

紫色土夏玉米–冬小麦轮作农田的 NO 排放特征

胡廷旭^{1,2,3}, 刘 韵^{1,2,3}, 柯 韵^{1,4}, 朱 波^{1,2*}

(1.中国科学院山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041; 2.中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.西南交通大学, 成都 610031)

摘 要:利用紫色土养分循环长期定位研究平台,通过静态箱–气袋采气–化学发光氮氧化物分析仪观测了紫色土夏玉米–冬小麦轮作周期的 NO 周年排放特征。结果表明,施肥促发紫色土 NO 的峰值排放,玉米与小麦季的土壤 NO 排放峰值均出现在施肥后 20 d 内。常规夏玉米–冬小麦轮作条件下 NO 年累积排放通量为 0.450 kg N·hm⁻²,其中玉米季的 NO 累积排放通量为 0.200 kg N·hm⁻²,排放系数为 0.13%,小麦季的 NO 累积排放通量为 0.250 kg N·hm⁻²,排放系数为 0.20%。玉米季的 NO 排放速率与土壤表层温度呈指数响应关系,小麦季与温度关系不明显。土壤湿度对于玉米季常规施肥条件下 NO 的排放有显著的响应关系。种植作物的土壤较裸地的 NO 排放通量都有不同程度的降低。

关键词:NO 排放;玉米–小麦轮作;紫色土;施肥

中图分类号:X511 文献标志码:A 文章编号:1672–2043(2015)07–1407–07 doi:10.11654/jaes.2015.07.025

Characteristics of NO Emissions from Purple Soil Under Summer Maize–Winter Wheat Rotation

HU Ting-xu^{1,2,3}, LIU Yun^{1,2,3}, KE Yun^{1,4}, ZHU Bo^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Static–gas collection technique combined with chem–luminescent analyzer was used to measure NO emitted from agro–ecosystem of purple soil under summer maize–winter wheat rotation during June 2013 to May 2014. Long term synthetic NPK fertilizer (NPK) and no fertilizer treatments (CK) were used to calculate NO emission factor (EF) induced by N fertilization. Fertilization was the cause of NO emissions in both maize and wheat seasons. The NO emissions reached peak 20 days after fertilization, and then decreased and maintained at low fluxes during the rest period of the season. The cumulative NO emissions during whole maize–wheat rotation was 0.450 kg N·hm⁻², of which the maize season accounted for 0.200 kg N·hm⁻² with EF of 0.13% while the wheat season was 0.250 kg N·hm⁻² with EF of 0.20%. There was significant relationship between NO emission flux and soil temperature and soil moisture in the maize season, whereas no relationship was found in the wheat season. This may imply complicated influencing factors of soil NO emissions. Plant growth reduced NO emissions compared to bare soil due to the N absorption by plants.

Keywords: NO emission; maize–wheat rotation; purple soil; synthetic NPK fertilization

NO 可与大气 O₃ 发生反应,生成 NO₂ 和 O₂,破坏大气臭氧层^[1],亦可在对流层中被氧化成亚硝酸和硝酸,通过干湿沉降过程促进生态系统的酸化和富营养化^[2],是大气化学反应过程中比较活跃的一种活性氮

气体。NO 来源有多种,而农田生态系统作为陆地生态系统的重要组成也相应成为全球 NO 排放源的重要组成部分^[3]。随着化肥使用量的增多,农田生态系统所排放的 NO 量也越来越多,有研究表明,耕地的 NO 年排放约为 1.4×10⁶ t N,约是全球土壤 NO 排放总量的 18%^[4]。但是农业土壤的 NO 排放研究仍略显薄弱,全球近一半的土壤尚无 NO 排放观测数据,因此亟需开展不同类型土壤以及不同耕作模式下的 NO 排放观测研究^[5–6]。

中国作为高施肥农业区,这方面的观测数据更为

收稿日期:2015–02–02

基金项目:国家重点基础研究计划项目(2012CB417101);国家自然科学基金项目(41271321)

作者简介:胡廷旭(1990–)男,江苏徐州人,硕士研究生,主要从事农田氮素面源污染研究。E-mail:1014432151@qq.com

* 通信作者:朱 波 E-mail:bzhu@imde.ac.cn

缺乏。现已知少数研究结果主要出自华北、华东、晋南的农业生态系统,作物以小麦、水稻和蔬菜为主。紫色土由亚热带紫色页岩和砂页岩母质风化而成,具有风化成土快、土层浅薄、有机质含量低但矿质养分丰富等特点,是我国西南地区最重要的农耕土壤^[7]。紫色土主要分布在西南低山丘陵区,农业利用以旱作为主,轮作方式主要以夏玉米-冬小麦为主,近20年来,该区农业依据较高的化肥用量而有了较大的发展,过量的氮肥使用导致农田氮素收支不平衡,从而提高了环境中氮素物质的环境风险。关于紫色土坡耕地氮素的径流损失^[8-10]、氧化亚氮气体损失^[11-12]及本区的氮挥发损失^[13]已有大量研究,但紫色土农田的NO排放过程与通量到目前为止尚无研究报道。因此,本文通过静态箱-气袋采气-化学发光氮氧化物分析法研究了紫色土夏玉米-冬小麦常规轮作条件下农田NO的排放特征和环境因素,旨在为本区NO排放评估和活性氮污染物的整体减排提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

野外观测试验在中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站(105°27'E, 31°16'N)的养分循环试验平台上开展,试验点位于四川盆地中部丘陵区的四川省盐亭县林山乡,海拔460 m,具有四川盆地亚热带湿润季风典型气候特征,气候温和,四季分明,年均温17.3℃,极端最高气温40℃,极端最低气温-5.1℃;多年平均降雨量830 mm,且分布不均,春季占5.9%,夏季占65.5%,秋季占19.7%,冬季占8.9%;汛期暴涨暴落,无霜期294 d。土壤以石灰性紫色土为主,农作物一年两熟有余,冬季普遍种植冬小麦和油菜,夏季以玉米为主。观测期内降雨1211 mm,属丰水年,春、夏、秋、冬季降雨量占比分别为8%、67%、23%和2%。

1.2 供试土壤

野外试验土壤为发育于侏罗系蓬莱镇组紫色页岩的石灰性紫色土,0~20 cm表层土壤基础理化性质为:pH8.2,有机质8.75 g·kg⁻¹,全氮0.81 g·kg⁻¹,全磷0.84 g·kg⁻¹,全钾18.01 g·kg⁻¹,碱解氮42.29 mg·kg⁻¹,速效磷9.02 mg·kg⁻¹,速效钾86.35 mg·kg⁻¹;土壤容重1.34 g·cm⁻³,黏粒含量22.3%,粉粒含量34.6%,砂粒43.1%。

1.3 观测实验设计

利用紫色土养分循环长期研究平台的常规施肥(NPK)和无肥对照(CK)处理,在两种施肥方式下均设置有植株和无植株两种采样方式,每个处理均设

3个田间重复。NPK处理的氮肥为碳酸氢铵(纯N 17%),玉米季和小麦季的施用量分别为150、130 kg N·hm⁻²,磷肥为过磷酸钙(含P₂O₅ 12%),钾肥为氯化钾(含K₂O 60%),磷钾肥在玉米和小麦季的施用量均为90 kg P₂O₅·hm⁻²和36 kg K₂O·hm⁻²。施肥方式采用翻耕后一次性基肥施肥,玉米季为穴施施肥播种,小麦季采用撒施施肥播种,耕作方式均为人工耩耕,耩耕深度为20 cm。耕作施肥和播种同时进行。夏玉米季为2013年6月1日至2013年9月16日,冬小麦季为2013年10月28日至2014年5月15日。

1.4 气体的采集、分析和相关计算

NO气体的采集与分析采用静态箱-气袋采气-化学发光氮氧化物分析方法。静态采样箱用不锈钢薄板制造,均由底座、中箱和顶箱组成,采气时以水封法进行密封。箱体外侧包有塑料泡沫保温层,以控制采样期间箱内温度变化幅度在3℃以下。在扣上顶箱后利用空气压缩机抽取箱内气体植入气袋,静待40 min后采取同样的方法抽取另一气袋,两组气袋带回实验室后进行氮氧化物分析,机器型号为(Thermo-Model 42i),通过前后气体浓度差值方法计算排放速率。采样频率:施肥后第一周为每天1次,第二周为隔天一次;其他时期为每周2次。在每次采气的同时,同步观测土壤表层温度(JM624 便携式测温计)和土壤孔隙充水率WFPS(% ,烘干法)。

通过NO浓度随时间的变化来计算单位面积的气体排放通量,即NO的排放速率,计算公式^[14]如下:

$$F = \frac{M}{V_0} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot H \cdot \frac{dc}{dt} \cdot k \quad (1)$$

式中: F 为土壤NO排放速率,μg·m⁻²·h⁻¹; M 为气体的摩尔质量,g·mol⁻¹; V_0 为标准状态下(温度273 K,气压1013 hPa)气体的摩尔体积,22.41×10⁻³ m³; T_0 和 P_0 分别为标准状态下的气温(273 K)和气压(1013 hPa); P 为采样点的气压,hPa; T 为采样时箱内的平均气温,K; dc/dt 为采样箱内NO浓度变化速率; H 为采样箱的高度,cm; k 为量纲转换系数。

NO的累积排放量是根据作物生长期NO的排放速率,将观测值和未观测日内插法计算值逐日累加后得到NO的累积排放量。计算公式^[14]如下:

$$E = k \sum_{i=2}^{n+1} [X_{i-1} + \Delta t \cdot (X_{i-1} + X_i)/2] \quad (2)$$

式中: E 代表NO排放量,kg N·hm⁻²; k 为量纲换算系数; X_i 为第*i*天NO的日排放通量值,mg N·m⁻²·d⁻¹,将小时排放通量(μg·m⁻²·h⁻¹)乘以24 h而转换成日排

放通量; Δt 为相近两次日排放通量值之间间隔的天数; $d; n$ 为小麦生长期有效日排放通量观测值的天数, d 。

NO 排放系数利用以下公式^[14]计算得到:

$$\text{NO 排放系数} = \frac{T_n - T_{ck}}{\text{氮肥施用量}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: T_n 为施肥后 NO 排放量, $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$; T_{ck} 为对照不施氮肥的 NO 排放量, $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$; 氮肥施用量的单位为 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

2 结果与讨论

2.1 紫色土夏玉米-冬小麦轮作农田的 NO 排放动态

观测表明(图 1),NO 排放峰值从施肥后第一天出现,至施肥后 20 d 内均呈现明显的峰值排放,玉米季呈多峰,小麦季为单峰,施肥 20 d 以后 NO 排放急剧下降并在整个玉米、小麦季维持与无肥对照相似的较低排放水平。夏玉米季的 NO 最大出峰时间出现在施肥后的第 7 d,达到 $64.01 \mu\text{g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$;而小麦季的最大出峰时间出现在施肥后的第 11 d,达到 $82.54 \mu\text{g N} \cdot$

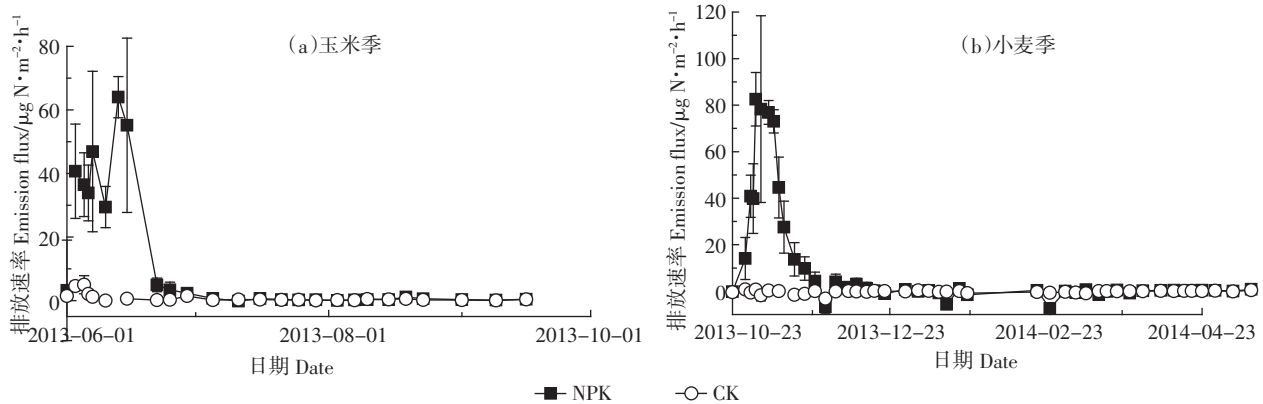
$\text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。小麦季峰值出现的时间比玉米季晚一些,相应空白对照样地未表现出明显的 NO 排放峰值。

可见施肥明显促发农田土壤的 NO 排放,这主要是因为施用氮肥可以提高土壤有效氮的含量,刺激硝化和反硝化反应的发生。Mei 等^[15]在蔬菜地研究中发现,施氮小区的 NO 排放通量平均为未施氮小区的 21 倍,NO 排放高峰出现在刚施肥后不久。蒙世协等^[16]对晋南地区的灌溉棉田研究表明,在 $27 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的尿基型氮素使用条件下,NO 的排放通量范围为 $-6.7 \sim 77.0 \mu\text{g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,其相应不施肥处理的 NO 排放通量范围为 $-6.7 \sim 26.6 \mu\text{g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。紫色土对照不施肥处理在玉米和小麦季均没有明显的 NO 排放峰。可见 NO 的排放受施肥效应的影响明显,但不同的土壤条件下 NO 排放通量具有很大的区别,所以针对不同土壤类型的农田 NO 排放研究很有必要。

2.2 紫色土夏玉米-冬小麦轮作农田的 NO 累积排放

2.2.1 NO 的累积排放通量

表 1 列出了玉米-小麦轮作周期中作物生长季和周年的 NO 累积排放量。夏玉米-冬小麦轮作季周年



NPK 表示常规施肥,CK 表示无肥对照。下同

图 1 紫色土玉米-小麦轮作周期的 NO 排放动态

Figure 1 Dynamics of NO emissions during maize-wheat rotation

表 1 紫色土夏玉米-冬小麦轮作系统的 NO 累积排放量和排放系数

Table 1 Cumulative emission fluxes and emission factor of NO in summer maize-winter wheat rotation system

项目	处理 Treatment	累积排放量/ $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$					排放系数 Emission factor/%
		春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	累计 Total	
夏玉米	NPK	—	0.200	0.000	—	0.200	0.13
Maize-season	CK	—	0.010	0.002	—	0.012	
冬小麦	NPK	0.010	—	0.260	-0.020	0.250	0.20
Wheat-season	CK	0.000	—	-0.006	-0.005	-0.011	
合计	NPK	0.010	0.200	0.260	-0.020	0.450	0.16
Total	CK	0.000	0.010	-0.004	-0.005	0.001	

注:NPK 表示常规施肥,CK 表示无肥对照。

NO 累积排放量为 $0.450 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中: 夏玉米季常规施肥处理的 NO 累积排放量为 $0.200 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$, 无肥对照处理的 NO 累积排放量为 $0.012 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$; 冬小麦季常规施肥处理的 NO 累积排放量达到 $0.250 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$, 无肥对照的 NO 累积排放量为 $-0.011 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。而春、夏、秋、冬季常规施肥处理的 NO 累积排放通量分别为 0.010 、 0.200 、 0.260 、 $-0.020 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$, 无肥对照处理的 NO 累积排放量季节分配相应为 0.000 、 0.010 、 -0.004 、 $-0.005 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。可见夏秋季的 NO 排放占较大比重, 春冬季贡献较小, 冬季 NO 出现负排放, 可能冬季紫色土农田吸收 NO。郑循华等^[17]在华东小麦试验田中也得到类似的 NO 季节排放特征。

而王霆宇^[18]在晋南盐碱地的夏玉米-冬小麦轮作农田观测表明 NO 季节排放特征为春夏高和秋冬低, 与本研究结果略有不同。这主要是由于当地春季条施尿素所致, 也间接说明施肥对于农田 NO 排放的重要影响。晋南地区的全年 NO 累积排放通量达到 $2.7 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较紫色土累积排放高出 6 倍。这可能与施肥品种和土壤条件有关, 紫色土区通常使用碳铵化肥, 而且 pH 较高, 氨挥发强烈, 氮素以氨挥发损失偏多, 而且淋溶量高, 导致土壤累积的氮素偏低而减少了土壤 NO 的产生。

2.2.2 排放系数

紫色土小麦-玉米轮作系统的 NO 排放系数为 0.16% , 其中夏玉米季的 NO 排放系数为 0.13% , 冬小麦季的 NO 排放系数为 0.20% (表 1), 冬小麦季的 NO 排放系数高于夏玉米季。蒙世协等^[16]对于晋南使用尿素棉田的研究表明 NO 的排放系数达 0.22% 。Ane 等^[19]在大麦生长期测得的 NO 排放系数为 0.038% 。王霆宇等^[18]对晋南盐碱地的夏玉米冬小麦农业土壤进行研究发现, 其周年 NO 排放系数达 0.68% , 土壤

背景排放值甚至达到 $0.25 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$, 远高于本文对紫色土的研究结果。可见 NO 的排放具有非常突出的时空异质特点, 不同时间、不同土壤及不同管理方式均可能导致排放的显著差异。

2.3 紫色土夏玉米-冬小麦轮作农田 NO 排放的主要影响因素

2.3.1 土壤温度对紫色土农田 NO 排放的影响

玉米季土壤平均温度 25°C , 最高温为 28.9°C (出现在 8 月 19 日), 最低温为 20.35°C (出现在 9 月 9 日)。在施肥后的两周时间内, 农田 NO 的排放主要受到施肥的影响, 对温度变化的响应不明显。在两周后至玉米季结束的这段时间, 对土壤温度与 NO 排放速率进行指数拟合 (图 2), 结果表明常规施肥处理条件下土壤温度 $T(^{\circ}\text{C})$ 与排放速率 $p(\mu\text{g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$ 有较好的相关性:

$$p = 0.26 + 0.0003 \exp(0.714T) \quad (R^2 = 0.59, P = 0.12)$$

同样, 无肥对照样地也具有类似的指数关系:

$$p = 0.29 + 0.0012 \exp(0.577T) \quad (R^2 = 0.55, P = 0.02)$$

小麦季平均温度 10.0°C , 最高温为 18.7°C (出现在 5 月 5 日), 最低温为 2°C (出现在 1 月 22 日)。统计分析表明 NO 排放速率与土壤温度无显著相关, 与其他地区^[20-22]的结论有所不同。

土壤温度主要通过影响有机质的分解速率、微生物的反应速率和土壤气体扩散速率而影响 NO 的释放。NO 主要产生于土壤硝化作用和反硝化作用过程, 而微生物酶的活性在一定范围内随着温度的增加而呈指数增加^[23], 这也导致了农田土壤 NO 排放与土壤温度的指数相关性, 很多研究都得到了相似的结论。本文玉米季的数据也支持这一观点, 但是小麦季并没有观测出相似的结论, 可能是由肥料种类的不同或者较为干旱的田间条件导致的^[24]。另外, 蒙世协等^[16]

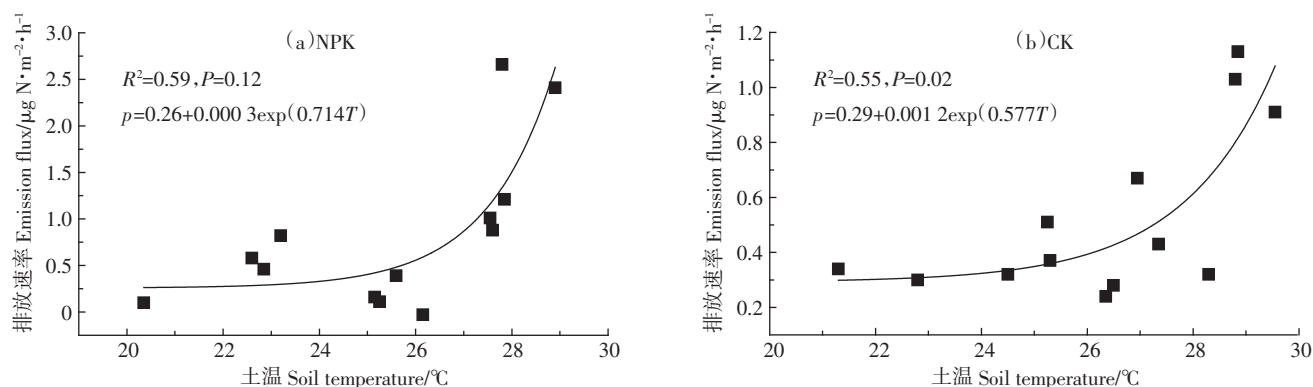


图2 玉米季 NO 排放速率与表层土温关系

Figure 2 Relationship between NO emission flux and soil temperature in maize season

指出棉田无氮对照条件的 NO 排放与土壤温度具有 $p=5.69+0.33T$ 的线性关系,与本实验结果相差较大。紫色土空白小区的 NO 排放都维持在一个较低的水平上,对于温度的响应不明显。这也表明不同类型土壤的农田 NO 排放特征是不同的。

2.3.2 土壤湿度对紫色土农田 NO 排放的影响

在玉米季常规施肥处理,观测到土壤孔隙充水率与 NO 排放速率的显著负相关(图 3),土壤湿度(x)和 NO 排放速率(p)存在如下拟合关系:

$$p=-11.6\ln(0.24\ln x)(R^2=0.47, P=0.002)$$

可见土壤湿度是决定土壤 NO 排放速率的另一个主要因素。而整个小麦季的 NO 排放与土壤湿度之间无显著相关,也没有表现出 NO 排放峰值特征,说明 NO 排放与土壤湿度的关系较为复杂。土壤湿度可从多个角度影响农田 NO 排放,比如土壤含水量影响土壤通气性、氧化还原电位、土壤有效氮(NH_4^+ 、 NO_3^- 等)分布及其对微生物的有效性等^[25]。土壤湿度和 NO 排放之间具有较为复杂的关系^[26],有些研究基于土壤水分对硝化与反硝化细菌活性的影响认为土壤湿度在较低水平上促进土壤 NO 的排放,在较高水平上抑制土壤 NO 的排放。但是不同土壤和不同肥料条件下湿度对 NO 排放峰值的影响也具有比较明显的差异,其变化范围一般介于 15%~65%^[27]。有研究指出,当土壤类型一定的情况下最大 NO 排放对应最适土壤湿度,而与土壤温度无关^[28]。本文的观测数据表明,紫色土农田 NO 排放与土壤湿度之间存在显著的负相关,在湿度范围内没有出现 NO 的排放峰值,可能是紫色土产生 NO 的最适土壤湿度值低于观测湿度值所导致的。

由于试验期间为丰水年份,玉米季降雨较多,土

壤湿度相对以往年份较大,玉米季低土壤水分条件下的 NO 排放数据缺乏。而在冬小麦季,温度对微生物活性产生影响,导致 NO 出现负排放现象,土壤湿度对 NO 排放的影响不明显。可见农田土壤 NO 排放是一个较为复杂的过程,受到多种因素的制约,有关土壤湿度对紫色土农田土壤 NO 排放的影响还需要进行进一步的研究。

2.3.3 作物生长对紫色土 NO 排放速率的影响

在夏玉米季,常规施肥条件下有植株生长时 NO 累积排放量为 $0.200 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$,而对应裸地的 NO 的累积排放量为 $0.230 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图 4)。在冬小麦季,常规施肥条件下有植株生长时 NO 累积排放量为 $0.250 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$,相应裸地的 NO 的累积排放量达到 $0.270 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。说明无植株土壤 NO 累积排放量高于有植株土壤,无肥对照处理的 NO 累积排放量也呈现类似的特点(图 4)。

作物生长改变了土壤的氮素循环,从而间接影响土壤 NO 的排放,但有关于植物对土壤 NO 排放影响的研究并不多见。有研究表明砍掉植物地上部之后,农田土壤的 NO 排放通量会提高 2~6 倍,作者认为这是由于 NO 性质不稳定,植物冠层对土壤 NO 气体的排放具有阻碍作用,使其在向大气的排放过程中被氧化^[29]。本文的数据也显示有植株处理的 NO 累计排放通量小于无植株处理,但是考虑到农田 NO 排放高峰期主要位于施肥后两周内,这一时期玉米和小麦幼苗基本无覆盖冠层,所以不能肯定所减少的 NO 排放通量是来自于冠层的阻碍作用,很有可能是作物生长利用了土壤氮素养分从而减少了土壤 NO 排放。关于不同作物生长对土壤 NO 产生过程的影响还需要进一步研究。

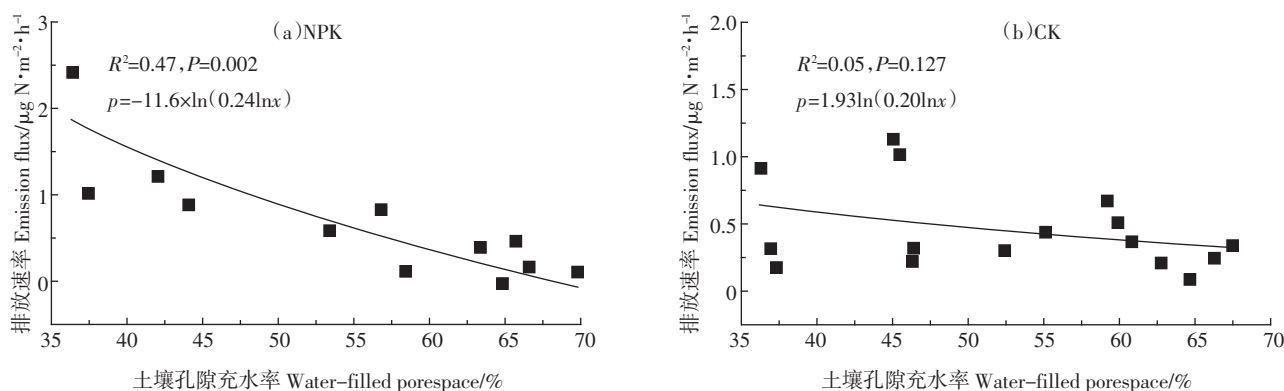


图 3 玉米季 NO 排放速率与土壤孔隙充水率的关系

Figure 3 Relationship between NO emission flux and water-filled porespace in maize season

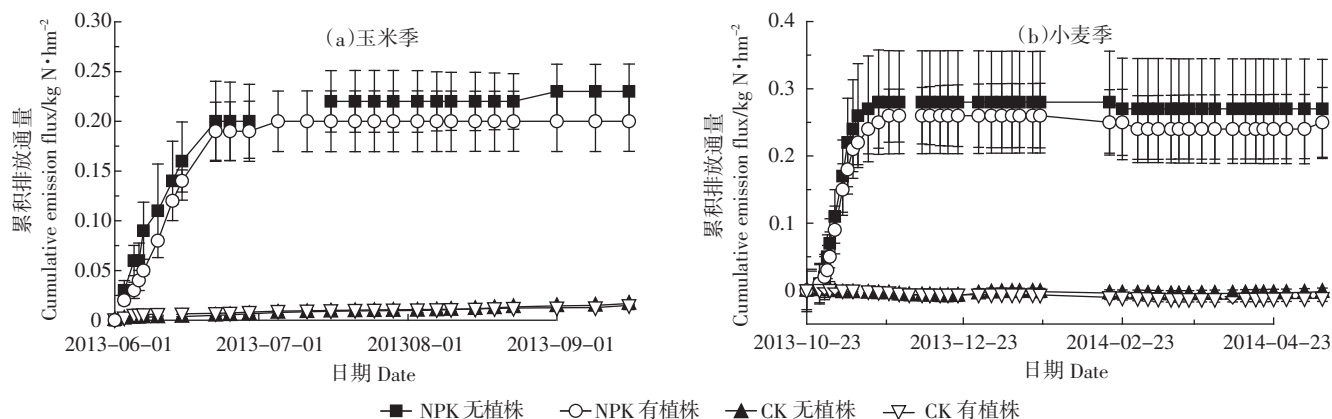


图4 作物生长对紫色土农田 NO 排放的影响

Figure 4 Effects of plant growth on NO emissions in purple-soil farmland

3 结论

施肥促发紫色土冬小麦-夏玉米农田 NO 排放,在施肥后的 20 d 里,NO 排放速率呈现急剧增加又迅速减少的特点,随后一直维持较低的水平。玉米生长季,土壤温度对 NO 的排放具有指数影响,小麦季土壤温度对 NO 排放影响不显著。玉米季土壤湿度与 NO 的排放具有显著负对数关系,小麦季土壤湿度对 NO 的排放影响不显著。试验处于丰水年份,不论是夏玉米季还是冬小麦季,温度和湿度对 NO 的排放影响都没有峰值出现。作物生长吸收土壤活性氮,从而较无植株土壤减少 NO 排放,不同作物生长对土壤 NO 排放的影响有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] Slemr F, Seiler W. Field study of environmental variables controlling the NO emissions from soil and the NO compensation point[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1991, 96(D7): 13017-13031.
- [2] 曹彦圣, 田玉华, 尹斌, 等. 农业土壤 NO 排放研究进展[J]. *土壤*, 2013(5): 791-799.
CAO Yan-sheng, TIAN Yu-hua, YIN Bin, et al. Investigation on NO emission from agricultural soils[J]. *Soils*, 2013(5): 791-799.
- [3] Robertson G P. Fluxes of nitrous-oxide and other nitrogen trace gases from intensively managed landscapes: A global perspective[M]/Harper L A, Mosier A R, Duxbury J M, et al. *Agricultural Ecosystem Effects on Trace Gases and Global Climate Change*. Madison: American Society of Agronomy, 1993: 95-108.
- [4] 宋贺, 潘广元, 陈清, 等. 中国北方设施菜田垄-畦土壤 N₂O 和 NO 年排放特征比较[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(12): 2472-2477.
SONG He, PAN Guang-yuan, CHEN Qing, et al. Comparison of N₂O and NO emissions from ridged and furrowed soils in a greenhouse in Northern China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(12): 2472-2477.
- [5] Davidson E A, Herman D J, Schuster A, et al. Cattle grazing and oak trees as factors affecting soil emissions of nitric-oxide from an annual grassland[M]/Harper L A, Mosier A R, Duxbury J M, et al. *Agricultural Ecosystem Effects on Trace Gases and Global Climate Change*. Madison: American Society of Agronomy, 1993: 109-119.
- [6] Skiba U, Fowler D, Smith K, et al. Emissions of NO and N₂O from soils[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1994, 31(1-2): 153-158.
- [7] 李仲明, 张先婉, 何毓蓉. 中国紫色土[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 277.
LI Zhong-ming, ZHANG Xian-wan, HE Yu-rong. *Purple soils in China* [M]. Beijing: Science Press, 1991: 277.
- [8] 汪涛, 朱波, 罗专溪, 等. 紫色土坡耕地硝酸盐流失过程与特征研究[J]. *土壤学报*, 2010(5): 962-970.
WANG Tao, ZHU Bo, LUO Zhuan-xi, et al. Nitrate loss from sloping cropland of purple soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010(5): 962-970.
- [9] 徐勤学, 王天巍, 李朝霞, 等. 紫色土坡地壤中流特征[J]. *水科学进展*, 2010, 21(2): 229-234.
XU Qin-xue, WANG Tian-wei, LI Zhao-xia, et al. Characteristics of interflow in purple soil of hillslope[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(2): 229-234.
- [10] 朱波, 汪涛, 况福虹, 等. 紫色土坡耕地硝酸盐淋失特征[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(3): 525-533.
ZHU Bo, WANG Tao, KUANG Fu-hong, et al. Characteristics of nitrate leaching from hilly cropland of purple soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(3): 525-533.
- [11] 项虹艳, 朱波, 况福虹, 等. 氮肥施用对紫色土-玉米根系系统 N₂O 排放的影响[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(3): 413-420.
XIANG Hong-Yan, ZHU Bo, KUANG Fu-hong, et al. Effects of nitrogen fertilizer application on N₂O emission in a purple soil and maize root system[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(3): 413-420.
- [12] 李锡鹏. 川中丘陵区典型农田和森林土壤温室气体排放特征及影响因素[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
LI Xi-peng. *Farmland and forest soils typical greenhouse gas emissions characteristics and influencing factors in a hilly area* [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

- [13] 周明华. 紫色土坡耕地氮素平衡的模拟研究[D]. 成都: 中国科学院山地灾害与环境研究所, 2010.
- ZHOU Ming-hua. Modeling nitrogen balance in sloping cropland of purple soil[D]. Chengdu: Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [14] 柳文丽, 李锡鹏, 沈 茜, 等. 施肥方式对冬小麦季紫色土 N_2O 排放特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(9): 1029-1037.
- LIU Wen-li, LI Xi-peng, SHEN Xi, et al. Effects of fertilizer application regimes on soil N_2O emissions in the croplands of purple soil in the Sichuan basin during wheat season[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(9): 1029-1037.
- [15] Mei B L, Zheng X H, Xie B H, et al. Nitric oxide emissions from conventional vegetable fields in southeastern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(17): 2762-2769.
- [16] 蒙世协. 晋南地区典型灌溉棉田 N_2O 和 NO 的排放[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
- MENG Shi-xie. Emissions of nitrous oxide(N_2O) and nitric oxide(NO) from an irrigated cotton field in South Shanxi[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011.
- [17] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 华东稻麦轮作生态系统冬小麦田 NO 排放观测研究[J]. 应用生态学报, 2000(4): 577-581.
- ZHENG Xun-hua, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. NO emission from winter wheat fields of rice-wheat rotation ecosystem in southeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000(4): 577-581.
- [18] 王霆宇. 晋南地区盐碱地冬小麦-夏玉米轮作田的 NO 排放特征[D]. 太原: 山西大学, 2010.
- WANG Ting-yu. Characteristics of NO emission from typical saline soil of southern Shanxi winter wheat-summer maize rotation system[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2010.
- [19] Meijide A, Garcia L, Arce A, et al. Nitrogen oxide emissions affected by organic fertilization in a non-irrigated mediterranean barley field[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2009, 132(1-2): 106-115.
- [20] Ludwig J, Meixner X, Vogel B, et al. Soil-air exchange of nitric oxide: An overview of processes, environmental factors, and modeling studies[J]. *Biogeochemistry*, 2001, 52(3): 225-257.
- [21] Liu C Y, Zheng X H, Zhou Z X, et al. Nitrous oxide and nitric oxide emissions from an irrigated cotton field in Northern China[J]. *Plant and Soil*, 2010, 332(1-2): 123-134.
- [22] Pang X B, Mu Y J, Lee X Q, et al. Nitric oxides and nitrous oxide fluxes from typical vegetables cropland in China: Effects of canopy, soil properties and field management[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(16): 2571-2578.
- [23] Bouwman F, Boumans M, Batjes H. Modeling global annual N_2O and NO emissions from fertilized fields[C]//International Specialty Conference on Regional Photochemical Measurement and Modeling Studies. Sandiego, CA: Pergamon-Elsevier Science LTD, 2002.
- [24] Aneja V P, Robarge W P, Holbrook B D. Measurements of nitric oxide flux from an upper coastal-plain, North Carolina agricultural soil[J]. *Atmospheric Environment*, 1995, 29(21): 3037-3042.
- [25] 蔡延江, 丁维新, 项 剑. 农田土壤 N_2O 和 NO 排放的影响因素及其作用机制[J]. 土壤, 2012, 44(6): 881-887.
- CAI Yan-jiang, DING Wei-xin, XIANG Jian, et al. Factors controlling N_2O and NO emissions from agricultural soils and their influencing mechanisms: A review[J]. *Soils*, 2012, 44(6): 881-887.
- [26] 王 兵, 李心清, 程红光, 等. 土壤 NO_x 气体释放研究进展[J]. 土壤通报, 2011, 42(6): 1522-1529.
- WANG Bing, LI Xin-qing, CHENG Hong-guang, et al. Advance in the study of NO_x emission fluxes in soil[J]. *Journal of Soil Science*, 2011, 42(6): 1522-1529.
- [27] Schindlbacher A, Zechmeister B S, Butterbach B K. Effects of soil moisture and temperature on NO, NO_2 , and N_2O emissions from European forest soils[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(D17). doi: 10.1029/2004JD004590.
- [28] Yu J, Meixner F X, Sun W, et al. Biogenic nitric oxide emission from saline sodic soils in a semiarid region, northeastern China: A laboratory study[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(G04005). doi: 10.1029/2007JG000576.
- [29] Johansson C, Granat L. Emission of nitric oxide from arable land[J]. *Tellus*, 1984, 36: 25-37.