中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

不同施肥方式下砂姜黑土冬小麦-夏玉米轮作农田氨挥发特征及排放系数

吕金岭，王小非，李太魁，寇长林

引用本文:
吕金岭, 王小非, 李太魁, 等. 不同施肥方式下砂姜黑土冬小麦-夏玉米轮作农田氨挥发特征及排放系数[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(12): 1869-1879.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200479

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

华北平原氮肥周年深施对冬小麦-夏玉米轮作体系土壤氨挥发的影响

The effects of deep application of nitrogen fertilization on ammonia volatilization in a winter wheat/summer maize rotation system in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(12): 1880-1889 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200290

秸秆还田对关中地区麦玉复种体系土壤氨排放的影响

Effect of straw returning on ammonia emissions from soil in a wheat-maize multiple cropping system in the Guanzhong region, China

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(4): 513-522 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190627

控释与稳定尿素配施对土壤氮素迁移及冬小麦-夏玉米产量的影响

Effects of controlled-release and stable urea application on soil nitrogen transport and yields of winter wheat and summer maize

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(10): 1591-1599 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200117

华北平原春绿豆-夏玉米种植模式经济效益和碳足迹评价

Economic benefits and carbon footprint of a spring mung bean-summer maize cropping system in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(6): 910-919 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190916

改性尿素硝酸铵溶液调控氮素挥发和淋溶的研究

Effects of modified urea ammonium nitrate solution topdressing on ammonia volatilization and leaching

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(8): 1200-1209 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190811

中国生态农业学报(中英文) 2020 年 12 月 第 28 卷 第 12 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Dec. 2020, 28(12): 1869−1879

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200479

吕金岭, 王小非, 李太魁, 寇长林. 不同施肥方式下砂姜黑土冬小麦-夏玉米轮作农田氨挥发特征及排放系数[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(12): 1869−1879

LYU J L, WANG X F, LI T K, KOU C L. Ammonia emission characteristics and emission coefficients of wheat and corn rotation cropland under different fertilization methods in lime concretion black soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(12): 1869−1879

不同施肥方式下砂姜黑土冬小麦-夏玉米轮作农田氨挥发特征及排放系数*

吕金岭, 王小非, 李太魁, 寇长林**

(河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所/农业部原阳农业环境与耕地保育科学观测实验站/河南省农业生态环境重点实验室 郑州 450002)

摘 要: 土壤类型对于农田氨挥发影响较大, 而关于砂姜黑土农田氨挥发特征及排放系数研究相对较少, 不利于区域性农田土壤氨排放清单的准确评估。基于此, 选取豫南典型砂姜黑土为研究对象, 设置不施肥(CK)、传统施肥(TR)、优化施肥(OPT)、再优化施肥(ZOPT)和缓控肥(HK)5 种施肥处理, 利用密闭海绵法, 探究砂姜黑土农田不同施肥方式下冬小麦-夏玉米轮作土壤氨挥发特征, 并尝试确定氨排放系数。结果表明: 砂姜黑土传统施肥条件下冬小麦季土壤氨挥发量为 11.1 kg·hm^{-2}, 夏玉米季氨挥发量为 13.4 kg·hm^{-2}, 说明夏玉米季是砂姜黑土冬小麦-夏玉米轮作农田氨的高排放时期。对比不同处理的氨挥发量, 发现 ZOPT 和 HK 处理冬小麦季和夏玉米季的氨挥发量显著低于其他处理(P<0.05), 其次为 OPT 处理, TR 处理的氨挥发量最高。HK 处理的氨排放系数最低, 其中冬小麦季和夏玉米季分别为 1.7%和 1.5%, 显著低于其他处理(P<0.05); 其次为 ZOPT 和 OPT 处理, 其氨排放系数冬小麦季分别为 2.1%和 2.6%, 夏玉米季分别为 2.6%和 3.6%; TR 处理的氨排放系数最高, 冬小麦季和夏玉米季分别为 3.6%和 4.7%。不同施肥处理氨挥发量与施肥量的拟合结果表明, 随施肥量增加, 冬小麦-夏玉米轮作农田氨挥发显示出较强的线性增长趋势, 其中夏玉米季和冬小麦季的 R^2 分别为 0.934 和 0.931, 说明该区域砂姜黑土传统施肥量的氨挥发未出现明显的激发性增长现象。本研究结果可为砂姜黑土区冬小麦-夏玉米轮作农田氮肥利用率的提高和氮排放清单的估算提供依据。

关键词: 砂姜黑土; 冬小麦-夏玉米轮作; 施肥方式; 氨挥发速率; 氨挥发量; 氨排放系数

中图分类号: S19 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Ammonia emission characteristics and emission coefficients of wheat and corn rotation cropland under different fertilization methods in lime concretion black soil*

LYU Jinling, WANG Xiaofei, LI Taikui, KOU Changlin**

(Institute of Plant Nutrition, Resources and Environmental Science, Henan Academy of Agricultural Sciences / Yuanyang Scientific Observing and Experimental Station of Agro-Environment and Arable Land Conservation, Ministry of Agriculture / Henan Key Laboratory of Agricultural Eco-environment, Zhengzhou 450002, China)

* 国家重点研发计划项目(2017YFD0800600, 2017YFC0212400)和国家自然科学基金项目(41807098)资助

** 通信作者: 寇长林, 研究方向为农田土壤肥力提升。E-mail: koucl@126.com
吕金岭, 研究方向为农田氮素循环和氨排放。E-mail: lvjinling2008@163.com

收稿日期: 2020-06-20 接受日期: 2020-10-07

* This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2017YFD0800600, 2017YFC0212400), and the National Natural Science Foundation of China (41807098).

** Corresponding author, E-mail: koucl@126.com

Received Jun. 20, 2020; accepted Oct. 7, 2020

Abstract: Soil type affects farmland ammonia volatilization, but few studies have examined ammonia volatilization characteristics and emission coefficients. Therefore, the accurate inventory of regional farmland soil ammonia emissions is disadvantaged. Lime concretion black soil found in southern Henan, China, was used to explore the ammonia volatilization characteristics of winterwheat-summer maize-rotated cropland by the closed-sponge method. The soil was unfertilized (CK) or treated with traditional fertilizer (TR), optimized fertilizer (OPT), re-optimized fertilizer (ZOPT), or slow-controlled fertilizer (HK), and the ammonia emissions coefficient was determined. The results showed that the winter wheat and summer maize ammonia volatilization amounts using the traditional fertilizer treatment were 11.1 and 13.4 kg·hm^{-2}, respectively. Summer maize ammonia emission was 21% higher than winter wheat, indicating that the summer maize season was a high-volume period. Winter wheat and summer maize treated with HK and ZOPT had the lowest ammonia emission coefficients (HK: 1.7% for winter wheat, 1.5% for summer maize; ZOPT: 2.1% for winter wheat, 2.6% for summer maize; P<0.05), the OPT treatment had moderate coefficients (2.6% for winter wheat, 3.6% for summer maize), and the TR treatment had the highest coefficients (3.6% for winter wheat, 4.7% for summer maize). The ammonia emissions fertilization gradients and fertilization amounts were plotted, and the ammonia volatilization amounts under variable fertilization treatments were linear (R^2: 0.931 for winter wheat, 0.934 for summer maize). These results may help to improve nitrogen fertilizer use and the ammonia emission inventory and provide basis for nitrogen emission estimation of winter wheat-summer maize rotation in lime concretion black soil croplands.

Keywords: Lime concretion black soil; Winter wheat and summer maize rotation; Fertilization method; Ammonia volatilization rate; Ammonia emission amount; Ammonia emission coefficient

氨挥发被认为是当前农田管理过程中不可避免的现象，这主要与肥料自身固有的特性有关[1]。除肥料本身外，环境因素也影响着农田氨的挥发[2-3]。相关研究发现，诸多因素中土壤因素对农田氨挥发的影响巨大，土壤因素中的土壤质地、pH、结构以及理化性质等方面对于土壤相关酶活性和氮素的迁移转化等都有深刻的影响，进而直接或者间接影响着农田氨挥发，所以农田土壤类型导致农田氨挥发量可能存在着大的差异[4-5]。此外，农田施肥导致的氨挥发损失被认为是大气氨或铵盐的主要来源之一[6-7]，而氨被认为是当前大气气溶胶形成的关键前提物质之一。有研究表明氨对大气二次颗粒物的贡献量最高可达 60%以上[8]。因此量化典型土壤不同施肥量及管理方式下氨挥发量并估算氨排放系数，对于未来该区域农田氮素利用率的进一步提升、氨排放清单的准确估算和大气环境质量的提升有着积极意义。

本研究聚焦的砂姜黑土广泛分布在我国黄淮海平原、长江中下游等地，总面积约 371 万 hm^2，是我国最主要的中低产土壤之一[9]。砂姜黑土是在低洼排水不良的环境条件下经过长期沼泽化(或潜育化)作用，脱沼泽过程，旱耕熟化过程而形成的一种古老耕作土壤，具有以锰铁结核为核心的砂姜层[10]。施肥灌溉后水肥往往不易下移，可能利于氨挥发的产生。然而由于砂姜黑土土壤黏重，且呈中性略偏酸性[11]，这种环境条件又不利于氨挥发的产生。所以，砂姜黑土的氨挥发损失存在一定复杂性。目前关于砂姜黑土农田氨挥发特征研究相对较少，例如李欠欠[12]在砂姜黑土农田氨排放研究中发现小麦(*Triticum aestivum*)季氨挥发量非常低，3 次施肥几乎无明显氨挥发；而张庆利等[13]在山东砂姜黑土室内培养中发现，砂姜黑土的氨挥发量几乎与潮土等同，挥发量较高；丁世杰等[14]在豫南砂姜黑土氨挥发研究中发现，330 kg·hm^{-2} 施氮量条件下，氨挥发量只有 5.4 kg·hm^{-2}。由此可见砂姜黑土氨挥发的估算存在巨大波动空间。此外，砂姜黑土氨挥发多聚焦于小麦季氨挥发特征研究[12-14]，而关于夏玉米(*Zea mays*)季及冬小麦-夏玉米轮作体系氨挥发特征，尤其涉及排放系数的研究还鲜见报道。为此，本研究选取豫南典型的砂姜黑土农田为研究对象，设置不同施肥处理，探究砂姜黑土冬小麦-夏玉米轮作农田氨挥发特征及关键响应因素，量化不同处理氨累积挥发量，并确定氨排放系数，为此类土壤合理减氨和提升氮肥利用率提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于河南省驻马店市西平县宋集乡(113°12′39″N, 33°27′01″E)。该地区属北亚热带季风性湿润气候，年平均气温 14.7 ℃，年日照时数 2 181 h，全年无霜期 216~225 d，平均降雨量为 786 mm，农业基础条件较好。土壤类型为砂姜黑土，其耕层 20 cm 土壤主要理化性质为：土壤 pH 6.8，呈弱酸偏中性，土壤有机质 15.98 g·kg^{-1}，铵态氮 4.08 mg·kg^{-1}，硝态氮 10.30 mg·kg^{-1}，交换性钙 4.02 g·kg^{-1}，交换性钾 136.90 mg·kg^{-1}，交换性镁 406.45 mg·kg^{-1}，速效磷 22.80 mg·kg^{-1}。氨挥发采集期间平均温度及降雨量如图 1 所示。

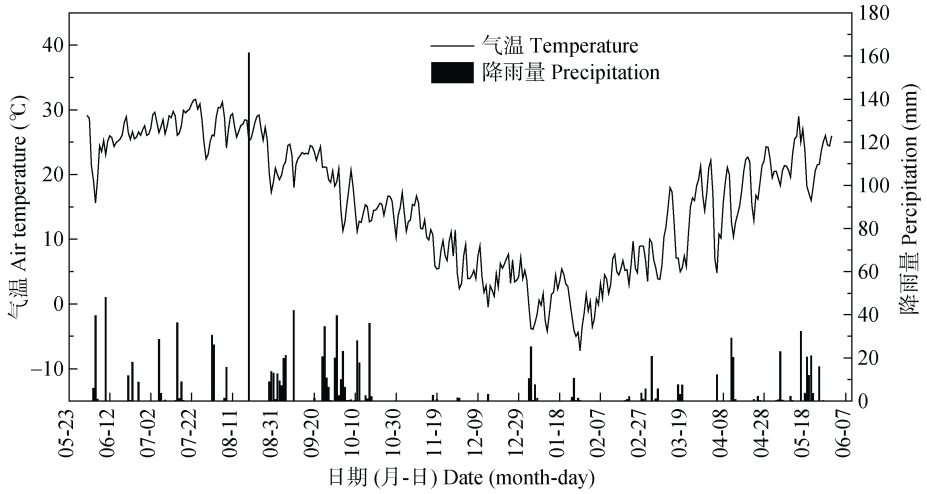

图 1　2017—2018 年试验期间的气温与降水量

Fig. 1　Temperature and precipitation during the experiment period in 2017–2018

1.2　试验处理

为了保障土壤肥力均一，选取该区域典型冬小麦-夏玉米轮作农田为研究对象。试验开始于 2017 年 5 月底，前期小麦收获后，采集土壤样品，划分小区和安装土壤墒情监测系统。试验共设置 5 个施肥处理，分别为不施肥(CK)、传统施肥(TR)、优化施肥(OPT)、再优化施肥(ZOPT)和缓控肥(HK)。每个处理 3 个小区，共 15 个小区。小区按照随机区组排列，每个小区面积为 9 m^2(3 m×3 m)。试验处理中的常规肥料为尿素(含氮 46.7%)、过磷酸钙(12% P_2O_5)和氯化钾(60% K_2O)。缓控肥料为新型聚脲甲醛(MU)缓释氮肥(尿素和甲醛缩合产物)，这种肥料的缓释效果已在水稻(*Oryza sativa*)-小麦轮作试验中验证[15]。氮磷钾按照砂姜黑土当地配施比例(HK 除外)，即氮肥基追比 6∶4，磷钾肥均一次性底施。不同处理的肥料施用量如表 1 所示。试验各小区均间隔 1 m，并用高 10 cm 的土埂围起，以防止降雨或者灌溉过程中的串水串肥问题。为了和大田施肥方式一致，夏玉米季采取模拟麦茬间种肥同播(不同行)的方式，播种深度为 5 cm，施肥深度大致为 10 cm。小麦基肥期采取撒施后人工翻耕的方式，追肥期采取撒施灌溉方式，所有措施严格按照大田管理方式展开。玉米季选用‘郑单 958’作为试验品种，播种施肥日期均为 6 月 21 日，按照等行距(60 cm)播种，密度 67 500 株·hm^{-2}；追肥期在 7 月 25 日(大喇叭口期)，收获期为 9 月 30 日。小麦选用‘周麦 32’为试验对象，播种前做好种子包衣处理；前茬玉米收获后粉碎平铺于地表，并进行人工翻耕和耙地，保持地面平整；于 10 月 25 日播种施肥，播量为 225 kg·hm^{-2}，追肥期为 2018 年 4 月 3 日，5 月 25 日收获。试验开展期间，根据病虫草害发生情况做好田间除草及病虫草害的防治工作。

表 1　砂姜黑土冬小麦-夏玉米轮作农田不同施肥处理的施肥量

Table 1　Fertilization amounts of different fertilization treatments of winter wheat-summer maize rotation system in lime concretion black soil　　kg·hm^{-2}

作物 Crop	处理 Treatment	氮肥 N fertilizer			磷肥 P_2O_5	钾肥 K_2O
		总量 Total	基肥 Basal	追肥 Topdressing		
夏玉米 Summer maize	CK	0	0	0	0	0
	TR	280	168	112	67.5	67.5
	OPT	232	139	93	67.5	67.5
	ZOPT	196	118	78	67.5	67.5
	HK	202	202	0	67.5	67.5
冬小麦 Winter wheat	CK	0	0	0	90.0	90.0
	TR	255	153	102	90.0	90.0
	OPT	225	135	90	90.0	90.0
	ZOPT	180	108	72	90.0	90.0
	HK	225	225	0	90.0	90.0

HK 处理的氮肥为聚脲甲醛缓释肥；其他处理氮肥为尿素。The nitrogen fertilizer of the treatment HK is a polyurea formaldehyde slow-release fertilizer; the urea is used in other treatments.

1.3　农田氨挥发试验

采用海绵法采集农田氨挥发量，海绵采用厚度大的单层海绵，顶端用密封盖密封整个采样装置[12]。海绵吸附液采用 PG-mix(磷酸-丙三醇混合溶液)混合液，即取 85%磷酸溶液 400 mL 和丙三醇 60 mL，转移至 1 000 mL 容量瓶中，用去离子水定容至 1 000 mL。试验开始前，准备干净海绵并吸附 60 mL PG-mix 溶液。试验开始时，将含有吸附液的海绵安放到各自小区的氨挥发装置内，在施肥后第 1 d 采集氨挥发样品，每次采集时间约为 24 h 以代表全天

量, 之后间隔 1 d, 持续采样 8~9 次, 直至海绵吸附氨的含量低且处于稳定状态。每次采集完成后, 立即对更换下的海绵进行浸提和清洗, 多次操作后将浸提液定容至 1 000 mL, 取部分定容液保存至 50 mL 塑料瓶中, 编号并放于冰箱冷藏保存。最后用连续流动分析仪(Seal AA3 Auto Analyzer 3)测定浸取液中的铵态氮浓度。

1.4 样品采集与测定

试验开始前按照“S”型采样法于试验地均匀采集 0~20 cm 耕层混合土样, 土壤样品带回试验室, 经过风干、过筛后, 按照常规分析方法测定基础土壤样品的 pH、有机质、全氮、有效磷和速效钾含量。具体为: 土壤 pH 采用 1∶2.5 的土水比制备土壤悬液, 用电位计法测定; 土壤铵态氮和硝态氮采用 2.0 mol·L^{-1} 的氯化钾溶液浸提, 振荡过滤后用流动注射分析仪(Seal AA3)分析测定; 土壤有机质、全氮、速效磷和速效钾均按传统方法测定, 具体见鲍士旦的《土壤农化分析法》[16]。每次氨挥发采样时, 同时用土钻采集试验小区 0~20 cm 的表层土(3 个样点), 一部分鲜样用于分析土壤含水率、铵态氮与硝态氮含量, 另一部分晾干备用。

植物样品的采集: 作物收获后采集植株样品, 包括籽粒和秸秆。具体为: 玉米成熟后, 将小区玉米全部收获, 并估算产量; 每个小区采集 5 株有代表性的玉米植株, 并装入网袋, 带回试验室, 分为秸秆和籽粒, 烘干用于测定主要养分(全氮、全磷和全钾)含量。小麦收获后选取每个小区长势均匀的小麦, 采集 1 m^2, 晾干后将秸秆和籽粒分开, 分别称重, 获取产量和地上生物量; 同时取 1 m 小麦样行, 晾干脱粒后, 分析各部分养分含量。除此之外, 通过自动土壤监测站(SP1000 数据采集器和 5TE 三参数探头, USA), 对土壤体积含水率、电导率和温度进行实时监测。

1.5 数据处理与作图

土壤氨挥发速率的计算公式为:

$$NH_3\text{-}N(mg\cdot m^{-2}\cdot h^{-1})=C\times V/(T\times A) \quad (1)$$

式中: C 为流动分析仪测定 NH_3-N 的浓度(mg·L^{-1}), V 为浸提体积(L), T 为累计时间(h), A 为圆形管横截面积(m^2)。

氨挥发通量计算公式:

$$NH_3\text{-}N(kg\cdot hm^{-2})=(M/A)\times 10^{-2} \quad (2)$$

式中: M 为通气法单个装置平均每日测得的氨量(NH_3-N, mg), A 为捕获装置的横截面积(m^2)。氨挥发积累量为测定时期内每日氨挥发通量之和。

氮肥利用率(%)=(施肥区氮吸收量−对照无氮区氮吸收量)/氮肥施用量×100 (3)

氨排放系数(%)=(施肥区氨挥发量−对照区氨挥发量)/总施氮量 (4)

利用 SPSS 18.0 软件对数据进行方差分析、显著性检验和线性拟合。利用 Origin 8.0 完成相关图片制作。

2 结果与分析

2.1 砂姜黑土耕层土壤体积含水量、电导率与温度动态变化

2017 年 5 月 25 日至 2018 年 6 月 30 日对砂姜黑土试验农田土壤耕层(0~20 cm)的体积含水率、电导率和温度进行测定, 结果发现砂姜黑土耕层土壤的体积含水量介于 0.129~0.500 m^3·m^{-3}, 平均值为 0.221 m^3·m^{-3}。同时发现耕层土壤电导率与土壤体积含水量的波动性几乎一致, 数值介于 0.052~0.169 dS·m^{-1}, 年平均值为 0.140 dS·m^{-1}。地表温度的起伏和气温起伏一致, 最高温度出现在夏季 6—9 月, 年平均地表温度为 16.2 ℃, 代表了河南豫南砂姜黑土农田地表温度的年平均值。从图 2 可以看出, 夏玉米季施肥期主要集中在 6—8 月, 此时砂姜黑土区农田土壤地温较高, 同时土壤的体积含水率和电导率波动性较弱。冬小麦基肥期土壤温度呈下降趋势, 同时耕层土壤含水率较高, 电导率基本处于稳定状态; 而冬小麦追肥期地表温度有显著升高趋势, 而土壤体积含水率和电导率整体处于高位波动状态。总而言之, 砂姜黑土夏玉米季施肥期土壤温度显著高于冬小麦季, 而土壤含水量和电导率却明显低于冬小麦季。

2.2 砂姜黑土冬小麦-夏玉米轮作农田氨挥发动态特征

从图 3 可以看出, 夏玉米季基肥期氨挥发的排放峰值在施肥后的第 2~3 d, 最高峰值可达 2.5 kg·hm^{-2}·d^{-1}, 之后快速降低, 直到施肥第 6 d 后基本处于稳定状态; 而玉米追肥期的氨排放峰值出现在施肥后的第 1 d, 最高峰值达 2.4 kg·hm^{-2}·d^{-1}, 之后迅速降低, 在施肥后第 4 d 趋于稳定状态。冬小麦季基肥期氨挥发峰值出现在施肥后的第 1 d, 最高氨排放峰值达 2.0 kg·hm^{-2}·d^{-1}, 之后迅速下降, 直到施肥后的第 5 d 趋于稳定状态; 而追肥期氨排放峰值出现在施肥后第 2 d, 最高峰值达 2.2 kg·hm^{-2}·d^{-1}, 随后显著下降, 同样在第 5 d 趋于稳定状态。由此可见, 砂姜黑土常规施肥条件下的氨排放峰值一般出现在施肥后的前 2 d, 一般在 5~7 d 后处于稳定排放状态。对于不同施肥处理而言, TR 处理无论在冬小麦季还是

夏玉米季都拥有最高的氨排放峰值，其次为 OPT 处理，而 ZOPT 和 HK 处理的排放峰值相对较低且差别不大(冬小麦季)，显示出较低的氨挥发量。值得注意的是，HK 处理无论在冬小麦季还是夏玉米季追肥期都显示出较低的氨挥发量，尤其玉米追肥期的氨挥发量几乎与 CK 处理一致，显示出较好的控氨效果。

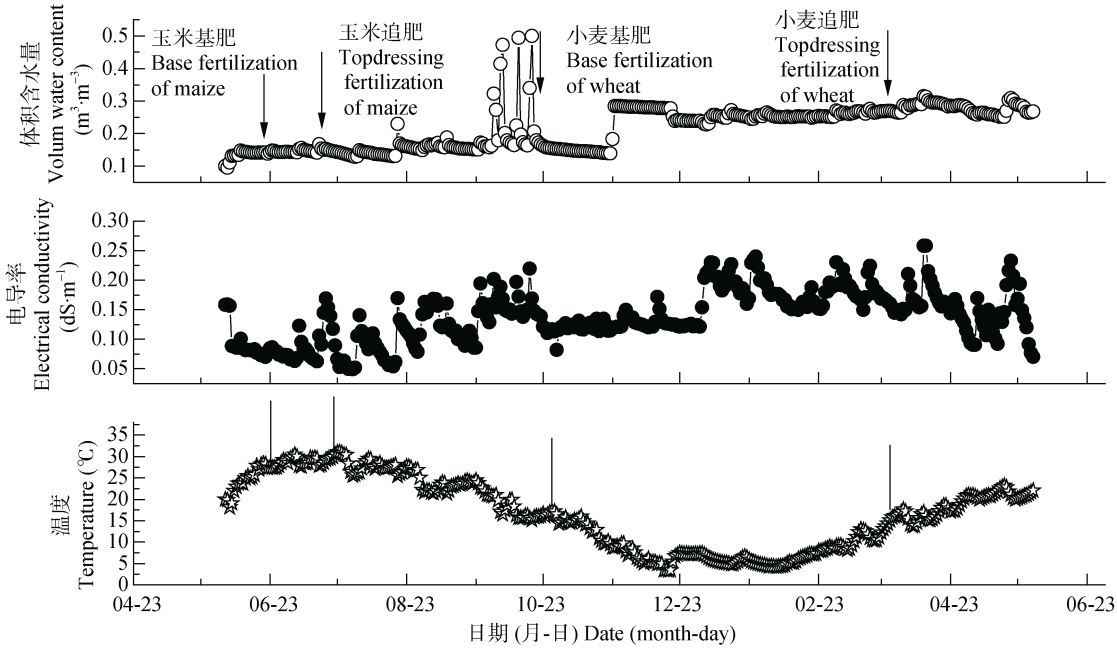

图 2　试验期间砂姜黑土冬小麦季和夏玉米季耕层土壤体积含水量、电导率和温度的变化

Fig. 2　Dynamics of soil moisture content, electrical conductivity and temperature of ploughed soil layer in winter wheat and summer maize rotation seasons during the experimental period

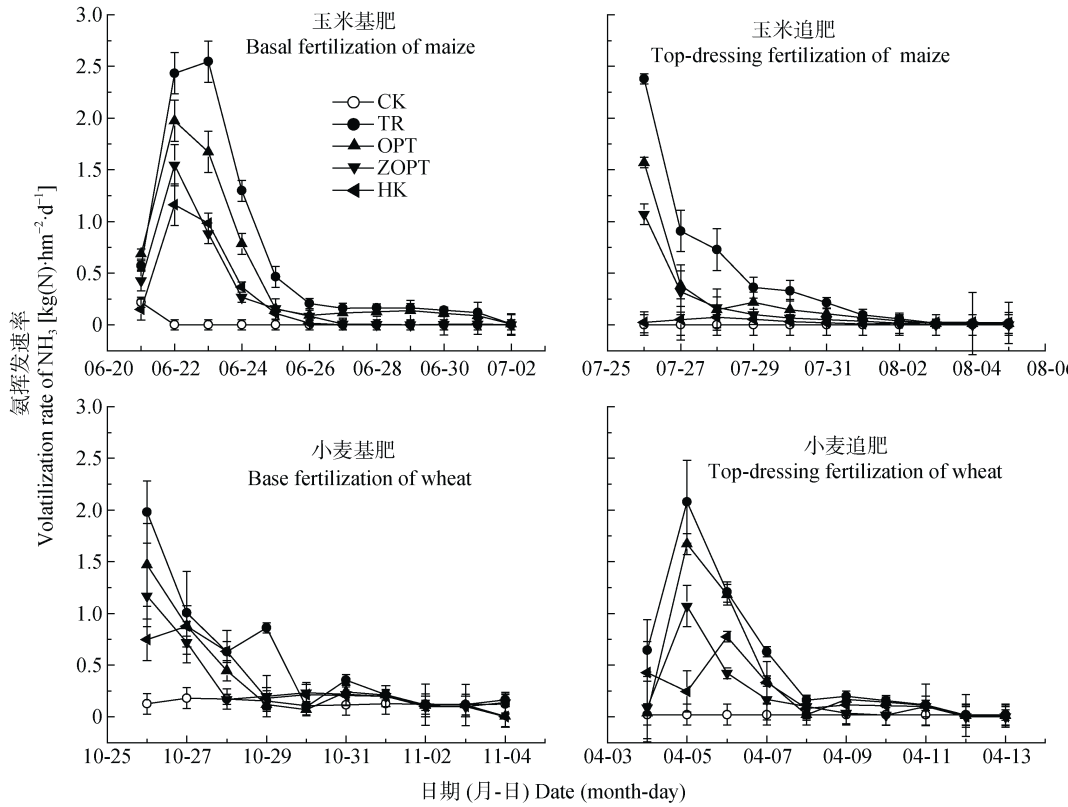

图 3　冬小麦季和夏玉米季不同施肥处理典型施肥期氨挥发速率

Fig. 3　Ammonia volatilization rates in typical fertilization periods of different fertilization treatments in winter wheat and summer maize seasons

试验各处理介绍见表 1。The description of each treatment is shown in the table 1.

2.3 砂姜黑土冬小麦-夏玉米轮作农田氨累积挥发量

从图 4 可以看出，砂姜黑土冬小麦-夏玉米轮作农田不同施肥期氨挥发量不同。玉米基肥期不同处理的氨挥发量整体高于追肥期，其中玉米基肥期不同处理(除 CK)的氨累积挥发量为 2.8~8.3 kg·hm^{-2}，而玉米追肥期不同处理氨累积挥发量仅为 0.4~5.1 kg·hm^{-2}。与夏玉米季类似，冬小麦基肥期不同处理(除 CK)的氨累积挥发量为 3.4~5.8 kg·hm^{-2}，而冬小麦追肥期不同施肥处理氨累积挥发量为 2.0~5.2 kg·hm^{-2}，冬小麦基肥期比追肥期的氨挥发量略高，但不如夏玉米季明显。综合两季结果，发现砂姜黑土夏玉米季的氨挥发量显著高于冬小麦季，成为该土壤类型冬小麦-夏玉米轮作农田的高发时期。对比不同施肥处理，TR 处理的氨挥发量在冬小麦-夏玉米轮作农田 4 次施肥中明显高于其他处理(P<0.05)，其冬小麦季和夏玉米季氨累积挥发量分别为 11.1 kg·hm^{-2} 和 13.4 kg·hm^{-2}；其次为 OPT 处理，其冬小麦季和夏玉米季氨累积挥发量分别为 7.5 kg·hm^{-2} 和 8.7 kg·hm^{-2}；而 ZOPT 和 HK 处理冬小麦-夏玉米两季氨累积挥发量最低，与前两个处理差异显著。玉米基肥期以及小麦基肥期和追肥期 HK 和 ZOPT 处理的氨累积挥发量差异均不显著，但玉米追肥期 HK 处理的氨挥发量显著低于 ZOPT 处理(P<0.05)。

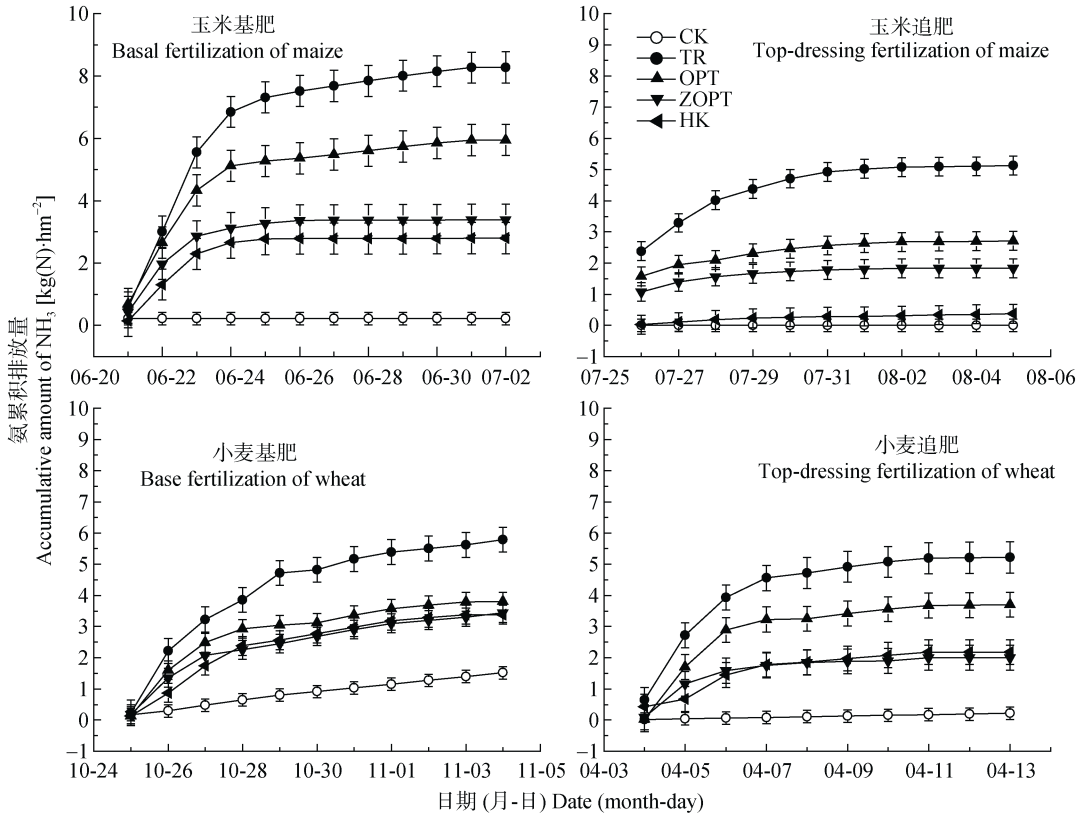

图 4 冬小麦季和夏玉米季不同施肥处理典型施肥期氨累积挥发量

Fig. 4 Cumulative ammonia volatilization in typical fertilization periods of different fertilization treatments in winter wheat and summer maize seasons

试验各处理介绍见表 1。The description of each treatment is shown in the table 1.

2.4 土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N (Nmin) 浓度变化及 NH_4^+-N 浓度与氨挥发的响应关系

以夏玉米季两次施肥为例，从图 5 可知，不同施肥处理的 Nmin 变化较大，几乎所有处理 NH_4^+-N 浓度的最高值出现在施肥后的前 1~2 d，随后显著降低。对比不同施肥处理的 NH_4^+-N 浓度，结果发现基肥期 HK 处理土壤的 NH_4^+-N 浓度显著高于其他处理(P<0.05)，其最高值达 4.1 mg(N)·kg^{-1}；其次为 TR 和 OPT 处理，其最高 NH_4^+-N 浓度分别达 3.5 mg(N)·kg^{-1} 和 3.3 mg(N)·kg^{-1}；而 ZOPT 和 CK 处理的 NH_4^+-N 浓度最低，分别为 3.1 mg(N)·kg^{-1} 和 1.9 mg(N)·kg^{-1}。不同于基肥期，追肥期 TR 处理的 NH_4^+-N 浓度显著高于其他处理(P<0.05)，其最高值达 2.8 mg(N)·kg^{-1}；其次为 OPT 处理，其最高值为 2.1 mg(N)·kg^{-1}；而 HK 和 ZOPT 处理的 NH_4^+-N 浓度显著低于其他处理(除 CK)(P<0.05)。与 NH_4^+-N 浓度结果不同，夏玉米季几乎所有处理两次施肥后的第

4~5 d NO_3^--N 浓度均达最大，之后显著降低。其中 TR 处理的两次施肥 NO_3^--N 浓度最高达 23.5 mg(N)·kg^{-1}，明显高于其他处理(P<0.05)；其次为 OPT 和 ZOPT 处理，HK 和 CK 处理最低(图 5)。

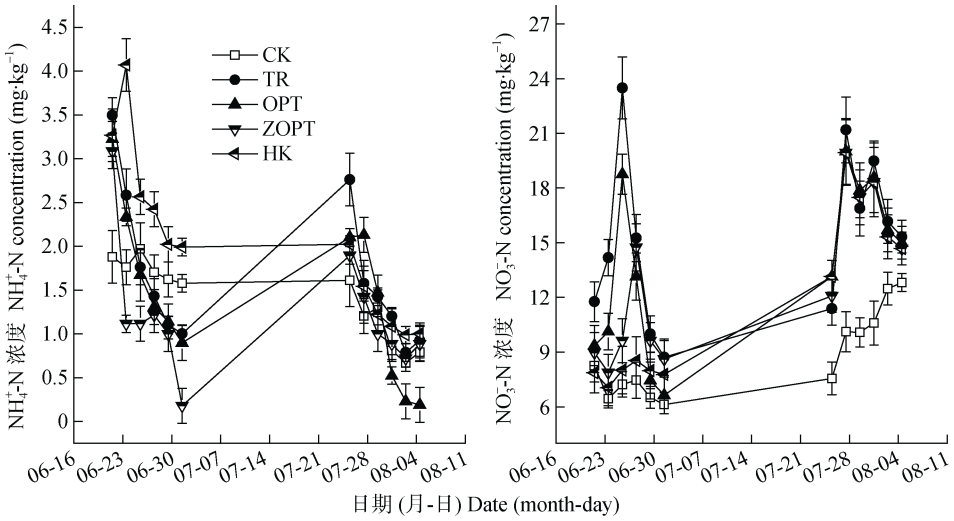

图 5　不同施肥处理夏玉米季土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度动态变化

Fig. 5　Dynamics of soil NH_4^+-N and NO_3^--N concentrations under different fertilization treatments in summer maize seasons

试验各处理介绍见表 1。The description of each treatment is shown in the table 1.

不同处理 NH_4^+-N 浓度与氨挥发量的响应关系较为密切，其中 TR、OPT 与 ZOPT 的氨挥发量与土壤 NH_4^+-N 浓度显示出较强的线性相关性(图 6)，其 R^2 介于 0.62~0.88。而 HK 和 CK 处理土壤的氨挥发量与土壤 NH_4^+-N 浓度的相关性较弱，尤其 HK 处理的 R^2 仅为 0.29，未表现出与 NH_4^+-N 浓度明显的相关性，这可能与脲甲醛缓释肥铵根离子转化氨的速率较慢有关。整体而言，砂姜黑土不同处理 NH_4^+-N 浓度基肥期大于追肥期，并且土壤 NH_4^+-N 浓度与氨挥发量表现出较好的相关关系，可以得出 NH_4^+ 浓度是影响砂姜黑土农田氨挥发的主要因素之一。

2.5　冬小麦和夏玉米产量、氮肥利用率和排放系数

由表 2 可以看出，TR、OPT 和 HK 处理小麦产量分别为 8.3 t·hm^{-2}、8.9 t·hm^{-2} 和 9.1 t·hm^{-2}，显著高于其他处理(P<0.05)，CK 处理产量最低。HK 和 TR 处理玉米产量分别为 9.0 t·hm^{-2} 和 8.8 t·hm^{-2}，显著高于其他处理(P<0.05)，其次为 OPT 和 ZOPT 处理，CK 处理产量最低。夏玉米季地上总吸氮量 HK 处理达 158.7 kg·hm^{-2}，显著高于其他处理(P<0.05)，其次为 TR 和 OPT 处理，ZOPT 和 CK 处理的地上吸氮量最低。与夏玉米季不同，冬小麦季 HK 和 OPT 处理的地上吸氮量最高，其次为 TR 处理，ZOPT 处理的地上吸氮量最低(表 2)。

夏玉米季 TR 处理的总氨挥发量最高，达 13.4 kg·hm^{-2}，其氨排放系数达 4.7%，显著高于其他处理(P<0.05)；其次为 OPT 处理和 ZOPT 处理，其总氨挥发量为分别为 8.7 kg·hm^{-2} 和 5.2 kg·hm^{-2}，排放系数分别为 3.6%和 2.6%；HK 处理的总氨挥发量为 3.2 kg·hm^{-2}，其氨排放系数为 1.5%，显著低于其他处理(P<0.05)。与夏玉米季的结果类似，冬小麦季 TR 处理的总氨挥发量最高，达 11.1 kg·hm^{-2}，其氨排放系数达 3.6%，显著高于其他处理(P<0.05)；其次为 OPT 处理，其总氨挥发量和氨排放系数分别为 7.5 kg·hm^{-2} 和 2.6%；HK 和 ZOPT 处理的冬小麦季总氨挥发量无显著差异，排放系数均显著低于其他处理(P<0.05)。

3　讨论

3.1　砂姜黑土冬小麦-夏玉米轮作农田氨挥发特征

砂姜黑土氨挥发特征研究较少，李欠欠[12]在砂姜黑土小麦季开展的氨挥发试验中发现，不同处理氨挥发量极低，4 次施肥过程中只有 1 次出现明显的氨挥发过程，从而说明砂姜黑土是一类氨挥发量极低的土壤。然而，我们用同样的方法在砂姜黑土开展冬小麦-夏玉米轮作农田氨挥发过程研究，发现当地传统施肥条件下砂姜黑土冬小麦季的氨排放系数达 3.6%，玉米达 4.7%，其结果远高于李欠欠[12]的结果。导致不同的原因可能归结于施肥期间的气候条件不同，李欠欠[12]的研究小麦季 4 次施肥，有 3 次出

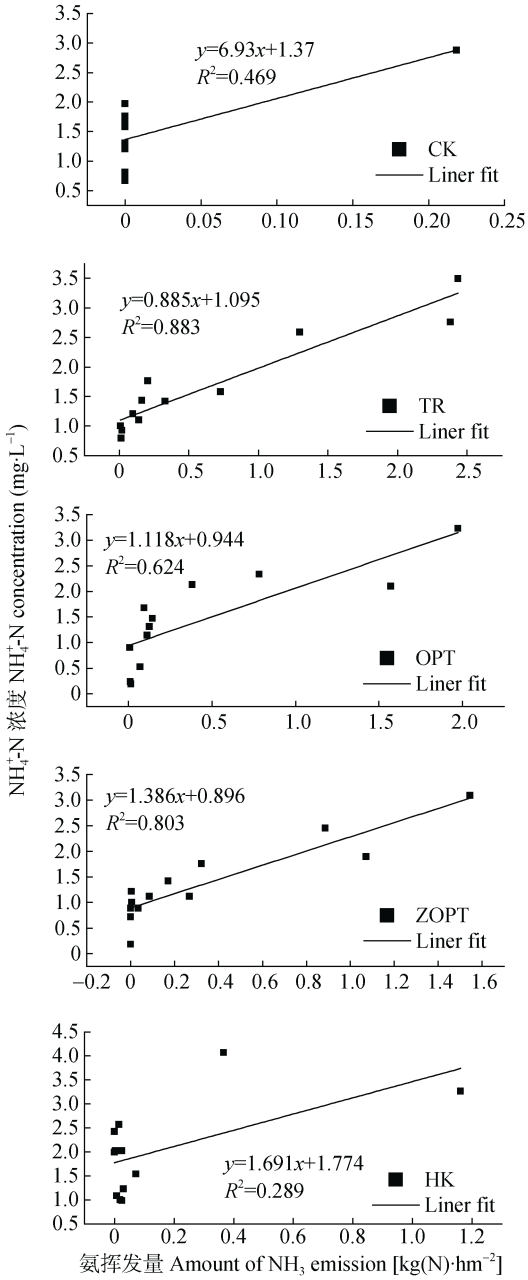

图 6 不同施肥处理夏玉米季氨挥发量与土壤 NH_4^+-N 浓度的相关性

Fig. 6 Correlation between ammonia emissions and soil NH_4^+-N concentration under different fertilization treatments in summer maize season

试验各处理介绍见表 1。The description of each treatment is shown in the table 1.

现异常降雨事件，限制了氨挥发的产生。然而基于当地长期气象资料[17]，我们的研究条件基本吻合砂姜黑土农田区域的常规气象条件，相关结果可以代表砂姜黑土冬小麦-夏玉米轮作农田的氨挥发基本特征。其次，本研究发现砂姜黑土冬小麦-夏玉米轮作农田中，夏玉米季氨挥发量高于冬小麦季，夏玉米季基肥期氨挥发量高于追肥期，这可能与冬小麦季和夏玉米季的温度条件和施肥习惯有关。例如，砂姜黑土夏玉米季两次施肥平均温度 25~30 ℃，而冬小麦季两次施肥温度在 15~20 ℃，相关研究表明土壤脲酶活性的最佳温度在 60 ℃左右，之后每降低 10 ℃，土壤酶促反应速度降低 1 倍左右[18]，从而导致夏玉米季氨挥发量高于冬小麦季。本研究没有测定不同阶段的脲酶活性，但通过对夏玉米季和冬小麦季施肥后土壤耕层铵态氮含量的变化发现，夏玉米季土壤铵态氮在施肥后前 5 d 的平均浓度远高于冬小麦季施肥后的浓度。由此可见，从温度角度来看，砂姜黑土夏玉米季气象条件更易于氨挥发的产生。此外，砂姜黑土夏玉米季以种肥同播为主，而冬小麦季肥料撒施之后旋耕处理，是否这两种方式会影响土壤脲酶活性从而导致氨挥发量不同值得进一步探索。本研究还发现玉米基肥期氨挥发量显著高于追肥期，施肥量可能是最主要的影响因素，而追肥期玉米叶片对部分地表的遮挡，从某种程度上遮档的降温作用可能减缓尿素撒施带来的氨挥发损失[19]。由于缺乏更进一步的监测，未来近地表不同层土壤地温、脲酶活性及 pH 动态变化研究显得尤为必要。最后，本研究选择的砂姜黑土分布在河南南部，属于暖温带气候带[20]，从气候角度来看利于氨挥发的产生，但砂姜黑土属于一类中性微偏酸性土壤，从 pH 角度来看，其氨挥发量应当介于酸性和碱性土壤之间。值得注意的是砂姜黑土黏土含量高、且以 2∶1 型蒙脱黏土矿物为主，属于交换性阳离子较高土壤。相关研究表明阳离子交换量较高的黏性土壤比阳离子交换量较低的粉砂土壤要低的多[10,21]，所以此方面来看砂姜黑土并不利于氨挥发的产生。总而言之，与其他类型土壤相比[13-14,18-19]，砂姜黑土的氨挥发量并不高，例如华北平原潮土(微碱性)农田土壤的氨挥发占施氮比例范围最高可达 15%[27]，相比潮土砂姜黑土氨排放量相对较低，但考虑到砂姜黑土农田土壤肥料累积效应和适宜的气候条件，其所导致的氨挥发损失仍不可小觑。

3.2 砂姜黑土不同施肥方式下氨挥发特征及排放系数

不同施肥方式下氨挥发特征已有大量研究[22-25]，但针对砂姜黑土不同施肥条件下的氨挥发特征及排放系数研究相对较少。与其他相关研究结果一致，减少氮肥施用量可以显著减少农田氨挥发量，而施肥从低到高的过程中农田氨挥发量可以从线性增长跨越到指数增长趋势[26-28]。本研究结果并未看到明

表 2　冬小麦和夏玉米季不同施肥处理作物产量、氮肥利用率、氨净挥发量及排放系数

Table 2　Crop yields, nitrogen fertilizer utilization rates, net ammonia emissions and emission factors in winter wheat and summer maize seasons under different fertilization treatments

作物 Crop	处理 Treatment	施氮量 Nitrogen fertilization rate (kg·hm^{-2})	籽粒产量 Grain yield (t·hm^{-2})	地上部吸氮量 Nitrogen uptake of overground part (kg·hm^{-2})	氮肥利用率 Nitrogen use efficiency (%)	氨挥发量 Ammonia emission (kg·hm^{-2})	氨排放系数 Ammonia emission factor (%)
夏玉米 Summer maize	CK	0	3.42d	44.3d	/	/	/
	TR	280	8.84a	154.4b	39.3c	13.4a	4.7a
	OPT	232	8.75b	152.7bc	46.7b	8.7b	3.6b
	ZOPT	196	8.68c	151.2c	54.5a	5.2c	2.6c
	HK	202	9.04a	158.7a	56.6a	3.2d	1.5d
冬小麦 Winter wheat	CK	0	3.4d	69.0d	/	/	/
	TR	255	8.3b	174.3b	41.3c	11.1a	3.6a
	OPT	225	8.9a	186.9a	52.4a	7.5b	2.6b
	ZOPT	180	7.0c	159.0c	50.0b	5.4c	2.1c
	HK	225	9.1a	186.6a	52.3a	5.6c	1.7d

试验各处理介绍见表 1。不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平差异显著性。The description of each treatment is shown in the table 1. Different lowercase letters in the same column mean significant differences among different treatments at 0.05 level.

显的指数增长趋势，夏玉米季和冬小麦季线性相关的 R^2 甚至可达 0.93(图 7)，当前施肥梯度还未出现氨激发增长趋势，说明砂姜黑土传统施肥量的氨排放还在合适的范围之内。相比 OPT 和 ZOPT 处理，聚脲甲醛缓控肥(HK)的减氨效果最明显，尤其夏玉米季氨挥发量甚至明显低于 ZOPT 处理，说明脲甲醛缓释肥具有良好的减氨效果。聚脲甲醛是通过尿素与甲醛在一定条件下反应缩合后的产物，其机理在于各种脲分子的交联聚合作用，形成的聚合物在水中是不容易溶解和崩解的，在不同的土壤温度条件下缓慢释放[12,29]。由此可见，减量施肥可以显著降低砂姜黑土农田土壤氨挥发，而通过肥料的改进可以进一步降低农田氨挥发量，起到更好的减氨效果。此外，不同施肥处理夏玉米季氨排放系数介于 2.6%~4.7%，冬小麦季氨排放系数介于 2.1%~3.6%，这基本代表了砂姜黑土冬小麦-夏玉米轮作农田不同施肥量下的氨排放系数。值得注意的是，相比环保部《大气氨源排放清单编制技术指南》针对于酸性土壤排放系数(尿素 30 ℃≈5.5%; 10~30 ℃≈3.5%)[7-8]，本研究结果整体偏低。其原因可能归结于 3 方面：第一，施肥方式降低了氨排放系数，夏玉米季基肥期种肥同播，冬小麦季撒施旋耕，以及施肥后灌溉都从某种程度上限制氨挥发的产生；第二，尽管土壤 pH 接近于中性，但砂姜黑土高黏土含量从某种程度上并不利于氨挥发的产生；第三，密闭海绵法由于限制气体流动，有可能低估农田氨挥发[30-31]。所以，未来多样化的方法、长时间的氨排放监测以及土壤关键因子的同步测定有助于未来砂姜黑土农田氨排放因子的进一步优化。

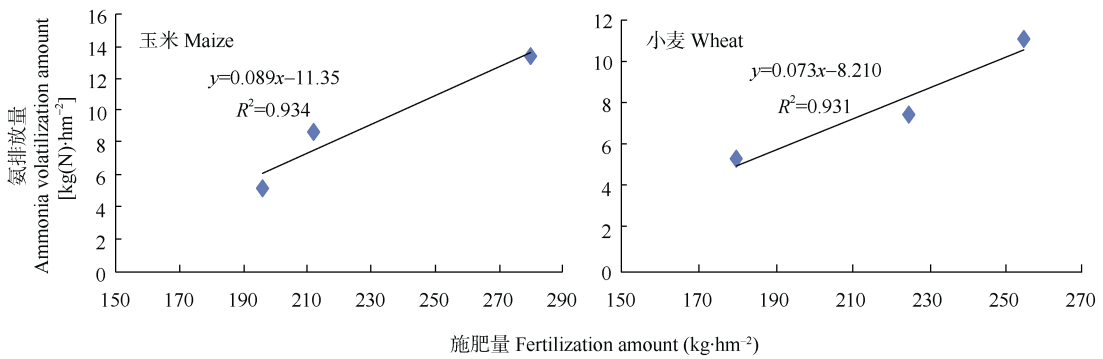

图 7　砂姜黑土农田夏玉米季和冬小麦季氨挥发与施肥量的响应关系

Fig. 7　Correlation between ammonia volatilization in summer maize and winter wheat seasons and fertilizer application rate in lime concretion black soil

4 结论

砂姜黑土区冬小麦-夏玉米轮作农田夏玉米季氨挥发量介于 3.2~13.4 kg·hm^{-2}, 冬小麦季氨挥发量介于 5.6~11.1 kg·hm^{-2}, 夏玉米季的氨挥发量整体高于冬小麦季, 说明夏玉米季是砂姜黑土冬小麦-夏玉米轮作体系氨挥发的高排时期。冬小麦季和夏玉米季不同施肥期的氨挥发量存在较大差异, 玉米基肥期的氨挥发量显著高于追肥期, 而小麦基肥期的氨挥发量与追肥期差异不大。与其他类型土壤研究结果类似, 砂姜黑土农田不同施肥处理的氨挥发量存在较大差别, TR 处理两季氨挥发量均显著高于其他处理, 其次为 OPT 处理, 而 HK 和 ZOPT 处理的氨挥发量更低, 且与前两个处理差异显著。然而, 对比两季作物产量发现, OPT、HK 和 TR 处理产量整体差别不大, ZOPT 处理产量更低, 说明 OPT 施肥量既可以实现减氨又能保障作物产量, 而 HK 处理不仅保障砂姜黑土作物产量, 还可以降低氨挥发, 实现砂姜黑土冬小麦-夏玉米轮作农田更好的经济与环境效益。最后, 结合几种典型施肥处理的排放系数, 发现砂姜黑土冬小麦季氨排放系数介于 1.7%~3.6%, 夏玉米季氨排放系数介于 1.5%~4.7%, 砂姜黑土农田的氨排放系数相比其他类型土壤相对较低。尽管如此, 考虑到砂姜黑土区域适宜的气候条件和高量施肥现象普遍存在, 合理施肥和新型肥料推广使用仍需被重视。

参考文献 References

[1] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915–924
ZHANG F S, WANG J Q, ZHANG W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915–924

[2] 胡春胜, 张玉铭, 秦树平, 等. 华北平原农田生态系统氮素过程及其环境效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1501–1514
HU C S, ZHANG Y M, QIN S P, et al. Nitrogen processes and related environmental effects on agro-ecosystem in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(10): 1501–1514

[3] 巨晓棠, 谷保静. 氮素管理的指标[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 281–296
JU X T, GU B J. Indexes of nitrogen management[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(2): 281–296

[4] 卢丽丽, 吴根义. 农田氨排放影响因素研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(1): 149–162
LU L L, WU G Y. Advances in affecting factors of ammonia emission in farmland[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(1): 149–162

[5] 董文旭, 吴电明, 胡春胜, 等. 华北山前平原农田氨挥发速率与调控研究[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1115–1121
DONG W X, WU D M, HU C S, et al. Ammonia volatilization and control mechanisms in the piedmont of North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(5): 1115–1121

[6] PAN Y P, TIAN S L, LIU D W, et al. Source apportionment of aerosol ammonium in an ammonia-rich atmosphere: An isotopic study of summer clean and hazy days in urban Beijing[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(10): 5681–5689

[7] ZHANG Q Q, PAN Y P, HE Y X, et al. Bias in ammonia emission inventory and implications on emission control of nitrogen oxides over North China Plain[J]. Atmospheric Environment, 2019, 214: 116869

[8] WANG C, YIN S S, BAI L, et al. High-resolution ammonia emission inventories with comprehensive analysis and evaluation in Henan, China, 2006–2016[J]. Atmospheric Environment, 2018, 193: 11–23

[9] 王玥凯, 郭自春, 张中彬, 等. 不同耕作方式对砂姜黑土物理性质和玉米生长的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(6): 1370–1380
WANG Y K, GUO Z C, ZHANG Z B, et al. Effect of tillage practices on soil physical properties and maize growth in Shajiang black soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(6): 1370–1380

[10] 刘卫玲, 程思贤, 李娜, 等. 深松(耕)时期与方式对砂姜黑土耕层养分和冬小麦、夏玉米产量的影响[J]. 河南农业科学, 2020, 49(3): 8–16
LIU W L, CHENG S X, LI N, et al. Effects of time and pattern of deep tillage on topsoil nutrient content, yield of winter wheat and summer maize in lime concretion black soil[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2020, 49(3): 8–16

[11] 叶新新, 王冰清, 刘少君, 等. 耕作方式和秸秆还田对砂姜黑土碳库及玉米小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 112–118
YE X X, WANG B Q, LIU S J, et al. Influence of tillage and straw retention on soil carbon pool and maize-wheat yield in Shajiang black soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(14): 112–118

[12] 李欠欠. 脲酶抑制剂 LIMUS 对我国农田氨减排及作物产量和氮素利用的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2014
LI Q Q. Effect of inhibitor LIMUS on ammonia mitigation and crop yield and nitrogen use efficiency in different croplands of China[D]. Beijing: Chinese Agricultural University, 2014

[13] 张庆利, 张民, 杨越超, 等. 碳酸氢铵和尿素在山东省主要土壤类型上的氨挥发特性研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(1): 32–34
ZHANG Q L, ZHANG M, YANG Y C, et al. Volatilization of ammonium bicarbonate and urea in main soil of Shandong Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33(1): 32–34

[14] 丁世杰, 熊淑萍, 马新明, 等. 耕作方式与施氮量对小麦-玉米复种系统玉米季土壤氮素转化及产量的影响[J]. 应用

生态学报, 2017, 28(1): 142–150
DING S J, XIONG S P, MA X M, et al. Effects of tillage and nitrogen application rate on soil nitrogen transformation and yield in a winter wheat/summer maize multiple cropping system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(1): 142–150

[15] 赵蒙, 曾科, 姚元林, 等. 聚脲甲醛缓释肥对太湖稻麦轮作体系氨挥发及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(1): 55–63
ZHAO M, ZENG K, YAO Y L, et al. Effects of polyurea-formaldehyde on ammonia volatilization and yields under rice-wheat rotation in Taihu Region[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2019, 25(1): 55–63

[16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 80
BAO S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 80

[17] 姜涛, 倪皖莉, 朱晓峰, 等. 砂姜黑土夏花生氮磷钾吸收与分配特征研究[J]. 中国农学通报, 2019, 35(35): 73–78
JIANG T, NI W L, ZHU X F, et al. Characteristics of nitrogen, phosphorus and potassium absorption and distribution of summer peanut in lime concretion black soil region[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(35): 73–78

[18] 翟学旭, 王振林, 戴忠民, 等. 灌溉与非灌溉条件下黄淮冬麦区不同追氮时期农田土壤氨挥发损失研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(1): 54–64
ZHAI X X, WANG Z L, DAI Z M, et al. Ammonia volatilization loss in Huang Huai winter wheat cultivation areas under irrigated and rainfed conditions[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(1): 54–64

[19] 吕宏菲, 马星霞, 杨改河, 等. 秸秆还田对关中地区麦玉复种体系土壤氨排放的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(4): 513–522
LYU H F, MA X X, YANG G H, et al. Effect of straw returning on ammonia emissions from soil in a wheat-maize multiple cropping system in the Guanzhong region, China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(4): 513–522

[20] 郭成士, 马东豪, 张丛志, 等. 典型砂姜黑土黑色物质提取方法及成份研究[J]. 土壤学报, 2020, 17(1): 23–38
GUO C S, MA D H, ZHANG C Z, et al. Extraction method and composition of black matter in typical Shajiang Calci-Aquic Vertisols in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 17(1): 23–38

[21] 王擎运, 杨远照, 徐明岗, 等. 长期秸秆还田对砂姜黑土矿质复合态有机质稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(5): 1108–1117
WANG Q Y, YANG Y Z, XU M G, et al. Effects of long-term straw returning on stability of mineral-complexed organic matter in Shajiang black soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(5): 1108–1117

[22] 董文旭, 胡春胜, 陈素英, 等. 保护性耕作对冬小麦-夏玉米农田氮肥氨挥发损失的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(11): 2278–2284
DONG W X, HU C S, CHEN S Y, et al. Effect of conservation tillage on ammonia volatilization from nitrogen fertilizer in winter wheat-summer maize cropping system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(11): 2278–2284

[23] 山楠, 赵同科, 毕晓庆, 等. 不同施氮水平下小麦田氨挥发规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(9): 1858–1865
SHAN N, ZHAO T K, BI X Q, et al. Ammonia volatilization from wheat soil under different nitrogen rates[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(9): 1858–1865

[24] 张翀, 韩晓阳, 李雪倩, 等. 川中丘陵区紫色土冬小麦/夏玉米轮作氨挥发研究[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(11): 1359–1366
ZHANG C, HAN X Y, LI X Q, et al. Ammonia volatilization in winter wheat/summer maize rotation system of purple soil in hilly area of Central Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(11): 1359–1366

[25] 杨晓云, 杨虎德. 不同施肥条件下北方夏玉米农田土壤氨挥发研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(11): 137–142
YANG X Y, YANG H D. Soil ammonia volatilization under the different fertilization in summer corn farmland in North China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(11): 137–142

[26] 田玉华, 曾科, 尹斌. 基于不同监测方法的太湖地区稻田基蘖肥期氨排放研究[J]. 土壤学报, 2019, 56(5): 1180–1189
TIAN Y H, ZENG K, YIN B. Ammonia emission following basal and tillering fertilization in Taihu Lake region relative to monitoring techniques[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(5): 1180–1189

[27] 张玉铭, 胡春胜, 董文旭. 华北太行山前平原农田氨挥发损失[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(3): 417–419
ZHANG Y M, HU C S, DONG W X. Ammonia volatilization from wheat-maize rotation field in the piedmont of Taihang[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(3): 417–419

[28] 王旭刚, 郝明德, 陈磊, 等. 长期施肥条件下小麦农田氨挥发损失的原位研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 18–24
WANG X G, HAO M D, CHEN L, et al. In situ study of ammonia volatilization from wheat cropland under long-term continuous fertilization[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(1): 18–24

[29] 黄巧义, 张木, 黄旭, 等. 聚脲甲醛缓释氮肥一次性基施在双季稻上的应用效果[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3996–4006
HUANG Q Y, ZHANG M, HUANG X, et al. Effect of one-off application of poly urea-formaldehyde fertilizer under reduced N rate on double cropping rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(20): 3996–4006

[30] LIU T Q, HUANG J F, CHAI K B, et al. Effects of N fertilizer sources and tillage practices on NH_3 volatilization, grain yield, and N use efficiency of rice fields in Central China[J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 385

[31] 姜超强, 卢殿君, 祖朝龙, 等. 施用方式和氮肥种类对砂姜黑土氮素迁移的影响[J]. 土壤, 2018, 50(2): 248–255
JIANG C C, LU D J, ZU C L, et al. Effects of different fertilization methods and nitrogen fertilizers on nitrogen diffusion and migration in lime concretion black soil[J]. Soils, 2018, 50(2): 248–255