

DOI: 10.11766/trxb202003050694

兰国俊, 胡雪峰, 程畅, 罗凡, 陆思文, 赵景龙, 张伟杰. 稻鸭共生对土壤养分和水稻病虫害防控的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(5): 1299–1310.

LAN Guojun, HU Xuefeng, CHENG Chang, LUO Fan, LU Siwen, ZHAO Jinglong, ZHANG Weijie. Effects of Raising Duck in Paddy Field on Soil Nutrients and Rice Pests and Diseases Control [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(5): 1299–1310.

稻鸭共生对土壤养分和水稻病虫害防控的影响*

兰国俊, 胡雪峰[†], 程 畅, 罗 凡, 陆思文, 赵景龙, 张伟杰

(上海大学环境与化学工程学院, 上海 200444)

摘 要: 在上海淀山湖稻区, 设置稻鸭共生田间试验, 研究稻田养鸭对水稻土壤养分、田面水和水稻病虫害防控的影响。试验分为四个处理: (1) 稻鸭共生 (DR); (2) 受稻鸭共生区田面水影响, 但无鸭子进入 (ND); (3) 受稻鸭共生区田面水影响, 无鸭子进入, 但人工除草 (NDW); (4) 不受稻鸭共生区田面水影响, 水稻单作 (CK)。结果表明: 无论受稻鸭直接影响 (DR) 还是间接影响 (ND 和 NDW), 均能显著提高土壤养分。DR 处理土壤有机质和碱解氮平均含量分别为 $33.0 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $138.3 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 高于 CK 13.6%、17.6%。而且, DR 处理鸭子活动搅动水土层, 增加溶解氧, 提高了土壤微生物量和土壤酶活性。受鸭子活动和粪便排泄影响, 稻鸭共生区 (DR、ND、NDW) 田面水养分大多显著高于 CK ($P<0.05$), 尤其是在 9 月 26 日, 其铵态氮、有效磷、总磷含量分别达到 $1.18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.93 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 高于 CK 137%、178%、316%。DR 处理鸭子啄食、践踏及浑水作用, 抑制杂草生长, 杂草密度平均较 CK 降低了 91.6%; ND 处理杂草密度很高; NDW 处理杂草密度仍高于 DR 处理。这说明水田定期人工拔草效果不及稻田鸭除草效果。ND、NDW 和 DR 处理显著促进水稻分蘖, 分蘖数平均高于 CK 33.6%、32.1% 和 34.2%。DR 处理卷叶螟、纹枯病和稻飞虱显著低于 CK 和其他处理。DR 处理增产效果显著, 水稻产量达到 $8\ 507 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 为 CK 的 1.42 倍。总之, 稻鸭共生增肥、抑草、防虫效果显著, 有利于大幅减少农药和化肥使用, 保护生态环境, 同时, 产出健康优质稻米和鸭肉。

关键词: 稻田养鸭; 土壤养分; 田面水; 抑草; 防虫

中图分类号: S158.3 文献标志码: A

Effects of Raising Duck in Paddy Field on Soil Nutrients and Rice Pests and Diseases Control

LAN Guojun, HU Xuefeng[†], CHENG Chang, LUO Fan, LU Siwen, ZHAO Jinglong, ZHANG Weijie

(School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: [Objective] A field experiment was conducted in paddy fields in the Dianshan Lake region of Shanghai to explore effects of raising ducks in paddy fields on soil nutrients, field surface water, rice growth, and control of weeds, pests and diseases.

[Method] The experiment was designed to have three treatments and one CK, i.e. duck-raising in paddy field (DR); No

* 国家自然科学基金项目 (41877005) 和上海市现代农业产业技术体系建设 (沪农科产字 (2019) 第 9 号) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41877005) and the Agriculture Research System of Shanghai, China (No. 201909) .

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: xfh@shu.edu.cn

作者简介: 兰国俊 (1992—), 男, 安徽芜湖人, 硕士研究生, 主要从事种养耦合型生态农业方面的研究。E-mail: 598670570@qq.com

收稿日期: 2020-03-05; 收到修改稿日期: 2020-06-14; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-08-26

duck-raising in the fields irrigated with drainage from Treatment DR (ND); No duck-raising in the field irrigated with drainage from Treatment DR, plus manual weeding (NDW); and rice cultivated as usual with irrigation of normal water (CK). No pesticides and herbicides were applied during the whole experiment to prevent their disturbances to rice and duck growth, soil nutrients and enzyme activities. 【Result】 Results show that all of the treatments, no matter whether it was directly affected by duck raising (Treatment DR), or indirectly affected by irrigation (Treatments NDW and ND), increased the content of soil nutrients. Treatment DR was the highest in the effect, being 11.0%, 17.6%, 11.5%, 13.3% and 13.6% higher in content of total nitrogen, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, readily available potassium and organic matter in the soil, respectively, than CK during the rice growth season, and Treatment NDW and ND was 9.8%, 8.4% and 10.9% higher, and 3.4%, 2.1%, and 7.1% higher than CK, respectively, in content of alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, and readily available potassium. Meanwhile, stirring of the flooding water by ducks in Treatment DR increased the content of dissolved oxygen and hence microbial biomass and activities of soil enzymes, especially the activity of urease, catalase and sucrase, by 21.0%, 20.6% and 13.9%, respectively. Thanks to the activities and fecal excretion of ducks in Treatment DR, the flooding water in Treatments DR, ND and NDW was significantly higher than that in CK ($P < 0.05$) in nutrient content. Especially on September 26, the flooding water in Treatment DR peaked up to $1.18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $0.40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $0.93 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively in contents of ammonium nitrogen and available and total phosphorus, or was 137%, 177% and 316% higher than in CK. Pecking, trampling and stirring of the ducks in the fields effectively inhibited weed growth, reducing the density of weeds by 91.6% on average in Treatment DR. In contrast, the density of weeds was the highest in Treatment ND and then in Treatment NDW and in Treatment DR, suggesting that the effects of regular manual weeding in the paddy fields on weed control were not so good as that of raising ducks in paddy fields. All the treatments, DR, NDW and ND, stimulated tillering of the rice significantly or by 34.2%, 32.1% and 33.6%, respectively. The incidence of rice leaf rollers, sheath blight or rice planthoppers was significantly lower in Treatment DR than in CK and the other treatments. Moreover, Treatment DR was also significant in yield increasing effect, with grain yield reaching up to $8507 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 1.42 times that of CK. 【Conclusions】 In general, raising ducks in paddy fields can improve soil fertility, inhibit weeds and reduce incidence of rice pests and diseases effectively, which is beneficial to minimizing the utilization of pesticides, herbicides and chemical fertilizers in paddy fields and controlling non-point source agricultural pollution. Moreover, it helps produce high quality healthy food - rice and ducks.

Key words: Rice-duck symbiosis; Soil nutrients; Flooding water; Weed suppression; Insect prevention

稻米是中国的主要粮食作物。在中国，水稻的栽培面积已达 4.53 亿亩（1 公顷合 15 亩）^[1]。为追求水稻高产，常规稻作通常大量施用农药、化肥和除草剂，对地表水构成威胁，也影响稻米食用安全。在保证粮食产量稳步增长的情况下，如何减少化学肥料的过量使用，维持土壤养分平衡，降低环境风险，是亟待解决的问题^[2]。近十几年来，以种养耦合为主要技术的生态稻作，在中国各地兴起。在水稻田中，适当地开展养殖业，可促进养分的循环利用，有效减少化肥投入^[3]。在稻田养鸭，实现稻鸭共生，在中国南方稻区，已有大规模实施。稻鸭种养耦合，具有较高的生态效益和经济效益^[4]。

稻田为鸭子提供天然饵料、充足的水源和生息的泥地；另一方面，鸭子在田间活动，捕虫除草，排粪肥田，奔跑活动又有利于田间通透，增加水中溶解氧，减少水稻病害，促进水稻根系生长^[5-7]。稻

鸭共生系统可大幅减少农药、化肥和除草剂的施用，使得稻田中保持健康生态环境和生物多样性^[8]。鸭子可作为水田化学除草剂和杀虫剂的替代品^[9]。此外，稻鸭共生还可显著减少稻田 CH_4 排放，有助于减缓全球变暖^[10-12]。稻鸭共生，还可减少水田氮素的流失^[13]。最新的研究^[14-15]表明，在上海西郊水源地，推行稻鸭共生有机稻作，可较常规稻作减少 92.1% 的氮素流失，对水源地保护有十分重要的意义。但是，稻鸭共生系统对土壤的增肥效应，以及对田面水养分含量和农业面源污染的影响，仍需作深入研究。

1 材料与方法

1.1 供试材料

稻鸭共生田间试验，位于上海市青浦区金泽镇

沙港村。青浦区地处上海西郊,年降水量为 1 056 mm,平均温度为 15.5 ℃。青浦西部的淀山湖,是黄浦江上游水源地,也是上海市最大的淡水湖泊。当地土壤发育于河湖相沉积,成土年轻,多为新成土或潮湿雏形土。土壤基本化学指标见表 1。

1.2 田间试验设计

在稻苗密度、灌溉条件和田间日常管理均匀一致的水田,用田埂和铁丝网划分为有鸭活动区(40 m×50 m)和无鸭活动区(40 m×10 m)。在有鸭活动区,也就是稻鸭共生区,用竹竿或竹竿+尼龙网

分隔出 3 个处理,每处理 3 个重复,共 9 个小区;在无鸭活动区仅用竹竿标记 3 个对照小区。每小区面积为 4×4 m²,小区之间设置 5 m 的缓冲带。3 个处理和 1 个对照:(1)稻鸭共生区,仅用竹竿标记小区位置,鸭子可自由出入(DR)。(2)稻鸭共生区,用 1 m 高尼龙围网,阻止鸭子进入,但田面水与外部相通(ND)。(3)稻鸭共生区,用 1 m 高尼龙围网阻止鸭子进入,田面水与外部相通,小区定期用人工除草(NDW)。(4)在无鸭区,仅用竹竿标记小区位置(CK)。

表 1 试验地土壤化学指标

Table 1 Chemical indices in the experimental soil

土壤类型 Type of soil	pH	全氮 Total N / (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P / (g·kg ⁻¹)	全钾 Total K / (g·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter / (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali-hydrolyzable N / (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available P / (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K / (mg·kg ⁻¹)
潮湿雏形土 Aquic Cambosols	6.8	1.98	0.34	21.64	27.7	30.27	13.80	90.58

试验田头年秋季播撒紫云英,当年 4 月中旬,紫云英翻压入田,作基肥;再补施有机肥作基肥。水稻于 2015 年 6 月 13 日插秧,10 月 18 日收割。为消除农药和施肥可能对鸭子生长的影响,在整个水稻生长季节,不施用除草剂、农药和化肥。于 2015 年 6 月 20 日购买鸭苗,进行人工饲养;于 7 月 23 日放入有鸭区域,共放养 50 只鸭子。鸭子白天在鸭稻区域活动,晚上回到鸭棚栖息。根据鸭日龄,每只鸭每天补喂约 50~100 g 稻谷或玉米。在 10 月 1 日回收鸭子。水稻采用沟灌模式,水稻生长期保持 5~10 cm 淹水层。

1.3 田间考察

在每个试验小区内,随机放置 5 个面积为 0.33 m²的铁框,作为调查单元,进行水稻全生育期稻苗生长追踪。在小区放置的每一个铁框中,随机选取 10 株稻苗,进行生长期全程标记追踪,测量稻苗的高度和分蘖数。每个小区内,随机放置 5 个面积为 1 m²的铁框作为调查单元,统计杂草密度。纹枯病的发病率通过调查单元内出现霉菌污渍的茎占总茎的比例评估。稻纵卷叶螟的发病率通过调查单元内受卷叶螟感染叶片占总叶片的比例评估。稻飞虱虫害发病率采用盆拍法统计。在每个小区随机选择 25 个调查点,每个调查点由相邻的两穴水稻植株

组成,用湿润的白糖瓷盆作载体用,将盆轻轻放入稻行,盆下缘紧挨水稻植株基部,拍打植株中下部,连续 3 次,每个点计数 1 次,计算每一穴水稻所含有的稻飞虱数量。蜘蛛密度测定方法同稻飞虱。

1.4 样品采集与分析

在水稻生长的不同阶段,每个小区内用 S 形方法采集耕作层(0~20 cm)土壤。每个样品分为两部分:一部分新鲜土样,用于土壤酶活性和微生物数量测定;另一部分在室温下风干,然后研磨并连续通过 2 mm 和 0.149 mm 孔径的筛子进行化学分析。

土壤酶活性和微生物生物量分析^[16]:土壤脲酶采用苯酚钠-次氯酸钠比色法,以 24 h 后每 100 g 干土中 NH₃-N 的毫克数表征;磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法,以 24 h 后每 100 g 干土中的酚的毫克数表征;过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法,以 1 g 干土 20 min 内消耗 0.01 mol·L⁻¹高锰酸钾的毫升数表征;蔗糖酶活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法,以 24 h 后每 1 g 干土中葡萄糖的毫克数表征。微生物生物量采用稀释平板法测定。

土壤理化性质分析^[17]:土壤有机质采用重铬酸钾氧化外加热法测定,土壤全氮采用凯氏定氮法测定,土壤碱解氮采用碱解扩散法测定,土壤全磷采用高氯酸-氢氟酸消煮—钼锑抗比色法测定,土壤有

效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定，土壤全钾采用高氯酸-氢氟酸消煮—火焰光度法测定，土壤速效钾采用乙酸铵浸提—火焰光度法测定。

水稻生理生化指标分析^[18]：硝态氮采用水杨酸比色法测定，可溶性糖采用蒽酮法测定，叶绿素采用乙醇比色法测定，可溶性蛋白质采用考马斯亮蓝 G-250 法测定。

1.5 产量统计

稻谷实际产量：称量各小区收割的稻谷获得。

稻谷理论产量：每个小区随机选择 5 个单元 (40 cm × 83.3 cm)，研究每个单元生产的有效穗数，每穗粒数和千粒重。使用以下公式计算每个单元的理论谷物产量：每公顷生产的穗数 (10⁴ hm⁻²) × 每穗粒数 × 结实率 × 千粒重 (g)。

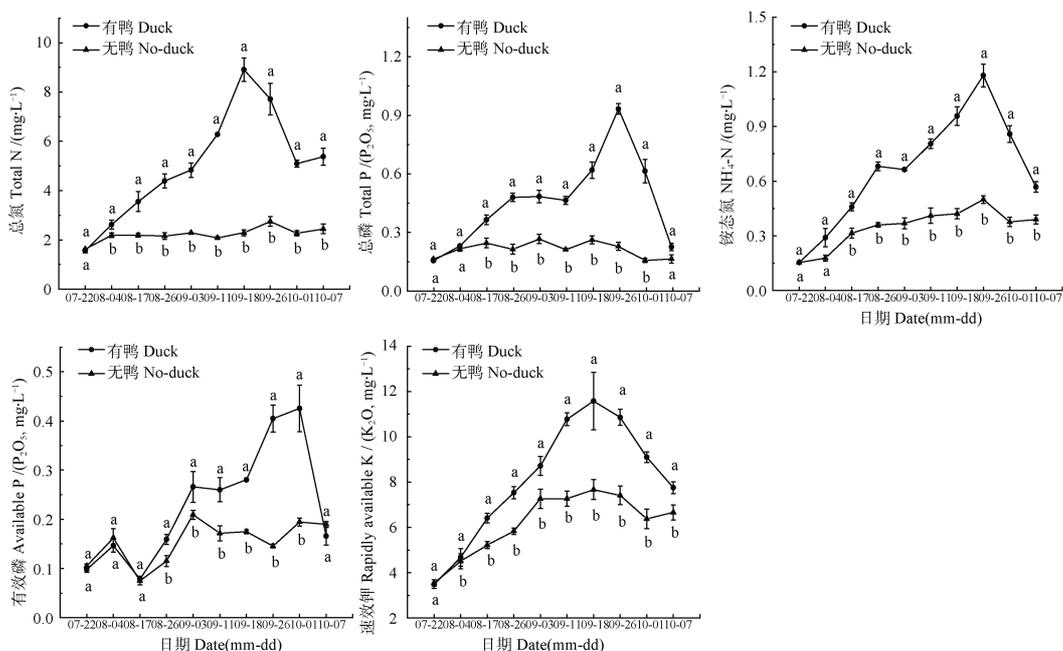
2 结果与讨论

2.1 稻鸭共生对田面水养分的影响

由于有鸭活动区田面水是相串通的，仅比较了有鸭活动区 (DR、NDW、ND) 和无鸭区 (CK) 田面水的养分状况。稻田放鸭以后，田面水中铵态氮、总氮、有效磷、总磷和速效钾含量迅速增加，至 9 月中下旬达到峰值；鸭子收获后，又迅速下降 (图

1)。相比之下，无鸭区 (CK) 田面水养分含量变幅较小。有鸭活动区各个时期田面水养分含量显著高于 CK (图 1)。例如，水稻生长中后期 (9 月 18 日)，有鸭活动区田面水总氮、速效钾含量分别为 CK 的 3.89 倍、1.51 倍；至后期 (9 月 26 日)，有鸭活动区铵态氮、有效磷和总磷含量分别达到 1.18 mg·L⁻¹、0.40 mg·L⁻¹、0.93 mg·L⁻¹，为 CK 的 2.37 倍、2.78 倍、4.16 倍。鸭活动区田面水养分含量增加，主要是由于稻田鸭产生的排泄物引起的。随着鸭子成长，鸭排泄物逐渐增多，养分输入也越高，在 9 月中下旬达到峰值。在后期，由于稻田鸭收获，鸭活动区处理的田面水养分含量迅速下降。但残留鸭粪在稻田分解、释放养分，使得水稻生长后期，稻鸭共生的田面水养分依然高于 CK。

中国土壤中氮的利用率约为 30% 至 35%，而磷的利用率仅为 10% 至 25%^[14]。稻田土壤中的氮主要通过氨挥发、硝化和反硝化、淋溶和径流等方式进入环境中；矿物质磷主要通过径流流失^[14]。鸭子的存在，可减少氨挥发和总氮损失^[13]。鸭子觅食和活动，有效降低了稻田藻类的丰度，使得田面水 CO₂ 的消耗减弱。与水稻单作相比，稻鸭共生区域田面水 pH 明显降低^[13]。在较低的 pH 下，NH₃ 不易挥发^[19]。因此，稻田养鸭能够提高氮肥利用率。前期研究^[20]



注：不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Note: Different letters indicate difference between treatments at the $P < 0.05$ level. The same below.

图 1 不同处理下稻田田面水养分含量

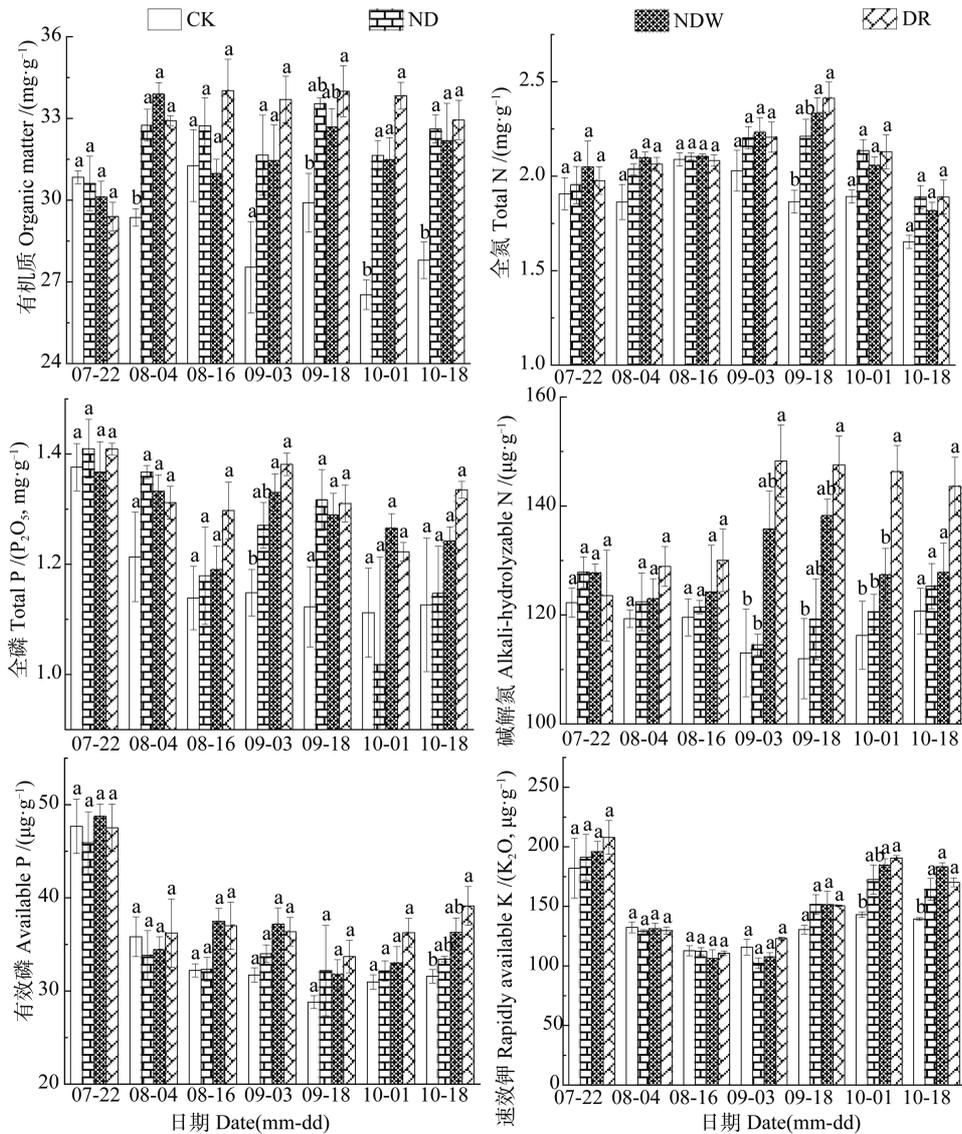
Fig. 1 Contents of nutrients in flooding water of the paddy soil relative to treatment

表明,施用化肥后,田面水中的氮和磷浓度瞬间达到峰值,随后迅速下降;而施用有机肥,田面水营养物浓度逐渐增加。两周后,化肥追肥效果几乎消失,而有机肥追肥效果仍然显著。本研究表明,稻鸭共生区域,田面水养分虽显著增加,但与施用化肥瞬间释放大量养分相比,含量低而可持续,多为水稻吸收,且随鸭子收获而下降,对外界环境的污染风险很低。前期研究^[14]还表明,环淀山湖 6 镇的常规稻田 N 和 P₂O₅ 的排放量分别为 $1.48 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $1.34 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$;若环湖地区稻

鸭共生取代常规稻作, N 和 P₂O₅ 的排放量可分别减少 83.79%和 92.11%,从而大大减少湖泊周围农田的面源污染。

2.2 鸭稻共生对土壤养分的影响

稻鸭共生区 DR、ND、NDW 处理土壤有机质含量普遍高于 CK,在水稻生长各时期多达显著水平 ($P < 0.05$) (图 2)。在水稻生长后期(10月1日), DR、NDW、ND 处理土壤有机质含量分别高于 CK 27.6%、18.7%、19.3%。同样, DR、ND、NDW 处理各项氮和磷养分指标均高于 CK。



注: CK: 水稻单作; ND: 受稻鸭共生区田面水影响,无鸭子进入; NDW: 受稻鸭共生区田面水影响,无鸭子进入,但人工除草; DR: 稻鸭共生。下同。Note: CK: Rice cultivated as usual; ND: No duck-raising in the field irrigated with drainage from Treatment DR; NDW: No duck-raising in the field irrigated with drainage from Treatment DR plus manual weeding; DR: Duck raising in paddy field. The same below.

图 2 不同处理下土壤养分和有机质含量

Fig. 2 Contents of nutrients and organic matter in the soil relative to treatment

稻鸭共生土壤有机质含量显著增高,一方面是由于鸭粪的排入和鸭饲料的残留;另一方面,鸭子踩踏杂草腐化形成。稻田长期被水浸没,不利于有机物快速分解,使得土壤有机质累积。鲜鸭粪便平均含有 N $7.1 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, P $3.6 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 K $5.5 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 并含有丰富的微量元素^[21]。因此,鸭排泄物使得土壤氮、磷和其他营养物质增加。鸭子主要以杂草、昆虫、浮游生物为食。这种觅食习惯减少了杂草和好氧生物的数量,减少了水层中溶解氧(DO)的消耗,从而增加了水层中的 DO 含量^[11]。鸭子的干扰加速了土壤、水和大气之间的气体交换^[7, 11],使土壤中释出硫化氢和甲烷^[22],改善了土壤氧化还原条件^[10-11],不仅有利于根系发育,还加速了氨化和硝化,促进了水稻对氮的吸收和利用效率^[3]。鸭子除食杂草,减少了杂草对养分消耗,也有利于增加土壤养分含量。总之,与常规稻作相比,稻鸭共生土壤肥力显著改善,土壤有机碳显著增加^[23]。

2.3 鸭稻共生对土壤微生物和酶活性的影响

土壤微生物是土壤重要成分,参与土壤生态系统中的物质循环和能量转化。在水稻生长期,ND、NDW、DR 处理土壤中细菌、真菌、放线菌数量均

高于 CK,在水稻生长后期差异达到显著水平($P<0.05$)(表 2)。而且,DR 处理土壤细菌、放线菌和真菌的含量高于 ND、NDW 处理,有时达到显著水平($P<0.05$)。水稻生长后期(9月18日),DR 处理细菌、真菌和放线菌生物量分别高于 CK 130.9%、50.6%和 114.2%。稻鸭共生增加了土壤溶解氧和养分,为微生物的增殖提供了良好条件,从而显著增加土壤各类微生物的含量。前人^[24-25]也有类似报道。鸭子活动能促进水稻根系分泌物如维生素、酶、植物生长调节剂及氨基酸等有益物质的分泌,对土壤微生物物质交换也可能起到积极作用,增加微生物量。

土壤酶活性是土壤肥力的重要标志。鸭子活动区 ND、NDW、DR 处理土壤脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶活性多高于 CK。DR 处理土壤酶活性的增加更加明显(图 3)。在水稻生长期,ND、NDW、DR 处理土壤过氧化氢酶活性平均高出 CK 15.4%、8.6%、20.6%。说明稻鸭共生对土壤部分酶的活性具有一定的促进作用。研究^[11]发现,稻田养鸭能够显著增加土壤脲酶活性,且土壤酶活性与土壤肥力因子具有显著相关性^[26-27]。土壤脲酶、磷酸酶、过

表 2 不同处理下稻田土壤微生物数量

Table 2 Microbial numbers in the paddy soil relative to treatment / ($\times 10^6 \text{ g}^{-1}$ (Dry soil))

日期 Date (mm-dd)	处理 Treatment	微生物种类 Microbial species		
		细菌 Bacteria	真菌 Fungus	放线菌 Actinomycetes
08-04	CK	4.40±0.60a	84.41±16.83a	20.87±0.86a
	ND	4.49±0.43a	84.88±3.97a	24.62±3.44a
	NDW	5.11±0.58a	93.46±7.45a	23.94±2.87a
	DR	4.23±0.32a	81.03±4.53a	23.04±1.99a
08-18	CK	17.74±2.74a	97.14±3.17a	40.82±11.16a
	ND	26.03±2.05a	116.3±22.04a	41.36±6.24a
	NDW	22.04±3.11a	120.2±20.82a	39.87±6.09a
	DR	27.37±3.06a	123.7±26.17a	45.30±4.23a
09-18	CK	10.11±1.33b	69.55±6.29b	51.19±4.58c
	ND	23.09±2.83a	97.00±11.93ab	87.71±10.82ab
	NDW	13.01±1.12b	97.38±10.78ab	80.33±6.63b
	DR	23.34±3.06a	104.7±7.91a	109.6±2.61a

注:表中数值表示 4 次检测的平均值±标准差;同一日期不同处理之间比较,不同字母表示差异性显著($P<0.05$)。Note: The values in the table represent the Mean±SD ($n=4$). Different letters indicate significant difference between treatments on the same date at the $P<0.05$ level.

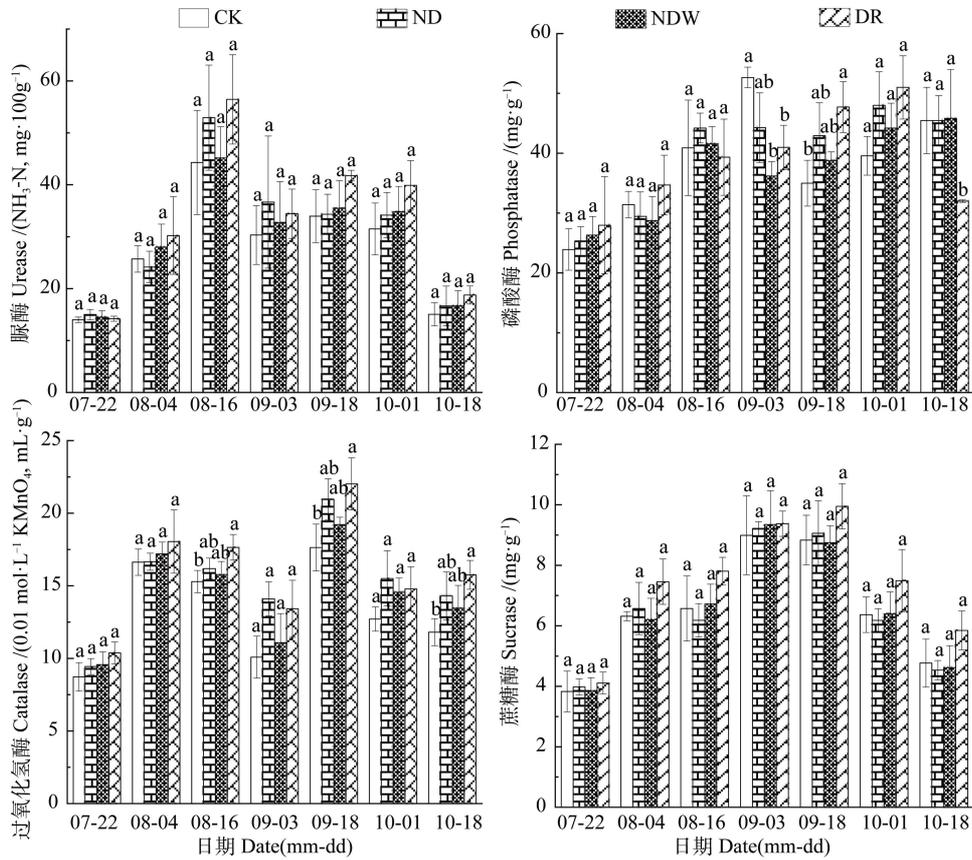


图3 不同处理下土壤酶活性
Fig. 3 Activities of soil enzymes relative to treatment

氧化氢酶和蔗糖酶能够促进土壤养分转化、加速土壤腐化以及增加土壤中易溶性营养物质。本研究也有类似结果，鸭活动区域土壤酶的活性和土壤肥力因子多高于CK，尤其是DR处理，表现出明显的正相关。

2.4 稻鸭共生对水稻生长的影响

水稻生长中后期，有鸭活动区 DR、ND 和 NDW

处理水稻苗株高略高于 CK ($P>0.05$)。在水稻全生长期，有鸭活动区 ND、NDW 和 DR 处理分蘖数大多显著高于 CK ($P<0.05$)，尤以 DR 处理为最高(图 4)，平均高于 CK 33.6%、32.1%和 34.2%。8 月 17 日，DR、NDW 和 ND 处理分蘖数分别较 CK 高 51.7%、47.9%、40.1%。充分表明，鸭子活动，无论直接还是间接，均可显著促进水稻分蘖。

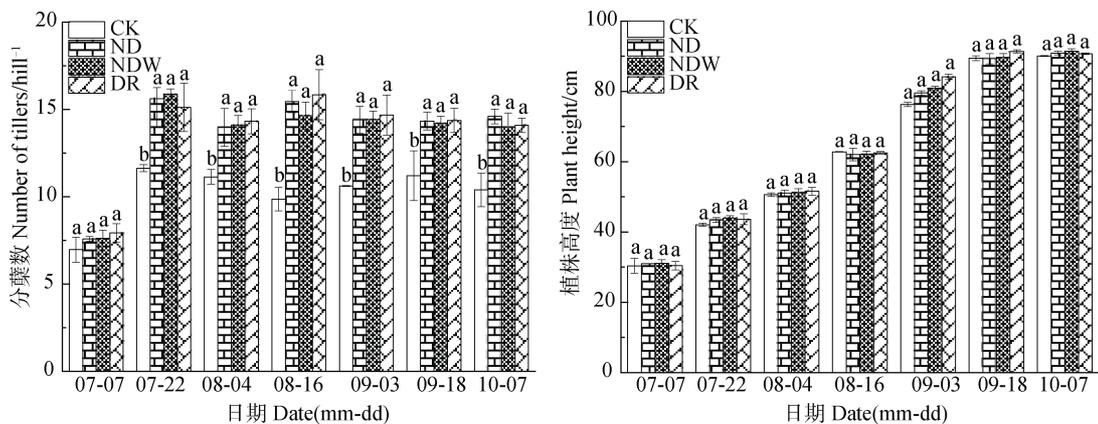


图4 不同处理下水稻苗高和分蘖数
Fig. 4 Plant height of the seedlings and number of tillers of the rice plants relative to treatment

显然, 稻鸭共生田面水和土壤养分的提高, 促进了水稻分蘖。但稻鸭共生还有其他积极效应, 如促进水稻生长。鸭子活动、摩擦刺激水稻杆茎, 一定程度上能促进水稻分蘖^[10]; 且踩踏和啄食晚期小分蘖, 显著降低水稻低效或无效分蘖^[5]。稻鸭共生促进了水稻根系活力和茎强度^[7], 促使根系扎深^[22]。鸭子排泄粪便, 刺激水稻, 有利于茎秆物质充实和生物量积累^[6]。鸭子在稻田的活动, 使水稻植株形态发生了明显变化, 植株碳水化合物含量、茎秆强度和抗倒伏指数显著提高^[6]。鸭子除食杂草, 使得水稻行间透光性变好, 能更有效合成叶绿素。

2.5 稻鸭共生对水稻生化特性的影响

水稻生长期, 植株硝态氮含量变化趋势: 先增高, 在开花期达到最大值; 而在水稻灌浆期(9月18日)后, 硝态氮含量迅速下降, 至黄熟期降至最低值(图5)。植株硝态氮含量在水稻生长中前期(8

月17日), 有鸭活动区 ND、NDW、DR 处理显著高于 CK ($P<0.05$)。植株硝态氮含量整体呈现出 DR>NDW>ND>CK 的趋势。

在水稻整个生长周期, 叶片叶绿素含量先增加, 至抽穗期和灌浆期伴随生殖生长达到顶峰; 进入黄熟期, 植株叶绿素含量逐渐下降。在生长中前期(8月4日), 有鸭活动区 ND、NDW、DR 处理的水稻植株叶绿素含量显著高于 CK ($P<0.05$) (图5)。

在水稻生长周期内, 植株可溶性蛋白质含量与可溶性糖变化趋势一致: 从分蘖期开始逐渐增高, 在灌浆期达到顶峰; 然后快速下降, 至黄熟期降至最低, 且各处理相近(图5)。水稻植株可溶性蛋白质和可溶性糖含量在抽穗期(9月3日)和灌浆期(9月18日)达到峰期, 此时有鸭活动区 ND、NDW、DR 处理显著高于 CK ($P<0.05$)。在可溶性糖含量达到最大值时, DR 处理显著高于其他处理和 CK ($P<0.05$)。

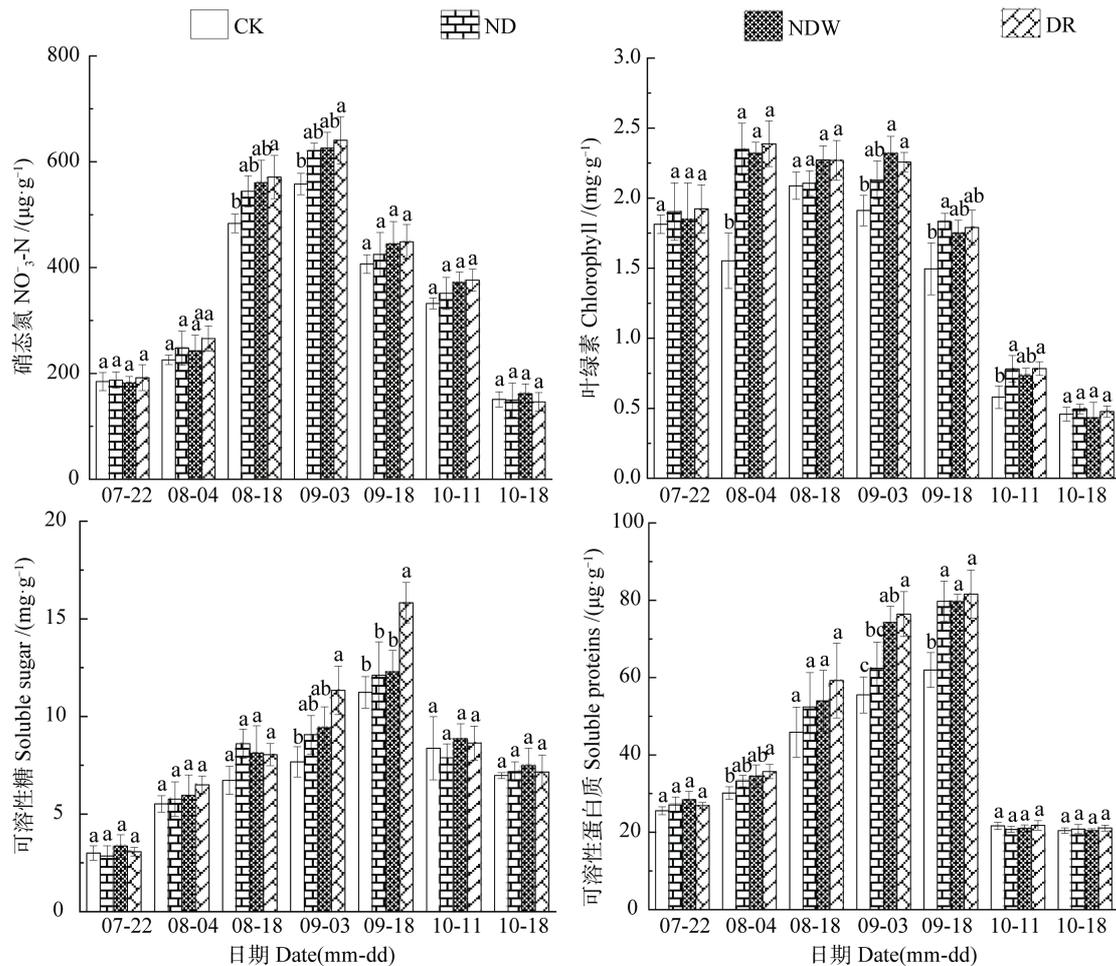


图5 不同处理下水稻植株生化特性

Fig. 5 Biochemical properties of the rice plants relative to treatment

水稻植株茎叶积累的硝态氮、叶绿素、可溶性蛋白和可溶性糖等成分，随着水稻生长发育迅速增加；但随着水稻叶片衰老，逐渐转移至水稻籽粒中。可溶性糖随着水稻的生长会逐渐转移至水稻茎鞘中，促进秆径充实，提高水稻植株的抗倒伏能力，而且同时为后期籽粒的开花灌浆提供物质储备^[6-7]。

2.6 鸭稻共生对稻田杂草的影响

鸭子进入稻田后，由于其杂食特性，啄食和践踏杂草，且在活动中产生浑水作用抑制杂草生长。DR 处理的杂草密度显著低于其他各处理 ($P < 0.05$)；与 CK 相比，杂草密度平均降低了 91.6% (图 6)。ND 处理杂草密度初期低于 CK；中后期迅速增加，显著高于 CK 和其他各处理 ($P < 0.05$)。ND 处理阻挡了稻田鸭，但依然受田面水养分输入影响，所以杂草密度最高。NDW 处理杂草密度，依然高于 DR 处理，说明水田定期人工拔草效果不及稻田鸭除草。前人研究^[28]也表明，与水稻单作相比，稻鸭处理杂草生物量减少了 98%。

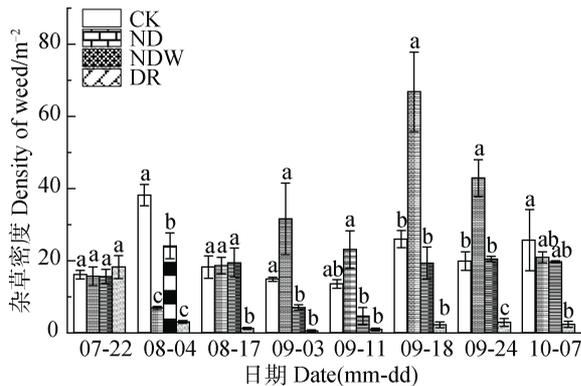


图 6 不同处理下田间杂草密度

Fig. 6 Density of weeds in the field relative to treatment

2.7 鸭稻共生对水稻病虫害的影响

在水稻生长期，调查了水稻卷叶螟、纹枯病和稻飞虱的发生率。DR 处理水稻三种病虫害的发生率，大多显著低于 CK 和其他处理 ($P < 0.05$) (图 7)。NDW 处理纵卷叶螟和纹枯病的发生率，大多显著高于 DR 处理，但低于 CK。水稻生长后期，ND 处理纵卷叶螟发生率显著高于 CK。这表明田间人工除草，增加水田的通透性，能有效地降低水稻病虫害。但在稻鸭活动区，若阻挡鸭子，又不人工除草，杂草密度过高，反而会加剧水稻病虫害。在水稻生长后期，对水田蜘蛛数量的调查表明，DR 处理蜘蛛数

量显著低于其他处理和 CK。这表明鸭子在田间觅食，不仅能减灭害虫，也会减少益虫的数量。

水稻生长期会受到许多病原体和害虫的威胁。常规稻作大量使用农药以控制病虫害。但是，农药过量施用，会影响稻米食用安全；滥用杀虫剂，还会减少捕食者的数量，反而诱使稻田虫害爆发。

鸭子在田间活动，不仅能够捕食稻飞虱和螟虫，而且溅起的泥土能够保护水稻植株不受病菌感染。稻飞虱是一种长距离迁移害虫，易伴随着台风天气迁移爆发^[29]。褐飞虱是水稻特有的害虫，对水稻的破坏性极强。严重时，会导致水稻大幅减产，严重威胁粮食安全^[30]。稻鸭共生对稻飞虱和叶蝉有明显的捕食作用，对稻纵卷叶螟、二化螟也有一定的控制效果^[31]。稻田放鸭 12 d 和 42 d 后，稻飞虱总数分别减少 63.9% 和 77.3%，杂草减少了 50.6% 和 94.2%；最大分蘖期和全抽穗期的纹枯病发病率分别降低了 67.2% 和 52.5%^[32]。本研究同时表明，稻田养鸭可大幅降低水稻纵卷叶螟、稻飞虱和纹枯病的发生率。鸭子在取食稻田害虫时，也会吃掉少量天敌，如青蛙和蜘蛛，在一定程度上会伤及有益生物；但不会像施用化学农药那样毁灭性地毒杀天敌。

2.8 鸭稻共生对水稻产量的影响

本研究估算的水稻理论产量与实际产量十分接近，而且相关性显著 (表 3)，说明田间测产较可靠。不同处理间，水稻每穗粒数、千粒重和结实率指标虽无显著差异 ($P > 0.05$)；但水稻产量存在显著差异：DR > NDW > ND > CK ($P < 0.05$, 表 3)。DR 处理平均高于 CK 42.3%，说明稻鸭共生有十分显著增产效果。NDW 和 ND 均显著高于 CK，又说明即使鸭子未进入、仅受鸭稻田面水影响的区域，也有显著增产效应。NDW 处理产量显著高于 ND 处理，表明在未用除草剂的情况下，水田人工除草，减少杂草密度，也有明显增产效应。

稻田养鸭能促进水稻生长，增加土壤肥力，控制田间草害和病虫害。在同等田间施肥条件下，稻鸭共生的增产效应显而易见。稻鸭共生能够显著提高水稻产量^[11, 33]。但是，稻鸭共生也可能对水稻增产产生负面影响。比如，雏鸭入田时机不当，会导致稻苗大面积踩坏；水稻扬花期，鸭子在田间活动，会碰落花粉，影响孕穗；水稻黄熟期不及时撤出鸭子，会导致大量稻谷被偷食。上述现象在实际生产中应引起注意。

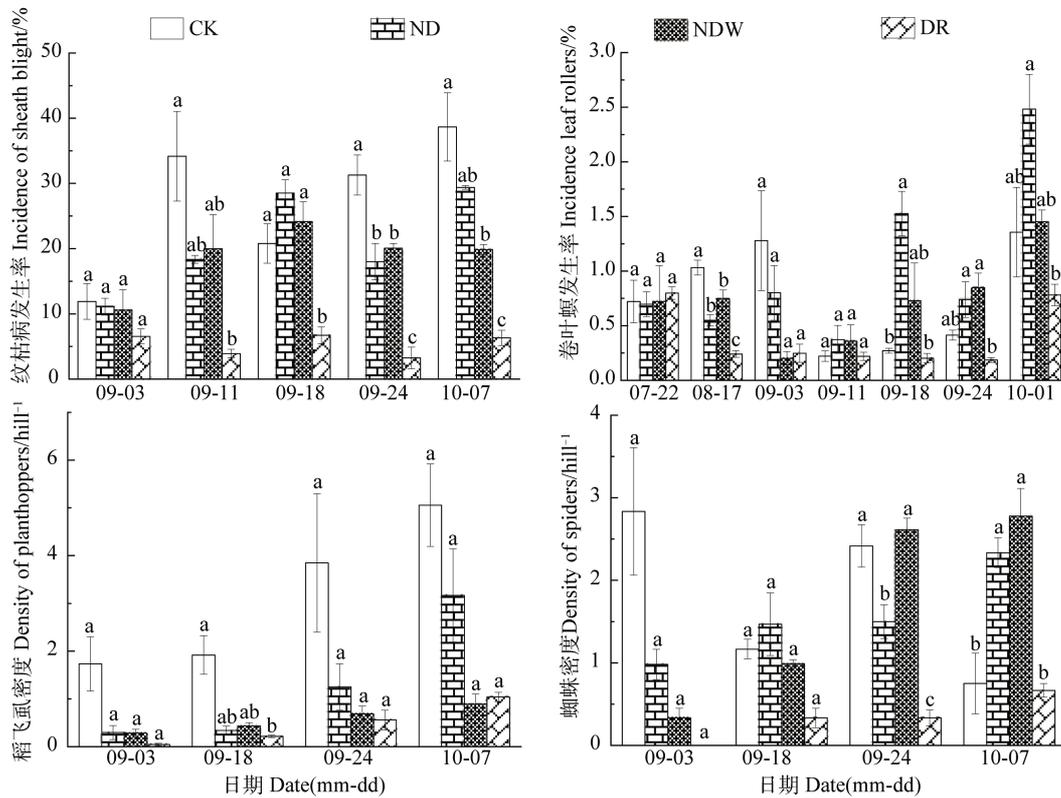


图 7 不同处理下病虫害发生率和蜘蛛数量

Fig. 7 Incidences of rice pests and diseases and number of spiders in the field relative to treatment

表 3 不同处理下的水稻产量

Table 3 Rice grain yield relative to treatment

处理 Treatment	有效穗数 Effective number of spikes/m ²	每穗粒数 Number of grains per panicle	千粒重 Thousand-grain weight/g	结实率 Seed setting rate	理论产量 Theoretical yield / (kg·hm ⁻²)	实际产量 Actual yield / (kg·hm ⁻²)
CK	218.4±11.85c	123.5±2.44a	27.24±0.41a	0.84±0.02a	6 140±31.6d	5 977±199.4c
ND	266.4±10.22b	132.6±10.81a	27.07±0.57a	0.75±0.02b	7 090±339.3c	7 667±192.5b
NDW	304.9±17.30ab	132.0±3.55a	26.35±0.65a	0.79±0.02ab	8 333±277.3b	8 241±182.4ab
DR	313.0±10.30a	128.6±4.25a	27.28±0.25a	0.84±0.01a	9 109±168.9a	8 507±302.5a

注: 同列不同字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Note: Different letters in the same column mean significant difference between different treatments ($P < 0.05$) .

3 结论

稻鸭共生显著增加水田田面水铵态氮和磷含量, 提高土壤养分, 增加土壤微生物数量和酶活性, 从而促进水稻分蘖, 增加水稻各类养分积累, 增产效果显著。稻田鸭在水田的啄食和踩踏, 较人工除草更有效地减少水田杂草, 杂草去除率达到 91.6%。

稻鸭共生系统还能有效控制水稻卷叶螟、纹枯病和稻飞虱。稻鸭共生虽可使土壤和田面水养分增加, 但与施用化肥养分瞬间大量释放相比, 含量低而可持续, 多为水稻吸收, 且随鸭子收获而下降, 对外界环境的污染风险很低。而且, 稻鸭共生可大幅减少化肥、农药和除草剂的施用, 减少农业面源污染, 还可实现稻田多元产出。无论经济效益还是环境效益, 稻鸭共生均值得肯定。

参考文献 (References)

- [1] National Bureau of Statistics. Announcement of the National Bureau of Statistics on Food Production in 2017[R]. China Information News, 2017. [国家统计局. 国家统计局关于 2017 年粮食产量的公告[R]. 中国信息报, 2017.]
- [2] Tao Y Y, Wang H H, Jin M J, et al. Response of wheat yield and soil nutrients to substitution of organic nitrogen with aquatic plant residue[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (1): 156—164. [陶玥玥, 王海候, 金梅娟, 等. 小麦产量与土壤养分对水生植物源有机氮替代率的响应[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (1): 156—164.]
- [3] Yang H S, Yu D G, Zhou J J, et al. Rice-duck co-culture for reducing negative impacts of biogas slurry application in rice production systems[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 213: 142—150.
- [4] Gao H, Sha Z M, Wang F, et al. Nitrogen leakage in a rice-duck co-culture system with different fertilizer treatments in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 686: 555—567.
- [5] Quan G M, Zhang J E, Teng L L, et al. Effects of integrated rice-duck farming on rice root growth[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2008, 29 (3): 1—5. [全国明, 章家恩, 滕丽丽, 等. 稻鸭共作对水稻根系生长的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2008, 29 (3): 1—5.]
- [6] Wang Q S, Zhen R H, Ding Y F, et al. Strong stem effect and physiological characteristics of rice plant under rice-duck farming[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19 (12): 2661—2665. [王强盛, 甄若宏, 丁艳锋, 等. 稻鸭共作下水稻植株的壮秆效应及生理特性[J]. *应用生态学报*, 2008, 19 (12): 2661—2665.]
- [7] Liu X, Wang Q S, Xu G C, et al. Ecological effect and technology mode of rice-duck farming system[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31 (29): 90—96. [刘欣, 王强盛, 许国春, 等. 稻鸭共作农作系统的生态效应与技术模式[J]. *中国农学通报*, 2015, 31 (29): 90—96.]
- [8] Zheng H B, Huang H, Chen C, et al. Traditional symbiotic farming technology in China promotes the sustainability of a flooded rice production system[J]. *Sustainability Science*, 2017, 12 (1): 155—161.
- [9] Suh J. Theory and reality of integrated rice-duck farming in Asian developing countries: A systematic review and SWOT analysis[J]. *Agricultural Systems*, 2014, 125: 74—81.
- [10] Sheng F, Cao C G, Li C F. Integrated rice-duck farming decreases global warming potential and increases net ecosystem economic budget in central China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25 (23): 22744—22753.
- [11] Xu G C, Liu X, Wang Q S, et al. Integrated rice-duck farming mitigates the global warming potential in rice season[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 575: 58—66.
- [12] Cui R Y, Liu H B, Mao K M, et al. Effects of rice-duck mutualism on greenhouse gas emissions and rice yields from paddy fields in Erhai basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39 (7): 2306—2314. [崔荣阳, 刘宏斌, 毛昆明, 等. 洱海流域稻鸭共作对稻田温室气体排放和水稻产量的影响[J]. *环境科学学报*, 2019, 39 (7): 2306—2314.]
- [13] Li C F, Cao C G, Wang J P, et al. Nitrogen losses from integrated rice-duck and rice-fish ecosystems in Southern China[J]. *Plant and Soil*, 2008, 307 (1/2): 207—217.
- [14] Teng Q, Hu X F, Luo F, et al. Promotion of rice-duck integrated farming in the water source areas of Shanghai: Its positive effects on reducing agricultural diffuse pollution[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78 (5): 171.
- [15] Teng Q, Hu X F, Cheng C, et al. Ecological effects of rice-duck integrated farming on soil fertility and weed and pest control[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16 (10): 2395—2407.
- [16] Li Z G, Luo Y M, Teng Y. The research methods of soil and environmental microorganism[M]. Beijing: Science Press, 2008. [李振高, 骆永明, 滕应. *土壤与环境微生物研究法*[M]. 北京: 科学出版社, 2008.]
- [17] Zhang G L, Gong Z T. Soil survey laboratory methods[M]. Beijing: Science Press, 2012. [张甘霖, 龚子同. *土壤调查实验室分析方法*[M]. 北京: 科学出版社, 2012.]
- [18] Li L. Experimental guide to plant physiology module [M]. Beijing: Science Press, 2009. [李玲. *植物生理学模块实验指导*[M]. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [19] Choudhury A T M A, Kennedy I R. Nitrogen fertilizer losses from rice soils and control of environmental pollution problems[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2005, 36 (11/12): 1625—1639.
- [20] Hu X F, Cheng C, Luo F, et al. Effects of different fertilization practices on the incidence of rice pests and diseases: A three-year case study in Shanghai, in subtropical southeastern China[J]. *Field Crops Research*, 2016, 196: 33—50.
- [21] Quan G M, Zhang J E, Chen R, et al. Effects of rice-duck farming on paddy field water environment[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19 (9): 2023—2028. [全国明, 章家恩, 陈瑞, 等. 稻鸭共作对稻田水体环境的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19 (9): 2023—2028.]
- [22] Zhu C Q, Zhu X F, Shen R F. Hydrogen sulfide promote rice (*Oryza sativa*) cell wall P remobilization under P starvation condition[J]. *Soils*, 2018, 50 (1): 51—58. [朱春权, 朱晓芳, 沈仁芳. 硫化氢促进缺磷条件下水稻根系细胞壁磷的再利用[J]. *土壤*, 2018, 50 (1): 51—58.]

- [23] Nayak P K, Nayak A K, Panda B B, et al. Ecological mechanism and diversity in rice based integrated farming system[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 91: 359—375.
- [24] Bu H Z, Wang L H, You J C, et al. Impact of long-term fertilization on the microbial biomass carbon and soil microbial communities in paddy red soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43 (16): 3340—3347. [卜洪震, 王丽宏, 尤金成, 等. 长期施肥管理对红壤稻田土壤微生物量碳和微生物多样性的影响[J]. *中国农业科学*, 2010, 43 (16): 3340—3347.]
- [25] Wang H, Huang H, Yang Z H, et al. Integrated benefits of paddy rice-duck complex ecosystem[J]. *Rural Eco-environment*, 2003, 19 (4): 23—26, 44. [王华, 黄璜, 杨志辉, 等. 湿地稻-鸭复合生态系统综合效益研究[J]. *农村生态环境*, 2003, 19 (4): 23—26, 44.]
- [26] Kang Y L, Jing F, Sun W Q, et al. Effects of continuous cropping of processing tomato on physical-chemical properties of and microbial biomass in the soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (2): 533—542. [康亚龙, 景峰, 孙文庆, 等. 加工番茄连作对土壤理化性状及微生物量的影响[J]. *土壤学报*, 2016, 53 (2): 533—542.]
- [27] Zhang M F, Tian F, Wang X X, et al. Effects of different green manure varieties on enzyme activities and fertility of tobacco-planting soils[J]. *Soils*, 2017, 49 (5): 903—908. [张明发, 田峰, 王兴祥, 等. 翻压不同绿肥品种对植烟土壤肥力及酶活性的影响[J]. *土壤*, 2017, 49 (5): 903—908.]
- [28] Lou Y G, Zhang G R, Zhang W Q, et al. Biological control of rice insect pests in China[J]. *Biological Control*, 2013, 67 (1): 8—20.
- [29] Hu G, Lu M H, Reynolds D R, et al. Long-term seasonal forecasting of a major migrant insect pest: The brown planthopper in the Lower Yangtze River Valley[J]. *Journal of Pest Science*, 2019, 92 (2): 417—428.
- [30] Jing S L, Zhao Y, Du B, et al. Genomics of interaction between the brown planthopper and rice[J]. *Current Opinion in Insect Science*, 2017, 19: 82—87.
- [31] Zhu F G, Feng Q S, Zhuge Z. Control impact of rice-duck ecological structure on harmful biotic community of rice fields[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2004, 16 (1): 37—41. [朱凤姑, 丰庆生, 诸葛梓. 稻鸭生态结构对稻田有害生物群落的控制作用[J]. *浙江农业学报*, 2004, 16 (1): 37—41.]
- [32] Huang S W, Wang L, Liu L M, et al. Nonchemical pest control in China rice: A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 34 (2): 275—291.
- [33] Zhang J E, Xu R B, Chen X, et al. Effects of duck activities on a weed community under a transplanted rice-duck farming system in Southern China[J]. *Weed Biology and Management*, 2009, 9 (3): 250—257.

(责任编辑: 陈荣府)