 0.05$），Leu 与 CK 无显著差异（$P > 0.05$），到了培养的第 36 天时，三者间均达显著差异（$P < 0.05$），表现为 Leu > CK > Met（图 3）。当土壤含水量升高至 90%WHC，土壤 NO_3^--N 含量变化与 60%WHC 时类似，但 CK、Leu、Met 三者在培养的第 16 天时就达到了显著差异，同样表现为 Leu >



CK. 对照；Leu. 亮氨酸；Met. 甲硫氨基酸。WHC. 土壤饱和持水量。不同字母代表同一时间不同处理间存在显著差异（$P < 0.05$）；ns 代表无显著差异（$P > 0.05$）。误差线代表标准偏差。下同。CK, control; Leu, leucine; Met, methionine. WHC, water holding capacity. Different letters indicate significant differences between treatments at the same time ($P < 0.05$); ns indicates no significant differences between treatments at the same time ($P > 0.05$). Error bars show standard deviation. The same below.

图 1　不同水分条件下不同氨基酸处理土壤 DOC 含量变化

Fig. 1　Changes of soil DOC content under different water conditions and varied amino acid treatments

表 3　不同水分条件对土壤碳氮含量、pH 及 CH_4 排放速率的影响

Tab. 3　Effects of different water conditions on carbon and nitrogen content, pH and CH_4 emission rate in soil

WHC/%	可溶性有机碳 DOC/(g·kg⁻¹)	铵态氮 NH_4^+-N/(mg·kg⁻¹)	硝态氮 NO_3^--N/(mg·kg⁻¹)	pH	甲烷排放速率 CH_4 emission rate/(mg·kg⁻¹·d⁻¹)
40	2.26 ± 0.77b	37.56 ± 12.48c	21.30 ± 10.96b	5.43 ± 0.11b	0.18 ± 0.67b
60	2.11 ± 1.02c	42.46 ± 16.08b	25.14 ± 15.01a	5.42 ± 0.11b	0.25 ± 0.71ab
90	2.53 ± 1.08a	50.88 ± 23.50a	19.16 ± 11.06c	5.47 ± 0.12a	0.37 ± 0.76a

注：表中数据为平均值 ± 标准差。不同字母代表同一列不同水分条件间存在显著差异（$P < 0.05$）。Notes: data in the table are mean ± standard deviation. Different letters indicate significant differences between varied moisture conditions in the same column ($P < 0.05$).

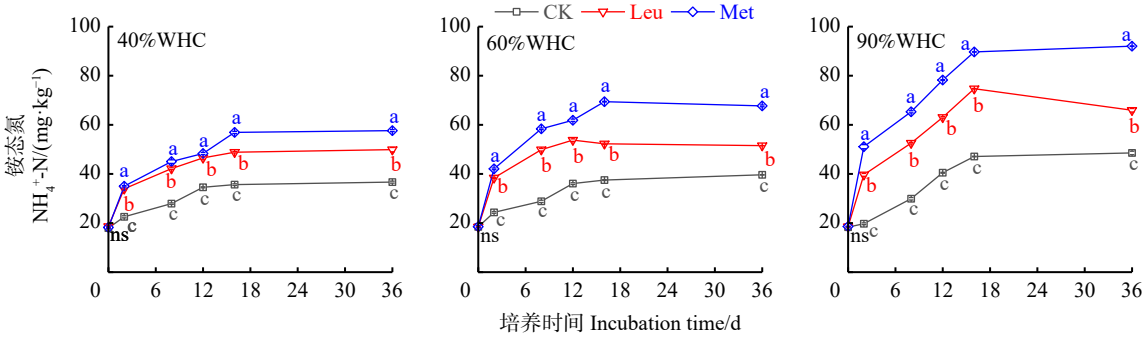


图 2　不同水分条件下不同氨基酸处理土壤 NH_4^+-N 含量变化

Fig. 2　Changes of soil ammonium nitrogen content under different water conditions and different amino acid treatments

CK > Met(图 3)。水分对土壤NO_3^--N 含量存在显著影响($P < 0.05$)，表现为：60%WHC > 40%WHC > 90%WHC。由此可见，NO_3^--N 的产生受高含水量条件的抑制，且 Met 可以显著抑制土壤NO_3^--N 的产生(表 3)。

2.3 不同水分条件下氨基酸处理对土壤 pH 的影响

由表 2 可知，氨基酸处理使土壤 pH 值显著升高($P < 0.05$)。40%WHC、60%WHC 条件下，除第 0 天外，Met 处理下的土壤 pH 均显著高于 CK($P < 0.05$)，在培养的第 2 天、第 12 天、第 36 天，Leu 处理的土壤 pH 值与 CK 达显著差异($P < 0.05$)(图 4)。90%WHC 条件下，除第 0 天外，Met、Leu 处理下的土壤 pH 均显著高于 CK($P < 0.05$)(图 4)。40%WHC、60%WHC 条件下，土壤 pH 值显著低于 90%WHC($P < 0.05$)，但二者间无明显差异($P > 0.05$)(表 3)。

2.4 不同水分条件下氨基酸处理对 CH_4 排放的影响

由表 2 可知，氨基酸处理显著提高了土壤 CH_4 排放速率($P < 0.05$)，且 Met 的促进作用强于 Leu($P < 0.05$)。40%WHC 条件下，第 8 天时，氨基酸处理下的 CH_4 排放速率显著高于 CK($P < 0.05$)，各处理在第 12 天、第 36 天时均达显著差异($P < 0.05$)，表现为 Met > Leu > CK(图 5)。60%WHC 各处理与 40%WHC 类似，差别仅在于第 12 天，第 12 天时，Met 处理显著高于 CK 和 Leu($P < 0.05$)，CK 和 Leu 间差异不显著($P > 0.05$)(图 5)。当土壤含水量升高至 90%WHC，第 8 天时，氨基酸处理下的 CH_4 排放速率显著高于 CK($P < 0.05$)，第 16 天后，各处理间均达显著差异($P < 0.05$)，表现为 Met > Leu > CK(图 5)。90%WHC 条件下的 CH_4 排放速率显著高于 40%WHC($P < 0.05$)，与 60%WHC 差异不

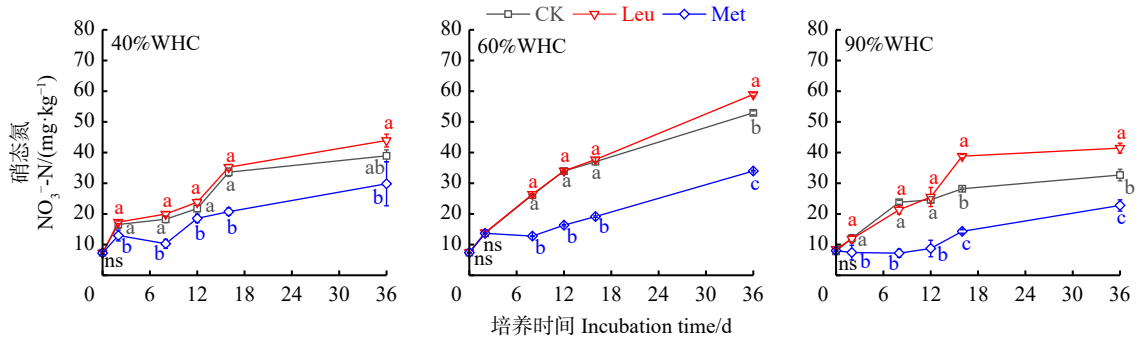


图 3 不同水分条件不同氨基酸处理土壤NO_3^--N 含量变化

Fig. 3 Changes of soil nitrate nitrogen content under different water conditions and varied amino acid treatments

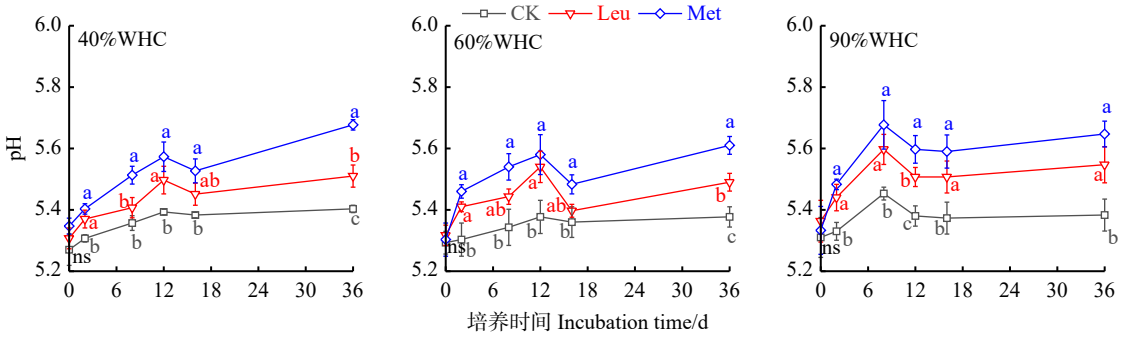


图 4 不同水分条件不同氨基酸处理土壤 pH 的变化

Fig. 4 Changes of soil pH under different water conditions and varied amino acid treatments

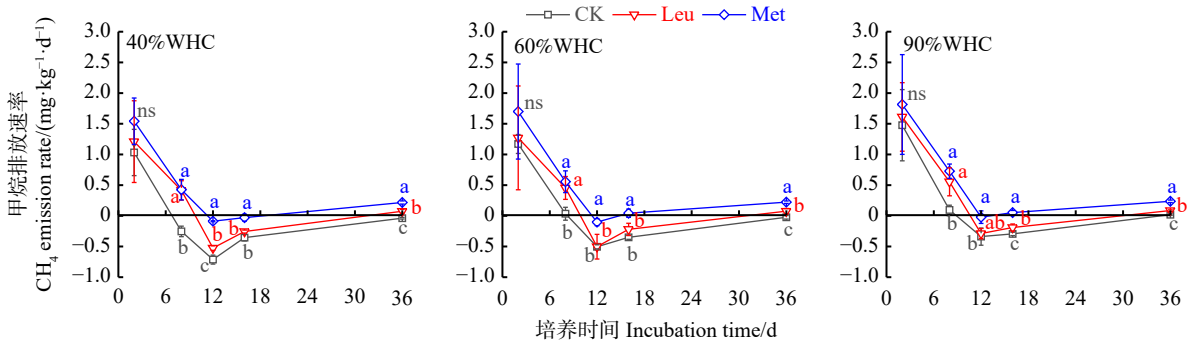


图 5 不同水分条件下各处理土壤 CH_4 排放速率的变化

Fig. 5 Changes of soil CH_4 emission rate under different water conditions and varied amino acid treatments

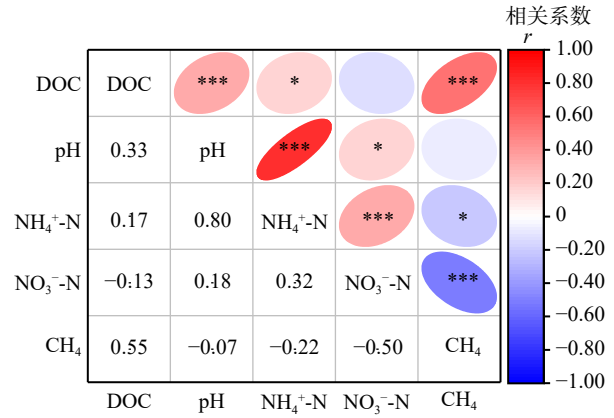
显著（$P > 0.05$），且 40%WHC 与 60%WHC 之间也不存在显著差异（$P > 0.05$）（表 3）。

2.5　土壤碳氮含量、pH 值及 CH_4 排放速率的相关关系

土壤 pH 与 NH_4^+-N 存在极显著正相关关系（$P < 0.001$），与 NO_3^--N 存在正相关关系（$P < 0.05$），与 CH_4 排放速率不存在相关关系（图 6）。CH_4 排放速率与 NO_3^--N 存在极显著负相关关系（$P < 0.001$），与 NH_4^+-N 存在负相关关系（$P < 0.05$），与 DOC 存在极显著正相关关系（$P < 0.001$）（图 6）。

2.6　多因素方差分析

多因素方差分析结果表明，不同氨基酸、土壤水分、培养时间对土壤 DOC、NH_4^+-N、NO_3^--N 含量、pH 及 CH_4 排放速率均存在显著影响（$P < 0.05$），DOC、NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量对三者交互作用的响应显著（$P < 0.05$）。在交互作用中，pH 仅受氨基酸 × 培养时间、水分 × 培养时间的显著影响（$P < 0.05$），而 CH_4 排放速率对三者的交互作用无明显响应（$P > 0.05$）（表 4）。



CH_4. CH_4 排放速率；***表示在 0.001 水平（双侧）上显著相关，*表示在 0.05 水平（双侧）上显著相关。红色和蓝色椭圆分别代表正相关和负相关，颜色越深，相关系数值越大。$n = 162$。CH_4, methane emission rate; *** means significantly correlated at 0.001 level (bilateral), * means significantly correlated at 0.05 level (bilateral). Red and blue of the ellipse represent positive and negative correlation, respectively. The darker the color is, the larger the correlation coefficient value is. $n = 162$.

图 6　土壤碳氮含量、pH 值及 CH_4 排放速率的相关关系

Fig. 6　Correlations between soil carbon and nitrogen content, pH and methane emission rate conditions

表 4　氨基酸、土壤水分、培养时间对土壤碳氮含量、pH 及 CH_4 排放速率影响的方差分析

Tab. 4　ANOVA analysis for the effects of amino acids, soil moisture, and incubation time on soil carbon and nitrogen content, pH, and CH_4 emission rate

因素 Factor	可溶性有机碳 DOC		铵态氮 NH_4^+-N		硝态氮 NO_3^--N		pH		甲烷排放速率 CH_4 emission rate	
	F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
氨基酸 Amino acid	164.02	0.000	22 906.28	0.000	498.88	0.000	136.26	0.000	16.32	0.000
水分 Moisture	120.15	0.000	7 860.17	0.000	128.37	0.000	15.29	0.000	3.41	0.038
培养时间 Time	1 161.09	0.000	19 664.03	0.000	917.56	0.000	57.33	0.000	106.20	0.000
氨基酸 × 水分 Amino acid × moisture	14.34	0.000	1 130.46	0.000	12.58	0.000	1.20	0.317	0.14	0.968
氨基酸 × 培养时间 Amino acid × time	17.67	0.000	681.05	0.000	42.84	0.000	4.89	0.000	0.80	0.603
水分 × 培养时间 Moisture × time	46.48	0.000	1 064.08	0.000	25.32	0.000	3.54	0.000	0.40	0.919
氨基酸 × 水分 × 培养时间 Amino acid × moisture × time	22.184	0.000	65.55	0.000	4.68	0.000	0.42	0.986	0.07	1.000

3　讨　　论

3.1　不同水分条件下氨基酸处理土壤 DOC 含量的变化

DOC 作为土壤中高活性物质，易受到诸如氮输入等环境变化的影响[6]。关于土壤 DOC 含量对施氮的响应不同学者得出的结论有所差异，翁晓虹等[28]研究发现，施氮能够显著提高土壤 DOC 含量。元晓春等[29]却发现，施氮使杉木人工幼林各土层土壤 DOC 含量显著减少。也有研究提出，施氮并不影响 DOC 的含量[11]。关于不同研究所得试验结果存在差异的原因，魏春兰等[12]认为是由土壤自身碳含量的差异造成的。本研究结论与翁晓虹等[28]相一致，即氨基酸处理使土壤 DOC 含量显著升高（$P < 0.05$）（表 2），究其原因，很有可能是由于氨基酸添加满足了微生物对氮素的需求，增加了土壤微生物的活性，从而促进了腐殖质的分解，间接导致了 DOC 含量升高[10]；其次，土壤水分升高会加速土壤中可溶性有机物质的溶解，同时造成团聚体裂解，提高可溶性物质的溶解度[11]；此外，对于微生物而言，DOC 具有较高的可利用性，在高水分条件下微生物活性降低，利用 DOC 能力下降[30]，这也就解释了为什么本研究

中 90%WHC 下的 DOC 含量显著高于另外两个水分（表 3）。

3.2 不同水分条件下氨基酸处理土壤氮素含量的变化

施氮能够改变生态系统氮循环，影响氮素转化过程，具体表现为氮形态及含量的改变。NH_4^+-N 和 NO_3^--N 是衡量土壤供氮能力的一个重要指标。Gao 等[31]研究发现，施氮促进了土壤氮素的矿化作用，促使有机氮向无机氮转化，从而增加土壤 NH_4^+-N 含量。李琛琛等[32]对华北落叶松（*Larix principis-rupprechtii*）的研究发现，施氮显著增加了华北落叶松天然成林表层土壤的 NH_4^+-N 含量，在 0 ~ 10 cm 土层中效果更明显。本试验结论与之相符，氨化作用是有机氮可在微生物催化条件下经氨化作用转化为 NH_4^+-N 的过程，试验中氨基酸的添加等同于增加了氨化作用的底物，进而造成 NH_4^+-N 积累（表 2）（$P < 0.05$），提高了土壤矿质氮的供应能力，利于林木生长。研究还发现，氨基酸处理使土壤 pH 显著升高（表 2）（$P < 0.05$），沈月等[33]认为尿素水解产生的大量铵是造成 pH 升高的主要原因。与之类似，氨基酸水解产生 NH_4^+-N 的过程需要吸收 H^+，且在土壤溶液中，铵离子可转化为氨挥发掉，反应式：$NH_4^+ + OH^- \rightarrow H_2O + NH_3\uparrow$，当产生氨气体的添加物加入时，上述反应向左进行，造成土壤 pH 显著升高[34]。土壤 pH 与土壤氮矿化作用间存在密切联系，pH 升高一定程度上可促使土壤微生物量增加，提高与氮矿化作用相关的酶活性，利于 NH_4^+-N 积累[35]，因此，本研究相关性分析结果显示，pH 和 NH_4^+-N 含量间存在极显著正相关关系（图 6）。土壤水分条件直接决定了土壤的氧气状态，并对土壤中可溶性底物的扩散造成影响，改变微生物群落结构及活性，间接影响 NH_4^+-N 含量。本研究中，与 40%WHC 和 60%WHC 相比，90%WHC 条件下 NH_4^+-N 含量显著升高（$P < 0.05$）（表 3），这是因为在厌氧条件下（90%WHC），硝化作用受限，且土壤中同时存在异化性硝酸盐还原产铵反应（DNRA），而 DNRA 对 NO_3^--N 还原的贡献率可达 16.7% ~ 92.9%，此条件下，反硝化微生物能迅速将电子传递给 NO_3^--N 或 NO_2^--N，造成土壤 NH_4^+-N 大量留存[36]。

此前有研究表明，施氮显著增加了土壤 NO_3^--N 含量[31]。本试验中性氨基酸处理所得结果与之一致（表 2），值得注意的是，对培养过程中 NO_3^--N 含量的变化趋势进行观察发现，中性氨基酸处理在培养前期对 NO_3^--N 含量影响较小，仅在第 36 天时有使土壤中 NO_3^--N 含量增加的趋势（图 3），说明中性氨基酸对土壤硝化作用的影响存在一定延迟性。Wolf 等[37]曾报道，酸性森林土壤中氨化作用占主导，Jones 等[4]的研究进一步提出，氨基酸、二肽、三肽氨化为 NH_4^+-N 的过程是迅速的，但随后 NH_4^+-N 向 NO_3^--N 的转化过程速度相对缓慢。与中性氨基酸不同，Met 处理导致 NO_3^--N 含量显著降低（$P < 0.05$）（表 2）。已有研究表明，氨化作用由几种膜结合蛋白催化，包括铵单氧酶（AMO）[38]，而 Met 经分解后可产生二硫化碳（CS_2），CS_2 对 AMO 活性具一定抑制作用[39]，可延缓 NH_4^+-N 向 NO_3^--N 的转化，从而抑制土壤硝化作用[40]，表现为 NO_3^--N 含量的降低，这也标志着 Met 在一定程度上可以降低硝化作用产物污染生态环境的风险。由此可见，不同性质氨基酸对 NO_3^--N 含量的差异性影响可能与分解产物有关，在研究凋落物分解对土壤氮素动态及稳定性的影响时，应重点关注其分解产物，尤其是含硫物质在微生物催化的土壤氮素转化中的作用。除氮输入外，由微生物介导的土壤氮素转化过程同时受水分的调节，水分条件通过改变土壤通气状况，影响微生物群落结构及活性，间接影响硝化过程。栗方亮等[41]认为，土壤水分为 60%WHC ~ 65%WHC 时是最适宜硝化作用的水分状态，过干和淹水条件均不利于硝化作用发生。本试验结论与之相符，土壤 NO_3^--N 在 60%WHC 时积累得最多，其次是 40%WHC、90%WHC（$P < 0.05$）（表 3），原因有以下两点：一是由于 NO_3^--N 带负电荷，与 90%WHC 相比，40%WHC 条件下土壤中的 NO_3^--N 不易在离子交换中流失；二是 90%WHC 相对厌氧，氧气供应受限，致使微生物活性下降和反硝化作用增强，使部分 NO_3^--N 以气体的形式散失，导致观测到的 NO_3^--N 含量降低[42]。

3.3 不同水分条件下氨基酸处理土壤 CH_4 排放的变化

土壤 CH_4 的吸收和排放是土壤中产 CH_4 作用和 CH_4 氧化过程的综合结果，取决于产 CH_4 菌和 CH_4 氧化菌的活性水平[43]。本次研究结果显示，氨基酸处理均显著促进了 CH_4 释放，且 Met 的作用更加明显（$P < 0.05$）（表 2）。一方面，氨基酸处理导致了 NH_4^+-N 的大量累积（$P < 0.05$）（表 2），由 NH_4^+-N 氧化产生的羟胺，对 CH_4 氧化菌具有毒害作用，间接抑制了土壤对 CH_4 的吸收，促进 CH_4 释放[44]，CH_4 排放速率与 NH_4^+-N 也因此呈显著负相关（$P < 0.05$）（图 6）；另一方面，产 CH_4 菌是严格厌氧细菌，Met 经微生物分解后产生乙炔，形成厌氧土壤环境，利于 CH_4 排放。根据试验结果，相比于 NH_4^+-N 对 CH_4 氧化菌的抑制作用，Met 分解形成的产 CH_4 菌偏好的厌氧环境，在以上因素中占据主导地位。

土壤水分条件通过改变气体的物理扩散以及微生物活性，影响产 CH_4 过程和 CH_4 氧化过程[45]。Castro 等[19]研究表明，土壤水分条件对 CH_4 排放速率存在显著影响，且 CH_4 排放速率变异的 78% 由土壤水分决定。40%WHC、60%WHC 条件下，氧气含量相对充足，而产 CH_4 菌属严格厌氧细菌，在空气中短期暴露即可死亡，但试验过程中依然监测到了低程度的 CH_4 排放，这与前人在野外环境观测的结论一致[46−47]，表明不可将好氧条件与不存在 CH_4 排放完全等同，因为在实际环境中，短期强降雨和不均匀的水分管理等均可导致土壤内部的部分孔隙被水充满，达饱和状态，即存在“厌氧微区”，导致微量 CH_4 排放，试验过程亦然，在调节水分的过程中，由于不能完全保证水分均匀一致，因此存在利于 CH_4 排放的微域厌氧环境。李平等[18]研究提出，水分条件从 60%WHC 升高到 100%WHC 对 CH_4 排放无显著影响，达淹水状态才显著促进了 CH_4 的排放。本研究结果与之不同，在水分条件为 90%WHC 时，即可显著促进 CH_4 排放（$P < 0.05$）（表 3），这可能与土壤类型的差异有关，李平等[18]所做的研究针对砂壤土，通气性能好，即使在 100%WHC 条件下，土壤仍可保证良好的通气性，产 CH_4 菌和 CH_4 氧化菌的活性与 60%WHC 条件下无异，造成其 CH_4 排放速率也无明显变化，而本试验所用土壤为暗棕壤，透气性能相对较低，90%WHC 条件除适宜产 CH_4 菌生存外，还导致一些好氧微生物死亡，死亡微生物释放的 DOC 是供产 CH_4 菌利用的高质量底物，从而间接促进了 CH_4 的排放[16]。

4　结　　论

不同性质氨基酸在温带森林暗棕壤碳氮含量及 CH_4 排放中发挥的作用不尽相同。亮氨酸和甲硫氨基酸均可使土壤 DOC 含量、NH_4^+-N 含量及 CH_4 排放速率显著升高，但甲硫氨基酸对 NH_4^+-N 含量和 CH_4 排放速率的促进作用更强。二者对于土壤 NO_3^--N 含量的影响存在明显差异。亮氨酸对于土壤硝化作用的影响可能存在滞后性，甲硫氨基酸明显了抑制温带暗棕壤硝化作用强度。土壤水分条件在土壤碳氮含量及 CH_4 排放中发挥的作用不可忽视，90%WHC 条件利于 DOC 积累，值得注意的是，土壤水分的提高虽然增加了土壤 DOC 含量，但同时可能造成土壤碳库稳定性下降，NH_4^+-N 含量随土壤水分含量的升高而显著升高，60%WHC 可能是温带暗棕壤硝化作用的最适含水量，高含水量条件抑制 NO_3^--N 的产生、促进 CH_4 的释放。综上所述，除氨基酸性质不同外，还有其他因素强烈影响氨基酸在土壤碳氮动态及 CH_4 排放中的作用，如氨基酸的分解产物。在森林经营工作中可通过干预土壤水分条件来调控土壤氮转化过程。

参　考　文　献

[1] 陈伏生, 曾德慧, 何兴元. 森林土壤氮素的转化与循环 [J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 126−133.
Chen F S, Zeng D H, He X Y. Soil nitrogen transformation and cycling in forest ecosystem[J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(5): 126−133.

[2] 郑利霞, 刘学军, 张福锁. 大气有机氮沉降研究进展 [J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3828−3834.
Zheng L X, Liu X J, Zhang F S. Atmospheric deposition of organic nitrogen: a review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(9): 3828−3834.

[3] Campbell C A, Zentner R P, Knipfel J E, et al. Thirty-year crop rotations and management practices effects on soil and amino nitrogen[J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55(3): 739−745.

[4] Jones D L, Kielland K. Amino acid, peptide and protein mineralization dynamics in a taiga forest soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 55: 60−69.

[5] Trenberth K E, Dai A, van der Schrier G, et al. Global warming and changes in drought[J]. Nature Climate Change, 2014, 4: 17−22.

[6] 周世兴, 邹秤, 肖永翔, 等. 模拟氮沉降对华西雨屏区天然常绿阔叶林土壤微生物生物量碳和氮的影响 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(1): 12−18.
Zhou S X, Zou C, Xiao Y X, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on soil microbial biomass carbon and nitrogen in natural evergreen broad-leaved forest in the Rainy Area of West China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(1): 12−18.

[7] Deforest J L, Zak D R, Pregitzer K S, et al. Atmospheric nitrate deposition and the microbial degradation of cellobiose and vanillin in a northern hardwood forest[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(6): 965−971.

[8] 颜辰亦, 龚吉蕊, 张斯琦, 等. 氮添加对内蒙古温带草原土壤活性有机碳的影响 [J/OL]. 植物生态学报, 2024: 1−13[2024−05−04]. https://kns-cnki-net.webvpn.nefu.edu.cn/kcms/detail/11.3397.q.20240227.1351.002.html.
Yan C Y, Gong J R, Zhang S Q, et al. Effects of nitrogen addition on soil active organic carbon in a temperate grassland of Nei Mongol, China[J/OL]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2024: 1−13[2024−05−04]. https://kns-cnki-net.webvpn.nefu.edu.cn/kcms/detail/11.3397.q.20240227.1351.002.html.

[9] 裴广廷, 马红亮, 林伟, 等. 氨基酸添加对亚热带森林红壤氮素转化的影响 [J]. 生态学报, 2015, 35(23): 7774−7784.
Pei G T, Ma H L, Lin W, et al. Effects of amino acid additions on nitrogen transformation in subtropical forest soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(23): 7774−7784.

[10] 朱灵, 张梦瑶, 高永恒. 高寒草原土壤有机碳矿化对水氮添加的

响应 [J]. 水土保持通报, 2020, 40(1): 30−37.
Zhu L, Zhang M Y, Gao Y H. Response of soil organic carbon mineralization to water and nitrogen addition in alpine steppe[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(1): 30−37.

[11] 黄思彤, 马亚培, 李宇轩, 等. 氮沉降背景下生物炭输入对土壤可溶性有机质和无机氮的影响 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2023, 18(2): 56−61.
Huang S T, Ma Y P, Li Y X, et al. Effects of biochar input on soil soluble organic matter and inorganic nitrogen under the background of nitrogen deposition[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2023, 18(2): 56−61.

[12] 魏春兰, 马红亮, 高人, 等. 模拟氮沉降对森林土壤可溶性有机碳的影响 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2013, 8(4): 16−24.
Wei C L, Ma H L, Gao R, et al. Effects of nitrogen deposition on soluble organic carbon: a simulation study in subtropical forest soils[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2013, 8(4): 16−24.

[13] 陈香碧, 王媛华, 胡乐宁, 等. 红壤丘陵区水田和旱地土壤可溶性有机碳矿化对水分的响应 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 752−758.
Chen X B, Wang Y H, Hu Y N, et al. Response of mineralization of dissolved organic carbon to soil moisture in paddy and upland soils in hilly red soil region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(3): 752−758.

[14] 郝静, 郭亚芬, 高雷. 小兴安岭典型森林土壤中外源丙氨酸的潜在周转差异 [J]. 应用生态学报, 2022, 33(12): 3237−3244.
Hao J, Guo Y F, Gao L. Potential turnover differences of exogenous alanine in soils of typical forests in the Xiaoxing'an Mountains, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(12): 3237−3244.

[15] 于淑华, 张丽霞, 谢雪迎, 等. 不同水分模式对山东茶园土壤氮素动态的影响 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 289−298.
Yu S H, Zhang L X, Xie X Y, et al. Effects of water regimes on soil nitrogen dynamics in tea garden in Shandong Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 289−298.

[16] 刘超, 王宪伟, 宋艳宇, 等. 增温对冻土区泥炭沼泽土壤孔隙水甲烷关联微生物和溶解性有机碳的影响 [J]. 生态学报, 2021, 41(1): 184−193.
Liu C, Wang X W, Song Y Y, et al. Effects of warming on abundances of methane-related microorganisms and concentration of dissolved organic carbon in soil pore water of permafrost peat swamp in Daxing'anling[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1): 184−193.

[17] 张艺, 王春梅, 许可, 等. 若尔盖湿地土壤温室气体排放对模拟氮沉降增加的初期响应 [J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(8): 54−63.
Zhang Y, Wang C M, Xu K, et al. Short-term effect of increasing nitrogen deposition on greenhouse gas emissions in Zoige Wetland, western China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(8): 54−63.

[18] 李平, 魏玮, 郎漫. 不同水分对半干旱地区砂壤土温室气体排放的短期影响 [J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(5): 1124−1132.
Li P, Wei W, Lang M. Short-term effects of different soil moisture contents on greenhouse gas emissions from sandy loam soil in semi-arid regions[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(5): 1124−1132.

[19] Castro M S, Steudler P A, Melillo J M, et al. Factors controlling atmospheric methane consumption by temperate forest soils[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1995, 9(1): 1−10.

[20] 张涵, 唐常源, 禤映雪, 等. 珠江口红树林土壤甲烷和二氧化碳通量特征及其影响因素研究 [J]. 生态环境学报, 2022, 31(5): 939−948.
Zhang H, Tang C Y, Xuan Y X, et al. The regular pattern and influencing factors of CO_2 and CH_4 fluxes from mangrove soil[J]. Ecology and Environment Science, 2022, 31(5): 939−948.

[21] Noll L, Zhang S, Wanek W. Novel high-throughput approach to determine key processes of soil organic nitrogen cycling: gross protein depolymerization and microbial amino acid uptake[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 130: 73−81.

[22] Hill P W, Jones D L. Plant-microbe competition: does injection of isotopes of C and N into the rhizosphere effectively characterise plant use of soil N?[J]. New Phytologist, 2019, 221(2): 796−806.

[23] Ma Q, Wen Y, Wang D, et al. Farmyard manure applications stimulate soil carbon and nitrogen cycling by boosting microbial biomass rather than changing its community composition[J/OL]. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 144: 107760[2023−12−21]. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107760.

[24] 高雷. 东北八种森林类型土壤有效氮、动态及植物吸收特征 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021.
Gao L. Pool size and dynamics of soil available nitrogen and plant uptake characteristics in eight forest types in northeast China[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021.

[25] Ma H L, Imran S, Gao R, et al. Contrasting effects of alanine and methionine on nitrogen ammonification and nitrification, and nitrous oxide emissions in subtropical forest soil[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2021, 21: 2967−2979.

[26] Li S, Zhang S, Pu Y, et al. Dynamics of soil labile organic carbon fractions and C-cycle enzyme activities under straw mulch in Chengdu Plain[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 155: 289−297.

[27] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
Lu R K. Methods of soil agricultural chemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.

[28] 翁晓虹, 隋心, 李梦莎, 等. 模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物碳源利用能力的影响 [J]. 环境科学, 2022, 43(9): 4674−4683.
Weng X H, Sui X, Li M S, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on soil microbial carbon metabolism in *Calamagrostis angustifolia* wetland in Sanjiang Plain[J]. Environmental Sciences, 2022, 43(9): 4674−4683.

[29] 元晓春, 陈岳民, 袁硕, 等. 氮沉降对杉木人工幼林土壤溶液可溶性有机物质浓度及光谱学特征的影响 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(1): 1−11.
Yuan X C, Chen Y M, Yuan S, et al. Effects of nitrogen

deposition on the concentration and spectral characteristics of dissolved organic matter in soil solution in a young *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(1): 1−11.

[30] Wang M T, Liao Q X, Zhao C, et al. The fate of litter-derived dissolved organic carbon in forest soils: results from an incubation experiment[J]. Biogeochemistry, 2019, 144(2): 133−147.

[31] Gao W L, Zhao W, Yang H, et al. Effects of nitrogen addition on soil inorganic N content and soil N mineralization of a cold-temperate coniferous forest in Great Xing'an Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 130−136.

[32] 李琛琛, 刘宁, 郭晋平, 等. 氮沉降对华北落叶松叶特性和林下土壤特性的短期影响 [J]. 生态环境学报, 2014, 23(12): 1924−1932.
Li C C, Liu N, Guo J P, et al. Short term effect of nitrogen deposition on needle of *Larix* and forest soil[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(12): 1924−1932.

[33] 沈月, 依艳丽. 不同因素交互作用对棕壤硝态氮累积及 pH 值的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1174−1182.
Shen Y, Yi Y L. Effects of interaction of different factors on nitrate nitrogen accumulation and pH of brown soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2013, 19(5): 1174−1182.

[34] Francisco S S, Urrutia O, Martin V, et al. Efficiency of urease and nitrification inhibitors in reducing ammonia volatilization from diverse nitrogen fertilizers applied to different soil types and wheat straw mulching[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, 91(9): 1569−1575.

[35] Kader M A, Sleutel S, Begum S A, et al. Nitrogen mineralization in sub-tropical paddy soils in relation to soil mineralogy, management, pH, carbon, nitrogen and iron contents[J]. European Journal of Soil Science, 2013, 64(1): 47−57.

[36] Chen Z, Ding W, Xu Y, et al. Importance of heterotrophic nitrification and dissimilatory nitrate reduction to ammonium in a cropland soil: Evidences from a ^{15}N tracing study to literature synthesis[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 91: 65−75.

[37] Wolf I, Brumme R. Dinitrogen and nitrous oxide formation in beech forest floor and mineral soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(6): 1862−1868.

[38] Wang D, Chadwick D R, Hill P W, et al. Tracing the mineralization rates of C, N and S from cysteine and methionine in a grassland soil: A ^{14}C and ^{35}S dual-labelling study[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2023, 177: 108906.

[39] He X Q, Li M X, Zhou M H, Gross nitrogen transformations and ammonia oxidizers affected by nitrification inhibitors and/or organic amendments in a calcareous soil: a ^{15}N tracing study[J]. Applied Soil Ecology, 2023, 188: 104926.

[40] Lisa Y S, Daniel J A. Ammonium limitation results in the loss of ammonia-oxidizing activity in *Nitrosomonas europaea*[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1998, 64(4): 1514−1521.

[41] 栗方亮, 李忠佩, 刘明, 等. 氮素浓度和水分对水稻土硝化作用和微生物特性的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(9): 1113−1118.
Li F L, Li Z P, Liu M, et al. Effects of different concentrations of nitrogen and soil moistures on paddy soil nitrification and microbial characteristics[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(9): 1113−1118.

[42] Marcos M S, Bertiller M B, Cisneros H S, et al. Nitrification and ammonia-oxidizing bacteria shift in response to soil moisture and plant litter quality in arid soils from the Patagonian Monte[J]. Pedobiologia, 2016, 59(1−2): 1−10.

[43] Smith K A, Ball T, Conen F, et al. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes[J]. European Journal of Soil Science, 2018, 69(1): 10−20.

[44] Liu J, Xue D, Chen H, et al. Effects of nitrogen addition on anaerobic oxidation of methane in Zoige Plateau peatlands[J]. Ecological Indicators, 2021, 129(11−12): 108018.

[45] 包振宗. 水分变化和模拟氮沉降对高寒湿地土壤 CH_4、CO_2 和 N_2O 排放的影响 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2018.
Bao Z Z. Effect of water changes and nitrogen deposition on CH_4, CO_2 and N_2O emission in alpine wetland soil[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2018.

[46] Praeg N, Wagner A O, Illmer P. Effects of fertilisation, temperature and water content on microbial properties and methane production and methane oxidation in subalpine soils[J]. European Journal of Soil Biology, 2014, 65: 96−106.

[47] 李平, 郎漫, 李淼, 等. 不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响 [J]. 环境科学, 2018, 39(5): 2360−2367.
Li P, Lang M, Li M, et al. Short-term effects of different fertilization treatments on greenhouse gas emissions from northeast black soil[J]. Environmental Science, 2018, 39(5): 2360−2367.

（责任编辑　孟　瑶
责任编委　孙向阳）