

张 婧, 夏光利, 李 虎, 等. 一次性施肥技术对冬小麦/夏玉米轮作系统土壤 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 195–204.

ZHANG Jing, XIA Guang-li, LI Hu, et al. Effect of single basal fertilization on N_2O emissions in wheat and maize rotation system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(1): 195–204.

一次性施肥技术对冬小麦/夏玉米轮作系统土壤 N_2O 排放的影响

张 婧¹, 夏光利², 李 虎¹, 朱国梁², 牟小翎², 王立刚^{1*}, 黄诚诚¹, 江雨倩¹

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业部面源污染控制重点实验室/中国农业科学院-美国新罕布什尔大学可持续农业生态系统研究联合实验室, 北京 100081; 2. 泰安市农业科学研究院, 山东 泰安 271000)

摘 要: 利用静态暗箱-气相色谱法对华北平原冬小麦/夏玉米轮作系统施氮条件土壤 N_2O 排放特征进行周年观测, 以探讨不同处理[对照(CK)、优化施氮(OPT)、优化氮肥一次性施用(OPT1)和控释肥(CRF)]土壤 N_2O 排放特征及土壤温度、湿度对土壤 N_2O 排放的影响。结果表明: 冬小麦/夏玉米轮作系统中土壤 N_2O 排放峰值主要出现在施肥+降雨或灌溉事件后, 不同处理 N_2O 排放通量变化范围在 $-0.24 \sim 2.78 \text{ mg N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 平均排放通量 $23.88 \sim 65.46 \mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, OPT1 和 CRF 两个一次性施肥处理可以降低小麦和玉米基肥施用后土壤 N_2O 排放峰值, 但未改变轮作周期土壤 N_2O 排放季节变化规律; 土壤含水量对土壤 N_2O 排放有显著影响, 且对夏玉米季土壤 N_2O 排放影响大于冬小麦季; 各处理土壤 N_2O 排放通量与 5 cm 深度土壤温度之间均无相关性; 不同处理 N_2O 年度排放总量差异显著, 与 OPT 处理相比, OPT1 处理和 CRF 处理 N_2O 年排放总量分别减少 27.47% 和 22.80%。各处理 N_2O 排放系数介于 0.28%~0.50%, 均低于 IPCC 1.0% 的推荐值, 且各处理产量之间没有显著性差异, 因此一次性施肥技术能够在保证产量的前提下, 有效减少冬小麦/夏玉米轮作系统土壤 N_2O 排放。

关键词: 一次性施肥; 冬小麦/夏玉米轮作; N_2O 排放

中图分类号: X511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2016)01-0195-10 **doi:** 10.11654/jaes.2016.01.026

Effect of single basal fertilization on N_2O emissions in wheat and maize rotation system

ZHANG Jing¹, XIA Guang-li², LI Hu¹, ZHU Guo-liang², MOU Xiao-ling², WANG Li-gang^{1*}, HUANG Cheng-cheng¹, JIANG Yu-qian¹

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/ Key Laboratory of Non-point Source Pollution Control, Ministry of Agriculture/ CAAS-UNH Joint Laboratory for Sustainable Agro-ecosystem Research, Beijing 100081, China; 2. Taian Academy of Agricultural Sciences, Taian 271000, China)

Abstract: Nitrous oxide (N_2O), as one of the most important greenhouse gases, plays a crucial role in the global warming. Nitrogen (N) fertilizer is the primary source of N_2O emissions from agricultural soils. A field experiment was conducted to study the effect of single basal fertilization on N_2O emissions in wheat and maize rotation system. N_2O fluxes along with main environmental drivers (i.e., soil temperature, soil moisture, and soil $\text{NO}_3^- - \text{N}$) were observed in 4 treatments, including control treatment (CK), optimized fertilization treatment (OPT), single basal fertilization treatment (OPT1) and controlled release fertilization treatment (CRF), during the period of October 2013 to October 2014. Results showed that the peaks of N_2O emissions were usually observed at the event of fertilization accompanied with irrigation or precipitation. The N_2O emission rates ranged from $-0.24 \sim 2.78 \text{ mg N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, with daily means ranging from $23.88 \sim 65.46 \mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. The OPT1 and CRF treatments both decreased the N_2O peak values, but did not change the seasonal variation patterns. The N_2O fluxes were pos-

收稿日期: 2015-07-21

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项“主要粮食作物一次性施肥技术研究与示范”(201303103); 农业源温室气体监测与控制技术研究(201103039)

作者简介: 张 婧(1988—), 女, 山西大同人, 博士研究生, 从事农业源温室气体排放研究。E-mail: zhangjing201306@sina.com

* 通信作者: 王立刚 E-mail: wangligang@caas.cn

itively correlated with soil water filled pore space(WFPS), but not with soil temperature at 5 cm depth. Compared with the OPT treatment, the OPT1 and CRF treatments both significantly reduced annual N_2O emissions by 27.47% and 22.80%, respectively. Annual emission factor(EF) of N_2O emissions was calculated to be 0.28%~0.77% of the fertilizer N. It is concluded that single basal fertilization management could effectively reduce N_2O emissions from wheat and maize rotation system.

Keywords: single fertilization; wheat and maize rotation system; N_2O emission

因温室气体浓度升高而引起的全球变暖和臭氧层破坏是当今最大的全球环境问题, N_2O 作为最重要的温室气体之一,在 100 年尺度上其增温潜势是 CO_2 的 298 倍^[1],2010 年大气 N_2O 浓度达到 323×10^{-9} ,大约比工业化前高了 20%^[2],并且每年以 0.2%~0.3% 的速率递增,是农业领域中增长最快的排放源。农业活动作为已知温室气体排放源中重要的人为排放源,在 N_2O 源汇收支平衡中起主导作用^[3], N_2O 主要来自于土壤微生物硝化过程和反硝化过程^[4-5],土壤排放的 N_2O 占全球 N_2O 总排放量的 10%~27%^[1]。

小麦和玉米是我国主要的粮食作物^[6],当前由于劳动力成本的提高,简化粮食作物施肥程序和提高肥料利用率的一次性施肥技术已经成为农民广泛采用的管理措施^[7-9]。一次性施肥技术是指在作物生长期只进行一次施肥的技术,多以控释肥施用为主。控释肥肥效期长,肥料养分的供应与植物需求基本一致,既可以防止土壤中有效氮过量又能满足植物在整个生长期对养分的需求,因此近年来针对控释肥的研究成为肥料研究的热点^[10]。控释肥已经在小麦、玉米、水稻和番茄中得到了广泛应用^[7,11-13]。

目前针对华北平原冬小麦/夏玉米轮作系统土壤 N_2O 排放的研究主要集中在有机肥无机肥配施和不同施氮水平方面^[14-15],而对于一次性施肥技术下冬小麦/夏玉米轮作系统土壤 N_2O 排放特征的研究较少,缺少一次性施肥条件下土壤 N_2O 排放的定量评价。因此,本研究通过田间原位观测,探讨一次性施肥条件下冬小麦/夏玉米轮作系统土壤 N_2O 排放规律,明确一次性施肥对土壤 N_2O 的减排效果,为冬小麦/夏玉米轮作体系下保产减排措施的提出提供数据支持和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验安排在山东泰安现代农业科研基地——肥城市良种试验场(东经 $117^{\circ}08'$,北纬 $36^{\circ}11'$),属温带大陆性半湿润季风气候,年平均气温 13.6°C ,平均年降水量 903.2 mm,种植模式为小麦-玉米轮作。供试土壤为砂浆黑土,土壤质地为粘壤土。试验土壤基础性状见表 1,观测期内降雨量和日均温见图 1。

1.2 田间试验设计

观测时间为 2013 年 10 月 20 日至 2014 年 10 月 27 日。试验采用随机区组设计,设置 4 个处理,分别为:对照(CK)、优化施氮(OPT)、优化氮肥一次性施用(OPT1)、控释肥施用(CRF)。优化施肥处理是根据当地测土配方施肥结果确定的施氮量,控释氮肥 CRF 由山东省农业科学院提供,具体肥料包膜材料为热固水性树脂,肥料释放曲线见图 2,其他施肥处理氮素来源均为尿素。每个处理设置 3 次重复,小区面积 $8.5\text{ m}\times 4.4\text{ m}=37.4\text{ m}^2$,重复间留 1 m 隔离区。各处理施肥方式和施肥量如表 2 所示。磷肥(重过磷酸钙 P_2O_5 44%)和钾肥(氯化钾 K_2O 60%)掺混后一次性作为基肥撒施。OPT 和 CRF 处理均开沟 10 cm 氮肥均匀施入覆土,OPT1 处理为开沟 25 cm 和 10 cm 氮肥均匀施入覆土,耙平后机械播种。OPT 处理小麦追肥时期为返青-拔节期,玉米施肥时期为大喇叭口期前,均为行间沟施氮肥覆土,深度 5~10 cm。其他管理措施与当地高产栽培措施一致。

控释肥 CRF 在 25°C 水中以及田间氮素溶出特征试验方法:称取本试验中施用的小麦(玉米)专用控释肥 5 g,缝合在直径 1 mm 的塑料网袋内,小麦生长

表 1 试验地土壤基础性状
Table 1 Basic properties in tested soil

土层 Layer/cm	硝态氮 Nitrate N/mg·kg ⁻¹	铵态氮 Ammonium N/ mg·kg ⁻¹	全氮 Total nitrogen/ N%	速效钾 Available potassium/mg·kg ⁻¹	有效磷 Available phosphorus/mg·kg ⁻¹	pH	有机质 Soil organic matter/g·kg ⁻¹
0~30	24.08	4.76	0.16	174.67	47.54	6.99	16.95
30~60	8.51	4.20	0.16	122.67	7.00	8.04	9.84
60~90	8.44	5.00	0.11	139.33	6.82	7.82	9.69

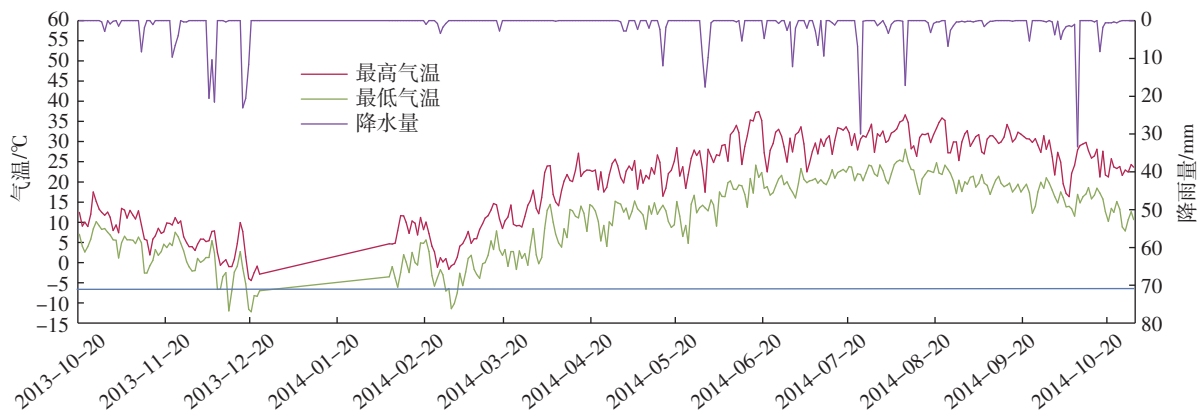
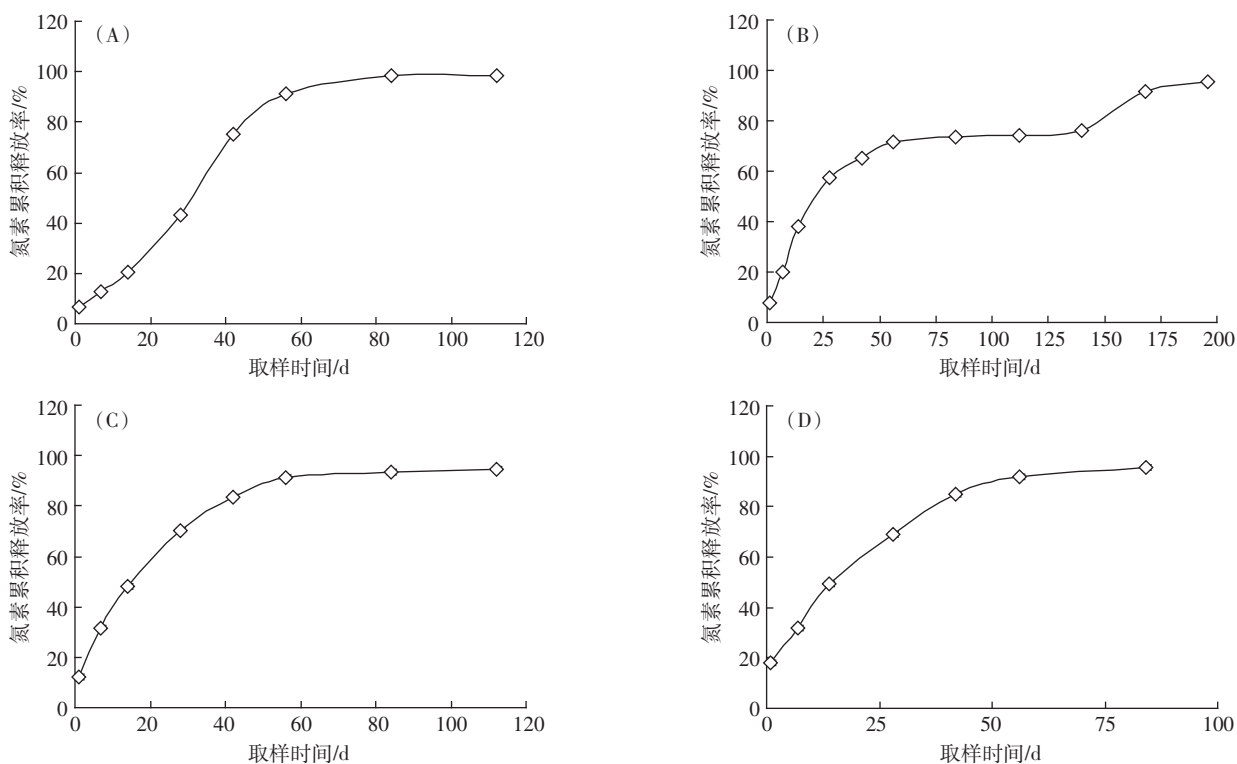


图 1 观测期降雨量与气温

Figure 1 Precipitation and air temperature during experimental period



(A)小麦专用控释肥 25 °C 静水条件下的养分累积释放率;(B)小麦专用控释肥大田条件下的养分累积释放率;

(C)玉米专用控释肥 25 °C 静水条件下的养分累积释放率;(D)玉米专用控释肥大田条件下的养分累积释放率

A: Wheat controlled release urea at 25 °C water; B: Wheat controlled release urea in field; C: Maize controlled release urea at 25 °C water;

D: Maize controlled release urea in field

图 2 控释肥 CRF 在 25 °C 水中以及田间氮素溶出特征

Figure 2 Characteristics of nutrient releases from controlled release fertilizers in water and field

季共 33 袋,玉米生长季共 21 袋,播种当天埋植于保护行中,深度为 10~20 cm,插牌标示。在小麦(玉米)每个主要生育时期取 3 袋,用自来水将泥土冲洗干净,自然晾干,测定膜内全氮含量。

1.3 取样和测定方法

土壤 N₂O 排放通量的测定采用静态箱-气相色谱法。

采样箱体由不锈钢材料制成,外覆绝热材料,箱体为 50 cm×50 cm×50 cm 的正方体,以最大限度地保证气体取样的代表性。箱体底部边缘粘有密封胶条,以确保箱体和底座之间密封良好。底座(50 cm×50 cm×20 cm)由不锈钢制成,观测期底座一直埋在田间固定位置。采样时,将采样箱置于底座上,用夹子将箱

表 2 冬小麦/夏玉米轮作施肥种类和施肥量
Table 2 Types and levels of fertilizers applied to wheat-maize rotation system

处理 Treatment	氮肥种类 Type of fertilizer	施氮方式 Nitrogen supply method	氮肥用量 Levels of N fertilizer/kg N·hm ⁻²			P ₂ O ₅ /kg·hm ⁻²		K ₂ O/kg·hm ⁻²	
			小麦	玉米	总氮量	小麦	玉米	小麦	玉米
不施肥 Control treatment(CK)	—	—	—	—	—	104	104	75	134
优化施肥 Optimized fertilization treatment(OPT)	尿素	分次施用 10 cm 沟施	基肥 112.5 追肥 112.5	基肥 72 追肥 168	465	104	104	75	134
改进优化施肥 Single basal fertilization treatment(OPT1)	尿素	全部基施 10、25 cm 沟施(比例 4:6)	上层 90 下层 135	上层 96 下层 144	465	104	104	75	134
控释氮肥 Controlled release fertilization treatment(CRF)	CRF	全部基施 10 cm 沟施	225	240	465	104	104	75	134

体和底座夹在一起,确保密封良好。密封后立即用注射器抽取气体,每隔 6 min 取样一次,连续取样 5 次,并准确记录采样时间和箱内气温(JM624)。观测频率为每周一次,施肥和灌溉后逐日观测一周,降雨后连续观测 3 d,施基肥时延长取样时间,直至施氮处理与不施氮处理的 N₂O 排放通量无差异为止。每次观测均在上午 8:00—10:00 之间进行,每次取气样的同时,测定土壤 5 cm 深度温度(JM624)及 16 cm 深度土壤体积含水量(TRIME-PICO 64)。所测得的土壤体积含水量据下式转化为土壤孔隙含水率(WFPS):

$$WFPS=\frac{\theta_v}{1-\rho_v/\rho_s}$$

式中:θ_v 为土壤体积含水量,cm³·cm⁻³;ρ_v 为土壤体积质量,g·cm⁻³;ρ_s 为土壤比重。

将气体样品存放于一定体积的气袋中,用改进的气相色谱仪(Agilent 7890A)分析 N₂O 浓度。气体通量计算公式为:

$$F=\rho H\frac{dc}{dt}\frac{273}{273+T}\frac{P}{P_0}$$

式中:F 为 N₂O 的排放通量,mg N₂O·m⁻²·h⁻¹,正值为排放,负值为吸收;ρ 为标准大气压下 N₂O 的密度,g·L⁻¹;H

为采样箱气室高度,cm;T 为采样箱内气温,℃;P 为采样时气压,mmHg;P₀ 为标准大气压,mmHg(P/P₀≈1);dc/dt 为采样箱内 N₂O 浓度的变化速率,μL·L⁻¹·min⁻¹。

N₂O 排放强度(kg N·t⁻¹)是指形成单位经济产量前提下 N₂O 的排放总量。

土壤样品的采集与测定:试验开始前和作物收获后取 0~90 cm 土样(每 30 cm 为一个层次)测定土壤基础理化性质,包括:硝态氮、铵态氮、全氮、速效钾、有效磷、pH 和有机质。

1.4 数据分析

用 Excel 2007 进行数据处理及作图,用 SPSS19.0 进行不同处理间的差异显著性检验及 N₂O 排放通量和各影响因素间的偏相关关系分析,不同处理间采用 LSD 多重比较方法。

2 结果与分析

2.1 冬小麦/夏玉米轮作系统 N₂O 排放特征

在冬小麦/夏玉米轮作周期中,各个处理土壤 N₂O 排放峰值均发生在施肥+灌溉或降雨事件后,一般持续时间为 7~10 d(图 3)。2013 年 10 月 19 日施肥

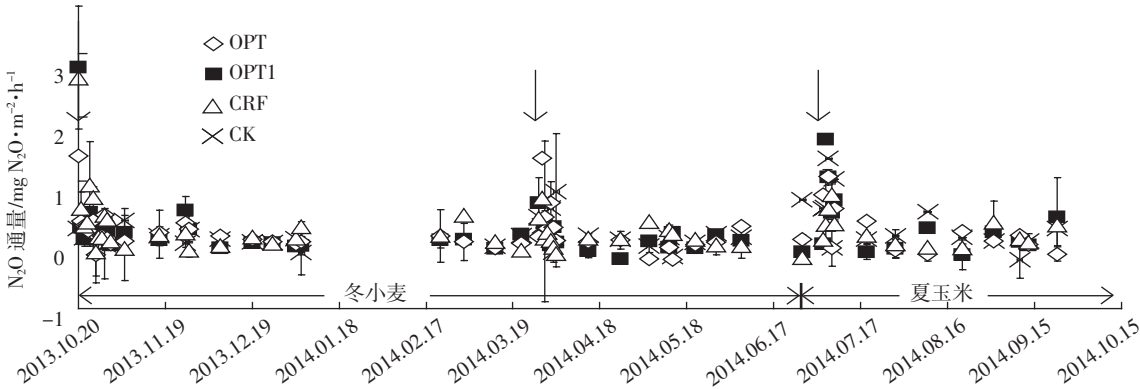


图 3 不同施肥处理冬小麦/夏玉米轮作系统土壤 N₂O 排放通量
Figure 3 Seasonal variations of N₂O emissions in wheat and maize rotation system under different treatments

播种,2014 年 4 月 25 日返青拔节施肥灌溉,2014 年 6 月 25 日施肥,与刘冬雪^[5]的施肥灌溉后土壤 N₂O 排放持续 8~14 d 的研究结果有所不同。轮作周期内各施肥处理最强的 N₂O 排放峰值出现在冬小麦播种后施基肥后的第 1 d,以 OPT1 处理排放通量最高,达到 2.78 mg N₂O·m⁻²·h⁻¹,随着入冬后环境温度的下降,排放通量逐渐降低,之后处于较低水平;第二次排放峰值出现在次年小麦返青后,以 OPT 处理最高,为 1.36 mg N₂O·m⁻²·h⁻¹,拔节期以后土壤 N₂O 排放通量随温度的上升而升高;第三次排放峰值在玉米施基肥以后,以 OPT1 处理最高,为 1.66 mg N₂O·m⁻²·h⁻¹。CK 处理土壤 N₂O 排放通量在整个观测期没有明显波动。

从图 3 可以看出,施氮肥明显促进了土壤 N₂O 排放。与 OPT 处理相比,在相同施氮量和施肥种类下 OPT1 处理在小麦种植初期和玉米种植初期 N₂O 排放通量较高;在相同施氮量下,CRF 处理在施肥前期 N₂O 排放通量低于 OPT1 处理,而在作物生长后期则相反。

结合图 1 可知,2014 年 9 月 19 日前后降雨量较

大,但是观测结果中土壤 N₂O 排放通量峰值远小于前几次峰值,可能是由于玉米生长后期土壤中氮素被作物吸收利用,土壤中用于硝化作用的底物浓度较低所致。另一方面,由于降雨造成土壤含水量的增加,土壤逐渐从好氧条件转变成厌氧条件,反硝化反应增强,过高的土壤含水量阻止了土壤 N₂O 向大气中的扩散而进一步还原为 N₂^[16]。

2.2 冬小麦/夏玉米轮作系统土壤 N₂O 排放的影响因素

图 4 显示,整个观测期间 5 cm 深度土壤温度处于-1.23~29.17℃,小麦生长季 5 cm 深度土壤温度在-1.23~25℃,玉米生长季 5 cm 深度土壤温度在 16.72~29.17℃。表 3 为各处理不同作物生长季和整个轮作系统的 N₂O 排放通量与 5 cm 土层温度的偏相关分析结果。CK 处理土壤温度和 N₂O 排放通量呈现显著的相关关系($P<0.05$)。其他施肥处理和各个生长季 N₂O 排放通量与土壤温度均无相关关系。

整个观测期间 5 cm 深度土壤孔隙含水率为 23.69%~70.07%,小麦生长季为 23.69%~70.07%,玉米生长季为 43.02%~65.93%。对各处理不同作物生长

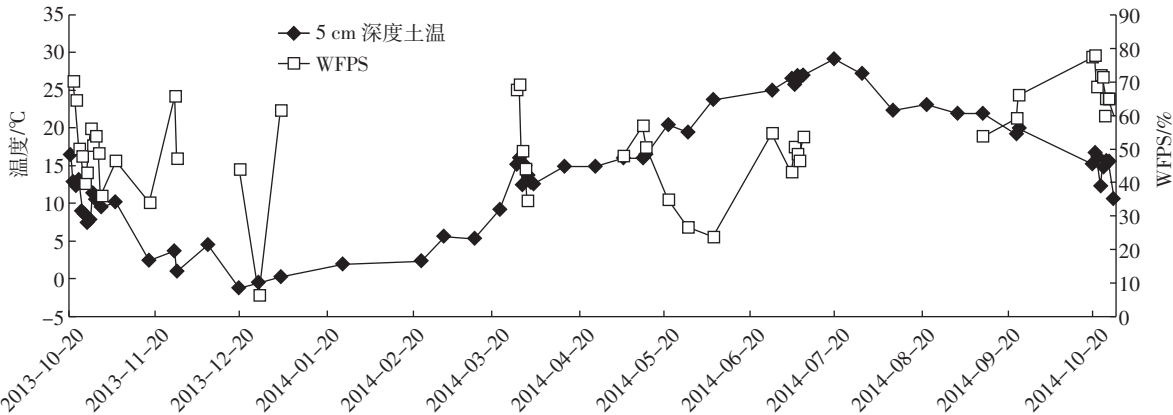


图 4 观测期土壤温度湿度的变化
Figure 4 Variations of soil temperature and WFPS during experimental period

表 3 土壤温度、含水量与冬小麦/夏玉米轮作系统内土壤 N₂O 排放通量的相关分析
Table 3 Correlation coefficients between N₂O flux and soil temperature and moisture in wheat and maize rotation system under different treatments

处理 Treatment	N ₂ O 排放通量与土温 N ₂ O flux vs soil temperature			N ₂ O 排放通量与土壤含水量 N ₂ O flux vs soil moisture		
	冬小麦	夏玉米	轮作系统	冬小麦	夏玉米	轮作系统
不施肥 Control treatment(CK)	0.23	0.18	0.38*	0.02	-0.17	0.14
优化施肥 Optimized fertilization treatment (OPT)	0.20	-0.23	0.16	0.27	0.22	0.34*
改进优化施肥 Single basal fertilization treatment(OPT1)	0.16	-0.43*	0.15	0.39*	0.52**	0.50**
控释氮肥 Controlled release fertilization treatment(CRF)	0.18	-0.40	0.09	0.39*	0.60**	0.50**

季和整个轮作系统的 N_2O 排放通量与土壤孔隙含水率(WFPS)的偏相关分析表明,OPT 在整个轮作系统 N_2O 排放通量与 WFPS 呈显著的相关关系($P<0.05$),OPT1 和 CRF 呈极显著相关关系($P<0.01$)。CK 处理各个生长季 N_2O 排放通量与 WFPS 均无相关关系。

2.3 冬小麦/夏玉米收获前不同层次土壤硝态氮和铵态氮含量

对于 0~90 cm 土层而言,除了 CRF 在夏玉米收获前土壤硝态氮含量表现为 60~90 cm>30~60 cm>0~30 cm 以外,其他土壤硝态氮含量均表现为 0~30 cm>30~60 cm>60~90 cm。从表 4 可以看出,除CK 处理外,冬小麦收获前各施肥处理 0~30 cm 土层硝态氮含量变化不大,说明一次性施肥方式能够为冬小麦生长提供足够的氮素需要,铵态氮含量表现为 OPT1>OPT>CRF。相同施氮量条件下,OPT1 处理在30~60 cm 和 60~90 cm 土层硝态氮含量均低于其他施肥处理,说明一次性分层施尿素方式能够提高氮素利用率,减少氮素的淋溶损失。对于玉米生长季而言,除CK 处理外,各施肥处理 0~90 cm 土层硝态氮含量均为 OPT>OPT1>CRF,显现 CRF 处理土壤中硝态氮偏低的现象,而铵态氮含量差异不大。

2.4 冬小麦/夏玉米轮作系统 N_2O 排放总量与排放系数

肥料种类和肥料用量是影响 N_2O 排放的重要因素。施用氮肥能显著提高 N_2O 的排放(表 5),CK 处理 N_2O 年排放总量最低,为 $(1.33\pm 0.17)\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$;相同施肥量和施肥种类条件下,OPT 处理年排放总量为 $(3.64\pm 0.40)\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$,OPT1 处理年排放总量与 OPT 处理相比减少了 27.47%,并达到显著水平($P<0.05$);相同施氮量条件下,CRF 处理比 OPT 处理排放总量减少了 22.80%,并达到显著水平($P<0.05$)。

对于 OPT 处理而言,轮作田中冬小麦生长季土壤 N_2O 排放总量为 $1.86\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$,占整个轮作田排放量的 51.10%;玉米生长季土壤 N_2O 排放总量为 $1.78\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$,占轮作田排放总量的 48.9%。总体上

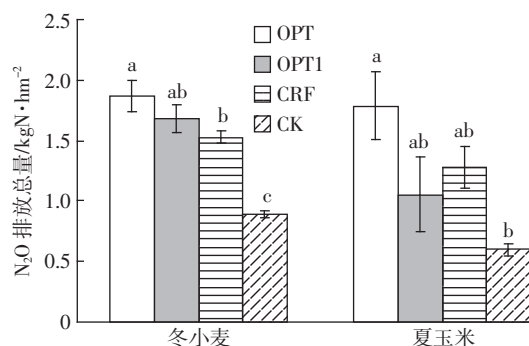


图5 不同施肥方式下冬小麦/夏玉米 N_2O 季节排放总量

Figure 5 Seasonal cumulative N_2O emissions in each treatment

表4 冬小麦/夏玉米收获前不同层次土壤硝态氮和铵态氮含量

Table 4 Changes of NO_3^-N and NH_4^+-N in 0~90 cm soil layer in different treatments

项目	土层/cm	试验开始前			冬小麦收获前			夏玉米收获前		
		0~30	30~60	60~90	0~30	30~60	60~90	0~30	30~60	60~90
硝态氮含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	CK	24.08	8.51	8.44	17.07	7.76	4.71	6.24	3.97	2.27
	OPT				22.42	17.19	8.93	17.88	10.70	8.39
	OPT1				21.51	12.99	8.82	14.52	10.11	6.89
	CRF				20.80	17.81	12.28	5.89	6.18	6.51
铵态氮含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	CK	4.76	4.20	5.00	8.93	6.05	8.22	0.64	0.83	0.69
	OPT				7.09	4.24	3.74	0.85	0.95	1.05
	OPT1				8.31	5.31	6.65	1.14	1.00	0.94
	CRF				4.51	2.44	5.55	0.85	1.20	0.80

表5 不同处理 N_2O 平均排放通量以及周年排放总量

Table 5 Average emission fluxes and annual cumulative N_2O emission in different treatments

处理 Treatment	平均排放通量 Average emission flux/ $\mu\text{g N}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	排放总量 Total emission/ $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$	排放系数 Emission factor/%
不施肥 Control treatment(CK)	23.88±3.08	1.33±0.17c	
优化施肥 Optimized fertilization treatment(OPT)	65.46±7.26	3.64±0.40a	0.50
改进优化施肥 Single basal fertilization treatment(OPT1)	47.33±2.66	2.64±0.15b	0.28
控释氮肥 Controlled release fertilization treatment(CRF)	50.37±2.19	2.81±0.12b	0.31

注: N_2O 排放系数为作物生长季内 N_2O-N 排放量占投入土壤中氮素的百分比。

Note: N_2O Emission factor= total N_2O-N emissions over total N inputs during crop growth period.

各处理表现为小麦季 N₂O 季节排放总量略高于玉米季(图 5)。

不同施肥方式和肥料种类对不同作物生长期土壤 N₂O 排放总量的影响也不同(图 5)。对于冬小麦生长季 CRF 处理土壤 N₂O 排放总量与 OPT 之间差异显著($P<0.05$),而在夏玉米生长季 3 个施氮处理之间土壤 N₂O 排放总量之间没有显著差异。

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006)将同期内由化肥氮施用引起的 N₂O-N 排放量占总施氮量的百分比定义为 N₂O 排放系数,并建议化肥氮的 N₂O-N 排放系数为 1%。本研究不同处理之间排放系数介于 0.28%~0.50%之间,均低于 IPCC 默认的 1%,因此利用 IPCC 的系数可能会高估冬小麦/夏玉米轮作系统 N₂O 排放量。

2.5 冬小麦/夏玉米产量与 N₂O 排放强度

相对于 OPT 处理而言,相同施氮量情况下,OPT1 处理和 CRF 处理对作物产量(冬小麦、夏玉米)的影响不显著($P<0.05$),都保持在 8.31 t 和 9.36 t 以上(图 6);冬小麦和夏玉米生长季土壤 N₂O 排放强度均以 OPT 处理最高,分别为 $(2.23\pm0.02)\text{kg N}\cdot\text{t}^{-1}$ 和 $(0.18\pm0.03)\text{kg N}\cdot\text{t}^{-1}$ 。与 OPT 处理对比,一次性施肥减少了单位产量土壤 N₂O 排放总量,其中一次性施入尿素即 OPT1 处理在冬小麦和夏玉米季分别减少 14.00%和

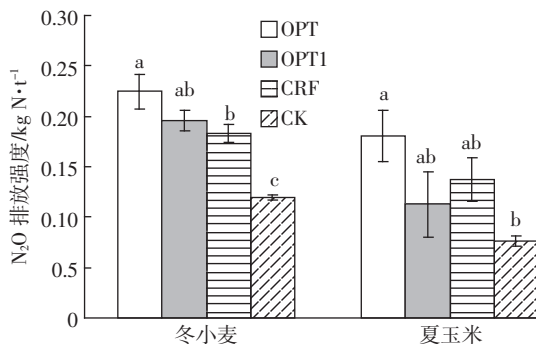


图 7 不同施肥方式下冬小麦/夏玉米 N₂O 排放强度

Figure 7 Intensity of N₂O emissions during wheat and maize growth periods

38.38%, CRF 处理较 OPT 处理分别减少 22.29% 和 28.00%(图 7)。由此可见,一次性施肥可以有效减少冬小麦和夏玉米生长季单位产量 N₂O 排放。

3 讨论

3.1 施肥方式对土壤 N₂O 排放的影响

本研究结果表明,冬小麦/夏玉米轮作系统中土壤 N₂O 排放峰值主要集中在施肥+灌溉(降雨)事件后;控释肥料可以减少小麦玉米基肥后土壤 N₂O 排放,但是未改变轮作周期的季节变化规律;在基肥施用下,OPT1 处理引起的 N₂O 排放峰值高于肥料分次施用处理;而控释肥可以降低初期土壤中 NO₃-N 浓度,进而可以有效减少土壤 N₂O 的排放^[17]。

本观测中 CK 处理即 N₂O 年排放总量为 $(1.33\pm0.17)\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$,略高于一般农田观测到的 N₂O 背景排放量 0.58~1.13 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[15,18-19]。本研究中各施肥处理年排放总量在 2.64~3.64 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间,可能与本试验土壤基础肥力高有关。OPT1 和 CRF 处理比 OPT 处理在冬小麦/夏玉米轮作周期 N₂O 排放总量减少 22.80%~27.74%,其中冬小麦生长季减少 9.68%~18.28%,夏玉米生长季减少 28.00%~41.02%,表现为一次性施肥能够降低土壤 N₂O 排放,与他人的研究结果相类似。纪洋等^[20]对江苏句容冬小麦田施氮量为 100、200、270 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的尿素和缓控释肥处理下土壤 N₂O 排放观测发现,控释肥能够减少冬小麦生长季 N₂O 排放总量的 50%~56%,并且在同等施氮量条件下,控释肥对土壤 N₂O 的减排量随着施氮量的增加而增加。张岳芳等^[21]在对苏州小麦季控释肥的研究表明控释肥料的施用通过大幅度减少小麦播种至越冬始期的 N₂O 累积排放量来减少 N₂O 的排放总量。而 Chu^[22]研究表明由于深施处土壤水分大于表层,利于反硝

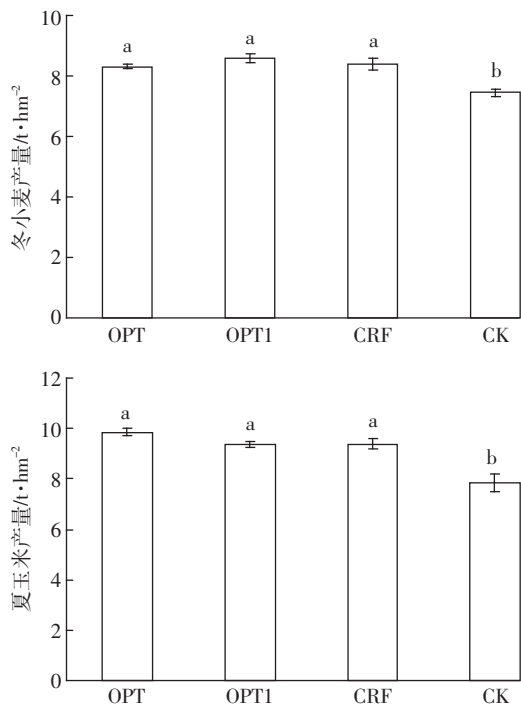


图 6 不同施肥方式下冬小麦/夏玉米产量

Figure 6 Yields of wheat and maize in different treatments

化反应的进行,导致尿素深施处理 N_2O 排放总量是浅施尿素的 5~8 倍,与本研究结果存在一定的差异。

目前,中国旱地农田 N_2O 排放系数为 0.22%~1.53%^[23],本研究排放系数介于 0.28%~0.50%之间。裴淑玮等^[24]在河北省望都县冬小麦/夏玉米轮作模式施氮量为 $540 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 下排放系数为 1.03%;王艳群等^[19]在河北保定市冬小麦/夏玉米轮作模式不同施氮水平 (600 、 550 、 $300 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 下排放系数为 0.66%、0.72%和 0.89%。这种差异可能与施肥量以及土壤理化性质和环境条件有关。

3.2 环境因素以及肥料种类对 N_2O 排放的影响

在土壤通气良好的情况下,硝化作用是产生 N_2O 的主要来源,因此影响硝化作用的因素如温度、湿度、微生物种类和数量以及耕作措施都会影响 N_2O 排放。结合图 3、图 4 和表 3 可以看出,CK 处理 N_2O 排放通量与 5 cm 深度土壤温度和土壤含水量之间均无相关性,说明氮素是土壤 N_2O 排放的首要限制因素。各施肥处理除 OPT 以外,小麦季、玉米季和整个轮作周期土壤 N_2O 排放通量与土壤含水量均存在相关关系,冬小麦季相关系数为 0.39,夏玉米季相关系数为 0.52~0.60,轮作系统相关系数为 0.34~0.50,表明土壤含水量对 N_2O 排放有显著影响。这与王艳群等^[19]研究的结果相同,并且土壤湿度在夏玉米季对土壤 N_2O 排放的影响大于冬小麦季。

各处理土壤 N_2O 排放通量与 5 cm 土层温度之间均无相关性。本研究中冬小麦季平均温度低于硝化作用适宜温度下限(土壤硝化作用微生物活动适宜温度为 15~35℃)^[25],而夏玉米季该土层平均温度则在硝化作用最适范围内,温度对玉米季 N_2O 排放的影响小于小麦季。

另一方面,土壤温度和水分通过影响缓控释肥养分释放速率改变土壤速效氮含量,间接影响土壤 N_2O 排放。Fujisawa 等^[26]研究指出温度和水分对包膜控释尿素氮素养分溶出的影响分别占 83% 和 11%,当土壤含水量高于田间持水量 40% 时,养分释放仅受温度的影响。衣文平等^[13,27]在泰安冬小麦的包膜控释尿素与普通尿素对土壤硝态氮的影响对比试验中发现,控释氮肥氮素溶出速率与温度呈正相关关系。

3.3 不同施肥方式对土壤养分、作物产量以及 N_2O 排放强度的影响

本研究在冬小麦和夏玉米生长季均发现,分次施肥方式(即 OPT 处理)较控释肥(即 CRF 处理)和普通尿素一次性施肥方式(即 OPT1 处理)在两季作物收获后 30~60 cm 和 60~90 cm 土层中 $\text{NO}_3^- \text{--N}$ 含量较高

的现象(表 4),说明该施肥方式肥料向下淋洗风险较大,造成氮素利用率降低。而卢艳丽等^[8]在廊坊冬小麦/夏玉米轮作地的观测结果则表明,普通尿素一次性施肥方式因肥料施用过于集中而表现为淋洗较多。一般认为分次施肥可以更好地满足作物不同阶段需肥要求,提高肥料利用率^[28],但由于多次施肥费工费力,使减少劳动力成本的轻简化技术逐渐成为目前农业生产实际的主流。从图 2 CRF 田间氮素溶出特征试验结果可看出,小麦专用缓控肥在 28、140 d 和 196 d 氮素累积溶出率分别是 57.2%、76.2%和 95.6%,冬小麦吸氮高峰期在拔节期到孕穗期(180~210 d)^[29];玉米专用控释肥在 14、56 d 和 84 d 氮素累积溶出率分别是 49.2%、91.7%和 95.4%,夏玉米吸氮高峰期在大喇叭口期到灌浆期(40~60 d)。与 OPT 相比,CRF 处理并没有显著造成冬小麦和夏玉米吸氮量的不同,对其产量及生物学性状的影响也无显著差异。这说明缓控释肥持续释放的特性使得肥料利用率提高,被作物及时充分吸收进而减少了氮素在其他途径的损失。在本研究中一次性施肥技术与优化施肥处理相比,冬小麦/夏玉米并没有表现出显著的产量差异,鉴于试验仅进行一年,一次性施肥措施的持续保产效果如何还需要多年试验进行验证。

对于不同生长季而言, N_2O 排放强度表现为各个处理冬小麦生长季大于夏玉米生长季,说明生产单位产量小麦生长季比玉米生长季土壤排放更多的 N_2O ,减排的重点在生育期较长的冬小麦生长季。

4 结论

(1)冬小麦/夏玉米轮作系统中土壤 N_2O 排放主要集中在施肥+灌溉(或降雨)事件后;除追肥以外,旱作条件下一次性施用控释肥引起的 N_2O 排放峰值高于尿素的分次施用处理,但是未改变轮作周期土壤 N_2O 排放的季节变化规律。

(2)相同施肥量和施肥种类条件下,优化施氮处理(OPT) N_2O 年排放总量为 $(3.64 \pm 0.40) \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$,优化氮肥一次性施用处理(OPT1)和控释肥处理(CRF)年排放总量较之分别减少了 27.47%和 22.80%。本研究不同处理之间排放系数介于 0.28%~0.50%之间,低于 IPCC 默认的 1%。

(3)土壤含水量对 N_2O 排放有显著影响,且对夏玉米季 N_2O 排放的影响大于冬小麦季。同时各处理土壤 N_2O 排放通量与 5 cm 深度土壤温度之间均无相关性。

(4)相对于优化施氮处理而言,相同施氮肥量情况下,优化氮肥一次性施用处理和控释肥处理对作物产量(冬小麦、夏玉米)的影响不显著。与优化施氮处理相比,一次性施肥可以有效降低 N₂O 排放强度。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: Couplings between change in the climate system and biogeochemistry[R/OL]. http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/Report/AR4WG1_Ch07.pdf.
- [2] Pathak H. Greenhouse gas emission from agriculture[J]. *Carbon Management in Agriculture for Mitigating Greenhouse Effect*, 2012: 60–69.
- [3] Kroeze C, Mosier A, Bouwman A F. Closing the global N₂O budget: A retrospective analysis 1500–1994[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(1): 1–8.
- [4] Maag M, Vinther F P. Nitrous oxide emission by nitrification and denitrification in different soil types and at different soil moisture contents and temperatures[J]. *Applied Soil Ecology*, 1996, 4(1): 5–14.
- [5] Eghball B, Power J F, Gilley J E, et al. Nutrient, carbon, and mass loss during composting of beef cattle feedlot manure[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26(1): 189–193.
- [6] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [7] 葛均筑, 展 茗, 赵 明, 等. 一次性施肥对长江中游春玉米产量及养分利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(5): 1073–1082.
- [8] 卢艳丽, 自由路, 王 磊, 等. 华北小麦-玉米轮作区缓控释肥应用效果分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(1): 209–215.
- [9] 王宜伦, 李潮海, 谭金芳, 等. 超高产夏玉米植株氮素积累特征及一次性施肥效果研究[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(15): 3151–3158.
- [10] 丁 洪, 王跃思, 秦胜金, 等. 控释肥对土壤氮素反硝化损失和 N₂O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(5): 1015–1019.
- [11] 杨俊刚, 张鹏飞, 倪小会, 等. 施用控释肥对设施番茄 NO₃-N 淋洗、N₂O 排放及产量与品质的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(9): 1849–1857.
- [12] 徐培智, 谢春生, 陈建生, 等. 水稻一次性施肥技术及其应用效果评价[J]. *中国土壤肥料*, 2005(5): 49–51.
- [13] 衣文平, 孙 哲, 武 良, 等. 包膜控释尿素与普通尿素配施对冬小麦生长发育及土壤硝态氮的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(3): 687–693.
- [14] 马银丽, 吉艳芝, 李 鑫, 等. 施氮水平对小麦-玉米轮作体系氮挥发与氧化亚氮排放的影响[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(2): 225–230.
- [15] 刘东雪. 施肥对冬小麦-夏玉米轮作生态系统温室气体排放的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013.
- [16] Azam F, Müller C, Weiske A, et al. Nitrification and denitrification as sources of atmospheric nitrous oxide—role of oxidizable carbon and applied nitrogen[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(1): 54–61.
- [17] 李方敏, 樊小林, 刘 芳, 等. 控释肥料对稻田氧化亚氮排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(11): 2170–2174.
- [18] 陈 静. 滴灌施肥对黄淮海典型农田水氮分布与利用和土壤 N₂O 排放的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- [19] 王艳群, 李迎春, 彭正萍, 等. 氮素配施双氰胺对冬小麦-夏玉米轮作系统 N₂O 排放的影响及效益分析[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(7): 1999–2006.
- [20] 纪 洋, 刘 刚, 马 静, 等. 控释肥施用对小麦生长期 N₂O 排放的影响[J]. *土壤学报*, 2012, 49(3): 526–534.

- JI Yang, LIU Gang, MA Jing, et al. Effect of controlled-release fertilizer (CRF) on nitrous oxide emission during the wheat growing period[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(3):526-534.
- [21] 张岳芳, 郑建初, 周 炜, 等. 免耕条件下控释肥对麦季氧化亚氮排放的影响[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(5):1037-1043.
- ZHANG Yue-fang, ZHENG Jian-chu, ZHOU Wei, et al. Effects of controlled release fertilizer on nitrous oxide emission during winter wheat-growing season under no-tillage condition[J]. *Jiangsu Journal of Agriculture Science*, 2014, 30(5):1037-1043.
- [22] Chu H Y, Hosen Y, Yagi K. Nitrogen oxide emissions and soil microbial activities in a Japanese Andisol as affected by N-fertilizer management[J]. *Soil Science Plant Nutrition*, 2004, 50(2):287-292.
- [23] Zheng X H, Han S H, Huang Y, et al. Re-quantifying the emission factors based on field measurements and estimating the direct N_2O emission from Chinese croplands[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(2):1-19.
- [24] 裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 等. 华北平原玉米-小麦轮作农田 N_2O 交换通量的研究[J]. 环境科学, 2012, 33(10):3641-3646.
- PEI Shu-wei, ZHANG Yuan-yuan, LIU Jun-feng, et al. N_2O Exchange fluxes from wheat-maize crop rotation system in the North China Plain [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(10):3641-3646.
- [25] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田 N_2O 产生与排放的影响[J]. 环境科学, 1997, 18(5):3-7, 93.
- ZHENG Xun-hua, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. Impacts of temperature on N_2O production and emission[J]. *Environmental Science*, 1997, 18(5):3-7, 93.
- [26] Fujisawa E, Kobayashi A, Hanyu T. A mechanism of nutrient release from resin-coated fertilizers and its estimation by kinetic methods:5. Effect of soil moisture level on release rates from resin-coated fertilizer [J]. *Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1998, 69:582-589.
- [27] 衣文平, 屈浩宇, 许俊香, 等. 不同释放天数包膜控释尿素在春玉米上的应用研究[J]. 核农学报, 2012, 26(4):699-704.
- YI Wen-ping, QU Hao-yu, XU Jun-xiang, et al. Application of different release duration controlled-release coated urea on spring maize[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2012, 26(4):699-704.
- [28] 邹忠君, 孙艳华. 玉米一次性分层缓释施肥技术试验研究[J]. 农学报, 2011, 1(4):6-9.
- ZOU Zhong-jun, SUN Yan-hua. A test on slow-release fertilizer one-time stratification application technique in maize[J]. *Journal of Agriculture*, 2011, 1(4):6-9.
- [29] 赵 营. 冬小麦/夏玉米轮作体系下作物养分吸收利用与累积规律及优化施肥[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2006.
- ZHAO Ying. Nutrients uptake, utilization, accumulation and optimize fertilization under the winter wheat/summer maize rotation system[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2006.