

## 稻田生态种养防控农田面源污染研究进展

仪凯<sup>1</sup>, 仪小梅<sup>2,3\*</sup>

(1. 中粮农业产业管理服务有限公司, 北京 100020; 2. 上海市岩土工程检测中心, 上海 200436; 3. 上海交通大学农业与生物学院, 上海 200240)

**摘要** 水稻是我国重要的粮食作物, 大量化肥、农药的使用使得粮食产量大幅提高。然而过量的化肥、农药随着渗漏和径流进入周边水体环境中, 带来一系列地表水环境问题, 严重威胁着我国粮食安全。防控农业面源已引起了国家的高度重视, 工作重点逐渐转移到稻田可持续发展。稻田生态种养这种古老传统的农业方式因利用生态系统循环原理, 减少化肥农药的投入再次受到人们重视。对目前稻-渔生态种养、稻-蛙生态种养以及稻-鸭生态种养防控面源污染等研究进展进行综述, 以期对稻田耕作、农药化肥的合理使用提供理论支持, 为我国的粮食安全提供技术支持。

**关键词** 稻田; 化肥; 面源污染; 生态种养; 粮食安全

**中图分类号** X 71 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2022)09-0027-03

**doi**: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.09.008



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Research Progress on Prevention of Non-point Source Pollution in Paddy Field by Integrated Planting-feeding Farming

YI Kai<sup>1</sup>, YI Xiao-mei<sup>2,3</sup> (1. COFCO Agricultural Industry Management Service Co., Ltd., Beijing 100020; 2. Shanghai Geotechnical Engineering Detecting Centre, Shanghai 200436; 3. School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

**Abstract** Rice is an important food crop in China. The greatly increased grain yield owed to the large use of chemical fertilizers and pesticides in agriculture. However, excessive chemical fertilizers and pesticides get into the surrounding water environment with leakage and runoff loss, which brings a series of surface water environmental problems and seriously threatens China's food security. The prevention and control of agricultural non-point source has attracted great attention of the government. And the focus of work has gradually transferred to the sustainable development of agriculture. Integrated planting-feeding farming which is an ancient traditional agricultural pattern, has attracted people's attention again. Integrated planting-feeding farming can use the principle of ecosystem circulation and reduce the input fertilizers and pesticides. In this paper, we review the research progress of prevention and control of non-point source pollution by integrated rice-fish farming, integrated rice-frog farming and integrated rice-duck farming. The aim is to provide theoretical support for rice cultivation, rational use of pesticides and fertilizers, and provide technical support for China's food security.

**Key words** Paddy field; Chemical fertilizer; Non-point source pollution; Ecological cultivation; Food security

水稻是我国重要的粮食作物, 大量施用化肥和农药是保证农业产量的主要措施, 但随着农药和化肥的过量使用, 过量的肥料以及农药随着渗漏和径流进入周边地表水体中, 带来了一系列的环境问题, 农业面源污染已成为当前地表水水体污染的主要驱动因素, 严重威胁着我国食品安全<sup>[1]</sup>。农业面源污染造成的环境问题已引起党中央、国务院的高度重视, 我国明确提出, 2020 年中国将形成“环境友好型、资源节约型”的两型农业。2017 年农业部办公厅印发了《重点流域农业面源污染综合治理示范工程建设规划(2016—2020 年)》<sup>[2]</sup>。2021 年生态环境部和农业农村部联合印发了《农业面源污染治理与监督指导实施方案(试行)》, 方案中指出农业面源污染治理是生态环境保护的重要内容, 事关农村生态文明建设, 事关国家粮食安全和农业绿色发展, 事关城乡居民的水缸子、米袋子、菜篮子, 需要大力发展种养结合、生态循环农业, 扩大绿色、有机和地理标志农产品种养规模, 增加绿色优质农产品供给, 提升农业发展质量和效益<sup>[3]</sup>。

近年来, 我国稻田生态种养已接近 233.33 万  $\text{hm}^2$ , 成为世界上稻田水产养殖面积和产量最大的国家<sup>[4]</sup>, 我国稻田生态种养正逐步向规模化、集约化方向发展, 生产力有了较大提高, 稻田生态种养模式已成为未来可持续农业的发展方

向。稻田生态种养农业是在水稻生长季节, 水稻与水生动物共同生活在同一环境中的一种生态农业模式, 动物和植物互惠互利, 相互影响。在保证水稻正常生长发育的前提下, 合理利用稻田湿地资源的空间和养分, 进行适当的水产动物和水禽养殖, 如: 稻-渔(稻-鱼、稻-虾、稻-蟹、稻-鳖)、稻-鸭、稻-蛙等生态种养耦合模式, 可保证稻田养殖动物的安全, 减少农药化肥的投入, 从源头上减少氮磷等面源污染, 提高稻田的生产力, 生产高附加值的绿色无公害水稻, 同时提高农民的收入。研究表明, 稻田生态种养能够改善营养循环, 控制害虫和杂草, 减少氮磷流失<sup>[5]</sup>。水稻种植和水产养殖相结合的生态种养模式不仅能够减少稻田对周边环境的污染压力, 也能够提高经济效益, 是一种既生态又能产生经济价值的水稻种植模式。

#### 1 稻-渔生态种养

稻-渔生态种养包括: 稻-鱼、稻-虾、稻-蟹、稻-鳖和稻-螺等。稻渔生态种养历史悠久, 稻田养鱼在东汉时期(公元 20—226 年)便已出现<sup>[6]</sup>, 稻田生态种养系统中, 水稻和水生动物同时生长和生活在同一湿地环境中, 既生产稻谷等碳水化合物, 又能产出渔虾蟹等的动物性蛋白, 被公认为粮食生产及饲养动物相结合的成功典范, 在提高人们营养水平、减轻世界贫困和维持粮食安全方面发挥着积极作用<sup>[7]</sup>。稻-渔生态种养能够减少化肥农药投入量, 改善农业生态环境, 减少农业面源污染, 促进粮食生产和水产养殖, 保障粮食安全。联合国粮农组织(FAO)自 1950 年开始在世界范围内大力推

**作者简介** 仪凯(1980—), 男, 北京人, 工程师, 硕士, 从事食品安全研究。\*通信作者, 工程师, 博士, 从事农业面源污染防治及生态修复研究。

**收稿日期** 2021-07-30

广稻田生态种养,并于2005年评选我国的“青田稻鱼共生系统”为首批“全球重要农业文化遗产”。据记载,稻-鱼生态种养系统已经具有1200多年的历史<sup>[8]</sup>。2020年12月25日,“青田田鱼”生态种养系统正式获得中华人民共和国农业农村部农产品地理标志登记保护。此外,随着政府的重视和推广,稻-虾、稻-蟹、稻-鳖和稻-螺等生态种养模式也得到了迅速发展,稻-虾生态种养目前已成为我国应用面积最大、综合产量最高的稻-渔综合种养方式<sup>[4]</sup>。

王晨等<sup>[9]</sup>研究表明,在稻-鱼种养型农场中,稻-鱼生态种养共作模式的氮肥投入和农药投入显著低于水稻单作模式,减少了农药化肥的使用和流失风险。Li等<sup>[10]</sup>研究发现,稻-鱼共生和稻-虾共生系统中,稻-鱼共生系统能够降低营养物质(TP和TN)的含量,缓解沉降物再悬浮,在缓解水体富营养化中起着重要的作用,并且使得稻田氨挥发和 $N_2O$ 的排放量显著降低。吴敏芳等<sup>[11]</sup>研究发现,稻-鱼共作系统中处理氮肥使用量较常规水稻种植系统中减少30%。Hu等<sup>[12]</sup>研究表明,与传统的水稻种植模式相比,稻-鱼生态种养可以在不增加稻田污染输出的基础上显著提高稻田生态系统的生产力,是一种环境友好型的水稻种植模式。与常规水稻种植相比,稻-鱼生态种养既可以保证稻谷产量又能降低 $CH_4$ 和 $N_2O$ 的排放量,降低全球增温潜势。Ahmed等<sup>[13]</sup>研究发现,稻-鱼生态种养能够提高土壤和稻米品质,减少农药投入23.4%。侣国涵等<sup>[14]</sup>研究表明,长期稻-虾生态种养模式能够显著降低氮和磷的流失,促进土壤中氮和磷的积累。陈飞星等<sup>[15]</sup>发现,稻蟹生态种养系统化肥和除虫剂的投入显著少于常规水稻种植,并且每年可减少氮素面源污染负荷 $6.375\text{ kg/hm}^2$ 。Zhang等<sup>[16]</sup>在研究稻-鳖生态种养系统中发现,部分含有氮磷未被鳖及时食用的饲料能够被水稻植株再吸收利用,不仅减少了水产动物饲料的浪费,降低水稻氮磷肥料的施用量,同时降低了面源污染的风险。

## 2 稻-蛙生态种养

古人利用稻蛙生态养的自然生态理念管理水稻种植,早在公元1181年,宋代词人辛弃疾在《西江月·夜行黄沙道中》便有“稻花香里说丰年,听取蛙声一片”的诗句,意思是听到稻田里传来的片片蛙声,人们便能想象得到今年又是一个稻米的丰收年。稻-蛙生态种养系统中,水稻田为青蛙提供栖息和捕食的场所,青蛙在稻田的捕食和碰撞活动可以降低水稻害虫的发生率,降低病害发生,减少农药和化肥的使用并起到生物防治的作用。近年来,关于稻-蛙生态种养控制农田面源污染的研究多有报道。苑圆圆<sup>[17]</sup>研究发现,在稻田中引入虎纹蛙,一方面其在稻田生长过程中的捕食和跳跃活动能够为稻田中耕松土,减少病虫害发生以及农药投入,保障了环境和粮食安全;另一方面虎纹蛙在稻田里的活动能够刺激水稻吸收养分,增强农产品品质。有研究指出,稻-蛙生态种养系统中,用50%有机肥替代化肥的绿色稻-蛙系统不会显著降低水稻产量,并且减少了硝态氮、铵态氮和总氮径流失量,分别减少20.00%、27.39%和25.16%,同时也减少了硝态氮、铵态氮和总氮的渗漏流失量,分别降低

14.42%、17.62%和14.82%;用100%有机肥代替化肥的有机稻蛙系统,明显降低了总氮渗漏和径流流失负荷,分别降低28.70%和28.45%,但会显著降低水稻产量<sup>[18]</sup>。周雪芳等<sup>[19]</sup>也发现,稻-蛙生态种养可提高巨大芽孢杆菌数量以及酸性磷酸酶活性,促进难溶性的磷转化为可溶性磷,从而提高稻田土壤磷素的供应能力。Fang等<sup>[20]</sup>在上海市青浦区现代农业园区试验发现,稻-蛙生态系统(IRFE)具有减少稻田 $CH_4$ 、 $N_2O$ 排放和维持稻田产量的潜力,2018年水稻生长季 $CH_4$ 和 $N_2O$ 排放分别减少了24.70%和41.75%,2019年分别减少了21.68%和51.21%, $CH_4$ 排放随青蛙数量的增加而减少,青蛙还能增加水稻根系的直径、生物量和体积,从而促进水稻的生长。另外,稻-蛙生态种养能够减少稻田氨挥发损失,稻-蛙生态种养为稻田的高效利用,避免过度使用化肥、除草剂和不降低水稻产量的前提下减少面源污染,提高水稻营养状况提供了一种新模式<sup>[21-23]</sup>。

## 3 稻鸭生态种养

稻鸭生态种养是以水田为基础、种稻为核心、田间养殖鸭子为特点的生态种养模式,稻鸭生态种养历史悠久,我国以鸭治虫可以追溯到明朝<sup>[24]</sup>。在稻鸭共作生态系统中,在水稻分蘖期后抽穗之前,将鸭子引入稻田,稻田为鸭子提供生存场地和食物,鸭子为杂食性动物,避开水稻植株取食稻田里的杂草和害虫,同时排泄物为水稻提供营养。鸭子通过不停踩踏,增加扰动,提高稻田中的溶解氧含量,帮助释放土壤中有毒气体硫化氢和沼气等,使水稻根系扎得更深,并且鸭子不停地碰撞水稻植株,可促进水稻植株的生长<sup>[25]</sup>。稻-鸭耦合互惠期间,鸭子的粪便是良好的肥料,可作为有机肥代替化肥,从而生产出健康的有机大米,与此同时还降低了农业面源污染的风险<sup>[26]</sup>。因为鸭子的引入不仅减少了化肥和农药的使用量,鸭子粪便排入稻田,显著增加土壤有机质、速效磷、速效钾、碱解氮和全氮等养分的含量,而且鸭子的活动能够降低土壤容重、改善土壤通气情况与氧化还原状况<sup>[27]</sup>。

李成芳等<sup>[28]</sup>研究表明,稻-鸭生态种养模式能够显著降低土壤有机氮和可溶性总氮含量,减少土壤可溶性氮的淋溶流失风险。郑敏<sup>[29]</sup>在稻-鸭生态种养方面做了大量的研究,发现放鸭当天,田面水的总氮、铵态氮和硝态氮的浓度均达到了峰值,之后急剧下降至缓慢平稳,鸭粪是氮素的主要来源,放鸭后期由于鸭子活动促进了水稻生长,增加了水体中氮素的吸收,这使得水体环境中氮素的含量有所减少,氮素流失的风险也相应的减少。Gao等<sup>[30]</sup>在上海地区进行稻-鸭生态研究发现,稻-鸭生态种养能够控制化肥投入,提高土壤生产力和水稻利用效率,显著降低氮素流失,并且与单施有机肥相比,稻田引入鸭子增加水稻对磷的利用效率,减少总磷和可溶性磷通过渗漏和径流流失。Yang等<sup>[31]</sup>发现,在沼液替代化肥的稻田系统,同时引入家鸭,稻-鸭共作提高了水稻对氮磷的利用效率,减少氮磷通过径流流失。稻-鸭生态种养不仅减少氮素渗漏流失,并且降低了 $N_2O$ 排放和氨挥发,稻-鸭生态系统相对于常规水稻种植降低了 $CH_4$ 和 $N_2O$

温室气体的排放,降低全球增温潜势<sup>[26-27]</sup>。

#### 4 展望

随着生态种养模式日益受到重视,在全国迅速推广,生态种养模式向多元化发展,不仅出现稻-渔生态种养、稻-蛙生态种养以及稻-鸭生态种养等单一动植物复合种养方式,更出现了稻-鱼-虾、稻-鱼-蛙、稻-鱼-蛙-虾等多元化复合种养方式。生态种养模式利用生态系统循环原理,做到“一田多用,一地多收”,能够提高稻田生态系统生物多样性,减少化肥农药的投入,保障粮食安全,同时保护环境,减少农田面源污染风险,有效地提高生态效益和经济效益,是值得推广的生态农业模式。

在当前的生态种养模式下,如何利用生态原理平衡好植物和动物的关系,以及避免过多的饵料投入造成浪费,防治动物疾病导致的抗生素过度使用也值得警惕,尤其是过多的有机肥投入潜在地增加磷素流失的风险防控值得深思和注意。

#### 参考文献

- [1] 朱兆良,孙波. 中国农业面源污染控制对策研究[J]. 环境保护,2008,36(8):4-6.
- [2] 农业部办公厅. 农业部办公厅关于印发《重点流域农业面源污染综合治理示范工程建设规划(2016—2020年)》的通知:农办科〔2017〕16号[A]. 2017-03-24.
- [3] 生态环境部办公厅,农业农村部办公室. 农业面源污染治理与监督指导实施方案(试行)[A]. 2021.
- [4] 中国稻渔综合种养产业发展报告(2020)[J]. 中国水产,2020(10):12-19.
- [5] 张福锁. 发展绿色生态种养业 加强绿色食品认证管理[J]. 中国食品,2021(8):32-35.
- [6] 苏培义. 论稻田养鱼在农田生态中的作用及其综合效益[J]. 重庆水产,1988(1):41-46.
- [7] REN W Z, HU L L, GUO L, et al. Preservation of the genetic diversity of a local common carp in the agricultural heritage rice-fish system[J]. Proceedings of the national academy of sciences, 2018, 115(3): E546-E554.
- [8] XIE J, HU L L, TANG J J, et al. Ecological mechanisms underlying the sustainability of the agricultural heritage rice-fish coculture system[J]. Proceedings of the national academy of sciences, 2011, 108(50): E1381-E1387.
- [9] 王晨,胡亮亮,唐建军,等. 稻鱼种养型农场的特征与效应分析[J]. 农业现代化研究,2018,39(5):875-882.
- [10] LI F B, FENG J F, ZHOU X Y, et al. Impact of rice-fish/shrimp co-culture on the N<sub>2</sub>O emission and NH<sub>3</sub> volatilization in intensive aquaculture ponds[J]. Science of the total environment, 2019, 655: 284-291.
- [11] 吴敏芳,张剑,陈欣,等. 提升稻鱼共生模式的若干关键技术研究[J]. 中国农学通报,2014,30(33):51-55.
- [12] HU L L, REN W Z, TANG J J, et al. The productivity of traditional rice-fish co-culture can be increased without increasing nitrogen loss to the

environment[J]. Agriculture, ecosystems & environment, 2013, 177: 28-34.

- [13] AHMED N, FLAHERTY M S. Opportunities and challenges for the development of prawn farming with fish and rice in southeast Bangladesh: Potential for food security and economic growth[J]. Food security, 2013, 5(5): 637-649.
- [14] 佘国涵,彭成林,徐祥玉,等. 稻虾共作模式对涝渍稻田土壤理化性状的影响[J]. 中国生态农业学报,2017,25(1):61-68.
- [15] 陈飞星,张增杰. 稻田养蟹模式的生态经济分析[J]. 应用生态学报,2002,13(3):323-326.
- [16] ZHANG J, HU L L, REN W Z, et al. Rice-soft shell turtle coculture effects on yield and its environment[J]. Agriculture, ecosystems and environment, 2016, 224: 116-122.
- [17] 苑圆圆. 稻-蛙、瓜-蛙-鱼生态种养及养分平衡的研究[D]. 福州:福建师范大学,2011.
- [18] 仪小梅. 基于稻蛙生态种养的稻田氮素流失及微生物群落特征研究[D]. 上海:上海交通大学,2020.
- [19] 周雪芳,朱晓伟,陈泽恺,等. 稻蛙生态种养对土壤微生物及无机磷含量的影响[J]. 核农学报,2016,30(5):971-977.
- [20] FANG K K, DAI W, CHEN H Y, et al. The effect of integrated rice-frog ecosystem on rice morphological traits and methane emission from paddy fields[J/OL]. Science of the total environment, 2021, 783[2021-03-17]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147123>.
- [21] 岳玉波,沙之敏,赵峥,等. 不同水稻种植模式对氮磷流失特征的影响[J]. 中国生态农业学报,2014,22(12):1424-1432.
- [22] SHA Z M, CHU Q N, ZHAO Z, et al. Variations in nutrient and trace element composition of rice in an organic rice-frog coculture system[J]. Scientific reports, 2017, 7(1): 1-10.
- [23] 陈慧妍,沙之敏,吴富钧,等. 稻蛙共作对水稻-紫云英轮作系统氮挥发影响的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文),2021,29(5):792-801.
- [24] ZHANG J E, QUAN G M, ZHAO B L, et al. Rice-duck co-culture in China and its ecological relationships and functions [M]//LUO S M, GLIESSMAN S R. Agroecology in China: Science, Practice, and Sustainable Management. Boca Raton: CRC Press, 2016: 111-138.
- [25] 沈建凯,黄璜,傅志强,等. 稻鸭生态种养系统直播水稻根表和根际土壤营养特性研究[J]. 中国生态农业学报,2010,18(6):1151-1156.
- [26] 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: 22744-22753.
- [27] 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.
- [28] 李成芳,曹贵贵,展茗,等. 稻鸭共作对稻田氮素变化及土壤微生物的影响[J]. 生态学报,2008,28(5):2115-2122.
- [29] 郑敏. 稻鸭共育稻田水体藻类多样性及其与氮磷相关性研究[D]. 武汉:华中农业大学,2012.
- [30] 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.
- [31] 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.

(上接第26页)

- [40] DAVIÈRE J M, ACHARD P. Gibberellin signaling in plants[J]. Development, 2013, 140(6): 1147-1151.
- [41] GALVÃO V C, HORRER D, KÜTTNER F, et al. Spatial control of flowering by DELLA proteins in *Arabidopsis thaliana* [J]. Development, 2012, 139(21): 4072-4082.
- [42] BOLDUC N, HAKE S. The maize transcription factor KNOTTED1 directly regulates the gibberellin catabolism gene *ga2ox1* [J]. Plant cell, 2009, 21(6): 1647-1658.
- [43] GOLDBERG-MOELLER R, SHALOM L, SHLIZERMAN L, et al. Effects of gibberellin treatment during flowering induction period on global gene expression and the transcription of flowering-control genes in *Citrus* buds [J]. Plant science, 2013, 198: 46-57.
- [44] GHOSH A, CHIKARA J, CHAUDHARY D R, et al. Paclobutrazol arrests

vegetative growth and unveils unexpressed yield potential of *Jatropha curcas* [J]. Journal of plant growth regulation, 2010, 29(3): 307-315.

- [45] BODEN S A, WEISS D, ROSS J J, et al. EARLY FLOWERING3 regulates flowering in spring barley by mediating gibberellin production and FLOWERING LOCUS T expression [J]. Plant cell, 2014, 26(4): 1557-1569.
- [46] XUE X Y, ZHAO B, CHAO L M, et al. Interaction between two timing microRNAs controls trichome distribution in *Arabidopsis* [J]. PLoS genetics, 2014, 10(4): 1-13.
- [47] WANG J W, CZECH B, WEIGEL D. miR156-regulated SPL transcription factors define an endogenous flowering pathway in *Arabidopsis thaliana* [J]. Cell, 2009, 138(4): 738-749.
- [48] JUNG J H, SEO P J, AHN J H, et al. *Arabidopsis* RNA-binding protein FCA regulates microRNA172 processing in thermosensory flowering [J]. The journal of biological chemistry, 2012, 287(19): 16007-16016.