

郭智,刘红江,张岳芳,等.不同施肥模式对麦稻两熟农田磷素径流流失和麦稻产量的影响[J].上海农业学报,2021,37(1):87-92.

不同施肥模式对麦稻两熟农田磷素径流流失和麦稻产量的影响

郭智,刘红江,张岳芳,郑建初,陈留根,王鑫,盛婧*

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部种养结合重点实验室,南京210014)

摘要:采用田间小区定位试验研究自然降雨条件下农户习惯性施肥(CK)、减量施肥(T1)及优化施肥(T2)等不同施肥模式对太湖流域麦稻两熟农田土壤磷素径流流失特征和麦稻产量的影响。结果表明:麦稻轮作农田地表径流排水主要分布于强降雨集中的水稻生长季,与降水量呈显著线性正相关关系。磷素径流流失集中在稻季,各处理的流失量占周年流失总量的66.65%—75.05%。在农户习惯性施肥(CK)条件下,麦季径流总磷平均质量浓度(0.36 mg/L)显著高于稻季(0.19 mg/L),但磷素径流流失量(0.47 kg/hm²)却显著低于稻季(1.40 kg/hm²)。减量施肥(T1)和优化施肥(T2)模式处理可显著降低麦季、稻季径流磷素质量浓度和麦稻周年磷素径流流失量。与CK相比,T1和T2处理显著降低麦稻周年TP径流流失量,降幅达22.62%和44.54%。在CK条件下,麦稻两熟农田磷素周年径流偏流失率达119.06 mg/kg,T1和T2处理显著降低,偏流失率降幅达17.95%和41.22%。与CK相比,麦稻产量在T1、T2处理下均显著下降,T1与T2处理间产量无显著差异。可见,麦稻轮作种植模式下,稻季不施磷具有养分减排与作物稳产的协同效应。

关键词:麦稻两熟农田;磷;地表径流;麦稻产量

中图分类号:S511 文献标志码:A 文章编号:1000-3924(2021)01-087-06

Effects of different fertilization modes on phosphorus loss by surface runoff and grain yields of wheat and rice in the winter wheat-paddy rice rotation fields

GUO Zhi, LIU Hongjiang, ZHANG Yuefang, ZHENG Jianchu, CHEN Liugen, WANG Xin, SHENG Jing*

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory for Crop and Animal Integrated Farming of Ministry of Rural Agriculture, Nanjing 210014, China)

Abstract: A field plot experiment was performed to study the effects of different fertilization modes on the characteristics of phosphorus (P) losses by surface runoff, grain yields of wheat and rice under straw return in a winter wheat-paddy rice rotation field in Taihu Lake Basin under natural rainfall conditions. The results showed that surface runoff events were mainly distributed in the rice growing season with heavy rainfall, which showed a significant positive linear correlation between the quantity of surface runoff water and rainfall capacity. And phosphorus (TP) losses by surface runoff were also mainly distributed in the rice growing season, which accounted for 66.65%—75.05% of TP losses during the whole monitoring period including the wheat and rice growing seasons. In CK (conventional fertilizer application) treatment, the average TP concentration of surface runoff water in the wheat growing season (0.36 mg/L) was significantly higher than that of rice growing season (0.19 mg/L), but TP loss (0.47 kg/hm²) was significantly lower than that of rice growing season (1.40 kg/hm²). Compared with CK, T1 and T2 could significantly reduce TP concentrations of surface runoff water during the wheat and rice

收稿日期:2019-03-08

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFD0300908-02);农业农村部种养结合重点实验室开放基金(KF2018-05)

作者简介:郭智(1981—),男,博士,副研究员,主要从事农田生态与资源利用研究。E-mail:Guozhi703@163.com

*通信作者,E-mail:nkysj@hotmail.com

growing seasons, and TP losses during the whole monitoring period including the wheat and rice growing seasons. In which, compared with CK, T1 and T2 significantly reduced TP losses by 22.62% and 44.54% during the whole monitoring period, respectively. Furthermore, the partial factor productivity of phosphorus (PFPP) for wheat and rice grain reached 119.06 mg/kg under CK treatment, and T1, T2 significantly reduced PFPP by 17.95% and 41.22%, respectively. Moreover, compared with CK, grain yields of wheat and rice decreased significantly under T1 and T2, but no significant difference was found between T1 and T2 in wheat grain yield and annual yield of wheat and rice grain. These results suggested that no P application during rice growing season had synergistic effect of phosphorus reduction and stable crop yield in the winter wheat-paddy rice rotation field.

Key words: Winter wheat-paddy rice rotation field; Phosphorus (P); Surface runoff; Grain yields of wheat and rice

麦稻轮作是一种重要的种植模式,主要在东亚和南亚的亚热带-暖温带地区推行,以在中国的推行面积最大,常年约为 $1.30 \times 10^7 \text{ hm}^2$ [1]。江苏省麦稻轮作年种植面积约 $1.30 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 约占耕地面积的 35% [2], 且麦稻两大作物对全省粮食产量的贡献率高达 85.9% [3]。因此,麦稻轮作农田的可持续生产对保证江苏乃至全国的粮食安全至关重要。然而,“高产”极大地依赖于“高投入”。据报道,苏南太湖流域耕种面积仅占全国的 0.4%, 而化肥消费量却高达全国用量的 1.3% [4]。持续高量肥料投入使得氮磷养分表层富集导致的负面生态效应远高于作物的产量增益 [5], 对农田周边水体环境产生潜在威胁。众所周知,磷是水体富营养化的关键限制因子,而农田径流磷流失是其重要面污染源 [6]。据估计,农业面源排放磷素对太湖水体污染的贡献率达 15.1%, 其中农田流失量对面源污染贡献率约为 20% [7]。因此,建立麦稻轮作农田土壤养分径流减排技术体系对太湖流域水体生态环境健康可持续发展具有重要意义。

目前,针对麦稻轮作农田磷素径流流失特征及其影响因素的研究较多,主要集中在磷素流失量 [8-12]、流失敏感时期 [13-14]、田间耕作 [15]、肥料配施 [14, 16-17]、水分管理 [18]、土壤改良剂 [19] 及田间工程应用 [20] 等磷素减排措施及其环境效应方面。然而,从麦稻轮作农田养分减排等环境效应与作物产量等农学效应协调统一的角度出发,系统研究不同施肥模式对麦稻轮作农田土壤磷素径流流失特征与作物产量影响的田间试验报道较少。因此,本研究以太湖流域典型麦稻轮作农田为研究对象,通过田间小区定位试验研究自然降雨条件下不同施肥模式对麦稻轮作农田土壤磷素径流流失特征与作物产量的影响,以期以太湖流域农业面源污染源头控制技术体系的建立提供一定的科学依据。

1 材料与方方法

1.1 试验点概况

试验点设在江苏省南京市溧水区白马镇江苏省农业科学院植物科学基地 (31°36'N, 119°11'E), 位于南京市溧水区东南部,属北亚热带向中亚热带的过渡区,年均气温 15.5 °C,年日照时间 2 145.8 h,年降水量 1 036.9 mm,年无霜期 237 d。试验时间为 2015 年 10 月至 2016 年 6 月的小麦生长季和 2016 年 6 月至 10 月的水稻生长季。试验田土壤属黄棕壤,基本理化性状为: pH (6.21 ± 0.05), 有机质 (16.62 ± 3.15) g/kg, 全 N (0.87 ± 0.01) g/kg, 全 P (0.24 ± 0.01) g/kg, 速效氮 (35.16 ± 1.58) mg/kg, 速效磷 (11.84 ± 2.23) mg/kg, 速效钾 (89.23 ± 3.84) mg/kg。

1.2 试验处理

根据当地农户稻麦种植施肥水平与田间管理情况,设置农户习惯性施肥 (CK)、减量施肥 (T1) 和优化施肥 (T2) 3 种施肥模式处理,各施肥模式下施肥量和肥料运筹方式如表 1 所示。

表 1 不同施肥模式下肥料施用量和肥料运筹方式
Table 1 Fertilizer application rate and nutrients input in the study

处理	小麦季		水稻季	
	施肥量/(kg·hm ⁻²)	氮肥运筹(基肥:穗肥)	施肥量/(kg·hm ⁻²)	氮肥运筹(基肥:穗肥)
CK	N 270, P ₂ O ₅ 135, K ₂ O 135	6:4	N 360, P ₂ O ₅ 112.5, K ₂ O 112.5	6:4
T1	N 225, P ₂ O ₅ 90, K ₂ O 90	7:3	N 270, P ₂ O ₅ 67.5, K ₂ O 112.5	7:3
T2	N 225, P ₂ O ₅ 90, K ₂ O 90	7:3	N 270, K ₂ O 112.5	7:3

小麦季 P、K 肥作基肥一次施入, N 肥用尿素(含 N 46%) 依处理施用, P、K 肥用复合肥(含 N 15%, P_2O_5 15%, K_2O 15%)。水稻季 CK 处理中 P、K 以复合肥(含 N 15%, P_2O_5 15%, K_2O 15%) 施入, 基肥 60%, 促花肥 40%; T1 处理中 P、K 也以 45% 复合肥(含 N 15%, P_2O_5 15%, K_2O 15%) 形式施入, P 肥全作基肥, 剩余 K 肥作促花肥施用, 以氯化钾(含 K_2O 60%) 形式施入; T2 处理中, K 肥作基肥施用 60%, 作促花肥施用 40%, 均以氯化钾(含 K_2O 60%) 形式施入, N 肥用尿素(含 N 46%) 依处理施用。

小麦品种选用‘宁麦 16’, 2015 年 11 月 3 日播种, 撒播, 播种量 $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 于 2016 年 5 月 30 日收获。基肥施用时间为 2015 年 11 月 1 日, 于 2016 年 3 月 3 日和 4 月 2 日追施返青拔节肥和穗肥。水稻品种选用‘南粳 9108’, 2016 年 5 月 16 日播种, 6 月 18 日移栽, 栽插规格为 $25 \text{ cm} \times 13 \text{ cm}$, 每穴 2—3 苗, 于 10 月 16 日收获。基肥施用时间为 2016 年 6 月 17 日, 并于 6 月 24 日、7 月 25 日和 8 月 4 日追施分蘖肥、促花肥和保花肥。小麦季耕作方式为旋耕, 稻秸还田量为 $9000 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 水稻季耕作方式为耕翻 + 旋耕, 麦秸还田量为 $6000 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。每个处理重复 3 次, 共 9 个试验小区, 随机排列。采用水泥田埂将试验小区相互隔开, 小区面积为 $7.5 \text{ m} \times 4.0 \text{ m}$, 每个小区都设有单独的径流池。径流池的规格为 $4.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ (长 × 宽 × 高)。径流池进水口高度与小区沟渠底面保持一致。同时, 每个径流池配有彩钢盖板以防止雨水和杂物进入。水分、植保等田间管理同当地高产大田。

1.3 测定指标与方法

土壤性状: 供试土壤(0—20 cm 土层) pH 采用 PHS-3C 型 pH 计测定^[21]; 全 N、全 P、速效 N、速效 P 和速效 K 及有机质含量等参照鲍士旦^[22]的方法测定。

径流样品: 记录降雨期间试验区域降水量及稻田排水量, 并采样。每次采集径流水样时, 先测量径流水深, 然后将径流池内的水搅拌均匀, 每个径流池至少采集径流水样 500 mL, 利用全自动流动分析仪(SKALAR San⁺⁺) 及时测定径流水中总磷(TP) 浓度。样品采集后排干径流水, 并将径流池清洗干净, 以备下一次径流收集和计量。

$$\text{地表径流磷素流失总量 } Q = \sum_{i=1}^n C_i \times V_i \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中: Q 为各施肥模式处理条件下稻田地表径流磷素流失总量(kg/hm^2); C_i 为每次径流过程中径流水磷素质量浓度(mg/L); V_i 为每次径流过程中径流水体积(m^3/hm^2)。

在计算农田养分径流流失率时, 仅考虑农田肥料磷投入, 而未将由雨水、灌溉水和种子带入磷等计算在内。

$$\text{磷素径流流失率 } P_i = \frac{Q}{Q_n} \times 100\% \quad (2)$$

式中, P_i 为各施肥模式处理条件下稻田磷素地表径流流失率(%), Q 为各施肥模式处理条件下稻田磷素地表径流流失量(kg/hm^2), Q_n 为各施肥模式处理条件下稻田磷素投入量(kg/hm^2)。

将稻田生产每千克稻谷或小麦的磷素径流流失量定义为磷素径流偏流失率(P_n), 计算公式为:

$$P_n = \frac{Q}{Y} \times 1000 \quad (3)$$

式中: P_n 为各施肥模式处理条件下稻田磷素径流偏流失率(mg/kg); Q 为各施肥模式处理条件下稻田磷素地表径流流失量(kg/hm^2); Y 为各施肥模式处理条件下稻谷或小麦产量(kg/hm^2)。

稻麦产量: 于稻麦成熟期, 测定不同施肥模式下水稻、小麦实际产量。

1.4 数据分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 13.0 软件进行数据处理, 数据均为 3 次重复的平均值, 各处理的比较采用最小显著差数(LSD)法, 超过 LSD 0.05(或 LSD 0.01)水平的视为显著(或极显著)。

2 结果与分析

2.1 径流量与降水量

降雨是导致农田养分径流流失的主要原因, 而径流量(Y) 是其构成因素之一, 与降水量(x) 呈显著线性正相关关系($Y = 7.362x - 91.774, R^2 = 0.991$)。2015—2016 年小麦生长季共发生 6 次径流事件, 地表径流水总量达 $1305.15 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。2016 年水稻生长季共发生 10 次径流事件, 径流水总量达

7 253.10 m³/hm²,且各处理间径流量基本保持一致。由图1可知,麦稻轮作农田地表径流排水主要分布于强降雨集中的水稻生长季(梅雨季、台风季)。

2.2 不同施肥模式对麦稻两熟农田径流磷素浓度的影响

由图2可知,在农户习惯性施肥(CK)条件下,小麦季径流总磷(TP)平均质量浓度达0.36 mg/L。与CK相比,减量施肥(T1)和优化施肥(T2)模式显著降低了麦季径流磷素浓度,降幅达21.99%—25.87%。T1、T2处理间差异不显著。同时,水稻季径流总磷(TP)平均质量浓度(0.19 mg/L)显著低于小麦季。与CK相比,减量施肥(T1)和优化施肥(T2)模式显著降低了稻季径流磷素质量浓度,降幅达22.83%—50.74%。与T1相比,T2处理显著降低了稻季径流磷素平均质量浓度,降幅达36.18%。

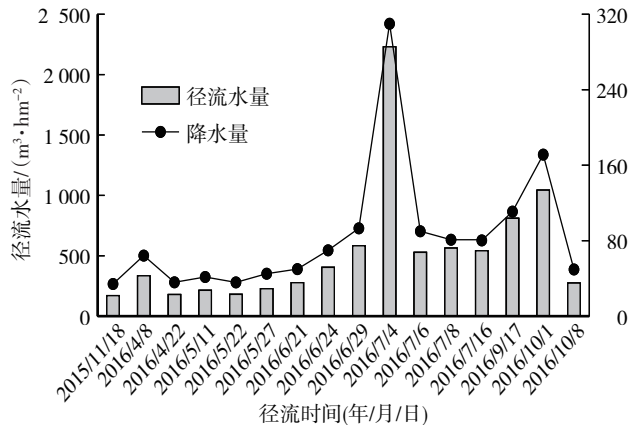


图1 自然降雨条件下麦稻两熟农田地表径流量与当地降水量
Fig.1 The quantity of surface runoff water and rainfall capacity in the winter wheat-paddy rice rotation field under natural rainfall conditions

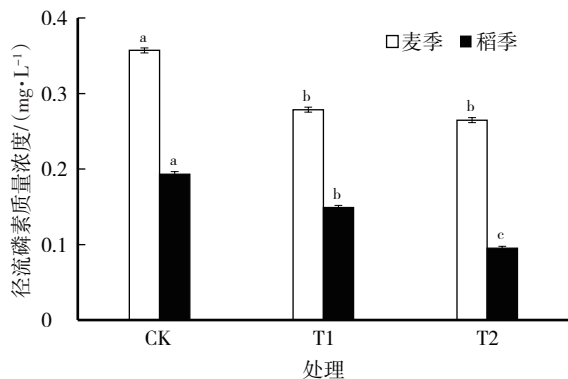


图2 不同施肥模式对麦稻两熟农田径流磷素质量浓度的影响
Fig.2 Effects of different fertilization modes on phosphorus (TP) concentration of surface runoff water in a winter wheat-paddy rice rotation field

2.3 不同施肥模式对麦稻两熟农田磷素径流流失量与季节分配的影响

由图3A可知,在农户习惯性施肥(CK)条件下,小麦季总磷(TP)径流流失量达0.47 kg/hm²。与CK相比,减量施肥(T1)和优化施肥(T2)模式显著降低了小麦季磷素径流流失量,降幅达21.99%—25.87%。T1、T2处理间差异不显著。水稻季总磷(TP)径流流失量(1.40 kg/hm²)显著高于小麦季。且与CK相比,减量施肥(T1)和优化施肥(T2)模式显著降低了水稻季磷素径流流失量,降幅达22.83%—50.74%。较T1、T2处理显著降低了水稻季磷素径流流失量,降幅达36.18%。CK处理下,周年TP径流流失量达1.87 kg/hm²。减量施肥(T1)模式麦稻周年TP径流流失量较CK显著降低,降幅达22.62%,优化施肥(T2)模式较CK磷素径流流失量降幅更大,达44.54%。T2处理较T1显著降低,降幅达28.33%。综上,磷素径流流失主要集中在水稻季,各处理磷素流失量占周年流失总量的比例高达66.65%—75.05%,水稻季磷素径流流失量是小麦季的2.00—3.01倍(图3B)。

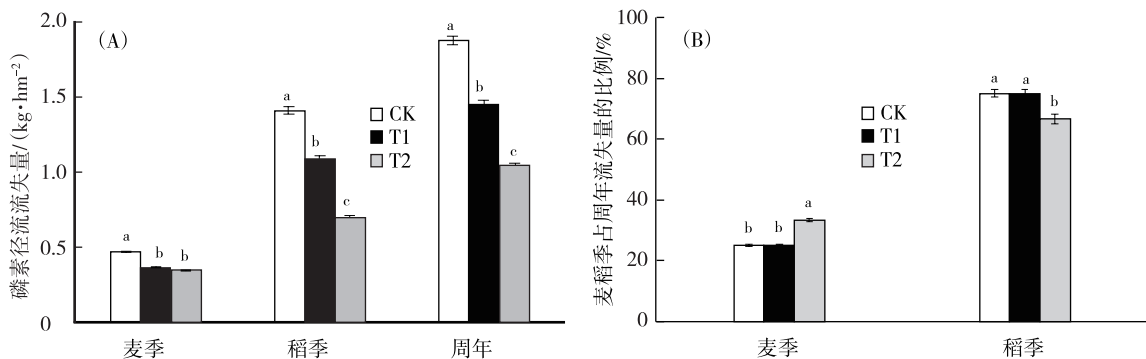


图3 不同施肥模式对麦稻两熟农田磷素径流流失量(A)与季节分配(B)的影响

Fig.3 Effects of different fertilization modes on TP losses by surface runoff (A) and the seasonal distribution pattern (B) in a winter wheat-paddy rice rotation field

2.4 不同施肥模式对麦稻两熟农田磷素径流流失率与偏流失率的影响

由图4A可知,在农户习惯性施肥(CK)条件下,麦稻两熟农田磷素周年径流流失率达0.75%,减量施

肥(T1)和优化施肥(T2)模式下径流流失率较CK处理显著增加,增幅分别达21.60%和52.52%。磷素径流偏流失率呈现与径流流失率截然相反的规律。CK处理下,麦稻两熟农田磷素周年径流偏流失率达119.06 mg/kg,而T1、T2处理的偏流失率则较CK处理显著降低,降幅达17.95%和41.22%。同时,水稻季磷素径流偏流失率显著高于小麦季,各处理稻季偏流失率是小麦季的1.36—2.08倍(图4B)。

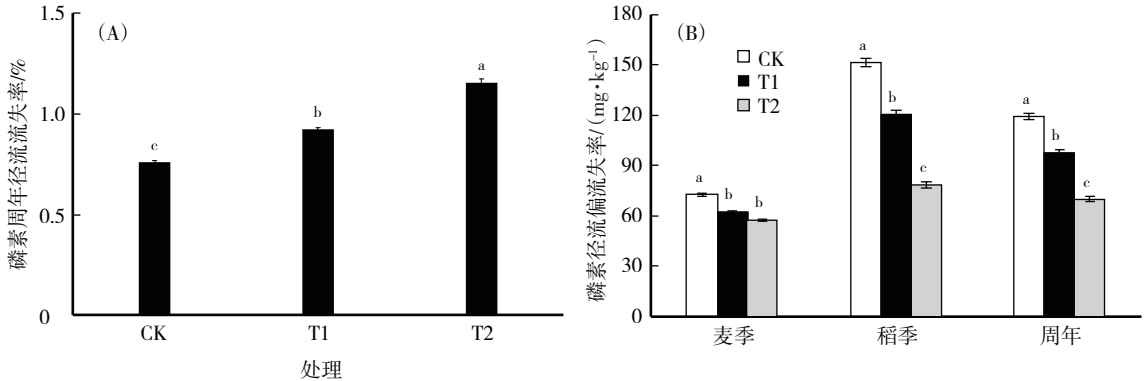


图4 不同施肥模式对麦稻两熟农田磷素径流流失率(A)与偏流失率(B)的影响

Fig. 4 Effects of different fertilization modes on the coefficient of TP losses (A) and the partial factor productivity of phosphorus (PFPP) for wheat and rice grain (B) in a winter wheat-paddy rice rotation field

2.5 麦稻产量

麦稻轮作模式下不同施肥模式对麦稻产量具有一定影响。在农户习惯性施肥模式(CK)条件下,小麦和水稻产量分别为 6.42×10^3 kg/hm²和 9.27×10^3 kg/hm²,减量施肥(T1)和优化施肥(T2)模式下,小麦产量较CK处理显著降低,降幅达6.52%—9.25%,水稻产量降幅较小,为3.23%—5.04%,但差异显著。减量施肥(T1)与优化施肥(T2)处理间差异不显著(图5)。

3 讨论

稻田磷素流失受土壤类型、土壤有效磷含量、磷肥用量及肥料施用方式、降水强度、农田水分管理方式、径流产生时期和持续时间、作物生育时期等因子的综合影响^[8-10,13,23-24],且以径流流失为主^[25]。曹志洪等^[11]研究认为,太湖流域稻麦轮作农田在常规施磷量(50 kg/hm²)条件下磷素年均径流损失量为0.84 kg/hm²,约占当年施磷量的2.5%,且麦季流失量大于稻季。付碧玉等^[26]认为稻麦轮作农田周年总磷流失量主要来自于水稻季,水稻季总磷流失量约占周年的80.59%—85.56%,且随着施磷量的增加,总磷流失量逐渐增大。本研究中,麦稻两熟农田磷素径流流失主要集中在水稻生长季,其流失量占周年流失总量(1.87 kg/hm²)的66.65%—75.05%,磷素流失量及季节分配结果差异可能与磷肥投入量、土壤类型及降雨模式等有关。张红爱等^[13]发现,稻季最易产生土壤磷素径流流失的时期是在水稻移栽后一个月内,且这段时期径流中溶解态磷、颗粒态磷及总磷浓度均最高,应重点加强此时期的稻田磷素减排与阻控。

杨林章等^[20]在太湖流域稻田构建并应用了生态拦截型沟渠系统,对稻田径流中总磷的去除效果达40%以上,可显著减轻稻田排水面源污染。刘红江等^[27]构建的“稻田-生态塘-水生植物-稻田”稻田流失养分循环利用系统工程也可显著减少稻田磷素向周边水体的直接排放。然而,这些措施均属于“尾端”处理技术范畴,虽可有效减少稻田磷素向水体直接排放,但存在工程构建耗资、水生/湿生植物打捞处置耗工等弊端。因此,稻田磷素高效利用与原位减排仍是需要大力解决的“前端”技术。易均^[28]研究认为,稻田径流水中各形态磷素浓度和流失量均随磷肥施用量的增加而增加,且施磷后径流事件距离磷肥施用时间越长,径流水中磷素浓度和流失量越小。陆欣欣等^[14]研究发现,在有机肥及混施肥条件下,稻田磷素径流流失负荷是化肥处理的2.02—7.50倍。叶玉适等^[18]研究发现,干湿交替节灌模式显著减少稻田TP径流流失量。冯国禄等^[15]认为,夏季浅耕为最佳清洁耕作模式,滞水5 d后排水能有效减少田面水中磷素流失量,减少稻田排水对面源污染的影响。易均^[28]研究发现,磷肥直接减施30%虽然显著降低稻田磷素流

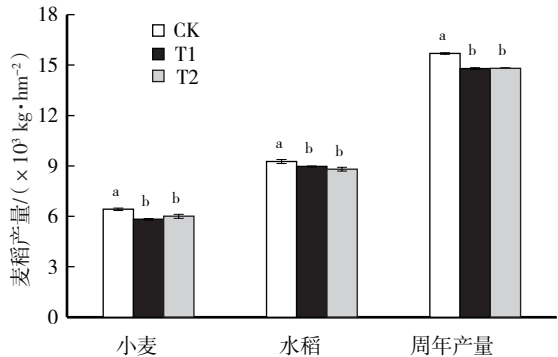


图5 不同施肥模式对麦稻产量的影响

Fig. 5 Effects of different fertilization modes on the grain yield of wheat and rice

失量,但稻谷产量也随之显著降低,在目前磷肥用量的基础上减施 10%—20% 具有良好的综合效应。本研究中,麦稻周年减量施肥模式下,作物产量显著下降,这可能与氮肥同步减施及减施幅度较大有关。

事实上,稻麦水旱轮作条件下磷素有效性季节性差异明显,鲁如坤^[29]提出集中在旱作季施用磷肥的措施。汪玉等^[30]也认为在太湖流域稻麦轮作农田可统筹考虑不同作物生长季磷肥的分配,充分利用残留磷肥的后效,以减少磷肥施用量。卢亚男等^[31]认为稻麦轮作农田在土壤磷素供应水平为中等及以上条件下时,稻季不施磷可以保证作物较高产量水平和土壤磷素的环境安全。朱文彬等^[32]和 Wang 等^[33]研究进一步验证了稻季不施磷在太湖流域稻麦轮作农田具有可行性。本研究中,优化施肥模式下麦稻轮作农田磷素流失浓度、流失量均显著降低,且较减量施肥模式而言,小麦产量及麦稻周年产量无显著影响。综上,麦稻轮作种植模式下,稻季不施磷具有养分减排与作物稳产的协同效应。然而,其长期效应需要从作物稳产、土壤磷库平衡、磷素吸收利用及养分减排等角度进一步验证。

参 考 文 献

- [1] TIMSINA J, CONNOR D J. Productivity and management of rice-wheat cropping systems; issues and challenges[J]. *Field Crops Research*, 2001, 69(2):93-132.
- [2] 盛婧,陈留根,朱普平. 稻麦轮作农田生态系统服务功能价值评估[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(6):1541-1545.
- [3] 蒋孝松,刘彩玲,隋标,等. 太湖流域稻麦轮作体系施肥现状分析与对策[J]. *中国农学通报* 2012, 28(15):15-18.
- [4] 吕耀. 苏南太湖流域农业非点源污染及农业可持续发展战略[J]. *环境科学动态*, 1998, 17(2):1-4.
- [5] WANG K, ZHANG Z J, ZHU Y M, et al. Surface water phosphorus dynamics in rice fields receiving fertilizer and manure phosphorus[J]. *Chemosphere*, 2001, 42:209-214.
- [6] SHARPLEY A N, DANIEL T, SIMS T, et al. *Agricultural Phosphorus and Eutrophication* [R]. Second ed. Washington DC: US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 2003.
- [7] 金相灿,叶春,颜昌宙,等. 太湖重点污染控制区综合治理方案研究[J]. *环境科学研究*, 1999, 12(5):1-5.
- [8] ZHANG H C, CAO Z H, SHEN Q R, et al. Effect of phosphate fertilizer application on phosphorus (P) losses from paddy soils in Taihu Lake region; I. Effect of phosphate fertilizer rate on P losses from paddy soil[J]. *Chemosphere*, 2003, 50:695-701.
- [9] ZHANG H C, CAO Z H, WANG G P, et al. Winter runoff losses of phosphorus from paddy soils in the Taihu Lake region of South China[J]. *Chemosphere*, 2003, 52:1461-1466.
- [10] CAO Z H, ZHANG H C. Phosphorus losses to water from lowland rice fields under rice-wheat double cropping system in the Tai Lake region[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26:229-236.
- [11] 曹志洪,林先贵,杨林章,等. 论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能 I. 稻田土壤磷素径流迁移流失的特征[J]. *土壤学报*, 2005, 42(5):799-804.
- [12] 金熠,梁新强,刘于,等. 增施有机肥对稻田面水磷素形态和径流流失量的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(4):42-47.
- [13] 张红爱,张焕朝,钟萍. 太湖地区典型水稻土稻-麦轮作地表径流中磷的变动规律[J]. *生态科学*, 2008, 27(1):17-23.
- [14] 陆欣欣,岳玉波,赵峥,等. 不同施肥处理稻田系统磷素输移特征研究[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(4):394-400.
- [15] 冯国禄,杨仁斌. 不同耕作模式下稻田水中氮磷动态特征及减排潜力[J]. *生态学报*, 2011, 31(15):4235-4243.
- [16] 郭智,周炜,陈留根,等. 施用猪粪有机肥对稻麦两熟农田稻季养分径流流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(6):21-25, 61.
- [17] 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(增刊):210-217.
- [18] 叶玉适,梁新强,李亮,等. 不同水肥管理对太湖流域稻田磷素径流和渗漏损失的影响[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(4):1125-1135.
- [19] 潘复燕,薛利红,卢萍,等. 不同土壤添加剂对太湖流域小麦产量及氮磷养分流失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(5):928-936.
- [20] 杨林章,周小平,王建国,等. 用于农田非点源污染控制的生态拦截型沟渠系统及其效果[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(11):1371-1374.
- [21] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法* [M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000.
- [22] 鲍士旦. *土壤农化分析* [M]. 3 版. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [23] 曹志洪. 施肥与水体环境质量:论施肥对环境的影响(2) [J]. *土壤*, 2003, 35(5):353-363.
- [24] 王小治,曹志洪,盛海君,等. 太湖地区渗水性水稻土径流中磷组分的研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41(2):278-284.
- [25] 杨蓓蓓,刘敏,张丽佳,等. 稻麦轮作农田系统中磷素流失研究[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2009(6):56-63.
- [26] 付碧玉. 稻麦轮作下施磷量对农田磷素流失的影响及磷肥阈值初探[D]. 合肥:安徽农业大学, 2016.
- [27] 刘红江,陈留根,朱普平,等. 稻田流失养分循环利用系统构建研究初探[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(10):2275-2279.
- [28] 易均. 磷肥减量施用对双季稻田磷素损失及水稻磷肥利用效率的影响[D]. 长沙:湖南农业大学, 2016.
- [29] 鲁如坤. *土壤-植物营养学原理和施肥* [M]. 北京:化学工业出版社, 1998.
- [30] 汪玉,赵旭,王磊,等. 太湖流域稻麦轮作农田磷素累积现状及其环境风险与控制对策[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(5):829-835.
- [31] 卢亚男,汪玉,王慎强,等. 太湖稻麦轮作农田减施磷肥盆栽试验研究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(3):507-513.
- [32] 朱文彬,汪玉,王慎强,等. 太湖流域典型稻麦轮作农田稻季不施磷的农学及环境效应探究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(6):1129-1135.
- [33] WANG Y, ZHAO X, WANG L, et al. Phosphorus fertilization to the wheat-growing season only in a rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China[J]. *Field Crops Research*, 2016, 198:32-39.