

青藏高原高寒草甸氧化亚氮排放特征及其与土壤理化性质耦合关系

朱辉¹, 王燕², 王云英³, 杜岩功³

(1. 青海省生态环境监测中心, 青海 西宁 810001; 2. 济宁市嘉祥县自然资源和规划局, 山东 济宁 272000; 3. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001)

摘要:在青海海北高寒草地生态系统国家野外科学观测研究站,以高寒矮嵩草草甸为研究对象。通过静态密闭箱—气相色谱法,监测生长季盛期高寒草甸 N₂O 排放特征,同时基于路径分析方法,解析土壤理化性质和地上生物量对高寒草地生态系统 N₂O 排放的影响作用。结果表明:生长季高寒草甸 N₂O 排放速率存在较大时间异质性特征,平均排放速率为(39.3±5.4) μg/(m²·h),各月之间均存在显著性差异;土壤理化性质与 N₂O 排放速率之间,可以建立较好的回归方程(R²=0.726);土壤有机质含量、pH 值对矮嵩草草甸 N₂O 排放速率的正向直接作用较强,而土壤湿度和容重与高寒草甸 N₂O 排放速率间存在负向直接作用关系。各因素通过影响土壤有机质和铵态氮,对土壤 N₂O 排放均具有较大的间接影响,土壤有机质通过影响高寒草地生物量、土壤硝态氮、铵态氮而间接影响草地生态系统 N₂O 排放速率的作用较强。

关键词:N₂O 排放速率;青藏高原;土壤理化性质;路径分析

中图分类号:S812 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2021)04-0036-06

DOI: 10.13817/j.cnki.cyycp.2021.04.005



工业革命之后,人类活动引起温室气体浓度不断增加,直接加剧了温室效应,2015—2019 年是自 100 多年前有气温记录以来最热的连续 5 年^[1-2],氧化亚氮(N₂O)是引起全球增温的重要温室气体之一^[3]。目前大气 N₂O 浓度约为 331.1 nL/L^[1],相比于工业革命前增加了 20%,为近 80 万年来的最高浓度。N₂O 在大气中存在时间较长(通常以百年尺度计算),且等摩尔浓度的辐射潜势是 CO₂ 的 310 倍,参与大气对流层和平流层很多光化学反应^[3],破坏大气臭氧层,大气

圈阻挡紫外线能力减弱,直接威胁人类健康^[2]。

陆地土壤是 N₂O 主要排放源,约占 N₂O 排放总量 70%,N₂O 主要通过土壤微生物介导的硝化和反硝化过程所产生^[4-5]。草地生态系统具有较强的碳氮吸收及释放功能,可以显著影响全球气候环境变化^[3,6]。高寒草甸是青藏高原的主体类型之一,约占草地总面积 46.7%^[7]。高寒草甸为大气温室气体 N₂O 的重要排放源^[8],多年平均排放速率约为 39.4 μg/(m²·h),生长季排放速率显著高于休眠季^[9-10],明显高于内蒙古羊草草原生态系统 N₂O 排放速率 [14.9 μg/(m²·h)]^[11]。

东北三江平原湿地草甸腐殖质土 N₂O 排放速率为 78~216 μg/(m²·h)^[12],荷兰放牧草场土壤排放速率为 179~358 μg/(m²·h)^[6]。青藏高原高寒金露梅灌丛、矮嵩草草甸休眠季也观测到 N₂O 吸收现象^[9,13],内蒙古草甸草原在生长季时监测到 N₂O^[14]。上述研究表明草地生态系统 N₂O 释放速率存在较强的空间异质性。

收稿日期:2020-09-07; **修回日期:**2020-10-28

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31770532);青海省自然科学基金(2018-ZJ-914)

作者简介:朱辉(1968-),男,河北灵寿县人,高级工程师,研究方向:草地土壤氮素循环及其环境效应研究。

E-mail:2968211257@qq.com

杜岩功为通讯作者。

E-mail:ygdu@nwipb.cas.cn

高寒草甸生态系统 N_2O 排放速率与土壤有机质含量、放牧强度等因素具有正相关关系,而与 pH 值间存在负相关关系^[3,15-16]。增温显著提升高寒草甸土壤 N_2O 排放速率^[8,17];在全球变暖的气候情景下,未来高寒草地土壤 N_2O 排放量将呈现明显上升趋势^[17]。土壤湿度为田间持水量的 35%~55% 时,硝化作用是主要排放过程,而土壤湿度是田间持水量的 65%~80% 时,反硝化作用速率增强^[6]。降水导致土壤形成厌氧环境,提高土壤反硝化作用, N_2O 部分被还原为氮素,降水量与 N_2O 排放通量之间存在较弱的负相关关系^[17]。

已有研究集中于青藏高原高寒草甸 N_2O 源汇效应^[9,15]、 N_2O 排放速率对土壤温度和湿度的响应特征^[17]和基于机理模型模拟高寒草甸生态系统 N_2O 排放量等方面^[10]。而有关土壤理化性质、生物量与高寒草甸氧化亚氮排放速率间耦合关系的研究相对薄弱。本研究解析土壤 N_2O 排放对土壤有机质、矿质态氮素

含量、土壤温度和湿度、地上生物量的响应特征;对土壤 N_2O 排放的主要影响因素进行定量研究。对于解析高寒草甸生态系统 N_2O 发生过程和探索减排策略具有重要理论意义。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

试验设置在青海省海北高寒草地生态系统国家野外科学观测研究站海北站(图 1),地处祁连山北支冷龙岭东段南麓的大通河谷(N 37°29',E101°12'),海拔 3 280 m。该地区为典型的高原大陆性气候,无明显四季区分,只有冷暖季,冷季漫长且干燥,暖季短暂且湿润。年均气温 -1.7℃,最冷月(1 月)平均气温为 -14.8℃,最热月(7 月)平均气温为 9.8℃。年均降水量 560 mm,其中 5—9 月的降水量占年降水总量的 80% 左右,植物生长季内雨热同期^[3]。

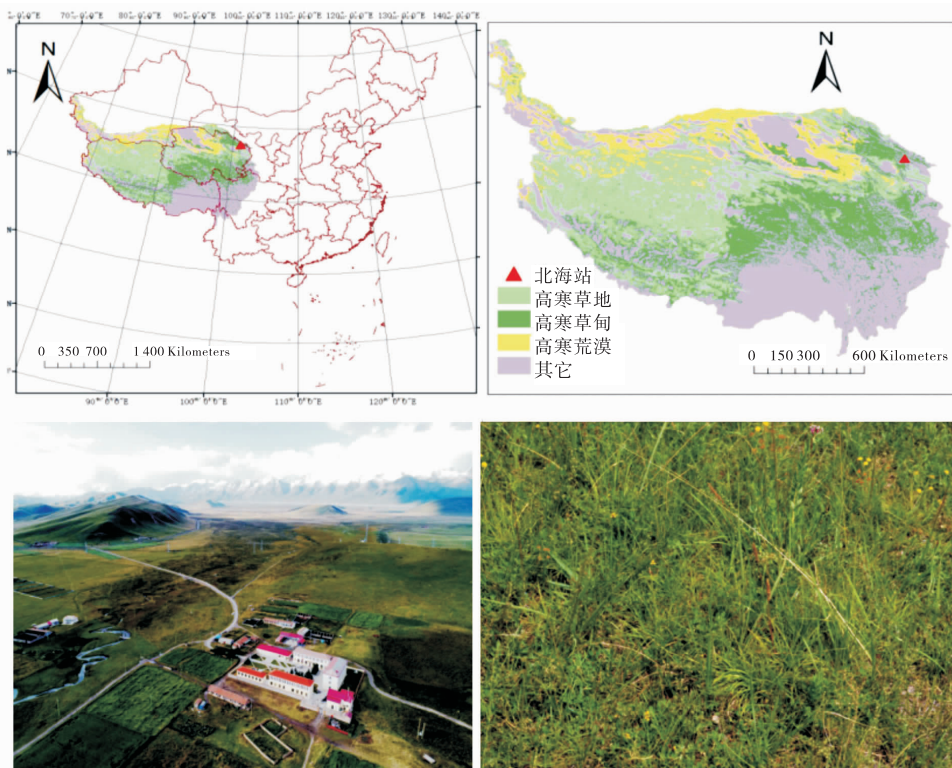


图 1 海北站地理位置及主要植被类型图

Fig. 1 Location of Haibei station and its main vegetation types

矮嵩草草甸主要优势植物种为矮嵩草(*Kobresia humilis*)、羊茅(*Festuca rubra*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、线叶龙胆(*Gentiana farreri*)、早熟禾(*Poa annua*)、矮火绒草(*Leontopodium nanum*)、麻花苻(*Gentiana straminea*)、雪白委陵菜(*Potentilla*

nivea)、美丽凤毛菊(*Saussurea superba*)、小嵩草(*Kobresia pygmaea*),均为多年生草本植物、其中矮嵩草、羊茅、垂穗披碱草、早熟禾、小嵩草为单子叶植物,而线叶龙胆、矮火绒草、麻花苻、雪白委陵菜、美丽凤毛菊为双子叶植物。植被盖度为 90%,年平均生物量为

(386.6±40.4) g/m。土壤类型为草毡寒冻锥形土,有机质含量约为12%,其中腐殖质占87%^[17],土壤全量养分丰富,速效养分贫乏^[9]。

1.2 试验设计

在海北站矮嵩草草甸综合观测场,随机选择能够代表该地区地表植被特征且地势平坦的草地作为采样点,3次重复。2018年5月将不锈钢地框(50 cm×50 cm×10 cm)埋入草地土壤,以减少对生长季采集N₂O气体试验的干扰。生长季(6—9月)每周监测1次,每月测定4次高寒草甸N₂O排放速率,取其平均值作为每月高寒草地N₂O排放速率。每次试验期间,同时采用便携式铂电阻数字温度计(JM624, USA)测定5 cm土层地温,采用时域反射仪(TDR, North Logan, UT, USA)测定10 cm土层湿度。

8月下旬利用蛇形取样法采集0~20 cm土层样品混合均匀,3次重复,置于实验室自然风干,通过2 mm土壤筛后备用。测定土壤化学性质(有机质、铵态氮和硝态氮含量、pH值)和地上生物量。

1.3 测定方法

N₂O排放速率研究:每次取样时选择晴天,上午9:00~11:00,采用静态箱法采集气样。取样时,在底座密闭水槽内加水,使采样箱(50 cm×50 cm×50 cm)与底座间形成气路密闭,切断采样箱内外空气的自由交换。气体采集使用带有三通阀的100 mL注射器抽气,采样时间点为0、10、20、30 min,即每隔10 min取1次样品,随后立即带回实验室,24 h之内进行上机测试分析。气体测定采用气相色谱法(HP4890D, Agilent),内装电子捕获检测器(ECD)。测定的色谱条件为:柱箱和检测器温度分别为70℃和300℃;最小因子检测限为±5 nL/L。N₂O排放速率的计算方法如下:

$$F_{N_2O} = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \times \frac{dC_t}{dt}$$

式中: F 是N₂O排放通量($\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$), A 是箱体底面积(cm^2), V 是箱体体积(cm^3), T 为采样时气温, P 为采样时气压。 C_t 是 t 时刻箱内N₂O的体积混合比浓度($10^{-9} \text{ L}/(\text{L} \cdot \text{min})$), t 为时间(min), ρ 是标准状态下N₂O密度(g/cm^3), T_0 和 P_0 分别为标准状况下,空气绝对温度(绝对温度,K)和气压(Pa)。依据样品N₂O浓度随时间变化,所建立的回归方程决定系数 $R^2 > 0.95$ 时,数据被视为有效而被采用。

矮嵩草草甸土壤有机质含量采用重铬酸钾氧化法分析^[18-19]、铵态氮和硝态氮含量采用流动分析仪测定(TRACCS-2000)^[8,12]。土壤pH采用pH计测定、容重采用环刀法。地上生物量采用标准样方收获法测定^[9]。

1.4 数据分析

每月高寒草地生态系统N₂O平均排放速率采用单因素方差分析。土壤N₂O排放与土壤理化性质和生物量等因素间的拟合方程,采用一般线性回归模型。土壤理化性质和生物量对矮嵩草草甸土壤N₂O排放速率的直接和间接影响采用路径分析,其中直接效应为变量 Y 关于 X_i 的标准回归系数,某一自变量通过其他自变量对因变量的作用效应即 X_i 通过 X_j 的间接效应为 $r_{ij} \times p_{jy}$ ^[20-21]。上述数据分析均采用SPSS 16.0进行。

2 结果与分析

2.1 生长季高寒矮嵩草草甸N₂O排放特征

陆地生态系统的观测数据证明,自然系统正在遭受全球变化影响,青藏高原高寒草地生态系统对气候变化尤为敏感,温室效应会对高寒草甸生态系统产生严重影响。生长季高寒矮嵩草草甸N₂O排放速率呈现明显的脉冲式变化特征,不同日期高寒草甸N₂O排放速率之间存在较大差异(图2)。

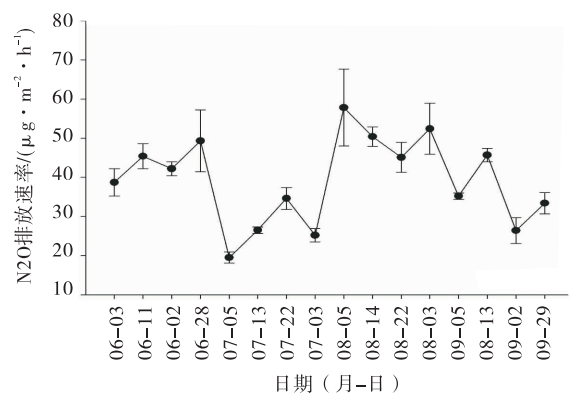


图2 生长季不同测定日期高寒草甸N₂O排放速率

Fig. 2 N₂O emission rates at different days in alpine meadow

高寒草甸N₂O平均排放速率最高值和最低值出现于8月5日和7月5日,分别为 57.8 ± 9.8 和 $19.5 \pm 1.4 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,前者排放速率约是后者的3倍,N₂O排放存在较大时间异质性。生长季6—9月高寒草甸N₂O平均排放速率分别为 43.9 ± 2.1 、 $26.5 \pm$

3.7、51.4±5.2、(35.2±2.7) $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ，每月之间均存在显著性差异($P < 0.05$)。生长季高寒草甸生态系统 N_2O 平均排放速率约为(39.3±5.4) $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

2.2 土壤理化性质和地上生物量对高寒草甸 N_2O 排放速率的影响

路径分析是一种研究多个变量之间多层因果关系及其相关强度的方法。本研究发现基于土壤理化性状和地上生物量，可以建立较好的 N_2O 排放通量的预测模型，决定系数较高，达到 0.726($P < 0.05$)，表明各因素对土壤 N_2O 排放速率的综合影响作用较强，误差项的决定系数 0.274，尚有其他因素对高寒草地生态系统 N_2O 排放速率影响作用为 27.4%。

矮嵩草草甸土壤有机质含量、pH 值、5 cm 土层温度和地上生物量对 N_2O 排放速率的直接作用较强，且前两者对 N_2O 排放速率影响的直接作用分别达到极显著($P < 0.01$)和显著水平($P < 0.05$) (图 3)。土壤硝态氮和铵态氮含量对高寒草甸 N_2O 排放速率的影响强度稍低，前者作用强度高于后者。而土壤湿度和容重对高寒草甸 N_2O 排放速率起到负直接作用。

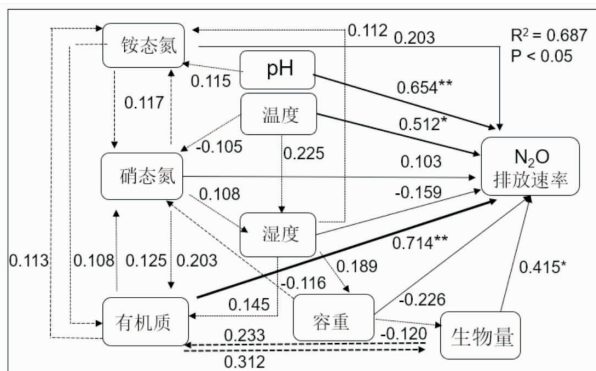


图 3 影响矮嵩草草地 N_2O 排放各因素的直接和间接作用强度

Fig. 3 The direct and indirect effects of different parameters on N_2O emission by path analysis

注：* ($P < 0.05$)，** ($P < 0.01$)。实线表征直接作用，虚线表征间接作用

各因素通过影响土壤有机质和铵态氮，对高寒草地土壤 N_2O 排放均具有较大的间接影响(图 3)，其中地上生物量和土壤硝态氮通过影响土壤有机质，对高寒草甸 N_2O 排放速率的间接作用较强，作用强度分别为 0.233 和 0.203。土壤有机质通过影响地上生物量、土壤硝态氮、铵态氮，对草地生态系统 N_2O 排放速率的间接作用较强，作用强度分别为 0.312、0.113 和

0.108。此外，除标注的间接作用强度外，其他因素之间的间接作用相对较弱，作用强度均小于 0.100(图 3)。

3 讨论

大气 N_2O 可以吸收红外线，且能减少地表通过大气向外空的热辐射，进而导致温室效应^[3,10]。 N_2O 主要以两种途径被破坏，光分解或者与游离氧发生反应， N_2O 与臭氧发生反应转变为 NO ，该过程破坏臭氧层，且取代氯氟化碳成为人类排放首要的消耗臭氧层物质^[4,10]。

增加土壤有机质会增加草地土壤 N_2O 排放^[22]，草原生态系统原状土柱加入碳源后，表层及深层土壤硝化过程和氮素损失量显著增加，尤其是下层土壤 N_2O 排放量增加趋势更加明显^[23]。本研究发现土壤有机质是影响高寒草地 N_2O 排放的重要因素，通过各主要因素的间接作用，可以看到各因素间还可能存在着较强耦合作用关系，尤其是矮嵩草草甸土壤中各因素通过土壤有机质的间接作用均较强，以及土壤有机质的直接作用亦较强，这可以认为土壤有机质是影响土壤 N_2O 排放通量的重要因素。

高寒草甸植物和农田作物均具有产生或者传输 N_2O 能力^[9,24]，并且这种能力受生物量和氮素含量等因素影响^[25-26]，本研究发现地上生物量对高寒草甸 N_2O 排放速率具有较强的直接作用。施氮肥土壤 N_2O 排放通量显著增加^[27]，施氮肥时可以增加高寒草甸土壤 N_2O 排放速率^[26]。在海北站地区，矮嵩草草地土壤硝化作用强度明显高于反硝化作用^[3]。本研究也发现，土壤硝态氮对 N_2O 排放速率的直接作用高于铵态氮，硝态氮主要来源于高寒草地土壤的硝化作用。 N_2O 排放通量与土壤温度和湿度密切相关^[8,28]，随土壤温度增加时，土壤 N_2O 排放速率增加，但温度超过 37°C ，草地土壤 N_2O 排放速率随温度增加而降低^[29]。本研究发现，温度与矮嵩草草甸生态系统 N_2O 排放速率间存在正相关关系。这可能也是高寒矮嵩草草甸 N_2O 排放峰值出现在雨热同期的 8 月的重要原因。但在内蒙针茅草原，观测到温度增高时， N_2O 排放速率总体呈降低趋势^[30]。青藏高原高寒矮嵩草草甸土壤水分对 N_2O 产生速率有重要影响，但这种关系是复杂、多变和阶段性的^[17]。

4 结论

青藏高原高寒草甸生态系统是 N_2O 排放源,且存在较大时间异质性。基于多元回归方程,利用土壤理化性质参数,可以较好地推测高寒草甸 N_2O 排放速率,提高土壤湿度将有利于降低高寒草地 N_2O 排放。土壤有机质、土壤温度和地上生物量对青藏高原高寒矮嵩草草甸 N_2O 排放速率的直接作用较强,土壤理化性质参数通过影响土壤有机质对 N_2O 排放速率的间接作用较强。研究为高寒草地 N_2O 减排提供了科学依据。

参考文献:

- [1] 徐文馨,陈杰,顾磊,等. 长江流域径流对全球升温 1.5℃ 与 2.0℃ 的影响[J]. 气候变化研究进展,2020,16(6):690—705.
- [2] 秦大河,Stocker H. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展,2014,10(1):1—6.
- [3] Du Y, Shu K, Guo X, *et al.* Moderate grazing promotes grassland nitrous oxide emission by increasing ammonia-oxidizing archaea abundance on the Tibetan Plateau[J]. *Current Microbiology*,2019,76(5):620—625.
- [4] PCC. Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge:Cambridge University Press,2013.
- [5] Kelliher F, Henderson H, Cox N. The uncertainty of nitrous oxide emissions from grazed grasslands: A New Zealand case study[J]. *Atmospheric Environment*,2016,148:329—336.
- [6] Velthof G, Beusichem V, Oenema O. Mitigation of nitrous oxide emission from dairy farming systems[J]. *Environmental Pollution*,1998,102(1):173—178.
- [7] 李红琴,张法伟,毛绍娟,等. 放牧强度对青海海北高寒矮嵩草草甸碳交换的影响[J]. 中国草地学报,2019,41(2):16—21.
- [8] Hu Y, Chang X, Lin X, *et al.* Effects of warming and grazing on N_2O fluxes in an alpine meadow ecosystem on the Tibetan plateau[J]. *Soil Biology & Biochemistry*,2010,42(6):944—952.
- [9] Du Y, Cui Y, Xu X, *et al.* Nitrous oxide emissions from two alpine meadows in the Qinghai Tibetan Plateau[J]. *Plant & Soil*,2008,311(2):245—254.
- [10] Du Y, Guo X, Cao G, *et al.* Simulation and prediction of nitrous oxide emission by the water and nitrogen management model on the Tibetan plateau[J]. *Biochemical Systematics & Ecology*,2016,65:49—56.
- [11] 杜睿,王庚辰,刘广仁,等. 内蒙古羊草草原温室气体交换通量的日变化特征研究[J]. 草地学报,1998,6(4):258—264.
- [12] 孙志高,刘景双,杨继松,等. 三江平原典型小叶章湿地土壤硝化—反硝化作用与氧化亚氮排放[J]. 应用生态学报,2007,18(1):185—192.
- [13] 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.
- [14] 王艳芬,马秀枝,纪宝明,等. 内蒙古草甸草原 CH_4 和 N_2O 排放通量的时间变异[J]. 植物生态学报,2003,27(6):792—796.
- [15] Wei D, Xu R, Wang Y, *et al.* Responses of CO_2 , CH_4 and N_2O fluxes to livestock enclosure in an alpine steppe on the Tibetan Plateau, China[J]. *Plant & Soil*,2012,359(1):45—55.
- [16] Cao Y, Ke X, Guo X, *et al.* Nitrous Oxide Emission Rates over 10 Years in an Alpine Meadow on the Tibetan Plateau[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*,2018,27(3):1353—1358.
- [17] 曹莹芳,郭小伟,周庚,等. 青藏高原高寒草甸 N_2O 排放速率及其对降水和气温的响应特征[J]. 草原与草坪,2017,37(4):20—25.
- [18] Cao G, Tang Y, Mo W, *et al.* Grazing intensity alters soil respiration in an alpine meadow on the Tibetan plateau[J]. *Soil Biology & Biochemistry*,2004,36(2):237—243.
- [19] 王启兰,王长庭,杜岩功,等. 放牧对高寒嵩草草甸土壤微生物量碳的影响及其与土壤环境的关系[J]. 草业学报,2008,17(2):39—46.
- [20] 张琪,丛鹏,彭励. 通径分析在 Excel 和 SPSS 中的实现[J]. 农业网络信息,2007(3):109—110.
- [21] Du Y, Ke X, Guo X, *et al.* Soil and plant community characteristics under long-term continuous grazing of different intensities in an alpine meadow on the Tibetan plateau[J]. *Biochemical Systematics and Ecology*,2019,85:72—75.
- [22] Azam F, Muller C, Weiske A, *et al.* Nitrification and denitrification as sources of atmospheric nitrous oxide—role of oxidizable carbon and applied nitrogen[J]. *Biology and Fertility of Soils*,2002,35(1):54—61.
- [23] 邹国元,张福锁,李新慧. 下层土壤反硝化作用的研究

- [J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(4): 379—384.
- [24] 陈书涛, 黄耀, 郑循华, 等. 轮作制度对农田氧化亚氮排放的影响及驱动因子[J]. 中国农业科学, 2005, 38(10): 2053—2060.
- [25] Cao G, Xu X, Long R, *et al.* Methane emissions by alpine plant communities in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Biology Letters*, 2008, 4(6): 681—684.
- [26] Jiang C, Yu G, Fang H, *et al.* Short-term effect of increasing nitrogen deposition on CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(24): 2920—2926.
- [27] 邹国元, 张福锁, 陈新平, 等. 秸秆还田对旱地土壤反硝化的影响[J]. 中国农业科技导报, 2001, 3(6): 47—50.
- [28] Lin X, Wang S, Ma X, *et al.* Fluxes of CO₂, CH₄, and N₂O in an alpine meadow affected by yak excreta on the Qinghai-Tibetan plateau during summer grazing periods [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41: 718—725.
- [29] Dallar R, Allen D. Greenhouse gas fluxes from natural ecosystems. *Australian Journal of Botany*, 2008, 56(5): 369—407.
- [30] 杜睿. 温度和水分对草甸草原土壤氧化亚氮产生速率的调控[J]. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2170—2174.

Characteristics of nitrous oxide emission from alpine meadow on Qinghai-Tibet Plateau and its coupling relationship with soil physical and chemical properties

ZHU Hui¹, WANG Yan², WANG Yun-ying³, DU Yan-gong³

(1. *Ecology and Environment Monitor Center in Qinghai Province, Xining 810001, China*; 2. *Bureau of Natural Resources and Planning of Jiexiang County in Jining, Jining 272000, China*; 3. *Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Science, Xining 810008, China*)

Abstract: Observation data from ocean and terrestrial ecosystems show evidence for the global changes in global natural ecosystems. This study was conducted in Qinghai Haibei Alpine Grassland Ecosystem National Observation and Research Station. The N₂O emission characteristics of alpine meadow were monitored by static chamber gas chromatography at the peak growing season of alpine *Kobresia humilis* meadow. Based on multiple linear regression and path analysis, the effects of soil chemical properties and aboveground biomass on N₂O emission from alpine grassland ecosystem were analyzed. The N₂O emission rate of alpine meadow showed significant temporal heterogeneity across the growing season, with an average rate of approximate (39.3 ± 5.4) μg/(m² · h). There was significant difference among different months. A better multiple linear regression equation could be established between soil chemical properties, aboveground biomass and N₂O emission rate (R² = 0.726). There was a positive correlation between the N₂O emission rate and soil organic matter, and pH value. However, there was a negative correlation between soil moisture, soil bulk and N₂O emission rate of alpine meadow. Other factors indirectly affected N₂O emissions by affecting soil organic matter and ammonia nitrogen. Soil organic matter indirectly affected N₂O emission rate of grassland ecosystem through aboveground biomass, soil nitrate nitrogen and ammonium nitrogen. In addition, this study showed its great significance for deepening the theory of nitrogen cycle in alpine grassland and exploring the strategies for the mitigation of N₂O emission.

Key words: N₂O emission rates; Tibetan Plateau; soil chemical property; path analysis