

# 生物炭对紫色土农田土壤 NO 排放的影响<sup>①</sup>

李 涛<sup>1,2</sup>, 王小国<sup>1\*</sup>, 胡廷旭<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

**摘 要:**为探明生物炭对紫色土农田土壤 NO 排放的影响,利用静态箱-化学发光氮氧化物分析法对夏玉米-冬小麦轮作土壤施用生物炭后的 NO 排放进行了为期一年(2013 年 6 月至 2014 年 5 月)的原位观测,比较了生物炭与化肥混施处理(BCNPK)和常规施肥处理(NPK)的紫色土 NO 排放特征,无肥(CK)作为计算排放系数的对照。结果表明,玉米生长季,NPK 处理下的土壤 NO 排放速率、累积排放通量及排放系数与 BCNPK 处理下相应参数之间均呈显著差异( $P<0.01$ )。施用生物炭后,NO 排放速率、累积通量及排放系数分别降低了 73.1%、77.4% 和 85.5%,但在小麦季两种处理之间的差异均不显著( $P>0.05$ )。此外,在玉米季和小麦季,BCNPK 处理单位产量的综合温室效应(yield-scale GWP)分别比 NPK 处理降低了 79.4% 和 26.4%。因此,在同等氮肥施用量的条件下配施生物炭既能保证紫色土农田土壤作物不减产又能降低 NO 的排放。

**关键词:**生物炭;紫色土;NO 减排;综合温室气体效应

**中图分类号:**X5

NO 是一种化学性质活跃的含氮大气污染物,可直接或间接地引起大气臭氧层的破坏、酸雨和光化学烟雾等一系列环境问题<sup>[1-2]</sup>。有效减少或控制 NO 的排放对缓解全球变化、改善人类生存环境具有重要意义<sup>[1]</sup>。目前,国内关于 NO 排放的报道还很有限<sup>[3-4]</sup>,通过何种手段可以有效降低 NO 排放的研究逐渐受到关注。生物炭是一种细粒度、多孔性的碳质材料,具有比表面积大、吸附性能良好和颗粒表面带有大量负电荷等特点<sup>[5]</sup>。土壤中施用生物炭能够改善土壤物理、化学特性以及微生物环境<sup>[6-7]</sup>,从而提高养分利用率<sup>[8]</sup>,促进作物生长和增加作物产量<sup>[9]</sup>。施用生物炭还能降低重金属<sup>[10]</sup>及有机污染物的生物有效性<sup>[11-12]</sup>从而降低其毒性。因此,近年来,生物炭已被作为一种有效的土壤改良剂广泛用于固碳、温室气体减排、土壤污染控制与修复等领域。利用生物炭减排温室气体的研究已有报道,但多集中施用生物炭对土壤 CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响<sup>[13-15]</sup>,对紫色土土壤 NO 排放的影响研究报道甚少。因此,本研究通过田间小区试验,采用静态暗箱-气袋采样-化学发光氮氧化物法研究施用生物炭后,川中丘陵区紫色土农田土壤 NO 年内(夏玉米-冬小麦)排放特征,试图探明施

用生物炭对土壤 NO 排放的影响,为该区探寻有效减少土壤 NO 排放的途径提供一种思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站位于四川盆地中北部的盐亭县林山乡(105°27'E, 31°16'N),海拔 460 m,地处嘉陵江一级支流涪江的支流——猕江、湍江的分水岭上。属中亚热带湿润季风气候,气候温和,四季分明,年均气温 17.3℃,极端最高气温 40℃,极端最低气温 -5.1℃;多年平均降雨量 825 mm,分布不均,春季占 5.9%,夏季 65.5%,秋季 19.7%,冬季 8.9%,无霜期 294 天。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。试验小区土壤为钙质紫色土,是由白垩纪和侏罗纪的紫色砂页岩风化物形成的初育土。0~20 cm 土壤基本理化性质为:体积质量为 1.34 g/cm<sup>3</sup>,黏粒、粉粒和砂粒含量分别为 22.3%、34.6% 和 43.1%,pH 8.23,有机质及全氮、全磷、全钾分别为 8.75、0.81、0.84、18.01 g/kg,碱解氮、有效磷和速效钾分别为 42.29、9.02、86.35 mg/kg。

基金项目:国家自然科学基金项目(41371302)资助。

\* 通讯作者(xgwang@imde.ac.cn)

作者简介:李涛(1990—),男,四川仁寿人,硕士研究生,主要从事土壤碳氮循环研究。E-mail: 1106700504@qq.com

## 1.2 试验设计

试验小区布置采用随机区组设计,共设常规氮磷钾肥处理(NPK)、生物炭与氮磷钾肥混施处理(BCNPK)和无肥对照处理(CK)等 3 个处理,每一处理设置 3 次重复,共 9 个小区,小区面积为 32 m<sup>2</sup>(4 m × 8 m)。试验小区均采用冬小麦-夏玉米轮作,经人工锄耕、施肥后立即播种。化肥以一次性基肥人工施入各小区耕作层土壤(20 cm),玉米季化肥采用穴施,小麦季采用撒施。试验期间不灌溉、不追肥,耕地管理与当地农民习惯一致。

玉米和小麦的施肥播种日分别为 2013 年 5 月 31 日和 10 月 27 日。玉米播种当日,先生物炭均匀撒施于 BCNPK 小区土壤表面,再经犁耕将其混入耕作层土壤,而后再采用与 NPK 和 CK 处理一致的施肥及播种方式,生物炭施用量为 16 t/hm<sup>2</sup>(1%)。小麦季 BCNPK 小区不再施加生物炭,所施化肥量与 NPK 处理完全一致。供试生物炭为小麦秸秆炭,由河南商丘“三利”新能源公司生产,其基本理化性质为:pH 10.22,含碳量 83.4%,全氮 1.5%,硫含量 0.3%,氢含量 1.8%,氧含量 13.0%,H/C 比为 0.26,O/C 比为 0.12<sup>[16]</sup>。NPK 和 BCNPK 处理施用的总氮水平一致(生物炭的氮素计入总氮),玉米季氮肥(碳酸氢铵,纯 N 17%)施用量为 N 150 kg/hm<sup>2</sup>,小麦季氮肥施用量 N 130 kg/hm<sup>2</sup>;磷肥(过磷酸钙,含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%)、钾肥(氯化钾,含 K<sub>2</sub>O 60%)玉米和小麦季的施用量分别为 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg/hm<sup>2</sup>和 K<sub>2</sub>O 36 kg/hm<sup>2</sup>。

## 1.3 样品的采集、分析和相关计算

**1.3.1 样品的采集与分析** 本研究采用静态暗箱-气袋采样法采集 NO 样品,采用化学发光氮氧化物法分析 NO 浓度,通过计算获得 NO 排放速率和系数。采样箱构造、田间布设和采样方法详见文献[17]。研究表明,9:00—11:00 am 时间段内的 NO 排放速率能代表当日平均排放水平<sup>[17]</sup>,故 NO 样品采样时间设为 9:00—11:00 am,采样频率为 2 次/周。施肥后增加采样频率,第一周每天采样 1 次,第二周为间隔采样,第三周恢复 2 次/周。NO 样品保存于遮光气袋中(容积 5 L,大连光明气体化工技术中心,大连,中国),采集后迅速送回实验室,利用 Thermo Scientific NO-NO<sub>2</sub>-NO<sub>x</sub> Analyzer(Model 42i,USA.EPA 公司)进行分析。

在采气过程中,采用 JM624 型便携式测温计(JM624,天津今明仪器有限公司,天津,中国)和 MP-406 便携式水分测定仪(MPM-160B,杭州汇尔仪器设备有限公司)分别测定土壤温度和土壤体积含水率,并采集适量表层土壤带回实验室,分析土壤可溶

性有机碳(DOC)、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量。具体操作步骤为:称取 5.000 ± 0.025 g 鲜土样于离心管中,加入 25 ml 0.5 mol/L K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(水土比为 5:1),于震荡器中震荡 2 h (25℃)后置于离心机(3 500 r/min,20 min)中离心,用 0.45 μm 滤膜过滤,滤液用 AA3 流动分析仪(SEAL Auto Analyzer 3,德国)测定 DOC、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度。

**1.3.2 相关计算公式** 土壤湿度用 WFPS(water-filled pore space,总孔隙含水率)表示,通过土壤体积含水率计算得到,转换公式如下<sup>[18]</sup>:

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

式中:SWM 为土壤体积含水率(%);BD 为土壤体积质量(g/cm<sup>3</sup>);PD 为土壤密度,取 2.65 g/cm<sup>3</sup>。

基于 NO 浓度随时间的变化计算得到单位面积的气体排放速率,具体计算公式如下<sup>[17]</sup>:

$$F = \frac{M}{V_0} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot H \cdot \frac{dc}{dt} \cdot k \quad (2)$$

式中:F 为土壤 NO 排放速率(mg/(m<sup>2</sup>·h));M 为气体摩尔质量(g/mol);V<sub>0</sub> 为标准状态下(温度 273 K,气压 1 013 hPa)气体摩尔体积(22.41×10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>);T<sub>0</sub> 和 P<sub>0</sub> 分别为标准状态下的气温(273 K)和气压(1 013 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 的日排放量累加后得到(通过相邻两次排放速率的线性插值得到未观测日的 NO 排放速率),计算公式如下<sup>[17]</sup>:

$$E = k \sum_{i=2}^{n+1} [X_{i-1} + \Delta t \cdot (X_{i-1} + X_i) / 2] \quad (3)$$

式中:E 为 NO 累积排放量(kg/hm<sup>2</sup>,以 N 计,下同);k 为量纲换算系数;X<sub>i</sub> 为第 i 天 NO 的日排放量值(mg/(m<sup>2</sup>·d)),将排放速率(mg/(m<sup>2</sup>·h))乘以 24 h 即可转换成日排放量;Δt 为相邻两次日排放量值的间隔天数(d);n 为观测期内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计算得到<sup>[17]</sup>:

$$\text{NO 排放系数}(\%) = \frac{T_n - T_{CK}}{\text{氮肥施用量}} \times 100 \quad (4)$$

式中:T<sub>n</sub> 为施肥后 NO 累积排放量(kg/hm<sup>2</sup>);T<sub>CK</sub> 为对照不施氮肥的 NO 累积排放量(kg/hm<sup>2</sup>)。氮肥施用量的单位为 kg/hm<sup>2</sup>。

综合温室效应(GWP)采用以下公式计算:

$$GWP_{NO} = 296 \times E_{NO} \times \frac{30}{14} \quad (5)$$

式中:GWP<sub>NO</sub> 为基于 NO 的 GWP 值(kg/hm<sup>2</sup>,以 CO<sub>2</sub>eq

计);  $E$  为  $\text{NO}$  累积排放量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )。单位产量的综合温室效应(yield-scaled GWP)等于当季的  $\text{GWP}_{\text{NO}}$  除以当季产量。

#### 1.4 数据处理和统计分析

应用 Excel 2013 和 Origin 9.0 软件进行数据处理、图表绘制;利用 SPSS 16.0 软件进行相关分析和方差分析,各处理间差异采用 Duncan 多重比较法,显著性水平设为 0.05。

## 2 结果与分析

### 2.1 环境因子的季节动态

试验期内空气温度和日降雨量、5 cm 土壤温度、土壤湿度(WFPS)及土壤可溶性有机碳(DOC)、无机氮( $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$ )变化趋势,如图 1 所示。由图 1A 可知,观测期内的年平均气温为  $16.5^\circ\text{C}$ ,月平均最高气温和最低气温分别为  $27.1^\circ\text{C}$ (7月)和  $5.8^\circ\text{C}$ (1月);降雨总量为 704.5 mm,较当地多年平均降水量减少约 14.6%。各小区的土壤(5 cm)温度介于  $2.0 \sim 29.6^\circ\text{C}$ ,

其中玉米季内土壤温度平均值约为  $25.0^\circ\text{C}$ ,小麦季的平均值约为  $10.5^\circ\text{C}$ (图 1B)。土壤孔隙充水率(WFPS)介于 25.2% ~ 74.5%,玉米季的平均值约为 53.8%,小麦季的平均值约为 48.3%(图 1C)。

由图 1D 可以看出,与对照小区(CK)相比,BCNPK 和 NPK 小区土壤 DOC 含量均显著高于 CK 处理( $P < 0.01$ ),但前两者间差异不显著(表 1,  $P > 0.05$ )。这主要是因为:CK 处理小区长期不施肥,土壤贫瘠,作物生长差,枯枝败叶等有机质输入量长期低于 BCNPK 和 NPK 等施肥处理,故其 DOC 含量显著低于 BCNPK 和 NPK 处理。施肥后,土壤无机氮含量迅速增加并维持 1~2 周的高峰期(玉米季约 1 周,小麦季约 2 周)。随后,由于微生物的硝化和反硝化、植物吸收以及氮淋失等作用,无机氮含量呈现出波动下降趋势并在当季末期降至最低(图 1E)。玉米生长季内,常规施肥处理(NPK)下,土壤无机氮含量在施肥后第 15 天(2013 年 6 月 15 日)达到最大值( $41.51 \text{ mg}/\text{kg}$ ),而生物炭小区(BCNPK)则在施肥后的第 1 天(2013 年

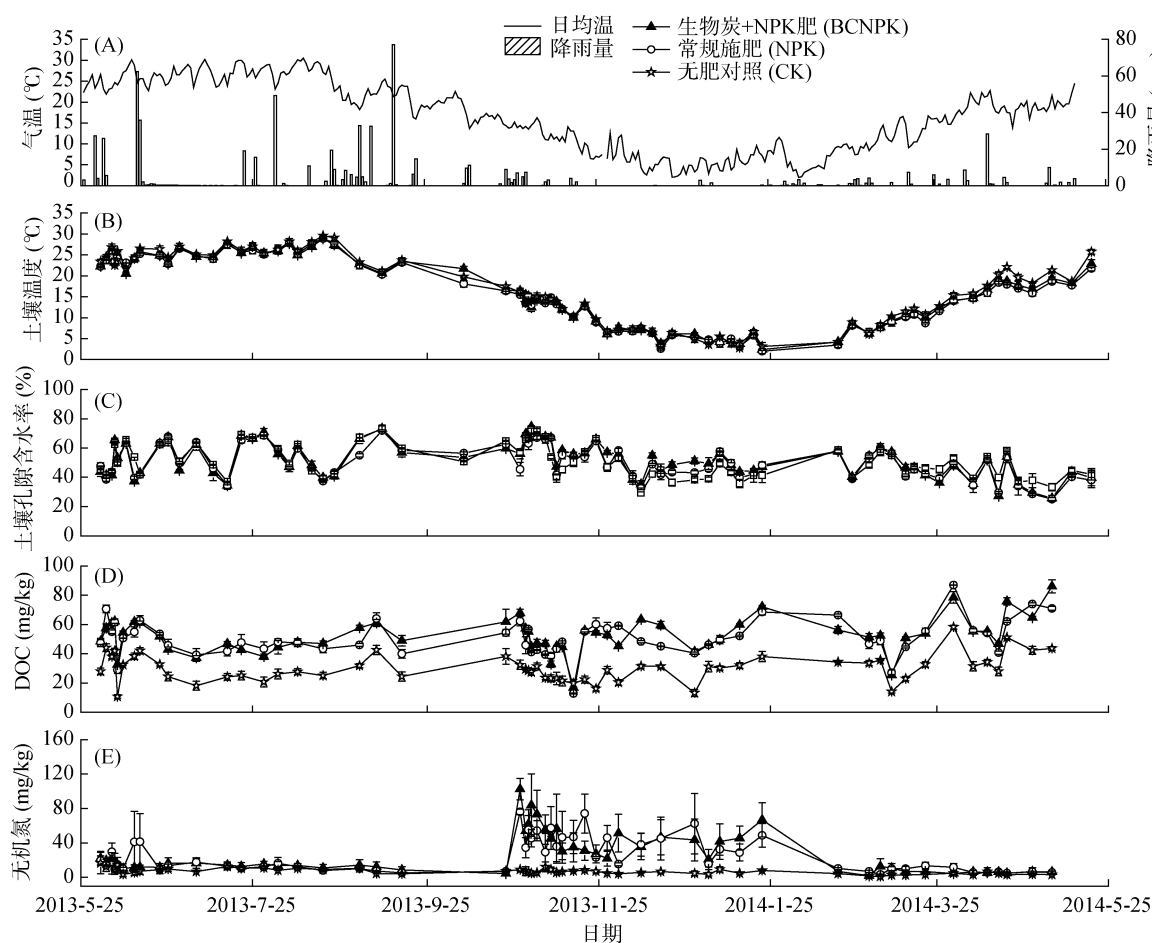


图 1 试验期内空气温度和日降雨量、5 cm 土壤温度、土壤湿度(WFPS)及土壤可溶性有机碳(DOC)、无机氮( $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$ )动态变化

Fig. 1 Dynamics of air temperature, daily precipitation, 5 cm soil temperature, soil moisture (WFPS) and the contents of soil  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , DOC during the experiment period

6 月 1 日)达到最大值(22.45 mg/kg)。小麦生长季内, BCNPK 和 NPK 处理的土壤无机氮含量均在施肥后第 1 天(2013 年 10 月 28 日)达到最大值,其无机氮含量分别为 102.54 mg/kg 和 76.20 mg/kg。试验周期内, BCNPK 和 NPK 小区土壤的无机氮含量显著高于 CK 处理( $P<0.01$ ),但两者间差异不显著(表 1)。

表 1 不同施肥处理的 DOC 和无机氮( $\text{NO}_3\text{-N}+\text{NH}_4\text{-N}$ )含量  
Table 1 DOC and inorganic nitrogen ( $\text{NO}_3\text{-N}+\text{NH}_4\text{-N}$ ) contents of soils in different treatments

时期	处理	DOC (mg/kg)			$\text{NO}_3\text{-N}+\text{NH}_4\text{-N}$ (mg/kg)		
		均值 $\pm$ 标准误	最小值	最大值	均值 $\pm$ 标准误	最小值	最大值
夏玉米	BCNPK	50.63 $\pm$ 1.81 a	36.43	62.19	14.51 $\pm$ 0.77 a	8.63	22.45
	NPK	50.40 $\pm$ 1.81 a	37.39	64.06	15.89 $\pm$ 2.28 a	5.31	41.51
	CK	36.95 $\pm$ 1.53 b	17.95	46.28	9.77 $\pm$ 0.83 b	3.62	16.64
冬小麦	BCNPK	53.16 $\pm$ 2.33 a	19.86	86.06	32.91 $\pm$ 4.53 a	2.08	102.54
	NPK	51.21 $\pm$ 2.28 a	16.86	82.56	29.84 $\pm$ 3.76 a	3.38	76.20
	CK	32.14 $\pm$ 1.65 b	14.96	54.74	5.57 $\pm$ 0.42 b	1.19	12.28

注:同列数据小写字母不同表示处理间差异达到  $P<0.05$  显著水平(Duncan 多重比较,下同)。

2.2 NO 排放的季节变化

轮作周期内,CK 处理下土壤无明显的 NO 排放峰出现,其值介于  $-4.54 \sim 7.63 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ,显著低于 BCNPK 和 NPK 处理(表 2)。BCNPK 和 NPK 处理表现出相似的 NO 排放趋势(图 2),即在施肥后 20 天内呈现 NO 脉冲排放特征,20 天后 NO 排放速率急剧下降并维持与 CK 对照处理相似的较低排放水平,由此说明施用氮肥能显著激发紫色土尤其是施肥后 20 天内的 NO 排放。玉米季内,BCNPK 处理于施肥后第 7 天出现 NO 排放峰值,为  $26.12 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ;NPK 处理于施肥后第 15 天出现 NO 排放峰值,为  $82.15 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。施肥后 20 天内,BCNPK、NPK 和 CK 处理土壤 NO 平均排放速率分别为 11.79、44.02 和  $2.90 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ,三者两两差异极显著( $P<0.01$ );施肥 20 天后至玉米季结束,3 种处理 NO 平均排放速

率分别为 0.22、0.68 和  $0.53 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ,差异不显著( $P=0.1507$ )。小麦季内,BCNPK 和 NPK 处理土壤均在施肥后第 6 天出现 NO 排放峰值,分别为 108.76 和  $115.10 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ;施肥后 20 天内,3 种处理土壤 NO 平均排放速率分别为 54.16、54.69 和  $0.21 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ,差异极显著( $P<0.01$ )。施肥 20 天后至玉米季结束期间 3 种处理 NO 平均排放速率分别为  $-0.41$ 、0.140 和  $-0.25 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ,差异不显著( $P=0.5624$ )。整个轮作周期内,BCNPK 和 NPK 处理的 NO 平均排放速率分别是 CK 的 20.1 倍和 30.9 倍。两种施肥处理相比,BCNPK 处理土壤玉米季的 NO 平均排放速率较 NPK 处理低 73.1%( $P<0.05$ ),其整个轮作周期的 NO 平均排放速率较 NPK 处理低 34.9% ( $P=0.9296$ ),说明紫色土施用生物炭能明显降低土壤 NO 的排放。

表 2 不同施肥处理的产量及土壤 NO 排放速率、范围、累积通量、综合温室效应值和单位产量的综合温室效应  
Table 2 Crop yield, the flux, range, amount and GWP of soil NO emission and yield-scaled GWP of NO emission in different fertilization treatments

时期	处理	生物量 (干重) ( $\text{t}/\text{hm}^2$ )	产量 (干重) ( $\text{t}/\text{hm}^2$ )	NO 平均 排放速率 ( $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ )	NO 排放 速率范围 ( $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ )	NO 累积 排放量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )	NO 排放系数	$\text{GWP}_{\text{NO}}$ ( $\text{kg}/(\text{hm}^2)$ )	Yield-scaled $\text{GWP}_{\text{NO}}$ ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )
玉米季	BCNPK	7.34 $\pm$ 0.85 a	2.52 $\pm$ 0.26 a	4.22 $\pm$ 1.61 b	$-0.22 \sim 26.12$	0.06 $\pm$ 0.01b	0.03%	40.17 $\pm$ 5.59b	15.83 $\pm$ 0.80b
	NPK	6.98 $\pm$ 1.04 ab	2.36 $\pm$ 0.23 a	15.67 $\pm$ 5.01 a	0.03 $\sim$ 82.15	0.28 $\pm$ 0.01a	0.19%	177.60 $\pm$ 6.34a	76.69 $\pm$ 8.69a
	CK	4.30 $\pm$ 0.52 b	1.47 $\pm$ 0.07 b	1.35 $\pm$ 0.37 b	0.01 $\sim$ 7.63	0.03 $\pm$ 0.00c	—	16.91 $\pm$ 2.11c	11.47 $\pm$ 1.18b
小麦季	BCNPK	11.24 $\pm$ 1.20 a	3.06 $\pm$ 0.33 a	11.75 $\pm$ 4.05 a	$-5.89 \sim 108.76$	0.24 $\pm$ 0.01a	0.19%	152.23 $\pm$ 3.66a	50.63 $\pm$ 4.53a
	NPK	11.54 $\pm$ 0.42 a	2.70 $\pm$ 0.43 a	12.23 $\pm$ 4.15 a	$-7.41 \sim 115.10$	0.27 $\pm$ 0.05a	0.21%	171.26 $\pm$ 31.93a	68.80 $\pm$ 21.17a
	CK	5.52 $\pm$ 0.54 b	1.19 $\pm$ 0.16 b	$-0.12 \pm 0.13$ b	$-4.54 \sim 2.62$	$-0.01 \pm 0.00$ b	—	$-4.23 \pm 2.11$ b	$-3.15 \pm 1.57$ b
全年	BCNPK	—	—	8.77 $\pm$ 2.59 a	$-0.22 \sim 68.41$	0.31 $\pm$ 0.01b	—	194.51 $\pm$ 7.62b	—
	NPK	—	—	13.48 $\pm$ 5.33 a	$-5.89 \sim 108.76$	0.55 $\pm$ 0.04a	—	350.97 $\pm$ 28.44a	—
	CK	—	—	0.44 $\pm$ 0.17 b	$-4.54 \sim 7.63$	0.02 $\pm$ 0.00c	—	12.69 $\pm$ 0.00c	—

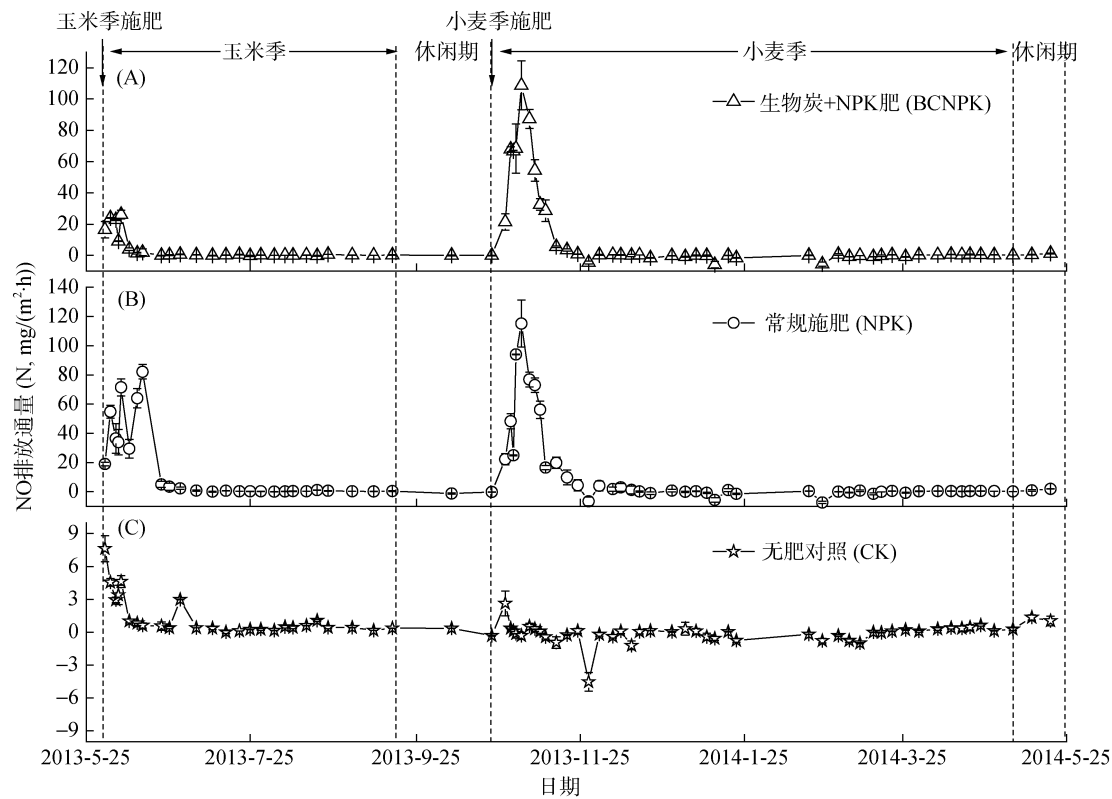


图 2 各施肥方式的 NO 排放速率的季节变化  
Fig. 2 Seasonal variation of NO emission rate in different treatments

2.3 不同施肥处理作物产量、NO 累积排放通量和排放系数

与对照(CK)小区相比, BCNPK 小区玉米季和小麦季的生物量分别增加 70.7% 和 103.5%, NPK 小区则分别增加 62.3% 和 108.9%; 相应地, BCNPK 玉米季和小麦季的产量分别增加 71.7% 和 157.9%, NPK 则分别增加 61.0% 和 127.2%。说明施肥能有效促进作物的生长, 增加作物的生物量和产量。但是, 常规施肥处理和生物炭添加处理间的生物量和作物产量均差异不显著(表 2)。

BCNPK、NPK 和 CK 处理夏秋季(玉米季)土壤 NO 累积排放量占全年 NO 排放量的 90.5%、93.7% 和 70.0%(图 3), 说明水热条件较好的夏秋季是紫色土夏玉米-冬小麦轮作系统 NO 排放的主要时期。冬春季(小麦季)NO 累积排放量所占比例很少, 冬季甚至会出现 NO 吸收现象, BCNPK、NPK 和 CK 分别吸收 -0.023、-0.040 和 -0.007 kg/hm<sup>2</sup> 的 NO。不管是玉米季还是小麦季, 不同施肥处理下土壤 NO 累积排放通量差异均达到显著水平( $P<0.05$ ), 而整个试验期内的 NO 累积通量差异达到极显著水平( $P<0.01$ )。玉米季内, BCNPK 和 NPK 的 NO 累积排放量分别是 CK 的 2.4 和 9.5 倍, 小麦季的则是 36.0 和 40.5 倍, NO 全

年累积量则分别是 CK 的 15.3 和 27.7 倍。说明施肥能显著增加紫色土土壤 NO 的排放量。与 NPK 相比, 玉米季和小麦季 BCNPK 的 NO 累积排放量分别降低 77.4% ( $P<0.01$ ) 和 11.1% ( $P = 0.5856$ ), NO 排放系数降低 85.5% 和 10.8%, 全年累积排放量降低 44.6% ( $P<0.01$ )。不同施肥方式对 100 年时间尺度的 NO 综合温室效应( $GWP_{NO}$ )的影响与对 NO 累计排放通量的影响相同。由此说明施用生物炭能降低紫色土尤其是水热条件较好的玉米季内的土壤 NO 的排放。

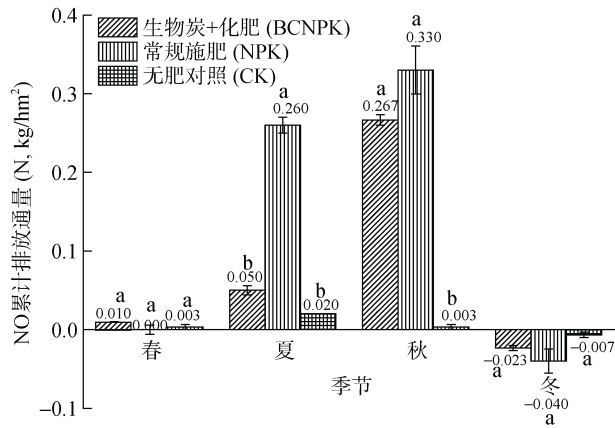


图 3 NO 累积排放通量(kg/hm<sup>2</sup>)的季节分配  
Fig. 3 Seasonal variation of NO cumulative emission flux (kg/hm<sup>2</sup>) in different treatments

### 3 讨论

#### 3.1 生物炭对单位产量的综合温室效应的影响

增加作物产量一直是农业中施用氮肥的最终目的,然而,氮肥的大量使用必然增加  $\text{N}_2\text{O}$  或  $\text{NO}$  等氮氧化物的排放风险,因此综合作物产量评价施肥对氮氧化物排放的影响具有一定的现实意义。Linquis 等<sup>[19]</sup>认为,单位产量的综合温室效应(yield-scaled GWP)能在综合考虑环境和生产效益的情况下较好地反映二者的综合效应。既能保证作物无明显减产又能减少 yield-scaled GWP 值的施肥措施是最合理的施肥方式。本研究中,施肥方式对作物产量、 $\text{NO}$  排放量、GWP 及 yield-scaled GWP 值均具有显著影响。与 CK 对照相比,施肥能显著增加作物产量、 $\text{NO}$  排放量、GWP 及 yield-scaled GWP 值(表 2)。而在等量氮肥施用的情况下,玉米季 BCNPK 处理的作物产量比 NPK 增加 6.7%, $\text{NO}$  累计排放通量、GWP 和 yield-scale GWP 则分别降低 77.4%、77.4% 和 79.4%;小麦季也表现出相同趋势,其中作物产量增加 13.5%, $\text{NO}$  累计排放通量、GWP 和 yield-scale GWP 分别降低 11.1%、11.1% 和 26.4%。因此,在同等氮肥施用量时,施用生物炭不仅能保证作物不减产,还能降低单位产量的  $\text{NO}$  排放量,取得良好的环境效应。但是,本研究在计算 GWP 或 yield-scaled GWP 时,没有综合计算  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  3 种温室气体的综合温室效应,不能全面评价生物炭对紫色土农田生态系统温室气体综合 GWP 的影响,还有待进一步研究。

#### 3.2 生物炭减排 $\text{NO}$ 的影响因素

碱性旱地土壤中  $\text{NO}$  的排放主要来自硝化作用<sup>[20-22]</sup>。硝化作用主要是指铵态氮在好氧条件下通过生物氧化生成亚硝态氮及硝态氮的过程,其主要影响因素包括 pH、温度、水分、氧气、无机氮化合物含量等<sup>[23]</sup>;本研究中, $\text{NO}$  排放速率与土壤温度和 DOC 无显著相关关系,而与土壤湿度( $r = 0.204$ ,  $n = 165$ ,  $P < 0.01$ )和无机氮含量( $r = 0.486$ ,  $n = 165$ ,  $P < 0.01$ )呈极显著正相关关系,说明紫色土  $\text{NO}$  排放受土壤湿度和无机氮含量共同控制。无机氮是硝化反硝化微生物产生  $\text{NO}$  的作用底物,而土壤湿度可通过影响土壤的通气性、氧化还原电位、土壤有效氮含量及其微生物可利用性来影响土壤  $\text{NO}$  的排放<sup>[1]</sup>。由图 2 可见,试验期内尤其是在施肥后的 20 天内降雨造成的土壤湿度的干湿交替均会激发  $\text{NO}$  的排放(如玉米季的 6 月 7 日和 6 月 15 日,小麦季的 11 月 3 日和 11 月 7 日),相应地,此阶段土壤无机氮含量较高,不是  $\text{NO}$  排放的限制条件。然而,施肥 20 天后,尽管土壤湿度也有剧烈变

化(如玉米季的 7 月 28 日、8 月 1 日和 8 月 8 日等以及小麦季的 4 月 18 日),但并没有出现明显的  $\text{NO}$  激发效应,这是因为该时期土壤无机氮含量显著降低(图 1E),供硝化微生物活动产生  $\text{NO}$  的底物(无机氮)显著减少。因此,土壤湿度和无机氮含量共同作用影响紫色土农田土壤  $\text{NO}$  的排放。

房彬等<sup>[7]</sup>、何飞飞等<sup>[24]</sup>的研究表明,添加生物炭对土壤无机氮含量和  $\text{N}_2\text{O}$  具有显著影响。本研究中,NPK 处理和 BCNPK 处理的土壤无机氮含量差异不显著,这与以往的研究结果不同。这是因为生物炭本身就是一种碳氮源,而本研究中进行等氮量施肥处理,BCNPK 处理所施氮肥必然较 NPK 处理少,所以 BCNPK 处理土壤无机氮含量较 NPK 低。此外,在玉米播种之前将生物炭按  $16 \text{ t/hm}^2$  (1%) 添加到生物炭小区,而小麦播种之前则没有新的生物炭添加,因此本研究所添加的生物炭比例明显小于其他研究<sup>[7, 24]</sup>中的添加比例。

与 NPK 处理相比,BCNPK 处理在玉米季和整个作物周期内的  $\text{NO}$  累计排放通量分别降低 77.4% 和 44.6%,表现出明显的  $\text{NO}$  减排效果,然而影响紫色土农田土壤  $\text{NO}$  排放的关键环境因子(土壤湿度和无机氮含量)在 BCNPK 和 NPK 间均无显著差异。因此,本研究认为:添加 1% 的生物炭后尤其是玉米季内所表现出来的  $\text{NO}$  减排效果主要是通过生物炭自身高吸附性、多孔性、高比面积等结构特性及其对土壤结构的改善实现  $\text{NO}$  减排的,而非通过直接改变土壤湿度和无机氮含量来实现。一方面,生物炭具有较高的 CEC,能够有效吸附土壤溶液中  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$ <sup>[5, 25-27]</sup>,并短期固定和滞留土壤中的无机氮<sup>[28-30]</sup>,使无机氮浓度和硝化作用强度降低。另一方面,土壤中施用的生物炭易与土壤矿物质结合形成有机-无机复合体<sup>[28]</sup>,使  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的生物有效性降低,难以被硝化微生物利用;同时,生物炭的多孔性及比表面积高等特征使生物炭具有很强的吸附能力<sup>[31]</sup>,可以吸附温室气体,减少温室气体向土表的扩散和逸出。本研究中,玉米播种前将生物炭施入土壤后,BCNPK 小区耕作层的土壤体积质量降低,土壤持水性能增加<sup>[16]</sup>,对干湿交替的响应不如 NPK 小区土壤敏感,因而降雨激发的  $\text{NO}$  排放量低于 NPK 小区。因此,BCNPK 处理在玉米季中表现出显著的  $\text{NO}$  减排效果。同时生物炭的  $\text{NO}$  减排效果随施用时间的延长而减弱,生物炭的吸附位点在玉米季末期时明显减少,而小麦季没有新的生物炭施入,因此 BCNPK 处理在小麦季并未表现出显著的  $\text{NO}$  减排效果。

## 4 结论

1) 试验期内, NO 排放速率与土壤温度和 DOC 含量无显著相关关系, 与土壤湿度和无机氮含量呈极显著正相关( $P < 0.01$ ), 土壤湿度(WFPS)和无机氮含量是影响紫色土农田土壤 NO 排放的主要环境因子, 引起其剧烈变化的措施或环境因子的改变如 N 肥的施用或降雨造成的干湿交替都能显著激发 NO 的排放。

2) 与 NPK 处理相比, 玉米季内 BCNPK 处理的作物产量增加 6.7%, NO 累计排放通量、GWP 和 yield-scale GWP 则分别降低 77.4%、77.4% 和 79.4%; 小麦季的作物产量增加 13.5%, NO 累计排放通量、GWP 和 yield-scale GWP 分别降低 11.1%、11.1% 和 26.4%。由此说明在同等氮肥施用量的条件下, 添加生物炭不仅能保证作物不减产, 也能降低单位产量的 NO 排放量, 减少氮肥以 NO-N 形态损失的比例, 取得良好的环境效应。

### 参考文献:

- [1] 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
- [2] 徐文彬.  $NO_x$  大气化学概论及全球  $NO_x$  释放源综述[J]. 地质地球化学, 1999, 27(3): 86–93
- [3] Yu Y, Wang X, Zhu B. NO emission and effect factors in rice-wheat rotation system in Chengdu Plain of Sichuan Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9): 1–8
- [4] Meng S, Liu C, Zheng X, et al. Effects of the applied amount of wheat straw on methane, carbon dioxide, nitrous oxide, and nitric oxide fluxes of a bare soil in south Shanxi[J]. Climatic and Environmental Research, 2012, 17(4): 504–514
- [5] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(5): 1 719–1 730
- [6] Bruun S, Clauson-Kaas S, Bobulska L, et al. Carbon dioxide emissions from biochar in soil: Role of clay, microorganisms and carbonates[J]. European Journal of Soil Science, 2014, 65(1): 52–59
- [7] 房彬, 李心清, 赵斌, 等. 生物炭对旱作农田土壤理化性质及作物产量的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(8): 1 292–1 297
- [8] 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 旱地土壤施用生物炭减少土壤氮损失及提高氮素利用率[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 54–61
- [9] Wang J, Pan X, Liu Y, et al. Effects of biochar amendment in two soils on greenhouse gas emissions and crop production [J]. Plant and Soil, 2012, 360(1/2): 287–298
- [10] Liu Z, Zhang F S. Removal of lead from water using biochars prepared from hydrothermal liquefaction of biomass[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 167(1/2/3): 933–939
- [11] 李洋, 宋洋, 王芳, 等. 小麦秸秆生物炭对高氯代苯的吸附过程与机制研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 1 096–1 105
- [12] Beesley L, Moreno-Jiménez E, Gomez-Eyles J L. Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(6): 2 282–2 287
- [13] 王军, 施雨, 李子媛, 等. 生物炭对退化蔬菜地土壤及其修复过程中  $N_2O$  产排的影响? [J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 1–12
- [14] Sun L, Li L, Chen Z, et al. Combined effects of nitrogen deposition and biochar application on emissions of  $N_2O$ ,  $CO_2$  and  $NH_3$  from agricultural and forest soils[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2014, 60(2): 254–265
- [15] Singla A, Inubushi K. Effect of biochar on  $CH_4$  and  $N_2O$  emission from soils vegetated with paddy[J]. Paddy and Water Environment, 2014, 12(1): 239–243
- [16] 王红兰, 唐翔宇, 张维, 等. 施用生物炭对紫色土坡耕地耕层土壤水力学性质的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 107–112
- [17] 胡廷旭, 刘韵, 柯韵, 等. 紫色土夏玉米-冬小麦轮作农田的 NO 排放特征[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(7): 1 407–1 413
- [18] 花可可. 紫色土坡耕地土壤固碳机制研究[D]. 成都: 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 2013
- [19] Linquist B, Groenigen K J, Adviento-Borbe M A, et al. An agronomic assessment of greenhouse gas emissions from major cereal crops[J]. Global Change Biology Bioenergy, 2012, 18(1): 194–209
- [20] Zheng X, Wang M, Wang Y. Mitigation options for methane, nitrous oxide and nitric oxide emissions from agricultural ecosystems[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2000, 17(1): 83–92
- [21] Zheng X H, Huang Y, Wang Y S, et al. Effects of soil temperature on nitric oxide emission from a typical Chinese rice-wheat rotation during the non-waterlogged period[J]. Global Change Biology, 2003, 9(4): 601–611
- [22] Remde A, Conrad R. Role of nitrification and denitrification for NO metabolism in soil[J]. Biogeochemistry, 1991, 12(3): 189–205
- [23] Godde M, Conrad R. Influence of soil properties on the turnover of nitric oxide and nitrous oxide by nitrification and denitrification at constant temperature and moisture[J]. Biology and Fertility of Soils, 2000, 32(2): 120–128
- [24] 何飞飞, 荣湘民, 梁运姝, 等. 生物炭对红壤菜田土壤理化性质和  $N_2O$ 、 $CO_2$  排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(09): 1 893–1 900
- [25] Zwieter V L, Kimber S, Morris S. Influence of biochars on flux of  $N_2O$  and  $CO_2$  from ferrosol[J]. Australian Journal of Soil Research, 2010, 48(7): 555–568
- [26] Mei B, Zheng X, Xie B, et al. Nitric oxide emissions from conventional vegetable fields in southeastern China[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(17): 2 762–2 769

- [27] 邵玲玲, 邹平, 杨生茂, 等. 不同土壤改良措施对冷浸田温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(6): 1 240–1 246
- [28] 李德军. 珠江三角洲森林和蔬菜地土壤一氧化氮排放[D]. 广州: 广州地球化学研究所, 2007
- [29] Singh B P, Hatton B J, Singh B, et al. Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils[J]. Journal of Environmental Quality, 2010, 39(4): 1 224–1 235
- [30] 刘娇, 高健, 赵英. 玉米秸秆及其黑炭添加对黄绵土氮素转化的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(6): 1 361–1 368
- [31] Antal M, Grönli M. The art, science and technology of charcoal production[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 2003, 42(8): 1 619–1 640

## Impact of Biochar on NO Emission from Cropland of Purple Soil

LI Tao<sup>1,2</sup>, WANG Xiaoguo<sup>1\*</sup>, HU Tingxu<sup>1,2</sup>

(1 Institute of Maintain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In this study, one year monitoring of NO emissions from purple soil farmlands planted with maize (in the summer) and wheat (in the winter) in rotation was carried out in the field after biochar application in Yanting Agro-Ecological Experimental Station (Chinese Academy of Sciences). The static chamber-gas chromatographic techniques and chemiluminescence NO analyzer were used in the study. Three treatments namely conventional fertilization (NPK), biochar application in combination with fertilizer (BCNPK) and control treatment (CK) without fertilizer and biochar, were applied by randomized design with three replications. Comparisons of NO emission from purple soil farmlands were made between NPK and BCNPK. In addition, CK was used to calculate NO emission coefficient. It was found that NO emission rate was not significantly correlated with soil temperature and soil dissolved organic carbon content, whereas there was a significantly positive correlation between soil moisture ( $r = 0.204$ ,  $n = 165$ ,  $P < 0.01$ ) and inorganic nitrogen content ( $r = 0.486$ ,  $n = 165$ ,  $P < 0.01$ ). Consequently, soil moisture and inorganic nitrogen content act as the main influential factors for NO emission from purple soil farmland. N fertilizer application or severe soil moisture alternating caused by rainfall could significantly excite NO emissions. The average NO emission rate throughout the trial period in BCNPK and NPK treatments was 20.1 times and 30.9 times higher than that in CK. During the maize season, the significant differences of NO emission rate, cumulative emissions and emission coefficient were observed between NPK and BCNPK ( $P < 0.01$ ). NO emission rate, cumulative emissions and emission coefficient in maize season were decreased by 73.1%, 77.4% and 85.5%, respectively, for BCNPK as compared with NPK. However, the aforementioned three parameters in wheat season showed no significant differences between the two treatments. Moreover, crop yield of BCNPK during the maize and wheat seasons increased by 6.7% and 13.5%, respectively, in comparison with that of NPK. Yield-scaled global warming potential (yield-scale GWP), a comprehensive indicator for the environmental and yield efficiency evaluation, of BCNPK exhibited the decreases of 79.4% and 26.4%, respectively, as compared with that of NPK for both maize and wheat seasons. That is to say, under the same level of nitrogen fertilization, biochar application could not only guarantee the crop production in purple soil farmland not to reduce, but also cut down NO emission. Therefore, biochar application in the purple soil farmland is a promising practice for NO emission reduction.

**Key words:** Biochar; Purple soil; NO reduction; Comprehensive greenhouse gas effect