

全孝飞, 颜晓元, 王书伟, 等. 长期施用有机物料对稻田生态系统服务功能的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1406–1415.

QUAN Xiao-fei, YAN Xiao-yuan, WANG Shu-wei, et al. Effects of long-term application of organic materials on the ecosystem services of paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7): 1406–1415.

长期施用有机物料对稻田生态系统服务功能的影响

全孝飞^{1,2}, 颜晓元^{1*}, 王书伟^{1,2}, 周伟^{1,2}

(1.中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:基于长期定位试验,测定稻田温室气体排放通量、土壤和糙米重金属、淋溶水中氮磷含量,收集整理水稻产量和土壤肥力长期数据,以研究长期施用有机物料对稻田生态系统服务功能的影响。选择净经济效益(NEB)作为生态系统服务功能的评价指标。研究表明:与单施化肥(F)相比,长期施用猪粪(FM)显著提高土壤有机碳、全氮、全磷和有效磷含量,秸秆还田(FS)显著提高土壤有机碳和速效钾,提高了全氮、全磷、速效氮和全钾,但差异不显著,说明长期施用有机物料可提高土壤肥力;FM和FS提高水稻平均产量分别达4.1%和4.3%;FS和FM显著增加CH₄累积排放量,减少N₂O排放,但差异不显著;FM和FS提高土壤有机碳固存率。与F和FS相比,FM降低了淋溶水中氮淋溶量,但显著增加了田面水磷含量和20 cm深淋溶水磷淋溶量,而对60 cm和80 cm深淋溶水磷淋溶量没有影响;FM显著提高土壤Zn、Cu和Cd含量,所有处理重金属含量均没有超过土壤环境质量二级标准,FM没有引起水稻糙米中重金属含量的累积。与F相比,FM增加NEB 5.2%,达到1 056.8元·hm⁻²。上述结果表明,20年尺度下,施用猪粪对稻田生态系统服务功能的正面影响远大于其所带来的负面影响,但随着猪粪施用时间的延长其负面效应可能进一步扩大,应引起重视。

关键词:有机物料;稻田;生态系统服务;净经济效益(NEB)

中图分类号:X592 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)07-1406-10 doi:10.11654/jaes.2017-0401

Effects of long-term application of organic materials on the ecosystem services of paddy fields

QUAN Xiao-fei^{1,2}, YAN Xiao-yuan^{1*}, WANG Shu-wei^{1,2}, ZHOU Wei^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: There are many individual studies on the effects of long-term application of organic materials on ecosystem services of paddy fields in terms of grain yield, greenhouse gas emissions, heavy metals, and nitrogen and phosphorus leaching, but few have comprehensively monitored or assessed the effects with a comprehensive index. We examined greenhouse gas emissions, heavy metal accumulation in soil, nitrogen and phosphorus leaching, rice yield, and soil fertility data from a 20-year (1997–2016) experiment to explore the effects of three different treatments, namely chemical fertilizer application (F), pig manure plus chemical fertilizer application (FM) and straw plus chemical fertilizer application (FS), on the ecosystem services of paddy fields. The net economic benefit (NEB) was chosen as a key index for evaluating ecosystem services. Compared to F, FM significantly ($P < 0.05$) increased the contents of soil organic carbon (SOC), total N, total P, and available P. FS significantly ($P < 0.05$) increased the contents of SOC and available K. In addition, FS and FM consistently increased rice yield by 4%. FS and FM increased CH₄ emission and annual SOC sequestration rate and decreased N₂O emission. Moreover, compared to F

收稿日期:2017-03-20

作者简介:全孝飞(1991—),男,四川达州人,硕士研究生,主要研究方向为碳氮循环与全球变化。E-mail:quanxiaofei@issas.ac.cn

*通信作者:颜晓元 E-mail:yanxy@issas.ac.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41571130062)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41571130062)

and FS, FM decreased the N load in percolating water and significantly increased the P concentration in surface water and P load in percolating water at 20 cm depth, while water at 60 cm and 80 cm was not affected. FM also significantly ($P < 0.05$) increased the contents of zinc, copper, and cadmium in soil, but all of the heavy metals did not exceed the Soil Environmental Quality Standard II. FM did not cause the accumulation of heavy metals in brown rice, indicating that the contents of the heavy metals in brown rice were within safe limits. Compared to F, FM increased the NEB by about 5.2% (1 056.8 yuan \cdot hm⁻²). Taken together, our results suggest that the positive effects of pig manure on ecosystem services of paddy fields outnumbered its negative effects at a timescale of 20 years.

Keywords: organic materials; paddy field; ecosystem services; net economic benefit(NEB)

城郊关键带是一类具有城市和农村双重特性的特殊关键带^[1]。由于区内畜禽养殖业发达,每年产生的大量畜禽粪便得不到有效处理,严重影响水体和空气质量;种植业产生的大量秸秆也得不到妥善处理,秸秆焚烧造成空气质量的恶化;同时以长期大量施用化肥为种植模式的农业生态系统导致城郊区土壤生态系统服务功能受到严重破坏^[2],因而用畜禽粪便替代部分化肥和秸秆还田等技术越来越受到重视。大量研究表明,畜禽粪便有机质含量高、养分全面、肥效长。一方面,能增加土壤有机碳库,改良土壤,提高土壤肥力,从而促进作物生长,提高作物产量和品质^[3-4];另一方面,可能会引起 CH₄ 等温室气体排放增加和地下水氮磷污染^[5-6]。另外,由于畜禽粪便中含有大量重金属元素,施入土壤后可能导致土壤和作物重金属的累积^[7]。单施化肥有可能造成土壤有机质的耗竭,秸秆可以作为碳源施入土壤,以补充土壤有机质,提高土壤肥力^[6]。

现有研究表明,大部分长期定位试验中,施用有机肥后土壤重金属含量出现不同程度的累积^[7],而在短期试验中,施用两年有机肥并没有引起土壤中重金属的累积^[8]。王美等^[7]分析现有文献资料得出,长期试验中由于土壤重金属的累积,导致作物可食部位 Cu、Zn、Pb 含量比对照分别增加 0.03~1.8、0.02~11.8、0.01~0.31 mg \cdot kg⁻¹;而在短期试验中,作物可食部分重金属含量相比对照有增有减。有机肥对产量的影响也有类似的现象^[8-9]。这表明长期试验比短期试验更能真实地反映施用有机肥对作物产量、土壤重金属累积和作物可食部位重金属含量的影响,其数据更具有说服力。

因此,我们需要综合评价长期施用猪粪对生态系统服务功能的影响。农田生态系统服务功能是指农田生态系统与生态过程所形成及维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用,其可归纳为生产功能(主要为提供农产品)、生态功能(调节温室气体、维持土壤肥力、土壤固碳、污染物控制、涵养水分、保持土壤、净化水质等)和生活功能(休闲娱乐与旅游观光)^[10]。

然而,在我国城郊关键带的水稻栽培区,施用有机物料对产量、有机碳固定、土壤肥力、土壤和作物重金属含量、温室气体排放及淋溶水氮磷污染等方面的影响缺乏全面的监测——特别是缺乏长期试验监测数据,同时,施用有机物料会产生正负两方面的影响,但没有指标对各方面结果进行统一评估,使得处理之间结果没有可比性,阐释不清楚阐释不清楚长期施用有机物料对生态系统服务功能产生怎样的影响。本研究以始于 1997 年有机肥长期定位试验为载体,通过全面监测土壤和作物重金属含量、温室气体排放通量和淋溶水氮磷浓度,收集整理水稻产量、土壤有机碳和土壤氮磷钾含量等数据,用净经济效益指标评价长期施用有机物料对稻田生态系统服务生产功能和主要生态功能的影响(对基本不会因为本试验处理不同而改变的其他服务功能,如涵养水分、保持土壤等生态功能和生活功能,本试验设定各处理一样),以期对相关评估提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区域概况

试验于 2016 年在中国科学院常熟农业生态试验站(31°32'45"N,120°41'57"E)排水采集器长期定位实验田进行。该站地处长江三角洲腹地——太湖流域,该区域为典型的城郊关键带区,属亚热带湿润气候,年平均降雨量 1038 mm,年平均气温 17.8 °C,年日照 1745 h,无霜期 242 d。站区海拔 3.2 m,地下水埋深 80 cm 左右。稻-麦轮作是其主要种植制度。供试土壤为湖积物发育而成的潜育型水稻土。表层 0~20 cm 土壤的基本理化性质(1997 年测定)如下:有机碳 10.5 g \cdot kg⁻¹,全氮 1.1 g \cdot kg⁻¹,速效氮 19.4 mg \cdot kg⁻¹,全磷 0.54 g \cdot kg⁻¹,有效磷 6.5 mg \cdot kg⁻¹,全钾 19.3 g \cdot kg⁻¹,速效钾 91.7 mg \cdot kg⁻¹。

1.2 试验设计及处理

该试验田始建于 1997 年,三个施肥处理分别为(1)常规施肥(F),稻季施 N 300 kg \cdot hm⁻²,P₂O₅ 48 kg \cdot hm⁻²,K₂O 120 kg \cdot hm⁻²,麦季施 N 230 kg \cdot hm⁻²,P₂O₅ 77

kg·hm⁻², K₂O 90 kg·hm⁻²; (2) 常规施肥加秸秆还田 (FS), 施肥与 F 相同, 每季增加秸秆还田量 4.5 t·hm⁻²; (3) 猪粪等氮替代部分氮肥 (FM), 稻季施 N 230 kg·hm⁻², P₂O₅ 36 kg·hm⁻², K₂O 90 kg·hm⁻², 麦季施 N 160 kg·hm⁻², P₂O₅ 51 kg·hm⁻², K₂O 60 kg·hm⁻², 每季增加猪粪施用量为 15 t·hm⁻²。有机肥用量均为鲜重, 猪粪鲜样含水率为 81.2%, 猪粪重金属及营养元素含量见表 1。该施肥方案从 1997 年开始实施。磷肥、秸秆和猪粪全作基肥一次施入; 氮肥分 3 次施入, 基肥、分蘖肥和穗肥比例为 4:2:4; 钾肥分两次施入, 基肥和穗肥比例为 1:1。各处理 3 次重复, 随机排列, 共 9 个小区, 每个小区面积为 2 m×2 m=4 m²。每个小区等间距插秧 100 穴, 试验小区之间用水泥埂隔开, 并高出田面 20 cm 以减少侧渗和串流, 灌溉水为自来水, 除试验设计要求外, 田间管理与试验站其他大田一致。供试水稻品种为南粳 46 号, 水稻于 2016 年 6 月 19 日移栽, 11 月 3 日收获, 3 次施肥时间分别为 6 月 19 日、7 月 2 日和 8 月 9 日。基肥撒施田面后耙地, 使之与表土混合, 两次追肥均为撒施。

1.3 样品采集与测定方法

1.3.1 气样采集与分析

采用静态暗箱-色谱法连续观测稻田 CH₄ 和 N₂O 排放通量。采气箱底座(横截面积 50 cm×50 cm)长期埋于田间, 底座内插有 4 穴水稻植株, 槽密封。采气箱为 PVC 材料, 箱体表面贴有海绵和铝箔以防止箱内温度变化过大, 箱顶插入温度计; 采气箱连接槽采样时需加水密封连接。为适应水稻生长, 采气箱分为两种尺寸(50 cm×50 cm×50 cm 和 50 cm×50 cm×100 cm)。采样时间为上午 8:00—11:00, 扣箱后立刻用 20 mL 注射器采集第一个样品, 以后每隔 10 min 采 1 次, 共采样 4 次, 采样结束立即带回实验室进行测定分析。采样频率为每周 1~2 次, 施肥和烤田期加密采样。气体样品用 Agilent 7890A 气相色谱仪分析, CH₄ 使用电子捕获 (FID) 检测器测定, N₂O 使用氢火焰离子化 (ECD) 检测器测定。检测器和柱箱温度分别为 300 °C 和 40 °C, 载气为高纯氮气, 流速 40 mL·min⁻¹。所有样

品 2 d 内测完。

1.3.2 水样总氮、总磷测定

在采集气体样品的同时, 用塑料瓶采集田面水(0 cm)和 20、60、80 cm 土层渗漏水各 100 mL, 共采样 31 次。渗漏水通过排水采集器采集, 在每个小区的 20、60 cm 和 80 cm 土层分别装有一个渗漏水采集盒(10 cm×15 cm×10 cm), 用不锈钢管(内径 1 cm)连接导出, 其末端接上医用输液管(内径 0.4 cm)以便采样。每次采样时, 应放干渗漏水采集盒里面残留的水。具体采集方法参考文献 [11]。样品带回实验室过 0.45 μm 滤膜, 用碱性过硫酸钾消解后, 用全自动间断化学分析仪 (Smartchem 140, WESTCO, 法国) 测定水样总氮和总磷, 所有样品放入 4 °C 冰箱保存并在一周内测完。

1.3.3 土壤、猪粪和糙米重金属测定

土壤中全量重金属 (Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Ni、As) 采用 HF-HNO₃-HCl 微波消解法, 猪粪和糙米中全量重金属采用 HNO₃-HClO₄-HCl 三酸消煮法, 消煮液用 ICP-OES 测定。猪粪全碳、全氮及重金属含量如表 1 所示。

1.3.4 水稻产量及土壤肥力测定

水稻收获时田间实际测产, 各小区于每年晚稻收获后, 按“S”形取样法取 5 个点, 取 0~20 cm 土层混合样, 自然风干后过 20 目筛, 用于土壤肥力测定。土壤肥力数据(有机质、全氮、速效氮、全磷、速效磷、全钾和速效钾等)由中国科学院南京土壤研究所分析中心检测, 同时收集 1997 年以来该试验田水稻产量数据(由中国科学院常熟农业生态试验站提供)。

1.4 数据处理

1.4.1 气体排放通量

温室气体排放通量计算公式如下:

$$F = \rho \times h \times \frac{dc}{dt} \times \frac{273}{273+T} \quad (1)$$

式中: F 为 CH₄ 或 N₂O 排放通量, mg·m⁻²·h⁻¹; ρ 为标准状态下 CH₄ 或 N₂O-N 密度, 其值分别为 0.714 kg·m⁻³ (CH₄) 和 1.25 kg·m⁻³ (N₂O-N); h 为采样箱高度, m; dc/dt

表 1 猪粪重金属及养分含量

Table 1 Contents of heavy metals and nutrients of pig manure

有机肥	全砷/mg·kg ⁻¹	全镉/mg·kg ⁻¹	全铬/mg·kg ⁻¹	全铜/mg·kg ⁻¹	全镍/mg·kg ⁻¹	全铅/mg·kg ⁻¹	全锌/mg·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	全磷/g·kg ⁻¹	全碳/g·kg ⁻¹
猪粪	6.1	0.8	14.8	362.2	5.4	6.3	954.5	24.3	5.8	365.1

注: 猪粪样品为 2016 年施用, 重金属及养分含量均为风干后含量。

Note: The pig manure were sampled in 2016. Contents of heavy metals and nutrient were based on oven-dry samples at 65 °C.

dt 为单位时间内 CH_4 或 N_2O 的浓度变化率, $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$;
 T 为采样箱内的平均温度, $^\circ\text{C}$ 。

1.4.2 气体累积排放量

温室气体累积排放量计算公式如下:

$$A = \sum_{i=1}^n (d_{i+1} - d_i) \times 24 \times \frac{F_{i+1} + F_i}{2} \quad (2)$$

式中: A 为 CH_4 或 N_2O 累积排放量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; F_i 为第 i 次采样 CH_4 或 $\text{N}_2\text{O}-\text{N}$ 排放通量, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; $d_{i+1}-d_i$ 为两次采样测定时间间隔, d 。

1.4.3 土壤有机碳固定

土壤有机碳(SOC)含量是用土壤有机质含量除以换算系数 1.724 所得,土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定。土壤有机碳密度(SOCD, $\text{kg C}\cdot\text{hm}^{-2}$)及有机碳固定速率(SOCSR, $\text{kg C}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)计算公式^[12]如下:

$$\text{SOCD} = \text{SOC} \times \rho \times H \times 100 \quad (3)$$

$$\text{SOCSR} = \frac{\text{SOCD}_{2016} - \text{SOCD}_{1997}}{t} \quad (4)$$

式中: SOC 为土壤耕作层(0~20 cm)有机碳含量, $\text{g C}\cdot\text{kg}^{-1}$; ρ 为土壤容重($1.13 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$); H 为耕作层深度(20 cm); SOCD_{2016} 和 SOCD_{2017} 分别代表试验最终和最初的 SOCD; t 为试验时间(20 a)。

1.4.4 净全球增温潜势

CH_4 或 N_2O 在 100 a 尺度的综合增温效应采用 IPCC 推荐的综合增温潜势计算,全球增温潜势(GWP, $\text{kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)和净全球增温潜势(NGWP, $\text{kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)计算公式^[13]如下:

$$\text{GWP} = A_{\text{CH}_4} \times 25 + A_{\text{N}_2\text{O}} \times 298 \times \frac{44}{28} \quad (5)$$

$$\text{NGWP} = \text{GWP} - \text{SOCSR} \times \frac{44}{12} \quad (6)$$

式中: A_{CH_4} 和 $A_{\text{N}_2\text{O}}$ 分别代表 CH_4 和 N_2O 累积排放量; 25 和 298 分别代表 CH_4 和 N_2O 在 100 a 尺度上相对 CO_2 的增温潜势的倍数; 公式(5)中 44 和 28 分别代表 N_2O 和 N 的摩尔质量, $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$; 公式(6)中 44 和 12 分别代表 CO_2 和 C 的摩尔质量, $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

1.4.5 净经济效益

FM 和 F 处理的净经济效益(NEB, $\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$), 计算公式^[14]如下:

$$\text{NEB} = Y \times P_r - \sum_{i=1}^3 (R_i \times P_i) - \text{NGWP} \times P_d - P_f - (L_N \times s + L_P \times t) \times P_m \quad (7)$$

式中: Y 为水稻产量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; P_r 为水稻市场价格, 近几年常熟水稻价格 $2.7 \text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$; R_i 为化肥 i (以 N、 P_2O_5 、 K_2O 计)施用量, P_i 为化肥 i (以 N、 P_2O_5 、 K_2O 计)价格, 分别为 4.8 、 5.8 、 $5.3 \text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$; P_d 为碳交易价格, $0.15 \text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ CO}_2\text{-eq}$ ^[14]; P_f 为多出的施肥成本, 本试验只有施猪粪处理有该成本, 取 $560 \text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$ (一次化肥施肥为 $375 \text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$, 猪粪会需要更多劳动力, 合理扩展 1.5 倍即为施猪粪成本)^[15]; 公式最后一部分代表治理富营养化成本, L_N 、 L_P ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 分别为 80 cm 深淋溶水总氮和总磷淋溶量 (详细计算方法参考文献 [16]), 本试验淋溶速度取 $5 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[17]; s 和 t 为 L_N 和 L_P 转化成等当量 PO_4 的系数, 分别为 0.42 和 3.06; P_m 为治理 PO_4 价格, $4.26 \text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ PO}_4\text{-eq}$ ^[13]。

1.5 数据处理

本文试验数据均用 Excel 2010 进行统计, Origin 9.0 作图, SPSS 19.0 进行方差分析和 T 检验, 用 Duncan 法检验各处理之间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 长期施用有机物料对土壤肥力的影响

表 2 为各处理连续施肥 20 年后土壤养分含量状况。该表表明, 与 F 相比, FM 处理显著提高土壤有机碳、全氮、全磷和有效磷含量, 各养分含量分别提高了 39.3%、33.5%、197.5% 和 320.6%, 亦提高了速效氮含量, 但差异不显著, 对全钾和速效钾没有影响; 与 F 相比, FS 处理显著提高了有机碳和速效钾含量, 分别为 18.2% 和 18.7%, 全氮、全磷、速效氮和全钾各养分含量分别提高了 13.9%、7.1%、22.9% 和 5.8%, 但差异不

表 2 长期施用有机物料对土壤肥力的影响

Table 2 Effect of long-term application of organic materials on soil fertility

处理	有机碳/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全钾/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
FM	18.2±1.2A	2.2±0.1aA	1.74±0.04A	15.8±0.8a	213.7±0.7a	115.4±9.4A	113.5±16.2ab
F	13.0±0.5C	1.6±0.1cB	0.59±0.05B	16.5±0.4a	174.3±35.8a	27.4±10.5B	109.4±3.6b
FS	15.4±0.1B	1.8±0.1bB	0.63±0.26B	17.4±0.7a	214.2±16.7a	20.4±4.4B	129.9±4.3a

注: 同列数据后不同的小写和大写字母分别代表处理间差异达 5% 和 1% 显著水平。下同

Note: Data in same column followed by different lowercase and capital letters mean significant difference at the 5% and 1% level, respectively. The same below.

显著,对有效磷没有影响。这说明长期施用有机物料能提高土壤肥力。

2.2 长期施用有机物料对水稻产量的影响

图1表明,各处理水稻产量年际间变化较大,但随试验时间所呈现的变化趋势一致。与F处理相比,FM和FS处理均提高水稻产量,但各处理在统计上没

有显著差异,20年平均增产分别达到4.1%和4.3%,F、FM、FS处理产量分别为8529.5、8882.2和8894.8 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。说明长期施用有机物料可以使水稻增产。

2.3 长期施用有机物料对温室气体排放和净全球增温潜力的影响

对 CH_4 排放特征分析得出,各处理排放通量季节

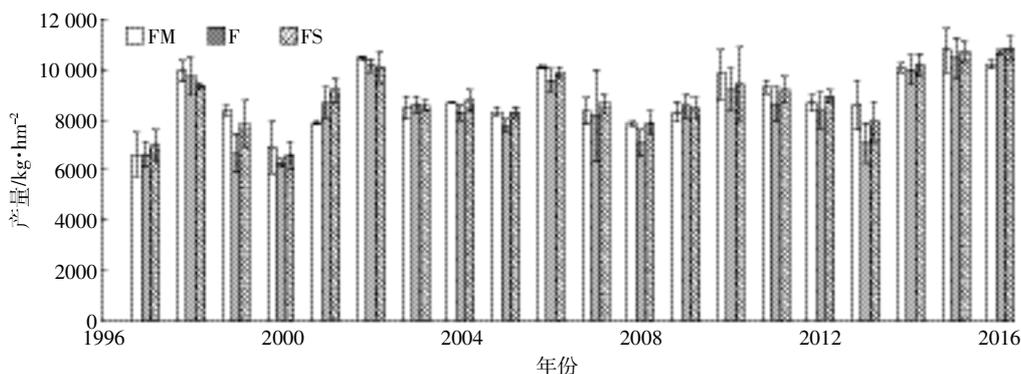
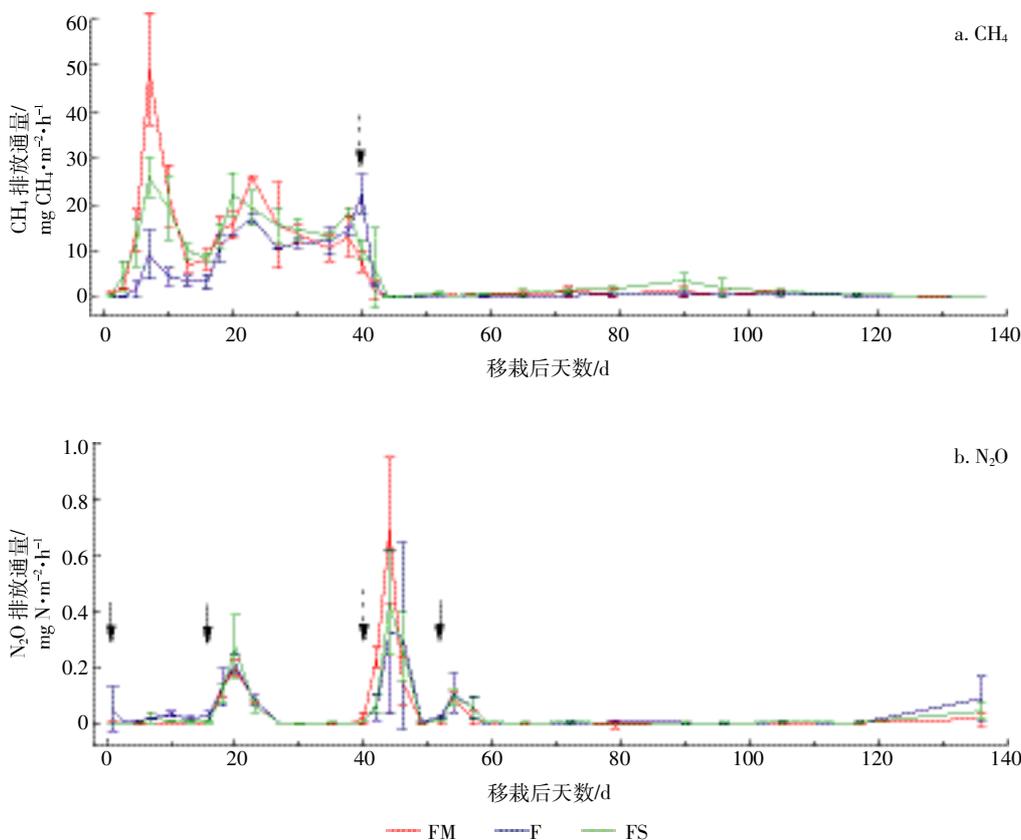


图1 长期施用有机物料对水稻产量的影响

Figure 1 Effect of long-term application of organic materials on grain yield



实线箭头代表施肥,虚线箭头代表中期烤田,温室气体排放为2016年数据

The solid arrows indicate when the N fertilizer was applied, the dashed arrows indicate the time of mid-season drainage, greenhouse gas emission data for 2016

图2 长期施用有机物料对稻田 CH_4 和 N_2O 排放通量的影响

Figure 2 Effect of long-term application of organic materials on CH_4 and N_2O fluxes

变化趋势一致(图 2a)。CH₄ 季平均排放通量大小顺序为 FS>FM>F,其值依次为 5.2、5.0、3.1 mg·m⁻²·h⁻¹。与 F 处理相比,FM 和 FS 处理显著增加了稻田 CH₄ 累积排放量(表 3),大小顺序为 FS>FM>F,其值依次为 169.6、163.4、102.6 kg·hm⁻²。CH₄ 排放主要集中在烤田前期,烤田结束重新灌水后,CH₄ 排放也没有恢复到烤田前水平。

图 2b 为稻田 N₂O 排放通量变化特征。由图可知,各处理排放季节变化趋势一致,N₂O 平均排放通量大小为 F>FS>FM,其值依次为 32.1、28.0、27.4 μg·m⁻²·h⁻¹。与 F 处理相比,FS 和 FM 处理均减少了 N₂O 累积排放量(表 3),但各处理之间差异不显著,大小顺序为 F>FS>FM,其值依次为 1.05、0.92、0.89 kg N₂O-N·hm⁻²。

表 3 表明,与 F 处理相比,FM 和 FS 显著提高了全球增温潜势,F、FM 和 FS 处理分别为 3 056.8、4 503.4 和 4 669.6 kg CO₂-eq·hm⁻²·a⁻¹。秦晓波等^[6]在湖南望城长期定位试验点也得到相同的结果。然而,与 F 处理相比,FM 和 FS 处理显著增加了有机碳固定速率(表 3);与 FS 相比,FM 显著提高了土壤有机碳固定速率,说明施用有机物料比单施化肥更快地增加土壤有机碳库。

由公式(6)计算 FM、F 和 FS 处理的净全球增温潜势分别为 1 320.7、1 994.2 和 2 626.4 kg CO₂-eq·hm⁻²·a⁻¹,均为正值,即从土壤输出 CO₂-eq 到大气中,表现为温室气体的源。与 FM 处理相比,FS 处理显著提高了净全球增温潜势,各处理该值大小顺序为 FM<F<FS,表明施猪粪处理对全球温室效应的贡献最小。

2.4 长期施用有机物料对土壤和糙米重金属含量的影响

图 3a 表明,在试验 20 年后,与 F 相比,FM 处理显著增加耕层土壤 Zn、Cu 和 Cd 含量,含量分别增加了 55.4%、61.1%和 48.5%;与 FS 相比,FM 处理也显著增加土壤 Zn、Cu 和 Cd 含量,含量分别增加了 43.6%、58.9%和 71.4%;施用猪粪对 As、Cr、Ni 和 Pb 含量则没有影响。所有处理重金属含量均没有超过国

家《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)二级限值。虽然 FM 处理中土壤 Zn、Cu 和 Cd 含量较高,但是并没有引起水稻糙米中重金属含量的累积,各处理间重金属含量没有差异(图 3b),也没有超过《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 27673—2012)中糙米重金属含量标准允许范围。

2.5 长期施用有机物料对氮、磷淋溶的影响

表 4 结果显示,与 F 和 FS 处理相比,长期施用猪粪能显著降低 20、60 cm 和 80 cm 深土壤全氮淋溶量,降低表层田面水中全氮含量,但处理间差异不显著。这表明长期施用猪粪减少氮的淋溶损失,从而降低了氮污染风险。长期施用猪粪显著增加了田面水磷含量和 20 cm 深淋溶水磷淋溶量,而对 60 cm 和 80 cm 深淋溶水全磷淋溶量没有影响。这表明长期施用猪粪增加了田面水和浅层淋溶水磷污染风险,而对深层淋溶水磷淋溶污染没有影响。

2.6 长期施用有机物料对净经济效益的影响

表 5 结果表明,由公式(7)计算得出 FM 和 F 处理每公顷净经济效益分别为 21 422.5 元和 20 365.7 元。通过 T 检验表明,FM 和 F 处理之间的产量效益、净全球增温潜势成本、富营养化成本和净经济效益都没有显著差异。与 F 处理相比,FM 处理产量收益增加 952 元·hm⁻²,肥料成本减少 564.6 元·hm⁻²,净全球增温潜势成本减少 101 元·hm⁻²,富营养化成本减少 1.5 元·hm⁻²,但增加了一次施猪粪的成本 560 元·hm⁻²,从而使净经济效益增加 5.2%,达到 1 056.8 元·hm⁻²。以上结果表明,农田长期施用猪粪可减少城郊关键带畜禽粪便污染,减少化肥施用,增加产量,减小净全球增温潜势,且不增加 60 cm 和 80 cm 深淋溶水氮磷污染风险,最后实现净经济效益的增加。

3 讨论

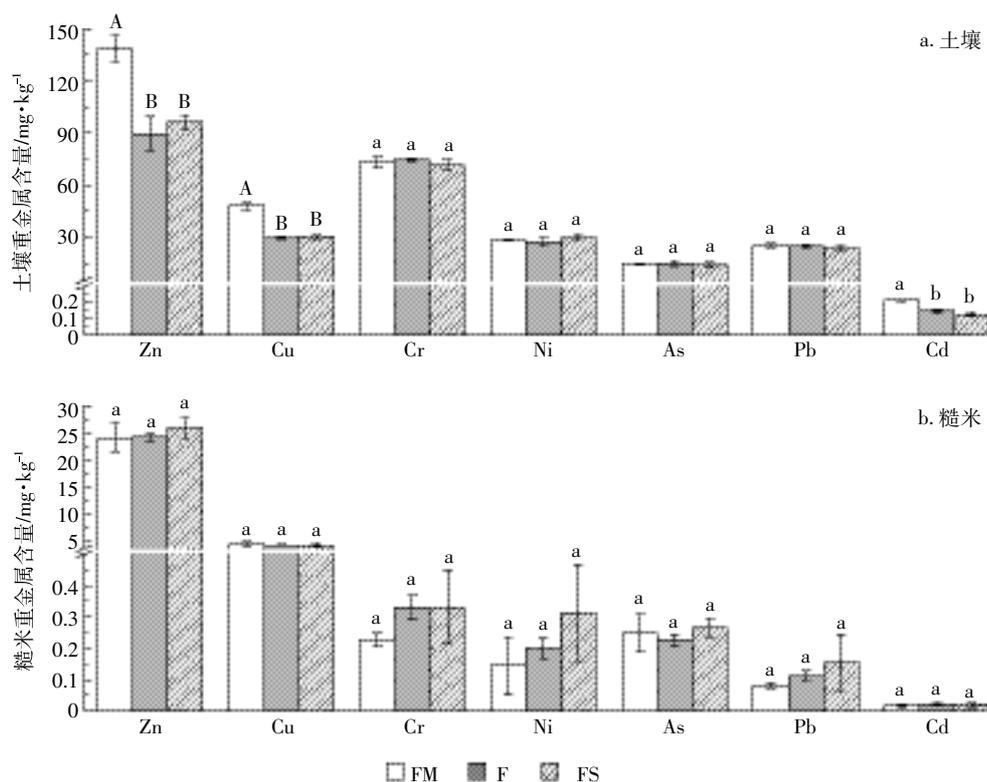
3.1 长期施用有机物料对土壤肥力和产量的影响

很多研究表明,与施用化肥相比,猪粪等有机肥与化肥配施可以显著提高土壤有机碳含量和氮磷钾含量^[8-9]。这是因为猪粪含有大量的有机质和氮磷钾元

表 3 长期施用有机物料对净全球增温潜势的影响

Table 3 Effect of long-term application of organic materials on net global warming potential

处理	CH ₄ 累积排放量/ kg·hm ⁻²	N ₂ O-N 累积排放量/ kg·hm ⁻²	全球增温潜势/ kg CO ₂ -eq·hm ⁻² ·a ⁻¹	土壤有机碳/ g·kg ⁻¹	有机碳固定速率/ kg C·hm ⁻² ·a ⁻¹	净全球增温潜势/ kg CO ₂ -eq·hm ⁻² ·a ⁻¹
FM	163.4±18.2A	0.89±0.16a	4 503.4±530.2aAB	18.2±1.2A	868.0±135.9A	1 320.7±32.1b
F	102.6±9.3B	1.05±0.49a	3 056.8±369.6bB	13.0±0.5C	289.8±53.4C	1 994.2±53.4ab
FS	169.6±16.8A	0.92±0.16a	4 669.6±429.9aA	15.4±0.1B	557.2±11.3B	2 626.4±11.3a



不同小写和大写字母分别代表同一重金属含量在各处理间差异达 5% 和 1% 显著水平

Different lowercase and capital letters indicate significant difference at the content of same heavy metal at the 5% and 1% level, respectively

图 3 长期施用有机物料对土壤和糙米重金属含量的影响

Figure 3 Effect of long-term application of organic materials on the contents of soil and brown rice heavy metals such as Zn, Cu, Cd, Cr, As, Pb and Ni

表 4 长期施用有机物料对氮、磷淋溶的影响

Table 4 Effect of long-term application of organic materials on nitrogen, phosphorus leaching

处理	0 cm N、P 浓度/mg·L ⁻¹		20 cm 淋溶量/kg·hm ⁻²		60 cm 淋溶量/kg·hm ⁻²		80 cm 淋溶量/kg·hm ⁻²	
	N	P	N	P	N	P	N	P
FM	7.56±11.5a	0.68±0.58A	3.97±0.39b	0.94±0.08A	2.85±0.53b	0.44±0.05a	1.95±0.11b	0.42±0.01a
F	10.5±14.7a	0.11±0.12B	5.72±0.40a	0.40±0.15B	4.40±0.47a	0.43±0.10a	3.55±0.32a	0.32±0.05a
FS	9.61±13.4a	0.12±0.13B	6.27±0.83a	0.35±0.06B	4.28±0.82a	0.39±0.05a	3.74±0.36a	0.37±0.08a

注:田面水 N 和 P 含量为 31 次采样平均值;淋溶水中 N 和 P 淋溶量计算方法见参考文献[16]。

Note: The contents of N and P in surface water are the mean value of 31 times sampling; The calculation method of N and P loads in percolation water can be found in 16th reference.

表 5 长期施用有机物料对净经济效益的影响(元·hm⁻²)

Table 5 Effect of long-term application of organic materials on net economic benefit(yuan·hm⁻²)

处理	产量效益	肥料成本	施猪粪成本	净全球增温潜势成本	富营养化成本	净经济效益
FM	23 981.9±247.9	1 789.8	560	198.1±4.8	9.0±0.1	21 422.5±252.9
F	23 029.7±602.1	2 354.4	0	299.1±76.8	10.5±1.3	20 365.7±671.6

素,与单施化肥相比,有机无机配施输入了更多的外源碳和氮磷钾,促进了土壤有机碳和氮磷钾的累积^[13]。作物的产量与土壤养分的供应过程密切相关,有机无

机配施能改善土壤养分供应过程,使土壤养分平稳释放。与单施化肥相比,有机无机配施能显著提高土壤的有机碳和氮磷钾养分含量,从而提高作物产量^[9]。本

试验中,与F相比,FM没有增加土壤中全钾含量,这可能是因为FM比F每年少施钾肥(K_2O 计)60 kg·hm⁻²,猪粪中含有的钾只能弥补少施的钾肥,并无多余的钾积累。

2016年FM、F和FS处理的有机碳含量比1997年的10.5 mg·kg⁻¹增加了73.4%、24.5%和47.1%。兰宇等^[18]在沈阳的长期定位试验也有类似现象,有机无机配施更有利于土壤有机碳的增加。当然,在长期施肥条件下,土壤对碳的固存并不会无限增加,而是存在一个最大的保持容量,即饱和水平,当土壤有机碳达到饱和水平时,外源碳的增加将不再增加土壤碳库。

值得注意的是,FM处理有效磷含量从1997年的6.5 mg·kg⁻¹,增加到2016年的115.4 mg·kg⁻¹,带来了很大的环境风险。从表4可知,与F和FS相比,FM处理显著增加田面水中磷含量,这表明,FM处理通过径流带走有效磷的风险增加,在以后的试验中应引起注意,猪粪的施用量需要调整。同时,FM、F和FS处理的速效氮含量从1997年的19.4 mg·kg⁻¹,分别增加到2016年的213.7、174.3 mg·kg⁻¹和214.2 mg·kg⁻¹,增加了通过径流带走速效氮进而污染环境的风险,这表明目前的施氮量是超量的,以后的试验中应调整各处理的施氮量,减少氮损失。

3.2 长期施用有机物料对重金属的影响

大多数研究表明施用畜禽粪便类有机肥增加了土壤中Zn和Cu等重金属含量^[7,9],这是因为畜禽粪便中含有大量Cu、Zn和Cd等重金属,长期施用导致土壤重金属的累积,而这些重金属主要来源于饲料添加剂的过量使用。因此,减少饲料添加剂的滥用对于猪粪在农田生态系统中的应用非常重要。另外,有研究表明无机酸和超声处理均可去除猪粪中Cu、Zn和Cd等重金属^[9],以后的研究可以考虑在实验中施用去除重金属的猪粪,以减少土壤重金属的累积。

有研究表明施用畜禽粪便类有机肥增加了植物中Zn和Cu等重金属含量^[5,7],本研究中施用畜禽粪便类有机肥并没有引起水稻糙米中重金属含量的累积,这可能是由于本试验所用水稻品种是Cu、Zn和Cd等重金属低积累的品种。曹方彬^[20]分析了浙江省144份水稻品种(系)的籽粒重金属含量,表明品种间存在显著差异,并筛选到可在中、轻度污染地区种植的籽粒重金属低积累水稻品种(系)嘉优08-1和春优689。

3.3 长期施用有机物料对温室气体排放及净全球增温潜力的影响

大多数研究结果表明施用有机肥会增加稻田

CH₄排放^[5,12,21],如王聪等^[21]研究结果表明,有机无机配施CH₄排放较单施化肥处理显著提高了43.5%。CH₄是在严格厌氧条件下产甲烷菌作用于产甲烷基质的结果,充足的产甲烷基质和适宜的产甲烷菌生长环境是CH₄产生的先决条件,施用有机肥增加稻田CH₄排放的主要机理是:一方面有机肥为产甲烷菌提供了大量的产甲烷前体基质;另一方面,稻田长期淹水条件下有机肥的快速分解加速稻田氧化还原电位(Eh)的下降,为土壤产甲烷菌提供了适宜的生长条件,从而促进稻田CH₄的排放^[22]。

目前,有机无机配施对稻田N₂O排放的影响并没有统一的结论。一方面,有机肥不仅为土壤提供充足的氮源和碳源,且可提供更多的其他土壤养分,而有较高C/N的有机肥在腐解过程中微生物活动能够消耗土壤中的少量氧气,造成局部厌氧环境而有利于反硝化作用进行,最终导致N₂O排放的增加;另一方面,高C/N的秸秆等有机肥料在腐解过程中产生的化感物质会抑制土壤反硝化等相关的微生物活性,进而导致土壤N₂O排放减少^[23]。因此,有机肥施用对土壤N₂O排放影响的机理需进一步深入研究。

在农业生态系统中增加土壤有机碳固定对减缓全球温室气体排放非常重要。表3表明FM对全球温室效应的贡献最小。这主要是因为施猪粪比其他处理固定了更多的土壤有机碳,从而抵消了更多的CH₄和N₂O的增温效应。与单施化肥相比,长期秸秆还田显著增加CH₄排放和土壤有机碳固定率,但是由秸秆引起的CH₄排放增加量是土壤有机碳固定率增加量的3.21~3.92倍^[13],导致稻田CH₄排放的增加,这与我们的试验结果相符。为了避免秸秆直接还田导致稻田CH₄的大量排放,秸秆的前处理就显得很重要,比如秸秆好氧腐解。有研究表明与秸秆直接还田相比,秸秆好氧腐解能显著减少CH₄排放,提高土壤质量和增加产量^[24]。

3.4 长期施用有机物料对淋溶的影响

长期施用猪粪可减少氮的淋溶损失,从而降低氮污染风险。可能的原因有以下两点:一方面,与无机氮施肥后立即体现有效性不同的是,猪粪中的氮是逐渐矿化释放出来的,猪粪替代部分化肥减少施肥初期的氮淋溶损失^[25]。另一方面,猪粪替代部分化肥增强了微生物对矿质态氮的固定,增加了土壤氮存留,从而减少氮淋溶损失^[26],特别是在作物生长早期通过植物根系吸收氮受限制时效果更明显。长期施用猪粪增加了田面水和浅层淋溶水P污染风险,而对深层淋

溶水 P 淋溶污染没有影响。王少先等^[27]在南昌的水稻-油菜轮作系统水稻季也观察到类似现象,与纯施化肥相比,施猪粪处理显著提高田面水磷含量,但 100 cm 深淋溶水磷含量各处理间没有差异。这可能是由于磷在土壤中主要靠扩散作用而移动,磷肥施到土壤后易被土壤固定,移动很困难^[28]。

3.5 长期施用有机物料对净经济效益的影响

通过统一标准评价施用有机物料对净经济效益影响方面的研究目前还比较缺乏。廖义善等^[29]研究表明,与常规施化肥相比,有机无机配施可以使水稻增产 9%,减少总氮和总磷流失量分别达 30.0%和 69.2%,最后增加收入 2716 元·hm⁻²,其经济效益、环境效益俱佳。但是该研究并没有考虑温室气体排放和富营养化等对环境的影响。在以后的研究中,还应考虑稻田氨挥发、径流等过程,从而更全面地认识长期施用有机物料对稻田净经济效益的影响。

4 结论

(1)长期施用有机物料可以提高土壤肥力,增加水稻产量,提高土壤有机碳固定率,增加 CH₄ 排放通量,对 N₂O 排放没有影响。与纯施化肥相比,施用猪粪可降低净全球增温潜势。

(2)连续 20 年施用猪粪显著提高土壤 Zn、Cu 和 Cd 含量,对 As、Cr、Ni 和 Pb 含量没有影响;没有造成水稻糙米中重金属含量的累积;降低了淋溶水氮淋溶损失和污染风险;显著增加了田面水磷含量和 20 cm 深淋溶水磷淋溶量,而对 60 cm 和 80 cm 深淋溶水全磷淋溶量没有影响。

(3)通过统一的评估方法得到结果显示,长期施用猪粪比单施化肥增加净经济效益 5.2%,达到 1 056.8 元·hm⁻²。综上,在 20 年尺度下,施用猪粪所带来的益处远大于其带来的坏处,对稻田生态系统服务功能产生正面影响。当然,随着试验年限的增长,其负面效应有可能会加强,其对生态环境的综合影响还需更长时间的监测试验来评价。

参考文献:

[1] 田志会, 杨志新. 城郊区农业环境问题的成因与对策研究[J]. 生态经济, 2005, 2(1): 80-82.
TIAN Zhi-hui, YANG Zhi-xin. Study on the cause and countermeasure of the problems of agricultural environment in the out skirts of a city[J]. *Green Economy*, 2005, 2(1): 80-82.

[2] Huang B, Shi X Z, Yu D S, et al. Environmental assessment of small-scale vegetable farming systems in peri-urban areas of the Yangtze

River Delta Region, China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 112(4): 391-402.

[3] Zhang H M, Xu M G, Zhang F, et al. Long-term effects of manure application on grain yield under different cropping systems and ecological conditions in China[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2009, 147(1): 31-42.

[4] 徐明岗, 李冬初, 李菊梅, 等. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3133-3139.
XU Ming-gang, LI Dong-chu, LI Ju-mei, et al. Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on nutrients absorption and yield of rice in Hunan of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(10): 3133-3139.

[5] 谢国雄, 王京文, 张丹, 等. 商品有机肥对作物产量及土壤与农产品中重金属积累的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(29): 97-104.
XIE Guo-xiong, WANG Jing-wen, ZHANG Dan, et al. Effects of commercial organic fertilizer application on crop yield and heavy metals accumulation in soil and agricultural products[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(29): 97-104.

[6] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 等. 不同施肥处理稻田甲烷和氧化亚氮排放特征[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 143-148.
QIN Xiao-bo, LI Yu-e, LIU Ke-ying, et al. Methane and nitrous oxide emissions from paddy field under different fertilization treatments[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(7): 143-148.

[7] 王美, 李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 466-480.
WANG Mei, LI Shu-tian. Heavy metals in fertilizers and effect of the fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(2): 466-480.

[8] 高菊生, 黄晶, 董春华, 等. 长期有机无机肥配施对水稻产量及土壤有效养分影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 314-324.
GAO Ju-sheng, HUANG Jing, DONG Chun-hua, et al. Effects of long-term combined application of organic and chemical fertilizers on rice yield and soil available nutrients[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(2): 314-324.

[9] 柳开楼, 李大明, 黄庆海, 等. 红壤稻田长期施用猪粪的生态效益及承载力评估[J]. 中国农业科学, 2014, 47(2): 303-313.
LIU Kai-lou, LI Da-ming, HUANG Qing-hai, et al. Ecological benefits and environmental carrying capacities of red paddy field subjected to long-term pig manure amendments[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(2): 303-313.

[10] 刘鸣达, 黄晓姗, 张玉龙, 等. 农田生态系统服务功能研究进展[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 834-838.
LIU Ming-da, HUANG Xiao-shan, ZHANG Yu-long, et al. Research advances in service functions of farmland ecosystems: A review[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(2): 834-838.

[11] Zhou W, Xia L L, Yan X Y. Vertical distribution of denitrification end-products in paddy soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 576: 462-471.

[12] Yan X, Zhou H, Zhu Q, et al. Carbon sequestration efficiency in paddy soil and upland soil under long-term fertilization in southern China[J].

- Soil & Tillage Research*, 2013, 130(2):42-51.
- [13] Xia L, Wang S, Yan X Y, et al. Effects of long-term straw incorporation on the net global warming potential and the net economic benefit in a rice-wheat cropping system in China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 197:118-127.
- [14] Xia Y Q, Yan X Y. Life-cycle evaluation of nitrogen-use in rice-farming systems: Implications for economically-optimal nitrogen rates[J]. *Biogeosciences*, 2011, 8(11):3159-3168.
- [15] Xia L L, Ti C P, Yan X Y, et al. Greenhouse gas emissions and reactive nitrogen releases during the life-cycles of staple food production in China and their mitigation potential[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 556:116-125.
- [16] Zhao X, Zhou Y, Min J, et al. Nitrogen runoff dominates water nitrogen pollution from rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 156:1-11.
- [17] 连 纲, 王德建, 林静慧, 等. 太湖地区稻田土壤养分淋洗特征[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11):1879-1883.
LIAN Gang, WANG De-jian, LIN Jing-hui, et al. Characteristics of nutrient leaching from paddy field in Taihu Lake area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11):1879-1883.
- [18] 兰 宇, Muhammad Imran Asshraf, 韩晓日, 等. 长期施肥对棕壤有机碳储量及固碳速率的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(1):264-270.
LAN Yu, Muhammad Imran Asshraf, HAN Xiao-ri, et al. Effect of long-term fertilization on total organic carbon storage and carbon sequestration rate in a brown soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(1):264-270.
- [19] 杨 宁, 杨 洋, 彭 亮, 等. 超声和酸化对猪粪中 Cu、Zn 去除的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(7):1429-1435.
YANG Ning, YANG Yang, PENG Liang, et al. Removal of Cu and Zn from pig manure by acids and ultrasound[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(7):1429-1435.
- [20] 曹方彬. 水稻重金属积累的品种与环境效应及调控技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
CAO Fang-bin. Cultivar and environmental effects and regulation of heavy metal accumulation in rice[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [21] 王 聪, 沈健林, 郑 亮, 等. 猪粪化肥配施对双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及其全球增温潜势的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(8):3120-3127.
WANG Cong, SHEN Jian-lin, ZHENG Liang, et al. Effects of combined applications of pig manure and chemical fertilizers on CH₄ and N₂O emissions and their global warming potentials in paddy fields with double-rice cropping[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(8):3120-3127.
- [22] 马 静, 徐 华, 蔡祖聪. 施肥对稻田甲烷排放的影响[J]. 土壤, 2010, 42(2):153-163.
MA Jing, XU Hua, CAI Zu-cong. Effect of fertilization on methane emissions from rice fields[J]. *Soils*, 2010, 42(2):153-163.
- [23] 马二登, 马 静, 徐 华, 等. 施肥对稻田 N₂O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12):2453-2458.
MA Er-deng, MA Jing, XU Hua, et al. Effects of fertilization on nitrous oxide emission from paddy fields: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12):2453-2458.
- [24] Linquist B A, Adviento-Borbe M A, Pittelkow C M, et al. Fertilizer management practices and greenhouse gas emissions from rice systems: A quantitative review and analysis[J]. *Field Crops Res*, 2012, 135:10-21.
- [25] Wang J, Zhu B, Zhang J, et al. Mechanisms of soil N dynamics following long-term application of organic fertilizers to subtropical rain-fed purple soil in China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 91:222-231.
- [26] Zhou M, Zhu B, Brüggemann N, et al. Sustaining crop productivity while reducing environmental nitrogen losses in the subtropical wheat-maize cropping systems: A comprehensive case study of nitrogen cycling and balance[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 231:1-14.
- [27] 王少先. 施肥对稻田湿地土壤碳氮磷库及其相关酶活变化的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
WANG Shao-xian. Effects of fertilization on soil C, N & P pools and its involved enzyme activity in paddy wetland ecosystems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [28] 徐明岗, 张一平, 王锐群. 土壤磷扩散规律及其能量特征的研究 I. 水分、质地、温度及其相互作用对磷扩散的影响[J]. 土壤学报, 1996, 33(2):148-157.
XU Ming-gang, ZHANG Yi-ping, WANG Rui-qun. Diffusion of phosphate in soils I. The influence of soil moisture, texture and temperature as well as their interactions[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33(2):148-157.
- [29] 廖义善, 卓慕宁, 李定强, 等. 适当化肥配施有机肥减少稻田氮磷损失及提高产量[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1):210-217.
LIAO Yi-shan, ZHUO Mu-ning, LI Ding-qiang, et al. Formulated fertilization for reducing nitrogen and phosphorus losses from paddy fields and increasing rice yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(1):210-217.