

DOI: 10.5846/stxb201308292169

于亚军, 王小国, 朱波. 成都平原水稻-小麦轮作系统 NO 排放及其主要影响因素. 生态学报, 2015, 35(9): 2910-2916.

Yu Y J, Wang X G, Zhu B. NO emission and its main impacting factors in rice-wheat rotation system in Chengdu Plain of Sichuan Basin. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9): 2910-2916.

成都平原水稻-小麦轮作系统 NO 排放及其主要影响因素

于亚军^{1,2,*}, 王小国², 朱 波²

1 山西师范大学地理科学学院, 临汾 041000

2 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041

摘要:应用静态暗箱-化学发光氮氧化物分析法对成都平原水稻-小麦轮作系统进行了 1.5 个轮作周期的 NO 排放定位观测, 分析了 NO 排放特征及施氮、土壤温度、土壤湿度和作物参与对 NO 排放的影响。结果表明: 成都平原水稻-小麦轮作系统在不施氮情况下, 表现为土壤 NO 负排放(吸收), 而施氮(N150kg/hm²)时 NO 排放通量为(5.5±3.3) μg m⁻² h⁻¹, 施氮能显著增加土壤 NO 排放量, 并且其效应在水热条件较好的水稻季更明显。整个观测期 NO 排放量有 56.1% 来自水稻季, 而 2 个小麦季和休闲期 NO 排放量分别占 32.5% 和 11.4%, 由于休闲期 NO 高排放主要是作物收获后的几次翻地引起的, 因此, 减少休闲期翻地次数可能会有效减少 NO 排放。土壤温度是影响 NO 排放的首要环境因素, 并且两者呈线性回归关系, 土壤湿度对 NO 排放的影响因土壤湿度本身状况而异, 土壤湿度条件较差时, 其增加有利于 NO 排放, 而当土壤湿度较好时会抑制 NO 排放。此外, 土壤水热条件还是造成 NO 负排放(吸收)和作物参与对水稻季和小麦季 NO 排放贡献有别的重要原因。

关键词: NO 排放; 水稻-小麦轮作系统; 影响因子; 土壤水热状况

NO emission and its main impacting factors in rice-wheat rotation system in Chengdu Plain of Sichuan Basin

YU Yajun^{1,2,*}, WANG Xiaoguo², ZHU Bo²

1 College of geography Sciences, Shanxi Normal University, Linfen 041000, China

2 Institute of mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

Abstract: Observation of NO emissions from a field under rice-wheat rotation was performed during the period from November, 2004 to May, 2006 using the static chamber method-chemiluminescence NO analyzer. Characteristics of the emissions and effects of the factors, such as N application, soil temperature, soil moisture and crops on the emissions were analyzed. Results show that in CK (No N applied) and in conventional fertilization (N was applied at rate of N150kg/hm²) the mean NO emission fluxes were (-0.8±2.1) μg m⁻² h⁻¹ and (5.5±3.3) μg m⁻² h⁻¹, respectively. N application increased NO emissions flux significantly, and increased more remarkably in rice season than in wheat seasons because of better soil hydrothermal condition in the rice season. About 56.1% of the total amount of NO emission came from rice season during the total research period, and NO emission in two wheat seasons and fallow season accounted for 32.5% and 11.4% of the total amount, respectively. Due to the high NO emissions come mainly from a few times plough in fallow season after crop harvest, therefore, plough times reduction might reduce NO emissions effectively in fallow season. Soil temperature is the key factor of NO emission flux, and its were linearly regressioned. Soil moisture increase will promoted the NO emission in

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41301304); 中国科学院知识创新工程课题(KSCX2-YW-N-46-11)

收稿日期:2013-08-29; **网络出版日期:**2014-08-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuyajun0211@126.com

wheat seasons, while in rice season, soil moisture increase inhibited NO emissions. At the same time, soil hydrothermal condition were reasons of soil NO negative emissions (soil absorption) and the difference contribution of crops participation on NO emissions of between rice season and two wheat seasons.

Key Words: NO emissions; rice-wheat rotation system; influencing factors; soil hydrothermal condition

NO 是一种可以直接或间接影响大气质量和破坏地球生态环境的活性气体^[1-2],其浓度变化备受关注。研究表明,土壤是全球 NO 排放的重要来源,而土壤排放中约有 41% 来自农业土壤^[3-4],并且其排放量的增加主要受土壤氮肥水平的驱动。尽管土壤是大气 NO 的一个主要来源已是公认的事实,但迄今为止对土壤 NO 排放的估算仍存在极大的不确定性^[5],而造成其估算不确定性的一个重要原因就是缺少系统的、具有代表性的土壤 NO 排放的观测数据^[6],我国氮肥用量约占全球用量的 25% 左右,因而研究我国农田土壤 NO 排放规律及减排措施十分必要。但是,我国现有关于 NO 排放的报道仍十分有限,特别是通过田间定位观测分析农田 NO 排放过程和规律性的研究更为少见,因而选取我国典型区域开展 NO 排放的田间定位观测十分必要。成都平原是我国轮作稻田的高产区,水稻-小麦轮作是该区主要的作物种植制度。所以,作者以成都平原水稻-小麦轮作系统为研究对象,在 2004 年 11 月至 2006 年 5 月对 1.5 个轮作周期(2 个小麦季,1 个水稻季及休闲期)NO 排放进行了田间定位观测,研究了该区稻田 NO 排放特征及施用氮肥、土壤湿度、温度和作物参与对 NO 排放的影响,为准确估算我国农田 NO 排放量提供基础数据,并为农田 NO 减排提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2004 年 11 月至 2006 年 5 月在成都市温江区(30°41'N, 103°48'E)进行,该区属亚热带湿润季风气候,冬无严寒,夏无酷暑,年均气温 15.2—16.6℃,年均降水量 873—1265mm,年日照时数 1017—1345h,地下水位多为 1.0—2.0m。试验为当地长期水稻-小麦轮作田,土壤类型为灰潮土,土壤容重为 1.31g/cm³,0—20cm 土层土壤黏粒(<0.002mm)、粉粒(0.002—0.05mm)和砂粒(>0.05 mm)含量分别为 6.0%、49.9%和 44.1%。pH 为 7.79,有机质及全 N、P、K 分别为 27.11、1.58、1.38 和 18.32 g/kg,速效 N、有效 P 和速效 K 分别为 129.59、22.65、56.42 mg/kg。

1.2 试验设计

试验设不施氮(CK)、常规施氮(NPK-C)和空地(NPK-NC;施肥同 NPK-C 处理,但不种作物,保持裸地)3 种处理,3 个随机重复。试验小区面积 2m×3m=6m²,每季作物氮肥(尿素)施用量为 N150kg/hm²,以 6:4 的比例分两次施用,施肥方式为表层撒施。并在每季作物播种或移栽前一次性施过磷酸钙(P₂O₅ 160kg/hm²)和氯化钾(K₂O 150kg/hm²),施肥后翻耕耙地。试验地 2004 年 11 月 9 日至 5 月 15 日,2005 年 5 月 28 日至 9 月 14 日和 2005 年 10 月 25 日至 2006 年 5 月 3 日分别为第一茬小麦季,水稻季和第二茬小麦季,2005 年 5 月 16 日至 5 月 27 日和 2005 年 9 月 15 日至 10 月 24 日分别为第一茬小麦收获后休闲期和水稻收获后休闲期。试验时水稻(品种为Ⅱ优-162,移栽时秧龄为 23d)栽植株、行距为 25cm×25cm,小麦(品种为绵阳 26)播种密度为 210 万株/hm²。试验田水稻季田间水分管理措施为:移栽—6 月 21 日、7 月 16 日—7 月 21 日、8 月 5 日—8 月 16 日均为持续淹水;6 月 22 日—7 月 15 日和 7 月 22 日—8 月 4 日为灌排交替;8 月 17 日—收获为排水晒田。

1.3 气体采样及分析方法

采用静态暗箱气袋采样-化学发光氮氧化物分析法对 NO 排放采样测定。采样箱的构造及田间设置方法与文献^[7]描述的一致。气体采样从作物播种或移栽后 1 周内开始,采样频率为每周 3 次,时间为每周一、三、五 9:00—11:00,具体采样方法、分析方法与文献^[8]描述的一致,NO 排放通量计算方法与文献^[9]描述的一致。

NO 排放总量的计算是先内插法计算因停电或偶尔发生仪器故障等原因造成的排放通量缺失数据,再根据观测期排放通量的平均值求得排放总量。气体采样同时采用与文献^[10]一样的方法测定试验地 0—5cm 土层土壤湿度(WFPS)和地下 5cm 处土壤温度。

2 结果与分析

2.1 水稻-小麦轮作系统 NO 排放特征

2.1.1 NO 排放的季节变化

从图 1a 可见,试验期间第一茬小麦季和第二茬小麦季地下 5cm 处土壤温度平均分别为 11.3℃ 和 10.6℃,而水稻季和休闲期平均分别为 23.9℃ 和 20.0℃;0—5cm 土层土壤湿度(WFPS)在 2 个小麦季平均分别为 35.6% 和 30.6%,而水稻季和休闲期平均分别为 42.7% 和 37.4%。可见,试验期间水稻季和休闲期水热状况总体优于两个小麦季。

从不施氮、空地和常规施氮处理 NO 排放通量的季节变化来看(图 1),整个观测期 3 种处理 NO 排放的季节变化趋势基本一致,均波动不大,波动主要由一些脉冲式排放峰和负排放组成,并且排放峰和高排放期更多的集中在水稻季。具体来看,3 种处理 NO 排放通量的季节变化存在差异,不施氮处理(图 1)整个观测期仅观测到 1 次大的排放峰和 2 次小的排放峰,并且排放峰主要出现在小麦播种、水稻移栽或休闲期翻地后,持续时间约 1 周左右。

空地和常规施氮处理(图 1)观测到的 NO 排放峰明显多于不施氮处理,并且峰值更高,两种处理分别观测到 2 次和 4 次大的排放峰和若干次小排放峰,大排放峰主要出现在施氮后(如空地处理在 2005 年 3 月 14 日和 10 月 28 日观测到的排放峰以及常规施氮处理在 2005 年 3 月 14 日和 6 月 9 日和 10 月 30 日观测到的排放峰),小排放峰主要出现在小麦播种、水稻移栽(如两种处理在 2004 年 11 月 9 日和 10 月 25 日观测到的排放峰)或休闲期翻地后(如两种处理在 2005 年 9 月 19 日观测到的排放峰),并且施氮后观测到的峰值大小和排放峰持续的时间均超过作物播种(移栽)或休闲期翻地后。据此认为,NO 排放峰出现的主要驱动因子是施氮、作物播种(移栽)或翻地等农事活动,并且排放峰和高排放期更多的出现在土壤水热状况较好的时期。

2.1.2 NO 排放通量和总量

从表 2 可见,常规施氮处理整个观测期 NO 平均排放通量为 $(5.5 \pm 3.3) \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$,其中作物季和休闲期分别为 $(6.1 \pm 4.3) \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 和 $(8.1 \pm 10.1) \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$,可见,休闲期 NO 平均排放通量稍高于作物季,但两者差异并不显著。不同作物季和休闲期 NO 排放通量表现为水稻季最高,其次为休闲期,2 个小麦季排放通量最低且相当。

表 2 常规施氮(NPK-C)处理水稻-小麦轮作系统 NO 排放通量、总量

Table 2 NO emission flux and total emission in rice-wheat rotation system under conventional fertilization (NPK-C)

观测期 Sampling period	观测天数 Sampling days/d	通量范围 Ranges of emission flux/ ($\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$)	平均排放通量 Emission flux/ ($\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$)	排放总量 Total emission/ (kg/hm^2)
第一茬小麦季 First wheat season	188	$(-18.5 \pm 2.4) - (101.3 \pm 44.8)$	1.9 ± 3.3 C	8.4 ± 15.5
水稻季 Rice season	108	$(-1.1 \pm 4.3) - (80.4 \pm 44.3)$	13.9 ± 6.3 A	36.0 ± 16.4
休闲期 Fallow *	33	$(-1.4 \pm 4.1) - (101.2 \pm 99.9)$	8.1 ± 10.1 B	7.0 ± 3.3
第二茬小麦季 Second wheat season	191	$(-49.8 \pm 10.1) - (248.2 \pm 29.3)$	2.7 ± 3.3 C	12.5 ± 15.2
整个观测期 Total sampling period	520	$(-49.8 \pm 10.1) - (248.2 \pm 29.3)$	5.5 ± 3.4	64.2 ± 10.6

同列不同大写字母上标表示数据间差异显著($P < 0.05$)

从不同作物季和休闲期 NO 排放总量来看,水稻季 NO 排放量占整个观测期排放总量的 56.1%,2 个小麦季和休闲期分别占 32.5% 和 11.4%。尽管休闲期排放量所占的比例不大,但休闲期时间远少于水稻季和 2 个

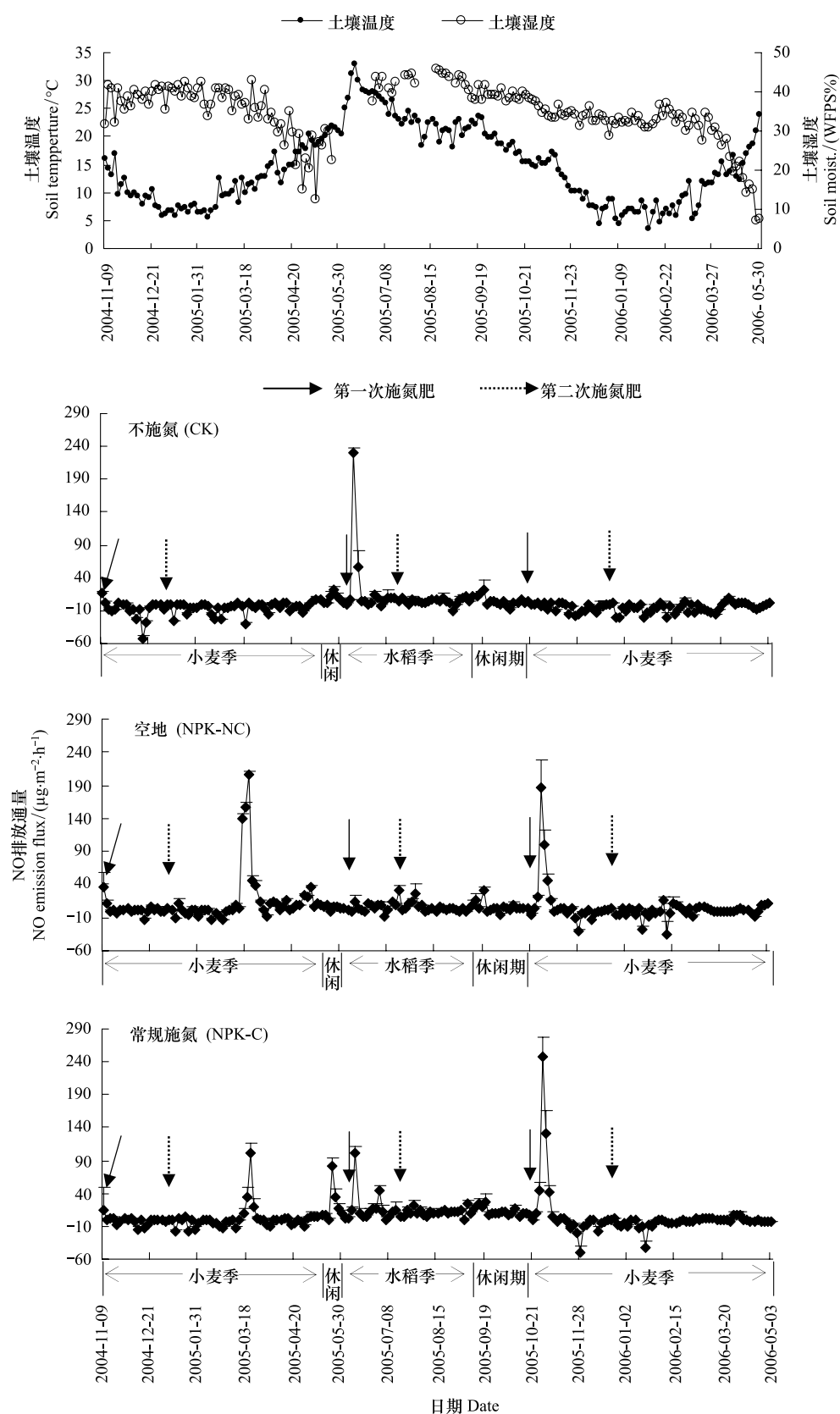


图1 水稻-小麦轮作系统土壤温度、土壤湿度和不施氮、常规施氮和空地处理 NO 排放通量的季节变化

Fig.1 Seasonal patterns of soil temperature, soil moisture and NO emission flux from rice-wheat rotation system of different treatments, i. e. control (CK), conventional fertilization (NPK-C) and no crop (NPK-NC)

小麦季,因此休闲期 NO 排放不容忽视。并且休闲期 NO 高排放主要是由第一茬小麦和水稻收获后的两次翻地引起的,所以,减少休闲期翻地次数可能会有效减少土壤 NO 排放。

2.2 NO 排放的影响因素

2.2.1 施氮

从图 2 可见,常规施氮处理整个观测期和 3 个作物季 NO 平均排放通量均显著高于不施氮处理 ($P < 0.01$),不施氮处理在整个观测期表现为土壤 NO 负排放,而常规施氮处理 NO 平均排放通量为 $(5.5 \pm 3.3) \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 。可见,施氮显著增加了 NO 排放 ($P < 0.01$)。但施氮增加 NO 排放量的效应在不同作物季表现有所不同。在 2 个小麦季,不施氮处理表现为 NO 负排放,排放通量分别为 $(-5.6 \pm 1.3) \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 和 $(-5.4 \pm 2.1) \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$,常规施氮处理 NO 排放通量平均为 $(2.3 \pm 3.3) \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$;而在水稻季,常规施氮处理 NO 排放通量是不施氮处理的 2.9 倍。所以,施氮对增加 NO 排放量的效应在水稻季表现较小麦季明显,而出现这种差异的原

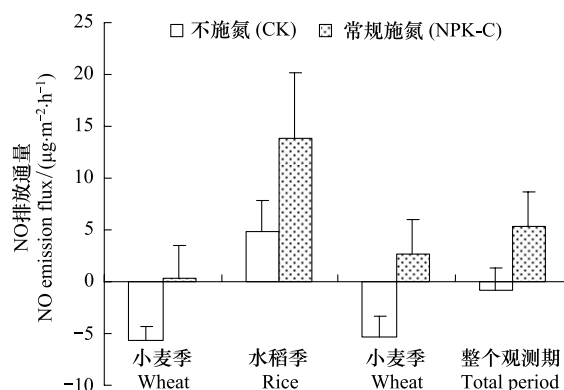


图 2 不施氮 (CK) 与常规施氮 (NPK-C) NO 排放通量比较
Fig.2 Comparison of NO emission from treatments of CK and NPK-C

因可能在于两方面,其一,与 2 个小麦季相比,水稻季土壤水热条件较优,因而有利于施氮后土壤 NO 产生和排放,其二,水稻和小麦生育期长短的差异造成单位时间施肥强度的差别,在生育期较短的水稻季,单位时间施肥强度大,有利于土壤硝化和反硝化作用进行,因而有更多的 NO 从土壤中产生和排放。

2.2.2 土壤温度

对不施氮、常规施氮和空地 3 种处理 NO 排放通量与土壤温度、土壤湿度进行逐步回归分析发现,3 种处理 NO 排放通量主要受土壤温度的影响。在常规施氮和不施氮情况下,土壤温度 (T) 对 NO 排放通量 (F) 的影响可分别用线性方程 $F = 0.285T - 11.795$ ($R^2 = 0.309$, $n = 196$, $P < 0.01$) 和 $F = 0.535T - 14.162$ ($R^2 = 0.282$, $n = 196$, $P < 0.01$) 描述。表明,土壤温度是该区水稻-小麦轮作田 NO 排放的关键因子,但在不同种作物的裸地两者关系不明确,这可能是由于裸地中土壤硝化微生物和反硝化微生物 (特别是根际微生物) 活动与种作物的农田有较大差异,从而造成 NO 排放对土壤温度的响应不明显,但具体原因有待进一步研究。

2.2.3 土壤湿度

研究表明,土壤湿度并非 NO 排放的关键影响因子,但偏相关分析发现,在不施氮处理中,水稻季和休闲期土壤湿度和 NO 排放通量呈显著的负相关 ($r = -0.318$, $n = 62$, $P < 0.05$);在常规施氮处理中,2 个小麦季两者呈显著的正相关 ($r = 0.200$, $n = 135$, $P < 0.05$),而水稻季和休闲期两者之间呈极显著的负相关 ($r = -0.397$, $n = 62$, $P < 0.01$);而在空地处理中,2 个小麦季土壤湿度和 NO 排放通量呈显著的正相关 ($r = 0.182$, $n = 135$, $P < 0.05$)。据此说明:(1)施氮和作物参与对土壤湿度和 NO 排放之间的关系有影响,施肥和作物参与往往使 NO 排放对土壤湿度变化的响应更敏感;(2)土壤湿度与 NO 排放量之间的关系受土壤湿度自身状况的影响,在土壤湿度较差的小麦季 (土壤湿度介于 6.9—43.0%,平均为 33.1%),土壤湿度提高有利于 NO 排放,而在土壤湿度较好的水稻季和休闲期 (土壤湿度介于 22.5—45.9%,平均为 36.5%),土壤湿度的提高对 NO 排放有抑制作用。

2.2.4 作物参与

由图 3 可见,整个观测期空地处理和常规施氮处理 NO 排放通量分别为 $(7.5 \pm 2.5) \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 和 $(5.5 \pm 3.3) \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$,空地处理稍高于常规施氮处理,但两者差异不显著。所以,整个观测期空地处理和常规施氮处理 NO 排放通量相当。但在不同作物季情况有所不同,在 2 个小麦季 NO 排放通量均表现为空地处理显著高于常规施氮处理 ($P < 0.01$),而水稻季则表现为空地处理显著低于常规施氮处理 ($P < 0.01$)。可见,水稻季作物参

与能够增加土壤 NO 排放,而小麦季正好相反。

3 讨论

3.1 土壤 NO 负排放(吸收)缘于土壤水热状况不佳

本试验观测到了土壤 NO 负排放(吸收)现象,其他研究中也类似现象出现^[11]。从观测结果来看,在不施氮、常规施氮和空地 3 种处理中,2 个小麦季与水稻季和休闲期观测到的 NO 负排放的频次(观测期 NO 负排放出现的次数占整个观测数据的比例)存在差异,3 种处理在 2 个小麦季 NO 负排放出现的频次分别为 67.4%、29.6%和 61.5%,而在水稻季和休闲期出现的频次分别为 12.9%、14.5%和 3.2%。可见,本研究观测到的土壤 NO 负排放(吸收)现象主要出现在小麦季。具

体原因可能在于:该区水稻-小麦轮作田 NO 排放主要受土壤温度的调控,并且土壤湿度也有影响,就本研究来看,2 个小麦季土壤温度和土壤湿度波动范围分别为 3.4—23.9℃和 6.9%—43.0%,平均分别为 11.0℃和 33.1%,而水稻季和休闲期土壤温度和土壤湿度波动范围分别为 15.5—33.1℃和 22.5%—45.9%,平均分别为 21.1℃和 36.5%。可见,与水稻季和休闲期相比,小麦季水热状况明显较差,特别是土壤温度,因而不利于 NO 产生和排放^[12]。所以,本研究出现 NO 负排放(吸收)的原因主要在于较差的土壤水热条件。

3.2 作物参与对 NO 排放的作用受土壤水热状况的影响

作物参与对 NO 排放的影响在水稻季表现为能增加土壤 NO 排放,而在小麦季却相反。该现象的原因分析如下:由于作物种类对土壤 NO 无显著影响^[13-14],并且作物参与影响土壤 NO 排放的一种重要机制就是作物根系与土壤硝化和反硝化作用竞争利用土壤有效氮^[15],当土壤硝化和反硝化作用较强时,土壤中有有效氮将更多的以 NO 形式排放,反之,当土壤中硝化和反硝化作用较弱时,根系会因吸收更多的有效氮而减少土壤中 NO 产生和排放。从本研究看,水稻季水热条件优于小麦季,因而水稻季土壤硝化和反硝化作用强于小麦季,所以水稻季较小麦季会排放更多的 NO。可见,作物参与对 NO 排放的作用受土壤水热状况的影响,在土壤水热状况较好的情况下,作物参与有利于土壤 NO 排放。

4 结论

(1) 成都平原水稻-小麦轮作系统不施氮和施氮(N150kg hm²)情况下,NO 排放通量分别为(-0.8±2.1) μg m⁻² h⁻¹和(5.5±3.3) μg m⁻² h⁻¹,施氮显著增加了土壤 NO 排放量,并且其增加效应在水分条件较好的水稻季更明显。

(2) 水稻-小麦轮作系统水稻季和 2 个小麦季 NO 排放量分别占排放总量的 56.1%和 32.5%,其余 11.4%来自休闲期,可见,水稻-小麦轮作系统 NO 排放量主要来自水热条件较好的水稻季,小麦季和休闲期 NO 排放量不大,同时,由于休闲期 NO 高排放主要是作物收获后的翻地引起的,所以,减少休闲期翻地次数可能会有效减少农田 NO 排放。

(3) 土壤温度是影响该区水稻-小麦轮作田 NO 排放主要环境因子,并且两者呈线性回归关系,土壤湿度对 NO 排放的影响因其本身状况差异而不同,在土壤湿度较差的小麦季,土壤湿度提高有利于 NO 排放,而在土壤湿度较好的水稻季和休闲期,土壤湿度提高会抑制 NO 排放。此外,土壤水热状况还是造成土壤 NO 负排放(吸收)和作物参与对小麦季和季季 NO 排放贡献有别的原因。

参考文献(References):

- [1] Pilegaard K. Processes regulating nitric oxide emissions from soils. Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological sciences, 2013,

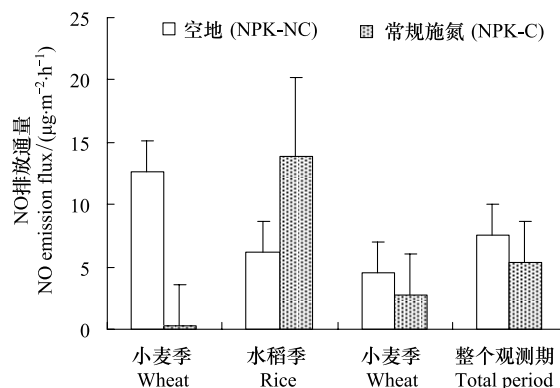


图3 空地(NPK-NC)与常规施氮(NPK-C)NO 排放通量比较
Fig.3 Comparison of NO emission from treatments of NPK-NC and NPK-C

- 368; 20130126.
- [2] Bradley M J, Jones B M. Reducing global NO_x emissions: Developing advanced energy and transportation technologies. *AMBIO*, 2002, 31(2): 141-149.
- [3] Delmas R, Serca D, Jambert C. Global inventory of NO_x sources. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 48(1/2): 51-60.
- [4] Yienger J J, Levy II H. Empirical model of global soil-biogenic NO_x emissions. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(D6): 11447-11464.
- [5] Davidson E A, Kinglerlee W. A global inventory of nitric oxide emissions from soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 48(1/2): 37-50.
- [6] 郑循华, 王明星, 王跃思. 农田 NO 排放的时间变异性. *环境科学*, 1999, 20(2): 17-21.
- [7] 于亚军, 朱波, 王小国, 项虹艳, 郑循华. 成都平原水稻-油菜轮作系统氧化亚氮排放. *应用生态学报*, 2008, 19(6): 1277-1282.
- [8] 蒙世协, 刘春岩, 郑循华, 梁旺国, 胡荣桂. 小麦秸秆还田量对晋南地区裸地土壤—大气间甲烷、二氧化碳、氧化亚氮和一氧化氮交换的影响. *气候与环境研究*, 2012, 17(4): 504-514.
- [9] 郑循华, 王明星, 王跃思, 李老土, 金继生. 华东稻麦轮作生态系统冬小麦田 NO 排放观测研究. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 577-581.
- [10] 于亚军, 朱波, 荆光军. 成都平原土壤-蔬菜系统 N₂O 排放特征. *中国环境科学*, 2008, 28(4): 313-318.
- [11] 李明, 梁旺国, 郑循华, 杨治平, 郑普山, 陈玉成, 陈德立. 晋南地区典型盐碱地棉田的 NO 排放特征. *气候与环境研究*, 2009, 14(3): 318-328.
- [12] Ludwig J, Meixner F X, Vogel B. Soil-air exchange of nitric oxide: An overview of processes, environmental factors, and modeling studies. *Biogeochemistry*, 2001, 52(3): 225-257.
- [13] Stehfest E, Bouwman L. N₂O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: Summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 74(3): 207-228.
- [14] Bouwman A F, Boumans L J M, Batjes N H. Emissions of N₂O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(4): 6-1-6-13.
- [15] Jarecki M K, Parkin T B, Chan A S K, Kaspar T C, Moorman T B, Singer J W, Kerr B J, Hatfield J L, Jones R. Cover crop effects on nitrous oxide emission from a manure-treated Mollisol. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2009, 134(1/2): 29-35.