

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.06.002

引用格式:张永智,陈哲,陈季贵,等.冻融交替加速冰缘带垫状植被生态系统氮素气态损失[J].草地学报,2026,34(6):1976—1989
ZHANG Yong-zhi, CHEN Zhe, CHEN Ji-gui, et al. Alternating Freeze-Thaw Accelerates the Gaseous Loss of Nitrogen in the Pad-like Vegetation Ecosystem of the Periglacial Zone[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(6):1976—1989

冻融交替加速冰缘带垫状植被生态系统氮素 气态损失

张永智¹, 陈哲^{1,2,3*}, 陈季贵⁴, 马琰琿¹, 陈裕¹, 唐遵严¹,
王世雄^{1,2,3}, 关晋宏^{1,2,3}, 王文颖^{1,2,3}, 周华坤⁵, 谢惠春^{1,2,3}, 郭志英⁴, 金艳霞¹, 云世明¹
(1. 青海师范大学生命科学学院/青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室, 青海 西宁 810016;
2. 高原科学与可持续发展研究院, 青海 西宁 810016; 3. 青海省青藏高原生物多样性形成机制与综合利用重点
实验室, 青海 西宁 810016; 4. 青海省海北州门源县草原站, 青海 海北州 810300;
5. 中国科学院西北高原生物研究所青海省寒区恢复生态学重点实验室, 青海 西宁 810008)

摘要:为探究季节性冻融是否促进流石滩垫状植被生态系统氧化亚氮(N_2O)排放,并加速氮素气态损失,本研究以祁连山东部岗什卡雪峰海拔4000~4400 m囊种草(*Thylacospermum caespitosum*)垫状植被为研究对象,连续两年监测土壤(0~30 cm)温湿度、养分动态特征及 N_2O 通量。结果表明:土壤全年经历约70次昼夜冻融循环,主要分布在四个时期:不稳定融化期(25次)、稳定融化期、不稳定冻结期(45次)、稳定冻结期。海拔每升高100 m,土壤冻融起止时间平均推迟或提前3.88天。不稳定融化期(持续时间仅占全年5.5%~6.8%) N_2O 排放最显著,累积排放量($225.97\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$)占全年35.88%,最大排放速率达 $24.52\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,平均通量($13.63\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)是年均值的1.39倍,除稳定融化期外的非生长季 N_2O 累积排放量总占比高达74.09%。排放受土壤水热、pH值主导,底物匮乏致生产量偏低。气候变暖下,冻融驱动冰缘带 N_2O 氮素气态损失加剧,需深入研究水热条件与氮转化机制。

关键词:气候变化;高山冰缘带;垫状植被;冻融作用;氧化亚氮

中图分类号:S812

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)06-1976-14

Alternating Freeze-Thaw Accelerates the Gaseous Loss of Nitrogen in the Pad-like Vegetation Ecosystem of the Periglacial Zone

ZHANG Yong-zhi¹, CHEN Zhe^{1,2,3*}, CHEN Ji-gui⁴, MA Ai-hui¹, CHEN Yu¹, TANG Zun-yan¹,
WANG Shi-xiong^{1,2,3}, GUAN Jin-hong^{1,2,3}, WANG Wen-ying^{1,2,3}, ZHOU Hua-kun⁵, XIE Hui-chun^{1,2,3},
GUO Zhi-ying⁴, JIN Yan-xia¹, YUN Shi-ming¹

(1. College of Life Sciences / Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation (Ministry of Education), Qinghai Normal University, Xining, Qinghai Province 810016, China; 2. Academy of Plateau Science and Sustainability, Xining, Qinghai Province 810016, China; 3. Qinghai Key Laboratory of Biodiversity Formation Mechanism and Comprehensive Utilization of the Qinghai-Tibetan Plateau, Xining, Qinghai Province 810016, China; 4. Menyuan County's Grassland Station, Haibei, Qinghai Province 810300, China;
5. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences/Qinghai Provincial Key Laboratory of Restoration Ecology for Cold Regions, Xining, Qinghai Province 810008, China)

Abstract: To investigate whether seasonal freeze-thaw promotes the emission of nitrous oxide (N_2O) and accelerates the gaseous loss of nitrogen in the talus plateau vegetation ecosystem, this study focused on the grassland (*Thylacospermum caespitosum*) pad vegetation at an altitude of 4000-4400 m on the Gangshigacha snow peak

收稿日期:2025-11-23;修回日期:2025-12-31

基金项目:青海省自然科学基金(2024-ZJ-707);国家自然科学基金(32260288);国家重点研发计划(2023YFF1304300)资助

作者简介:张永智(1999-),男,汉族,甘肃武威人,硕士研究生,主要从事高寒草地生态系统生态学研究,E-mail:1061611658@qq.com;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail: chenzhe@qhnu.edu.cn

in the eastern part of the Qilian Mountains. The soil (0-30 cm) temperature, humidity, nutrient dynamic characteristics, and N_2O flux were monitored continuously for two years. The results showed that the soil experienced approximately 70 daily freeze-thaw cycles throughout the year, divided into four periods: unstable thawing period (25 times), stable thawing period, unstable freezing period (45 times), and stable freezing period. For every 100-meter increase in altitude, the average start and end time of soil freeze-thaw was delayed or advanced by 3.88 days. The N_2O emission was the most significant during the unstable thawing period (accounting for only 5.5%-6.8% of the entire year), with a cumulative emission ($225.97 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$) accounting for 35.88% of the annual total, a maximum emission rate of $24.52 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, an average flux of $13.63 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, which was 1.39 times the annual average, and the cumulative emission during the non-growing seasons (excluding the stable thawing period) accounted for as high as 74.09%. The emission was dominated by soil water and heat, pH, and substrate scarcity, leading to low production. Under climate warming, the freeze-thaw driven nitrogen gas loss of N_2O in the ice margin zone intensified, and further research on the water and heat conditions and nitrogen transformation mechanism is needed.

Key words: Climate change; Alpine periglacial zone; Cushion vegetation; Freeze-thaw action; Nitrous oxide

青藏高原平均海拔4000 m以上,发育有丰富的冰缘地貌^[1]。在高山冰缘带靠近永久积雪区(或冰川)的下缘,由于冰冻及强烈风化,地表岩石剥落成大量大小不等的砾石,砾石沿陡峭山体向下滑动,因貌似石海,也被形象地称为高山流石滩^[2]。另外,由于高山冰缘带流石滩环境恶劣,植物生长季短暂,且大部分高山山峰彼此间独立似“岛状”,植被多呈现斑块状分布,因此冰缘植被带是一个相对独立且特殊的生态系统。在我国,高山流石滩植被已经被定义为高山流石滩稀疏植被和高山垫状植被生态系统两种类型^[3]。而在国际自然保护联盟(IUCN)发布的全新的全球生态系统类型中,高山冰缘带被专门归入第六大类生物区系——极地/高山(低温)生物群系,并被确定作为一种亚型生态系统^[4]。有研究表明,北极等寒冷地区正以数倍于全球平均水平的速度变暖,导致永久冻土融化,并释放其储存的巨量氮素^[5]。高山冰缘带垫状植被生态系统以其独特的半球状形态,适应强风、低温与贫瘠土壤,并通过改善局部微环境为其他物种提供“庇护所”,对维持高寒地区的生物多样性及生态功能起着至关重要的作用^[6],该地区高海拔、极端恶劣的生境特性使其研究极具特殊性。丰富的高山冰缘地貌使青藏高原成为全球高山植物,特别是垫状植物分布的热点分布区,其拥有垫状植物的种类达13科17属70余种,远高于全球其他山地^[7]。高海拔的环境决定了垫状植被生态系统对气候变化响应敏感且脆弱,因此垫状植被生态系统是研究陆地生态系统对气候变化响应机制的理想模式系统。垫状植被以其独特簇生结构,不但可以适应高山冰缘带的强风、低温、贫瘠和不稳定的土壤环境,提高自身的生存能力,还可以通过对局部土壤养分、水分、

温度等环境条件进行的改善,为其他耐受性较差的物种提供庇护,进而影响冰缘带生态系统的重要功能,因此垫状植物也被称为“护理植物”^[8]。绝大多数垫状植物所构建的微群落对物种丰富度、多度和地面生产力维持具有显著作用,垫状植物周边物种丰富度较流石滩裸地高出80%~150%^[9]。冰缘带这类植物多样性的维持机制与垫状植物对氮转化和氮素累积的作用密不可分。研究发现,垫状植物通过提高硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性进而促进土壤氮矿化和无机氮累积^[10]。此外,垫状植物通过富集凋落物、拦截风携颗粒物,形成“养分岛屿”效应,增加了其冠层下土壤的全氮和速效氮含量^[11]。垫状植被还通过调节微生物群落与酶活性,影响氮素矿化、硝化、反硝化等过程,改变氮素在生态系统内部的转化路径与速率,驱动氮素形态转变^[12]。目前学界多聚焦于冰川退却或草甸退化,对高山垫状植被生态系统氮循环关键过程的研究还较少,对理解这类系统结构和功能对气候变化的响应机制也相对薄弱。

氧化亚氮(Nitrous oxide, N_2O)是一种强效温室气体,加剧了全球变暖的进程,造成严重的生态危机^[13],在百年尺度上,1分子 N_2O 的潜在增温效应是1分子二氧化碳(Carbon dioxide, CO_2)的298倍^[14-16]。全球农业和自然生态系统排放的 N_2O 中,约60%来源于土壤微生物参与的氮循环过程,主要包括硝化作用和反硝化作用^[17-18]。有研究发现,高寒生态系统中在冻融作用驱动下土壤 N_2O 排放量占全年总排放量的50%以上^[19],这与土壤温度、水分和微生物特性有直接关系^[20]。高寒草地在表层土壤经历冻融循环的过程中 N_2O 排放强度虽然低于季节性冻融农田,但在土壤解冻初期表现出显著

脉冲式排放特征^[21-22],可占全年总排放量的6%~20%,退化严重的高寒草地裸地斑块在表土解冻过程中 N_2O 排放速率是非生长季平均值的2倍以上^[23]。在淡水沼泽湿地中非生长季土壤解冻时期, N_2O 排放量同样占到全年释放量的6%~28%^[24-25]。室内冻融模拟试验同样证明冻融过程中 N_2O 排放量急剧增加^[26]。在全球变暖驱动下,冻融影响的区域将向高海拔和高纬度冻土区扩张,冻融格局的变化可能对垫状植物生态系统土壤氮转化关键过程和 N_2O 排放产生重要的影响^[27]。目前关于冻融作用是否加速氮素相对贫瘠的高山垫状植被生态系统 N_2O 排放并造成系统氮素亏缺,尚未被系统研究。因此,探究全年尺度上垫状植被土壤 N_2O 排放规律,特别是考虑冻融作用和漫长非生长季内 N_2O 的排放量,明确影响冰缘带土壤 N_2O 排放的主要因素,对理解气候变化背景下高寒生态系统氮循环关键过程及温室气体排放响应过程和机制具有重要作用。

为此,本研究计划在青藏高原北部祁连山岗什卡雪峰地区选取海拔4000~4400 m范围内的典型囊种草(*Thylacospermum caespitosum*)垫状植被生态系统,连续两年在野外原位条件下监测三处高山流石滩垫状植被上层土壤(0~30 cm)的冻融变化特征,明确垫状植被土壤冻融时期,持续测定 N_2O 通量,计算不同时期的累积排放量,并结合土壤温度、湿度及养分,明确影响高山垫状植被土壤 N_2O 排放的主要因子,旨在为准确地评估青藏高原高山冰缘带垫状植被生态系统土壤 N_2O 通量提供必要参考,并为深入探讨气候变化驱动下高海拔极端生境氮循环关键过程响应提供支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于青海省海北藏族自治州门源回族自治县境内岗什卡雪峰(37°41′51.23″~37°40′58.03″N, 101°28′8.11″~101°26′49.11″E),该峰为祁连山东部冷龙岭主峰,海拔5254.5 m。研究区属典型高原大陆性季风气候,无明显四季变化,仅有冷暖季之分。年均温-1.7℃,历史极端最高温度和最低温度分别为26.8℃和-37.1℃,日最低温度低于0℃的天数高达280天,年内无绝对无霜期,相对无霜期仅20天左右^[28]。最热月7月平均气温约为9.8℃,最冷月

1月,平均气温约为-14.8℃。年均降水量为580 mm,80%降水集中在植物生长季节(6—8月),区域年均蒸发量为1238.0 mm^[29]。海拔3200~3800 m之间的区域从11月中旬到次年4月上旬,土壤会形成稳定的季节冻土层,最大厚度可达230 cm,4月中旬随着气温不断上升,冻土层自下而上开始融化,6月下旬季节性冻土层完全消融。海拔3800 m以上的高山地带,往往分布有多年岛状冻土,其活动层厚度约2 m,土壤冻融状态的季节变化特征目前尚未见报道。高山流石滩植被类型有红景天属(*Rhodiola* L.)、雪莲属(*Echeveria lauii*)等高海拔特有植物,同时分布有四蕊山莓草(*Sibbaldia tetrandra*)、囊种草、甘肃雪灵芝(*Arenaria kansuensis*)等典型垫状植被^[30]。土壤pH值为6.91,容重1.37 g·cm⁻³,表层土壤(0~30 cm)年均温13.07℃,含水量为21.90%。

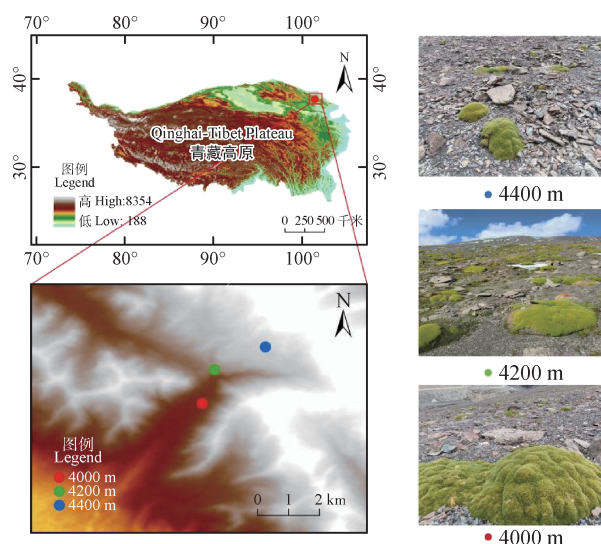


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

注:基于自然资源部标准地图制作,审图号GS(2024)0650号,底图无修改

Note: Based on the standard map of the Ministry of Natural Resources (Map Review Number: GS (2024) 0650), the base map has not been modified

1.2 试验设计

从岗什卡雪峰冰川前端4400 m开始向下,选择囊种草集中分布的区域,设置3个样地(4400 m, 4200 m, 4000 m)(图1),样地面积100 m²(10 m×10 m),各样地中设置3个样方(1 m×1 m),样方中选取直径大小为35 cm的囊种草作为研究对象,各布设1个静态箱采气装置,同步进行气体及土壤样品取样工作。季节性冻融周期的划分基于5 cm深度的土

壤日均温度变化^[31]。依据HOBO温湿度记录仪监测到的温度数据,确定融化时期,并按照季节性冻融周期变化情况采集气体和土壤样品。本研究以海北站相关资料为参考,将季节性冻融过程划分为四个阶段:不稳定冻结期(UFP,土壤温度开始降至0℃)、稳定冻结期(SFP,土壤温度完全低于0℃)、不稳定融化期(UTP,土壤温度开始升至0℃以上)和稳定融化期(STP,土壤温度完全高于0℃)^[28]。

1.3 样品采集与测定

(1) 土壤温湿度及大气温度测定

本研究在各样地内埋设HOBO传感器(HOBO Micro Station Data Logger-H21, Onset, 美国)自动监测土壤10 cm, 20 cm两个深度的含水量,及5 cm, 15 cm, 30 cm三个深度的土壤温度,监测频率为次·(30 min)⁻¹。大气温度数据来源于中国气象数据网(data.cma.cn)。

(2) 土壤样品采集与测定

土壤样品与气体样品收集同期进行,在样方内、静态箱底座周边,采用五点取样法,采集0~20 cm深度土壤样品,混合均匀,室内自然风干,去除根系、枯落物及砾石,风干土样过0.149 mm的尼龙网筛,用于测定土壤总碳(Total carbon, TC)含量、总氮(Total nitrogen, TN)含量、总磷(Total phosphorus, TP)含量、pH值。用元素分析仪(Vario EL III, Elementar, 德国)测定TC和TN;TP采用钼锑抗比色法测定^[32];使用pH计,按照水土比5:1测量土壤pH值^[33]。

(3) 气体样品采集与测定

本研究气体采集与测定采用静态暗箱-气相色谱法。气体采集静态箱分为透明箱体和底座两个部分,其中透明箱体为直径40 cm、高30 cm的高透光亚克力板制成的圆柱桶,底座为直径40 cm、高15 cm的不锈钢圈(图2)。底座插入土体15 cm深,箱体通过密封胶圈嵌套在不锈钢底座上。箱内安装有小型风扇,取样时连通移动电源,通过风扇转动将箱内空气搅拌均匀。不稳定融化期(4—5月)和不稳定冻结期(10—11月)加大样品采集频率,每周采集1次气体样品;生长季(6—9月)每月采集一次样品;稳定冻结期(12—3月)由于土壤冻结,积雪覆盖,每2个月取1次样品。气体样品采集每次选择在天气晴朗的上午(8:00—11:00)进行,取样开始前5分钟,用遮光布对透明静态箱进行遮光处理,

避免取气过程中发生强烈温室效应。取气开始后,在40 min内每隔10 min(0, 10, 20, 30, 40 min)抽取20 mL空气,并同步记录箱内温度、采气时刻、大气和土壤温度等数据。采样地大气压强数据来源于中国气象数据网(data.cma.cn)。将气体样品注入铝箔采样袋,运回实验室后使用气相色谱仪(GC-2014C, 岛津, 日本)测定气体中N₂O浓度,数据采集与处理使用GC solution Lite工作站,按照公式(1)计算N₂O通量(F)。N₂O累积通量采用线性内插法计算。

N₂O通量(F)计算:

$$F = \frac{d_c}{d_t} \times \frac{M}{V_0} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \times H \quad (1)$$

式中: d_c/d_t 为采样箱内气体浓度随时间变化的回归曲线斜率; M 为气体摩尔质量; P 为采样地实际大气压强; T 为箱内实际温度; V_0, P_0, T_0 分别为标准状态下的气体摩尔体积(22.4 L·mol⁻¹)、标准大气压(101.325 kPa)和绝对温度(273.15 K); H 为采样气室高度(0.3 m)。F为负值时表示气体净吸收,正值时表示净排放。

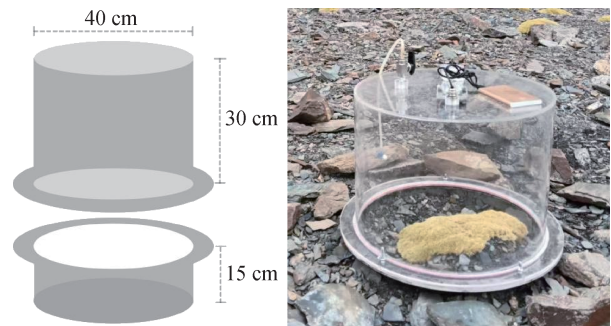


图2 气体采集静态箱示意图

Fig. 2 Schematic diagram of static chamber for gas collection

1.4 数据处理与分析

使用Microsoft Excel 2019对数据进行整理。采用IBM SPSS 26.0软件对数据进行分析,数据符合正态分布和方差齐性,然后进一步进行单因素方差分析(ANOVA),并结合LSD法对不同海拔梯度及不同冻融时期N₂O通量、土壤理化性质进行多重比较,显著性水平选取 $\alpha=0.05$;采用皮尔逊相关性分析探究不同时期N₂O排放通量和气候因子及土壤理化性质的相关性;使用R studio 4.3.2完成结构方程模型(plspm包),探究环境因子对N₂O通量的影响路径。

2 结果与分析

2.1 垫状植被生态系统土壤温湿度特征

在三样地中,不稳定融化期为4月10日(± 3 天)—5月5日(± 5 天),持续时间为20~25天,持续时间占全年的6.39%,5 cm,15 cm,30 cm三处深度的平均温度为 -1.82°C ;稳定融化期为5月10日(± 4 天)—9月28日(± 5 天),持续时间为110~120天,持续时间占全年的36.98%,5 cm,15 cm,30 cm三处深度的平均温度为 6.84°C ;不稳定冻结期为10月5日(± 6 天)—11月10日(± 5 天),持续时间为30~50天,持续时间占全年的10.05%,5 cm,15 cm,30 cm三处深度的平均温度为 -0.90°C ;稳定冻结期为11月25日(± 4 天)—4月1日(± 3 天),持续时间为170~185天,持续时间占全年的46.58%,5 cm,15 cm,30 cm三处深度的平均温度为 -7.77°C (图3、图4)。另外,海拔每升高100 m,土壤冻融起止时间平均推迟或提前3.88天。

上层土壤含水量与土壤冻融状态存在明显的协同规律。随着10月份开始土壤冻结程度的加剧,土壤含水量缓慢降低,并于1月份达到全年最低值,如1月1日海拔4000 m样地10 cm处土壤含水量仅为4.03%,完全冻结期内含水量维持在5%~14.76%之间。在冷季末期解冻期内,随着土壤的融化,土壤含水量急剧上升(从4.03%上升至24.16%),从表土完全解冻至冷季初期冻结前,土壤含水量相对稳定地维持在24.16%~35.83%之间。而稳定融化期和不稳定冻结期土壤含水量则呈阶段性递减趋势。在全年尺度上,不同深度处,地下10 cm处的土壤含水量对冻融响应更明显,波动范围(4.03%~31.68%)略低于地下20 cm(5.00%~35.83%)。且4400 m高海拔样地冻融进程滞后,稳定冻结期低含水量持续更久,不稳定融化期水分峰值出现更晚,且幅度略低(图5)。

2.2 垫状植被生态系统环境土壤养分含量变化特征

全年尺度上土壤TC和TN在不同样地间均随海拔升高而降低,但TP变化却刚好相反。冻融作用同样影响土壤C,N,P含量,如海拔4000 m处不稳定冻结期TC含量最高($15.60\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)显著高于其他三个时期(图6a),而其稳定融化期的土壤TN含量最高($0.93\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)(图6b)。在海拔4400 m

处,不稳定冻结期的土壤TP含量($1.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)显著高于其他时期(图6c)。

2.3 垫状植被生态系统氧化亚氮通量特征

2.3.1 氧化亚氮通量季节特征 三个样地中, N_2O 通量变化都呈现出明显的“单峰型”变化规律,在稳定融化期、稳定冻结期、不稳定冻结期 N_2O 均表现为弱释放,而在短暂的不稳定融化期,随着积雪融化和土壤解冻过程的进行,土壤为明显的 N_2O 释放源。三个样地 N_2O 排放速率峰值介于 $19.06\sim 24.52\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间(图7)。不稳定融化期的 N_2O 平均排放速率($13.63\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)显著高于其他时期,分别是稳定融化期、不稳定冻结期、稳定冻结期平均通量的1.32倍、2.17倍、1.52倍(图8)。在不稳定冻结期,三个样地之间 N_2O 平均通量差异显著($P<0.05$),其他时期三个样地之间 N_2O 平均通量无差异。虽然不稳定冻结期内表层土壤经历的昼夜冻融循环次数多于不稳定融化期,但该时期 N_2O 平均通量却为全年最低水平。

2.3.2 不同时期氧化亚氮累积排放 三个海拔样地中,不稳定融化期的 N_2O 累积排放量均为最高,平均为 $225.97\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$,占全年总排放量的35.88%,而稳定融化期、不稳定冻结期、稳定冻结期 N_2O 累积排放量平均为 $163.18\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$, $99.17\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$, $141.43\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$,仅占全年总排放量的25.91%,15.75%,22.46%。在不稳定融化期,海拔4200 m样地 N_2O 排放占比最高,其次是海拔4000 m样地,海拔4400 m样地 N_2O 累积排放占比最低。

2.4 影响氧化亚氮排放的相关因素

相关性分析初步揭示了各环境因子与 N_2O 排放通量间的双变量关联特征,结果表明:在不稳定融化期, N_2O 排放通量与海拔、土壤温度、pH值呈显著正相关,而与土壤TP,TC含量显著负相关(图10)。而在稳定融化期,土壤温度较高,同时伴随不定期降雨, N_2O 排放通量仅与土壤含水量呈显著负相关,与其他环境因子相关性不显著。除稳定冻结期 N_2O 排放通量与土壤TP含量显著负相关外,不稳定冻结期和稳定冻结期 N_2O 排放通量与其他环境因子相关性均不显著。

基于双变量关联的初步认知,进一步采用结构方程模型解析各环境因子间复杂因果路径,结果表明:垫状植被生态系统不稳定融化期土壤 N_2O 排放

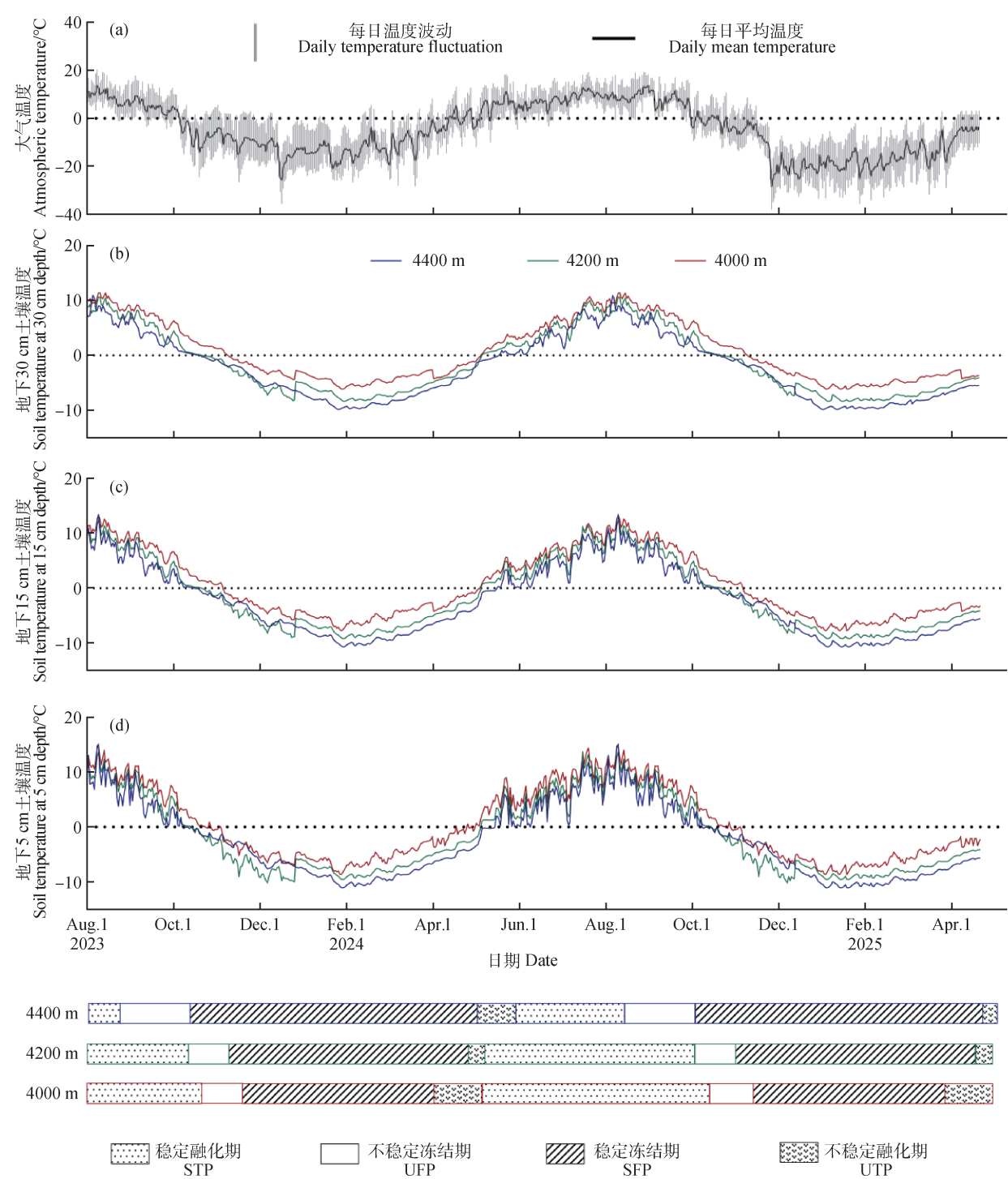


图 3 大气温度和不同深度土壤温度变化特征

Fig. 3 Characteristics of atmospheric temperature and soil temperature at different depths

注:图中展示为日平均温度变化特征

Note: The figure shows the characteristics of the daily average temperature variation

直接受土壤理化性质(土壤含水量,土壤温度,pH值)决定(路径系数-0.79)。而土壤养分对N₂O通量具有较弱的正效应,其中直接效应的路径系数为0.11,且理化性质还通过影响土壤养分(路径系数-0.87)改变N₂O排放量,其总效应达到-0.89。在不稳定融化期,海拔虽然对N₂O通量直接效应不

显著,但通过影响土壤理化性质(路径系数-0.92)和土壤养分含量(路径系数-0.10)间接改变N₂O通量特征,其总效应达到0.72。总之,不稳定融化期N₂O大量释放与该时期土壤理化性质密切相关,而随着海拔上升土壤理化性质改变和生态系统养分匮乏造成反应底物不足,间接抑制N₂O排放。

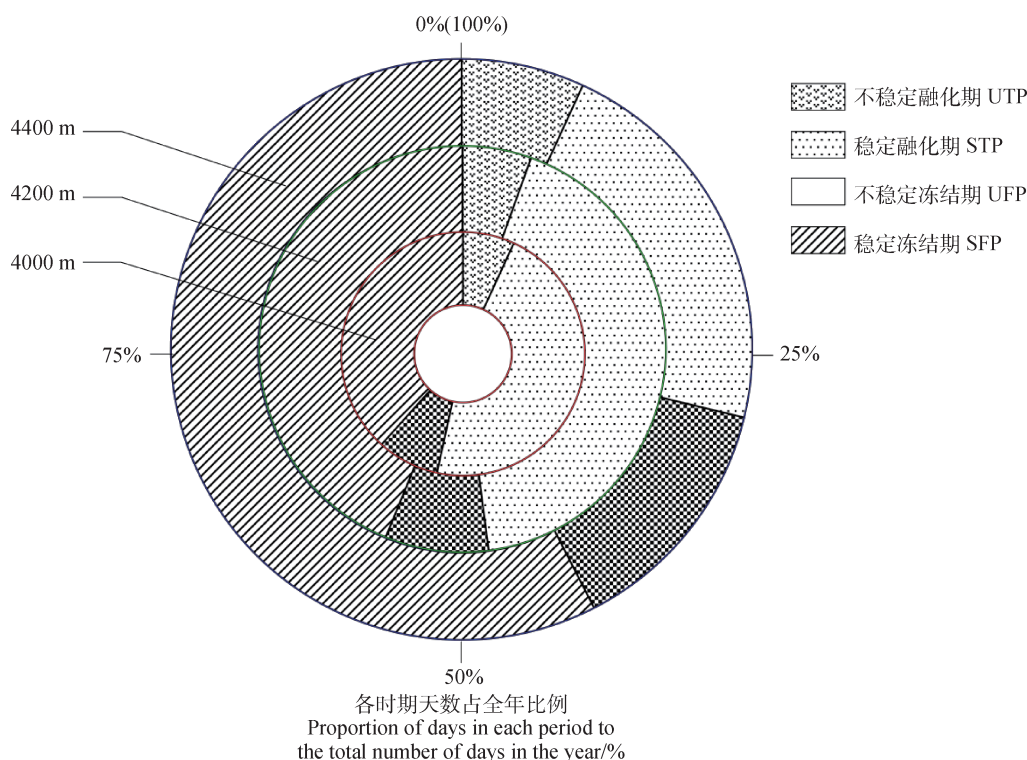


图 4 各时期天数占全年比例

Fig. 4 The proportion of days in each period to the total of the year

3 讨论

3.1 不同冻融时期氧化亚氮排放特征

本研究发现在不稳定融化期,伴随土壤解冻和积雪消融,垫状植被生态系统土壤 N_2O 排放速率急剧增加,最高峰值达到 $24.52 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,短短 25 天累积排放量达 $225.97 \text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$,占全年总排放量的 35.88%,而其他时期 N_2O 平均排放速率仅为 $8.53 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,长达 340 天的累积排放量为 $403.78 \text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。因此,垫状植被土壤在冷季末期表层土壤解冻过程中 N_2O 脉冲式排放特征显著。已有研究表明,农田土壤在非生长季融雪过程中 N_2O 排放速率高达其他时期的 40~100 倍,融雪期累积排放量占非生长季总排放量的 70%^[34];高寒草甸非生长季 N_2O 累积排放通量占全年的 62.67%^[35];高纬度农田在冷季末期融雪土壤解冻时 N_2O 累积排放通量占全年的 50% 以上^[36];温带森林生态系统在融雪期 N_2O 排放急剧升高,累积排放通量占全年的 73%^[37];季节性冻结的淡水沼泽湿地的非生长季土壤解冻时期产生大量 N_2O ,占到全年排放的 6%~28%^[24-25]。在我国东北地区三江平原的苔草湿地,冷季末期解冻期 N_2O 排放量对全年的贡献率高达 62.46%^[38],这些结果与我们本次的研究结果都表明,在不同生态系统中,冷季末期土壤解冻期是系统

中氮的气态损失的关键时期^[19]。

这一阶段的排放量激增通常是因为物理和生物的双重作用,土壤孔隙中冰晶的融化打破了物理屏障,使整个冻融周期中累积的 N_2O 瞬间释放^[39]。与此同时,融化的雪水创造出厌氧环境,从而引发了更强的硝化和反硝化作用,导致大量 N_2O 排放。更有研究指出,忽视冻融过程中 N_2O 排放,会导致对全球土壤氮的气态损失低估 17%~28%^[40]。

本研究还发现在稳定冻结期,垫状植被生态系统仍然有可观的 N_2O 排放。这与 Papen 等人的研究一致^[37],在土壤表层温度稳定在 -1.5°C 的长期霜冻期,云杉(*Picea asperata*)和山毛榉(*Fagus sylvatica*)林地仍产生了极高的 N_2O 排放,这是由于土壤未冻结水膜中存在活跃的微生物活动(硝化与反硝化),且冻结过程导致的底物浓缩和微生物死亡后释放的易降解有机质进一步促进微生物代谢^[34]。由此推断,垫状植被下相对温和的微环境(较厚的雪被保温使得冷季垫状植被 0~30 cm 土壤温度维持在 $-5\sim-10^\circ\text{C}$ 之间)可能同样为稳定冻结期的微生物活动创造了条件,使其成为一个不可忽视的“静默”排放阶段。相比于不稳定融化期,稳定融化期土壤温度升高,积雪融化完全,土地更易吸收热量,水分流失后土壤透气性增加,因而 N_2O 排放量也趋于稳定。

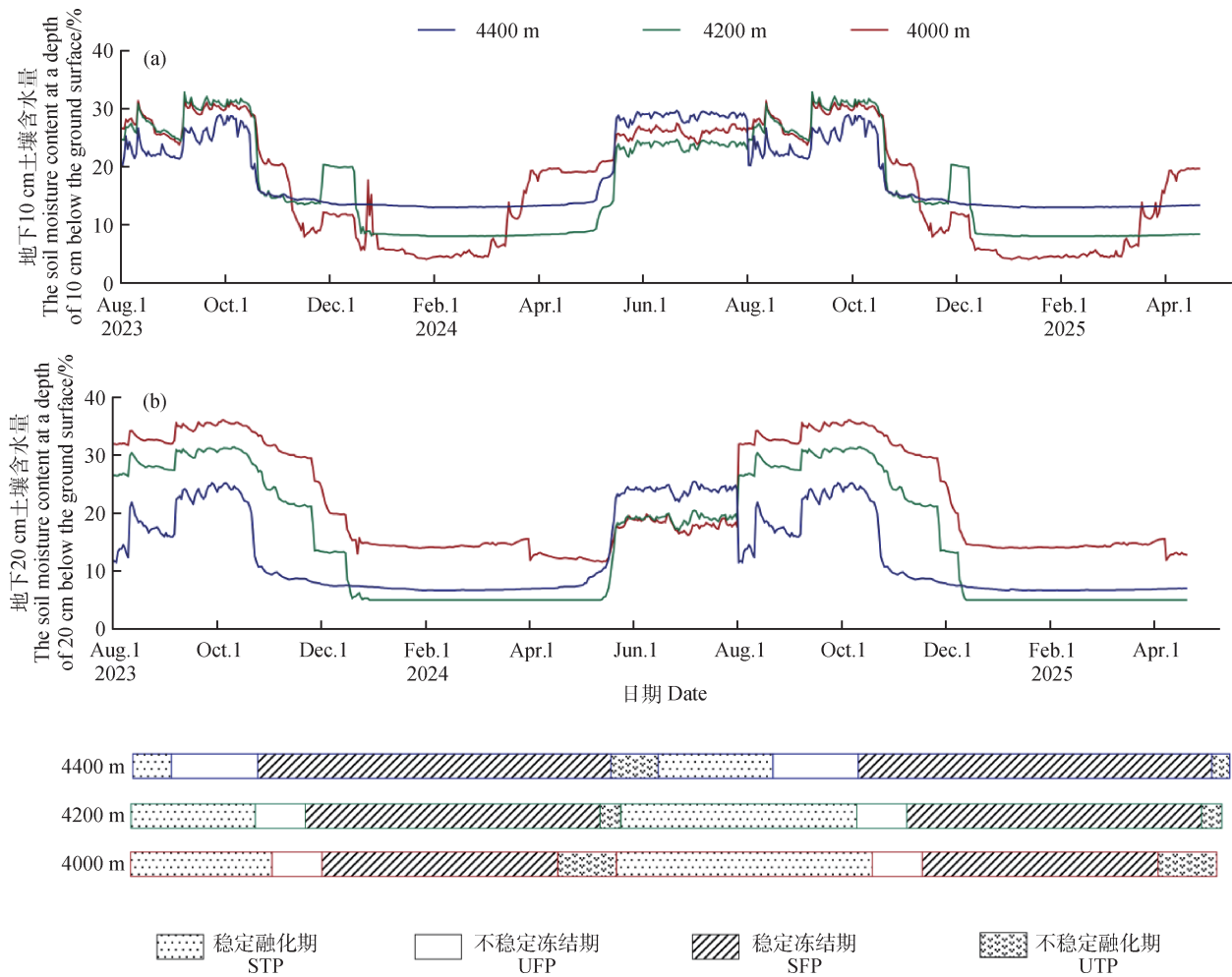


图5 不同深度土壤含水量变化

Fig. 5 Changes in soil moisture at different depths

注:图中展示为日平均土壤含水量变化特征

Note: The figure shows the variation characteristics of the daily average soil moisture content

总之,与其他具有显著季节性冻融过程的生态系统相比,垫状植被生态系统冻融期 N_2O 排放同样不可忽视,这对原本营养贫瘠的系统而言,冻融作用驱动下的氮排放可能加速系统氮素亏缺,威胁高山冰缘带生物多样性稳定和生态系统功能。未来评估高寒地区 N_2O 排放时,须重点针对冷季末期解冻期采用高频度的观测方式捕捉 N_2O 脉冲排放量。仅监测 N_2O 通量评估氮素气态损失,存在很大局限性。氮素气态损失含 N_2O , N_2 , NO , NH_3 等组分,但在野外原位条件下, N_2 因大气背景浓度极高难以精准测定; NO 通量低,常规技术灵敏度不足未纳入监测; NH_3 挥发亦未同步监测,导致损失评估遗漏关键路径。综上,仅基于 N_2O 无法全面表征氮素气态损失,未来需克服技术瓶颈,通过整合高频自动监测与稳定同位素示踪等先进手段,实现对 N_2 , N_2O , NO 和 NH_3 等全路径气态氮损失的同步量化,为氮

素循环研究提供可靠依据。

3.2 冻融环境中影响氧化亚氮排放的因素

海拔梯度引起的大气水热条件变化,是调控土壤微环境与生物地球化学循环的关键因素^[41]。本研究发现,在垫状植被生态系统的冻融过程中,土壤温度和水分是驱动 N_2O 排放动态的两个核心物理因子。在不稳定融化期,土壤温度与 N_2O 通量呈显著正相关,这与全球绝大多数生态系统的观测结果一致。这一现象的原因可能在于,温度上升提高了土壤微生物的代谢活性,包括参与氮转化关键过程的酶活性,从而为 N_2O 的产生提供了动力^[42-43]。除温度之外,土壤含水量也是影响冻融过程中 N_2O 排放的重要因子。本研究中,在稳定融化期,温度的正效应消失,土壤含水量成为唯一的显著负相关因子(图10),这可能是因为土壤高含水量下形成强

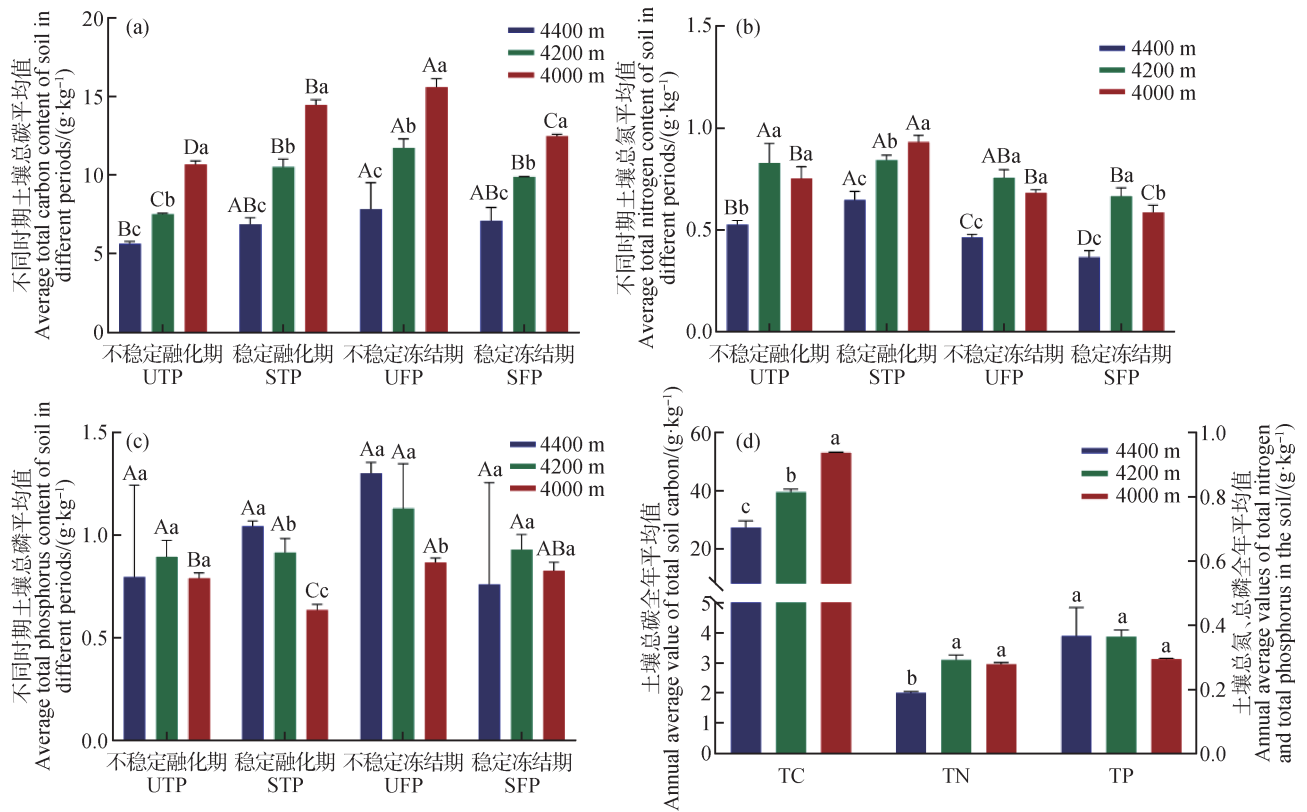


图6 不同时期土壤总碳(a)、总氮(b)、总磷(c)含量变化特征和土壤养分全年平均值(d)

Fig. 6 The variation characteristics of total carbon (a), total nitrogen (b), and total phosphorus (c) contents in soil at different periods and the annual average value of soil nutrients (d)

注:不同的小写字母表示同一时期不同海拔梯度差异显著;不同大写字母表示同一海拔梯度不同时期差异显著($P < 0.05$)。下同

Note: Different lowercase letters indicate significant differences in altitude gradients during the same period. Different capital letters indicate significant differences in the same altitude gradient at different periods ($P < 0.05$). The same as below

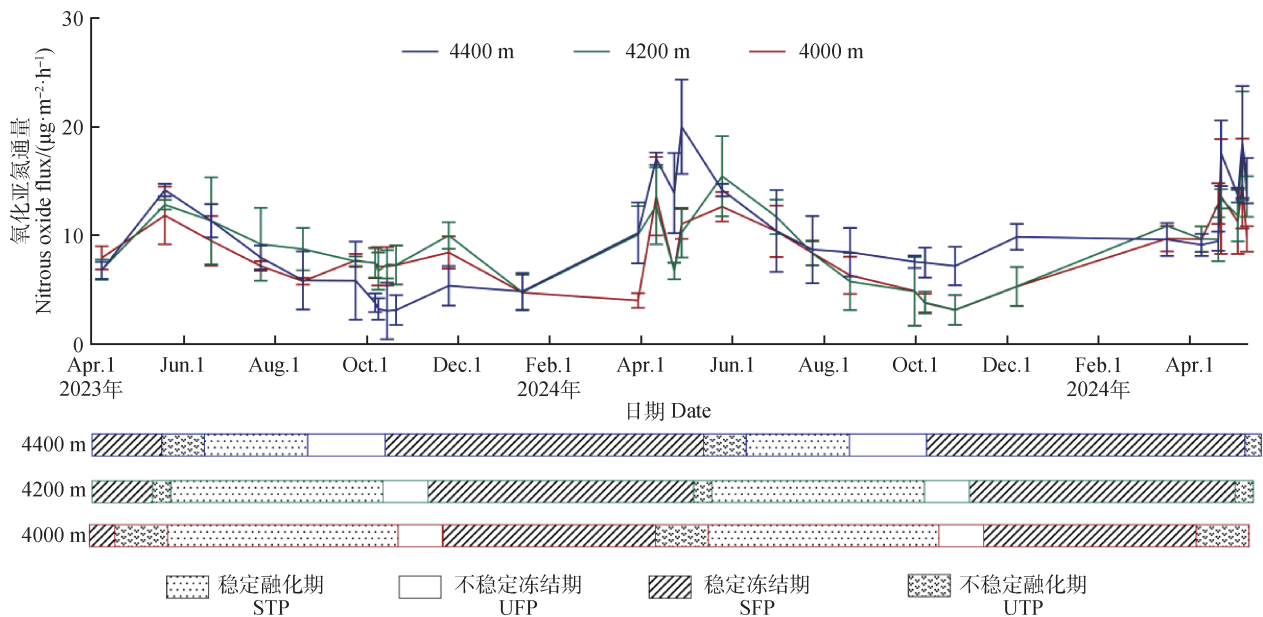


图7 垫状植被生态系统土壤氧化亚氮通量季节动态

Fig. 7 Seasonal dynamics of soil nitrous oxide fluxes in cushion plant ecosystems

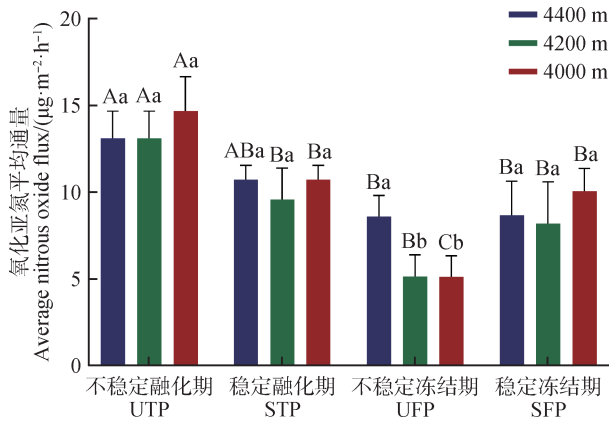


图8 不同时期氧化亚氮平均通量

Fig. 8 Average flux of nitrous oxide at different times

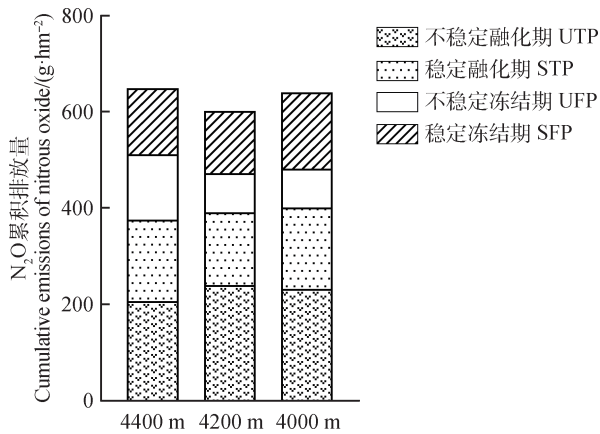


图9 各时期氧化亚氮累积排放量及占比

Fig. 9 Shows the cumulative emission proportion of nitrous oxide in each period

烈的厌氧环境,一方面促进反硝化作用,另一方面提高 N_2O 还原酶活性,使更多的 N_2O 还原为氮气 (N_2),导致 N_2O 净通量降低^[44]。已有研究表明,含水量适中的土壤在冻融交替影响下, N_2O 排放更为强烈^[45],我们之前的模拟试验发现是水分而非温度决定着冻融过程中氮素流和 N_2O 大量排放^[46]。由此可推论,土壤水分对 N_2O 排放的调控存在阈值效应:既需维持一定的水分以驱动冻融循环中的氮转化,又需避免水分过饱和引发的 N_2O 深度还原。除此之外,我们之前的研究还表明,青藏高原冻土区土壤氮素有效性受冻融交替次数、土壤水分及土壤融化温度共同影响^[47],这进一步说明水分与冻融过程的协同作用是 N_2O 排放的关键驱动机制。

不稳定融化期是 N_2O 排放的“脉冲窗口”,此阶段经历频繁昼夜冻融循环,物理性地破碎土壤团聚体并且杀死土壤微生物,加速了被封存养分的释放,从而形成氮素流,而生长季的缺失导致植物无法吸收这些氮素流,因此使得 N_2O 脉冲式排放,累

积量可占到年排放总量的 20%~90%^[48-49]。本研究观测到不稳定融化期排放量占全年 35.88%,正处于文献报道的范围之内,其中的差异可能与土壤理化性质有关。不稳定融化期土壤“冻结-融化”过程形成的有氧-无氧交替的环境,为硝化、反硝化作用提供了天然反应场地;白天升温与积雪融化提升土壤透气性,利于硝化作用;夜晚降温冻结则加剧土壤厌氧环境,推动反硝化过程。关于此期间 N_2O 的主要产生路径,目前学界也有探讨:Ludwig 等人指出,在冻融交替过程中,反硝化作用对 N_2O 排放的贡献更大^[26],但也有研究表明硝化作用可能是多年冻土融化初期 N_2O 大量排放的主要过程^[50]。这种看似矛盾的观点可能源于不同生态系统的水分差异。有研究进一步细化了水分的调控角色,发现当土壤充水孔隙度小于 60% 时, N_2O 排放由硝化反应主导,二者之间呈正相关,但当土壤充水孔隙度处于 60%~70% 之间时,反硝化作用逐渐加强, N_2O 排放达到峰值,随着土壤充水孔隙度再次变高,更完整的厌氧环境促进 N_2O 被还原为 N_2 , N_2O 排放量随之降低^[51],这与我们之前的推论一致。本研究还观测到 pH 值与 N_2O 通量呈显著正相关,当土壤 pH 值偏酸性时, N_2O 的还原过程受到严重抑制^[52-53],而在本研究中,相对偏碱性的土壤,也可解释为何在养分贫瘠的系统中仍能观测到大量 N_2O 排放。本研究中结构方程模型表明土壤理化性质对 N_2O 通量具有强烈的负向总效应(路径系数 -0.79),这表明尽管在不稳定融化期温度表现出正效应,但多个理化因子(如含水量、pH 等)的综合作用对 N_2O 的排放构成了限制。

海拔梯度通过驱动植物对水分及养分的吸收,以及引起微生物的代谢活性与底物消耗的差异,共同调控 N_2O 排放^[54]。在本研究中,土壤 TC 和 TP 含量与 N_2O 通量呈显著负相关,这可能是因为垫状植被生态系统存在强烈的磷限制。在高寒生态系统中,磷通常是初级生产和微生物活动的主要限制因子,较高的 TP 含量可能极大地促进了植物和微生物的生长与氮素固持,从而减少用于硝化和反硝化过程的氮库,导致 N_2O 排放降低^[55],这与在酸性森林土壤中磷添加会减少 N_2O 排放的报道相呼应^[56]。而在高寒环境下,TC 矿化速率缓慢,活性有机碳供应不足,这可能限制了反硝化微生物的能量供给。而较高的 C:N 可增强微生物对无机氮的固持作用,进一步减少了 N_2O 产生的底物^[57]。这些机制共同作用,可能导致在高 TC 和 TP 的样地中 N_2O 排放受

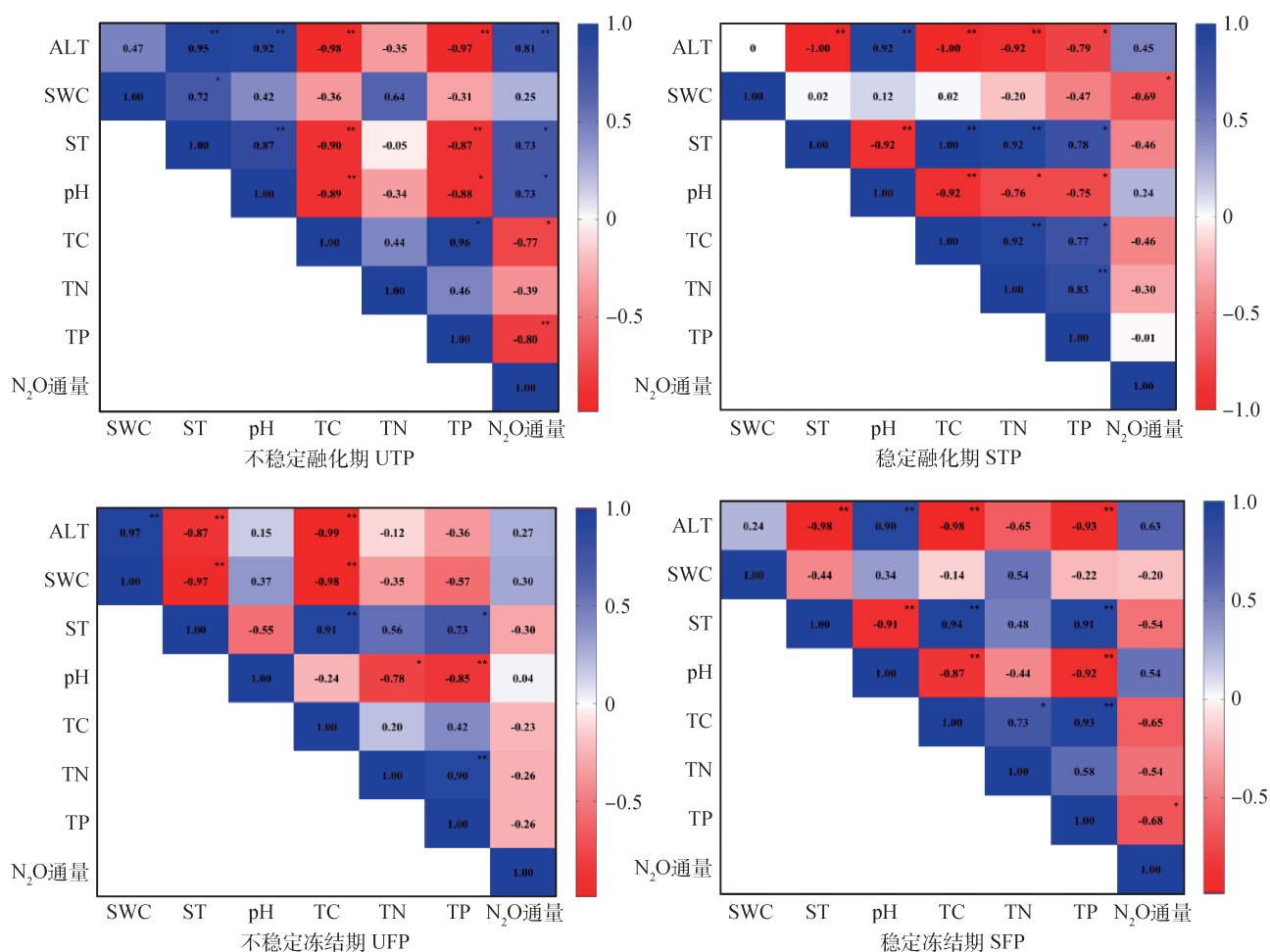


图10 不同时期氧化亚氮排放通量与环境因子的相关性分析

Fig. 10 Correlation analysis of nitrous oxide emission fluxes and environmental factors in different periods

注: *代表 $P \leq 0.05$, **代表 $P \leq 0.01$ 。ALT, 海拔; SWC, 土壤含水量; ST, 土壤温度; TC, 土壤总碳; TN, 土壤总氮; TP, 土壤总磷

Note: * indicates $P \leq 0.05$, ** indicates $P \leq 0.01$. ALT, altitude; SWC, soil moisture content; ST, soil temperature; TC, total soil carbon; TN, total soil nitrogen; TP, total phosphorus in soil

到抑制。除此之外,土壤质地、剖面层次、植被类型、凋落物、积雪厚度都会影响 N_2O 排放^[58]。本研究结构方程模型显示,海拔虽然对 N_2O 通量没有直接效应,但它通过强烈影响土壤理化性质(路径系数-0.92)和养分含量,产生了显著的间接效应(总效应0.72)。土壤养分含量对 N_2O 通量的直接正向影响非常微弱(路径系数0.11),这可能是因为养分的直接作用被生物固持等间接作用影响;而海拔对养分的微弱负向影响(路径系数-0.10)则可能与高海拔、有机质分解速率降低有关。

综上所述,在评估高寒生态系统 N_2O 排放时,必须充分考虑土壤磷限制和碳质量的潜在重要调控作用,以及不同冻融阶段主导环境因子的动态转换。未来的研究需结合氮素转化过程中相关功能基因的测定,进一步明确不同冻融阶段硝化、反硝化过程的相对贡献,以提升 N_2O 排放研究的准确性。

4 结论

在祁连山东部连续两年的野外监测研究表明,高山流石滩活动层土壤(0~30 cm)每年经历约70次昼夜冻融循环,冷季末期虽然昼夜冻融次数仅25次(天)左右,但该时期土壤 N_2O 排放峰值、平均速率、累积排放量均显著高于其他时期,其中累积排放量更是高达 $225.97 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$,占全年排放量的35.88%。同时,土壤温度连续监测结果表明,海拔每升高100 m,土壤冻融起止时间平均推迟或提前3.88天。气候变暖对高海拔地区土壤冻融状态影响显著,并加速 N_2O -N 的损失,且这种氮排放主要受土壤水分、温度和pH值调控。总之,冷季末期,冰缘带在非生长季中冻融作用驱动下的氮素气态损失不可忽视,气候变化可能加剧这类极端系统养分亏缺的现状。

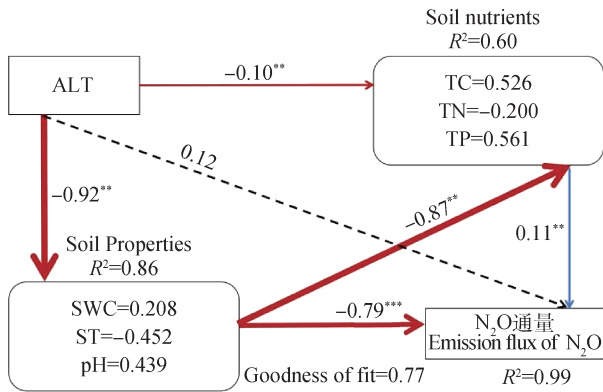


图 11 不稳定融化期环境因子对 N₂O 通量影响的结构方程模型

Fig. 11 Structural equation model of the influence of environmental factors during the unstable melting period on the emission flux of nitrous oxide

注:**代表 $P \leq 0.01$, ***代表 $P \leq 0.001$ 。ALT 表示海拔;SWC 表示土壤含水量;ST 表示土壤温度;TC 表示土壤总碳;TN 表示土壤总氮;TP 表示土壤总磷;Goodness of fit 表示拟合度。红色线条表示负效应,蓝色线条表示正效应,虚线表示关系不显著,线条粗细表示路径系数绝对值大小

Note: ** indicates $P \leq 0.01$, *** indicates $P \leq 0.001$. ALT represents altitude; SWC stands for soil moisture content; ST stands for soil temperature; TC represents total soil carbon; TN represents total soil nitrogen. TP represents total phosphorus in soil. Goodness of fit indicates the degree of fit. The red line indicates negative correlation, the blue line indicates positive correlation, and the dotted line indicates insignificance, the thickness of the line indicates the absolute value of the path coefficient

参考文献

- [1] 李渤生,张经纬,王金亭,等. 西藏高山冰缘植被的初步研究[J]. 植物学报,1981,23(2):132-139
LI B S, ZHANG J W, WANG J T, et al. A preliminary study of the subnival vegetation in Xizang[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 1981, 23(2):132-139
- [2] 《云南植被》编写组. 云南植被[M]. 北京:科学出版社,1987:22-28
The Editing Group of Vegetation of Yunnan. Vegetation in Yunnan[M]. Beijing: Science Press, 1987:22-28
- [3] 陈佐忠,王艳芬,汪诗平,等. 中国草地生态系统分类初步研究[J]. 草地学报,2002,10(2):81-86
CHEN Z Z, WANG Y F, WANG S P, et al. Preliminary studies on the classification of grassland ecosystem in China[J]. Acta Agrestia Sinica, 2002, 10(2):81-86
- [4] KEITH D A, FERRER-PARIS J R, NICHOLSON E, et al. A function-based typology for earth's ecosystems[J]. Nature, 2022, 610(7932):513-518
- [5] STRAUSS J, BIASIC, SANDERS T, et al. A globally relevant stock of soil nitrogen in the Yedoma permafrost domain[J]. Nature Communications, 2022, 13(1):6074
- [6] CHEN J G, CHEN X F, QIAN L S, et al. Degeneration of

foundation cushion species induced by ecological constraints can cause massive changes in Alpine plant communities [J]. Science China Life Sciences, 2024, 67(4):789-802

- [7] 黄荣福. 青海可可西里地区垫状植物[J]. 植物学报, 1994 (2):130-137
HUANG R F. The cushion plant in the Hoh Xil area of Qinghai[J]. Acta Botanica Sinica, 1994(2):130-137
- [8] 何永涛,石培礼,同巍. 高山垫状植物的生态系统工程师效应研究进展[J]. 生态学杂志, 2010, 29(6):1221-1227
HE Y T, SHI P L, YAN W. Ecosystem engineering of cushion plants in Alpine plant community: A review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(6):1221-1227
- [9] YANG P F, LOREAU M, HUANG M H, et al. Increased diversity by cushion plants enhances Alpine community productivity and stability[J]. New Phytologist, 2025, 248(1):125-139
- [10] XING S, HE Y T, NIU B, et al. Effect of a cushion plant, *Androsace tapete*, on soil net nitrogen mineralization and enzyme activities during the growing season [J]. Journal of Resources and Ecology, 2024, 15(2):422-430
- [11] 刘晓娟. 青藏高原北缘高山寒漠带垫状植物生态系统工程师效应研究[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2014:8
LIU X J. Study on engineer effect of cushion plant ecosystem in Alpine cold desert zone on the northern margin of Qinghai-Tibet Plateau[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2014:8
- [12] CHEN Q, CHEN J, ANDERSEN M N, et al. Elevational shifts in foliar-soil $\delta^{15}\text{N}$ in the Hengduan Mountains and different potential mechanisms[J]. Global Change Biology, 2022, 28 (18):5480-5491
- [13] 黄瑾,余龙飞,李文娟,等. 基于稳定同位素自然丰度技术的土壤氧化亚氮产生与排放过程研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(5):906-915
HUANG J, YU L F, LI W J, et al. Stable isotope natural abundance techniques in the studies on nitrous oxide production and emission processes: a review [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2021, 38(5):906-915
- [14] PENG Y R, WANG T, LI J, et al. Temporal-scale-dependent mechanisms of forest soil nitrous oxide emissions under nitrogen addition[J]. Communications Earth & Environment, 2024, 5(1):512
- [15] 马丽娟,效存德,康世昌. 全球主要山地气候变化特征和异同——IPCC AR6 WGI报告和SROCC综合解读[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(5):605-621
MA L J, XIAO C D, KANG S C. Characteristics, and similarities and differences of climate change in major high mountains in the world—comprehensive interpretation of IPCC AR6 WGI report and SROCC [J]. Climate Change Research, 2022, 18 (5):605-621
- [16] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2021—the physical science basis: working group I contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023:287-422
- [17] 吕晓东,王婷. 旱地农田氧化亚氮排放研究进展[J]. 甘肃农业科技, 2018, 49(10):67-73

- LV X D, WANG T. Research progress on nitrous oxide emissions from greenhouses in dryland [J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2018, 49(10): 67-73
- [18] 毛国华, 马文林, 康静文. 北京市农用地 N_2O 排放估算——基于区域氮循环 IAP-N 模型[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(5): 280-284
- MAO G H, MA W L, KANG J W. Estimation of N_2O emission from farmlands in Beijing City—Based on regional nitrogen cycling IAP-N model [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(5): 280-284
- [19] LUO J, PENG Y, JIA Z, et al. Moisture - microbial interaction amplifies N_2O emission hot moments under deepened snow in grasslands [J]. Global Change Biology, 2025, 31(5): e70254
- [20] ZHANG K R, PENG C H, ZHU Q A, et al. Estimating natural nitrous oxide emissions from the Qinghai - Tibetan Plateau using a process-based model: historical spatiotemporal patterns and future trends [J]. Ecological Modelling, 2022, 466: 109902
- [21] WEI H H, SONG X T, LIU Y, et al. *In situ* ^{15}N - N_2O site preference and O_2 concentration dynamics disclose the complexity of N_2O production processes in agricultural soil [J]. Global Change Biology, 2023, 29(17): 4910-4923
- [22] FU Y F, LIU C Y, LIN F, et al. Quantification of year-round methane and nitrous oxide fluxes in a typical Alpine shrub meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 255: 27-36
- [23] 杜岩功, 曹广民, 邓永翠, 等. 金露梅灌丛草甸氧化亚氮排放特征及冻融交替的影响研究[J]. 山地学报, 2009, 27(6): 688-697
- DU Y G, CAO G M, DENG Y C, et al. Characterization of and the effect of freezing-throwing on N_2O emission in an Alpine *Potentilla fruticosa* shrub meadow [J]. Journal of Mountain Science, 2009, 27(6): 688-697
- [24] SONG C C, WANG Y S, WANG Y Y, et al. Emission of CO_2 , CH_4 and N_2O from freshwater marsh during freeze - thaw period in Northeast of China [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(35): 6879-6885
- [25] 朴河春, 刘广深, 洪业汤. 全球冻融地区土壤是重要的 N_2O 释放源的综合分析[J]. 地球科学进展, 1995, 10(3): 283-288
- PIAO H C, LIU G S, HONG Y T. Soils in global freezing-thawing areas as the major N_2O -release source [J]. Advances in Earth Science, 1995, 10(3): 283-288
- [26] LUDWIG B, WOLF I, TEEPE R. Contribution of nitrification and denitrification to the emission of N_2O in a freeze-thaw event in an agricultural soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2004, 167(6): 678-684
- [27] 张青松, 李佳秀, 陈有超, 等. 冻融与氮输入对草地土壤氮转化和氧化亚氮排放的影响[J]. 草业科学, 2023, 40(6): 1472-1486
- ZHANG Q S, LI J X, CHEN Y C, et al. Effects of freeze-thaw action and nitrogen input on soil nitrogen transformation and nitrous oxide emissions in grassland ecosystem [J]. Pratacutural Science, 2023, 40(6): 1472-1486
- [28] 李英年, 赵新全, 曹广民, 等. 海北高寒草甸生态系统定位站气候、植被生产力背景的分析[J]. 高原气象, 2004, 23(4): 558-567
- LI Y N, ZHAO X Q, CAO G M, et al. Analyses on climates and vegetation productivity background at Haibei Alpine meadow ecosystem research station [J]. Plateau Meteorology, 2004, 23(4): 558-567
- [29] 戴黎聪, 柯浔, 曹莹芳, 等. 青藏高原矮嵩草草甸地下和地上生物量分配格局及其与气象因子的关系[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 486-493
- DAI L C, KE X, CAO Y F, et al. Allocation patterns of above- and belowground biomass and its response to meteorological factors on an Alpine meadow in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): 486-493
- [30] 陈哲, 周华坤, 任飞. 青藏高原北部高山冰缘带植物图谱[M]. 北京: 科学出版社, 2025: 5-8
- CHEN Z, ZHOU H K, REN F. Phytocora of the alpine periglacial zone in the northern part of the Qinghai-Xizang Plateau [M]. Beijing: Science Press, 2025: 5-8
- [31] 陈哲. 季节性冻土区生态系统土壤温室气体排放研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016: 10-19
- CHEN Z. Greenhouse gas emissions from soil of seasonally frozen region of ecosystems [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016: 10-19
- [32] 张向向, 姜向弟, 贺江, 等. 基于常规 Olsen 法的全自动化学分析仪 (SmartChem 200) 测定土壤有效磷的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2023(7): 232-237
- ZHANG X X, LOU X D, HE J, et al. Study on the method of determining soil available phosphorus (Olsen-P) by SmartChem 200 automatic chemical analyzer [J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2023(7): 232-237
- [33] 田乾, 张卫青, 乌兰图雅, 等. 畜粪及粪金龟对内蒙古典型草原土壤电导率和 pH 值的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2024, 38(8): 179-188
- TIAN Q, ZHANG W Q, WU L, et al. Effects of animal dung and dung beetle on electrical conductivity and pH of typical grassland soils in Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024, 38(8): 179-188
- [34] 陈哲, 韩瑞芸, 杨世琦, 等. 东北季节性冻融农田土壤 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 通量特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(2): 387-395
- CHEN Z, HAN R Y, YANG S Q, et al. Fluxes of CO_2 , CH_4 and N_2O from seasonal freeze-thaw arable soils in Northeast China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(2): 387-395
- [35] 王广帅, 杨晓霞, 任飞, 等. 青藏高原高寒草甸非生长季温室气体排放特征及其年度贡献[J]. 生态学杂志, 2013, 32(8): 1994-2001
- WANG G S, YANG X X, REN F, et al. Non-growth season's greenhouse gases emission and its yearly contribution from Alpine meadow on Tibetan Plateau of China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(8): 1994-2001
- [36] REGINA K, SYVÄSALO E, HANNUKALA A, et al. Fluxes of N_2O from farmed peat soils in Finland [J]. European Journal of Soil Science, 2004, 55(3): 591-599
- [37] PAPEN H, BUTTERBACH-BAHL K. A 3-year continuous record of nitrogen trace gas fluxes from untreated and limed soil of a N-saturated spruce and beech forest ecosystem in Germany: 1. N_2O emissions [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1999, 104(D15): 18487-18503

- [38] 宋立全. 三江平原三种河岸带湿地 N_2O 通量时空变化及其影响因子[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2020:8-10
SONG L Q. Spatiotemporal variations of nitrous oxide fluxes and influencing factors in the three riparian marshes in Sanjiang plain, Northeast China[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2020:8-10
- [39] 陈哲, 杨世琦, 张晴雯, 等. 冻融对土壤氮素损失及有效性的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(4): 1083-1094
CHEN Z, YANG S Q, ZHANG Q W, et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil nitrogen loss and availability[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(4): 1083-1094
- [40] WAGNER-RIDDLE C, CONGREVES K A, ABALOS D, et al. Globally important nitrous oxide emissions from croplands induced by freeze - thaw cycles[J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10(4): 279-283
- [41] 王思瑶, 王玉娟, 邱开阳, 等. 贺兰山土壤微生物生物量 C、N、P 化学计量特征沿海拔梯度的变化规律及其影响因素[J]. 草业科学, 2024, 41(7): 1558-1570
WANG S Y, WANG Y J, QIU K Y, et al. Variation regularity of stoichiometric characteristics of soil microbial biomass C, N, and P along the altitudinal gradient and their influencing factors in Helan Mountains[J]. *Pratacultural Science*, 2024, 41(7): 1558-1570
- [42] LAVILLE P, JAMBERT C, CELLIER P, et al. Nitrous oxide fluxes from a fertilised maize crop using micrometeorological and chamber methods[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 96(1-3): 19-38
- [43] USSIRI D A N, LAL R, JARECKI M K Nitrous oxide and methane emissions from long-term tillage under a continuous corn cropping system in Ohio[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 104(2): 247-255
- [44] WANG L, LI K, SONG Y Q, et al. The N_2O consumption ability in the surface paddy soil layer and its coupling relationship to N_2O reducing microorganisms [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7602-7610
- [45] CHEN Z, YANG S Q, ZHANG A P, et al. Nitrous oxide emissions following seasonal freeze-thaw events from arable soils in Northeast China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(1): 231-246
- [46] CHEN Z, GE S D, ZHANG Z H, et al. Soil moisture but not warming dominates nitrous oxide emissions during freeze - thaw cycles in a Qinghai-Tibetan Plateau Alpine meadow with discontinuous permafrost[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2021, 9: 676027
- [47] 陈哲, 徐巍, 门双, 等. 祁连山岛状冻土活动层土壤氮库对模拟冻融响应[J]. 草地学报, 2023, 31(1): 19-28
CHEN Z, XU W, MEN S, et al. Response of soil nitrogen pools to a simulated freeze-thaw test in the active layer of segregated permafrost on the Qilian Mountains [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(1): 19-28
- [48] 田路路, 隗英华, 刘艳, 等. 冻融作用对农田土壤可溶性氮组分的影响[J]. 土壤, 2017, 49(3): 512-518
TIAN L L, JUAN Y H, LIU Y, et al. Effects of freezing-thawing on dissolved nitrogen components of farmland soils [J]. *Soils*, 2017, 49(3): 512-518
- [49] 宋阳, 于晓菲, 邹元春, 等. 冻融作用对土壤碳、氮、磷循环的影响[J]. 土壤与作物, 2016, 5(2): 78-90
SONG Y, YU X F, ZOU Y C, et al. Progress of freeze-thaw effects on carbon, nitrogen and phosphorus cyclings in soils [J]. *Soils and Crops*, 2016, 5(2): 78-90
- [50] 陈哲, 金艳霞, 孙建, 等. 全球变暖对高寒冻土区温室气体通量影响研究进展[J]. 草地学报, 2023, 31(4): 929-942
CHEN Z, JIN Y X, SUN J, et al. A review on the impact of global warming to greenhouse gas flux in frozen ground region [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(4): 929-942
- [51] 李赞, 王国丽, 宋晓桐, 等. 容重对土壤水分状况及氧化亚氮排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(4): 1126-1134
LI Y, WANG G L, SONG X T, et al. Effects of soil bulk-density on soil moisture and nitrous oxide emissions [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025, 44(4): 1126-1134
- [52] ŠIMEK M, COOPER J E. The influence of soil pH on denitrification: progress towards the understanding of this interaction over the last 50 years [J]. *European Journal of Soil Science*, 2002, 53(3): 345-354
- [53] 王泽岳, 王文颖, 熊友才, 等. 祁连山不同海拔梯度下模拟增温对土壤碳氮组分影响研究[J]. 草地学报, 2025, 33(10): 3318-3329
WANG Z Y, WANG W Y, XIONG Y C, et al. Effects of simulated warming on soil carbon and nitrogen components under different altitude gradients in Qilian [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(10): 3318-3329
- [54] COSENTINO V R N, FIGUEIRO AUREGGUI S A, TABOADA M A. Hierarchy of factors driving N_2O emissions in non-tilled soils under different crops [J]. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64(5): 550-557
- [55] 刘彦婷, 尹俊慧, 宋贺, 等. 磷添加对橡胶林土壤 N_2O 、 CO_2 排放及净氮转化速率的影响[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(2): 495-503
LIU Y T, YIN J H, SONG H, et al. Effects of phosphorus addition on N_2O , CO_2 emissions and net nitrogen transformation rates in rubber forest soil [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis (Natural Sciences Edition)*, 2022, 44(2): 495-503
- [56] ZHENG M H, ZHANG T, LIU L, et al. Effects of nitrogen and phosphorus additions on nitrous oxide emission in a nitrogen-rich and two nitrogen-limited tropical forests [J]. *Biogeosciences*, 2016, 13(11): 3503-3517
- [57] LUO X Z, ZHANG L L, LIN Y B, et al. Nitrogen availability mediates soil organic carbon cycling in response to phosphorus supply: A global Meta-analysis [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2023, 185: 109158
- [58] 段俊光, 房凯, 褚建民, 等. 退化程度对典型草原物种多样性和土壤养分关系的影响[J]. 草地学报, 2025, 33(9): 2890-2899
DUAN J G, FANG K, CHU J M, et al. Effects of degradation stages on the relationship between species diversity and soil nutrients in typical steppe [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(9): 2890-2899

(责任编辑 闵芝智)