

氮磷添加对昆仑山北坡高山草地N₂O排放的影响

曹登超^{1,2,3,4} 高霄鹏^{1,2,3*} 李磊^{1,2,3} 桂东伟^{1,2,3} 曾凡江^{1,2,3} 匡文浓^{1,2,3,4}
尹明远^{1,2,3,4} 李言言^{1,2,3,4} 艾力·甫拉提⁵

¹中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011; ²新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 新疆策勒 848300; ³中国科学院干旱区生物地理与生物资源重点实验室, 乌鲁木齐 830011; ⁴中国科学院大学, 北京 100049; ⁵新疆策勒县草原工作站, 新疆策勒 848300

摘要 氮(N)、磷(P)等养分添加是提高草地生态系统生产力的重要策略, 但其对土壤氧化亚氮(N₂O)排放的影响尚不明确。该研究以新疆昆仑山北坡高山草地为研究对象, 设置氮添加、磷添加、氮磷交互以及不施肥(CK) 4个处理, 采用静态箱-气象色谱法连续监测2017年生长季草地的N₂O排放, 研究不同氮、磷添加处理下的N₂O排放特征, 并利用Pearson相关分析对影响N₂O排放的主要环境因子进行定性识别及定量解析。结果表明: 氮添加处理与氮磷交互处理在施肥后约3周引起显著的N₂O排放峰, 分别为42.3和15.4 g N·hm⁻²·d⁻¹。与其他处理相比, 氮添加处理生长季N₂O排放通量显著增加了1.8–3.2倍, 而磷添加以及氮磷交互处理与CK之间没有显著差异。Pearson相关分析结果表明: N₂O排放与微生物生物量碳呈负相关关系, 与溶解性有机碳含量、pH值呈正相关关系, 而与其他环境因子关系不显著。以上结果表明, 与单施氮肥相比, 在该地区草场采用氮磷混施可显著减少N₂O的排放。

关键词 高山草地; 氮磷添加; 氧化亚氮; 昆仑山; 通量特征

曹登超, 高霄鹏, 李磊, 桂东伟, 曾凡江, 匡文浓, 尹明远, 李言言, 艾力·甫拉提 (2019). 氮磷添加对昆仑山北坡高山草地N₂O排放的影响. 植物生态学报, 43, 165–173. DOI: 10.17521/cjpe.2018.0267

Effects of nitrogen and phosphorus additions on nitrous oxide emissions from alpine grassland in the northern slope of Kunlun Mountains, China

CAO Deng-Chao^{1,2,3,4}, GAO Xiao-Peng^{1,2,3*}, LI Lei^{1,2,3}, GUI Dong-Wei^{1,2,3}, ZENG Fan-Jiang^{1,2,3}, KUANG Wen-Nong^{1,2,3,4}, YIN Ming-Yuan^{1,2,3,4}, LI Yan-Yan^{1,2,3,4}, and Aili PULATI⁵

¹Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Ürümqi 830011, China; ²Cele National Station of Observation and Research for Desert-Grassland Ecosystems in Xinjiang, Cele, Xinjiang 848300, China; ³Key Laboratory of Biogeography and Bio-resource in Arid Zone, Chinese Academy of Sciences, Ürümqi 830011, China; ⁴University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ⁵Cele Grassland Management Station in Xinjiang, Cele, Xinjiang 848300, China

Abstract

Aims Nutrient additions such as nitrogen and phosphorus are important strategies to improve the productivity of the grassland ecosystem. However, their effect on soil nitrous oxide (N₂O) emissions remains unclear.

Methods A field study was conducted in an alpine grassland located in the north slope of Kunlun Mountains in Southern Xinjiang. Four treatments included nitrogen addition alone (N), phosphorus addition alone (P), mixture of nitrogen and phosphorus additions (N + P) and an unfertilized control (CK). Gas samples were collected and analyzed using the static chamber chromatography methodology during the 2017 growing season. Treatment effects on the characteristics of N₂O emissions from grassland soil were thoroughly investigated. Pearson correlation analysis was used to identify and quantify the influence of environmental variables on soil N₂O emissions.

Important findings The results showed that N and (N + P) treatments induced N₂O flux peaks after three weeks of fertilizer addition, with the maximum daily N₂O flux rates of 42.3 and 15.4 g N·hm⁻²·d⁻¹, respectively. The N treatment significantly increased growing season cumulative N₂O emissions by 1.8 to 3.2 times compared to P treatment, (N + P) treatment and CK, and there were no significant differences between the three treatments. Pearson correlation analysis showed that daily N₂O flux rate was correlated negatively with soil microbial biomass carbon, and positively with soil pH and dissolved organic carbon. There was no significant correlation

收稿日期Received: 2018-10-30 接受日期Accepted: 2019-02-01

基金项目: 国家自然科学基金(31570002和31870499). Supported by the National Natural Science Foundation of China (31570002 and 31870499).

* 通信作者Corresponding author (Xiaopeng.Gao@umanitoba.ca)

between daily N_2O flux rate and other environmental variables. These results suggest that simultaneous addition of nitrogen and phosphorus nutrients can significantly reduce soil N_2O emission compared to N treatment for the alpine grassland in this region.

Key words alpine grassland; nitrogen and phosphorus addition; N_2O ; Kunlun Mountains; flux characteristic

Cao DC, Gao XP, Li L, Gui DW, Zeng FJ, Kuang WN, Yin MY, Li YY, Pulati A (2019). Effects of nitrogen and phosphorus additions on nitrous oxide emissions from alpine grassland in the northern slope of Kunlun Mountains, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 43, 165–173. DOI: 10.17521/cjpe.2018.0267

氧化亚氮(N_2O)是最重要的一种温室气体,在大气中留存时间约为120年,其全球增温潜势在100年尺度上分别为甲烷(CH_4)和二氧化碳(CO_2)的10倍和298倍,同时大气 N_2O 浓度的增加也是引起平流层臭氧(O_3)消耗的重要因素(Ravishankara & Portmann, 2009)。研究表明大气 N_2O 浓度已从工业革命前的 $270 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到目前的 $324 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,而其中近31%与土壤氮肥的施用有关(IPCC, 2007)。全球草地生态系统占陆地面积的25%,对温室气体排放起着至关重要的作用。在草地管理过程中,添加氮肥或磷肥以提高草地生产力已成为一种常规的管理方式(Bouwman *et al.*, 2002),但其对温室气体尤其是 N_2O 排放的影响目前尚不清楚。

氮(N)、磷(P)添加对不同生态系统 N_2O 排放的影响是目前研究的热点问题之一。Wang等(2014b)在我国南方次生热带雨林中的研究发现, N添加在湿润和干旱季节均显著增加了土壤 N_2O 的排放;而P添加仅在湿润季增加了 N_2O 排放。黄树辉等(2005)在稻田研究中发现,施用氮肥和磷肥对 N_2O 排放均有促进作用。刘运通等(2011)发现添加磷肥有助于减少玉米(*Zea mays*)农田 N_2O 排放并提高产量。王广帅(2013)在青藏高原高寒草原两年的实验发现, N、P添加显著增加了 N_2O 排放,具体表现为N和P添加>P添加>N添加>对照。Zhang等(2014)在内蒙古温带草原通过3年的野外实验发现,不同施肥梯度下的N、P、钾(K)处理都显著提高了土壤 N_2O 排放量。而Wang等(2016)通过对青藏高原土壤进行室内培养试验发现P添加对土壤 N_2O 的排放没有显著影响。这些研究结果表明不同生态系统中土壤 N_2O 排放的动态变化及其对养分添加的响应并不一致。土壤中 N_2O 的产生主要来自于微生物参与的硝化和反硝化过程,而这两个过程受很多因素影响,包括土壤水分、温度、pH值、无机N和有机碳(C)含量等(Granli & Bockman, 1994)。草地土壤的N、P添加,一方面会直接影响土壤的养分含量,另一方面也可能通过

影响植物生物量而对土壤性质产生间接影响。这些土壤性状的改变会进一步对土壤 N_2O 的排放产生重要影响。

南疆昆仑山北坡的天然草地是我国主要的牧区,是维持当地畜牧业发展和维持区域生态平衡的基础,制定合理的草地管理措施以实现畜牧业发展和环境保护双赢是当前亟需解决的区域问题之一。合理的N、P添加是提高草场生产力的重要手段,但其对草地生态系统 N_2O 排放的影响还缺乏研究。基于此,本研究以昆仑山高山草地为研究对象,采用静态箱-气象色谱法连续监测不同N、P添加处理下生长季草地 N_2O 排放的动态变化,并进一步探讨 N_2O 排放与包括土壤和气候因子等环境因子之间的关系,为正确评估新疆高山草地 N_2O 排放以及制定合理的管理措施提供理论基础和科学依据。

1 研究区域和研究方法

1.1 研究区域概况

本试验于2017年4–11月进行,试验草场位于新疆南部策勒县昆仑山北坡中段国家级草原固定观测点(81.11°E , 36.13°N),海拔3 186 m,属于温性草原。2017年生长季(4–11月)的平均气温为 11.0°C ,降水量为511 mm,主要集中在6–8月。试验草场为2009年所设置的封牧草场,植被覆盖率为60%–80%,优势物种为昆仑针茅(*Stipa roborowskyi*)和高山绢蒿(*Seriphidium rhodanthum*),主要伴生种为野韭(*Allium ramosum*)、黄耆(*Astragalus membranaceus*)和羊草(*Leymus chinensis*)。土壤为沙壤土,0–20 cm表层土壤的有机质含量为 $10.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全N含量 $0.57 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全P含量 $0.67 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全K含量 $18.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效P含量 $2.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效K含量 $121 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, pH值8.0,溶解性有机碳(DOC)含量 $0.23 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,容重 $1.23 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,硝态氮($\text{NO}_3^- \text{-N}$)含量 $22.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,铵态氮($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)含量 $9.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计, 设4个施肥处理, 包括: 不施肥对照(CK)、单施氮肥(16 g N·m⁻²)(N)、单施磷肥(3 g P·m⁻²)(P)、氮磷肥混施(16 g N·m⁻² + 3 g P·m⁻²)(N + P)。其中氮肥为常规尿素, 磷肥为磷酸二氢钾(KH₂OP₄)。N、P添加的形态及施肥量设定主要是基于当地牧民的草地管理措施。每个处理重复4次, 共计16个小区, 每小区面积为2 m × 3 m, 小区间设置1 m保护行。施肥时间为2017年4月22号, 将肥料与少量过筛(2 mm)土壤充分混合后均匀撒施至各小区。

1.3 气体、土壤、生物量及环境因子的测定

1.3.1 气体样品

N₂O气体利用静态暗箱法采集, 采样箱由箱体和箱盖两部分组成, 箱体为不透明的中空PVC圆柱管, 内径为18 cm, 高12 cm。箱盖上分别开有小孔连接气压缓冲管与三通阀, 以维持气压平衡和气体采集。箱盖周边与箱体连接部位利用硅胶垫保证箱体密封性。于2017年4月末将采样箱布置于每个小区中央位置, 每个小区布置一个采样箱。在生长季后期, 采样箱内部分植株高度会超过采样箱高度, 采样时将高于采样箱的植株轻压至采样箱内再用箱盖密封进行气体采集。采样前先检查采样箱底部的密闭性并将采样所需的采样袋置于采样箱旁边, 并清理硅胶垫上的灰尘。采样时将箱盖扣在箱体上, 并用皮筋加固以隔绝箱内外气体交换。类似采样箱设计及采样方法经常应用于草地生态系统温室气体相关研究中(Tenuta *et al.*, 2010)。

施肥处理后一个月以内采样频率为每周一次, 之后为每两周一次, 降水后适当增加采样次数。每次采样时间为北京时间11:30–14:00。采样时用30 mL的注射器通过箱盖的三通阀, 分别于封闭后第0、15、30、45 min采集气体。每次采集前来回抽动3次注射器以混匀箱内气体, 然后将抽取气体转存于50 mL的铝箔真空气袋中保存, 带回实验室后采用气相色谱仪(Shimadzu GC-2014C, Shimadzu Scientific, Kyoto, Japan)测定气体样品中的N₂O浓度。

1.3.2 土壤样品

整个观测期每月采集一次0–20 cm土壤样品, 每个小区在采样箱周围取3钻, 土样混匀后装入自封袋, 置于0 °C保温箱中运回实验室, 新鲜样品过2

mm筛后分别分析无机N含量、速效P含量、pH值、DOC含量、微生物生物量碳(MBC)和微生物生物量氮(MBN)含量。具体方法为: 使用CaCl₂ (质量体积比1:10)溶液浸提, 过滤后用连续流动分析仪(Autoanalyzer 3 SEAL, Bran and Luebbe, Norderstedt, Germany)测定土壤中的NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量; 使用NaHCO₃浸提后采用钼锑抗比色法测定土壤中速效P含量; 采用pH计测定土壤溶液pH值(水土体积质量比为1:5); 采用总有机碳分析仪器(Aurora1030, OI Analytical, College Station, Texas, USA)测定土壤DOC含量, 采用氯仿熏蒸法测定土壤MBC和MBN含量(Vance *et al.*, 1987)。

1.3.3 植物生物量样品的采集

于2016年生长季末期, 在各小区内选择0.5 m × 0.5 m的样方, 将样方内所有植株齐地面剪下, 装入信封后带回实验室, 于65 °C烘干至恒质量后称质量。由于该试验为长期试验但小区面积有限, 多次地上生物量收获势必会对试验小区造成较大的破坏从而影响试验结果的准确性和可信度, 因此在2017年试验中未选取样方对地上生物量进行测量。

1.3.4 气象和土壤温度

试验草场安装有气象站以获取降水以及大气温度等气象数据, 同时在试验草场土壤20 cm处安装土壤温湿度传感器(5TM-Sensors, Decagon Devices, Pullman, USA)并连接数据采集器(Em50G, Decagon Devices, Pullman, USA), 以连续监测试验期间的土壤温湿度的动态变化。同时在每次采集气样时, 用土壤温湿度速测仪(WET-2, Delta-T Devices, Cambridge, UK)测定每个静态箱的对应5 cm的温度和湿度以分析其与N₂O排放速率之间的关系。

土壤孔隙含水率(WFPS)计算公式如下:

$$WFPS(\%) = \frac{VM}{1 - \frac{BD}{PD}} \times 100 \quad (1)$$

其中VM为土壤体积含水量(%), BD为土壤容重(g·cm⁻³), PD为土壤密度(2.65 g·cm⁻³)。

1.4 数据处理分析

采用R程序中的HMR程序包通过对采样当天不同时段N₂O浓度进行线性或非线性模拟计算N₂O排放速率(Pedersen, 2011; Kuang *et al.*, 2018)。利用线性内插法计算未采集气体天数的排放速率后累加

得到生长季 N_2O 累积排放通量。采用双因素方差分析法分析N、P添加对生长季 N_2O 累积排放量和生物量的影响,用多重比较Tukey HSD ($\alpha = 0.05$)的方法比较不同处理间的 N_2O 排放速率、生长季 N_2O 累积排放量、生物量及相关土壤指标之间的差异。采用Pearson相关分析对 N_2O 日排放速率与环境因子的线性关系进行分析。利用R软件进行数据整理和统计分析,采用Origin 2018软件进行绘图。

2 结果和分析

2.1 观测期内降水、土壤WFPS、日平均气温和土壤温度的季节性变化

如图1所示,观测期内研究地点的降水量表现出明显的季节动态变化,观测期间的总降水量为511 mm。土壤WFPS与降水密切相关,在降水集中的6–9月,土壤WFPS相对较高,基本分布于30%–40%之间。日平均气温和土壤温度趋势相同,均表现出明显的季节动态规律。夏季(6–9月)最高,春秋次之,10月末之后土壤温度降至5℃以下。

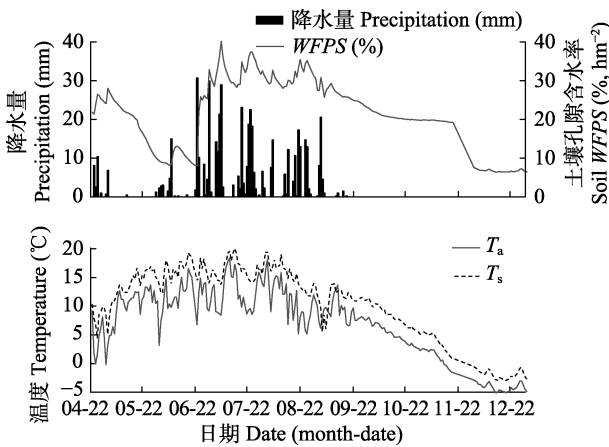


图1 试验期间降水量、20 cm深度土壤孔隙含水率(WFPS)、日平均气温(T_a)和20 cm深度土壤温度(T_s)的变化。
Fig. 1 Daily precipitation, soil water-filled pore space (WFPS) at 20 cm depth, daily air temperature (T_a) and soil temperature (T_s) at 20 cm depth during the experimental period.

表1 不同氮磷添加处理下昆仑山北坡高山草地土壤 N_2O 累积排放量(平均值±标准误差)

Table 1 Cumulative N_2O emissions of grassland soil under different nitrogen and phosphorus addition treatments in alpine grassland in the northern slope of Kunlun Mountains, China (mean ± SE)

处理 Treatment	N_2O 排放通量 N_2O emission ($\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$)	p
对照 CK	0.50 ± 0.05^B	
氮添加 nitrogen addition	1.45 ± 0.06^A	0.002
磷添加 phosphorus addition	0.35 ± 0.02^B	0.025
氮磷混施 nitrogen + phosphorus addition	0.52 ± 0.05^B	0.226

不同大写字母表示处理间差异极显著($p < 0.001$)。

Different uppercase letters indicate significant difference between treatments ($p < 0.001$).

2.2 不同处理下草地土壤 N_2O 排放速率和累计排放量

如图2所示,在氮、磷添加处理后的3周内,N和(N + P)处理的 N_2O 排放均表现明显的排放峰,峰值分别为 42.4 和 $15.4 \text{ g N}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,而P处理与CK均未产生明显的排放峰。在全部16次取样中的4次(分别为5月7日、5月14日、6月24日和11月28日),不同处理间存在显著差异,一般表现为N处理高于其他处理。自6月24日之后,各处理下的 N_2O 排放均低于 $10 \text{ g N}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,且不同处理间基本没有显著差异。观测期间N、P、(N + P)和CK处理的日平均排放速率分别为 7.2 、 0.9 、 4.2 和 $2.9 \text{ g N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

从表1可以看出,N处理下草地土壤生长季 N_2O 累积排放量为 $1.45 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$,高于其他处理1.8–3.2倍,差异显著($p < 0.001$),而P以及(N + P)处理与CK

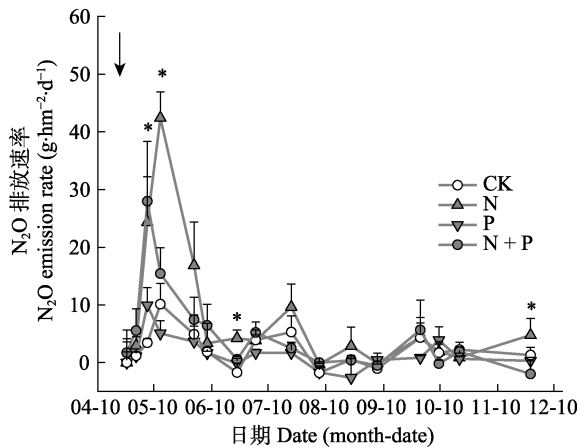


图2 不同氮磷添加处理下草地土壤 N_2O 排放速率的动态变化(平均值±标准误差)。箭头表示氮磷添加日期。*表示处理间存在显著差异($p < 0.05$)。CK, 对照; N, 氮添加; N + P, 氮磷混施; P, 磷添加。

Fig. 2 Dynamic variation of daily N_2O flux rate from grassland soil under different nitrogen and phosphorus addition treatments (mean ± SE). Arrow indicates date of nitrogen and phosphorus addition treatments. * indicates significant differences between treatments ($p < 0.05$). CK, control; N, nitrogen addition; N + P, nitrogen and phosphorus addition; P, phosphorus addition.

处理相比没有显著差异。双因素方差分析结果显示氮添加显著增加了生长季累积 N_2O 排放量, 而磷添加均显著降低了生长季 N_2O 累积排放量, 但二者之间交互作用不显著。

2.3 不同处理下土壤理化性状的动态变化

2.3.1 DOC和pH

不同处理下土壤DOC含量具有相同的季节性变化趋势, 均表现为5月份首次取样时最高($0.23 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$), 之后逐渐降低且趋于平稳, 不同处理间在各取样期均无显著差异(图3)。土壤初始pH值为8.2, 之后降低为7.8且趋于平稳。土壤DOC含量和pH值存在显著($p < 0.05$)的季节差异, 且生长季中后期不同处理间存在显著差异($p < 0.05$), 表现为P和(N + P)处理显著低于CK和N处理。

2.3.2 不同处理下土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 和速效磷的动态变化

如图4所示, N和(N + P)处理0–20 cm土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在5月22日和8月7日显著($p < 0.05$)高于P和CK处理。不同处理下的土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均为8月份最高, N、P、(N + P)和CK处理下分别为21.1、17.7、24.3、12.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。整个生长季N、P、(N + P)和CK的土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均含量分别为14.2、12.2、16.7、

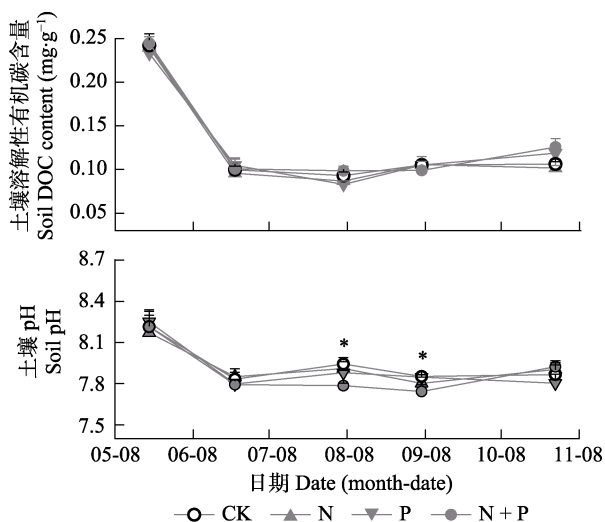


图3 不同氮磷添加处理下昆仑山北坡高山草地土壤溶解性有机碳含量和pH的动态变化(平均值±标准误差)。*表示处理间存在显著差异($p < 0.05$)。CK, 对照; N, 氮添加; N + P, 氮磷混施; P, 磷添加。

Fig. 3 Dynamic variation of soil dissolved organic carbon (DOC) content and pH under different nitrogen and phosphorus addition treatments in alpine grassland in the northern slope of Kunlun Mountains (mean \pm SE). * indicates significant difference between treatments ($p < 0.05$). CK, control; N, nitrogen addition; N + P, nitrogen and phosphorus addition; P, phosphorus addition.

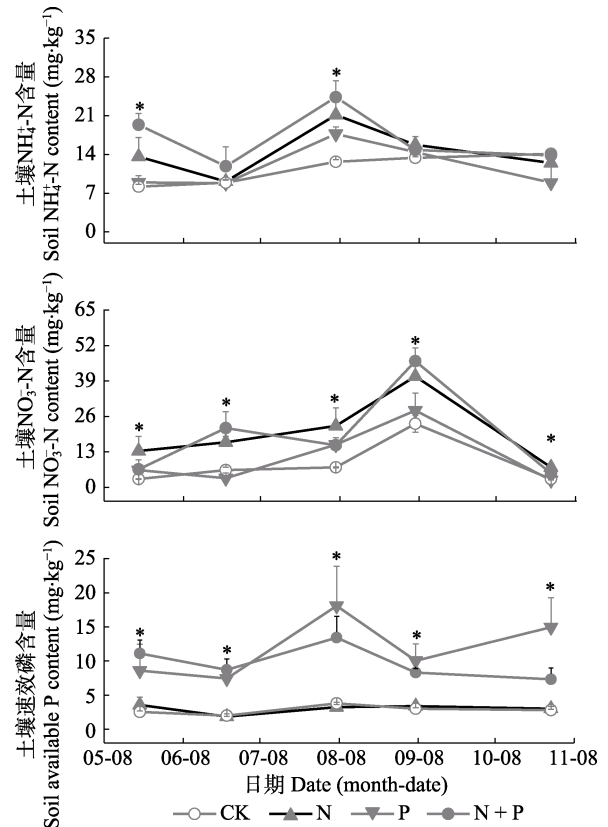


图4 不同氮磷添加处理下昆仑山北坡高山草地土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 和速效P含量的动态变化(平均值±标准误差)。*表示处理间存在显著差异($p < 0.05$)。CK, 对照; N, 氮添加; N + P, 氮磷混施; P, 磷添加。

Fig. 4 Dynamic variation of soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^+\text{-N}$ and available P content under different nitrogen and phosphorus addition treatments in alpine grassland in the northern slope of Kunlun Mountains (mean \pm SE). * indicates significant difference between treatments ($p < 0.05$). CK, control; N, nitrogen addition; N + P, nitrogen and phosphorus addition; P, phosphorus addition.

$11.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

N处理0–20 cm土壤 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量在生长季不同时期均显著($p < 0.05$)高于P和CK处理, (N + P)处理在6月22日和10月30日显著($p < 0.05$)高于P和CK处理。不同处理下的土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均为9月份最高, N、P、(N + P)和CK处理下分别为40.7、28.2、46.2、23.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。整个生长季N、P、(N + P)和CK处理下的平均土壤 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量分别为20.1、11.2、19.0、8.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在生长季末期(10月30日), N、P、(N + P)和CK处理下的土壤 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量分别为7.4、2.6、4.8、3.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中N处理显著高于其他处理且(N + P)显著高于P和CK处理。

P和(N + P)处理下土壤速效磷含量在生长季不同时期均显著($p < 0.05$)高于N处理和CK。整个生长

季N、P、(N + P)和CK处理下的平均土壤速效磷含量分别为3.0、11.8、9.7、2.8 mg·kg⁻¹。在生长季末期, N、P、(N + P)和CK处理下的土壤速效磷含量分别为3.0、15.0、7.3、2.8 mg·kg⁻¹, 其中磷处理显著高于其他3个处理, 而其他三者之间没有显著差异。

2.3.3 不同处理下MBN, MBC的动态变化

如图5所示, 土壤MBN和MBC含量均表现出先增加后降低的趋势。各处理下的MBN和MBC含量均表现为6月份最高。不同处理间MBN和MBC含量在各个生育期均无显著差异。

2.4 不同处理下群落地上生物量的变化

如表2所示, 2016年生长季末期不同处理间群落地上生物量没有显著差异, 氮、磷添加对地上生物量均没有显著影响且不存在交互作用。

2.5 N₂O排放与环境因子的关系

对全部处理下的N₂O排放与各土壤因子及气温

做Pearson相关分析, 结果如表3所示, N₂O排放速率与土壤pH值和DOC含量呈显著正相关关系, 相关系数分别为0.53和0.67。与之相反, N₂O排放速率与土壤MBC含量呈显著负相关关系。N₂O排放与土壤NO₃⁻含量、NH₄⁺含量、速效磷含量、MBN含量、WFPS、气温和土壤温度等环境因子均无显著相关性。

3 讨论

与其他处理相比, 单施氮肥显著增加了昆仑山北坡高山草地土壤N₂O排放通量, 这与以往研究结果类似(杨涵越等, 2016; Yan *et al.*, 2018), 主要是因为氮肥添加增加了硝化和反硝化过程所需的底物进而增加了N₂O产生。这一推论可以从N处理下土壤NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量在整个生长季均高于CK得到印证。而(N + P)与P处理下草地生长季N₂O排放通量低于N处理, 而与CK没有显著差异, 表明与单施氮

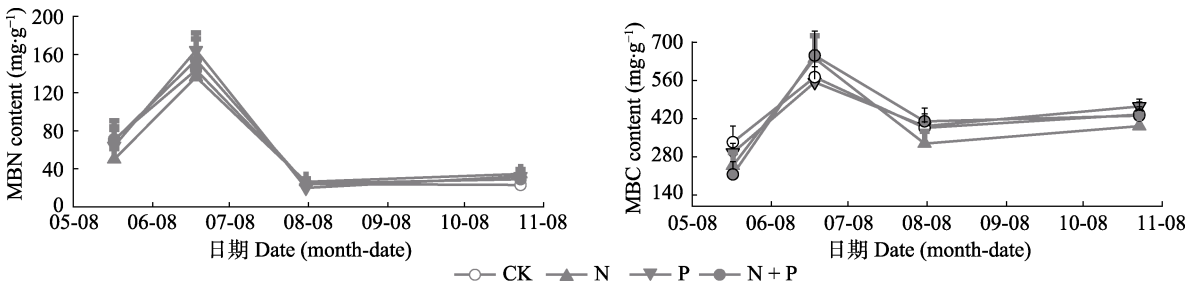


图5 不同氮磷添加处理下昆仑山北坡高山草地土壤微生物生物量氮(MBN)和微生物生物量碳(MBC)含量的动态变化(平均值±标准误差)。CK, 对照; N, 氮添加; N+P, 氮磷混施; P, 磷添加。

Fig. 5 Dynamic variation of soil microbial biomass nitrogen (MBN) and carbon (MBC) content under different nitrogen and phosphorus addition treatments in alpine grassland in the northern slope of Kunlun Mountains, China(mean ± SE). CK, control; N, nitrogen addition; N + P, nitrogen and phosphorus addition; P, phosphorus addition.

表2 不同氮磷添加处理下昆仑山北坡高山草地的植物地上部生物量(平均值±标准误差)

Table 2 Plant above-ground biomass under different nitrogen and phosphorus addition treatments in alpine grassland in the northern slope of Kunlun Mountains (mean ± SE)

处理 Treatment	地上部生物量 Above-ground biomass (g·m ⁻²)	p
对照 CK	192.78 ± 27.03 ^A	
氮添加 nitrogen addition	192.13 ± 34.07 ^A	0.96
磷添加 phosphorus addition	176.02 ± 30.45 ^A	0.62
氮磷交互 nitrogen + phosphorus addition	178.57 ± 28.38 ^A	0.96

相同大写字母表示处理间不存在显著差异($p > 0.05$)。

The same uppercase letters indicated no significant difference among treatment ($p > 0.05$).

表3 昆仑山北坡高山草地N₂O排放与环境变量的相关性和决定系数

Table 3 Correlation coefficients of daily N₂O flux rate with environmental variables in alpine grassland in the northern slope of Kunlun Mountains

硝态氮 NO ₃ -N	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	速效磷 AP	pH	可溶性有机碳 DOC	微生物生物量碳 MBC	微生物生物量氮 MBN	土壤孔隙含水率 WFPS	气温 Air temperature	土壤温度 Soil temperature
-0.17	-0.08	-0.11	0.53**	0.67**	-0.30*	-0.17	-0.16	-0.19	0.05

*, $p < 0.05$; **, $p < 0.001$. AP, available phosphorus; DOC, dissolved organic carbon; MBC, microbial biomass carbon; MBN, microbial biomass nitrogen; WFPS, water-filled pore space.

肥相比, 磷肥的添加可以显著降低 N_2O 排放。以往一些研究中发现磷添加增加了 N_2O 排放, 认为这主要是因为其一方面促进土壤氮的矿化, 增加了土壤硝化和反硝化作用底物; 另一方面磷添加提高了包括硝化和反硝化细菌等土壤微生物的活性, 促进了硝化和反硝化作用(Mori *et al.*, 2010, 2013, 2017)。与此相反, 本研究中磷添加并未增加 N_2O 排放, 一方面是因为土壤的无机氮(NH_4^+ 和 NO_3^-)含量较低, 限制了硝化和反硝化过程的底物; 另一方面可能是因为试验草场的土壤本底磷含量较低, 速效磷含量仅为 $2.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 磷肥的添加可能会促进植物对土壤氮的吸收, 从而减少了 N_2O 排放。Wang等(2018)在青藏高原高山草甸的研究发现, 磷添加可以显著增加群落尺度上的植物叶片和根系氮浓度。生物量是构成生态系统生产力的重要组分, 通常可以作为衡量生产力的间接指标(Goulden *et al.*, 2011), 以往研究报道磷添加增加了群落地上生物量(Wang *et al.*, 2014a, 2018)或者对群落地上净初级生产力没有显著影响(Zhao *et al.*, 2019)。本研究中2016年相同试验处理下, 群落地上生物量数据显示不同处理间地上生物量没有显著差异, 可能是由于施肥时间为4月中旬, 而该地区2016年4月和5月的降水分别为13.2和20.6 mm, 因此未能体现出施肥对地上生物量的影响。2017年降水较2016年充沛, 生长季末期P处理下土壤速效磷含量显著高于其他3个处理, 而(N + P)与N处理与CK没有显著差异; 且N处理下的土壤 NO_3^- -N含量显著高于(N + P)处理, 表明(N + P)处理很可能同时促进了植物对氮和磷的吸收。Mori等(2014)在热带种植园的研究中发现施磷显著降低了土壤 N_2O 排放, 认为土壤磷限制和施磷后植物生长对氮的吸收是磷添加降低 N_2O 排放的重要原因, 而本研究中由于未测定植物N浓度并不能对这一假设进行验证。Baral等(2013)认为添加磷肥会增加土壤中微生物氮的固定, 减少无机氮底物, 从而减少 N_2O 的排放。但本研究对微生物生物量碳氮分析的结果表明, 各时期不同处理间微生物生物量碳、氮含量没有显著差异, 氮磷添加并没有显著提高土壤微生物的活动, 表明氮磷添加引起的微生物活性改变可能不是导致不同处理间排放差异的主要原因。总而言之, 本研究中磷添加处理下土壤 N_2O 排放的限制作用是否通过施磷后植物生产力或氮吸收的改变仍需要进一步的研究。

土壤中的 N_2O 主要产生于由微生物主导的硝化和反硝化过程, 且该过程受包括土壤无机氮含量、温湿度, 通气性以及pH值等诸多因子的影响(Mehnaz & Dijkstra, 2016)。本研究对 N_2O 排放速率与相关环境因子进行Pearson相关分析, 发现 N_2O 排放速率与土壤pH值和DOC含量呈正相关关系, 与MBC含量呈负相关关系。这与添加氮肥后各处理 N_2O 排放速率均在3周内达到峰值, 土壤DOC含量和pH值也在施肥后达到最大值并在之后减小并趋于平稳有关。需要指出的是, N_2O 排放与各环境因子的相关分析需区别各个因子的季节性变化和不同施肥处理的两种影响。比如氮磷添加处理对土壤MBC、DOC含量和pH值的影响不大且与其对 N_2O 排放影响的模式并不一致, 表明 N_2O 排放与各土壤因子的关系主要是与季节性变化有关, 而与氮磷添加处理关系不大。与之相反, 尽管Pearson相关分析表明 N_2O 排放与土壤无机氮含量无显著相关关系, 但能够看到氮添加处理下的无机氮含量显著增加, 这与氮添加处理增加 N_2O 排放是一致的。因此, N_2O 排放与土壤无机氮含量的相关性不显著可能与该研究中土壤取样次数相对于 N_2O 测定次数过少有关。

不同草地生态系统调控 N_2O 产生和排放的因子各异。Yan等(2018)分析表明在青藏高寒草原中, N_2O 排放与气温、土壤温度、含水量、总氮含量、有机碳以及铵态氮含量显著相关。而魏达等(2011)在青藏高原研究得出, 在季节尺度上, N_2O 排放与土壤温度没有线性关系, 而随土壤含水量增加呈线性增加。王冠钦等(2018)在青藏高原通过增温实验发现 N_2O 排放与增温引起的土壤水分含量变化正相关。Zhang等(2014)在内蒙古温带草原的研究发现, N_2O 排放与土壤温度、有机碳含量、总氮含量以及年净初级生产力之间呈显著的正相关关系。一般来讲, 铵态氮和硝态氮是产生 N_2O 的硝化和反硝化过程的底物, 通常与 N_2O 排放具有良好的相关关系(Kuang *et al.*, 2018)。土壤温湿度也是影响土壤 N_2O 排放的比较重要的因子, 因为它们对土壤微生物的活性起着重要的调控作用(Li *et al.*, 1992)。本研究中 N_2O 排放速率与MBC呈负相关关系, 与以往研究中微生物固氮能力增加会降低 N_2O 排放的观点一致(Mori *et al.*, 2014)。不同处理间MBC含量没有显著差异, 但MBC含量和 N_2O 排放速率均存在显著的季节变化, 这表明不同时期微生物量的差异可能在

N₂O排放的季节性规律中发挥着重要作用。这些研究结果表明关于养分添加对草地土壤的N₂O排放的相关研究需要考虑不同季节气象和土壤因子的动态变化,以后需要开展连续多年、多点的试验研究。

本研究中昆仑山北坡除施氮处理外草地土壤N₂O排放速率均低于10 g N·hm⁻²·d⁻¹,且与降水和气温等气象因子相比没有明显的季节性波动,生长季土壤N₂O累计排放量平均为0.5 kg N·hm⁻²,明显低于以往研究中对内蒙古典型草原和青海高山草甸的报道(杨涵越等, 2016; Yan *et al.*, 2018)。一方面与该地区土壤有机碳和全氮含量低有关。土壤有机碳含量低限制微生物活性进而降低了土壤N₂O的产生(Ussiri & Lal, 2013),而较低的土壤氮含量由于不能为硝化和反硝化过程提供足够的底物也会降低N₂O排放。另一方面与该地区土壤含水量和土壤温度较低有关。如图1所示,即使在降水集中的6–8月,土壤孔隙含水量也低于40%,这远低于以往报道中N₂O产生的最适条件(50%–70% WFPS)(Linn & Doran, 1984; Granli & Bockman, 1994)。本研究中各处理还出现轻微的吸收N₂O的现象,这可能与该区域土壤含水量较低有关。杜睿等(2003)对羊草草原土壤进行研究时也发现,在土壤含水量较低时,土壤微生物代谢途径的改变会使得半干旱草原土壤由大气N₂O源阶段性地转变为汇。本研究N处理显著提高了N₂O排放而(N + P)处理与对照没有显著差异,说明昆仑山北坡高山草地植物生长可能同时存在氮限制和磷限制,在未来的草地管理中适当地添加氮肥和磷肥有提高该地区草地生产力,防止草地退化的同时不增加N₂O排放的潜力。

4 结论

单施氮肥显著增加了昆仑山北坡草地土壤的N₂O排放,而单施磷肥或氮磷混施与对照相比对N₂O排放没有显著影响。氮添加引起的N₂O排放主要与施肥后土壤无机氮含量的增加有关,同时土壤N₂O排放的季节性变化与土壤MBC含量、pH、DOC含量等因子的动态变化有关。磷添加对N₂O排放的限制作用主要与土壤无机N含量较低,限制了土壤硝化和反硝化过程所需底物有关,而磷添加对植物生产力以及氮吸收的影响仍需进一步地细致研究。该地区草地生产可能同时存在氮限制和磷限制,同时添加氮磷养分有提高该地区草地生产力且不会增

加草地土壤N₂O排放所带来的环境压力的潜力。这一发现为南疆草地畜牧业的发展和生态环境保护提供了重要科学依据,同时为制定合理的草地管理措施提供了理论基础。而深入探讨不同施氮(磷)水平对草地生产力及温室气体排放的影响能进一步加深对该地区草地氮循环的理解。

参考文献

- Baral BR, Kuypers TW, van Groenigen JW (2013). Liebig's law of the minimum applied to a greenhouse gas: Alleviation of P-limitation reduces soil N₂O emission. *Plant and Soil*, 374, 539–548.
- Bouwman AF, Boumans LJM, Batjes NH (2002). Modeling global annual N₂O and NO emissions from fertilized fields. *Global Biogeochemical Cycles*, 16, 1080. DOI: 10.1029/2001GB001812.
- Du R, Zhou YG, Wang GC, Lü DR, Wan XW (2003). The effect of soil water on grassland N₂O releasing process in typical temperate zones. *Nature Science Advance*, 13, 939–945. [杜睿, 周宇光, 王庚辰, 吕达仁, 万小伟 (2003). 土壤水分对温带典型草地N₂O排放过程的影响. 自然科学进展, 13, 939–945.]
- Goulden ML, McMillan AM, Winston GC, Rocha AV, Manies KL, Harden JW, Bond-Lamberty BP (2011). Patterns of NPP, GPP, respiration, and NEP during boreal forest succession. *Global Change Biology*, 17, 855–871.
- Granli T, Bockman OC (1994). Nitrous oxide from agriculture. *Norwegian Journal of Agricultural Sciences*, 12, 7–128.
- Huang SH, Jiang WW, Lü J, Cao JM (2005). Influence of nitrogen and phosphorus fertilizers on N₂O emissions in rice fields. *China Environmental Science*, 25, 540–543. [黄树辉, 蒋文伟, 吕军, 曹建明 (2005). 氮肥和磷肥对稻田N₂O排放的影响. 中国环境科学, 25, 540–543.]
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, New York, USA.
- Kuang WN, Gao XP, Gui DW, Tenuta M, Flaten DN, Yin MY, Zeng FJ (2018). Effects of fertilizer and irrigation management on nitrous oxide emission from cotton fields in an extremely arid region of northwestern China. *Field Crops Research*, 229, 17–26.
- Li C, Frolking S, Frolking TA (1992). A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97, 9759–9776.
- Linn DM, Doran JW (1984). Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Science Society of America Journal*, 48, 1267–1272.
- Liu YT, Li YE, Wan YF, Gao QZ, Qin XB, Chen DL (2011). Nitrous Oxide emissions from spring-maize field under the application of different nitrogen and phosphorus fertilizers.

- Journal of Agro-Environment Science*, 30, 1468–1475. [刘运通, 李玉娥, 万运帆, 高清竹, 秦晓波, 陈德立 (2011). 不同氮磷肥施用对春玉米农田 N₂O 排放的影响. 农业环境科学学报, 30, 1468–1475.]
- Mehnaz KR, Dijkstra FA (2016). Denitrification and associated N₂O emissions are limited by phosphorus availability in a grassland soil. *Geoderma*, 284, 34–41.
- Mori T, Ohta S, Ishizuka S, Konda R, Wicaksono A, Heriyanto J (2014). Phosphorus application reduces N₂O emissions from tropical leguminous plantation soil when phosphorus uptake is occurring. *Biology and Fertility of Soils*, 50, 45–51.
- Mori T, Ohta S, Ishizuka S, Konda R, Wicaksono A, Heriyanto J, Hardjono A (2010). Effects of phosphorus addition on N₂O and NO emissions from soils of an *Acacia mangium* plantation. *Soil Science and Plant Nutrition*, 56, 782–788.
- Mori T, Ohta S, Ishizuka S, Konda R, Wicaksono A, Heriyanto J, Hardjono A (2013). Effects of phosphorus addition with and without ammonium, nitrate, or glucose on N₂O and NO emissions from soil sampled under *Acacia mangium* plantation and incubated at 100% of the water-filled pore space. *Biology and Fertility of Soils*, 49, 13–21.
- Mori T, Wachrinrat C, Staporn D, Meunpong P, Suebsai W, Matsubara K, Boonsri K, Lumban W, Kuawong M, Phukdee T, Srifai J, Boonman K (2017). Effects of phosphorus addition on nitrogen cycle and fluxes of N₂O and CH₄ in tropical tree plantation soils in Thailand. *Agriculture and Natural Resources*, 51, 91–95.
- Pedersen AR (2011). HMR: Flux Estimation with Static Chamber Data. <http://CRAN.R-project.org/package=HMR>. Cited: 2012-04-10.
- Ravishankara AR, Portmann RW (2009). Nitrous oxide (N₂O): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st Century. *Science*, 326, 123–125.
- Tenuta M, Mkhabela M, Tremorin D, Coppi L, Phipps G, Flaten D, Ominski K (2010). Nitrous oxide and methane emission from a coarse-texture grassland soil receiving hog slurry. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 138, 35–43.
- Ussiri D, Lal R (2013). *Soil Emission of Nitrous Oxide and Its Mitigation*. Springer, Dordrecht, the Netherlands. 63–97.
- Vance ED, Brookes PC, Jenkinson DS (1987). An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology & Biochemistry*, 19, 703–707.
- Wang C, Zhu F, Zhao X, Dong K (2014a). The effects of N and P additions on microbial N transformations and biomass on saline-alkaline grassland of Loess Plateau of Northern China. *Geoderma*, 213, 419–425.
- Wang DX, Gao YH, Wang P, Zeng XY (2016). Responses of CO₂ and N₂O emissions to carbon and phosphorus additions in two contrasting alpine meadow soils on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Fresenius Environmental Bulletin*, 25, 4401–4408.
- Wang F, Shi G, Nicholas O, Yao B, Ji M, Wang W, Ma Z, Zhou H, Zhao X (2018). Ecosystem nitrogen retention is regulated by plant community trait interactions with nutrient status in an alpine meadow. *Journal of Ecology*, 106, 1570–1581.
- Wang FM, Li J, Wang XL, Zhang W, Zou B, Neher DA, Li Z (2014b). Nitrogen and phosphorus addition impact soil N₂O emission in a secondary tropical forest of South China. *Scientific Reports*, 4, 5615. DOI: 10.1038/srep05615.
- Wang GQ, Li F, Peng YF, Chen YL, Han TF, Yang GB, Liu L, Zhou GY, Yang YH (2018). Responses of soil N₂O emissions to experimental warming regulated by soil moisture in an alpine steppe. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 105–115. [王冠钦, 李飞, 彭云峰, 陈永亮, 韩天丰, 杨贵彪, 刘莉, 周国英, 杨元合 (2018). 土壤含水量调控高寒草原生态系统 N₂O 排放对增温的响应. 植物生态学报, 42, 105–115.]
- Wang GS (2013). *Effect of Nutrition Addition, Altered Precipitation and Temperature Regimes on Greenhouse Gas Emissions in an Alpine Grassland on the Tibetan Plateau*. Master degree dissertation, Northwest Institute of biology, Chinese Academy of Sciences, Xining. 20–21. [王广帅 (2013). 养分、水热调控对青藏高原高寒草地温室气体排放的影响. 硕士学位论文, 中国科学院西北高原生物所, 西宁. 20–21.]
- Wei D, Xu R, Wang YH, Yao TD (2011). CH₄, N₂O and CO₂ fluxes and correlation with environmental factors of alpine steppe grassland in Nam Co region of Tibetan Plateau. *Acta Agrestia Sinica*, 19, 412–419. [魏达, 旭日, 王迎红, 姚檀栋 (2011). 青藏高原纳木错高寒草原温室气体通量及与环境因子关系研究. 草地学报, 19, 412–419.]
- Yan YL, Ganjurjav H, Hu GZ, Liang Y, Li Y, He SC, Danjiu LB, Yang J, Gao QZ (2018). Nitrogen deposition induced significant increase of N₂O emissions in an dry alpine meadow on the central Qinghai-Tibetan Plateau. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 265, 45–53.
- Yang HY, Zhang T, Huang Y, Duan L (2016). Effect of stimulated N deposition on N₂O emission from a *Stipa krylovii* steppe in Inner Mongolia, China. *Environmental Science*, 37, 1900–1907. [杨涵越, 张婷, 黄永梅, 段雷 (2016). 模拟氮沉降对内蒙古克氏针茅草原 N₂O 排放的影响. 环境科学, 37, 1900–1907.]
- Zhang LH, Huo YW, Guo DF, Wang QB, Bao Y, Li LH (2014). Effects of multi-nutrient additions on GHG fluxes in a temperate grassland of Northern China. *Ecosystems*, 17, 657–672.
- Zhao Y, Yang B, Li M, Xiao R, Rao K, Wang J, Zhang T, Guo J (2019). Community composition, structure and productivity in response to nitrogen and phosphorus additions in a temperate meadow. *Science of the Total Environment*, 654, 863–871.



扫码加入读者圈
听语音, 看问答

责任编辑: 白 娥 责任编辑: 李 敏

DOI: 10.17521/cjpe.2018.0267