

引用格式:朱利群,王春杰,杨曼君,等. 施肥对长江中下游稻田温室气体排放的影响——基于Meta分析[J]. 资源科学, 2017, 39(1): 105–115. [Zhu L Q, Wang C J, Yang M J, et al. Effects of fertilization on greenhouse gas emissions in paddy fields in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River based on Meta-analysis[J]. *Resources Science*, 2017, 39(1): 105–115]. DOI: 10.18402/resci.2017.01.11

施肥对长江中下游稻田温室气体排放的影响 ——基于Meta分析

朱利群^{1,3}, 王春杰², 杨曼君², 李 静³, 陈利根³

(1. 南京农业大学农村发展学院, 南京 210095; 2. 南京农业大学经济管理学院, 南京 210095;
3. 南京农业大学公共管理学院, 南京 210095)

摘 要: 气候变暖已成为全球关注的热点话题, 农业温室气体是气候暖化的重要排放源。目前许多学者研究了不同施肥措施下温室气体排放的特征, 但实验结果之间存在一定的差异。为了综合评价区域内不同施肥措施(单施无机氮(N)、无机氮磷钾(NPK)和有机无机配施(OF))下土壤温室气体排放的特征及其净减排潜力, 本文基于长江中下游地区40篇关于施肥对稻田温室气体CH₄和N₂O排放的文献, 筛选出339组样本数据, 采用Meta分析方法从施肥类型、施肥时间和施肥水平三个方面定量研究了3种施肥措施对稻田CH₄和N₂O排放的影响, 并在前期研究的基础上, 估算了各个施肥处理下的综合增温潜势、净增温潜势以及温室气体排放强度。结果表明: N、NPK和OF处理下CH₄周年排放的效应值分别为0.24、0.27和0.63, N₂O周年排放的效应值分别为1.25、1.26和1.41。随着施肥次数的增加, N、NPK和OF处理下温室气体排放的效应值均逐渐增大; 随着施肥量的增加, N处理表现为增加的趋势, NPK处理表现为减少的趋势, OF处理表现为先增后减的趋势。对于3种施肥处理下的净增温潜势大小为OF>NPK>N, 其中CH₄排放对温室气体的贡献最大; 3种施肥处理下的温室气体排放强度大小为OF>NPK>N。从粮食增产和温室气体减排两方面综合考虑, 施用氮磷钾(NPK)是长江中下游地区稻田较适宜的施肥方式。

关键词: 施肥; 温室气体; Meta分析; 净增温潜势; 长江中下游地区

DOI: 10.18402/resci.2017.01.11

1 引言

随着大气温室气体含量的逐年增加, 全球性气候暖化已成为当前的焦点问题, 其中农业生产是温室气体重要排放源。据统计, 农业温室气体每年排放总量占全球人为排放总量的10%~12%^[1]。目前, 通过增加土壤固碳和减少温室气体排放这两种方法可以有效地减缓全球气候变暖, Smith等估计到2030年, 通过农业技术可以使全球农业温室气体减排潜力达5500~6000Mt CO₂-eqv^[2]。在温室气体排放过程中受耕作^[3]、施肥^[4,5]、灌溉^[6]等农业管理措施的显著影响, 其中施肥是影响稻田CH₄和N₂O排放的重要因素^[4,5,7]。施肥不仅可以有效地增加土壤

的固碳潜力, 同时还能够改变稻田生态系统中的土壤微环境, 为CH₄产生创造条件, 同时也不同程度地影响着N₂O的排放, 因此需结合土壤固碳潜力和温室气体减排这两方面来评价稻田温室气体CH₄和N₂O排放的净增温潜势, 同时应综合考虑其生产效益, 探究出有利于粮食增产和温室气体减排的施肥方式, 对中国农业可持续发展和粮食安全起着至关重要的作用。中国是水稻和小麦的生产大国, 双季稻和稻麦轮作是长江中下游地区的主体种植模式^[8], 施肥是目前重要的农业措施之一, 因此明确长江中下游地区不同施肥措施下稻田净减排潜力具有重要意义。

收稿日期: 2016-08-01; 修订日期: 2016-11-24

基金项目: 教育部人文社会科学研究青年基金(15YJCZH246); 江苏高校哲学社会科学研究项目(2015SJD087); 南京农业大学中央高校基本科研业务费人文社科基金(SKPT2015028)。

作者简介: 朱利群, 男, 浙江淳安县人, 博士, 教授, 主要从事区域农业与农田生态研究。E-mail: zhulq@njau.edu.cn

近年来,关于农业生产活动对农田土壤固碳和温室气体排放的研究已有较多的报道,且各个试验对象局限于某一地点的研究,试验结果也不尽相同,缺少对同类问题的不同试验结果进行综合研究。Meta分析是将同一主题下的多个独立试验结果进行归纳和概括,以提供量化的平均效果即效应值来分析所要研究的问题^[9]。在生态学领域Meta分析得到了广泛的关注,用于全球变暖问题的研究日趋增多。近年来,许多学者开展了大量的独立田间试验来研究施肥对稻田土壤温室气体排放的影响,这为综合研究区域内这一问题提供了一定的参考数据。Sun等基于Meta分析从施肥量、施肥时间、种植模式等方面研究了氮肥对中国稻田CH₄和N₂O排放的影响^[10];Lingquist等定量研究了全球范围内施肥量、氮肥类型、有机肥种类等因素对温室气体CH₄和N₂O排放的影响,但未结合土壤固碳考虑净减排潜力^[11];石生伟等利用Meta分析研究了施肥量、有机肥种类和非水稻生长季节水分状态等水肥管理对稻田CH₄和N₂O的影响,并提出了相应的减排途径^[12]。目前,尚无文献从土壤固碳量和温室气体排放两个方面进行综合研究区域内不同施肥措施的净减排潜力。本文以长江中下游典型稻田为对象,在研究了不同施肥措施对稻田土壤固碳的基础上,对有关CH₄和N₂O排放的试验结果进行整合分析,初步探讨不同施肥措施下土壤的净减排潜力以及温室气体排放强度,有助于科学评价施肥在减缓全球变暖方面的贡献,为减少长江中下游地区稻田温室气体CH₄和N₂O排放提供参考依据。

2 研究区域与研究方法

2.1 研究区域

研究区域主要集中在中国长江中下游地区,包括江苏、安徽、上海、湖北、湖南、江西、浙江等六省一市(表1)。该区以北亚热带气候为主,气候温和,雨量充足,四季分明,平均气温14~18℃,年降雨量1000~1400mm,集中于春、夏两季。土壤主要为水稻土,稻麦轮作和双季稻是该区的主体种植制度。

2.2 数据来源

本文通过文献资料数据库搜集2016年以前发表的关于施肥对土壤温室气体CH₄和N₂O排放影响的文章(表1)。文章筛选的标准有:①试验为田间

定位试验,温室气体排放量均采用静态箱/气相色谱法进行测量;②施肥措施包括单施氮肥(N)、氮磷钾配施(NPK)、有机无机配施(OF)等的一个或多个,其中对照为不施肥(CK);不同施肥措施下氮肥施入量的范围为(94~483)kgN/hm²,平均施氮量为288.5kgN/hm²;③试验时间跨度至少为一个生长季节(从种植到收获);④文献中包含实验地点、年均降雨量、年均气温、土壤类型、种植制度、试验处理等指标的信息;⑤以CH₄和N₂O的季节累计排放量为指标,单位为kg/hm²。

最终筛选出符合标准的研究论文40篇,确定采纳20个实验地点的339组试验数据,其中CH₄排放的研究数据有202组,N₂O排放的研究数据有183组。试验土壤类型多为水稻土。无机氮肥处理(N)样本数为64,占总样本的18.9%;无机氮磷钾肥配施(NPK)为100,占29.5%;有机无机配施(OF)为175,占51.6%。

2.3 研究方法

试验数据来自文献中的表、图以及正文文字,其中,图中数据利用Get data v.2.22^[51]软件获得。施肥量以不同施肥措施下的氮肥施用量为准,单位为kgN/hm²。试验结果以排放速率表示的样本,根据作物的生育期计算出累计排放量,以CH₄-C和N₂O-N表示的样本,分别乘以44/12和44/28得到CH₄和N₂O的排放量。

2.3.1 效应值(lnRR)

为了使区域内不同的独立试验结果之间具有可比性,需扣除不施肥(CK)处理下稻田温室气体的排放,采用Metawin 2.0^[52]进行Meta分析,通过公式(1)计算:

$$\ln RR = \ln\left(\frac{X_t}{X_c}\right) \quad (1)$$

式中lnRR为效应值;X_t为各个施肥处理下温室气体的排放(kgN/hm²);X_c为不施肥(CK)处理下温室气体的排放(kgN/hm²)。效应值是无单位的,计算出每组数据的效应值,利用标准差计算权重加权平均后得到95%的置信区间。只有当置信区间不包括0时,试验结果才有意义,此时表示施肥能显著增加或抑制温室气体CH₄和N₂O排放(P<0.05)。另外,通过公式(2)计算得到温室气体排放量的变化百分

2017年1月

表1 文献中实验田间信息

Table 1 Information of field experiments in the literature

序号	试验地点	年均降雨量/mm	年均气温/℃	土壤类型	种植制度	试验处理	CH ₄	N ₂ O	文献
1	湖北荆门	1 085.0	16.1	水稻土	稻-麦	N、OF	Y	Y	[7]
2	江苏苏州	1 100.0	15.7	水稻土	稻-麦	NPK、OF	Y	Y	[13]
3	湖南桃源	1 437.0	16.5	水稻土	稻-稻	NPK、OF	Y	Y	[14]
4	湖南长沙	1 361.6	17.1	水稻土	稻-稻-油	NPK、OF	Y	Y	[15]
5	湖南长沙	1 361.6	17.1	水稻土	单季稻	NPK、OF	Y	N	[16]
6	湖南长沙	1 361.6	17.1	水稻土	稻-稻	NPK、OF	Y	N	[17]
7	湖南常德	1 447.9	16.5	水稻土	稻-稻	NPK、OF	Y	N	[18]
8	湖南望城	1 350.0	17.5	红壤土	稻-稻	NPK、OF	Y	Y	[19]
9	上海青浦区	1 087.3	16.7	水稻土	稻-麦	N、OF	Y	Y	[4]
10	湖南长沙	1 500.0	17.1	水稻土	稻-稻	NPK、OF	Y	Y	[20]
11	湖南望城	1 380.0	17.0	水稻土	稻-稻	NPK、OF	Y	Y	[21]
12	江西鹰潭	1 881.8	18.4	红壤土	稻-稻	NPK、OF	N	Y	[22]
13	湖南湘阴	1 392.6	17.0	紫潮泥	稻-稻	NPK、OF	Y	Y	[23]
14	湖南长沙	1 330.0	17.5	麻沙泥	稻-稻	N、OF	Y	Y	[24]
15	江苏扬州	1 020.0	14.8	沙壤土	稻-麦	OF	Y	Y	[25]
16	湖南长沙	1 361.6	17.1	水稻土	稻-稻	NPK	Y	Y	[26]
17	江苏句容	1 099.1	15.5	水稻土	稻-麦	N	Y	N	[27]
18	湖南长沙	1 500.0	17.1	水稻土	稻-稻	NPK、OF	Y	N	[28]
19	湖北武穴	1 360.7	16.8	水稻土	稻-油	NPK	Y	N	[29]
20	江苏句容	1 099.1	15.5	水稻土	稻-麦	N、NPK	N	Y	[30]
21	江苏常熟	1 178.0	16.6	水稻土	稻-麦	NPK、OF	Y	Y	[31]
22	江苏苏州	1 100.0	15.7	黄泥土	稻-麦	N、NPK、OF	Y	Y	[32]
23	上海嘉定	1 054.0	15.4	水稻土	稻-麦	NPK	Y	Y	[33]
24	江苏南京	1 050.2	15.7	沙壤土	稻-麦	N、OF	Y	Y	[34]
25	江苏常熟	1 178.0	16.6	乌珊土	稻-麦	N	N	Y	[35]
26	江苏南京	1 050.2	15.7	水稻土	稻-麦	N	Y	Y	[36]
27	安徽巢湖	1 100.0	16.0	水稻土	稻-麦	OF	Y	N	[37]
28	江苏苏州	1 042.0	15.5	乌珊土	稻-麦	N、NPK	N	Y	[38]
29	浙江杭州	1 454.0	17.8	水稻土	稻-稻	NPK、OF	N	Y	[39]
30	湖南桃源	1 448.0	16.5	水稻土	稻-稻	NPK、OF	Y	N	[40]
31	湖南浏阳	1 361.0	17.2	粘壤土	稻-稻	NPK	Y	Y	[41]
32	江苏苏州	1 100.0	15.7	水稻土	稻-麦	N、OF	Y	Y	[42]
33	上海青浦	1 087.3	16.7	水稻土	稻-麦	N、OF	Y	Y	[43]
34	江苏苏州	1 139.0	16.0	水稻土	稻-麦	N	Y	Y	[44]
35	江苏南京	1 106.0	15.4	水稻土	稻-麦	N、OF	Y	Y	[45]
36	湖北荆州	1 446.0	17.2	水稻土	稻-稻	NPK、OF	Y	Y	[46]
37	江苏常熟	1 054.0	15.4	水稻土	稻-麦	NPK、OF	Y	Y	[47]
38	湖南桃源	1 448.0	16.5	水稻土	稻-稻	NPK、OF	Y	Y	[48]
39	湖南长沙	1 361.6	17.0	水稻土	稻-稻	N、OF	Y	Y	[49]
40	湖北咸宁	1 577.0	16.8	红棕壤	稻-油	N	N	Y	[50]

注: N: 无机氮肥 Inorganic nitrogen fertilization; NPK: 无机氮磷钾配施 Inorganic nitrogen, phosphorus and potassium fertilization; OF: 有机无机配施 Inorganic and organic fertilization; “Y”和“N”表示文献中有或者没有 CH₄和 N₂O 的数据。

数^[53]:

$$m = (\exp(\ln RR) - 1) \times 100\% \quad (2)$$

式中 m 为施肥处理相对于不施肥处理下温室气体排放量的变化(%)。

2.3.2 施肥处理下稻田固持的大气 CO₂ 量

稻田土壤固碳量的计算公式^[54]为:

$$SOCS = ([SOC]_i - [SOC]_0) \times \rho \times T \times k/a \quad (3)$$

式中 $SOCS$ 为土壤固碳量 ($\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$); SOC_i 和 SOC_0 分别为试验第 i 年和试验前土壤有机碳含量 (g/kg); ρ 为试验前后土壤的平均容重 (g/cm^3); T 为土壤深度 (20cm); a 为试验年限; k 为换算系数。

其中,土壤容重^[54]通过公式(4)计算得出:

$$\rho = -0.22 \ln SOC + 1.780 \quad (4)$$

为使稻田土壤固碳和施肥后温室气体的增温潜势进行对比,本文通过公式(5)将稻田土壤固碳折算为稻田固持的大气 CO₂ 量^[55]:

$$ASOCS = SOCS \times 44/12 \quad (5)$$

式中 44/12 为土壤 $SOCS$ 换算为 CO₂ 当量的系数; $ASOCS$ 为施肥后土壤固碳对减缓全球变暖的贡献 ($\text{kgCO}_2\text{-eq}/\text{hm}^2$)。

2.3.3 稻田净增温潜势(NGWP)

基于 CO₂、CH₄ 和 N₂O 这 3 种温室气体的增温潜势不同,进而不同程度地影响着全球气候,故只有计算出它们的综合温室效应才能准确地评价出不同施肥措施对气候变暖的贡献^[14]。全球增温潜势(GWP)和净增温潜势(NGWP)常作为一种相对指标,可以用来比较不同温室气体对气候变暖的潜在效应。由于农业生态系统中 CO₂ 净排放量很少,几乎可以忽略不计^[56],因此本文在 GWP 的估算中以 CO₂ 为参考气体,将 CH₄ 和 N₂O 的排放量转化成 CO₂

的等效排放量,并在估算出稻田土壤固碳潜力的基础上,只以 CH₄ 和 N₂O 这 2 种温室气体的净增温潜势来评估不同施肥措施对温室气体的影响。其中,稻田净增温潜势(NGWP)表示温室气体 CH₄ 和 N₂O 的综合增温潜势与土壤固碳减缓全球变暖贡献的差值。由于以不同的时间尺度为基础,能够有效地估算出随着时间的延长全球增温潜势的变化趋势,因此本文选择在 20a 和 100a 时间尺度上对单位质量 CH₄ 和 N₂O 的净增温潜势进行估算。具体计算公式如下:

$$NGWP_{20yr} = EM(CH_4) \times 72 + EM(N_2O) \times 289 - ASOCS \quad (6)$$

$$NGWP_{100yr} = EM(CH_4) \times 25 + EM(N_2O) \times 289 - ASOCS \quad (7)$$

式中 $EM(CH_4)$ 为 CH₄ 的周年累计排放量 (kg/hm^2); $EM(N_2O)$ 为 N₂O 的周年累计排放量 (kg/hm^2)。72 和 289 或 25 和 298 分别表示在 20a 和 100a 时间尺度上单位质量的 CH₄ 和 N₂O 换算成等效 CO₂ 的系数。

2.3.4 温室气体排放强度(GHGI)

温室气体排放强度(GHGI)即单位产量的 GWP,是温室气体 CH₄ 和 N₂O 的综合增温潜势与作物产量的比值,是综合环境效益与生产效益来评价不同施肥处理对温室气体 CH₄ 和 N₂O 排放的影响。

$$GHGI = GWP/Y \quad (8)$$

式中 GWP 为 CH₄ 和 N₂O 的综合增温潜势 (kg/hm^2); Y 为各个处理单位面积作物产量 (kg/hm^2)。

3 结果与分析

3.1 不同施肥措施下长江中下游稻田周年温室气体排放的效应值

从图 1 可以看出,不同施肥措施对稻田土壤 CH₄ 和 N₂O 排放均有显著影响,N、NPK 和 OF 处理下

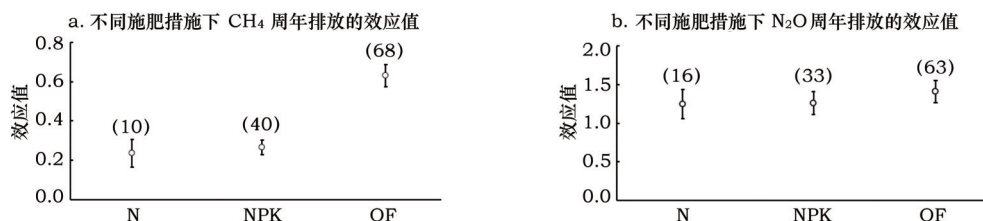
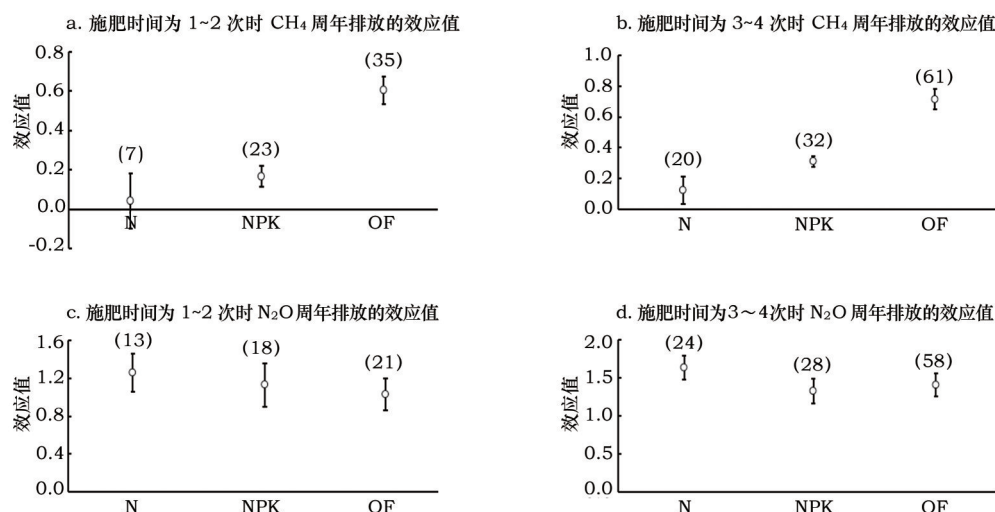


图 1 不同施肥措施下长江中下游稻田周年温室气体 CH₄ 和 N₂O 排放的效应值

Figure 1 Effect size on CH₄ and N₂O annual emissions under different fertilization treatments in paddy fields in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River

注:误差线表示 95% 置信区间;括号中的数字表示样本数。

2017年1月

图2 不同施肥时间下长江中下游稻田周年温室气体CH₄和N₂O排放的效应值Figure 2 Effect size on CH₄ and N₂O annual emissions under different fertilization times in paddy fields

in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River

注: 误差线表示 95% 置信区间; 括号中的数字表示样本数。

CH₄周年排放的效应值分别为0.24、0.27和0.63, N₂O周年排放的效应值分别为1.25、1.26和1.41。在OF处理下能显著促进CH₄和N₂O排放, 效应值均为最大, 分别为0.63和1.41, 较不施肥相比分别增加88%和309% ($P < 0.05$)。与OF处理相比, N处理减少了62.64%的CH₄排放和11.65%的N₂O排放。不同施肥措施下土壤CH₄和N₂O周年排放的效应值大小均为OF > NPK > N。

3.2 不同施肥时间下长江中下游稻田温室气体排放的效应值

如图2所示, 不同施肥时间对稻田土壤CH₄和N₂O排放的影响效果不同。在施肥时间为1~2次和3~4次时各种施肥处理均增加了温室气体的排放, 表现为正效应。具体为: 随着施肥次数的增加, N、NPK和OF处理下温室气体排放的效应值均逐渐增大, 对于CH₄的排放, 在OF处理下施肥次数为3~4时, 效应值达到最大值为0.71, 这表明此时有机无机配施显著增加了104%的CH₄排放, 在N处理下施肥次数为1~2时, 效应值达到最小为0.04, 与最大值相比, 减少了94.1% CH₄的排放; 对于N₂O的排放, 在N处理下施肥次数为3~4时, 效应值达到最大值为1.63, 表明此时单施无机氮肥显著增加了410%的N₂O排放。

3.3 不同施肥水平下长江中下游温室气体排放的效应值

由图3可知, 不同施肥处理在不同的施肥水平上对稻田土壤CH₄和N₂O排放影响不同, 当 $R \leq 150 \text{ kg N/hm}^2$ 时, N处理对温室气体CH₄的排放表现为负效应, 减少了6.4%的CH₄排放; 其余处理均增加了温室气体的排放。其中, 对于CH₄排放, 在施肥量 $R = (150 \sim 300) \text{ kg N/hm}^2$ 时OF处理下达到最大值, 为0.88, 增加了141%的CH₄排放。在施肥量 $R = (150 \sim 300) \text{ kg N/hm}^2$ 时N处理下达到最小值为0.13。随着施肥量的增加, OF处理表现为先增后减的趋势, N处理表现为增加的趋势, NPK处理表现为减少的趋势。对于N₂O排放, 在施肥量 $R \geq 300 \text{ kg N/hm}^2$ 时NPK处理下对N₂O排放的效应值达到最大为1.82, 增加了519%的N₂O排放, 在 $R \leq 150 \text{ kg N/hm}^2$ 时NPK处理下的效应值最小为0.63, 相对于其他处理, 此时NPK处理减少了N₂O的排放。随着施肥量的增加, N处理对土壤N₂O排放的效应值呈先增加后降低的趋势, NPK和OF处理呈增加的趋势。

3.4 不同施肥处理对稻田综合温室效应的影响

由表2可看出, 在20a和100a尺度上, 稻田土壤温室气体排放中CH₄均占主导地位, 分别占综合增温潜势的97.5%和93%。由此可见, CH₄是农田生态

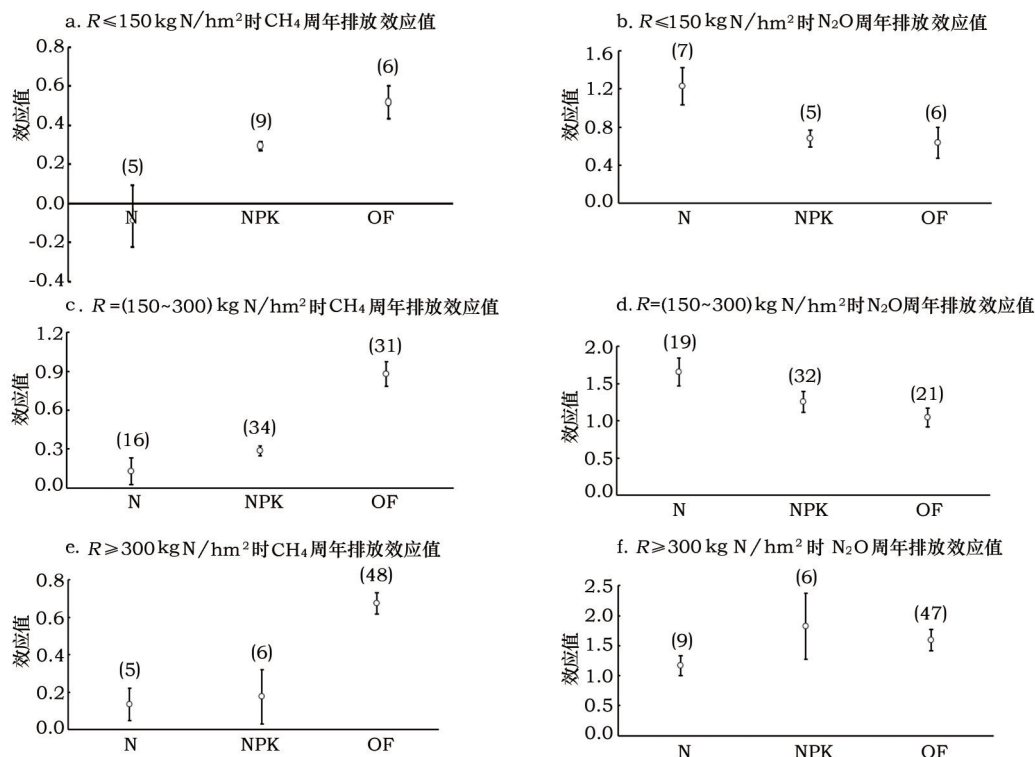


图3 不同施肥水平下长江中下游稻田周年温室气体CH₄和N₂O排放的效应值

Figure 3 Effect size on CH₄ and N₂O annual emissions under different fertilization levels in paddy fields in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River

注:误差线表示95%置信区间;括号中的数字表示样本数。

表2 不同施肥措施下的稻田综合温室效应

Table 2 The global warming potential of different fertilization treatments

施肥处理	周年温室气体排放总量 /(kg/hm ²)		CH ₄ 增温潜势 /(kgCO ₂ -eqv/hm ²)		N ₂ O增温潜势 /(kgCO ₂ -eqv/hm ²)		综合增温潜势 /(kgCO ₂ -eqv/hm ²)	
	CH ₄	N ₂ O	20a	100a	20a	100a	20a	100a
N	255.41	3.15	18 389.40	6 385.21	911.27	939.64	19 300.66	7 324.85
NPK	518.41	3.00	37 325.41	12 960.21	867.40	894.41	38 192.81	13 854.63
OF	639.56	2.76	46 048.31	15 989.00	797.27	822.09	46 845.57	16 811.09
合计	1 413.38	8.91	101 763.12	35 334.42	2 575.94	2 656.14	104 339.04	37 990.57

系统中最主要的温室气体,对温室气体的贡献最大。不同施肥处理下稻田土壤CH₄和N₂O周年累计排放量所产生的综合增温潜势均为OF>NPK>N。在20a尺度上,N处理下的温室气体全球增温潜势较NPK和OF处理分别减少了49.5%和58.8%,在100a尺度上分别减少了47.1%和56.4%。由此说明,随着时间的延长,不同施肥措施下全球增温潜势之间的差距有所减小。

3.5 不同施肥处理下稻田的净增温潜势

从表3可以看出,稻田在采用施肥措施后虽极

大地提高了土壤碳的固定,但同时会导致稻田系统净增温潜势的增加。不同施肥处理下温室气体的净增温潜势的大小分别为OF>NPK>N。在20a时间尺度上,与NPK和OF处理相比,N处理净增温潜势分别减少了50.3%和58.3%,在100a尺度上分别减少了47.7%和56%。由此说明,随着时间的延长,不同施肥处理的净增温潜势之间的差距有所减小。3种施肥处理下净增温潜势均为正值,表明施肥导致了明显的温室气体泄漏。不同施肥处理下温室气体排放强度的大小分别为OF>NPK>N,在20a时间

2017年1月

表3 不同施肥措施下稻田的净增温潜势

Table 3 The net warming potential of different fertilization treatments

施肥处理	土壤有机碳	土壤	作物	净增温潜势		温室气体排放强度	
	相对年变化量	固碳量	产量	/(kg CO ₂ -eq/hm ²)		/(kg/kg)	
	/(g/kg)	/(kgC/hm ²)	/(kg/hm ²)	20a	100a	20a	100a
N	0.10	243.15	12 439.30	18 409.11	7 081.70	1.55	0.59
NPK	0.14	321.72	13 568.31	37 013.17	13 532.91	2.81	1.02
OF	0.32	727.33	12 891.13	44 178.69	16 083.76	3.63	1.30

注: 土壤有机碳相对年变化量数据来自于前期研究^[58]。

尺度上, OF处理下尽管作物产量较高, 但由于NGWP显著增加, 温室气体排放强度比NPK和N处理分别增加了22.6%和57.3%。

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 3种施肥措施下的CH₄周年排放的效应值均大于零, 说明施肥能增加稻田CH₄的排放, 这可能是因为施肥增加了土壤中产甲烷菌的碳源和氮源, 同时降低了土壤氧化还原电位^[5], 为产甲烷菌生长提供了充足的底物和有利的环境条件, 进而增加了CH₄的排放。不同施肥措施下土壤CH₄周年排放的效应值大小为OF>NPK>N, 这可能是因为不同肥料类型导致土壤中的有机碳投入不同, 与单施化肥相比, OF处理下较高C/N的有机肥向土壤中输入大量的有机碳, 同时提高了土壤微生物的分子多样性^[13], 进而促进了稻田产甲烷菌的生长, 故其CH₄排放量高于其他处理。随着施肥次数的增加, 各个施肥处理下CH₄的效应值均逐渐增大, 这可能是因为在水稻生长的分蘖期和灌浆阶段会出现CH₄的排放高峰, 多次施肥会促进第2个CH₄排放高峰。随着施肥量的增加, N处理下CH₄排放的效应值呈现增加的趋势, 这可能是因为氮肥的施用使土壤中氨态氮含量增加, 抑制甲烷菌的氧化, 增加了CH₄的排放量。NPK处理表现为减少趋势, 这可能是因为化肥的施用促进了水稻植株的呼吸作用, 增强了稻田CH₄的氧化能力^[59], 从而抑制CH₄的排放。OF处理表现为先增后减的趋势, 在一定的施肥量范围内, 稻田土壤中的各类微生物有充足的营养, CH₄排放量呈递增状态, 超过一定范围时, 由于基质浓度过饱和, CH₄排放量达到最大值而不再增加, 这与Wang等研究结果一致^[60]。

(2) 3种施肥措施下N₂O周年排放的效应值均

大于零, 说明施肥能增加稻田N₂O的排放, 这可能是因为N₂O是在厌氧条件下土壤中铵盐进行反硝化过程中产生的, 稻田的淹水条件提供了厌氧环境, 施肥为反硝化细菌提供大量的氮源^[61], 进而促进了反硝化作用的进行和N₂O的排放。不同施肥措施下土壤N₂O周年排放的效应值大小为OF>NPK>N, 其中, OF处理N₂O的效应值显著高于其他处理, 这可能是因为OF处理下, 有机肥在腐解过程中会消耗土壤中的氧气易形成厌氧条件, 另外, 化肥和有机肥配施能够为反硝化细菌反应提供充足的养分, 从而导致N₂O排放的增加。随着施肥量的增加, N处理下N₂O排放的效应值呈现先增后减的趋势, 这可能是因为土壤中较高的NO₃⁻含量和淹水还原条件有利于反硝化反应的进行, 当施肥量达到一定值后, 反硝化作用会在充足的底物和厌氧环境反应进行完全, 产生最终产物N₂, 进而减少了中间产物N₂O的排放^[4]。NPK和OF处理下均呈现增加的趋势, 这可能是因为增施化肥或有机肥能够为反硝化过程提供充足的反应基质, 为反硝化过程创造有利的条件。

4.2 结论

在20a和100a时间尺度上, 各个施肥处理下稻田土壤CH₄排放的增温潜势均远高于N₂O的增温潜势, 说明CH₄排放对温室气体的贡献最大, 因此探究有效的稻田CH₄减排途径对减缓温室效应具有重要意义。各个施肥处理下稻田温室气体CH₄和N₂O的净增温潜势均为正值, 表明3种施肥处理下土壤固碳减排对温室气体增排的抵消作用均很明显, 其中以OF处理下的抵消作用最大, N处理下最小。与N和NPK处理相比, OF处理可以显著增加净增温潜势, 主要原因是有机无机配施可以显著促进CH₄的大量排放。本研究中, OF和NPK处理比N处理增

加了作物产量,但由于显著增加了 CH_4 排放量使其GHGI大于N处理,综合粮食增产与温室气体减排两方面的考虑,同时稻田应重视平衡施肥尤其是磷肥的施用,因此OF和N处理不能作为该评价体系下的最优处理,NPK处理应是长江中下游较适宜的施肥方式。另外,虽然区域性的数据分析可以有效的反映不同施肥措施对稻田温室气体排放的影响程度,但由于本研究中的试验点主要集中于湖北、湖南、江苏等地,安徽、浙江及上海的研究样本较少,未能均匀覆盖整个研究区域,故研究结果有一定的缺陷。因此,在以后的研究中,应多在安徽、浙江和上海等地区开展一些不同施肥措施对稻田温室气体排放的试验研究,以使研究结果更具有说服力。

参考文献(References):

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2007- The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Smith P, Martino D, Cai Z, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2008, 363(1492): 789-813.
- [3] 成臣, 曾勇军, 杨秀霞, 等. 不同耕作方式对稻田净增温潜势和温室气体强度的影响[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(6): 1887-1895. [Cheng C, Zeng Y J, Yang X X, et al. Effect of different tillage methods on net global warming potential and greenhouse gas intensity in double rice cropping systems[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(6): 1887-1895.]
- [4] 赵峥, 岳玉波, 张翼, 等. 不同施肥条件对稻田温室气体排放特征的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(11): 2273-2278. [Zhao Z, Yue Y B, Zhang Y, et al. Impact of different fertilization practices on greenhouse gas emission from paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11): 2273-2278.]
- [5] 谢义琴, 张建峰, 姜慧敏, 等. 不同施肥措施对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(3): 578-584. [Xie Y Q, Zhang J F, Jiang H M, et al. Effects of different fertilization practices on greenhouse gas emissions from paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3): 578-584.]
- [6] 蔡祖聪, 徐华, 卢维盛, 等. 冬季水分管理方式对稻田 CH_4 排放量的影响[J]. *应用生态学报*, 1998, 9(2): 171-175. [Cai Z C, Xu H, Lu W S, et al. Influence of water management in winter crop season on CH_4 emission during rice growing season[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(2): 171-175.]
- [7] 郭腾飞, 梁国庆, 周卫, 等. 施肥对稻田温室气体排放及土壤养分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(2): 337-345. [Pan G X, Liang G Q, Zhou W, et al. Effect of fertilizer management on greenhouse gas emission and nutrient status in paddy soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(2): 337-345.]
- [8] 李根蟠. 长江下游稻麦复种制的形成和发展-以唐宋时代为中心的讨论[J]. *历史研究*, 2002, (5): 3-28. [Li G P. Formation and development of double cropping of wheat and paddy in the Lower Reaches of the Yangtze River-Discussions focusing on the period of the Tang and Song dynasties[J]. *History Research*, 2002, (5): 3-28.]
- [9] Hechtel L J, Julianio S A. Effects of a predator on prey metamorphosis: Plastic responses by prey or selective mortality? [J]. *Ecology*, 1997, 78(3): 851-928.
- [10] Sun B F, Zhao H, Lu Y Z, et al. The effects of nitrogen fertilizer application on methane and nitrous oxide emission/uptake in Chinese croplands [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(2): 440-450.
- [11] Linquista B A, Adviento-Borbea M A, Pittelkova C M, et al. Fertilizer management practices and greenhouse gas emissions from rice systems: A quantitative review and analysis[J]. *Field Crops Research*, 2012, 135: 10-21.
- [12] 石生伟, 李玉娥, 刘运通, 等. 中国稻田 CH_4 和 N_2O 排放及减排整合分析[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(14): 2923-2936. [Shi S W, Li Yu E, Liu Y T, et al. CH_4 and N_2O emission from rice field and mitigation options based on field measurements in China: An integration analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(14): 2923-2936.]
- [13] 刘晓雨, 李志鹏, 潘根兴, 等. 长期不同施肥下太湖地区稻田净温室效应和温室气体排放强度的变化[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(9): 1783-1790. [Liu X Y, Li Z P, Pan G X, et al. Greenhouse gas emission and C intensity for a long-term fertilization rice paddy in Tai Lake region, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(9): 1783-1790.]
- [14] 商庆银. 长期不同施肥制度下双季稻田土壤肥力与温室气体排放规律的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012. [Shang Q Y. Studies on Soil Fertility and Carbon Sequestration and Mitigation under Long-Term Fertilization in Chinese Double Rice-Cropping Systems[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.]
- [15] 石生伟, 李玉娥, 秦晓波, 等. 晚稻期间秸秆还田对早稻田 CH_4 和 N_2O 排放以及产量的影响[J]. *土壤通报*, 2011, (2): 336-341. [Shi S W, Li Y E, Qin X B, et al. Effect of rice straw incorporation of later rice season on CH_4 and N_2O emission and grain yield from following early rice field [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, (2): 336-341.]
- [16] 吴家梅, 纪雄辉, 彭华, 等. 不同种类有机肥施用对一季稻田 CH_4 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(8): 1688-

2017年1月

1694. [Wu J M, Ji X H, Peng H, *et al.* The effect of different organic manures treatments on methane emission from single-cropping paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(8): 1688-1694.]
- [17] 石生伟, 李玉娥, 秦晓波, 等. 不同施肥处理对红壤晚稻田 CH_4 排放的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(2): 103-108. [Shi S W, Li Y E, Qin X B, *et al.* CH_4 emission from late rice field of red clay soil under different fertilization treatments [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(2): 103-108.]
- [18] 刘金剑, 吴萍萍, 谢小立, 等. 长期不同施肥制度下湖南红壤晚稻田 CH_4 的排放[J]. *生态学报*, 2008, 28(6): 2878-2886. [Liu J J, Wu P P, Xie X L, *et al.* Methane emission from late rice fields in Hunan red soil under different long-term fertilizing systems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6): 2878-2886.]
- [19] 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 X B, Li Y E, Liu K Y, *et al.* Methane and nitrous oxide emission from paddy field under different fertilization treatments[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(7): 143-148.]
- [20] 侯晓莉. 不同施肥措施下双季稻田固碳减排研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012. [Hou X L. Study on Soil Carbon Sequestration and Emission Mitigation under Different Fertilization[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.]
- [21] 刘晓雨. 施用有机物料对农田固碳减排及生产力的影响-田间试验及整合研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013. [Liu X Y. Effects of Soil Organic Amendment on Productivity and Greenhouse Gas Mitigation of Croplands: Field Studies and Synthetic Analysis[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.]
- [22] 熊正琴, 邢光熹, 鹤田治, 等. 豆科绿肥和化肥氮对双季稻田氧化亚氮排放贡献的研究[J]. *土壤学报*, 2003, 40(5): 704-710. [Xiong Z Q, Xing G X, He T Z, *et al.* Nitrous oxide emissions from paddy soils as affected by incorporation of leguminous green manure and fertilization during double-cropping rice-growing season[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(5): 704-710.]
- [23] 李波. 不同有机无机肥配施对水稻生长及稻田温室气体排放的影响研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013. [Li B. Effect of Combined Application with Organic and Inorganic Fertilizers on Rice Growth and Greenhouse Gas Emission from Double-Cropping Paddy Fields[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2013.]
- [24] 王聪, 沈建林, 郑亮, 等. 猪粪化肥配施对双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放及其全球增温潜势的影响[J]. *环境科学*, 2014, 35(8): 3121-3127. [Wang C, Shen J L, Zheng L, *et al.* Effects of combined applications of pig manure and chemical fertilizers on CH_4 and N_2O emissions and their global warming potentials in paddy fields with double-rice cropping [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(8): 3121-3127.]
- [25] 马义虎. 有机肥对水稻根系生长和养分吸收及稻田温室气体排放的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2013. [Ma Y H. Effects of Organic Fertilizers on the Root Growth and Nutrient Absorption of Rice and Emission of Greenhouse Gases from Paddy Field [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2013.]
- [26] 石生伟, 李玉娥, 万云帆, 等. 不同氮、磷肥用量下双季稻田的 CH_4 和 N_2O 排放[J]. *环境科学*, 2011, 32(7): 1899-1907. [Shi S W, Li Y E, Wan Y F, *et al.* Observation for CH_4 and N_2O emissions under different rates of nitrogen and phosphate fertilization in double rice fields[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(7): 1899-1907.]
- [27] 张广斌, 马静, 马二登, 等. 尿素施用对稻田土壤甲烷产生、氧化及排放的影响[J]. *土壤*, 2010, 42(2): 178-183. [Zhang G B, Ma J, Ma E D, *et al.* Effects of urea application on methane production, oxidation and emission from a paddy soil[J]. *Soils*, 2010, 42(2): 178-183.]
- [28] 霍连杰, 纪雄辉, 吴家梅, 等. 有机肥施用对稻田甲烷排放的影响及模拟研究[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(10): 2084-2092. [Huo L J, Ji X H, Wu J M, *et al.* The effect of organic manures application on methane emission and its simulation in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(10): 2084-2092.]
- [29] 代光照, 李成芳, 曹凑贵, 等. 免耕施肥对稻田甲烷与氧化亚氮排放及其温室效应的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(9): 2166-2172. [Dai G Z, Li C F, Cao C G, *et al.* Effects of no-tillage and fertilization on paddy soil CH_4 and N_2O emissions and their greenhouse effect in Central China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(9): 2166-2172.]
- [30] 纪洋, 张晓艳, 马静, 等. 控释肥及其与尿素配合施用对水稻生长期 N_2O 排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(8): 2031-2037. [Ji Y, Zhang X Y, Ma J, *et al.* Effects of applying controlled-release fertilizer and its combination with urea on nitrous oxide emission during rice growth period[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(8): 2031-2037.]
- [31] Wang J Y, Chen Z Z, Ma Y C, *et al.* Methane and nitrous oxide emissions as affected by organic-inorganic mixed fertilizer from a rice paddy in southeast China[J]. *Soils*, 2013, 13(8): 1408-1417.
- [32] 张萍. 土壤管理对农田温室气体排放的效应研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2012. [Zhang P. The Effects of Soil Managements Affecting the Greenhouse Gas Emitted from Cropland[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2012.]
- [33] 黄明蔚. 稻麦轮作农田生态系统温室气体排放及机制研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2007. [Huang M W. Emission Process of Greenhouse Gases and Its Mechanism from the Paddy-Wheat Rotation Agro-Ecosystem[D]. Shanghai: East China Normal University, 2007.]
- [34] 张啸林. 不同稻田轮作体系下温室气体排放及温室气体强度研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013. [Zhang X L. Greenhouse Gases Emissions and Greenhouse Gas Intensity from Different Rice-Based Cropping Systems[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural

- University, 2013.]
- [35] 王海云, 邢光熹. 不同施氮水平对稻麦轮作农田氧化亚氮排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2631-2636. [Wang H Y, Xing G X. Effect of nitrogen fertilizer rates on nitrous oxide emission from paddy field under rice-wheat rotation [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2631-2636.]
- [36] 李露, 周自强, 潘晓健, 等. 氮肥与生物炭施用对稻麦轮作系统甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1095-1103. [Li L, Zhou Z Q, Pan X J, et al. Combined effects of nitrogen fertilization and biochar incorporation on methane and nitrous oxide emissions from paddy fields in rice-wheat annual rotation system [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(5): 1095-1103.]
- [37] 李广灏, 王子豹, 邱征, 等. 不同施肥处理方式对稻田甲烷排放的影响[J]. 安徽农学通报, 2016, 22(1): 54-58. [Li G H, Wang Z B, Qiu Z, et al. Impact of different fertilization practices on methane emission from paddy field [J]. *Anhui Agri. Sci. Bull.*, 2016, 22(1): 54-58.]
- [38] 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 Y F, Zhang J C, Zhou W, et al. Effects of controlled release fertilizer on nitrous oxide emission during winter wheat-growing season under no-tillage condition[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2014, 30(5): 1037-1043.]
- [39] Wassmann R, Schutz H, Papen H, et al. Quantification of methane emissions from Chinese rice fields (Zhejiang Province) as influenced by fertilizer treatment[J]. *Biogeochemistry*, 1993, 20(2): 83-101.
- [40] Yang X, Shang Q, Wu P, et al. Methane emissions from double rice agriculture under long-term fertilizing systems in Hunan, China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 137(3): 308-316.
- [41] Liu Y L, Zhou Z Q, Zhang X X, et al. Net global warming potential and greenhouse gas intensity from the double rice system with integrated soil-crop system management: A three-year field study [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 116: 92-101.
- [42] Yang B, Xiong Z Q, Wang J Y, et al. Mitigating net global warming potential and greenhouse gas intensities by substituting chemical nitrogen fertilizers with organic fertilization strategies in rice-wheat annual rotation systems in China: A 3-year field experiment[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 81: 289-297.
- [43] Zhao Z, Yue Y B, Sha Z M, et al. Assessing impacts of alternative fertilizer management practices on both nitrogen loading and greenhouse gas emissions in rice cultivation atmospheric environment[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 119: 393-401.
- [44] Xiang J, Liu D Y, Ding W X, et al. Effects of biochar on nitrous oxide and nitric oxide emissions from paddy field during the wheat growth season[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 104: 52-58.
- [45] Wang J Y, Zhang X L, Xiong Z Q, et al. Methane emissions from a rice agroecosystem in South China: Effects of water regime, straw incorporation and nitrogen fertilizer[J]. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2012, 93(1): 103-112.
- [46] Liu W, Hussain S, Wu L S, et al. Greenhouse gas emissions, soil quality, and crop productivity from a mono-rice cultivation system as influenced by fallow season straw management[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2016, 23(1): 315-328.
- [47] Xia L L, Wang S W, Yan X Y. 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 and Environment*, 2014, 197: 118-127.
- [48] Shang Q Y, Yang X X, Gao C M, et al. Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice-cropping systems: A 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(6): 2196-2210.
- [49] Zhu B, Yi L X, Hu Y G, et al. Effects of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) residue incorporation on CH₄ and N₂O emission from a double-rice paddy soil[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(9): 1537-1544.
- [50] Lin S, Iqbal J, Hu R G, et al. Nitrous oxide emissions from rape field as affected by nitrogen fertilizer management: A case study in Central China[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(9): 1775-1779.
- [51] Fedorov S. Get Data Graph Digitizer Version 2.23[EB/OL]. (2016-11-30) [2016-05-01]. <http://getdata-graph-digitizer.com/download.php>.
- [52] Rosenberg M S, Adams D C, Gurevitch J. Metawin: Statistical Software for Meta-Analysis Version 2.0[M]. Sunderland: Sinauer Associates Inc., 1999.
- [53] Liu C, Lu M, Cui J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1366-1381.
- [54] Pan G X, Li L Q, Wu L S, et al. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils[J]. *Global Change Biology*, 2003, 10(1): 79-92.
- [55] 逯非, 王效科, 韩冰, 等. 稻田秸秆还田: 土壤固碳与甲烷增排[J]. 应用生态学报, 2010, 21(1): 99-108. [Lu F, Wang X K, Han B, et al. Straw return to rice paddy: Soil carbon sequestration and increased methane emission[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1): 99-108.]
- [56] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2003, 23(6): 758-764. [Zou J W, Huang Y, Zong L G, et al. A field study on CO₂, CH₄ and N₂O emissions from rice paddy and impact factors[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(6): 758-764.]
- [57] 韩士杰, 董云社, 蔡祖聪. 中国陆地生态系统碳循环的生物地球化学过程[M]. 北京: 科学出版社, 2008. [Han S J, Dong Y S,

2017年1月

- Cai Z C. Biogeochemical Process of Carbon Cycling in Terrestrial Ecosystems in China[M]. Beijing: Science Press, 2008.]
- [58] 朱利群, 杨敏芳, 徐敏轮, 等. 不同施肥措施对我国南方稻田表土有机碳含量及固碳持续时间的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 87–95. [Zhu L Q, Yang M F, Xu M L, *et al.* Effects of different fertilization modes on paddy field topsoil organic carbon content and carbon sequestration duration in South China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(1): 87–95.]
- [59] 王毅勇, 陈卫卫, 赵志春, 等. 三江平原寒地稻田 CH₄、N₂O 排放特征及排放量估算[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 170–176. [Wang Y Y, Chen W W, Zhao Z C, *et al.* Characteristics and estimation of CH₄, N₂O emissions from cold paddy field in the Sanjiang Plain[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(10): 170–176.]
- [60] Wang Z P, Delaune R D, Lindau C W, *et al.* Methane production from anaerobic soil amended with rice straw and nitrogen fertilizers[J]. *Fertilizer Research*, 1992, 33(2): 115–121.
- [61] 薛福建, 濮超, 张冉, 等. 农作措施对中国稻田氧化亚氮排放影响的研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 1–9. [Xue F J, Pu C, Zhang R, *et al.* Review on management-induced nitrous oxide emissions from paddy ecosystems[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(11): 1–9.]

Effects of fertilization on greenhouse gas emissions in paddy fields in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River based on Meta-analysis

ZHU Liquan^{1,3}, WANG Chunjie², YANG Manjun², LI Jing³, CHEN Ligen³

(1. College of Rural Development, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

2. College of Economics and Management, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

3. College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Agricultural greenhouse emissions are an important source of emissions responsible for climate warming. To comprehensively evaluate the effect of fertilization management (Inorganic nitrogen fertilization (N), Inorganic nitrogen, phosphorus and potassium fertilization (NPK), Inorganic and organic fertilization (OF)) on greenhouse emissions, net emission reduction potential and greenhouse gas intensity we used 40 documents on greenhouse gas emissions in paddy fields in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River and 339 sets of data. A meta-analysis was conducted to determine the effects of the three fertilization modes on CH₄ and N₂O emissions, fertilization times and fertilization application. The results showed that the effects sizes of N, NPK and OF on annual CH₄ emissions were 0.24, 0.27 and 0.63, respectively. While the effect sizes of N, NPK and OF on annual N₂O emissions were 1.25, 1.26 and 1.41, respectively. The effect sizes of N, NPK and OF on CH₄ and N₂O emissions increased with increasing fertilization time. The effects size of OF on CH₄ and N₂O emissions showed an increase and then decrease with increasing fertilization; the N and NPK showed an increasing and decreasing trend respectively. In addition, the net warming potential of fertilization was OF > NPK > N, and CH₄ emissions were a large proportion of greenhouse gas emissions. The greenhouse gas intensity was OF > NPK > N. From the point of view of higher yields and greenhouse gas emission reduction, NPK is more appropriate than the other two fertilization modes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River.

Key words: fertilization; greenhouse; Meta-analysis; net warming potential; Middle and Lower Reaches of Yangtze River