

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190627

吕宏菲, 马星霞, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 李娜, 谢呈辉, 许宏伟. 秸秆还田对关中地区麦玉复种体系土壤氮排放的影响[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, FENG Y Z, REN G X, LI N, XIE C H, XU H W. 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

秸秆还田对关中地区麦玉复种体系 土壤氮排放的影响*

吕宏菲, 马星霞, 杨改河**, 冯永忠, 任广鑫, 李娜, 谢呈辉, 许宏伟

(西北农林科技大学农学院/陕西省循环农业工程技术研究中心 杨凌 712100)

摘要: 农业氮减排是雾霾治理最经济有效的方法, 而农田肥料施用造成的氮排放是农业氮排放的重要部分。本研究旨在探讨冬小麦-夏玉米复种体系下土壤氮排放对秸秆还田的响应, 为减少农业氮排放和控制雾霾提供理论依据。本试验于2018年6月—2019年6月在陕西关中杨凌地区, 对土壤氮排放、0~40 cm土壤无机氮以及产量进行了测定分析。试验采用双因素裂区设计, 主区为秸秆还田方式, 设不还田(S0)、半量还田(S0.5)和全量还田(S1)3个水平; 副区为施肥, 设不施肥(F0)、减量施肥(F0.8)、常规施肥(F1)3个水平。结果表明: 秸秆还田与施肥及两者互作对夏玉米季土壤氮累积排放量(C)有显著影响。秸秆还田对冬小麦季土壤氮累积排放量无显著影响。整个麦玉复种体系的氮累积排放量为1.31~19.26 kg·hm⁻², 占施肥量的2.17%~4.69%, 各处理之间表现为: S0F1>S0.5F1>S1F1>S0F0.8>S0.5F0.8>S1F0.8>S1F0>S0.5F0>S0F0。在不施肥情况下, 秸秆还田能增加土壤氮累积排放量, 但秸秆还田配施氮肥较不还田处理显著减少土壤氮累积排放量和氮损失率, 秸秆全量还田和半量还田之间的氮排放无明显差异。其中S1F0.8和S0.5F0.8处理在整个复种体系中减排效果最为显著, 分别较S0F0.8处理(11.62 kg·hm⁻²)减排38.64%和37.35%。相比于只施氮肥, 秸秆还田配施氮肥能显著减少土壤中无机氮, 显著提高夏玉米产量6.23%~20.20%, 冬小麦产量16.60%~28.17%。通过PCA分析发现, S1F0.8和S0.5F0.8处理是减排增产的最优组合。综合考虑土壤氮排放和作物产量, 长期秸秆还田配减量施肥处理, 能在保证作物高产的基础上减少土壤氮排放, 可在关中地区实施。

关键词: 麦玉复种; 氮排放; 产量; 减量施肥; 秸秆还田

中图分类号: S318

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



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

LYU Hongfei, MA Xingxia, YANG Gaihe**, FENG Yongzhong, REN Guangxin,
LI Na, XIE Chenghui, XU Hongwei

(College of Agronomy, Northwest A & F University / the Research Center of Recycle Agricultural Engineering and Technology of Shaanxi Province, Yangling 712100, China)

* 国家自然科学基金面上项目(31971859)和陕西省科技统筹计划项目(2016KTCL02-11)资助

** 通信作者: 杨改河, 从事资源生态、循环农业与区域发展方面的研究。E-mail: ygh@nwsuaf.edu.cn

吕宏菲, 从事农田生态与高效耕作栽培制度方面的研究。E-mail: kanalh2019@163.com

收稿日期: 2019-08-25 接受日期: 2019-12-19

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31971859) and the Overall Science and Technology Program of Shaanxi Province, China (2016KTCL02-11).

** Corresponding author, E-mail: ygh@nwsuaf.edu.cn

Received Aug. 25, 2019; accepted Dec. 19, 2019

Abstract: Reducing agricultural ammonia emissions is considered the most economical and effective method to mitigate haze pollution. Notably, ammonia emissions caused by fertilizer application in agricultural practices are a significant contributor to atmospheric ammonia. In this context, this study aimed to explore the effect of straw returning on ammonia emissions from soil using a winter wheat-summer maize multiple cropping system to provide a theoretical basis for reducing agricultural ammonia emissions to control haze pollution. The study was conducted from June 2018 to June 2019, in the Shaanxi Guanzhong region, China. The experiment used a random block design encompassing different straw returning treatments — no straw returning (S0), half straw returning (S0.5), and full straw returning (S1), as main treatments; and different fertilizer applications — no fertilization (F0), 20% fertilizer reduction (F0.8), and conventional fertilization (F1), as sub-treatments. Soil ammonia emissions, inorganic N (in 0–40 cm of soil), and crop yield, were measured for all treatments. The results showed that straw returning and fertilization, and the interaction between the two, had a significant effect on cumulative ammonia emissions (C) in the summer maize season. Conversely, straw returning had no significant effect on C in the winter wheat season. The C of the entire wheat-maize multiple cropping system was 1.31–19.26 kg·hm⁻², accounting for 2.17%–4.69% of the fertilizer application. Performance among the treatments was as follows: S0F1 > S0.5F1 > S1F1 > S0F0.8 > S0.5F0.8 > S1F0.8 > S1F0 > S0.5F0 > S0F0. Notably, straw returning showed an increase in C without fertilization. However, when compared with no straw returning, straw returning combined with fertilization significantly reduced the C and the amount of ammonia loss that occurred. There was no significant difference in ammonia emissions between full and half straw return treatments. Notably, the ammonia emission reduction effect of S1F0.8 and S0.5F0.8 treatments were the most significant for the study, reducing 38.64% and 37.35% from S0F0.8 treatment, respectively. Straw returning combined with N fertilizer also demonstrated a significant reduction in NO₃⁻-N and NH₄⁺-N in soil, while increasing the yield of summer maize by 6.23%–20.20%, and winter wheat by 16.60%–28.17%. Further to this, PCA analysis indicated that S0.5F0.8 and S1F0.8 treatments were the optimal treatment combinations of those tested for the study, providing a balance between ammonia emission reduction and increased crop production. Therefore, our findings indicate that long-term straw returning combined with fertilizer reduction could improve crop yield as well as reduce soil ammonia emissions, suggesting an agricultural practice that can assist in the reduction of agricultural ammonia emissions, and thus help mitigate haze pollution in the Guanzhong region.

Keywords: Wheat-maize multiple cropping system; Ammonia emission; Yield; Nitrogen fertilizer reduction; Straw returning

氨挥发是氮肥气态损失的重要途径,也是导致氮肥利用率低的主要原因之一^[1]。大量科学证据表明,碱性污染物氨(NH₃)与酸性污染物二氧化硫(SO₂)和氮氧化物(NO_x)在空气中发生化学反应,生成硫酸铵和硝酸铵,形成PM_{2.5}凝结核,吸水并结合其他污染物而形成雾霾^[2],雾霾带来的生态环境问题严重影响到人们生活。研究发现通过加强NH₃控制措施干预硫酸盐形成过程,可有效缓解雾霾^[3]。人为NH₃排放主要来自于农业,而农业NH₃排放的重要来源是种植业肥料的使用,国外学者对减氮和控霾的相关研究表明,农业NH₃减排是雾霾治理最经济有效的方法^[4-7]。

农作物秸秆是当今世界上仅次于煤炭、石油和天然气的第四大能源^[8]。据统计,我国2016年秸秆总产量已突破8×10⁸ t^[9]。将秸秆施用于农田里能够调控土壤水温环境,改善土壤结构和作物生长环境。高效持续利用作物秸秆在化肥减施、作物增产和改善大气环境等方面具有重要作用。通常情况下,土壤pH是影响土壤氨挥发的主要因素^[10],其他影响氨挥发的土壤因素还包括还田秸秆种类^[11]和土壤阳离子交换量^[12]、质地^[13-14]、铵态氮含量^[15]、温度^[4-5]、含水量^[13,16-18]和脲酶活性^[19-20]等。近年来通过秸秆还

田调控土壤氨排放的研究也屡见不鲜。李宗新等^[21]研究发现,随施肥量增加氨排放明显增加,与单施化肥相比,秸秆还田配施化肥可显著减少夏玉米(*Zea mays*)土壤氨挥发损失4.06~8.25 kg·hm⁻²;董文旭等^[11]、胡春胜等^[22]研究也发现在冬小麦(*Triticum aestivum*)-夏玉米一年两熟制(麦玉复种体系)下,小麦或玉米秸秆混合施肥可显著减少氨挥发损失,且小麦秸秆抑制氨挥发效果优于玉米秸秆,但在相同的秸秆还田下,施氮100 kg·hm⁻²的氨挥发量却远远小于施氮70 kg·hm⁻²;徐聪^[23]在连续两年的研究中指出秸秆还田配施氮肥对麦玉复种体系总的氨排放量并无明显影响规律。以上研究之所以呈现不同结果,主要由于秸秆还田方式、肥料配施量等不同。然而,在陕西关中地区传统麦玉复种体系下,秸秆还田配施氮肥对土壤氨排放的影响如何尚少见报道。因此,本研究基于合理的秸秆还田配施氮肥能够对农田起到良好的增产减氮效果的假设之上,在陕西关中地区以麦玉复种体系为研究对象,开展了不同秸秆还田量配施不同施肥量下,土壤氨排放规律及作物产量的研究,旨在探索一个既能保证产量,又能尽量减少土壤氨排放的田间管理模式。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究设于陕西省关中地区杨凌农业示范区 (34°17'N, 108°07'E), 该区域为大陆性暖温带季风气候区, 年平均气温 13.7℃, 最热月月均温为 26.6℃, 最冷月月均温为 1.1℃, 全年降水量约为 550 mm。作物常为一年两熟制。本试验为长期定位试验, 试

验开始于 2011 年 10 月, 土壤为壤土, 2011 年测定 0~20 cm 土壤有机质含量为 13.4 g·kg⁻¹, 碱解氮含量 32.7 mg·kg⁻¹, 速效磷含量 12.08 mg·kg⁻¹, 速效钾含量 145.65 mg·kg⁻¹。氮排放的测定周期为 2018 年 6 月至 2019 年 6 月, 2018 年 6 月夏玉米种植之前 0~20 cm 土壤基础指标如表 1 所示。期间试验地气温与降雨量变化情况如图 1 所示。

表 1 2018 年 6 月夏玉米种植之前 0~20 cm 土壤基础指标
Table 1 Foundation indexes of 0~20 cm soil before summer maize planting in June 2018

试验处理 Treatment	pH	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Hydrolysable N (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg·kg ⁻¹)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P (g·kg ⁻¹)
S0F0	8.37a	13.38e	27.10g	7.78f	94.38g	0.59h	0.67g
S0F0.8	8.12e	14.71d	38.20d	9.62d	115.11d	0.74e	0.77e
S0F1	8.30b	15.95c	39.46c	10.57bc	117.84cd	0.79d	0.79e
S0.5F0	8.15e	15.89c	32.28f	8.36e	100.35f	0.66g	0.74f
S0.5F0.8	8.23cd	18.05a	39.33cd	10.20c	119.82bc	0.81c	0.85d
S0.5F1	8.20d	17.12b	41.43b	11.36a	122.88ab	0.82b	0.87c
S1F0	8.25c	15.43cd	35.39e	8.30e	106.77e	0.68f	0.79e
S1F0.8	8.12e	18.63a	41.36b	10.76b	121.07abc	0.83ab	0.92b
S1F1	8.00f	16.75b	42.88a	11.68a	123.69a	0.84a	0.94a

同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。S0: 无秸秆还田; S0.5: 半量秸秆还田; S1: 全量秸秆还田; F0: 不施肥; F0.8: 减量施肥; F1: 常规施肥。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). S0: no straw returning; S0.5: half straws returning; S1: all straws returning; F0: no fertilization; F0.8: fertilizer reduction; F1: conventional fertilization.

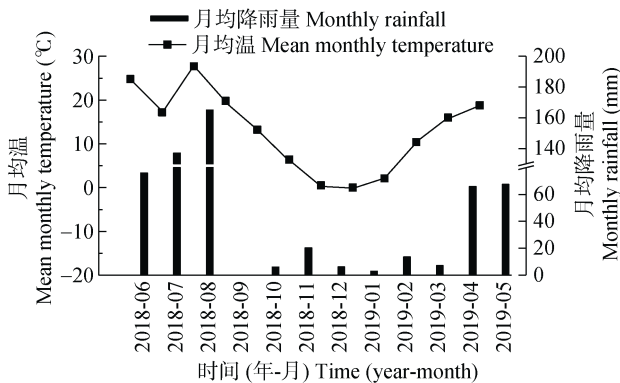


图 1 试验区试验期间气温与降雨量变化

Fig. 1 Changes of air temperature and monthly rainfall during the experimental period in the research area

1.2 试验设计

试验对象是 2018—2019 年麦玉复种体系, 夏玉米品种为‘漯单 9 号’, 播种采用免耕机械条播, 播量为 42 kg·hm⁻², 播幅 3 行, 行距 50 cm, 2018 年 6 月 15 日种植, 9 月 28 日收获, 其中大喇叭口期追肥, 施肥方式条施覆土, 追肥时大水灌溉 1 次, 灌溉量约 120 mm。冬小麦品种为‘西农 889’, 机械翻耕后播种, 行距 20 cm, 株距 5 cm, 2018 年 10 月 11 日种植, 2019 年 6 月 4 日收获, 其中肥料做基肥处理, 施肥方式是

均匀撒施。

试验采用双因素裂区设计。其中主区为秸秆还田水平, 设置秸秆不还田(S0)、秸秆半量还田(S0.5)和秸秆全量还田(S1)3 个梯度; 副区为施肥水平, 设不施肥(F0)、减量施肥(F0.8, 为常规施肥的 80%)、常规施肥(F1)3 个梯度。详见表 2。试验共计 9 个组合, 分别表示为 S0F0、S0F0.8、S0F1、S0.5F0、S0.5F0.8、S0.5F1、S1F0、S1F0.8、S1F1, 重复 3 次。所有试验小区面积为 68.8 m²(8.6 m×8 m), 小区之间间隔 0.5 m。夏玉米季采用秸秆覆盖还田方式, 所用秸秆为前茬作物冬小麦秸秆。冬小麦季采用秸秆翻耕入土还田方式。在作物收获后, 人工移除 S0 处理小区内所有秸秆, 隔行移除 S0.5 处理小区内秸秆, 保留 S1 处理小区所有秸秆, 用打草机将小区内秸秆粉碎成 3~5 cm 碎屑。

1.3 测定项目

1.3.1 土壤氮排放及环境因子测定

土壤氮排放采用通气法测定。采样装置用聚氯乙烯硬质塑料管制成, 内径 15 cm, 高 15 cm。分别将两块厚度均为 2 cm、直径为 16 cm 的海绵均匀浸以 15 mL 磷酸甘油溶液(50 mL 磷酸+40 mL 丙三醇, 定容

表 2 试验期间冬小麦和夏玉米的具体施肥情况
Table 2 Fertilization of winter wheat and summer maize during the experiment

作物种类 Crop type	施肥种类 Fertilizer type	常规施肥 Conventional fertilization [kg(N)·hm ⁻²]	减量施肥 Fertilizer reduction [kg(N)·hm ⁻²]	施肥方式 Fertilization method	施肥时期 Fertilization time
冬小麦 Winter wheat	尿素 Urea	172.5	138.0	基肥 Base fertilizer	播种前 Before sowing
	磷酸二铵 Diammonium phosphate	65.5	52.4		
夏玉米 Summer maize	尿素 Urea	172.5	138.0	追肥 Top dressing	大喇叭口期 Flare opening

尿素氮含量为≥46%，磷酸二铵氮含量为≥17.4%。Total nitrogen contents of urea and diammonium phosphate are ≥46% and ≥17.4%, respectively.

至 1 000 mL)置于硬质塑料管中,下层的海绵距地面 5 cm,上层的海绵与管顶部相平。将海绵放置在集气装置中 24 h 后,将集气装置下层的海绵取出,迅速装入塑封袋中,及时带回实验室,用靛酚蓝比色法测定海绵中吸收的 NH₄⁺,进而计算氨排放通量与氨累积排放量。上层的海绵根据其干湿情况 3~7 d 更换 1 次。遇到阴雨天气,配备遮雨装置,测定仍可照常进行。具体监测周期:作物施肥后开始监测,连续采样 20 d,前 7 d 每天监测 1 次,中间 9 d 每 3 d 监测 1 次,后 4 d 测 1 次,可以根据采集实际情况适当调整采集时间。

在夏玉米 5 个生育时期(小喇叭口期、大喇叭口期、开花期、灌浆期、成熟期),冬小麦的 8 个主要生育时期(播种期、苗期、抽穗期、分蘖期、拔节期、开花期、灌浆期、成熟期),分别用土钻钻取根层 0~40 cm 土壤,每 10 cm 一层,采用连续流动分析仪(德国 SEAL Auto Analyzer 3)检测每层土壤硝态氮、铵态氮含量,土壤中硝态氮、铵态氮含量相加为无机氮含量。

1.3.2 土壤氨排放通量及累积排放量

田间氨排放通量(V)的计算公式为:

$$V(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})=M\times 10^{-2}/(A\times T) \quad (1)$$

式中: M 为通气法单个装置平均每次测得的氨量(mg), A 为捕获装置的横截面积(m²), T 表示每次连续捕获的时间(d)。

氨累积排放量(C)的计算公式为:

$$C(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})=\sum(\text{氨排放通量}\times\text{每次连续收集的时间}) \quad (2)$$

1.3.3 作物产量测定

作物收获时,不同处理重复选样 3 次,样方面积 1 m²,将样方内所有作物风干、脱粒,统计实际产量。

1.4 数据分析方法及软件

采用 Microsoft Excel 2010 进行试验数据整理和计算, SPSS 17.0 进行方差分析及相关性分析,使用 Origin 2016、Canoco 5 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田与施肥对氨排放通量的影响

夏玉米监测期,不同秸秆还田量配施不同尿素的氨排放变化规律整体呈现先增加后降低趋势,氨排放主要发生在施肥后的 13 d 内,且在施肥后的第 3 d 出现排放通量的最大值 0.06~3.13 kg·hm⁻²·d⁻¹;不同处理的最大排放通量表现为 S0F1>S0F0.8>S0.5F1>S1F1>S1F0.8>S0.5F0.8>S1F0>S0.5F0>S0F0(图 2a)。3 种还田水平下,随着施肥量的增加,平均氨排放通量均明显增加。但 3 种施氮条件下,秸秆还田的平均氨排放量有所不同,其中 F0 处理下秸秆还田会增加平均氨排放通量,但差异不显著;F0.8 和 F1 处理下,秸秆还田能够明显降低平均氨排放通量,但两种秸秆还田量之间差异不显著。

冬小麦监测期,氨排放通量呈“降低—升高—降低—再升高—再降低”趋势,施肥后第 2 d 降低是由于降雨,增加了土壤含水量,并且引起气温骤降 4℃,从而减少了土壤氨排放通量,第 15 d 升高,是因为在施肥后 14~15 d 内较之前气温升高 5~7℃,有利于土壤氨排放(图 2b)。氨排放主要发生在施肥后 15 d 内,施肥后 4~5 d 出现氨排放通量的峰值 0.06~0.81 kg·hm⁻²·d⁻¹,表现为 S1F1>S0.5F1>S0F1>S0.5F0.8>S1F0.8>S0F0.8>S1F0=S0.5F0>S0F0。通过对整个监测期平均氨排放通量分析可得:相同秸秆还田量下,随施肥量增加,平均氨排放通量也增加;相同施肥水平下,秸秆还田能增加土壤平均氨排放通量。只有在施肥后第 1 d 差异显著,其他监测时期差异不显著。

综上所述,施肥量和秸秆还田能显著影响土壤氨排放通量。随着施肥量的增加土壤氨排放通量不断增加;秸秆还田能显著减少夏玉米季土壤氨排放通量,增加冬小麦季土壤氨排放通量。

2.2 秸秆还田与施肥对氨累积排放量的影响

如表 3 所示,夏玉米监测期的氨累积排放量显

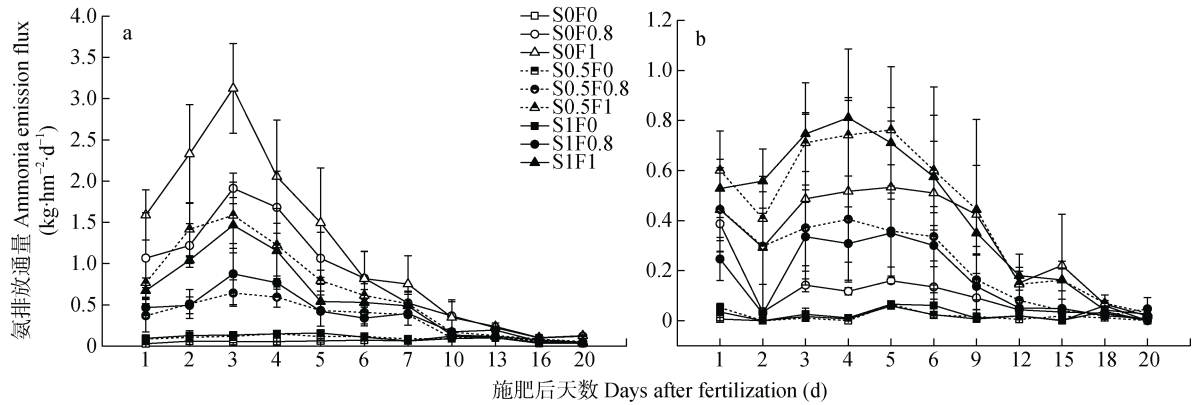


图 2 不同秸秆还田和施肥处理下夏玉米(a)和冬小麦(b)土壤氮排放通量变化

Fig. 2 Changes in ammonia emission fluxes from soil of summer maize (a) and winter wheat (b) under different treatments of straws returning and fertilization

S0: 无秸秆还田; S0.5: 半量秸秆还田; S1: 全量秸秆还田; F0: 不施肥; F0.8: 减量施肥; F1: 常规施肥. S0: no straw returning; S0.5: half straws returning; S1: all straws returning; F0: no fertilization; F0.8: fertilizer reduction; F1: conventional fertilization.

表 3 不同秸秆还田和施肥处理下夏玉米和冬小麦生长季氮累积排放量和氮损失率

Table 3 Accumulated ammonia emissions and loss rates in summer maize and winter wheat growing seasons under different treatments of straws returning and fertilization

处理 Treatment	夏玉米 Summer maize		冬小麦 Winter wheat		麦玉复种体系 Wheat-maize multiple cropping system	
	氮累积排放量 Accumulated ammonia emission (kg·hm ⁻²)	氮损失率 Loss rate (%)	氮累积排放量 Accumulated ammonia emissions (kg·hm ⁻²)	氮损失率 Loss rate (%)	总的氮累积排放量 Total accumulated ammonia emissions (kg·hm ⁻²)	氮损失率 Total loss rate (%)
S0F0	1.05±0.08g	/	0.26±0.03c	/	1.31	/
S0.5F0	1.53±0.09ef	/	0.29±0.05c	/	1.82	/
S1F0	1.52±0.07ef	/	0.33±0.09c	/	1.85	/
S0F0.8	10.10±1.15b	7.32	1.52±0.19bc	0.80	11.62	3.54
S0.5F0.8	4.14±0.78def	3.00	3.14±1.29abc	1.65	7.28	2.22
S1F0.8	4.82±0.58cde	3.50	2.31±0.25abc	1.22	7.13	2.17
S0F1	14.00±2.74a	8.14	5.26±3.43ab	2.21	19.26	4.69
S0.5F1	7.95±0.81bc	4.61	6.18±0.56a	2.60	14.13	3.48
S1F1	6.80±1.19bcd	3.94	6.08±0.61a	2.55	12.88	3.14
显著性分析(F 值) Significance (F value)						
S	11.76**	/	0.36 ^{ns}	/	/	/
F	39.04**	/	14.93**	/	/	/
S × F	3.91*	/	0.11 ^{ns}	/	/	/

S: 秸秆还田; F: 施肥; S0: 无秸秆还田; S0.5: 半量秸秆还田; S1: 全量秸秆还田; F0: 不施肥; F0.8: 减量施肥; F1: 常规施肥。同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。**和*分别表示 $P < 0.01$ 水平和 $P < 0.05$ 水平影响显著; ns 表示影响不显著。S: straw returning; F: fertilization; S0: no straw returning; S0.5: half straws returning; S1: all straws returning; F0: no fertilization; F0.8: fertilizer reduction; F1: conventional fertilization. Different lowercase letters in the same column mean significant differences among different treatments at $P < 0.05$ level. ** and * mean significant effects at $P < 0.01$ and $P < 0.05$, respectively. "ns" means no significant effect.

著受秸秆还田和施肥量影响。相同秸秆还田量下, 随施肥量增加, 氮累积排放量显著增加, 氮损失率也增加; 相同施肥量下, 秸秆还田能显著减少土壤氮累积排放量和氮损失率, 但半量还田和全量还田间差异不显著。秸秆还田和施肥及两者互作对夏玉米季氮累积排放量有极显著或显著影响。

冬小麦监测期, 相同还田量下, 常规施肥显著增加了土壤氮累积排放量, 使氮损失率有所升高;

相同施肥量下, 秸秆还田增加土壤氮累积排放量和氮损失率, 但与秸秆不还田处理间差异不显著。施肥对冬小麦季氮累积排放量有极显著影响, 但秸秆还田和两者互作影响不显著。

整个麦-玉复种的氮累积排放量依次为 $S0F1 > S0.5F1 > S1F1 > S0F0.8 > S0.5F0.8 > S1F0.8 > S1F0 > S0.5F0 > S0F0$, 最大为 $19.26 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 最小为 $1.31 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。不施肥处理下, 秸秆半量还田和全量还田较不还田土壤

氮累积排放量分别增加 $0.41 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $0.44 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。与只施肥相比, 秸秆还田配施氮肥减少氮累积排放量 $4.34 \sim 6.38 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、降低氮损失率 $1.21\% \sim 1.55\%$ 。其中 S1F0.8 和 S0.5F0.8 处理在整个复种体系中减排效果最为显著, 减排幅度分别 38.64% 和 37.35% 。

2.3 秸秆还田与施肥对土壤无机氮的影响

各处理夏玉米季土壤耕层硝态氮和铵态氮含量的影响如图 3A、3B 所示。0~30 cm 土层内, 随土壤深度增加, 各处理的硝态氮含量均呈逐渐减少趋势; 30~40 cm 土层除 S0F1 和 S0.5F1 处理较 20~30 cm 土层显著升高外其余均无明显差异。各处理的铵态氮含量在 0~30 cm 土层逐渐减少, 30~40 cm 土层除 S0F0.8、S0F1 处理明显增加外, 其他处理均没有显著变化(图 3B)。

冬小麦季硝态氮和铵态氮含量变化如图 3C、3D 所示。各处理的变化一致, 均为随着土层深度增加呈减少趋势。施肥量增加能显著增加土壤 0~40 cm 土层硝态氮含量, 除 S1F1 处理比 S0F1 处理显著高

$2.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 外, 其他秸秆还田配施氮肥处理比只施肥处理显著减少 $9.32 \sim 23.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。分析图 3D 发现: S0.5F0 处理比 S0F0 处理铵态氮含量显著高 $0.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 除 S1F0.8 处理比 S0F0.8 处理显著低 $4.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 外, 其他秸秆还田配施氮肥处理比只施肥处理显著增加 $2.06 \sim 3.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

分析整个麦玉复种体系土壤无机氮含量(表 4)发现, 施肥对 0~40 cm 土壤无机氮含量影响显著, 表现出随施肥量增加而显著增加趋势。秸秆还田对土壤无机氮含量影响与施肥条件有关。在 F0 下, 秸秆还田能增加无机氮含量, 增幅为 $15.04\% \sim 55.10\%$, 半量还田与全量还田之间无显著差异。在 F0 和 F1 处理下, 除 S1F1 处理 0~20 cm 土层有所增加外, 秸秆还田与只施肥相比, 显著减少无机氮含量 $5.56\% \sim 31.36\%$ ($P < 0.05$)。值得注意的是在 0~20 cm 土层, F0.8 处理下, 随秸秆还田量增加, 无机氮含量显著减少, 在其他土层两种秸秆还田量之间无显著差异。

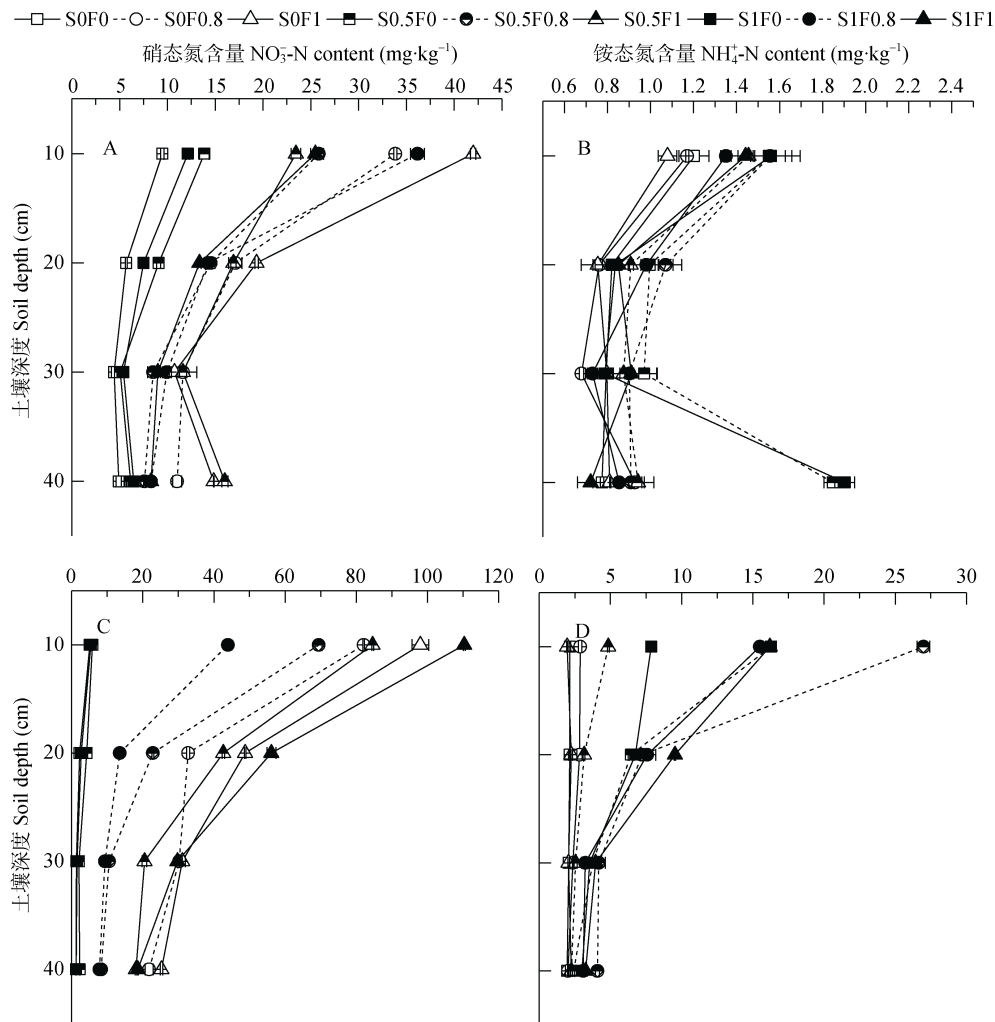


图 3 不同秸秆还田和施肥处理下夏玉米(A、B)、冬小麦(C、D)土壤 0~40 cm 硝态氮和铵态氮含量

Fig. 3 $\text{NO}_3^- \text{--N}$ and $\text{NH}_4^+ \text{--N}$ contents in 0~40 cm soil of summer maize (A, B) and winter wheat (C, D) under different treatments of straws returning and fertilization

表4 麦玉复种体系中不同秸秆还田和施肥处理下不同深度耕层土壤无机氮平均含量

Table 4 Average contents of inorganic nitrogen in different layers of 0–40 cm soil of wheat-maize cropping system under different treatments of straws returning and fertilization $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

处理 Treatment	土层 Soil layer (cm)			
	0~10	10~20	20~30	30~40
S0F0	8.96±0.07f	5.46±0.025i	4.34±0.10d	4.46±0.10e
S0.5F0	11.87±0.23e	8.47±0.13g	5.08±0.06d	5.68±0.049e
S1F0	10.31±0.07ef	6.62±0.10h	4.91±0.06d	5.43±0.19ef
S0F0.8	66.86±0.11b	28.64±0.12d	23.30±0.84a	18.53±0.63b
S0.5F0.8	61.91±0.58c	22.84±0.13e	12.07±0.20c	10.48±0.12d
S1F0.8	43.20±0.43d	15.91±0.06f	11.38±0.21c	9.66±0.05d
S0F1	74.70±1.12a	37.84±0.066b	23.09±0.34a	22.49±0.19a
S0.5F1	62.44±0.22c	34.06±0.15c	18.04±0.54b	19.01±0.23b
S1F1	76.73±0.24a	39.94±0.56a	21.80±0.39a	15.44±0.02c

S0: 无秸秆还田; S0.5: 半量秸秆还田; S1: 全量秸秆还田; F0: 不施肥; F0.8: 减量施肥; F1: 常规施肥。同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。S0: no straw returning; S0.5: half straws returning; S1: all straws returning; F0: no fertilization; F0.8: fertilizer reduction; F1: conventional fertilization. Different lowercase letters in the same column mean significant differences among different treatments at $P<0.05$ level.

2.4 秸秆还田与施肥对夏玉米产量的影响

由图4可以看出, 秸秆还田和施肥对夏玉米产量和冬小麦产量的影响效果相似。不施肥情况下, 夏玉米产量 S1、S0.5 处理分别比 S0 处理高 $464.44 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $662.36 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 冬小麦产量分别高 $978.33 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $288.33 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 但增加效果不显著。在相同施肥情况下, 秸秆还田能显著提高夏玉米、冬小麦产量, 夏玉米产量增幅为 $18.84\%\sim 20.21\%$ (F0.8) 和 $6.23\%\sim 11.01\%$ (F1), 冬小麦产量增幅为 $28.17\%\sim 27.88\%$ (F0.8) 和 $27.36\%\sim 16.60\%$ (F1), 但全量还田和半量还田处理间差异不显著, 减量施肥和常规施肥处理间差异也不显著。

2.5 秸秆还田与施肥对各指标的 PCA 分析

不同处理影响土壤氮排放通量(V)、每生产 1 t 粮食所产生的氮累积排放量(C/Y)、0~40 cm 各层无机氮含量、0~40 cm 铵态氮含量和作物产量(Y)变换的 PCA 分析如图5所示(W 代表冬小麦, M 代表夏玉米)。9 个处理被划分为 3 个组别, 第 1 组别内有 S0F1、S0.5F1、S1F1、S0F0.8 处理, 第 2 组别包含 S0.5F0.8、S1F0.8 处理, 第 3 组别包含 S0F0、S0.5F0 和 S1F0 处理。变异累计贡献率为 97.94%(其中 PC1 能够解释 92.27% 的差异; PC2 能够解释 5.67% 的差异)。通过 PCA 分析可以看出, 在整个麦玉复种体系中 S0.5F0.8、S1F0.8 处理下的夏玉米和冬小麦产量为较高水平, 同时每生产 1 t 粮食所产生的氮累积排放量处于较低水平, 综合对比发现, 秸秆还田配合

减量施肥的田间管理模式既能减少田间氮排放量, 又能保证高产, 建议在关中地区推广使用。

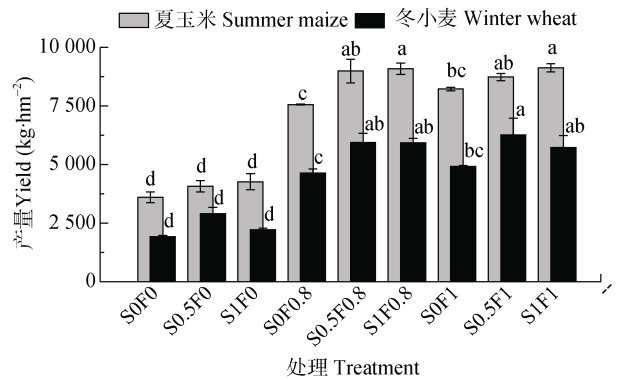


图4 不同秸秆还田和施肥处理下冬小麦和夏玉米的产量
Fig. 4 Yields of winter wheat and summer maize under different treatments of straws returning and fertilization

S0: 无秸秆还田; S0.5: 半量秸秆还田; S1: 全量秸秆还田; F0: 不施肥; F0.8: 减量施肥; F1: 常规施肥。不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。S0: no straw returning; S0.5: half straws returning; S1: all straws returning; F0: no fertilization; F0.8: fertilizer reduction; F1: conventional fertilization. Different lowercase letters in the same column mean significant differences among different treatments at 0.05 level.

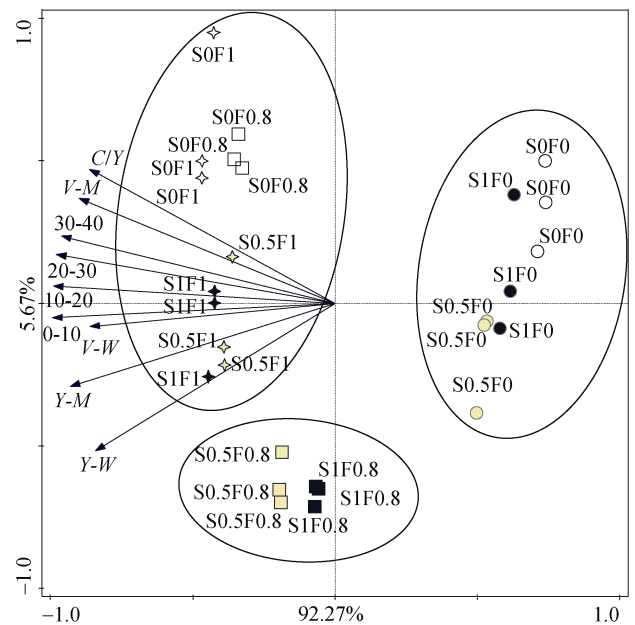


图5 秸秆还田和施肥处理与各指标之间的主成分分析
Fig. 5 Principal component analysis of each treatment and index

V : 氮排放通量; C/Y : 每生产 1 t 粮食所产生的氮累积排放量; Y : 产量; W : 冬小麦; M : 夏玉米; 0-10: 0~10 cm 土壤无机氮含量; 10-20: 10~20 cm 土壤无机氮含量; 20-30: 20~30 cm 土壤无机氮含量; 30-40: 30~40 cm 土壤无机氮含量; S0: 无秸秆还田; S0.5: 半量秸秆还田; S1: 全量秸秆还田; F0: 不施肥; F0.8: 减量施肥; F1: 常规施肥。 V : ammonia emission flux; C/Y : accumulated ammonia emissions per ton grain production; Y : yield; W : winter wheat; M : summer maize; 0-10: inorganic nitrogen content of 0~10 cm soil layer; 10-20: inorganic nitrogen content of 10~20 cm soil layer; 20-30: inorganic nitrogen content of 20~30 cm soil layer; 30-40: inorganic nitrogen content of 30~40 cm soil layer; S0: no straw returning; S0.5: half straws returning; S1: all straws returning; F0: no fertilization; F0.8: fertilizer reduction; F1: conventional fertilization.

3 讨论

土壤无机氮含量与氨排放密切相关, 土壤铵态氮含量与土壤氨排放呈显著正相关^[20,24]。本研究发现, 随施肥量增加, 提供给土壤微生物和土壤酶更多可转化为铵态氮的底物, 土壤中铵态氮总量和转化的速度增大, 土壤的氨排放速率和氨累积排放量也随之增加, 这与人^[25-27]得出的氨排放结果规律一致。但氨累积量低于前人研究结果, 氨排放的测量方法、施肥方式和灌水条件可能是引起差异的主要原因^[16,28-29]。Ruijter 等^[30]将作物秸秆和有机物残体与土壤混合处理, 结果发现作物秸秆及有机残体能够有效增加氨挥发, 原因是秸秆还田后微生物增殖, 种群建立, 释放出自身生长不需要的铵态氮, 在土壤表面很容易以 NH_3 的形式释放出来, 这与本研究得出的在不施肥条件下, 秸秆还田能显著增加土壤氨排放的结论一致。长期秸秆配施氮肥能够有效补充土壤中碳源和氮源^[31], 增加土壤有机酸含量, 使土壤 pH 降低^[32], 从而抑制土壤中铵态氮向 NH_3 转化^[33]; 同时土壤微生物活性增加, 加速土壤无机氮(硝态氮、铵态氮等)固定转化为有机氮, 减少土壤中氨排放底物, 进而减少氨排放量^[34-35]。本研究结果发现: 相对于只施肥处理, 秸秆还田能显著降低麦玉复种系统土壤的硝态氮和铵态氮含量, 进而降低土壤氨排放, 这与 Gill 等^[36]和杨弘^[24]的研究结果相似, 其中 S0.5F0.8 和 S1F0.8 处理减排效果最佳。但对于冬小麦季秸秆还田能增加土壤铵态氮含量和氨排放, 徐聪^[23]的研究也得到了相似结果, 可能由于西北干旱地区冬季低温干燥, 有机物质阻碍了铵态氮进入黏土矿物固定位置, 减少了铵的晶穴固定, 从而增加了土壤铵态氮含量, 进而促进氨的转化^[37]。综合分析可以得出, 长期秸秆还田配施氮肥有助于土壤氮素积累, 减少氮素损失。

秸秆还田能够优化农田土壤理化性状和土壤结构, 维持和增加土壤微生物活性和数量^[38-39], 补充土壤有机质含量^[40], 从而为作物籽粒发育提供充足的碳源^[41], 达到增产目的。施氮对作物增产有显著效果, 但过量施氮不仅不会使作物产量增加, 反而会带来减产及土壤氮素残留过高风险^[42], 因此, 秸秆还田与氮肥合理配施是实现作物高产的有效途径。杨宪龙等^[43]在关中地区连续 4 年的定位试验中发现, 小麦施氮 150~191 $\text{kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$ 、玉米施氮 180 $\text{kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$ 作物即可获得高产, 施氮过高或过低都有减产的风险。相对于只施肥处理, 秸秆还田配施氮肥使小麦季平均产量增幅达到 25.43%, 玉米平均产量增幅达

4.4%, 且增产效果随种植年限的推移而加强。本研究得出 S0.5F0.8 和 S1F0.8 处理增产效果最佳, 但增幅高于以往研究^[44-45], 作物品种、秸秆还田方式、种植年限和耕作措施等不同可能是造成差异的重要原因。综合分析可知, 秸秆还田配施合理氮肥能有效增加作物产量, 减少资源浪费。

4 结论

麦玉复种体系中, 不施肥情况下, 秸秆还田能增加土壤无机氮含量和氨排放; 随着施肥量增加, 土壤耕层无机氮和氨排放显著增加; 与只施肥相比, 秸秆还田配施氮肥显著减少麦玉复种体系土壤无机氮含量、氨排放和氨损失率。秸秆还田配施氮肥显著提高作物产量, 但半量还田和全量还田之间、减量施氮和常规施氮之间均无显著性差异。在本试验中, 麦玉复种系统半量或全量秸秆还田配合减量施肥是减排增产的最优组合, 建议在陕西关中地区推广使用。

参考文献 References

- [1] HARRISON R, WEBB J. A review of the effect of N fertilizer type on gaseous emissions[J]. *Advances in Agronomy*, 2001, 73: 65-108
- [2] GU B J, SUTTON M A, CHANG S X, et al. Agricultural ammonia emissions contribute to China's urban air pollution[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2014, 12(5): 265-266
- [3] WANG G, ZHANG R, GOMEZ M E, et al. Persistent sulfate formation from London Fog to Chinese haze[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(48): 13630-13635
- [4] 邓明君, 罗文兵. 中国农业氨排放的时空演变趋势与减排潜力分析[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(9): 1257-1268
- [5] DENG M J, LUO W B. Space-time evolution of China's agricultural ammonia emission and emission reduction potential[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(9): 1257-1268
- [6] PINDER R W, ADAMS P J, PANDIS S N. Ammonia emission controls as a cost-effective strategy for reducing atmospheric particulate matter in the Eastern United States[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(2): 380-386
- [7] DERWENT R, WITHAM C, REDINGTON A, et al. Particulate matter at a rural location in southern England during 2006: Model sensitivities to precursor emissions[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(3): 689-696
- [8] BESSAGNET B, BEAUCHAMP M, GUERREIRO C, et al. Can further mitigation of ammonia emissions reduce exceedances of particulate matter air quality standards?[J]. *Environmental Science & Policy*, 2014, 44: 149-163
- [9] 董宇, 马晶, 张涛, 等. 秸秆利用途径的分析比较[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(19): 327-332
- [10] DONG Y, MA J, ZHANG T, et al. Analysis and comparison

- of straw utilization[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(19): 327–332
- [9] 马晓轩, 蔡红珍, 付鹏, 等. 中国农业固体废弃物秸秆的资源化处置途径分析[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 168–174
MA X X, CAI H Z, FU P, et al. Analysis of the reutilization methods for agricultural waste of straw in China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(1): 168–174
- [10] PETERSEN V, MARKFOGED R, HAFNER S, et al. A new slurry pH model accounting for effects of ammonia and carbon dioxide volatilization on solution speciation[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2014, 100(2): 189–204
- [11] 董文旭, 吴电明, 胡春胜, 等. 华北山前平原农田氮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
- [12] 汪军, 王德建, 张刚, 等. 麦秸全量还田下太湖地区两种典型水稻土稻季氮挥发特性比较[J]. 环境科学, 2013, 34(1): 27–33
WANG J, WANG D J, ZHANG G, et al. Comparing the ammonia volatilization characteristic of two typical paddy soil with total wheat straw returning in Taihu Lake region[J]. Environmental Science, 2013, 34(1): 27–33
- [13] PELSTER D E, WATT D, STRACHAN I B, et al. Effects of initial soil moisture, clod size, and clay content on ammonia volatilization after subsurface band application of urea[J]. Journal of Environmental Quality, 2019, 48(3): 549–558
- [14] FAN X H, LI Y C, ALVA A K. Effects of temperature and soil type on ammonia volatilization from slow-release nitrogen fertilizers[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2011, 42(10): 1111–1122
- [15] 上官宇先, 师日鹏, 李娜, 等. 垄作覆膜条件下田间氮挥发及影响因素[J]. 环境科学, 2012, 33(6): 1987–1993
SHANGGUAN Y X, SHI R P, LI N, et al. Factors influencing ammonia volatilization in a winter wheat field with plastic film mulched ridges and unmulched furrows[J]. Environmental Science, 2012, 33(6): 1987–1993
- [16] 李祯, 史海滨, 李仙岳, 等. 不同水氮运筹模式对田间土壤氮挥发及春玉米籽粒产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(4): 799–807
LI Z, SHI H B, LI X Y, et al. Ammonia volatilization in soil and grain yield of the spring maize under different water-nitrogen management regimes[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(4): 799–807
- [17] 雷杨莉, 王林权, 薛亮, 等. 交替灌溉施肥对夏玉米土壤氮挥发的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 41–46
LEI Y L, WANG L Q, XUE L, et al. Effect of alternative irrigation and fertilization on soil ammonia volatilization of summer maize[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(4): 41–46
- [18] ZHANG Y Y, LIU J F, MU Y J, et al. Emissions of nitrous oxide, nitrogen oxides and ammonia from a maize field in the North China Plain[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(17): 2956–2961
- [19] 王欢, 郑西来, 辛佳. 土壤氮挥发的影响因素及其与脲酶活性的关系研究[J]. 安徽农学通报, 2016, 22(9): 74–79
WANG H, ZHENG X L, XIN J. Influencing factors on ammonia volatilization and its relations with urease activity[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2016, 22(9): 74–79
- [20] 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
- [21] 李宗新, 王庆成, 刘开昌, 等. 不同施肥模式下夏玉米田间土壤氮挥发规律[J]. 生态学报, 2009, 29(1): 307–314
LI Z X, WANG Q C, LIU K C, et al. Law of field soil ammonia volatilization in summer maize under different fertilizer patterns[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 307–314
- [22] 胡春胜, 董文旭, 张玉铭, 等. 华北山前平原农田生态系统氮通量与调控[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 997–1003
HU C S, DONG W X, ZHANG Y M, et al. Nitrogen flux and its manipulation in the cropland ecosystem of the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(5): 997–1003
- [23] 徐聪. 华北平原长期氮肥施用和秸秆还田下温室气体排放及氮素损失特征[D]. 北京: 中国农业大学, 2018: 64–66
XU C. Characteristics of greenhouse gas emissions and nitrogen losses under long-term nitrogen fertilization and straw incorporation in the North China Plain[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018: 64–66
- [24] 杨弘. 秸秆还田对农田棕壤氮挥发和氧化亚氮排放的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016: 23–24
YANG H. Effect of maize stalk retention on nitrous oxide emission and ammonia volatilization in arable brown soil[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016: 23–24
- [25] 巨晓棠, 刘学军, 邹国元, 等. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析[J]. 中国农业科学, 2002, 35(12): 1493–1499
JU X T, LIU X J, ZOU G Y, et al. Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(12): 1493–1499
- [26] 山楠. 京郊小麦-玉米轮作体系氮素利用与损失研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2014: 22–23
SHAN N. Nitrogen utilization and loss in winter wheat-summer maize rotation system of Beijing suburb[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2014: 22–23
- [27] 曹欢欢. 旱地夏玉米—冬小麦轮作体系尿素氮挥发研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2018: 28–29
CAO H H. Ammonia volatilization of urea from summer maize-winter wheat rotation system in dryland[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2018: 28–29
- [28] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氮挥发的原位测定——通气法[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 205–209
WANG C H, LIU X J, JU X T, et al. Field *in situ* determina-

- tion of ammonia volatilization from soil: Venting method[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2): 205–209
- [29] 杨淑莉, 朱安宁, 张佳宝, 等. 不同施氮量和施氮方式下田间氨挥发损失及其影响因素[J]. *干旱区研究*, 2010, 27(3): 415–421
- YANG S L, ZHU A N, ZHANG J B, et al. Ammonia volatilization loss and its affecting factors under different amounts and ways of N application in field[J]. *Arid Zone Research*, 2010, 27(3): 415–421
- [30] DE RUIJTER F J, HUIJSMANS J F M, RUTGERS B. Ammonia volatilization from crop residues and frozen green manure crops[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(28): 3362–3368
- [31] 张亚丽, 张娟, 沈其荣, 等. 秸秆生物有机肥的施用对土壤供氮能力的影响[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(12): 1575–1578
- ZHANG Y L, ZHANG J, SHEN Q R, et al. Effect of combined application of bioorganic manure and inorganic nitrogen fertilizer on soil nitrogen supplying characteristics[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(12): 1575–1578
- [32] 刘兰清. 秸秆还田和氮肥对土壤理化性质及作物产量的影响研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2018: 26–27
- LIU L Q. A study of effects of straw mulching and nitrogen fertilizer on soil physicochemical properties and crop yield[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2018: 26–27
- [33] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 778–783
- ZHU Z L. Study on soil nitrogen in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 778–783
- [34] Muhammad W, Vaughan S M, Dalal R C, et al. Crop residues and fertilizer nitrogen influence residue decomposition and nitrous oxide emission from a Vertisol[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(1): 15–23
- [35] QIU S J, JU X T, LI L, et al. Nitrate transformation and N₂O emission in a typical intensively managed calcareous fluvaquent soil: A 15-nitrogen tracer incubation study[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2015, 46(14): 1763–1777
- [36] GILL J S, BIJAY-SINGH, KHIND C S, et al. Efficiency of N-(n-butyl) thiophosphoric triamide in retarding hydrolysis of urea and ammonia volatilization losses in a flooded sandy loam soil amended with organic materials[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, 53(3): 203–207
- [37] 张四海, 曹志平, 胡婵娟. 添加秸秆碳源对土壤微生物生物量和原生动物丰富度的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(6): 1283–1288
- ZHANG S H, CAO Z P, HU C J. Effect of added straw carbon on soil microbe and protozoa abundance[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(6): 1283–1288
- [38] HENRIKSEN T M, BRELAND T A. Carbon mineralization, fungal and bacterial growth, and enzyme activities as affected by contact between crop residues and soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(1): 41–48
- [39] 戴志刚, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 272–276
- DAI Z G, LU J W, LI X K, et al. Nutrient release characteristic of different crop straws manure[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(6): 272–276
- [40] 申丽霞, 王璞, 兰林旺, 等. 施氮对夏玉米碳氮代谢及穗粒形成的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(6): 1074–1079
- SHEN L X, WANG P, LAN L W, et al. Effect of nitrogen supply on carbon-nitrogen metabolism and kernel set in summer maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(6): 1074–1079
- [41] 林治安, 赵秉强, 袁亮, 等. 长期定位施肥对土壤养分与作物产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(8): 2809–2819
- LIN Z A, ZHAO B Q, YUAN L, et al. Effects of organic manure and fertilizers long-term located application on soil fertility and crop yield[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(8): 2809–2819
- [42] 程曼, 解文艳, 杨振兴, 等. 黄土旱塬长期秸秆还田对土壤养分、酶活性及玉米产量的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(10): 1528–1536
- CHENG M, XIE W Y, YANG Z X, et al. Effects of long-term straw return on corn yield, soil nutrient contents and enzyme activities in dryland of the Loess Plateau, China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(10): 1528–1536
- [43] 杨宪龙, 路永莉, 同延安, 等. 长期施氮和秸秆还田对小麦-玉米轮作体系土壤氮素平衡的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(1): 65–73
- YANG X L, LU Y L, TONG Y A, et al. Effects of long-term N application and straw returning on N budget under wheat-maize rotation system[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(1): 65–73
- [44] 于舜章, 陈雨海, 周勋波, 等. 冬小麦期覆盖秸秆对夏玉米土壤水分动态变化及产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 175–178
- YU S Z, CHEN Y H, ZHOU X B, et al. Effect of straw-mulch during wheat stage on soil water dynamic changes and yield of summer maize[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(6): 175–178
- [45] 杨晨璐, 刘兰清, 王维钰, 等. 麦玉复种体系下秸秆还田与施氮对作物水氮利用及产量的效应研究[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(9): 1664–1680
- YANG C L, LIU L Q, WANG W Y, et al. Effects of the application of straw returning and nitrogen fertilizer on crop yields, water and nitrogen utilization under wheat-maize multiple cropping system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(9): 1664–1680