DOI：10.11766/trxb201510080392

施肥方式对冬小麦—夏玉米轮作土壤N_2O排放的影响*

刘 韵[1, 2, 3] 柳文丽[1, 2, 3] 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）

摘 要 氧化亚氮（N_2O）是一种重要的农田温室气体，本研究利用紫色土长期施肥试验平台，采用静态箱/气相色谱法对紫色土旱作农田冬小麦—夏玉米轮作系统的N_2O排放进行了定位观测（2012年11月至2013年9月），研究单施氮肥（N）、常规氮磷钾肥（NPK）、猪厩肥（OM）、猪厩肥配施氮磷钾肥（OMNPK）和秸秆还田配施氮磷钾肥（ICRNPK）等施肥方式对紫色土N_2O排放特征的影响；不施肥（NF）作为对照计算排放系数，以探寻紫色土地区可操作性强、环境友好的施肥方式。结果表明，所有施肥方式的N_2O排放均呈现双峰排放，峰值出现在施肥初期；玉米季N_2O排放峰值显著高于小麦季（$p < 0.05$）。在相同的施氮水平（小麦季130 kg hm^{-2}，玉米季150 kg hm^{-2}）下，施肥方式对N_2O排放和作物产量均有显著影响（$p < 0.05$）。N、OM、NPK、OMNPK和ICRNPK处理的土壤N_2O周年累积排放量分别为1.93、1.96、1.12、1.50和0.79 kg hm^{-2}，排放系数分别为0.62%、0.63%、0.33%、0.47%和0.21%，全年作物产量分别为4.35、11.95、8.39、9.77、10.93 t hm^{-2}。施用猪厩肥显著增加N_2O排放量，而秸秆还田在保证作物产量的同时显著降低N_2O排放量，可作为紫色土地区环境友好的施肥方式。土壤无机氮（NO_3^--N和NH_4^+-N）是N_2O排放的主要限制因子。因此，在施氮水平相同时，施肥方式对紫色土活性氮含量的影响导致N_2O排放差异显著，是土壤N_2O排放差异的根本原因。土壤孔隙充水率也是影响N_2O排放的重要环境因子，并且其对N_2O排放的影响存在阈值效应。

关键词 N_2O排放；小麦—玉米轮作；施肥方式；土壤无机氮；紫色土；产量

中图分类号 X511 **文献标识码** A

氧化亚氮（N_2O）是一种重要的温室气体，其增温效应是CO_2的296倍～310倍[1]。2011年，大气中的N_2O浓度已经达到0.44 mg m^{-3}，超出工业化时代前的20%[1]。研究表明，大气N_2O浓度的增加主要来源于农业，其贡献率占人类活动产生的N_2O总量的60%以上[2]。1980年至2007年中国农田N_2O排放年均增长7.6%，2007年N_2O-N排放量达到288.4 Gg（1 Gg = 1000 t），肥料氮的施入是大气中N_2O浓度增长的最主要因素[2]。N_2O排放量随着施氮量的增加而增加。除氮肥投入量之外，氮肥的品种对N_2O排放的影响也很大[3]，合理的施肥方式能有效减少因施肥而引起的土壤N_2O的排放。有关华北冬小麦—夏玉米轮作体系温室气体排放的研究表明，华北N_2O排放主要来自NH_4^+基氮肥的硝化作用[4]。还有研究表明，华北平原施用硝态氮几乎不产生N_2O排放[5]。此外，缓释肥和控释肥等新型肥料在减少N_2O排放方面也有一定作用。在夏玉米生产中，当施氮量为300 kg hm^{-2}时，施用缓效尿素做基肥能够减少70% N_2O排放。目前，施用有机肥以及秸秆还田对土壤N_2O排放的影响尚无统

* 国家重点基础研究发展计划（“973”）项目（2012CB417101）和国家自然科学基金项目（41271321、41330744）联合资助 Supported by the National Basic Research Program of China（973 Program）（No. 2012CB417101）and the National Natural Science Foundation of China（Nos. 41271321 and 41330744）

† 通讯作者 Corresponding author，E-mail：bzhu@imde.ac.cn

作者简介：刘 韵（1991—），女，重庆人，硕士研究生，研究方向为土壤—植物营养。E-mail：lylove003@126.com

收稿日期：2015-10-08；收到修改稿日期：2015-12-07

一的结论。研究表明，在等氮量情况下，化肥配合有机肥施用的土壤N_2O排放量大于化肥处理，秸秆还田降低了土壤N_2O的排放。但也有研究表明，等氮条件下，单施化肥与有机无机肥混施处理的N_2O排放通量间差异不显著[6]。还有研究指出，等氮施肥条件下，施用猪粪相比施用化肥能减少农田N_2O的排放[7]。邹建文等[8]认为，在常规灌溉方式下，秸秆还田减少后季麦田N_2O排放。而邹国元等[9]却认为秸秆还田可能促进土壤N_2O的排放。这可能是由于试验地区的环境因素、土壤类型、耕作制度及肥料投入比例和类型等因素的不同造成的。目前，国内有关施肥对小麦—玉米轮作土壤N_2O排放的影响研究多集中在华北平原地区，这其中涉及长期定位施肥的研究更少。四川盆地中部的紫色土丘陵区是四川省乃至全国重要的玉米和小麦等粮食生产基地之一。紫色土是该地区主要耕作土壤类型，但关于施肥方式对该地区土壤N_2O排放的报道不多。曾泽彬等[10]和项虹艳等[11]研究了施肥对夏玉米季紫色土N_2O排放的影响，未对整个玉米—小麦轮作周期的土壤N_2O排放开展观测研究。Zhou等[12]研究了紫色土玉米—小麦轮作系统土壤N_2O的排放，探讨了N_2O排放过程规律与N淋溶的关系。本研究拟从优化施肥的角度，利用长期田间施肥试验平台，研究不同施肥方式对冬小麦—夏玉米轮作系统下的土壤周年N_2O排放的影响，以探寻可操作性强、环境友好的施肥方式，同时为区域农田生态系统N_2O排放量估算和土壤氮循环等研究提供科学数据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验点位于中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站（105°27′ E，31°16′ N）的养分平衡长期试验场内。试验点海拔460 m，具有典型的四川盆地亚热带湿润季风气候特征，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 ℃；多年平均降水量836 mm，且分布不均，无霜期294 d。土壤以钙质紫色土为主，农作物一年两熟，主要以小麦—玉米轮作为主。

1.2 供试土壤

供试土壤为发育于侏罗系蓬莱镇组紫色页岩的钙质紫色土，0～20 cm表土基础理化性质为：pH 8.2，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}，有效磷9.02 mg kg^{-1}，速效钾86.35 mg kg^{-1}，土壤容重1.34 g cm^{-3}，土壤黏粒含量6.5%，粉粒含量58.9%，砂粒含量34.6%。

1.3 试验设计

供试作物选择四川盆地紫色土旱地代表轮作作物冬小麦和夏玉米，冬小麦于2012年11月5日种植，2013年5月11日收获；夏玉米于2013年6月1日播种，2013年9月9日收获。试验设6个处理：单施氮肥（N）、单施猪厩肥（OM）、常规氮磷钾肥（NPK）、猪厩肥配施氮磷钾肥（OMNPK）、秸秆还田配施氮磷钾肥（ICRNPK）和对照不施肥（NF）。各施肥处理保持施用氮素总量在同一水平，其中小麦季施氮130 kg hm^{-2}，玉米季150 kg hm^{-2}。有机—无机复合施肥时，无机化肥的氮量为总施氮量的60%，猪厩肥和秸秆占40%。试验中，化肥氮为碳酸氢铵（纯N 17%），磷肥为过磷酸钙（含P_2O_5 12%），钾肥为氯化钾（含K_2O 60%），还田秸秆采用小区内施用NPK处理的上季作物秸秆，秸秆经剪碎后以覆土翻耕的形式还田。施肥前，提前测新鲜猪厩肥和当季还田秸秆中全氮含量，并按纯氮总量进行换算。施肥方式采用基肥一次性于播种前人工施入，耕作和施肥同步，耕作方式为人工锄耕，深度为20 cm。冬小麦肥料采取撒施的方式施肥，夏玉米为穴施。试验采用随机完全区组设计，每处理设置3个重复。各处理的施肥方式、施肥量和种植制度已延续10年。

1.4 气体采集与分析方法

N_2O通量测定采用静态箱—气相色谱法，箱体尺寸为50 cm × 50 cm × 50 cm，带有水槽的不锈钢底座插入土壤20 cm深。每个采样点于上午9：00～11：00 采集气体。采集的气样避光保存在 60 ml 医用注射器内，24 h 内分析完成。采样频率为每周 2 次，施肥后连续采样14天，降水后连续采样3天。小麦季观测期为2012年11月6日至2013年5月11日，玉米季观测期为2013年6月1日至2013年9月9日，为一个完整的冬小麦—夏玉米生长季。小麦季和玉米季采样箱构造详见文献［13］描述，气体采样方法、分析方法，N_2O排放通量、N_2O排放总量计算方法和数据分析方法与文献［14］一致，N_2O排放系数计算方法与文献［14］一致。

1.5　土壤环境因子的监测

在采集气体的同时，测定相关土壤环境因子。其中，土壤体积含水率（%）用MP－406 便携式水分测定仪（杭州托普仪器有限公司）测定，并利用土壤容重将其转换为土壤孔隙充水率［WFPS（%）］；采样箱内气体温度、土壤温度（5 cm）使用 JM 624 型便携式测温计（上海自动化仪表公司）测定；降水量、大气压等资料利用试验站内的气象站获得（离试验点50 m）。每次采集气体的同时，同步采集 0～10 cm土壤样品以分析土壤含水率和无机氮（NO_3^-–N、NH_4^+–N）含量，施肥初期和降雨时土样采集频率与气体采集同步，其余时间的鲜土样品采集与无机氮测定均为一周一次。土壤含水率采用烘干法测定；土壤无机氮（NO_3^-–N、NH_4^+–N）含量采用 0.5 mol L^{-1} K_2SO_4浸提，AA3 流动分析仪（德国SEAL公司）测定（水土比为5∶1）。

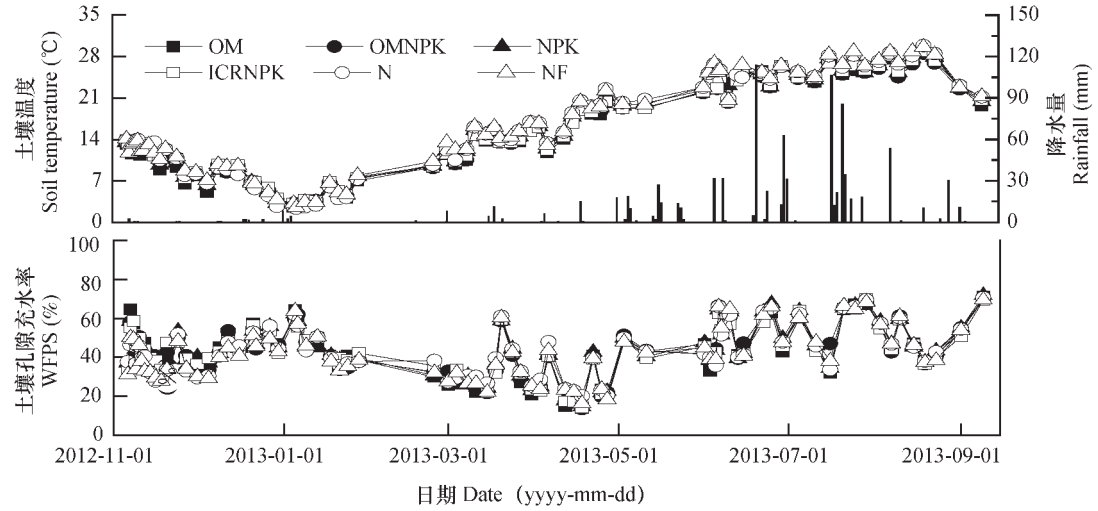
1.6　数据处理

利用Excel 2007进行相关数据计算，Origin 8.0绘图，SPSS 16.0进行皮尔森相关分析和单因素方差分析。

2　结　果

2.1　降水量、土壤温度及土壤孔隙充水率变化

小麦—玉米轮作期间，降水量、土壤温度（5 cm）和土壤孔隙充水率（WFPS）等动态变化见图1。在试验期，总降水量980.2 mm，主要集中在5至9月之间，冬小麦季降水明显少于夏玉米季。整个观测期间，各施肥处理间土壤温度和孔隙含水率并无显著差异（$p > 0.05$）。土壤5 cm温度变化范围为2.4～29.8℃，冬季温度最低，春季温度回升，夏季最高。土壤WFPS受降水的影响呈现不规则变



注：OM、OMNPK、NPK、ICRNPK、N和NF分别代表猪厩肥、猪厩肥配施氮磷钾肥、常规氮磷钾肥、秸秆还田配施氮磷钾肥、单施氮肥及不施肥，下同 Note：Treatment OM，OMNPK，NPK，ICRNPK，N and NF represents application of pig manure，application of pig manure plus synthetic NPK fertilizer，application of synthetic NPK fertilizer，incorporation of crop residues plus synthetic NPK fertilizer，application of pure synthetic N fertilizer and application of no fertilizer，respectively. The same below

图1　降水量及不同施肥方式下土壤5 cm温度及土壤孔隙充水率（WFPS）变化

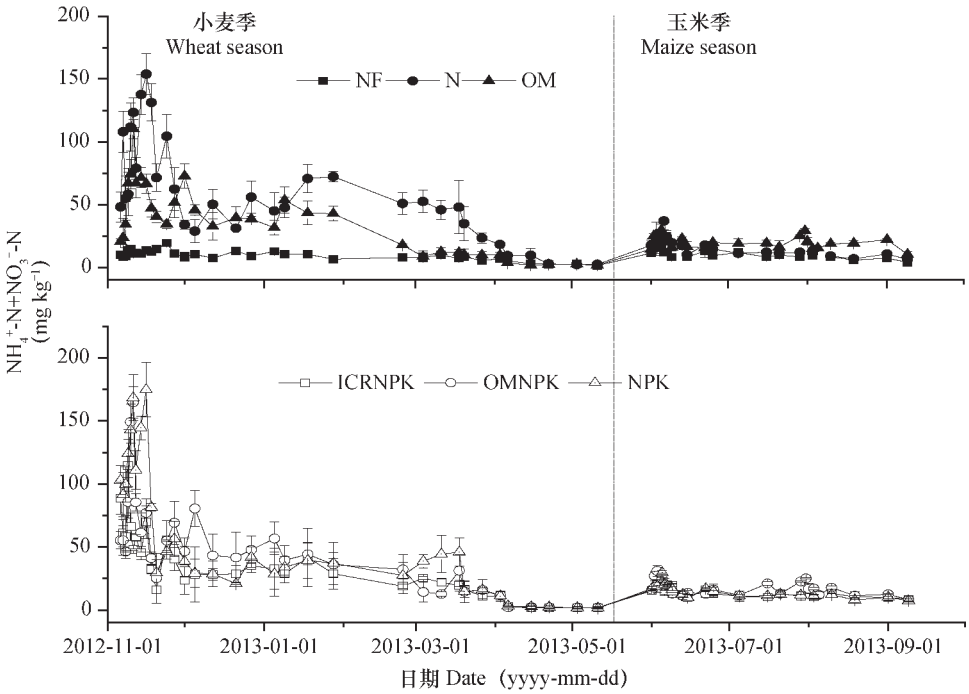
Fig 1　Changes in soil temperature and soil WFPS at topsoil（5 cm）relative to rainfall and fertilization regime

化，最大值为71.9 %，最小值为13.5 %。

2.2　作物生长期土壤无机氮变化

图2为冬小麦—夏玉米轮作期间土壤无机氮（NO_3^-–N + NH_4^+–N）的动态变化情况（以干土重计）。在小麦和玉米季，不同施肥方式间的土壤无机氮含量差异极显著（$p < 0.01$），不施肥处理（NF）土壤中无机氮含量最低、变化幅度最小（1.49～19.46 mg kg^{-1}）。小麦季和玉米季土壤无机氮含量变化趋势类似，即施肥后，无机氮含量迅速增加，持续一段时间后下降，至作物收获时含量达最低值。

小麦生长季内，OM和OMNPK处理土壤中无机氮含量在施肥第6天达到最大值，分别为110.1和164.6 mg kg^{-1}；而N、NPK和ICRNPK则在施肥后第11天达到最大值，分别为153.9、174.7和69.82 mg kg^{-1}。土壤无机氮含量高峰期持续约2周。玉米生长季



注：误差线代表标准差，下同 Note：Error bars represent standard deviations. The same below

图2 不同施肥方式下土壤无机氮含量变化

Fig 2 Changes in soil inorganic N (NO_3^-–N + NH_4^+–N) contents relative to fertilization regime

内，OM、OMNPK以及N的土壤无机氮含量在施肥后第4天达到最大值，分别为29.72、31.10、37.00 mg kg^{-1}，而NPK和ICRNPK在施肥后第3天就达到最大值，分别为29.70和26.29 mg kg^{-1}。玉米季无机氮高峰期仅持续约1周。

2.3 不同施肥方式下土壤N_2O排放通量

NF处理土壤N_2O排放通量的季节变化不突出（图3），变化范围为–0.71 ~ 20.83 μg m^{-2} h^{-1}。在小麦和玉米生长期，各施肥处理的N_2O排放通量变化趋势基本一致，呈双峰型变化（图3），即施肥后N_2O排放速率迅速增加，在第5、6天达到峰值后通量下降，整个排放高峰在小麦季和玉米季均持续2周。可见施肥是小麦和玉米生长初期N_2O排放的主要驱动因子。

在小麦季，N、OM、NPK、OMNPK和ICRNPK处理下，土壤N_2O排放通量变化范围分别为1.06 ~ 48.47、0.86 ~ 114.62、–2.18 ~ 61.49、0.04 ~ 113.06和 –0.99 ~ 50.33 μg m^{-2} h^{-1}，平均排放通量分别为11.69、15.81、10.08、13.37和8.37 μg m^{-2} h^{-1}。

在玉米季，N、OM、NPK、OMNPK和ICRNPK处理下，土壤N_2O排放通量变化范围分别为1.96 ~ 245.7、3.13 ~ 1041、–1.06 ~ 214.5、3.30 ~ 473.4和2.28 ~ 225.5 μg m^{-2} h^{-1}，平均排放通量分别为48.21、165.1、38.90、96.14和37.91 μg m^{-2} h^{-1}。在所有施肥处理中，玉米季N_2O平均通量均高于小麦季，这与一般认为夏秋季作物生长N_2O排放通量高于冬春季作物的观点一致。

2.4 不同施肥方式下的土壤N_2O排放总量和作物产量

由表1可见，不同施肥方式间土壤N_2O累积排放量差异显著，施肥方式对N_2O累积排放量具有显著影响（$p < 0.05$）。其大小顺序为OM > N > OMNPK > NPK > ICRNPK > NF。所有施肥处理的土壤N_2O累积排放量均显著高于NF处理（$p < 0.05$）。

在冬小麦季，不同施肥方式下土壤N_2O排放量在0.19 ~ 0.38 kg hm^{-2}之间，占施氮总量的0.10% ~ 0.25%。常规NPK施肥处理的土壤N_2O排放量与OMNPK处理无显著差异（$p > 0.05$），而与其他处理均存在显著差异（$p < 0.05$）。与NPK处理相比，N和OM处理的土壤N_2O排放量分别增加了31.2% 和24.5%，而ICRNPK则减少34.3%（$p < 0.05$）。

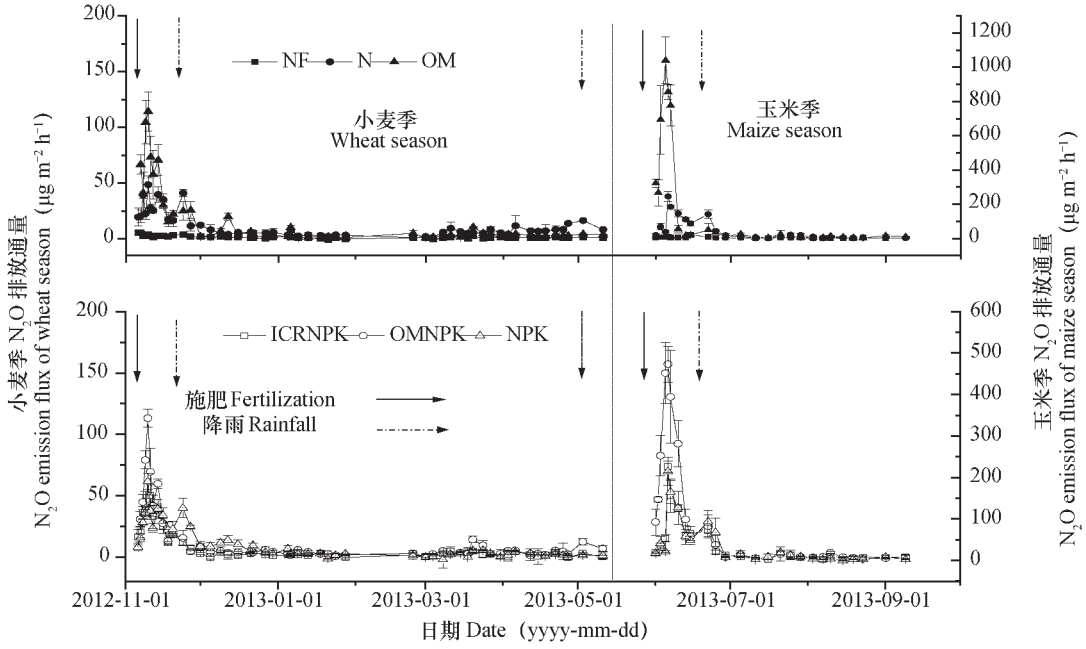


图3　不同施肥方式下土壤N_2O排放通量变化

Fig 3　Dynamics of soil N_2O emission flux relative to fertilization regime

在夏玉米季，不同施肥方式下土壤N_2O排放量在0.60～1.59 kg hm^{-2}之间，占施氮总量的0.31%～0.97%。OM的N_2O排放量与单施氮肥N无显著差异（$p > 0.05$），而NPK、OMNPK和ICRNPK较N减少了46.5%、24.5%和61.3%（$p < 0.05$）。与常规施肥NPK相比，OMNPK增加41.0%的N_2O排放（$p < 0.05$），ICRNPK则减少了27.7%的N_2O排放（$p < 0.05$）。

施肥方式对冬小麦和夏玉米作物产量同样具有显著影响（$p < 0.05$）。在冬小麦季，施用有机肥（OM）的处理小麦产量最高，为3.71 ± 0.10 t hm^{-2}，此外秸秆还田处理（ICRNPK）也具有较高的小麦产量（3.40 ± 0.29 t hm^{-2}），且两者间差异并不显著（$p > 0.05$）。与常规NPK施肥方式相比，OM和ICRNPK处理的小麦产量分别增加33.2%和21.5%（$p < 0.05$）。而在夏玉米季，同样也是OM处理的玉米产量最高，为8.24 ± 0.72 t hm^{-2}，其次是ICRNPK处理，为7.52 ± 0.41 t hm^{-2}，两者之间无显著差异（$p > 0.05$），但相较于NPK处理，分别增产47.1%和34.3%（$p < 0.05$）。可见，施入有机肥和秸秆有利于提高紫色土生产力，创造更大的经济效益。

3　讨　论

3.1　降水对N_2O排放的影响

降水所引起的土壤快速再湿润能激发N_2O形成与排放，其主要原因是干燥时部分微生物死亡增加了土壤可降解有机碳的量，氧的存在又促进了硝化过程，其后土壤湿润时发生反硝化作用，N_2O产生比还原快，导致N_2O累积并使N_2O扩散排放成为可能[2; 16; 17]。在2013年3月20日、4月6日、5月3日和6月22日的观测中，不同施肥方式下土壤N_2O排放通量明显增加（图3），这主要是由于在3月19日、4月5日、5月1日、6月20日、21日分别出现了5次降水（11.6、7.2、17.7、62.4和35.8 mm），土壤含水量显著增加，WFPS分别达到59.5%、42.3%、49.5%和63.7%，而此时的土壤温度（11.8～26.2 ℃）相对较高，微生物活性较强，土壤硝化与反硝化的共同作用促使土壤N_2O的大量产生和排放[15]。其中小麦季各施肥处理在降水事件中排放的N_2O占该作物季N_2O排放量的6%～15%，而玉米季则占到了5%～10%（除OM处理仅占3.7%），与部分学者的研究结果一

表1 不同施肥方式下土壤N_2O累积排放量和作物产量

Table 1 Cumulative soil N_2O emission and grain yield relative to fertilization regime

处理 Treatment	累积排放量 Total emission（kg hm^{-2}）			排放系数 Emission factor（%）			作物产量 Yield（t hm^{-2}）		
	小麦季 Wheat season	玉米季 Maize season	全年 Whole year	小麦季 Wheat season	玉米季 Maize season	全年 Whole year	小麦 Wheat	玉米 Maize	全年 Whole year
NF	0.06 ± 0.01d	0.13 ± 0.03e	0.19 ± 0.03e	—	—	—	1.27 ± 0.38d	1.89 ± 0.38e	3.16 ± 0.35e
N	0.38 ± 0.04a	1.55 ± 0.12a	1.93 ± 0.04a	0.25a	0.95a	0.62a	1.34 ± 0.15d	3.01 ± 0.27d	4.35 ± 0.33d
OM	0.36 ± 0.06a	1.59 ± 0.10a	1.96 ± 0.08a	0.23a	0.97a	0.63a	3.71 ± 0.10a	8.24 ± 0.72a	11.95 ± 0.77a
NPK	0.29 ± 0.05b	0.83 ± 0.03c	1.12 ± 0.07c	0.18c	0.45c	0.33c	2.80 ± 0.19c	5.60 ± 0.73c	8.39 ± 0.92c
OMNPK	0.33 ± 0.02ab	1.17 ± 0.06b	1.50 ± 0.05b	0.21b	0.69b	0.47b	3.13 ± 0.25bc	6.63 ± 0.28b	9.77 ± 0.45b
ICRNPK	0.19 ± 0.03c	0.60 ± 0.05d	0.79 ± 0.06d	0.10d	0.31d	0.21d	3.40 ± 0.29ab	7.52 ± 0.41ab	10.93 ± 0.70ab

注：“—”代表不施肥作为对照计算排放系数，同列不同字母表示处理间0.05水平差异显著（Duncan多重比较），误差为标准差 Note: “—” represents no fertilizer（NF）as control for calculation of emission coefficient. Different small letters in the same column indicate significant differences（$p < 0.05$, Duncan）between fertilization regimes. “±” errors represent standard deviations

http://pedologica.issas.ac.cn

致[10; 13]。说明在土壤温度适宜时，土壤水分是紫色土N_2O排放的重要影响因子[16]。

小麦季和玉米季N_2O排放通量与土壤孔隙充水率无显著的相关性（$p > 0.05$，表2）。但对各施肥处理N_2O排放通量大于各自观测期平均值的所有观测值而言，小麦季中，67%～100%的N_2O排放量观测值出现在WFPS介于35%～65%的条件下，而玉米季则有67%～87%的观测值出现在WFPS介于40%～70%条件下。可见，土壤孔隙充水率是小麦—玉米轮作土壤N_2O排放的主要控制因子之一，因为WFPS介于40%～65%时相较于其他WFPS含量更有利于N_2O的产生和排放。

3.2　土壤环境条件对N_2O排放的影响

大量野外和室内试验均表明，无论是硝化还是反硝化作用，土壤中有效氮的水平均是控制N_2O气体释放的主要限制性因素[17-18]，土壤中NH_4^+和NO_3^-含量与土壤释放的N_2O气体通量间有很强的相关性。N_2O排放通量与土壤无机氮含量的相关分析表明，各施肥方式下，二者之间均存在显著正相关（$p < 0.05$，表2），这主要是由于土壤中的NH_4^+和NO_3^-为硝化和反硝化微生物提供了底物，促进土壤N_2O的产生和排放。土壤无机氮含量是小麦—玉米轮作土壤N_2O排放的主要控制因子。

土壤温度通过影响微生物反应速率和土壤气体扩散速率而影响N_2O的释放[17]。对N_2O排放通量与土壤温度的相关分析表明，小麦季和玉米季的N_2O排放通量与地下5 cm处土壤温度之间均无显著相关（$p > 0.05$，表2），可能因为在小麦生长期的气温较低，土壤温度变化小，而同时降水少，湿度变化小；而玉米季则可能是因为监测时间较短，数据量不多，且35%的数据均来自施肥初期，因而施肥造成的肥料效应部分掩盖了土壤温度的效应。该结果与其他研究结果一致[11, 14]。

3.3　施肥方式对N_2O排放的影响

不同施肥方式下冬小麦—夏玉米土壤N_2O累积排放通量呈OM > N > OMNPK > NPK > ICRNPK > NF的关系。施肥方式对N_2O排放具有显著影响（$p < 0.05$，表1）。施用有机肥处理（OM和OMNPK）的N_2O累积排放量显著高于NPK常规施肥，说明有机肥能促进土壤N_2O排放。有研究指出，当有机肥等氮量施用时，N_2O排放主要受外源碳供应水平的制约[19-21]。通过影响土壤C/N比来影响微生物活动，进而影响硝化和反硝化反应产物N_2O的生成与排放。一般高C/N比作物残留会降低N_2O排放，相反，低C/N比作物残留会促进N_2O排放[22]。本研究所施用的猪厩肥C/N比较小，

表2　N_2O排放通量与土壤环境条件的相关性

Table 2　Correlation between N_2O flux and soil conditions

处理 Treatment	作物 Crops	土壤温度 Soil temperature	土壤孔隙充水率 Soil WFPS	土壤无机氮含量 Soil inorganic N content
NF	小麦 Wheat	0.111	0.108	0.457*
	玉米 Maize	0.291	0.228	0.465*
N	小麦 Wheat	0.223	0.060	0.647**
	玉米 Maize	0.152	0.144	0.761**
OM	小麦 Wheat	0.115	0.356*	0.624**
	玉米 Maize	0.113	0.034	0.608**
NPK	小麦 Wheat	−0.028	0.270	0.798**
	玉米 Maize	−0.291	0.229	0.456*
OMNPK	小麦 Wheat	0.186	0.222	0.757**
	玉米 Maize	−0.218	0.157	0.479*
ICRNPK	小麦 Wheat	0.145	0.268	0.702**
	玉米 Maize	0.322	0.149	0.477*

注：*和**分别代表在0.05和0.01水平显著相关，表中数值代表皮尔森相关系数 Note: "*" and "**" indicates significant correlation at $p < 0.05$ and $p < 0.01$, respectively. The values in the table are Pearson correlation coefficients

能够为土壤提供活性微生物和酶，促进土壤有机氮的矿化，增加土壤中无机氮含量（图2），为硝化和反硝化作用的进行提供底物。而ICRNPK处理土壤N_2O累积排放量显著低于所有施肥处理（$p < 0.05$，表1），也是由于施入了高C/N比的玉米和小麦秸秆，微生物在分解秸秆过程中利用土壤氮素来构成自身的体细胞，微生物对氮素的争夺利用导致土壤无机氮含量下降（图2），使硝化和反硝化底物含量下降以减少N_2O的排放。综上，从节约成本及减排方面来看，小麦—玉米轮作中秸秆还田是行之有效的途径。

农田施氮的目的是增加作物产量，因而脱离产量来谈N_2O减排没有现实意义。合理的施肥方式应该在保证作物产量的同时减少N_2O的排放。本研究中，相较于常规NPK施肥，长期施用有机肥虽显著提高了作物产量，但也增加了N_2O排放（$p < 0.05$，表1）；而长期单施N肥不仅不能增产，还显著增加N_2O排放（$p < 0.05$，表1），这也从侧面说明了单施N肥不能提供作物生长所需的其他养分，因而无法增加作物产量，反而激发N_2O排放，不利于农业可持续发展；长期秸秆还田（ICRNPK）条件下，全年作物产量为10.93 ± 0.70 t hm^{-2}，相较于NPK处理显著增加了30%，且与最高作物产量的OM处理间无显著差异，N_2O排放量减少了29%（$p < 0.05$，表1）。可见秸秆还田（ICRNPK）能够实现作物高产与环境效益的统一，可作为紫色土地区推荐的施肥方式。

氮肥施用是影响土壤N_2O排放的主要因素，施用氮肥能显著促进土壤N_2O的排放[13-23]。在本研究中，所有施肥处理在施肥初期均出现了非常明显的N_2O排放峰（图3），其施肥初期（施肥后14天内）的N_2O累积排放量占周年累积排放的比值分别为：40%（N）、93%（OM）、83%（ICRNPK）、88 %（OMNPK）和57%（NPK），这表明土壤N_2O排放主要发生在施肥之后的较短时间内。这主要是因为作物播种和施肥同步进行，施肥初期，植株刚萌发，对肥料N的利用有限，使得土壤中大量无机氮积累（图2），导致了N_2O的大量排放。因此，在选择秸秆还田配施无机肥的同时，根据作物生育期特点调节施肥时间与施肥量可能会进一步减少小麦—玉米轮作土壤的N_2O排放量，其具体的N^2O减排潜力有待进一步的研究。

4 结 论

冬小麦—夏玉米轮作期间土壤N_2O排放呈双峰式，小麦和玉米季土壤N_2O均在施肥后第5～6天出现排放峰值，之后排放通量迅速下降。施肥是小麦—玉米轮作土壤N_2O排放出现高峰的主要驱动因子，施肥初期土壤N_2O累积排放量占周年排放量的40%～93%。土壤无机氮（NO_3^--N和NH_4^+-N）含量是N_2O排放的主要限制因子，降水引发的土壤WFPS变化也是影响N_2O排放的重要环境因子，并且其对N_2O排放的影响存在阈值效应。不同施肥方式对冬小麦—夏玉米轮作土壤N_2O累积排放量具有显著影响（$p < 0.05$）。ICRNPK处理N_2O全年累积排放量为0.79 ± 0.06 kg hm^{-2}，显著低于其他施肥方式（$p < 0.05$），而全年作物产量为10.93 ± 0.70 t ha^{-1}，与最高作物产量的OM处理间无显著差异。施肥方式调控着土壤无机氮水平和土壤C/N比，是土壤N_2O排放的主要调控因子。秸秆还田是现行施肥方式下紫色土N_2O减排的有效途径，若能配合作物生育期特点合理调节施用时间与施肥量，可进一步减少小麦—玉米轮作土壤的N_2O排放。

参 考 文 献

[1] IPCC. Climate Change 2013：The physical science basis：Summary for policymakers. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report. 2013

[2] 张玉铭，胡春胜，张佳宝，等. 农田土壤主要温室气体（CO_2、CH_4、N_2O）的源/汇强度及其温室效应研究进展. 中国生态农业学报，2011，19（4）：966—975
Zhang Y M，Hu C S，Zhang J B，et al. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO_2，CH_4 and N_2O in agricultural soils（In Chinese）. Chinese Journal of Eco-Agriculture，2011，19（4）：966—975

[3] 赵维，蔡祖聪. 氮肥品种对亚热带土壤N_2O排放的影响. 土壤学报，2009，46（2）：248—254
Zhao W，Cai Z C. Effects of N fertilizers on N_2O emission from subtropical soils in China（In Chinese）. Acta Pedologica Sinica，2009，46（2）：248—254

[4] Ju X T，Lu X，Gao Z L，et al. Processes and factors controlling N_2O production in an intensively managed low carbon calcareous soil under sub-humid monsoon conditions. Environmental Pollution，

2011，159：1007—1016

[5] de Klein C A M，Sherlock R R，Cameron K C，et al. Nitrous oxide emissions from agricultural soils in new zealand—A review of current knowledge and directions for future research. Journal of the Royal Society of New Zealand，2001，31（3）：543—574

[6] 孟磊，蔡祖聪，丁维新. 长期施肥对华北典型潮土N分配和N_2O排放的影响. 生态学报，2008，28（12）：6197—6203
Meng L，Cai Z C，Ding W X. Effects of long-term fertilization on N distribution and N_2O emission in fluvoaquci soil in North China（In Chinese）. Acta Ecologica Sinica，2008，28（12）：6197—6203

[7] Vallejo A S U，Garcia-Torres L A A，Lopez-Fernandez S，et al. Nitrogen oxides emission from soils bearing a potato crop as influenced by fertilization with treated pig slurries and composts. Soil Biology & Biochemistry，2006，38（9）：2782—2793

[8] 邹建文，黄耀，宗良纲，等. 稻田不同种类有机肥施用对后季麦田N_2O排放的影响. 环境科学，2006，27（7）：1264—1268
Zou J W，Huang Y，Zong L G，et al. Effect of organic material incorporation in rice season on N_2O emission from following winter wheat growing season（In Chinese）. Environmental Science，2006，27（7）：1264—1268

[9] 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. 中国农业科技导报，2001，3（6）：47—50
Zou G Y，Zhang F S，Chen X P，et al. Effect of straw addition on denitrification in upland soil（In Chinese）. Revive of China Agricultural Science and Technology，2001，3（6）：47—50

[10] 曾泽彬，朱波，朱雪梅，等. 施肥对夏玉米季紫色土N_2O排放及反硝化作用的影响. 土壤学报，2013，50（1）：130—137
Zeng Z B，Zhu B，Zhu X M，et al. Effects of fertilization on N_2O emission and denitrification in purple soil during summer maize season in the sichuan basin（In Chinese）. Acta Pedologica Sinica，2013，50（1）：130—137

[11] 项虹艳，朱波，况福虹，等. 氮肥施用对紫色土-玉米根系系统N_2O排放的影响. 环境科学学报，2007，27（3）：413—420
Xiang H Y，Zhu B，Kuang F H，et al. Effects of nitrogen fertilizer application on N_2O emission in a purple soil and maize root system（In Chinese）. Acta Scientiae Circumstantiae，2007，27（3）：413—420

[12] Zhou M H，Zhu B，Butterbach-Bahl K，et al. Nitrous oxide emissions and nitrate leaching from a rain-fed wheat-maize rotation in the Sichuan basin，China. Plant and Soil，2012，362（1/2）：149—159

[13] 于亚军，高美荣，朱波. 小麦—玉米轮作田与菜地N_2O排放的对比研究. 土壤学报，2012，49（1）：96—103
Yu Y J，Gao M R，Zhu B. Comparison study on N_2O emission from field under wheat-maize rotation system and field under vegetable cultivation（In Chinese）. Acta Pedologica Sinica，2012，49（1）：96—103

[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. 中国生态农业学报，2014，22（9）：1029—1037
Liu W L，Li X P，Shen X，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（In Chinese）. Chinese Journal of Eco-Agriculture，2014，22（9）：1029—1037

[15] 徐文彬，刘广深，刘维屏. 降雨和土壤湿度对贵州旱田土壤N_2O释放的影响. 应用生态学报，2002，13（1）：67—70
Xu W B，Liu G S，Liu W P. Effects of precipitation and soil moisture on N_2O emissions from upland soils in Guizhou（In Chinese）. Chinese Journal of Applied Ecology，2002，13（1）：67—70

[16] 王兵，李心清，程红光，等. 土壤NO_X气体释放研究进展. 土壤通报，2011，42（6）：1522—1529
Wang B，Lee X Q，Cheng H G，et al. Advnce in the study of NO_X emission fluxes in soil（In Chinese）. Chinese Journal of Soil Science，2011，42（6）：1522—1529

[17] 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. 土壤，2012，44（6）：881—887
Cai Y J，Ding W X，Xiang J. Factors controlling N_2O and NO emissions from agricultural soils and their influencing mechanisms（In Chinese）. Soils，2012，44（6）：881—887

[18] 于亚军，王小国，朱波. 紫色土菜地生态系统土壤N_2O排放及其主要影响因素. 生态学报，2012，32（6）：1830—1838
Yu Y J，Wang X G，Zhu B. N_2O emissions from vegetable farmland with purple soil and the main factors influencing these emissions（In Chinese）. Acta Ecologica Sinica，2012，32（6）：1830—1838

[19] 潘晓健，刘平丽，李露，等. 氮肥和秸秆施用对稻麦轮作体系下土壤剖面N_2O时空分布的影响. 土壤学报，2015，52（2）：364—371
Pan X J，Liu P L，Li L，et al. Spatial and temporal distributions of

soil profile N_2O as affected by N fertilization and straw incorporation in the rice-wheat rotation system (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(2): 364—371

[20] Zhu B, Kuang F H, Tang J L. Measurements of nitrate leaching from a hillslope cropland in the central Sichuan basin, China Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(4): 1419—1426

[21] Shang Q, Yang X, Gao C, et al. Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in chinese double rice-cropping systems: A 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments. Global Change Biology, 2011, 17(6): 2196—2210

[22] Chadwick D R. Nitrous oxide and methane emissions following application of animal manures to grassland. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(1): 277—287

[23] 凌德, 李婷, 王火焰, 等. 施用方式和氮肥种类对水稻土中氮素迁移的影响效应. 土壤, 2015, 47(3): 478—482
Ling D, Li T, Wang H Y, et al. Effects of fertilization methods and forms of nitrogen fertilizers on nitrogen diffusion and migration in paddy soil (In Chinese). Soils, 2015, 47(3): 478—482

Effect of Fertilization Regime on Soil N_2O Emission from Upland Field under Wheat-Maize Rotation System

LIU Yun[1, 2, 3] LIU Wenli[1, 2, 3] 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*)

Abstract Agricultural soils have been determined to contribute at present about 60% to the global anthropogenic nitrous oxide (N_2O) emission due to N fertilization. It is a great challenge to guarantee high crop yields while reducing N_2O emissions under continuous application of nitrogen fertilizers. However, few field data sets are available for exploration of effects of fertilizer N regimes on soil N_2O emission in the Sichuan Basin, one of the regions the most intensive in agriculture in China. The main objectives of this research were to screen out optimal N fertilizer management practices which would not only reduce soil N_2O emission, but also maintain high crop yields. Static chamber-gas chromatographic techniques had been used to measure soil N_2O emissions from the purple soil under long-term N fertilization of pure synthetic N fertilizer (N), synthetic NPK fertilizer (NPK), pig manure (OM), pig manure plus synthetic NPK fertilizer (OMNPK) and incorporation of crop residues plus synthetic NPK fertilizer (ICRNPK). A plot with no fertilizer (NF) applied was set as control for emission coefficient calculation. In-situ field measurements were conducted through the wheat-maize rotation season from November 2012 to September 2013. N_2O emission showed a double-peak curve during the season regardless of fertilization regime. The peaks occurred in the first days after fertilization. However, the peak in the maize season was significantly higher than that in the wheat season ($p < 0.05$). Fertilization regimes influenced cumulative N_2O fluxes and grain yields significantly ($p < 0.05$). When the total N application rate was the same for all the treatments, 130 kg hm^{-2} in the wheat and 150 kg hm^{-2} in the maize season, Treatment N, OM, NPK, OMNPK and ICRNPK was 1.93, 1.96, 1.12, 1.50 and 0.79 kg hm^{-2}, respectively, in cumulative N_2O flux, 0.62%, 0.63%, 0.33%, 0.47% and 0.21%, respectively, in emission coefficient, and 4.35, 11.95, 8.39, 9.77, 10.93 t hm^{-2}, respectively, in total annual grain yield. In comparison with Treatment NPK, Treatment OM enhanced N_2O emission significantly, whereas, Treatment ICRNPK significantly reduced N_2O emission and maintained high crop yields, as well. Therefore, incorporation of crop

residues plus synthetic fertilization（ICRNPK）is recommended as an optimal fertilization regime in croplands of purple soil. Content of inorganic N（ammonium and nitrate）was the main controlling factor of soil N_2O emission. Therefore, the difference in N_2O emission flux was attributed to variation of the content of inorganic N induced by fertilization regime. That was also the reason why the fertilization regime, Treatment as ICRNPK, could effectively reduce N_2O emission. Soil water filled pore space（WFPS）might be another important factor affecting soil N_2O emission with a threshold effect. Therefore, it can be concluded that N_2O emissions from upland croplands under the wheat-maize rotation system can be reduced by optimizing timing and rate of N application in the light of crop growth and antecedent soil WFPS.

Key words　N_2O emission; Wheat-maize rotation; Fertilization regime; Soil inorganic nitrogen; Purple soil; Crop yield

（责任编辑：陈荣府）