



青藏高原高寒草地土壤速效氮矿化能力对温度和有机肥添加的响应

郭雅婧 李辉鹏 张其斌 白璐 张伟 陈宝林 桑建辉 李渊 沈禹颖

Responses of soil available nitrogen mineralization ability to temperature and organic fertilizer addition in alpine grasslands of the Qinghai–Tibet Plateau

GUO Yajing, LI Huipeng, ZHANG Qibin, BAI Lu, ZHANG Wei, CHEN Baolin, SANG Jianhui, LI Yuan, SHEN Yuying

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0237>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

青藏高原高山草甸群落生物量及多样性对氮素添加的响应

Response of biomass and species diversity to nitrogen addition in alpine meadows

草业科学. 2017, 11(5): 1082 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0429>

高寒草甸主要组分种开花物候对氮素添加的响应

Response of dominant and common species flowering phenology to nitrogen addition in an alpine meadow

草业科学. 2021, 38(7): 1240 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0155>

叶重比及株高质量比解释亚高寒草甸禾本科对氮素添加的积极响应

Using leaf mass fractions and height/mass ratios to explain the positive response of Gramineae to nitrogen addition on a sub-alpine meadow

草业科学. 2019, 36(10): 2631 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0199>

硅氮添加对高寒草甸优势物种披针叶黄华生长及净光合速率的影响

Effects of silicon and nitrogen fertilization on the growth and net photosynthetic rate of *Thermopsis lanceolata* in an alpine meadow

草业科学. 2020, 37(9): 1681 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0239>

高寒区施肥和混播对燕麦栽培草地植物氮素储量的影响

Effect of fertilizer and legume mixture on oat cultivation and nitrogen storage in an alpine region

草业科学. 2019, 36(2): 468 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0295>

林下生草对园林绿地土壤氮转化及可溶性氮含量的影响

Effect of grass planting on soil nitrogen transformation and dissolved nitrogen concentration of urban greening lands

草业科学. 2019, 36(11): 2838 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0313>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0237

郭雅婧, 李辉鹏, 张其斌, 白璐, 张伟, 陈宝林, 桑建辉, 李渊, 沈禹颖. 青藏高原高寒草地土壤速效氮矿化能力对温度和有机肥添加的响应. 草业科学, 2024, 41(5): 1048-1056.

GUO Y J, LI H P, ZHANG Q B, BAI L, ZHANG W, CHEN B L, SANG J H, LI Y, SHEN Y Y. Responses of soil available nitrogen mineralization ability to temperature and organic fertilizer addition in alpine grasslands of the Qinghai-Tibet Plateau. Pratacultural Science, 2024, 41(5): 1048-1056.

青藏高原高寒草地土壤速效氮矿化能力 对温度和有机肥添加的响应

郭雅婧¹, 李辉鹏², 张其斌¹, 白璐², 张伟²,
陈宝林², 桑建辉³, 李渊³, 沈禹颖³

(1. 甘肃省高新技术创业服务中心, 甘肃兰州 7303013; 2. 甘肃省子午岭林业管理局合水分局, 甘肃庆阳 745400;
3. 兰州大学草地农业科技学院 / 草种创新与草地农业生态系统国家重点实验室 /
甘肃庆阳草地农业生态系统国家野外科学观测研究站, 甘肃兰州 730020)

摘要: 青藏高原高寒草地土壤氮素矿化是影响全球碳氮循环和草地生态系统演替的关键过程。本研究通过不同温度(5、15和25℃)和有机氮添加梯度(0、15、45和75 kg·hm⁻²)的室内培养试验, 测定土壤氮矿化速率、矿化势以及矿化反应速率常数对处理的响应, 旨在探究温度和有机肥添加对青藏高原高寒草地土壤速效氮供应能力的影响。结果表明: 土壤氮素矿化量随温度的升高而增加, 25℃下明显高于15和5℃; 有机氮添加(15~45 kg·hm⁻²)显著提高了土壤铵态氮的矿化量, 继续增加至75 kg·hm⁻²时, 氮素矿化能力降低; 土壤氮矿化速率随培养时间的增加先增加后降低, 添加有机氮可以增加高寒草地土壤氮素矿化速率, 在氮素添加量为45 kg·hm⁻²时达到峰值; 温度决定了高寒草地土壤氮素矿化势, 对矿化速率常数k没有明显影响。综上所述, 添加15~45 kg·hm⁻²有机氮及较高的温度条件有利于提高青藏高原高寒草地土壤速效氮的矿化能力, 这为高寒草原地区的草地管理和有机肥施用提供了理论依据。

关键词: 高寒草甸; 氮素添加; 有机氮; 氮素矿化速率; 氮素矿化潜力; 室内培养; 温度

文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2024)05-1048-09

Responses of soil available nitrogen mineralization ability to temperature and organic fertilizer addition in alpine grasslands of the Qinghai-Tibet Plateau

GUO Yajing¹, LI Huipeng², ZHANG Qibin¹, BAI Lu², ZHANG Wei², CHEN Baolin²,
SANG Jianhui³, LI Yuan³, SHEN Yuying³

(1. Gansu High-tech Innovation Service Center, Lanzhou 7303013, Gansu, China;

2. Gansu Ziwojing Forestry Management Bureau Heshui Branch, Qingyang 745400, Gansu, China;

3. State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, College of Pastoral Agriculture Science and Technology / State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-ecosystems / Gansu Qingyang Grassland Agricultural Ecosystem National Field Science Observation and Research Station, Lanzhou 730020, Gansu, China)

Abstract: Nitrogen mineralization in the soil of alpine grasslands on the Tibetan Plateau is a key process affecting the global carbon and nitrogen cycle, as well as the succession of grassland ecosystems. The aim of this study was to explore the effects of temperature and organic fertilizer additions on the nitrogen availability in the soil of these alpine grasslands. Through

收稿日期: 2023-04-30 接受日期: 2023-07-03

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目“豆科牧草促进粮-草轮作系统碳平衡的途径与机制(22JR5RA455)”

第一作者: 郭雅婧(1990-), 女, 甘肃榆中人, 助理研究员, 硕士, 研究方向为天然草地改良与牧草栽培。E-mail: guoyj2012@lzu.edu.cn

通信作者: 沈禹颖(1965-), 女, 上海人, 教授, 博士, 研究方向为草地农业生态系统。E-mail: yy.shen@lzu.edu.cn

incubation experiments involving different temperatures (5, 15, and 25 °C) and gradients of organic nitrogen addition (0, 15, 45, and 75 kg·ha⁻¹), we analyzed changes in soil nitrogen mineralization rates, mineralization potential, and mineralization reaction rate. The results showed that soil nitrogen mineralization increased with rising temperature, with values significantly higher at 25 °C than at 15 °C and 5 °C. Organic nitrogen addition (15~45 kg·ha⁻¹) significantly increased the mineralization of ammoniacal nitrogen in the soil. However, further increasing the fertilization gradient to 75 kg·ha⁻¹ reduced the nitrogen mineralization capacity. The soil nitrogen mineralization rate exhibited a single peak trend with increasing incubation time, and the addition of organic nitrogen could increase the nitrogen mineralization rate in alpine grassland soil, reaching its maximum under N 45 treatment. Temperature determined the mineralization potential of nitrogen in alpine grassland soil, but did not significantly affect the mineralization rate, k. In summary, the addition of 15~45 kg·ha⁻¹ of organic nitrogen and higher temperature conditions are beneficial for enhancing the mineralization capacity of rapidly available nitrogen in the soil of alpine grasslands on the Tibetan Plateau, providing a theoretical basis for grassland management and organic fertilizer application in alpine grassland regions.

Keywords: alpine meadow; nitrogen addition; organic fertilizer; nitrogen mineralization rate; nitrogen mineralization capacity; indoor cultivation; temperature

Corresponding author: SHEN Yuying E-mail: yy.shen@lzu.edu.cn

青藏高原草地占据了全国草原面积的 33%，不仅是我国重要的畜牧业生产基地，还具有生态安全屏障的功能。青藏高原高寒草甸土壤是一个容量巨大的碳氮库，其有机碳、全氮循环及碳氮排放对大气中温室气体浓度产生显著影响，因而在全球碳氮循环中扮演着关键角色^[1]。然而，青藏高原生态系统非常脆弱，人类活动和全球气候变化均对草地碳氮循环产生重大影响，并对区域及全球环境产生深远影响^[2]。氮素是影响草地生产力的主要限制因子，也是引起地下水污染、土壤酸化以及水体富营养化的主要因素^[3]。土壤无机态氮是植物可以直接吸收利用的氮素形态，通常以硝态氮、铵态氮和含量极低且不稳定的亚硝态氮的形式存在。表层土壤全氮库中有机态氮占了 85%~95%，有机态氮通过土壤氮素矿化作用 (nitrogen mineralization) 经微生物和细菌分解转化为矿质氮才能被植物吸收利用^[4]。

近年来，受到人类活动和全球气候变化等因素的共同影响，我国约有 90% 的天然草地出现不同程度的退化现象^[5]。青藏高原草地生态系统的脆弱性和特殊的地理位置使其对人为干扰和气候变化的敏感度更高，退化问题尤为严重^[6-8]。在高寒退化草地中，土壤中的硝化细菌、氨化细菌以及土壤酶活性降低，从而导致土壤矿化能力下降^[9]。土壤氮素矿化能力也随着草地退化程度的加剧而减弱^[10]。施肥可以有效调控生态系统物质循环，对提高草地初级生产力、改善土壤肥力状态和退化草地恢复具有

重要作用^[11-12]。施肥可以通过改变土壤性质、微生物活性和团聚体性状等因素，影响土壤氮素矿化，尤其是在无机肥与有机肥配施时效果更为显著^[13]。在高寒草地中，土壤微生物活性低、速效养分不足，添加氮肥能明显改善土壤氮素供应水平，增加禾本科牧草生物量和牧草蛋白质含量，调节群落结构，促进草地的正向演替^[14]。了解各地区土壤氮素矿化能力，有助于为草地管理和合理施肥提供重要依据。

在天然草地中，放牧过程中动物排泄物以有机肥的形式回归草地。因此，因地制宜地施用有机肥是牧区经济实用的施肥方式。在已有研究中，主要集中在无机氮肥添加对草地植被以及耕地土壤氮素矿化速率的影响方面^[8]，然而，关于青藏高原高寒草地土壤氮素供应能力对有机氮肥添加响应的研究尚未见报道。本研究将结合不同培养温度和有机肥施用梯度，通过实验室通气培养方法，分析有机肥添加和培养温度对土壤有机氮矿化的影响。研究目的在于确定青藏高原天然草地土壤氮素供应潜力，为合理管理草地、指导生产实践提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究在甘肃省夏河县进行。夏河县地处青藏高原的东北边缘，海拔介于 3 000~3 800 m。该地年均气温 2.6 °C，多年平均降水量 516 mm，没有绝对

无霜期,属于典型的高原大陆性气候,具有高寒湿润特征。主要草地类型包括高寒草甸和高寒草原,土壤为浅棕色,厚度通常介于50~90 cm,腐殖质含量较高。夏河县有天然草地50.26万km²,牧草种类达到72科290属628种,546种可食牧草主要以禾本科、莎草科、豆科和菊科牧草为主,优良牧草有43种,包括高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)、矮嵩草(*K. humilis*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)和草地早熟禾(*Poa pratensis*)等^[15-16]。

试验样地位于夏河县桑科镇(35°07'56" N, 102°24'34" E)。选择平坦的多年围封刈割天然草地(生长季结束后进行刈割,冬季正常放牧)作为试验场地。

1.2 土壤及有机肥样品采集

在生长季开始前的4月中旬,在围封刈割天然草地随机设置5个点采集表层土壤(0-30 cm)。每个样地内的土壤样本混合均匀,过2 mm筛,同时挑出石头、植物根系残渣等异物。处理好的土壤样本在阴凉处风干,干燥处密封保存。土壤样品的含水率为15.61%,全氮含量为2.25 g·kg⁻¹,有机质含量为318.47 g·kg⁻¹。另外,收集了当地牦牛新鲜牛粪约15 kg,实验室条件下36℃恒温烘干48 h,粉碎后过2 mm筛。四分法均匀取样,用凯氏定氮法测定有机肥全氮含量,其余样品密封低温保存。

1.3 间歇淋洗培养

称取过2 mm筛的烘干土壤20.0 g,与等重粒状石英砂(1 mm < d < 2 mm)混合均匀。将混合物装入矿化淋洗管(φ = 2.5 cm)中(淋洗管下端安装塞子,塞子上铺适量玻璃丝和两层滤纸),轻轻震荡平实后在土壤上再铺少量玻璃丝。设置5、15、25℃共3个温度梯度进行培养(模拟不同气候条件),各温度下设有4个有机氮添加处理N₀、N₁₅、N₄₅和N₇₅(表1),每个处理有5个平行。在70%湿度下保湿,进行恒温暗培养。

用100 mL CaCl₂溶液(0.01 mol·L⁻¹)分次淋洗土壤中的起始矿质氮。淋洗液排空后加入25 mL无氮营养液,用真空泵在60 cm汞柱负压下抽提营养液直至液体排干,管内通气良好、湿度适宜。每个培养温度下,用同等质量粒状石英砂做3个空白,不添加土壤和有机肥,其余处理与上述相同,以消除

表1 有机肥添加土壤矿化淋洗试验设计
Table 1 Design of soil mineralization leaching experiment with organic fertilizer addition

| 温度 Temperature/°C | 处理 Treatment | N/ (kg·hm ⁻²) | 有机肥 Organic fertilizer/ (kg·hm ⁻²) |
|----------------------|-----------------|------------------------------|--|
| 5、15、25 | N ₀ | 0 | 0 |
| | N ₁₅ | 15 | 1 070 |
| | N ₄₅ | 45 | 3 210 |
| | N ₇₅ | 75 | 5 350 |

石英砂等试验材料和环境的影响。

在室内培养的第15、30、45、60、77、95、114、144、175、230、293、361、484天,用100 mL CaCl₂溶液分次淋洗,按上述方法处理后继续培养直至试验结束。收集的淋洗液过滤(滤纸用Whatman No. 42)后用流动注射仪(FIASTAR 5000)测定淋洗液中速效氮(NH₄⁺-N和NO₃⁻-N)含量。在不同时间点收集的淋洗液样本可以用来分析土壤矿化过程中速效氮的动态变化,这些数据将有助于了解不同温度梯度和有机氮添加处理对土壤氮矿化过程的影响。

1.4 指标计算及数据处理

土壤无机氮的矿化量是各次淋洗液中矿质氮含量之和。

土壤净氮矿(铵、硝)化率计算公式如下^[17]:

$$NAR = (Ct - Ct_0)/(t - t_0) \times M; \quad (1)$$

$$NNR = (C't - C't_0)/(t - t_0) \times M; \quad (2)$$

$$NMR = (C''t - C''t_0)/(t - t_0) \times M. \quad (3)$$

式中:NAR、NNR和NMR分别表示培养时间段内的土壤NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和无机氮矿化速率[mg·(kg·d)⁻¹],C、C'和C''分别是土壤铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)和总无机氮(NH₄⁺-N + NO₃⁻-N)的矿化量(mg·kg⁻¹),t和t₀分别代表培养前后的时间(d),M为培养土壤的质量。

用Standford和Smith在1972年首次提出,经1988年Bonde和Rosswall修正后的一级指数模型: $N_t = N_0(1 - e^{-kt}) + C_0$ ^[18]进行土壤氮素矿化积累量的拟合。N_t是在时刻t土壤氮素矿化的积累量(mg·kg⁻¹);N₀是潜在最大的矿化量,既活性氮库也称矿化势;k是矿化速率常数;t为培养时间;C₀为常数。

采用Excel 2010和SigmaPlot 10.0软件绘图,用Genstat 17.0中的单因素方差分析(ANOVA)检验处

理效应, 最小显著差数法 (LSD) 进行指标间差异多重比较。用 Genstat 17.0 中的非线性模型进行方程的回归。

2 结果

2.1 土壤氮素矿化量对温度和氮素添加的响应

土壤中 NH_4^+ -N 矿化总量随培养温度的升高明显增加, 同时随施肥梯度的增加, NH_4^+ -N 矿化量先增加后降低 (图 1)。在对照土壤 (N_0) 中, NH_4^+ -N 矿化量在 15 和 25 °C 培养条件下分别是 5 °C 条件下的 1.72 倍和 4.43 倍, 差异均达到显著水平 ($P < 0.05$)。在 5 和 15 °C 的培养温度下, 各种施肥处理都提高了 NH_4^+ -N 矿化量。当施肥量为 $15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_{15}) 时, NH_4^+ -N 矿化量大幅增加, 而在 N_{45} 处理下达到最高, 随后在 N_{75} 处理下开始降低。在 25 °C 的培养条件下, 施肥 N_{45} 处理下的 NH_4^+ -N 矿化量显著高于其他处理, 而其余施肥处理对 NH_4^+ -N 矿化量并无明显影响。

土壤 NO_3^- -N 矿化量随着培养温度的升高大幅增加 (图 2), 在 25 °C 培养条件下各施肥 NO_3^- -N 矿化量均显著高于 5 °C 培养温度。在 15 和 25 °C 的培

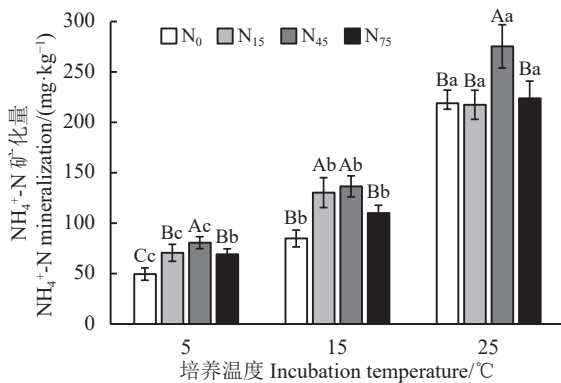


图 1 不同培养温度和施肥处理下土壤 NH_4^+ -N 矿化总量

Figure 1 Soil ammonium nitrogen mineralization under different culture temperature and fertilization

不同大写字母表示相同培养温度不同施肥梯度间差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示相同施肥梯度不同培养温度间差异显著 ($P < 0.05$); N_0 、 N_{15} 、 N_{45} 和 N_{75} 分别表示氮素添加水平为 0、15、45 和 $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 下同。

Different capital letters indicate significant differences between the different fertilization gradient for the same training temperature at the 0.05 level; and different lowercase letters indicate significant differences among different training temperature and the same fertilization gradient at the 0.05 level; N_0 , N_{15} , N_{45} , and N_{75} represent nitrogen addition levels of 0, 15, 45, and $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. This is applicable for the following figures as well.

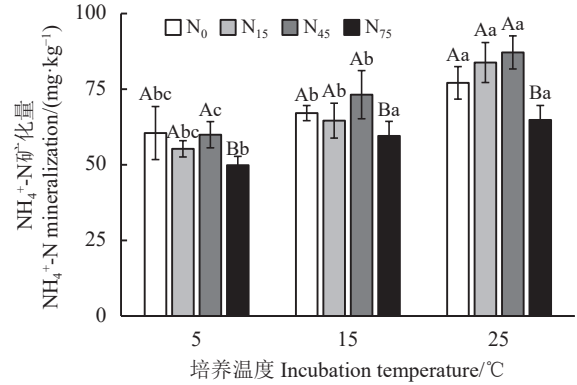


图 2 不同培养温度和施肥处理下土壤 NO_3^- -N 矿化量

Figure 2 Soil nitrate nitrogen mineralization under different incubation temperatures and fertilization

养条件下, 未施肥土壤 (N_0 处理) 中的 NO_3^- -N 矿化量分别是 5 °C 条件下的 1.11 倍和 1.27 倍, 在 25 °C 下差异显著 ($P < 0.05$)。与 NH_4^+ -N 矿化量相比, 施肥对各温度梯度下土壤 NO_3^- -N 矿化量的影响较小。在各温度下, N_{15} 处理对 NO_3^- -N 矿化量的影响不明显, 在 25 °C 培养条件下略有增加, 但差异不显著。 N_{45} 处理都提高了 NO_3^- -N 矿化量, 并且在 25 °C 培养条件下达到最高。而 N_{75} 处理则显著降低了各培养温度下的 NO_3^- -N 矿化量。

2.2 土壤速效氮矿化速率对温度和有机肥添加的响应

土壤铵化速率与培养温度正相关, 在各处理下均表现出单峰趋势 (图 3)。铵化速率峰值出现的时间随着培养温度的升高而提前, 同时随着施肥梯度的增加先升高后降低。5 和 15 °C 的培养温度下, 添加有机肥在不同程度上提高了土壤铵化速率。在 N_{45} 处理下, 铵化速率达到最大值, 分别为 1.18 和 $1.32 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 铵化速率峰值分别出现在培养的第 95 天和第 60 天。当施肥量达到 $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 铵化速率反而降低。在 25 °C 的培养温度下, 铵化速率峰值出现在培养的第 30 天, 且在施肥 N_{45} 处理下达到最大, 为 $3.10 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 。土壤铵化速率对其他施肥处理的响应不明显。

土壤硝化速率表现出随着培养时间的增加, 先急剧降低后平缓减少的趋势 (图 4)。提高培养温度稍微增加了硝化速率, 但未达到显著水平。施用有机肥增加了各培养温度下的硝化速率峰值, 并且在各培养温度的 N_{45} 处理下均达到最大。继续增加有机肥梯度后, 硝化速率反而开始降低。在 25 °C 培

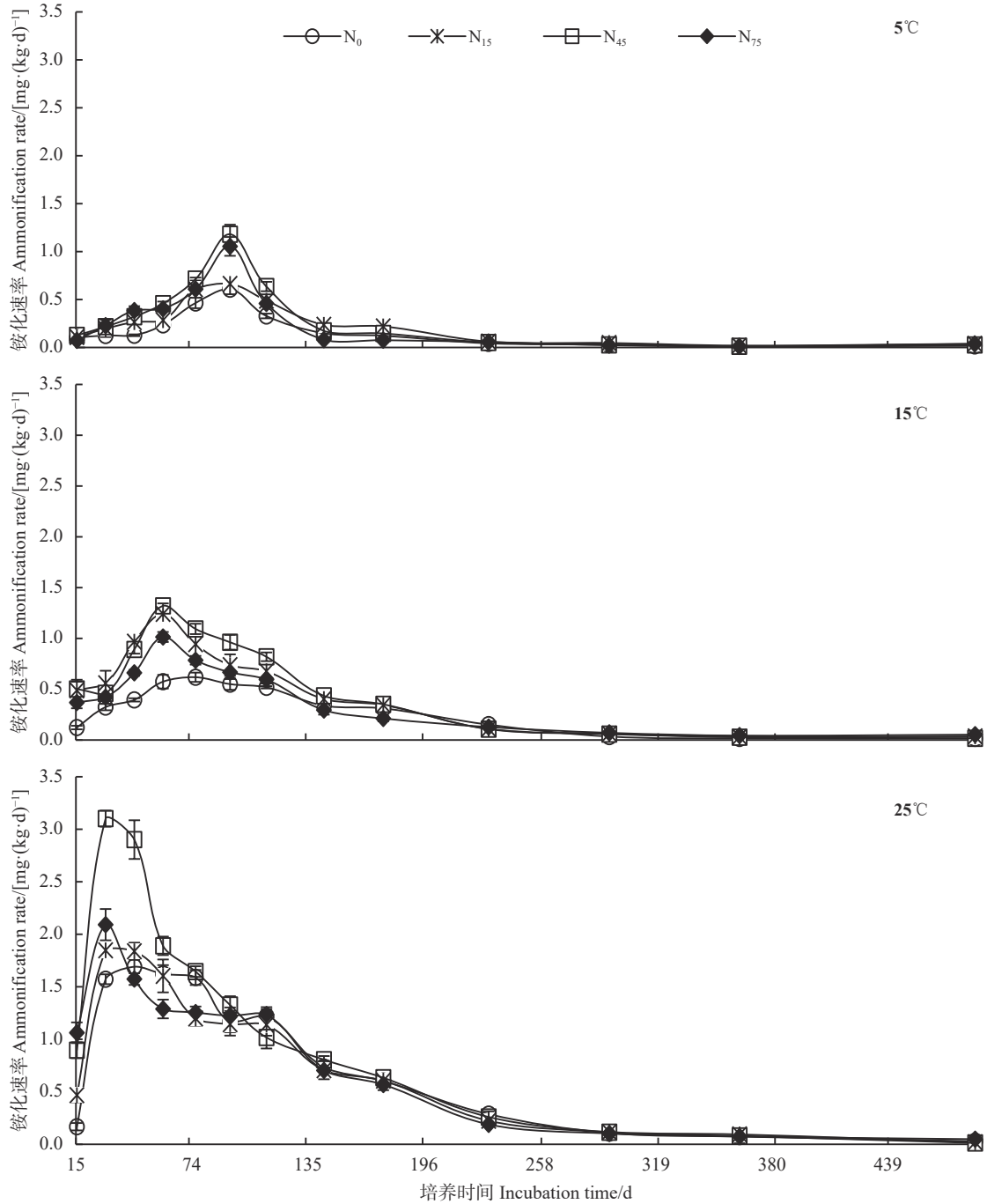


图3 不同培养温度和施肥处理下土壤铵化速率

Figure 3 Soil ammonification rate under different incubation temperatures and fertilization gradients

养条件下, 施肥 N_{45} 处理的硝化速率最大值, 为 $1.58 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 为 N_0 的 122.70%。而 N_{75} 处理明显降低了硝化速率峰值, 为 N_0 的 81.04%。

2.3 培养温度和施肥对土壤矿化潜力和矿化反应速率常数的影响

对各处理土壤矿质氮积累量拟合的结果显示: 在 $5 \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内, 土壤氮素矿化潜力 (N_0)

随着培养温度的升高而增加 (表 2), 介于 $109.73 \sim 388.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 同一温度下施肥对氮素矿化潜力的影响是先增加后降低, 在 N_{45} 处理下达到峰值。温度对矿化速率常数 k 没有明显影响, $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下矿化速率常与施肥梯度正相关; 15 和 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下矿化速率常数随着氮素添加水平的增加呈单峰趋势, 在 N_{45} 处理下达到最大。常数 C_0 在 15 和 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 培养

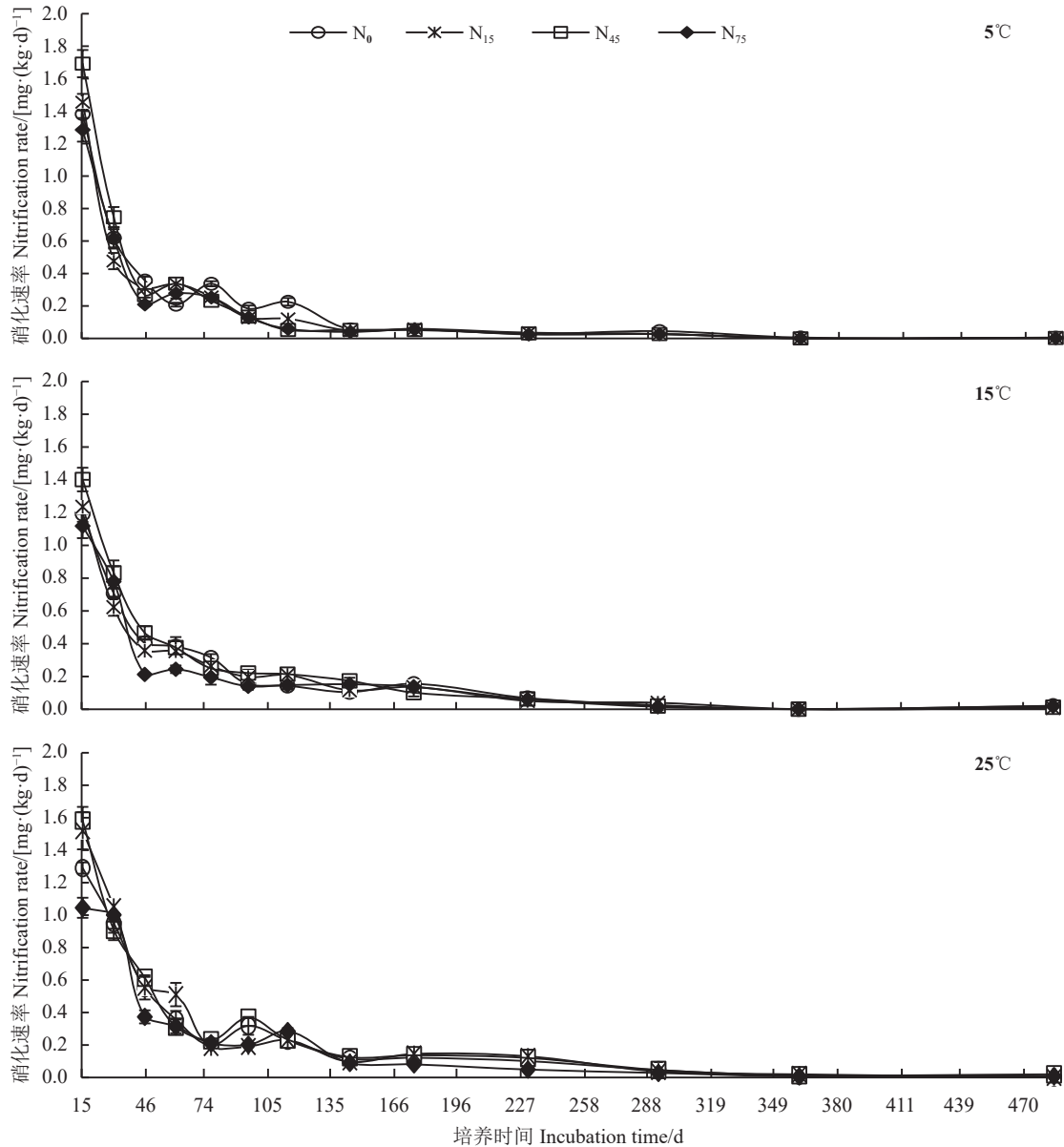


图 4 不同培养温度和施肥处理下土壤硝化速率

Figure 4 Soil nitrification rate under different incubation temperatures and fertilization gradients

条件下为负值,且温度越高其距原点的偏差越大,这可能是高寒草地土壤从低温环境到高温环境后,土壤微生物等因子对高温的适应过程。各处理下回归方程的相关系数在 97.8% 以上 ($P < 0.001$)。

3 讨论与结论

温度是高寒草地土壤有机氮矿化能力的决定性影响因子,各处理下土壤有机氮矿化速率呈现先快速分解后趋于平缓的趋势,与前人研究结果一致^[10,19]。本研究结果中铵态氮是矿化无机氮的主要存在形式,这是因为高山草甸土壤呈酸性,因而土壤铵态氮含量普遍高于硝态氮^[10,20-21]。

在青藏高原称多县高寒草甸研究表明硫酸铵施肥量在 $200 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时施肥效果最佳^[22];氮磷配施对玉树州高寒草地牧草产量的促进作用最明显,其中最优氮肥梯度为添加尿素 252 和 $270 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[23];青藏高原东缘玛曲县施用磷酸氢二铵为 $30\sim 60 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 为高寒草甸的最佳施肥水平,到 $90 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 时土壤全氮酶活性逐渐降低^[24]。纪亚君^[14]认为青海天然高寒草甸草地施用尿素 $150 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时草地生物量最大,有利于退化草地的恢复。以上研究中高寒草地无机肥适宜施肥量集中在氮素 $40\sim 124 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。而本研究表明高寒草地施用有机肥时氮含量在 $15\sim 45 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时能大幅提高土壤速效氮供应能力。在

表2 不同培养温度和有机肥添加下土壤氮素矿化的一级动力学方程模拟值
 Table 2 Simulated values of first-order kinetic equations for soil nitrogen mineralization in different incubation temperatures and fertilization gradients

| 培养温度 Incubation temperature/°C | 施肥梯度 Fertilization gradient | $N_0/$ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | k | $C_0/$ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 相关系数 Correlation coefficient/% | P |
|-----------------------------------|--------------------------------|--|----------|--|-----------------------------------|---------|
| 5 | N_0 | 109.73 ± 2.53 | 0.011 09 | 1.31 | 98.8 | < 0.001 |
| | N_{15} | 126.53 ± 2.73 | 0.010 23 | 0.05 | 98.9 | < 0.001 |
| | N_{45} | 146.42 ± 3.82 | 0.012 34 | -4.47 | 98.4 | < 0.001 |
| | N_{75} | 125.49 ± 3.91 | 0.012 91 | 3.56 | 98.3 | < 0.001 |
| 15 | N_0 | 161.70 ± 2.39 | 0.009 71 | -6.31 | 99.5 | < 0.001 |
| | N_{15} | 209.85 ± 2.73 | 0.011 34 | -13.79 | 99.6 | < 0.001 |
| | N_{45} | 231.05 ± 2.86 | 0.011 77 | -18.03 | 99.5 | < 0.001 |
| | N_{75} | 174.62 ± 4.16 | 0.010 37 | -6.38 | 97.8 | < 0.001 |
| 25 | N_0 | 333.79 ± 6.65 | 0.010 90 | -32.97 | 99.4 | < 0.001 |
| | N_{15} | 323.84 ± 3.43 | 0.011 20 | -19.64 | 99.8 | < 0.001 |
| | N_{45} | 388.78 ± 4.30 | 0.012 80 | -26.89 | 99.8 | < 0.001 |
| | N_{75} | 305.82 ± 4.49 | 0.011 42 | -16.03 | 99.6 | < 0.001 |

3个培养温度下 N_{45} 施肥处理有机氮添加下无机氮(NH_4^+-N 和 NO_3^--N)矿化量最高,而继续增加施肥梯度到 N_{75} 时氮素矿化能力大幅降低。因此,适量施用有机肥能明显提高高寒草地土壤氮素矿化能力,而施肥梯度过高则会抑制了土壤氮素的矿化,造成有机肥的浪费。

高温加速了有机肥中速效铵的释放,有机肥添加对铵化速率峰值出现的时间没有影响,吴建国等^[25]研究表明祁连山高寒草甸土壤氮矿化速率在 $0\sim 15\text{ }^\circ\text{C}$ 低温范围内对温度升高较为敏感,在 $15\sim 35\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内温度升高对土壤氮矿化速率的影响不明显,这是因为高寒草甸土壤及其微生物适应了低温条件,温度适当升高增强了土壤微生物活性,温度过高反而开始抑制。

研究表明^[26-27],升温能促进土壤硝化作用,但本研究中培养温度升高对高寒草地土壤硝化速率的影响不明显,这可能是由于施用无机氮肥刺激了反硝化微生物,提高了反硝化活性和效率^[3,28],并且高寒草原地区高海拔寒冷的环境不利于土壤中硝化细菌的生存^[29],同时添加有机肥降低了土壤氮素矿化速率对升温的敏感性,放缓了高温条件下矿质氮

的释放速率^[30]。此外,干湿交替强度及交互作用均显著影响高寒草地土壤的硝态氮量^[31],本研究中矿化培养时速效氮提取溶液淋洗的方法对土壤的扰动可能造成了土壤硝化作用的降低。各处理下土壤硝态氮矿化量没有明显增加,说明添加有机氮肥不会增加高寒草地土壤硝态氮的淋溶风险,但有机肥添加对气态形式损失氮素的影响还有待进一步研究。

综上,本研究得出以下结论:

1) 土壤氮素矿化总量与温度正相关,在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 下明显高于 15 和 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 。有机氮添加 $15\sim 45\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 可以增加土壤铵态氮的矿化量。

2) 土壤氮矿化速率随着有机氮的添加先增加后降低,在 N_{45} 处理下达到峰值。土壤有机氮的铵化速率随着温度的升高而增加,硝化速率对温度的响应不明显。有机氮添加大幅提高了土壤速效氮在培养前期的矿化速率,加速了有机氮的矿化。

3) 温度决定了高寒草地土壤氮素矿化势。有机氮添加增加了高寒草地土壤矿化势,有机氮梯度过高则土壤氮素矿化积累量开始降低。温度对矿化速率常数k的影响不明显,添加 $15\sim 45\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 有机氮可以增加高寒草地土壤氮素矿化速率。

参考文献 References:

- [1] 张亚亚,郭颖,刘海红,刘胤序,刘小龙,李军. 青藏高原表土有机碳、全氮含量分布及其影响因素. *生态环境学报*, 2018, 27(5): 536-644.

- ZHANG Y Y, GUO Y, LIU H H, LIU Y X, LIU X L, LI J. Content and impact factors of soil organic carbon and total nitrogen on the Qinghai-Tibet Plateau. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(5): 536-644.
- [2] 陈文业, 张瑾, 戚登臣, 赵明, 张继强, 李广宇, 魏强, 王芳, 朱丽, 刘振恒. 黄河首曲-玛曲县高寒草甸沙化动态演变趋势及其驱动因子定量分析. *草业学报*, 2013, 22(2): 11-21.
CHEN W Y, ZHANG J, QI D C, ZHAO M, ZHANG J Q, LI G Y, WEI Q, WANG F, ZHU L, LIU Z H. Desertification dynamic change trend and quantitative analysis of driving factors of alpine meadow in Maqu County in the First Mender of the Yellow River. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(2): 11-21.
- [3] 赵仪, 孙盛楠, 严学兵. 2010-2020年草地土壤氮循环研究现状与发展趋势. *草业科学*, 2021, 38(8): 1498-1512.
ZHAO Y, SUN S N, YAN X B. Research status and development trends of soil nitrogen cycle in grasslands during 2010-2020. *Pratacultural Science*, 2021, 38(8): 1498-1512.
- [4] 王常慧, 邢雪荣, 韩兴国. 草地生态系统中土壤氮素矿化影响因素的研究进展. *应用生态学报*, 2004, 15(11): 2184-2188.
WANG C H, XING X R, HAN X G. Advances in study of factors affecting soil N mineralization in grassland ecosystems. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11): 2184-2188.
- [5] 韩俊. 中国草原生态问题调查. 上海: 上海远东出版社, 2011.
HAN J. Survey on Ecological Issues of China's Grasslands. Shanghai: Shanghai Far East Publishers, 2011.
- [6] 周华坤, 姚步青, 于龙. 三江源区高寒草地退化演替与生态恢复. 北京: 科学出版社, 2016.
ZHOU H K, YAO B Q, YU L. Degraded Succession and Ecological Restoration of Alpine Grassland in The Three River Source Region. Beijing: Science Press, 2016.
- [7] 曹晓云, 周秉荣, 周华坤, 乔斌, 颜玉倩, 赵彤, 陈奇, 赵慧芳, 于红妍. 气候变化对青藏高原植被生态系统的影响研究进展. *干旱气象*, 2020, 40(6): 1068-1080.
CAO X Y, ZHOU B R, ZHOU H K, QIAO B, YAN Y Q, ZHAO T, CHEN Q, ZHAO H F, YU H Y. Research progress on the impact of climate change on vegetation ecosystem in the Tibetan Plateau. *Journal of Arid Meteorology*, 2020, 40(6): 1068-1080.
- [8] 王军, 张骁, 高岩. 青藏高原植被动态与环境因子相互关系的研究现状与展望. *地学前缘*, 2021, 28(4): 70-82.
WANG J, ZHANG X, GAO Y. The relationships between vegetation dynamics and environmental factors on the Qinghai-Tibet Plateau: A review of research progress and prospect. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(4): 70-82.
- [9] 王学霞, 董世魁, 高清竹, 张勇, 胡国铮, 罗文蓉. 青藏高原退化高寒草地土壤氮矿化特征以及影响因素研究. *草业学报*, 2018, 27(6): 1-9.
WANG X X, DONG S K, GAO Q Z, ZHANG Y, HU G Z, LUO W R. The rate of soil nitrogen transformation decreased by the degradation of alpine grasslands in the Qinghai Tibet Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(6): 1-9.
- [10] 宋良翠, 马维伟, 李广, 刘帅楠, 陆刚. 温度变化对尕斯库勒湿地不同退化梯度土壤氮矿化的影响. *草业学报*, 2021, 30(9): 27-37.
SONG L C, MA W W, LI G, LIU S N, LU G. Effect of temperature changes on nitrogen mineralization in soils with different degradation gradients in Gahai Wetland. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(9): 27-37.
- [11] 侯彦林. 生态平衡施肥的理论基础和技术体系. *生态学报*, 2000, 20(4): 22-25.
HOU Y L. Theory and technological system of ecological balanced fertilization. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(4): 22-25.
- [12] 符佩斌, 干友民, 张洪轩, 杨平贵, 郭丽娟, 曾华, 陈立坤, 张雪莲, 薛晶月, 刘焱, 苏剑, 高伟, 洪家平. 施肥对高寒草甸产草量和品质的影响. *草业科学*, 2015, 9(7): 1137-1142.
FU P B, GAN Y M, ZHANG H X, YANG P G, GUO L J, ZENG H, CHEN L K, ZHANG X L, XUE J Y, LIU T, SU J, GAO W, HONG J P. Effects of fertilizing on the forage production and quality of alpine grassland. *Pratacultural Science*, 2015, 9(7): 1137-1142.
- [13] GONG W, YAN X Y, WANG J Y, HU T, GONG Y. Long-term manure and fertilizer effects on soil organic matter fractions and microbes under a wheat-maize cropping system in northern China. *Geoderma*, 2009, 149(3/4): 318-324.
- [14] 纪亚君. 青海高寒草甸施氮肥增产效应浅析. *草业科学*, 2006, 23(3): 26-29.
JI Y J. Effects of nitrogen on the grass yield of Qinghai alpine meadow. *Pratacultural Science*, 2006, 23(3): 26-29.
- [15] 徐正辉, 俞联平, 王汝富, 马隆西, 曹国顺, 俞慧云, 李新媛, 任越. 夏河县天然草原资源及分布. *中国草食动物科学*, 2020, 40(5): 42-46.
XU Z H, YU L P, WANG R F, MA L X, CAO G S, YU H Y, LI X Y, REN Y. Natural grassland resources and distribution in Xiahe County. *China Herbivore Science*, 2020, 40(5): 42-46.
- [16] 杨延彪, 刘占龙. 关于夏河县草地畜牧业可持续发展的思考. *家畜生态*, 2001, 22(1): 23-25.
YANG Y B, LIU Z L. The thought of sustainable development in Xiahe pasture husbandry. *Ecology of Domestic Animal*, 2001,

- 22(1): 23-25.
- [17] 郭雅婧. 氮素添加对青藏高原高寒草甸植被和土壤氮素供应能力的影响. 兰州: 兰州大学硕士学位论文, 2015.
GUO Y J. Effects of nitrogen adding on plant community and soil nitrogen supply ability of alpine meadow in Qinghai-Tibet Plateau. Master Thesis. Lanzhou: Lanzhou University, 2015.
- [18] STANFORD G, SMITH S J. Nitrogen mineralization potentials of soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1972, 36: 465-472.
- [19] 胡星云, 孙志高. 黄河口碱蓬湿地土壤氮矿化特征对温度及氮输入响应. *生态学报*, 2020, 40(24): 8882-8891.
HU X Y, SUN Z G. Effects of temperature and nitrogen input on nitrogen mineralization of soils in the newly created marshes of the Yellow River estuary. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(24): 8882-8891.
- [20] KÖRNER C. *Alpine Plant Life: Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems* (First edition). Berlin: Springer, 1999: 149-152.
- [21] 颜淑云, 周志宇, 秦彧, 邹丽娜. 玛曲高寒草地不同利用方式下土壤氮素含量特征. *草业学报*, 2010, 19(2): 153-159.
YAN S Y, ZHOU Z Y, QIN Y, ZOU L N. Characteristics of nitrogen contents under different land use conditions in Alpine grassland of Maqu. *Acta Prataculturae Sinica*, 2010, 19(2): 153-159.
- [22] 王伟, 德科加. 不同氮肥及施氮水平对称多县高寒草甸生物量和养分的影响. *草地学报*, 2015, 23(5): 968-977.
WANG W, Dekeja. The influences of different nitrogen types and dose rates on alpine meadow aboveground biomass and nutrients in Cheng Duo. *Acta Agrestia Sinica*, 2015, 23(5): 968-977.
- [23] 德科加. 青藏高原高寒草甸草地 NPK 施肥组合研究. *草原与草坪*, 2010, 30 (4): 22-25.
DE K J. Study on NPK fertilizer application in alpine meadow on Qinghai-Tibetan Plateau. *Grassland and Turf*, 2010, 30 (4): 22-25.
- [24] 李恩宇, 何贵永. 青藏高原高寒草甸不同季节土壤理化性质及酶活性对施肥处理的响应. *广西植物*, 2014, 34(4): 467-472.
LI E Y, HE G Y. Tibetan Plateau alpine meadow soil properties and enzyme activity in response to fertilization gradients in different seasons. *Guihaia*, 2014, 34(4): 467-472.
- [25] 吴建国, 韩梅, 裴伟, 艾丽, 常学向. 祁连山中部高寒草甸土壤氮矿化及其影响因素研究. *草业学报*, 2007, 16(6): 39-46.
WU J G, HAN M, CHANG W, AI L, CHANG X X. The mineralization of soil nitrogen and its influenced factors under alpine meadows in Qilian Mountains. *Acta Prataculturae Sinica*, 2007, 16(6): 39-46.
- [26] 王艳杰, 邹国元, 付桦, 刘洪斌. 土壤氮素矿化研究进展. *中国农学通报*, 2005, 21(10): 203-208.
WANG Y J, ZOU G Y, FU H, LIU H B. Development and advance of soil nitrogen mineralization. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(10): 203-208.
- [27] 王峰, 陈玉真, 尤志明, 吴志丹, 江福英. 培养温度对酸性茶园土壤硝化作用的影响. *茶叶学报*, 2016, 57(3): 124-128.
WANG F, CHEN Y Z, YOU Z M, WU Z D, JIANG F Y. Effects of temperature on nitrification of acidic soil in tea plantation. *Acta Tea Sinica*, 2016, 57(3): 124-128.
- [28] KRAMER S B, REGANOLD J P, GLOVER J D, BOHANNAN B J M, MOONEY H A. Reduced nitrate leaching and enhanced denitrifier activity and efficiency in organically fertilized soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(12): 4522-4527.
- [29] 李玉倩, 马俊伟, 高超, 霍守亮, 夏星辉. 青藏高原高寒湿地春夏两季根际与非根际土壤反硝化速率及 nirS 型反硝化细菌群落特征分析. *环境科学*, 2021, 42(10): 4959-4967.
LI Y Q, MA J W, GAO C, HUO S L, XIA X H. Denitrification rates and nirS-type denitrifying bacteria community structure characteristics of bulk and rhizosphere soil in spring and summer in the alpine wetlands of the Qinghai-Tibet Plateau. *Environmental Science*, 2021, 42(10): 4959-4967.
- [30] 田飞飞, 纪鸿飞, 王乐云, 郑西来, 辛佳, 能惠. 施肥类型和水热变化对农田土壤氮素矿化及可溶性有机氮动态变化的影响. *环境科学*, 2018, 39(10): 4717-4726.
TIAN F F, JI H F, WANG L Y, ZHENG X L, XIN J, NAI H. Effects of various combinations of fertilizer, soil moisture, and temperature on nitrogen mineralization and soluble organic nitrogen in agricultural soil. *Environmental Science*, 2018, 39(10): 4717-4726.
- [31] 乐艺, 张晓雅, 高俊琴, 丁艳, 李谦维. 模拟干湿交替对若尔盖高寒湿地土壤呼吸及可溶性碳氮稳定性的影响. *水土保持研究*, 2020, 27(1): 81-87.
LE Y, ZHANG X Y, GAO J Q, DING Y, LI Q W. Effect of simulated drying-rewetting cycles on soil respiration and dissolved organic carbon and nitrogen stability in Zoige Alpine wetlands. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(1): 81-87.

(责任编辑 苟燕妮)