

陇东旱塬苜蓿草地N₂O排放特征及其对施氮的响应*

王 刚 杨宪龙 李 渊 丁新宇 沈禹颖**

兰州大学草地农业科技学院, 草地农业生态系统国家重点实验室, 农业农村部草牧业创新重点实验室 兰州 730020

摘 要 采用LGR-N₂O/CO气体分析仪研究陇东旱塬苜蓿草地N₂O排放特征、影响因素及其对施氮的响应. 试验设N 0 kg hm⁻² (N0) 和150 kg hm⁻² (N150) 两个施氮处理. 结果表明, 监测期N0和N150处理的N₂O排放通量平均分别为-0.0036和0.0118 mg m⁻² h⁻¹, N150处理较N0处理明显增加. N₂O排放通量具有明显的日变化特征, 表现为先降低后增加的趋势. 回归分析表明, N₂O排放通量与表层10 cm土壤含水量表现为显著的正相关关系, 降雨天N₂O排放通量较非降雨天值升高131.3%. 同时, N₂O排放通量随着表层10 cm土壤温度的升高表现为减低的趋势. 日排放特征表明, 以9:00-11:00时测定的N₂O通量值为基础推算日尺度或更长时间尺度的N₂O排放通量时可能存在明显低估的现象. 综上所述, 陇东苜蓿草地N₂O排放受降水和施氮的深刻影响, 且具有明显的日动态特征, 建议通过仪器连续动态测定加强N₂O排放通量数据的准确性和代表性. (图6 表1 参38)

关键词 N₂O排放; 日动态; 降雨; 施氮; 影响因素
CLC X154.1

Characteristics of N₂O emission from *Medicago sativa* stands and its response to nitrogen fertilizers in the Longdong dryland Plateau*

WANG Gang, YANG Xianlong, LI Yuan, DING Xinyu & SHEN Yuying**

College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems of Lanzhou University, Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Grassland Livestock Industry Innovation, Lanzhou 730020, China

Abstract Nitrous oxide (N₂O) is one of the potent greenhouse gases (GHG) that depletes the stratospheric ozone. Nitrogen fertilizers are considered to be a major source of nitrous oxide (N₂O) emissions from arable soils. To investigate the characteristics of N₂O emission, its influencing factors, and its response to nitrogen application in dry grassland in the Loess Plateau, one of the most intensively used agricultural regions in China, we conducted a field trial with two treatments including N0 (0 kg hm⁻²) and N150 (150 kg hm⁻²) at the Qingyang Loess Plateau grassland agricultural research station of Lanzhou University. An LGR-N₂O/CO gas analyzer was used to monitor the emissions. The results showed that the N₂O fluxes of the N0 and N150 treatments during the monitoring period were -0.0036 and 0.0118 mg m⁻² h⁻¹, respectively; the flux in case of the N150 treatment was significantly higher than that for the N0 treatment. The N₂O emission flux has a distinct diurnal variation characteristic, which first showed the trend of decreasing and then increasing. Regression analysis indicated a significant positive correlation between the N₂O flux and the surface soil water content at a depth of 10 cm. The N₂O emission flux increased by 131.3%, compared with that during the non-precipitation days. At the same time, the N₂O emission flux showed a trend of decreasing with the increase of the surface soil temperature at a depth of 10 cm. The daily emission characteristics indicated that there may be a significant underestimation of the N₂O flux at the daily or longer time-scale, based on the N₂O flux value measured at 9:00–11:00. In summary, the N₂O emissions from the sown alfalfa grassland of the eastern Gansu are strongly affected by precipitation and nitrogen application and have obvious daily dynamic characteristics. It is recommended that the accuracy and representativeness of N₂O emission flux data be enhanced by continuous dynamic measurement using the instrument.

Keywords N₂O emission; daily dynamics; rainfall; nitrogen application; influencing factor

收稿日期 Received: 2017-06-27 接受日期 Accepted: 2017-09-12

*国家科技支撑计划项目(2014BAD14B006)、国家牧草产业技术体系(CARS-34)和中央高校基本科研业务专项(Lzujbky-2017-2)资助
Supported by the National Key Technologies R&D Program of China (2014BAD14B006), the Project of China Forage & Grass Research System (CARS-34) and the Fundamental Research Fund for the Central Universities of China (Lzujbky-2017-2)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: yy.shen@lzu.edu.cn)

气候变暖是全球性的环境问题,其主要原因是大气中温室气体浓度不断增加.一氧化二氮(N_2O)是除二氧化碳(CO_2)和甲烷(CH_4)外最主要的温室气体之一,能够破坏平流层中的臭氧,使到达地面的紫外辐射增加,从而加剧全球变暖^[1].2011年,大气 N_2O 浓度达到 3.24×10^{-7} ,并且每年以 0.78×10^{-9} 的速率增加^[2].大气中 N_2O 浓度每增加1倍,平流层中臭氧浓度减少10%,到达地表的紫外线辐射增加20%,导致人类健康问题的增加^[3].研究显示, N_2O 在大气中的滞留时间长达150年,即使土壤中 N_2O 含量不再增加,预计到2040年大气中 N_2O 体积分数也将达到 $340 \mu\text{L/L}^{-1}$ ^[4],其增温潜势十分明显.

农田土壤是全球最主要的 N_2O 排放源,贡献率高达70%,农业的贡献占人类活动总贡献量的81%^[5].氮肥施用是农业土壤 N_2O 产生的重要来源^[6],来自肥料的 N_2O -N占施用肥料N的比例一般在0.001%-6.8%之间,施用氮肥排放的 N_2O 占土壤总 N_2O 排放的25%-82%^[7].吉艳芝等研究发现,小麦整个生育期的 N_2O 排放总量随施氮量的增加而增加^[8].胡小康等在夏玉米地的研究也发现了相似的规律^[9].Wang等研究发现,施氮处理较对照处理增加了39%的 N_2O 排放^[10].其次,土壤水分也是影响 N_2O 排放的重要因素.降水和灌溉后,土壤的通气状况变差,反硝化作用增强,致使土壤 N_2O 的产生量和溢出量明显增加^[11-13].例如,梁东丽等研究发现,旱地土壤 N_2O 的变化一般较小,但在降雨后土壤 N_2O 通量呈上升趋势,且这种变化趋势与同时期降雨量的变化趋势相同^[14];杨岩等研究发现,灌水对 N_2O 排放的影响显著,试验期间灌溉3次后均出现排放高峰^[15].

紫花苜蓿作为优良的豆科牧草,在中国栽培面积已达 $2 \times 10^6 \text{ hm}^2$,在草畜产业发展中发挥着重要作用^[16].苜蓿具有很强的固氮能力,但在幼苗阶段或刈割以后,根瘤菌的固氮作用较弱,需从土壤中吸收大量矿质氮以满足其生理需求^[17].同时,随种植年限的增加,苜蓿固氮能力衰退,开始消耗土壤氮^[18].因此,施氮对苜蓿生产力的提升可能具有积极作用^[19].然而,截至目前,关于苜蓿草地 N_2O 排放对施氮响应的研究尚不多见.此外,以往关于 N_2O 排放特征的研究多用静态箱-气相色谱法,该方法无法实现对 N_2O 气体释放通量的连续动态观测,导致计算季节通量或者年通量时可能出现较大偏差^[20].鉴于此,我们采用LGR $\text{N}_2\text{O}/\text{CO}$ 气体分析仪(DLT-100, Los Gatos Research, Inc. NE, USA)对陇东旱塬苜蓿草地 N_2O 排放动态进行了24 h的连续动态监测,以期揭示苜蓿草地 N_2O 排放规律提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究在兰州大学庆阳黄土高原草地农业试验站($35^{\circ}39'\text{N}$, $107^{\circ}51'\text{E}$)进行.该地区冬春寒冷干燥,

无霜期平均150-190 d,生长期255 d,年均日照时数2 300-2 700 h.多年平均年降水量543 mm(1961-2013),集中于7-9月份,年均蒸发量1 504 mm.2014年降水量为529 mm(图1).供试土壤为黑垆土,土壤有机质含量约1%,全氮含量低于0.1%,pH值为8.0-8.5.

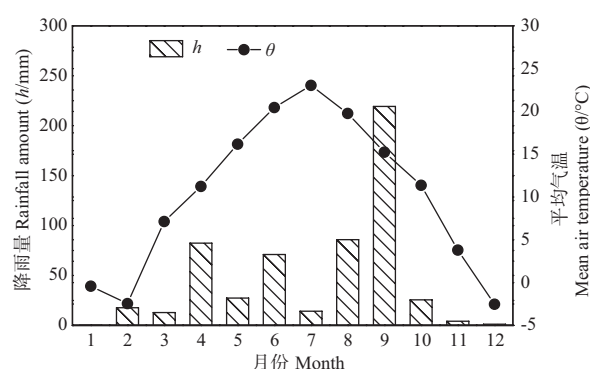


图1 2014年试验地降雨量和气温的月分布特征.

Fig. 1 Monthly distribution of precipitation and average temperature in the experimental site in 2014.

1.2 试验设计

供试样地为2009年人工建植的紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)草地.条播,播量为 25 kg/hm^2 ,行间距15 cm.苜蓿草地均旱作,每年刈割2次.于2013年开始施氮,设0和 150 kg hm^{-2} 两个N水平,分别记为N0和N150,分别于返青期(4月5日,施用总量的80%)和头茬再生期(7月16日,施用20%)撒施.氮肥类型为尿素,小区面积 20 m^2 ($4 \text{ m} \times 5 \text{ m}$),设3次重复,采取随机区组排列.

1.3 N_2O 测定方法

通过LGR $\text{N}_2\text{O}/\text{CO}$ 气体分析仪和土壤通量主机(MCC-1-8, LI-CA, CHN)观测和记录 N_2O 释放通量.土壤中产生的气体进入 $\text{N}_2\text{O}/\text{CO}$ 气体分析仪内,再由传感器测量 N_2O 的通量值,可以实现24 h不间断测定.采用LGR $\text{N}_2\text{O}/\text{CO}$ 多通道土壤通量测量系统的长期测量室监测.采用LGR $\text{N}_2\text{O}/\text{CO}$ 多通道土壤通量测量系统的长期测量室监测.测定前将半径和高均为20 cm的凹形圆槽铝合金底座安置在土壤中,露出地面10 cm与气室紧密接触.测定时将气室(半径20 cm,高120 cm的PVC管制成)扣入凹形槽中用水密封.气室顶部安装密封盖,其上连接气路管和供电线路,由主机控制其闭合.主机按设定好的程序控制其顺序进行自动测定,将气体抽进气体分析仪分析得出通量值.每小区放置1个气室,每隔15 min测定一次.每次观测时间为105 s,测定前后的排空时间为120 s,完成一次完整的测定需3.75 min,每小时求平均值,最后计算出日平均排放通量按得日动态.同时利用仪器自带的温度探针和水分传感器记录10 cm深度处的土壤温度和水分.

1.4 数据采集与统计

N_2O 的监测期为2014年7月2日至8月26日,共56 d.将原始数据Txt文件转化为Excel后,msg值为0则表示仪器能正常收到数据.由于仪器长期处于野外观测环境,偶尔会出现光谱飘逸现象,根据静态箱经验值将 N_2O 通量在-0.1-0.1范围之外的删去^[21].采用Excel 2007和Origin 10.2软件进行数据的整理和作图.

2 结果与分析

2.1 监测期内 N_2O 排放动态

N_2O 排放通量的监测表明,苜蓿再生期(7月2日-7月16日)N150的平均排放量($-0.000 2 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)高于N0处理($-0.015 8$

$mg\ m^{-2}\ h^{-1}$). 7月16日苜蓿刈割后, 由于施氮操作, N150处理的 N_2O 排放通量略有增加. N150处理下, 7月份 N_2O 累计排放通量为 $127.7\ mg/m^2$, 8月份 N_2O 累计排放通量为 $302.0\ mg/m^2$.

监测期内共发生15次降雨(图2a). 其中, 7月份发生了5次, 降雨量普遍较小, 变幅为 $0.4\text{--}11.5\ mm$ (平均值为 $2.84\ mm$), 因此对 N_2O 排放通量的影响也较小. 8月份共发生了10次降水事件, 降雨量较7月份偏大, 变幅为 $0.3\text{--}32.6\ mm$ (平均

值为 $7.2\ mm$), 对 N_2O 排放通量的影响也较大. 其次, 由图2b可知, 整个监测期内N0和N150处理 N_2O 排放通量的变幅分别为 $-0.036\ 8\text{--}0.066\ 5\ mg\ m^{-2}\ h^{-1}$ 和 $-0.009\ 3\text{--}0.046\ 6\ mg\ m^{-2}\ h^{-1}$, 平均值分别为 $-0.003\ 6$ 和 $0.011\ 8\ mg\ m^{-2}\ h^{-1}$, 前者明显低于后者.

2.2 监测期内 N_2O 排放日动态特征

由土壤水分和温度的日动态曲线(图3a, 3b)可知, 土壤

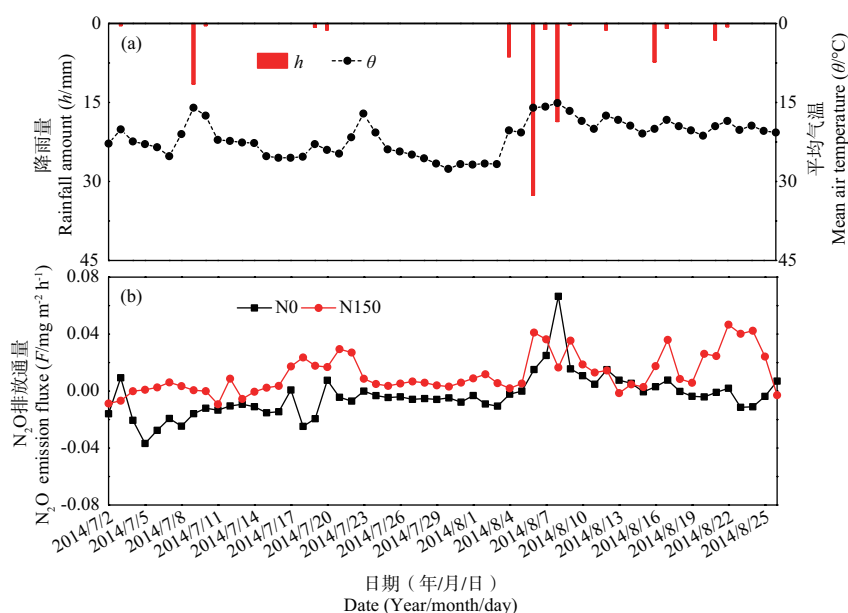


图2 2014年7月2日至8月26日间降雨量、日平均气温 (a) 和 N_2O 日均排放通量 (b) 动态.

Fig. 2 Dynamics of precipitation, daily average temperature (a), and N_2O emission flux (b) from 2 July to 26 August, 2014.

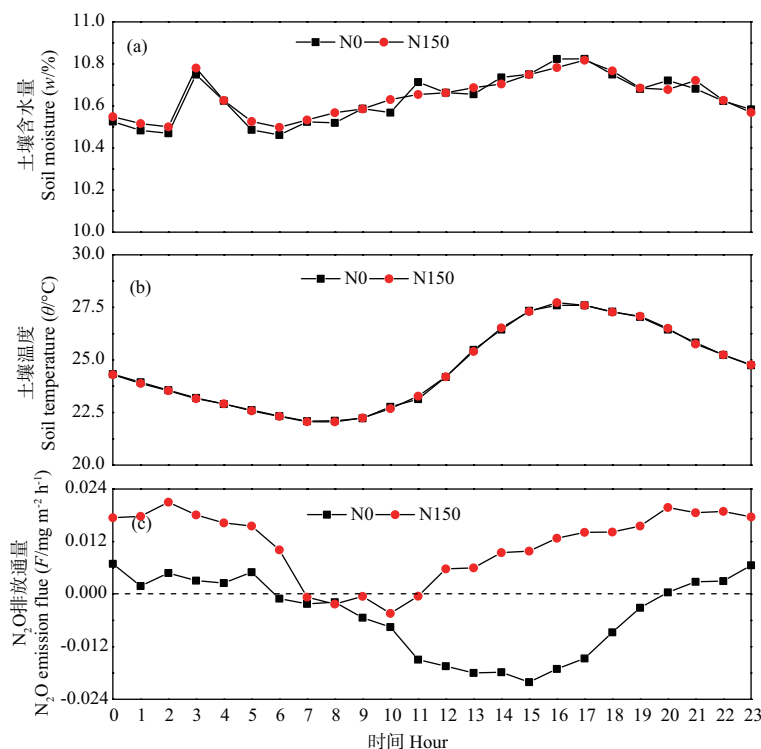


图3 2014年7月2日至8月26日间土壤含水量 (a)、温度 (b) 和 N_2O 排放通量 (c) 的日动态特征.

Fig. 3 Diurnal dynamics of soil water content (a), temperature (b), and N_2O emission flux (c) from 2 July to 26 August, 2014.

含水量大体上表现为先增加后减低的趋势,在3:00时(主要由8月6日32.6 mm的强降水引起)和17:00时出现峰值,分别为10.78%和10.81%;在6:00时出现最小值,为10.49%。土壤温度呈现降低—增加—降低的动态变化规律,在8:00时最低,为22.1℃,在16:00出现最大值,为27.7℃。 N_2O 排放日动态(图3c)特征与土壤含水量的变化特征正好相反,表现为先降低后增加的趋势。 N_0 处理在0:00排放量最大,为 $0.0069\text{ mg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$,在15:00时排放量最小,为 $-0.02\text{ mg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$,在6:00-19:00时间段出现 N_2O 负通量特征。 N_{150} 处理下 N_2O 排放以正通量为主,在2:00时出现最大值,为 $0.0210\text{ mg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$,在10:00时出现最小值,为 $-0.0044\text{ mg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$,在7:00-11:00时间段内出现暂时的 N_2O 负通量现象。

2.3 施氮对 N_2O 排放通量的影响

由图4可知, N_0 和 N_{150} 处理下 N_2O 释放通量的均值分别为 -0.0036 和 $0.0118\text{ mg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$,施氮后 N_2O 排放通量明显增加。此外, N_0 处理 N_2O 释放通量对应的箱线图较长,说明该处理下 N_2O 释放通量变幅较大,其极差和变异系数分别为 $0.1033\text{ mg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ 和4.17%。相比而言, N_{150} 处理下 N_2O 释放通量则较集中,其极差和变异系数分别为 $0.0559\text{ mg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ 和1.78%。

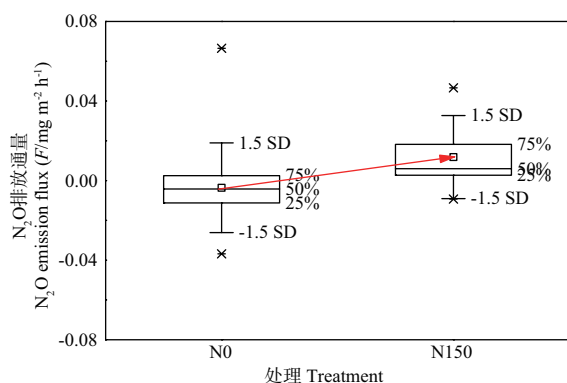


图4 不同施氮水平下 N_2O 排放通量的箱线图。

Fig. 4 Box diagram of N_2O emission flux under two nitrogen application levels.

2.4 降水对 N_2O 排放通量的影响

N_0 处理下,降雨天和非降雨天 N_2O 释放通量的变幅分别为 -0.0194 - $0.0665\text{ mg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ 和 -0.0368 - $0.0108\text{ mg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$,平均值分别为 0.0078 和 $-0.0080\text{ mg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$,降雨天 N_2O 释放通量明显高于非降雨天; N_{150} 处理的 N_2O 释放通量均值也表现出同样的趋势,降雨天和非降雨天 N_2O 释放通量的变幅分别为 -0.0068 - $0.0466\text{ mg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ 和 -0.0093 - $0.0423\text{ mg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$,平均值分别为 0.1991 和 $0.0091\text{ mg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$,降雨天 N_2O 释放通量较非降雨天高131.3%。

2.5 N_2O 排放通量与土壤温度、湿度的关系

不同施氮水平下, N_2O 排放通量均随土壤含水量的增加而增加,二者存在显著的线性回归关系(图6a)。土壤10 cm处的水分含量分别可以解释 N_0 和 N_{150} 处理 N_2O 排放通量变化的27%和19%,土壤含水量每增加1%, N_0 处理 N_2O 排放通量增加 $0.0039\text{ mg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$, N_{150} 处理 N_2O 排放通量增加 $0.0031\text{ mg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ 。

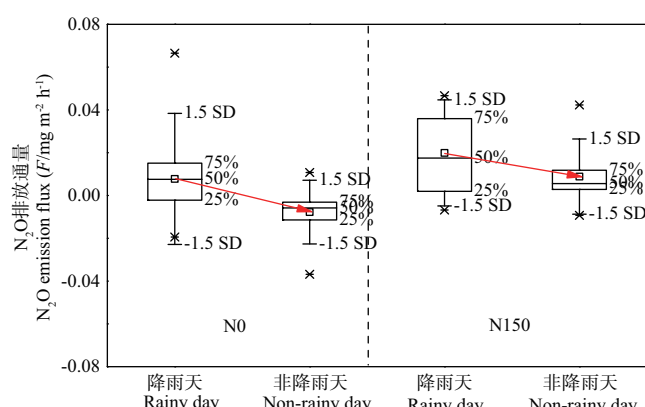


图5 2014年7月2日至8月26日间降雨天和非降雨天 N_2O 排放通量的箱线图。
Fig. 5 Box diagram of N_2O emission flux in rainy day and non-rainy day from 2 July to 26 August, 2014

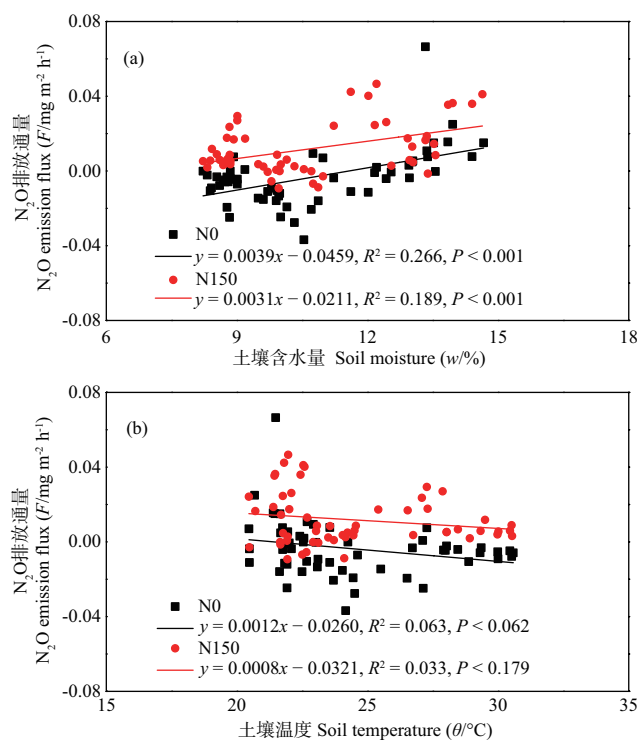


图6 2014年7月2日至8月26日期间 N_2O 排放通量与土壤含水量和温度的关系。

Fig. 6 Relationship between N_2O emission flux and soil water content and temperature from 2 July to 25 August, 2014.

$\text{mg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ 。同时,我们发现,两个处理对应的 N_2O 排放通量有随土壤温度的增加而减小的趋势(图6b),但回归方程均没有达到显著性水平($P > 0.05$)。

3 讨论

本研究表明,监测期内 N_0 处理 N_2O 排放通量在7月份主要表现为负通量,而在8月份表现为正通量。一方面这可能是由于7月份气温较高(日均气温为23.1℃),土壤升温后使得参与硝化和反硝化作用的微生物活性降低,从而减低 N_2O 的产生量。另一方面,7月份降雨偏少,土壤较为干燥,通气状

况良好,不利用形成厌氧环境,进而阻碍了反硝化作用N₂O的产生. 本研究结果中N₂O排放通量与土壤温度的负相关关系(图6b)以及与土壤水分的正相关关系(图6a)正好佐证了这一点. 由N₂O排放通量的日动态特征可知, N0处理下N₂O通量在6:00-20:00时这一时间段出现负通量特征, 而N150处理几乎在全部时刻表现为正通量. 造成N0处理N₂O的负通量现象的原因可能是植物从根部土壤吸收水分用于蒸腾和自身代谢, 使得土壤含水率不断下降, 土壤通气状况得以改善, 从而抑制反硝化产生的N₂O^[29]. 再者, 在硝化与反硝化作用过程中产生的N₂O存在进一步转化的可能, 即N₂O在氧化亚氮还原酶的作用下进一步还原为N₂. 此时土壤空气中的N₂O浓度降低, 从而表现为从地表空气中吸收的现象^[30]. 此外, 研究表明, 光合有效辐射和N₂O通量呈显著负相关, 随着光照增强, 生态系统N₂O通量呈下降趋势, 同时强烈的光合作用也会对N₂O释放有显著的抑制^[31].

氮肥运筹是影响土壤N₂O排放的重要因素, 氮肥的施用量与N₂O的生长季累积排放量之间一般表现为正相关关系^[31-32]. 本研究表明, 随着施氮水平的增加, N₂O通量值明显增加, 这与王旭燕等人的研究结果^[33]一致. 由图2可知, N150处理的N₂O通量比对照处理(N0)高, 这是因为施氮处理下较多的NO₃⁻和大量根茬等有机物积累在适宜的温度和水分条件下更有利于N₂O的产生^[34]. 土壤中有有效氮的累积是土壤产生N₂O的前提条件之一^[35], 多余的氮未被作物完全吸收, 残留在土壤中成为N₂O的潜在排放源, 因此需要加强田间管理避免氮肥的过量投入. N0处理的N₂O通量较小, 可能是由于植物生长需要大量的氮, 土壤中的有效氮被植物利用后, 使硝化或者反硝化作用失去了有效氮源, 从而减少N₂O产生的机会.

降雨与N₂O释放峰间存在明显的驱动-响应关系, N₂O释放通量与降雨量和土壤湿度间存在正相关性^[36]. 较大降雨后, 由于大量雨水排出了土壤中的空气, 使得土壤容易形成厌氧环境加速反硝化作用的速率, 从而增加了N₂O的排放量^[37].

本研究结果正好佐证了这一点, 观测表明, 土壤由于变湿的过程中, N₂O通量增加, 由湿变干的过程中N₂O通量减小. 土壤中N₂O产生的机制是多方面的, 受许多因子共同的影响, 而土壤硝化作用和反硝化作用是其主要来源. 在一定土壤水分含量范围内, 硝化速率随水分含量增加而增加, 当土壤水分的增加使氧的供应受到限制时, 硝化速率开始下降^[12, 38]. 在本研究中, 从土壤温度、水分与土壤N₂O排放通量之间的关系可以看出, 温度和水分是影响N₂O排放的重要因素并且不施氮处理N₂O排放更容易受土壤温、湿度变化的影响. 王晓燕等对不同施氮处理下旱作农田N₂O排放特征的研究显示, 5-10 cm土壤温度与N₂O平均排放通量呈显著正相关, 而5-10 cm土壤水分与N₂O平均排放通量呈显著负相关^[32]. 这与本研究结果正好相反, 这可能与观测地点土层深度、土壤温度和水分的变化范围以及其他环境因素有关.

为了明确本研究中LGR/N₂O气体分析仪N₂O通量测定值与传统静态箱发测定值的差异, 我们通过文献调研的方式对相关研究结果进行了汇总. 结果(表1)显示, 截至目前, 几乎所有文献中N₂O通量的测定都采用静态箱法, 且测定一般在上午9:00-11:00时进行. 文献中观测的N₂O通量范围在-0.06 - 0.46 mg m⁻² h⁻¹之间. 本研究条件下, 我们通过LGR/N₂O气体分析仪对N₂O排放通量实现了24 h动态观测, 若以24 h的测定值推算, 苜蓿草地N₂O排放通量为0.001-0.068 mg m⁻² h⁻¹, 该值位于前人研究结果范围之内; 但若以9:00-11:00时的观测结果推算, N0和N150处理的N₂O平均排放通量分别为-0.0093和-0.0018 mg m⁻² h⁻¹, 表现为暂时的负通量特征.

本研究条件下, 我们通过LGR/N₂O气体分析仪对苜蓿草地N₂O排放特征进行了连续动态监测. 结果显示, 9:00-11:00时测定的N₂O平均排放通量值较00:00-24:00时的测定值明显偏小(图3c), 因此该时间段内的N₂O排放值不能够很好地代表一天的排放量, 若以此推算日尺度或更长时间尺度的排放量可能存在明显低估的现象. 因此, 今后的研究尚需加强有关N₂O排放通量测定时间点的代表性问题及影响因素.

表1 苜蓿草地N₂O排放通量的文献汇总
Table 1 Research summary on N₂O emission flux in the alfalfa field

实验地点 Location	经纬度 Latitude and longitude	苜蓿种植年限 Alfalfa growth year (t/a)	N ₂ O通量 N ₂ O emission flux F/mg m ⁻² h ⁻¹	测量方法 Measurement method	测定时间 Measure time	文献来源 Reference source
宁夏贺兰山 Helan Mountain, Ningxia	38°32'N, 106°05'E	1, 3, 4, 5, 8	-0.0600 - 0.1400	静态箱-气相色谱法 Static box gas chromatography	9:00-11:00	[22]
河北保定 Baoding, Hebei	-	4	< 0.7900	静态箱-气相色谱法 Static box gas chromatography	9:00-11:00	[23]
甘肃庆阳 Qingyang, Gansu	35°39'N, 107°51'E	3	-0.0990 - 0.0850	静态箱-气相色谱法 Static box gas chromatography	9:00-11:00	[24]
甘肃庆阳 Qingyang, Gansu	35°39'N, 107°51'E	3	-0.3167 - 0.4620	静态箱-气相色谱法 Static box gas chromatography	9:00-11:00	[25]
甘肃庆阳 Qingyang, Gansu	35°39'N, 107°51'E	3, 4, 10	0.0458 (平均值 Mean)	静态箱-气相色谱法 Static box gas chromatography	9:00-11:00	[26]
甘肃定西 Dingxi, Gansu	-	5	0.0087 (平均值 Mean)	静态箱-气相色谱法 Static box gas chromatography	9:00-11:00	[27]
河北保定 Baoding, Hebei	38°10'N, 113°40'E	1	0.0010 - 0.0680	静态箱-气相色谱法 Static box gas chromatography	9:00-11:00	[28]
甘肃庆阳 Qingyang, Gansu	35°39'N, 107°51'E	5	-0.0368 - 0.0665	LGR-N ₂ O/CO分析仪 LGR-N ₂ O/CO gas analyzer	0:00-24:00	本研究 This study

参考文献 [References]

- 李发东, 杜钨, 张秋英, 古从珂, 冷佩芳, 乔云峰, 朱农, 郝帅, 黄勇彬, 施生锦. 华北平原农田 N_2O 排放通量的高频动态观测[J]. 中国生态农业学报, 2018, **26** (2): 195-202 [Li FD, Du K, Zhang QY, Gu CH, Leng PF, Qiao YF, Zhu N, Hao S, Huang YB, Shi SJ. High-frequency dynamic observation of N_2O emission flux from cropland in the North China Plain [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2018, **26** (2): 195-202]
- 李彬波, 曾科, 李瑞, 杨兰芳. 作物生长对土壤 N_2O 排放影响的研究进展[J]. 土壤通报, 2015, **46** (4): 1003-1010 [Li BB, Zeng K, Li R, Yang LF. Research progress on effect of crop growth on soil N_2O Emissions [J]. *Chin J Soil Sci*, 2015, **46** (4): 1003-1010]
- IPCC. Climate change 2007: the physical science basis [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- Bauza JF, Morell JM, Corredor JE. Biogeochemistry of nitrous oxide production in the red mangrove (*Rhizophora mangle*) forest sediments [J]. *Estuarine Coastal Shelf Sci*, 2002, **55** (5): 697-704
- Isermann K. Agriculture's share in the emission of trace gases affecting the climate and some cause-oriented proposals for sufficiently reducing this share [J]. *Environ Pollut*, 1994, **83** (1-2): 95
- Mosier A, Kroeze C. Potential impact on the global atmospheric N_2O budget of the increased nitrogen input required to meet future global food demands [J]. *Chemosphere - Global Change Sci*, 2000, **2**: 465-473
- Eichner MJ. Nitrous oxide emissions from fertilized soils: summary of available data [J]. *J Environ Qual*, 1990, **19**, **2** (2): 272-280
- 吉艳芝, 巨晓棠, 刘新宇, 张丽娟, 李鑫, 刘楠. 不同施氮量对冬小麦田氮去向和气态损失的影响[J]. 水土保持学报, 2010, **24** (3): 113-118 [Ji YZ, Ju XT, Liu XY, Zhang LJ, Li N. Ampact of different nitrogen application on nitrogen movement and gaseous loss of winter wheat fields [J]. *J Soil Water Conserv*, 2010, **24** (3): 113-118]
- 胡小康, 黄彬香, 苏芳, 巨晓棠, 江荣凤, 张福锁. 氮肥管理对夏玉米土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 中国科学: 化学, 2011 (1): 124-135 [Hu XK, Huang BX, Su F, Ju XK, Jiang RF, Zhang FS. Effects of nitrogen management on soil CH_4 and N_2O emissions in summer maize [J]. *Sci Sin Chim*, 2011 (1): 124-135]
- Wang FM, Li J, Wang XL, Zhang W, Zou B, Deborah AN, Li ZA. Nitrogen and phosphorus addition impact soil N_2O emission in a secondary tropical forest of South China [J]. *Sci Rep*, 2014, **4**: 5615
- Robertson K, Schnurer J, Clarholm M, Torben A, Bonde, Rosswall T. Microbial biomass in relation to C and N mineralization during laboratory incubations [J]. *Soil Biol Biochem*, 1988, **20** (3): 281-286
- Sitaula BK, Bakken LR. Nitrous oxide release from spruce forest soil: relationships with nitrification, methane uptake, temperature, moisture and fertilization [J]. *Soil Biol Biochem*, 1993, **25** (10): 1415-1421
- Kessel CV, Pennock DJ, Farrell RE. Seasonal variations in denitrification and nitrous oxide evolution at the landscape scale [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1993, **57** (4): 988-995
- 梁东丽, 同延安, Emteryd, 方日尧, 张树兰. 干湿交替对旱地土壤 N_2O 气态损失的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2002, **20** (2): 28-31 [Liang DL, Tong YA, Emteryd, Fang RY, Zhang SL. The effects of wetting and drying cycles on N_2O emission in dryland [J]. *Agric Res Arid Areas*, 2002, **20** (2): 28-31]
- 杨岩, 孙钦平, 李吉进, 刘春生, 刘本生, 许俊香. 不同水肥处理对设施菜地 N_2O 排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, **19** (2): 430-436 [Yang Y, Sun QP, Li JJ, Liu CS, Liu BS, Xu JX. Effects of different fertilizer and irrigation levels on N_2O emission from greenhouse vegetable lands [J]. *Plant Nutr Fertil Sci*, 2013, **19** (2): 430-436]
- 韩方虎, 沈禹颖, 王希, 周少平, 杨静, 耿丽英. 苜蓿草地土壤氮矿化的研究[J]. 草业学报, 2009, **18** (2): 11-17 [Han FH, Shen YY, Wang X, Zhou SP, Yang J, Geng LY. Nitrogen mineralization in alfalfa stands [J]. *Acta Pratacult Sin*, 2009, **18** (2): 11-17]
- Heichel GH, Barnes DK, Vance CP. Nitrogen fixation of alfalfa in the seeding year [J]. *Crop Sci*, 1981, **21** (2): 330-335
- 杨菁. 不同种植年限人工苜蓿草地土壤氮储量及氧化亚氮排放通量研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2014 [Yang J. Research on soil nitrogen storage and N_2O flux characteristics of artificial alfalfa grassland with different planting years [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2014]
- 曾庆飞, 贾志宽, 韩清芳, 刘玉华, 徐玉霞. 施肥对苜蓿生产性能及品质影响的研究综述[J]. 草业科学, 2005, **22** (7): 8-15 [Ceng QF, Jia ZK, Han QF, Liu YH, Xu YX. Review on the effect of fertilization on the production and quality of alfalfa [J]. *Pratacult Sci*, 2005, **22** (7): 8-15]
- 贾明升, 王晓君, 陈少华. 垃圾填埋场 N_2O 排放通量及测定方法研究进展[J]. 应用生态学报, 2014, **25** (6): 1815-1824 [Jia MS, Wang XJ, Chen SH. Nitrous oxide emissions from municipal solid waste landfills and its measuring methodology: a review. *Chin J Appl Ecol*, 2014, **25** (6): 1815-1824]
- 王涛, 周莹, 王先之, 沈禹颖. 黄土高原旱塬区陇东苜蓿草地 N_2O 释放动态及微生物驱动因子的研究[J]. 西北植物学报, 2013, **33** (10): 2113-2119 [Wang T, Zhou Y, Wang XZ, Shen YY. N_2O emission dynamics and its microbial mechanism of a 3-year-old alfalfa grassland in the arid loess plateau [J]. *Acta Bot Bor-occid Sin*, 2013, **33** (10): 2113-2119]
- 谢应忠, 徐坤. 不同种植年限人工苜蓿地土壤 N_2O 排放通量[J]. 生态学杂志, 2015, **34** (5): 1211-1217 [Xie YZ, Xu K. Soil N_2O flux from artificial alfalfa in different planting years. [J] *Chin J Ecol*, 2015, **34** (5): 1211-1217]
- 杨园园, 高志岭, 王雪君. 有机、无机氮肥施用对苜蓿产量、土壤硝态氮和温室气体排放的影响[J]. 应用生态学报, 2016, **27** (3): 822-828 [Yang YY, Gao ZL, Wang XJ. Impacts of organic and inorganic fertilizations on alfalfa yield, soil nitrate and greenhouse gas emissions [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2016, **27** (3): 822-828]
- 李渊, 王涛, 周莹, 杨倩, 沈禹颖. 3种栽培草地 N_2O 释放通量季节动态的研究[J]. 草地学报, 2015, **23** (4): 703-709 [Li Y, Wang T, Zhou Y, Yang Q, Shen YY. Research on N_2O emission fluxes of cultivated grassland in growing seasons [J]. *Acta Agrestia Sin*, 2015, **23** (4): 703-709]
- 李渊, 王涛, 沈禹颖. 黄土高原苜蓿生长年限对草地 N_2O 释放通量的影响[J]. 干旱区研究, 2015, **32** (5): 869-874 [Li Y, Wang T, Shen YY. Influence of lucerne field growth years on nitrous oxide emission at the loess plateau [J]. *Arid Zone Res*, 2015, **32** (5): 869-874]
- 高亚琴, 黄高宝, 王晓娟, 马剑, 刘博, 黄涛, 李卿沛. 退耕土壤的碳、氮固存及其对 CO_2 、 N_2O 通量的影响[J]. 生态环境学报, 2009, **18** (3): 1071-1076 [Gao YQ, Huang GB, Wang XJ, Ma J, Liu B, Li QP. Soil carbon and nitrogen sequestration following cropland to forage grassland conversion and its effect to CO_2 and N_2O fluxes [J]. *Ecol Environ Sci*, 2009, **18** (3): 1071-1076]
- 韩思训. 氮素管理对紫花苜蓿产量及土壤 N_2O 和 CH_4 排放特征的影响研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2014 [Han SX. Impact of nitrogen management on alfalfa yield, N_2O and CH_4 emission [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2014]
- Wang D, Chen ZL, Wang J, Xu SY, Yang HX, Chen H, Yong LY, Hu LZ. Summer-time denitrification and nitrous oxide exchange in the intertidal

- zone of the Yangtze Estuary [J]. *Estuarine Coastal Shelf Sci*, 2007, **73** (1): 43-53
- 29 Chapuis Lardy L, Wrage N, Metay A, Chotte JL Bernou M. Soils, a sink for N₂O? A review [J]. *Global Change Biol*, 2007, **13** (1): 1-17
- 30 Yu ZJ, Li YJ, Deng HG, Wang DQ, Chen ZL, Xu SY. Effect of *Scirpus mariqueter* on nitrous oxide emissions from a subtropical monsoon estuarine wetland [J]. *J Geophys Res Biogeosci*, 2015, **117** (G2): 2017
- 31 胡腾, 同延安, 高鹏程, 高兵, 巨晓棠. 黄土高原南部旱地冬小麦生长期N₂O排放特征与基于优化施氮的减排方法研究[J]. 中国生态农业学报, 2014, **22** (9): 1038-1046 [Hu T, Tong YA, Gao PC, Gao B, Ju XT. N₂O emission characteristics and mitigation methods in South Loess Plateau under rain-fed winter wheat conditions [J]. *Chin J Eco-Agricult*, 2014, **22** (9): 1038-1046]
- 32 梁国庆, 周卫, 夏文建, 王秀斌, 孙静文, 李双来, 胡城, 陈云峰. 优化施氮下稻-麦轮作体系土壤N₂O排放研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, **16** (2): 304-311 [Liang GQ, Zhou W, Xia WJ, Wang XB, Song JL, Li SL, Hu C, Chen YF. Effect of optimized nitrogen application on N₂O emission from paddy field under wheat-rice rotation system [J]. *Plant Nutr Fertil Sci*, 2010, **16** (2): 304-311]
- 33 王旭燕, 张仁陟, 蔡立群, Yeboth S, 罗珠珠, 李玲玲, 谢军红. 不同施氮处理下旱作农田土壤CH₄、N₂O气体排放特征研究[J]. 环境科学学报. 2015, **35** (11): 3655-3661 [Wang XY, Zhang RZ, Cai LQ, Stephen Yeboth, Lu ZZ, Li LL, Xi JH. Emission characteristics of CH₄ and N₂O fluxes from dry land field under different nitrogen treatments [J]. *Acta Sci Circumst*, 2015, **35** (11): 3655-3661]
- 34 梁东丽, 同延安, Ove E, 李生秀, 方日尧, 张树兰. 灌溉和降水对旱地土壤N₂O气态损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, **8** (3): 298-302 [Liang DL, Tong YA, Ove Emteryd, Fang RY, Zhang SL. Effect of irrigation and rainfall on the N₂O losses in dryland [J]. *Plant Nutr Fertil Sci*, 2002, **8** (3): 298-302]
- 35 Maag M, Vinther FP. Effect of temperature and water on gaseous emissions from soils treated with animal slurry [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1999, **63** (4): 858-865
- 36 徐文彬, 刘广深, 刘维屏. 降雨和土壤湿度对贵州旱田土壤N₂O释放的影响[J]. 应用生态学报, 2002, **13** (1): 67-70 [Xu WB, Liu GS, Liu WP. Effects of precipitation and soil moisture on N₂O emissions from upland soils in Guizhou [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2002, **13** (1): 67-70]
- 37 吴得峰, 姜继韶, 孙棋棋, 王蕊, 李如剑, 王志齐, 刘洪星, 崔全红, 郭胜利, 党廷辉, 巨晓棠. 减量施氮对雨养区春玉米产量和环境效应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35** (6): 1202-1209 [Wu DF, Jiang JS, Sun QQ, Wang R, Li, RJ, Wang ZQ, Liu HX, Cui QH, Guo SL, Dang YH, Ju XT. Effect of reduced nitrogen fertilization on spring maize production and environment impact in rain-fed areas [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2016, **35** (6): 1202-1209]
- 38 Borken W, Matzner E. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils [J]. *Global Change Biol*, 2009, **15** (4): 808-824