

施肥模式对中国稻田氮素径流损失和产量影响的 Meta 分析

魏翠兰¹, 曹秉帅^{2*}, 韩 卉³, 谷 丰⁴

(1. 江苏开放大学环境生态学院, 江苏 南京 210036; 2. 生态环境部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042; 3. 廊坊师范学院生命科学学院, 河北 廊坊 065000; 4. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所 / 中国科学院山地表生过程与生态调控重点实验室, 四川 成都 610041)

摘 要: 优化施肥模式是减少稻田氮素径流损失, 降低农业面源污染风险, 确保作物产量的重要措施。采用 Meta 分析方法研究不同施肥模式 (施肥类型、施肥量和分施次数) 对稻田氮素径流损失和作物产量的影响, 筛选了 29 个同行评议研究论文, 共 109 组有效的配对试验数据进行分析。结果表明, 与不施肥相比, 化肥、有机肥替代和缓释肥替代分别增加氮素径流损失量 N 6.73、1.21 和 3.40 kg/hm²。与单施化肥相比, 有机肥和缓释肥替代分别显著降低 82.0% 和 49.5% 的氮素径流损失, 而对作物产量没有显著影响。同时, 单施化肥处理的氮素径流损失率 (4.34%) 显著高于有机肥替代 (2.33%) 和缓释肥替代 (2.04%)。施肥量的影响表现为, 当施肥量低于 N 240 kg/hm² 时氮素径流损失量没有明显差异, 95% 置信区间范围在 N 4.40 ~ 6.96 kg/hm²; 而施肥量高于 N 240 kg/hm² 时氮素径流损失量显著增加, 95% 置信区间范围增加为 N 7.17 ~ 11.25 kg/hm²。当稻田的施肥量为 N 120 ~ 180 kg/hm² 时, 可有效降低氮素径流损失, 同时维持较高的作物产量。化肥分施次数也对氮素径流有显著影响, 与氮肥一次性施入相比, 分施显著降低了氮素的径流损失量和损失率, 其中 2、3 和 4 次分施的氮素径流损失率均值分别为 1.87%、3.54% 和 3.21%, 显著低于单次施用的 10.20%。该研究结果为合理制定稻田氮素管理方案、减少氮素径流损失和农业面源污染物排放、提高氮素利用效率提供科学依据。

关键词: 水稻; 施肥; 氮素径流损失; 产量; Meta 分析

中国是水稻生产大国, 也是主要消费国之一, 2018 年水稻产量为 2.14 亿 t, 约占全世界的 30%^[1]。为了追求高的水稻产量, 稻田氮肥投入量常常高于作物需求量, 不仅浪费资源, 盈余的土壤氮易通过降雨流失, 进入水土污染环境, 成为农业面源污染的主要来源^[2-3]。有研究表明, 农业面源污染已导致我国太湖、巢湖等区域水体富营养化频发, 环境急剧恶化, 对该区域的饮水安全和生态环境安全产生威胁^[4-5]。有效控制该地区稻田氮素流失是降低农业面源污染物排放和防止水体污染的关键环节。

通过改变施肥模式, 可以达到降低稻田氮素径流损失、维持较高作物产量的目的^[6-8]。江苏太湖地区的研究表明, 与该区域传统施肥量相比, 减

氮 30% ~ 50% 显著降低了总氮径流损失, 而对作物产量没有明显影响^[9-10]。同时, 缓释肥可在减少稻田氮素投入量的情况下, 降低氮素径流损失^[11-12]。有机肥替代也可以达到与缓释肥相似的效果, 如马凡凡等^[13]在安徽省巢湖市研究了不同有机肥替代对稻田氮素径流损失和作物产量的影响, 通过合理设置有机肥替代化肥的比例, 可以在兼顾高产的同时有效降低氮素径流损失。闻轶等^[14]在上海市的研究也发现了类似的结果。一些学者还发现, 施肥次数能够对氮素径流产生显著影响, 与氮肥一次性施入相比, 分施显著降低了氮素的径流损失量和损失率^[4]。可见, 施肥类型 (化肥、有机和缓释肥)、施肥量和分施次数均对稻田氮素损失和作物产量有一定影响。

目前国内外对稻田径流损失的研究一般通过田间试验来进行, 试验结果受各试验点土壤类型、气候因素、田间管理等影响, 得到的结果存在一定差异。Meta 分析方法可归类总结同类型研究结果, 在综合考虑各个研究试验条件的基础上得到更加系统化的结论。因此, 有必要通过 Meta 分析在已有研

收稿日期: 2021-04-21; 录用日期: 2021-05-24

基金项目: 江苏省高等学校自然科学研究面上项目 (18KJB210003); 江苏省自然科学基金青年基金 (BK20200112)。

作者简介: 魏翠兰 (1989-), 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为绿肥与土壤质量提升。E-mail: 450816900@qq.com。

通讯作者: 曹秉帅, E-mail: cbs@nies.org。

究的基础上,全面评价施肥模式对稻田氮素径流损失和作物产量的影响,为提高稻田资源利用效率、减少氮素径流损失、降低农业面源污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据收集和分类

研究数据来源于中国知网 (www.cnki.net) 和 Web of Science (www.webofscience.com), 通过搜索关键词: 水稻、氮素损失、径流和产量, 筛选 2020 年 12 月 1 日以前经过同行评议的期刊论文。数据需要符合以下标准: (1) 研究为田间试验, 且包含有至少 1 个完整水稻生长季的氮素 (总氮) 径流损失数据; (2) 试验设置有不同施肥模式处理 (有机、无机、缓释肥等), 有具体的施肥管理信息 (施肥时间、施肥类型、施肥量、分施次数等);

(3) 试验设置有不施肥处理, 每个处理记录有重复数和标准差, 或两季及以上的数据。经筛选, 得到了 29 篇研究论文中共 109 组有效的配对试验数据, 提取的数据包括每季水稻的径流损失量和作物产量的重复数、均值和标准差以及相应的施肥管理信息。

合并试验地点相同的研究, 共有 24 个试验点, 各个试验点的地理位置、经纬度、处理设置和参考文献如表 1 所示。根据各研究试验处理的设置, 对文献中施肥处理方案归纳并分为 3 类: (1) 施肥种类: 化肥、有机肥替代和缓释肥替代; (2) 施肥水平: N 60 ~ 120、121 ~ 180、181 ~ 240、241 ~ 300、 ≥ 301 kg/hm²; (3) 施肥次数: 一次性施用、2 次分施、3 次分施和 4 次分施。收集的数据集将用于分析不同施肥处理对氮素径流损失和作物产量的影响。

表 1 Meta 分析所用数据集基本情况

序号	试验站点	经纬度	施肥处理 (N)	文献
1	苏州市, 中科院野外试验站	120° 37' E, 31° 18' N	施肥水平, 分施次数	[15]
2	苏州市, 望亭镇项路生态农场	120° 25' E, 31° 27' N	施肥水平, 缓释肥替代, 分施次数	[8, 10]
3	无锡市, 胡埭镇龙岩村	120° 06' E, 31° 31' N	施肥水平, 有机肥替代, 缓释肥替代	[7]
4	常熟市, 中科院农业生态试验站	120° 42' E, 31° 33' N	施肥水平, 缓释肥替代	[11, 16]
5	六合市, 江苏省农科院试验基地	118° 36' E, 32° 29' N	有机肥替代	[17]
6	丹阳市, 延陵镇	119° 32' E, 32° 00' N	施肥水平, 缓释肥替代, 分施次数	[18]
7	昆山市, 河海大学野外试验研究基地	120° 57' E, 31° 15' N	施肥水平, 缓释肥替代	[5]
8	宜兴市, 大浦镇渭淩村	119° 55' E, 32° 16' N	施肥水平	[9, 19]
9	上海市, 青浦区农业水利技术推广站	121° 27' E, 31° 14' N	施肥水平, 有机肥替代	[14]
10	巢湖市, 居巢区	117° 48' E, 31° 39' N	分施次数	[4]
11	巢湖市, 宋圩农田示范基地	117° 40' E, 31° 39' N	有机肥替代	[13]
12	长沙市, 长沙县干杉乡	113° 11' E, 28° 08' N	施肥水平	[20]
13	长沙市, 湖南省土肥研究所	113° 05' E, 28° 11' N	缓释肥替代	[21]
14	浏阳市, 湖南农业大学试验基地	113° 49' E, 28° 19' N	施肥水平, 有机肥替代	[22]
15	浏阳市, 沿溪镇花园村	113° 49' E, 28° 19' N	施肥水平, 缓释肥替代	[23]
16	岳阳市, 湘阴县农业科学院试验基地	112° 54' E, 28° 41' N	缓释肥替代	[24]
17	荆门市, 太湖港农场	112° 08' E, 30° 36' N	施肥水平, 缓释肥替代, 分施次数	[25]
18	松滋市, 江大学野外试验基地	111° 47' E, 30° 07' N	施肥水平	[6]
19	灵武市, 灵武农场	106° 17' E, 38° 07' N	缓释肥替代	[26]
20	武穴市, 大山镇和梅川镇	115° 37' E, 29° 59' N	施肥水平, 缓释肥替代, 分施次数	[12, 27]
21	广州市, 广州农科院大风试验站	113° 20' E, 23° 08' N	施肥水平, 分施次数	[28]
22	盘锦市, 鼎翔农工建集团公司农场	122° 11' E, 40° 44' N	施肥水平, 有机肥替代	[29]
23	银川市, 裕稻生态农业科技公司基地	106° 15' E, 38° 16' N	施肥水平, 有机肥替代, 缓释肥替代	[30-31]
24	伊犁哈萨克自治州, 察布查尔锡伯县	80° 06' E, 48° 65' N	施肥水平, 有机肥替代	[32]

1.2 数据处理与分析

利用 R 中的“Meta”包进行分析, 计算得到的异质性指数 $I^2 > 75\%$, 说明异质性显著, 因此本文采用了随机效益模型。研究选中均数差 MD 作为效应量, 其计算公式为:

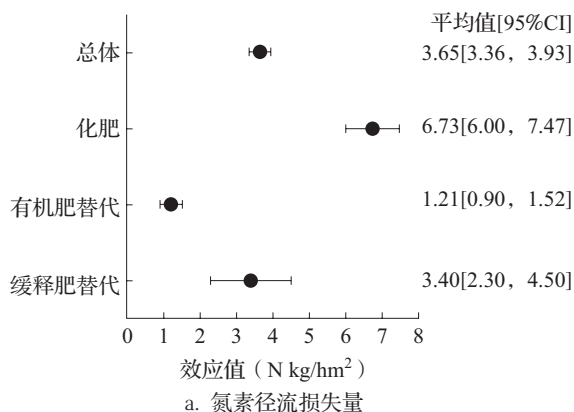
$$M_i = X_i - X_c \quad (1)$$

其中, M_i 为第 i 组配对试验的效应量, N kg/hm^2 ; X_i 为第 i 组配对试验施肥处理中单季水稻的氮素径流损失量 (或者产量) 均值, N kg/hm^2 (或 kg/hm^2); X_c 为第 i 组配对试验空白处理中单季水稻的氮素径流损失量 (或者产量) 均值, N kg/hm^2 (或 kg/hm^2)。

M_i 值反映了施肥措施导致的稻田氮素径流损失量的绝对值, 为了更加全面分析施肥对稻田氮素径流损失的影响, 可将 M_i 转为氮素径流损失率 R_i :

$$R_i = 100 \times M_i / N_i \quad (2)$$

其中, N_i 为第 i 组配对试验中施肥处理的氮素投入总量, N kg/hm^2 ; 氮素径流损失率 R_i 反映了氮素径流损失占总氮投入的百分比, %。



计算出各组的 M_i 和 R_i 后, 采用“Meta”包中的 metacout 函数合并效应量, 并计算相应的 95% 置信区间。如处理间效应量的 95% 置信区间有重叠, 则认为处理间没有显著差异, 反之则存在显著差异。

2 结果与分析

2.1 施肥种类对氮素径流损失的影响

施肥显著增加了氮素径流损失量 (每季 $\text{N } 3.65 \text{ kg/hm}^2$), 且不同施肥种类增加的幅度有所不同 (图 1a)。化肥、有机肥替代和缓释肥替代分别增加氮素径流损失量 $\text{N } 6.73$ 、 1.21 和 3.40 kg/hm^2 , 3 种施肥类型的 95% 置信区间均不重叠, 且两两之间差异显著。说明与化肥处理相比, 有机肥和缓释肥替代均能显著降低氮素径流损失量, 其中, 有机肥的降低效果最明显。施肥增加了氮素径流损失量, 但也显著增加了作物产量 (2769 kg/hm^2), 不同施肥种类的增产效果无显著差异, 化肥、有机肥替代和缓释肥替代分别增加产量 2659 、 2752 和 2957 kg/hm^2 (图 1b)。

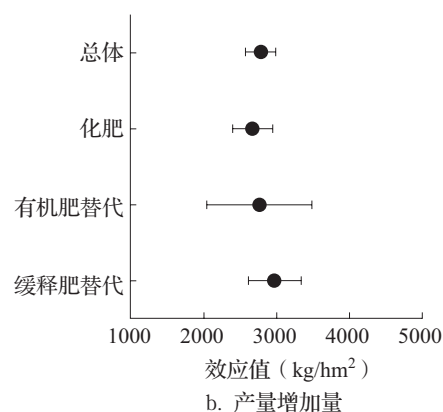


图 1 施肥种类对氮素径流损失量和产量的影响

施肥种类也影响了氮素径流损失率, 整体氮肥径流损失率为 3.36% , 95% 置信区间为 $3.02\% \sim 4.25\%$, 化肥处理的氮素径流损失率 (4.34%) 显著高于有机肥替代 (2.33%) 和缓释肥替代 (2.04%)。有机肥替代和缓释肥替代之间的氮素径流损失率没有显著差异 (图 2)。上述结果说明, 有机肥替代和缓释肥替代均能有效降低氮素径流损失量和氮素径流损失率, 而作物产量与单施化肥之间没有显著差异。

2.2 施肥量对氮素径流损失的影响

施肥量对氮素径流损失量的影响如图 3a 所示, 当施肥量低于 $\text{N } 240 \text{ kg/hm}^2$ 时氮素径流损失量没

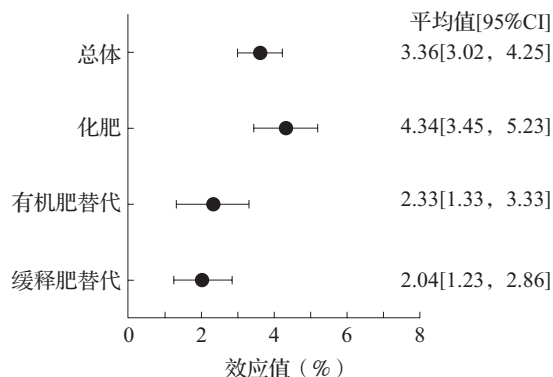


图 2 施肥种类对氮素径流损失量比例的影响

有明显差异, 95% 置信区间范围为 N 4.40 ~ 6.96 kg/hm²; 而施肥量高于 N 240 kg/hm² 时氮素径流损失量显著增加, 均值范围为 N 7.17 ~ 11.25 kg/hm²。作物产量也受施肥量的影响, 当施肥量从 N 60 ~ 120 kg/hm² 升高到 N 180 ~ 240 kg/hm² 时, 作物产量显著增加, 均值从 N 2094 kg/hm² 增加到 N 3050 kg/hm² (图 3b); 而当进一步增加施肥量时 (>N 240 kg/hm²), 产量不再显著增加, 说明施肥量 N 120 ~ 160 和 180 ~ 240 kg/hm² 可以满足水稻生长

所需氮素。

施肥量对氮素径流损失率没有明显规律, 表现为施肥量低于 N 300 kg/hm² 时没有明显差异, 且存在较大的变异, 95% 置信区间范围为 2.01% ~ 13.30% (图 4); 而高于 N 300 kg/hm² 时, 氮素径流损失率显著降低, 可能是由于施肥量大, 绝大部分的氮素残留在土壤中, 或者以其他形式损失。综上所述, 施肥量 N 120 ~ 180 kg/hm² 为水稻的最佳施肥范围, 可显著提高作物产量, 同时降低氮素径流损失。

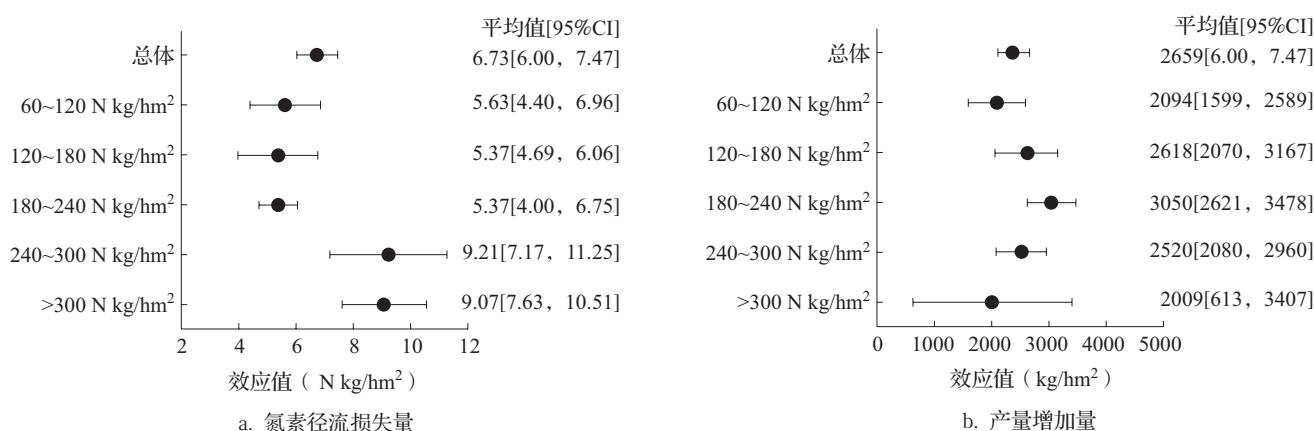


图 3 施肥量对氮素径流损失量和产量的影响

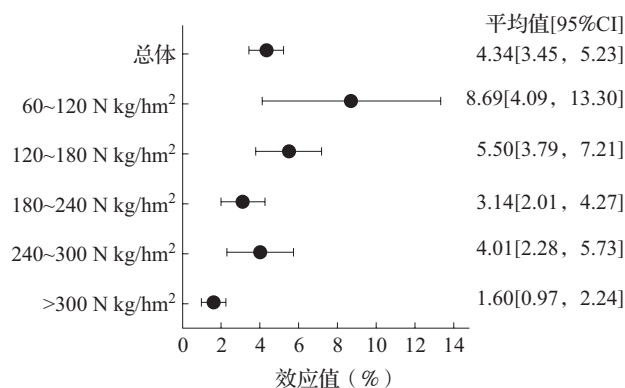
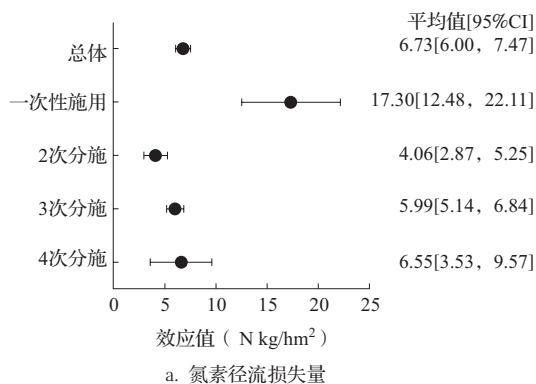


图 4 施肥量对氮素径流损失量比例的影响



2.3 分施次数对氮素径流损失的影响

施肥次数显著影响了氮素径流损失量, 一次性施肥的氮素径流损失量最高, 为 N 17.3 kg/hm², 明显高于其他分施处理 (图 5a)。分施 2、3 和 4 次的氮素径流损失量均值分别为 N 4.06、5.99 和 6.55 kg/hm², 随着分施次数的增加, 氮素径流损失量小幅增加, 但各分施处理间无显著差异 (图 5a)。其中, 分施 2 次的作物产量增加量最大, 但分施次数对增产效应没有明显差异 (图 5b)。

施肥次数对氮素径流损失率的影响表现出与径

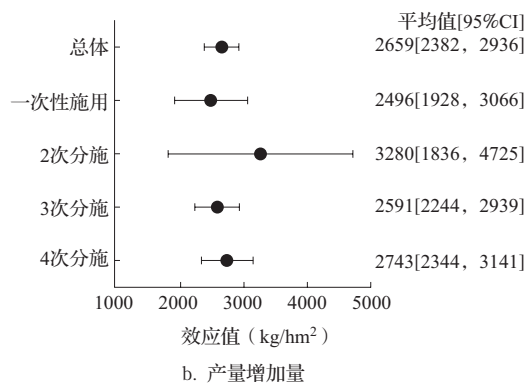


图 5 施肥次数对氮素径流损失量和产量的影响

流损失量相似的规律, 一次性施用的氮素径流损失率为 7.18% ~ 13.23%, 明显高于其他分施处理 (图 6)。分施 2、3 和 4 次的氮素径流损失率均值分别为 1.87%、3.54% 和 3.21%, 差异不显著。

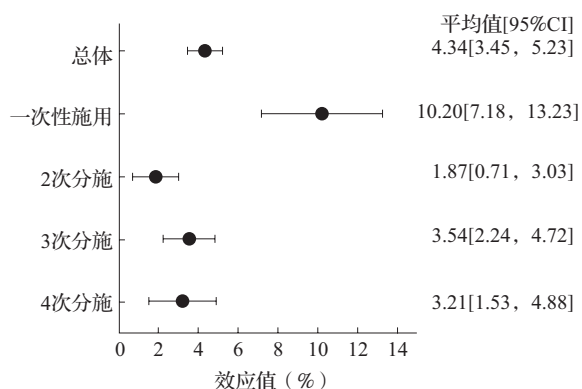


图 6 施肥次数对氮素径流损失率的影响

3 讨论

施肥模式主要通过调控稻田田面水中氮素浓度影响氮素径流损失。氮肥类型、施用量和分施方案均与稻田田面水氮素浓度峰值相关^[33]。施肥后田面水氮素浓度在短期内急剧升高, 3 d 内稻田田面水氮素浓度处于较高状态, 该阶段发生径流会导致氮素的大量流失, 之后逐渐下降趋于稳定^[20]。与化肥相比, 缓释肥可有效控制氮素释放, 降低田面水氮素浓度, 从而显著降低氮素径流损失^[8, 21, 33]。湖北省武穴市的研究发现, 与传统化肥相比, 缓释肥显著降低了稻田田面水浓度, 减少了 8% ~ 58% 的稻田氮素径流损失, 并维持了较高的作物产量^[12]。在江苏太湖地区的研究也发现, 缓释肥替代普通尿素可有效降低稻田田面水氮浓度, 从而降低了氮素径流损失^[8]。闻轶等^[14]在上海市青浦区的研究表明, 与化肥处理相比, 有机肥替代显著降低了田面水氮素浓度, 减少了 39.7% 的氮素径流损失。在等氮情况下, 单施化肥的稻田田面水总氮浓度显著高于施用缓释肥处理^[33]。同时, 与单施化肥相比, 缓释肥还可减少水稻田 50% 的氮素投入量, 显著降低氮素径流 73.5% ~ 80.1%, 且维持较高的作物产量, 是一种高效和环保的肥料^[11]。本研究得出与单施化肥相比, 缓释肥替代降低了 49.5% 氮素径流损失。同时, 有机肥替代也可有效降低稻田田面水氮素浓度, 进而降低氮素径流损失的风险^[11, 13, 29]。马凡凡等^[13]在安徽巢湖流域的研究结果表明, 施用化肥的氮素径流损失总量和损

失率均最高, 分别为 N 9.43 kg/hm² 和 4.91%, 有机肥替代 50% 化肥可以在兼顾高产的同时有效降低氮素径流损失。陈淑峰等^[29]在东北典型稻区研究了有机肥替代对稻田氮素径流损失的影响, 发现有机肥处理的氮素径流损失仅为 N 1.93 kg/hm², 显著低于常规化肥处理的 N 5.89 kg/hm²。上述结果与本研究的结果相似, 与单施化肥相比, 有机肥替代分别降低了 82.0% 的氮素径流损失, 并维持了较高的作物产量。

过量的氮肥施用, 增加了土壤氮素径流损失量, 是导致中国南方地区农业非点源污染的重要因素。在太湖地区不同施氮水平的田间试验结果表明, 当施肥量从 N 330 kg/hm² 降低到 N 180 kg/hm² 时, 氮素径流损失量从 N 9.30 kg/hm² 降低到 N 5.98 kg/hm², 减少了将近 35.7% 的氮素径流损失, 而作物产量没有显著降低^[16]。刘红江等^[10]在相同地区的研究也发现, 随着施肥量的减少, 氮素径流损失量降低, 但损失率增加, 其中减氮 30% 处理减少了 19.6% 的氮素径流损失, 同时作物产量没有明显降低。与该区域常规施肥量 N 270 kg/hm² 相比, 减氮 50% 并没有显著降低产量, 但显著降低了总氮径流损失, 综合考虑农学和环境效益, 建议该地区最佳的施肥量为 N 135 kg/hm²^[9]。Wu 等^[34]通过总结中国主要稻区 1177 个田间试验数据发现, 中国各稻区的最佳施肥量在 N 114 ~ 224 kg/hm² 之间, 平均值为 N 167 kg/hm², 在最佳施肥模式下, 可以降低约 56% 的氮肥投入, 并确保较高的作物产量。本研究也发现, 当稻田的施肥量在 N 120 ~ 180 kg/hm² 时, 可有效降低氮素径流损失, 同时维持较高的作物产量。除施肥量外, 化肥的分施次数也显著影响了稻田氮素径流损失。巢湖流域的研究表明, 与氮肥一次性施用相比, 分施 2、3 和 4 次分别降低了 30.5%、52.7% 和 59.7% 的氮素径流损失, 且不同分施次数间作物产量无显著差异^[4]。这与本研究结果类似, 与氮肥一次性施入相比, 分施显著降低了氮素径流损失量和损失率, 其中分施 2、3 和 4 次之间差异不显著。这可能是由于分施较好地匹配了作物的生长需氮量, 提高了氮素利用效率, 从而减少了氮素径流损失量。同时, 每次分施的化肥用量, 也是影响土壤氮素径流损失和作物生长的重要因素^[35]; 然而, 目前在这方面的研究数量较少, 可收集的数据集相对较小, 无法较好地分析基追比等对氮素径流损失的影响, 所以需要在今后的工作

中进一步完善。

4 结论

研究通过 Meta 分析方法定量了不同施肥类型、施肥量和分施次数对稻田氮素径流损失和作物产量的影响。研究结果显示,与单施化肥相比,有机肥替代和缓释肥替代显著降低了氮素损失量和损失率,并维持了较高的作物产量。在综合考虑氮素径流损失量和作物产量基础上,得到最佳施肥量为 N 120 ~ 180 kg/hm²。化肥分施相比一次性施用也显著降低了氮素径流损失。上述研究结果可为稻田氮素管理决策,及稻区农业面源污染治理提供科学依据与参考。

参考文献:

- [1] FAO, FAOSTAT [DB/OL], 2020-5-24. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
- [2] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2014, 37 (7): 1008-1017.
- [3] 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 (4): 1-11.
- [4] 张丽娟,马有华,施英尧,等. 灌溉与施肥对稻田氮磷径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 12 (6): 7-12.
- [5] Yang S H, Peng S Z, Xu J Z, et al. Nitrogen loss from paddy field with different water and nitrogen managements in Taihu Lake Region of China [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2013, 44 (16): 2393-2407.
- [6] 王小燕,王隼,田小海,等. 纳米碳增效尿素对水稻面水氮素流失及氮肥利用率的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27 (1): 106-111.
- [7] Xue L H, Yu Y L, Yang L Z. Maintaining yields and reducing nitrogen loss in rice-wheat rotation system in Taihu Lake region with proper fertilizer management [J]. Environmental Research Letters, 2014, 9 (11): 115010.
- [8] 刘红江,郭智,郑建初,等. 不同类型缓控释肥对水稻产量形成和稻田氮素流失的影响[J]. 江苏农业学报, 2018, 34 (4): 783-789.
- [9] 乔俊,汤芳,朱励军,等. 太湖地区水稻产量、根圈土壤矿物质氮及氮素径流损失对氮肥的响应[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34 (11): 2140-2145.
- [10] 刘红江,郭智,郑建初,等. 太湖地区氮肥减量对水稻产量和氮素流失的影响[J]. 生态学报, 2017, 36 (3): 713-718.
- [11] Wang X Z, Zhu J G, Gao R, et al. Nitrogen cycling and losses under rice-wheat rotations with coated urea and urea in the Taihu Lake region [J]. Pedosphere, 2007, 17 (1): 62-69.
- [12] Li P F, Lu J W, Wang Y, et al. Nitrogen losses, use efficiency, and productivity of early rice under controlled-release urea [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 251: 78-87.
- [13] 马凡凡,邢素林,甘曼琴,等. 有机肥替代化肥对水稻产量、土壤肥力及农田氮磷流失的影响[J]. 作物杂志, 2019 (5): 89-96.
- [14] 闻轶,张翰林,谢剑炜,等. 不同施肥处理对稻田系统氮素流失的影响[J]. 科技通报, 2011, 27 (4): 549-553.
- [15] Cao Y S, Tian Y H, Yin B, et al. Improving agronomic practices to reduce nitrate leaching from the rice-wheat rotation system [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 195: 61-67.
- [16] Tian Y H, Yin B, Yang L Z, et al. Nitrogen runoff and leaching losses during rice-wheat rotations in Taihu lake region, China [J]. Pedosphere, 2007, 17 (4): 445-456.
- [17] 孙国峰,张丽萍,周炜,等. 连续施用猪粪有机肥的高产稻田氮磷钾径流流失特征[J]. 江苏农业科学, 2018, 46 (23): 349-351.
- [18] Ke J, He R C, Hou P F, et al. Combined controlled-released nitrogen fertilizers and deep placement effects of N leaching, rice yield and N recovery in machine-transplanted rice [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 265: 402-412.
- [19] Sun H J, Min J, Zhang H L, et al. Biochar application mode influences nitrogen leaching and NH₃ volatilization losses in a rice paddy soil irrigated with N-rich wastewater [J]. Environmental Technology, 2018, 39 (16): 2090-2096.
- [20] 石丽红,纪雄辉,李洪顺,等. 湖南双季稻田不同氮磷施用量的径流损失[J]. 中国农业气象, 2010, 31 (4): 551-557.
- [21] 纪雄辉,郑圣先,鲁艳红,等. 控释氮肥对洞庭湖区双季稻田表面水氮素动态及其径流损失的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18 (7): 1432-1440.
- [22] 朱文博,刘鸣达,肖珣,等. 化肥配施有机肥对早稻产量及稻田氮素归趋的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2019, 50 (6): 728-733.
- [23] 田昌,周旋,刘强,等. 控释尿素减施对双季稻田氮素渗漏淋失的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29 (10): 3267-3274.
- [24] 杨益新. 专用配方肥对稻田氮磷径流损失及水稻产量的影响[J]. 湖南农业科学, 2011, 7 (32): 42-44.
- [25] 丁武汉,谢海宽,徐驰,等. 一次性施肥技术对水稻-油菜轮作系统氮素淋失特征及经济效益的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30 (4): 1097-1109.
- [26] 张爱平,高霁,刘汝亮,等. 应用于水稻生产的增效减负环保型施肥技术比对——以宁夏引黄灌区为例[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32 (2): 175-184.
- [27] Li P F, Lu J W, Hou W F, et al. Reducing nitrogen losses through ammonia volatilization and surface runoff to improve apparent nitrogen recovery of double cropping of late rice using controlled release urea [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24 (12): 11722-11733.

- [28] Liang X Q, Chen Y X, Nie Z Y, et al. Mitigation of nutrient losses via surface runoff from rice cropping systems with alternate wetting and drying irrigation and site-specific nutrient management practices [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20 (10): 6980–6991.
- [29] 陈淑峰, 孟凡乔, 吴文良, 等. 东北典型稻区不同种植模式下稻田氮素径流损失特征研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20 (6): 728–733.
- [30] 刘汝亮, 张爱平, 李友宏, 等. 长期配施有机肥对宁夏引黄灌区水稻产量和稻田氮素淋失及平衡特征的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34 (5): 947–954.
- [31] 刘汝亮, 王芳, 张爱平, 等. 控释氮肥全量基施对宁夏引黄灌区水稻氮素利用效率和淋失的影响 [J]. *水土保持学报*, 2019, 33 (5): 251–256.
- [32] Meng F Q, Olesen J E, Sun X P, et al. Inorganic nitrogen leaching from organic and conventional rice production on a newly claimed Calciustoll in Central Asia [J]. *PLOS ONE*, 2014, 9 (5): 1–10.
- [33] 金树权, 陈若霞, 汪峰, 等. 不同氮肥运筹模式对稻田田面水氮浓度和水稻产量的影响 [J]. *水土保持学报*, 2020, 34 (1): 242–248.
- [34] Wu L, Chen X P, Cui Z L, et al. Improving nitrogen management via a regional management plan for Chinese rice production [J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10 (9): 95011.
- [35] Shi X R, Hu K L, Batchelor W D, et al. Exploring optimal nitrogen management strategies to mitigate nitrogen losses from paddy soil in the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 228: 105877.

Effects of different N management practices on N runoff loss and yield in rice production system based on Meta-analysis in China

WEI Cui-lan¹, CAO Bing-shuai^{2*}, HAN Hui³, GU Feng⁴ (1. College of Environment and Ecology, Jiangsu Open University, Nanjing Jiangsu 210036; 2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing Jiangsu 210042; 3. College of Life Science, Langfang Normal University, Langfang Hebei 065000; 4. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu Sichuan 610041)

Abstract: Developing optimized nitrogen management practice is crucial for mitigating nitrogen runoff loss and reducing the risk of agricultural non-point source pollution, and ensuring crop yield in paddy rice system. A meta-analysis was conducted to analyze the effects of different nitrogen management practices on nitrogen runoff loss and crop yield. A total of 29 peer-reviewed papers and 109 treatment pairs were selected by a global literature review. Results showed that chemical nitrogen fertilizer, organic nitrogen fertilizer substitution, and slow-release nitrogen fertilizer substitution increased nitrogen runoff loss by N 6.73, 1.21 and 3.40 kg/hm², respectively, compared with no fertilization treatments. Compared with the single application of chemical nitrogen fertilizer, organic nitrogen fertilizer and slow-release nitrogen fertilizer substitutions decreased 82.0% and 49.5% of nitrogen runoff loss, respectively, without reduction in crop yield. Moreover, the ratio of nitrogen runoff loss to total nitrogen input of organic nitrogen fertilizer (2.33%) and slow-release nitrogen fertilizer (2.04%) substitution treatments was significant smaller than that of chemical nitrogen fertilizer treatments (4.34%). Under different nitrogen application rates, the amount of nitrogen runoff loss showed no significant difference when the nitrogen application rates were less than N 240 kg/hm², and within the 95% confidence interval of N 4.40 to 6.96 kg/hm². And the amount of nitrogen runoff loss increased significantly with the nitrogen application rate when nitrogen input was above N 240 kg/hm². The nitrogen application rates from N 120 to 180 kg/hm² was recommend to minimize nitrogen runoff loss and meanwhile maintaining high crop yield. In addition, the fertilization times also significantly impacted nitrogen runoff loss. Two, three and four split applications significantly reduced nitrogen runoff loss, with the average ratios of 1.87%, 3.54% and 3.21%, respectively, compared to one-off application (10.20%). These results provide decision supports for developing best N management practices in paddy rice system.

Key words: rice; fertilization; nitrogen runoff loss; yield; Meta-analysis