

· 专论与综述 ·

稻田氮磷流失控制技术研究

甘曼琴, 刘佩诗, 黄瑜, 甘晓玉, 马友华*

(安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036)

摘要: 分析了稻田氮磷流失的途径, 以及降雨、秸秆还田、施肥等影响因素, 综述了养分管理、水分管理、生态拦截、农田尾水回用等稻田氮磷流失控制技术的研究现状, 提出应探索稻田氮磷流失源头控制和末端管控机制, 加强生态拦截技术优化配置与性能研究。

关键词: 氮磷流失; 控制技术; 养分; 水分; 生态拦截; 稻田

中图分类号: X592; S157.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-2009(2020)02-0008-04

Study on Control Technology of Nitrogen and Phosphorus Loss in Paddy Field

GAN Man-qin, LIU Pei-shi, HUANG Yu, GAN Xiao-yu, MA You-hua*

(School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China)

Abstract: In this paper, the ways of nitrogen and phosphorus loss from paddy fields were analyzed, the influence factors of rainfall, straw returning and fertilization were discussed, and the control technologies of nitrogen and phosphorus loss were studies in water and nutrient management, ecological interception and tail water re-use. It proposed to establish source and end control mechanism, strengthen the optimal configuration of ecological intercept technologies and performance researches.

Key words: Nitrogen and phosphorus loss; Control technology; Nutrient; Water; Ecological interception; Paddy field

水稻是我国粮食作物体系的重要环节, 在粮食作物排行榜上高居首位^[1], 其种植面积达到 3 000 万 hm^2 , 产量超过目前粮食总产量的 1/3。我国有超过 65% 的人口将稻米作为主要食物^[2], 稻米在粮食生产和消费中一直处于领先地位^[3]。与此同时, 我国的氮肥消耗量也居世界首位, 稻田氮肥的利用率为 30% ~ 40%, 磷肥使用量仅 2011 年就达到 1 462 万 t ^[4], 而其利用率仅为 15% ~ 25%^[5]。在对稻田施肥时, 粮食作物对肥料中的氮磷无法全部吸收利用, 通过地表径流、农田排水或地下淋溶等途径, 作物周围环境吸收了大部分损失的氮肥、磷肥, 引起农业非点源污染, 破坏动物、植物正常的生长条件, 乃至危害人类健康。造成农田面源污染的主要原因之一就是稻田氮磷流失^[6], 而水稻的生产与氮磷等肥料的投入密不可分。因此, 如何在降低稻田氮磷流失量的同时兼顾水稻产量等经济效益, 对于水稻生产具有重要意义。今就控制稻田

氮磷流失的技术方法展开综述。

1 稻田氮磷流失现状

1.1 稻田氮磷流失途径

稻田氮磷流失途径分为氮素气态损失、氮磷径流损失和氮磷淋溶流失 3 大类^[7]。除土壤中残留的小部分氮被植物吸收外, 由于淋溶、径流、气体挥发及硝化-反硝化等作用, 投入稻田的大部分氮会损失, 其中气态损失的氮占氮素总损失量的 70% ~ 80%。此外, 地表径流也是稻田土壤氮磷流失的重要途径之一。研究表明, 施肥后氮和磷主要通过地

收稿日期: 2019-05-14; 修订日期: 2020-01-12

基金项目: 国家重点研发计划“水稻主产区氮磷流失综合防控技术与产品研发”基金资助项目(2016YFD0800503)

作者简介: 甘曼琴(1994—), 女, 安徽安庆人, 在读研究生, 主要从事农业资源与环境研究。

* 通信作者: 马友华 E-mail: yhma@ahau.edu.cn

表径流和地下管网流入水体,导致水体富营养化^[8]。由地表径流造成的氮磷损失可分为两种:一种是土壤全氮(沉积氮)、全磷(沉积磷)的损失;另一种是土壤可溶性氮(溶解氮)、可溶性磷(溶解磷)的损失^[9]。施用于农田的氮肥有 30% ~ 40% 通过淋溶进入地下水^[5,10]。朱兆良^[11]研究发现,太湖水稻-小麦轮作的地表径流与淋溶造成的氮素流失量相当于氮肥施用量的 11% 左右,稻季氮素淋溶损失以硝态氮为主,占施肥量的 1% ~ 3%, 占总氮淋溶损失量的 75% 左右^[12-13]。硝化-反硝化也是稻田氮素流失的途径之一,其产生的 N_2O 还会造成大气污染。

1.2 影响稻田氮磷流失的因素

1.2.1 降雨

降雨是影响稻田氮磷流失的重要因素之一^[5,14]。到目前为止,研究结论与观测资料均表明,降雨所引起的径流是稻田氮磷流失的主要途径。降雨量、降雨强度和降雨历时等因子均会对氮磷流失量和流失浓度产生影响。肖强等^[15]模拟了太湖流域的降雨试验,当控制降雨条件保持一致时,长时期的小雨比短时期的大雨造成的农田氮流失量更大。氮磷流失的形态也会随着降雨强度不同而产生变化,径流中总氮、氨氮、硝态氮和总磷的损失更为严重^[16-17]。降雨量和降雨强度通过影响径流量和泥沙流失量,进而对氮磷流失产生影响。在高强度暴雨条件下,氮磷流失会随降雨事件而发生变化,氮磷等营养元素的流失与降雨强度呈正相关。对降雨前后水中氮元素含量的测试研究表明,稻田非点源污染的关键成因之一就是降雨所导致的氮元素损失。

1.2.2 秸秆还田

秸秆还田作为秸秆的利用方法,既可以避免秸秆焚烧造成的环境污染,又可以回收秸秆中的养分^[18-19]。此外,秸秆还田提高了土壤对有机质和氮、磷、钾等养分的吸收能力,使土壤中的水分更好地被储存,具有改善植物性状和提高作物产量等优势,在农业中得到了广泛应用。朱坚等^[20]开展了秸秆还田对双季稻产量及氮磷径流流失的影响研究,结果发现,秸秆长期还田能够促进节肥增效减失,提高资源利用效率,降低氮磷流失风险。与一般的肥料处理方式相比,秸秆还田还可以使早稻和晚稻径流中的总氮分别降低 15% 和 7%, 总磷分别降低 9% 和 11%。

1.2.3 施肥

稻田是我国农田的主要类型,水稻生长过程中过量施肥带来的氮磷流失是导致稻田面源污染的主要原因之一^[21-22]。施肥量和施肥时间对稻田径流及氮磷流失均有影响,一般而言,施肥量越大,径流发生时间越接近施肥时间,氮磷损失就越大^[23-24]。王小治等^[25]研究发现,稻田氮磷施用量越大,产生的氮磷流失越多。另外,水稻对养分的吸收能力取决于施肥方式,不同的施肥方式会导致稻田氮磷流失程度的不同。在施肥过程中适当控制时间和位置,有益于寻找水稻增产与减少氮磷流失之间的平衡点。施肥时期也会影响稻田的氮磷流失。张丽娟等^[26]研究发现,稻季施用分蘖肥、拔节肥和穗肥后,田面水中的总氮浓度较施基肥时分别降低约 35%、69% 和 87%, 总磷浓度较施基肥时分别降低约 46%、80% 和 78%。拔节期稻田径流水中的氮磷含量比分药期减少 33% ~ 56%, 移栽期和分药期会导致稻田生态系统更高的氮磷损失率。施肥后水稻田面水中的氮磷浓度通常会在 1 d 左右上升到最高值,7 d 后降至低值再逐渐保持稳定。由于田面水是稻田氮磷流失的主要去向之一,所以应重视施肥后 7 d 这一时间节点,将其视为氮磷流失的高风险期^[23]。

2 稻田氮磷流失养分管理控制技术

2.1 控制施肥方式和时间

控制施肥方式和时间是稻田氮磷流失研究的重要方向。张亚莉等^[27]研究了施肥作用方式对稻田氮磷流失的影响,发现深施既可以供应作物生长所需要的可溶性氮素,又能减少田间氮素流失。张鸿睿^[28]研究了稻田田面水氮磷动态及径流流失,发现施肥后若发生降雨,则氮素的流失程度与径流发生和施肥的距离有关,距离越近流失程度越大,若没有发生降雨,则氮素流失会显著降低,故施肥时间不宜选择在降雨之前。根据本课题组的研究,施肥会导致田面水氮磷浓度迅速升高,随后的第二天开始降低,7 d ~ 10 d 后基本降至对照浓度。因此,若施肥后 7 d ~ 10 d 不产生径流,则稻田氮磷因径流而导致的流失情况会得以缓解。

2.2 有机肥替代化肥

施用有机肥是提高土壤肥力、减少养分流失的一个有效途径^[29-30]。研究显示,减少耕层土壤硝态氮、氮肥因淋溶而产生的流失,应在施肥时选择

有机无机肥,其对土壤有机质含量、土壤理化性质的变化都有着积极的作用,并且能够促进作物根系生长,提高作物产量。还有研究表明,使用50%有机肥替代氮肥,可以有效减少稻田径流中总氮和总磷的流失^[31-32]。将猪粪和化肥配施后,稻田田面水中的总氮、可溶性氮、铵态氮、可溶性钾较施用常规化肥分别降低了7.94%~23.6%、19.23%~29.23%、21.28%~35.2%、16.42%~25.71%,且以猪粪替代50%化肥一直是我国传统的肥料配施比例。有机肥相对于化肥而言,除了可以给农作物提供营养外,还有益于土壤有机质和活性的提高。

2.3 推广新型环保肥料

目前,研制环保型的缓释肥料是国内外肥料领域的研究热点。将缓/控释肥料进行新旧对比发现,由于新型环保肥料的释放速率与作物对营养物质的吸纳保持一致,并且氮素利用率能达到50%以上,因而其利用率提高了1倍多。缓释肥料通过延长释放周期,从而提高了肥料的利用率,减少了养分流失,缓解了我国因长期单施化肥而带来的利用率低的问题,以及养分流失带来的环境污染风险。

3 稻田氮磷流失水分管理控制技术

我国早期的水分管理措施多采用“深灌-大排”等传统操作,在水稻整个生育期内对水的利用率仅为40%~50%。近年来,我国采用新型的稻田水分管理技术,加强了制度、技术等方面的创新,选用新型灌溉设备,根据水稻各阶段的生长需要进行水分供给,优化水的使用效率,或者对整个稻田生态进行合理的水分协调补给。研究表明,降低稻田氮磷流失,应选择更加优化的水分管理技术,其对于控制氮磷损失有着更优异的效果。

3.1 节水灌溉

与我国早期传统的大水灌溉相比,节水灌溉具有“浅、湿、薄、晒”的特点。在目前的水稻研究中,干湿交替灌溉、水稻控制灌溉、旱育稀植及覆膜旱作节水灌溉、水稻叶龄模式灌溉等都属于现代节水灌溉技术。上述技术根据水稻对水的需求特性,将节水灌溉技术运用于合适的时期。研究证明,为了控制营养元素的流失,应在氮磷肥布施的7 d之内尽可能减少排水事件的出现,因为在这个时期内田面水氮磷浓度较高。

3.2 控制排水

研究发现,控制排水是减少地表径流氮磷流失

的重要途径。关于稻田控制排水对养分流失影响的研究表明,与常规排水相比,控制排水能够削减氮磷营养元素的输入,在水稻全生育期控制排水,稻田 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TP的累积流失量分别为18.91 kg/hm²、5.08 kg/hm²、1.02 kg/hm²,比常规排水减少了14.20%、73.19%、61.55%。控制排水有两个主要措施:一是控制排水发生的时间,增加稻田田面水深度,减少田间径流所导致的氮磷流失。由于雨水与化学侵蚀是颗粒和可溶性氮磷进入地表水的主要方式之一,所以该措施还能有效降低地表水中颗粒和可溶性氮磷的含量,将其应用于施肥时间较短的稻田可以获得优异的效果。二是增加降雨所产生的径流水在排水沟中滞留的时间,发挥水沟湿地的生态功能,促进水中颗粒态的氮磷沉淀。该举措通过对氮磷流失的有效控制,可以缓解附近水体的富营养化现象^[33]。根据本课题组关于不同稻田水层深度对氮磷流失影响的研究,控水扩容对于控制稻田氮磷流失有较好的效果,深水层灌溉与中水层和浅水层灌溉相比,对TN的贮蓄分别增加了29.42%和67.31%。

4 稻田氮磷流失生态拦截技术

生态拦截指根据地形(如农田沟、渠、塘、湿地等),利用生态工程技术和水体修复方法,通过种植具有高富集能力的植物,将工程措施与植物净化相结合,采取一系列措施对氮磷营养元素进行拦截、降解。生态拦截技术包括生态沟渠技术、缓冲带技术、人工湿地技术等,每种技术各有特点,适用于不同的地形。

4.1 生态沟渠

生态沟渠指以满足农田排涝防滞需求,且将填料与植物一同设置在沟渠底部位置后,还可以依靠设置物料自身的拦截、吸附、微生物作用控制和转化来自稻田的氮磷等营养元素,达到减弱周围河流与湖泊水体富营养化为目的,对自然排水沟渠的改善^[34-35]。王晓玲等^[36]研究了使用生态沟渠技术拦截稻田氮磷流失的效果,证明该技术可以实现径流水中约31%氮素和40%磷素的降低。还有研究表明,生态沟渠技术对总氮和总磷的去除率超过50%^[37-38],再次证明了该技术在控制氮磷流失中的适用性。

4.2 缓冲带

缓冲带指在水体流域附近能够缓冲污染物和

沉积物的水路交错带生态系统。在拦截稻田氮磷流失时使用缓冲带,可以削减超过30%的总氮和50%的总磷,而且能拦截和避免渗漏水中氮磷营养元素的水平迁移^[39]。

4.3 人工湿地

人工湿地是1970年左右发展起来的一种废水处理工艺,其机理是通过一系列物理、化学和生物过程实现对污水的净化处理。由于建设和运行费用低,对氮磷等营养物质的去除效果好,维护管理简单,能耗少,人工湿地技术得到了广泛应用。稻田生态系统中氮营养元素的去除与人工湿地系统的设计有关,包括植物种类、系统内部环境的化学性质、可利用碳源、氮的挥发性和基底材料类型等。氮磷等营养物质的去除效果会受到污水在湿地中停留时间的影响。降低稻田生态系统中磷元素含量的重要途径之一,就是依靠湿地系统中植物的吸收、沉淀,床体材料吸附,以及与其他有机物质结合在一起的共同作用。潘乐等^[40]开展的人工湿地对稻田氮磷的去除试验表明,人工湿地对早稻和晚稻排水中总氮、总磷的去除率分别达到56.0%、17.2%和64.1%、76.7%。

5 稻田氮磷流失农田尾水回用技术

农田尾水在我国是一个新颖的概念,当灌溉或降雨发生后,农田生态系统产生的地表径流水被称为农田尾水。农田尾水会带走农田中各种形态的氮磷元素,降低土壤肥力和化肥的利用率,还会通过水体的迁移作用导致附近水体的富营养化、缺氧等问题。农田尾水中含有的高浓度氮磷元素是造成水体污染的主要原因,而其本质上属于可循环利用的水,因而研究农田尾水回用技术具有比较深远的意义。目前人工湿地、生态沟渠和缓冲带等技术在农田尾水处理工程中的应用较为广泛,其中对于人工湿地的研究投入占比较高,也最为常用。在氮磷去除研究方面,农田尾水回用技术的发展将为我国稻田面源污染治理开辟新篇章。

6 展望

过量施肥及管理不当导致稻田氮磷流失,造成水体富营养化问题日益严重。通过养分管理、水分管理、生态工程等技术可以减少稻田氮磷流失,提高养分利用率。将来可以在以下两个方面进一步开展稻田氮磷流失控制技术研究:①探索稻田氮磷

流失控制机制,从源头控制化肥投入,建立化肥投入品监测体系,同时实施末端管控,制定稻田尾水排放标准;②选择和设置生态沟渠时仔细研究,择优使用,重点分析生态沟渠底泥对于氮磷的拦截效果,加大关于生态沟渠拦截去除径流氮磷效果分析等方面的研究力度。

[参考文献]

- [1] 钟桂花. 我国水稻生产现状及发展对策研究[J]. 农民致富之友, 2017(12): 72.
- [2] 朱泽闻, 李可心, 王浩. 我国稻渔综合种养的内涵特征、发展现状及政策建议[J]. 中国水产, 2016(10): 32-35.
- [3] 虞国平, 朱鸿英. 我国水稻生产现状及发展对策研究[J]. 现代农业科技, 2009(6): 122-126, 130.
- [4] 姜晓剑, 汤亮, 刘小军, 等. 中国主要稻作区水稻生产气候资源的时空特征[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 238-245.
- [5] 付月君, 王昌全, 李冰, 等. 稻田氮磷养分损失途径及影响因素研究进展[J]. 四川环境, 2015, 34(6): 162-167.
- [6] 刘钦普. 国内农田氮磷面源污染风险控制研究进展[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(1): 1-5.
- [7] DAI X Q, ZHANG H Y, SPIERTZ J H J, et al. Crop response of aerobic rice and winter wheat to nitrogen, phosphorus and potassium in a double cropping system[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010, 86(3): 301-315.
- [8] 王全九, 许紫月, 单鱼洋, 等. 去电子处理微咸水矿化度对土壤盐运移特征的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 125-132.
- [9] 王霞, 刘雷, 何跃, 等. 洪泽湖水体富营养化时空分布特征与影响因素分析[J]. 环境监测管理与技术, 2019, 31(2): 58-61.
- [10] 串丽敏, 赵同科, 安志装, 等. 土壤硝态氮淋溶及氮素利用研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(11): 200-205.
- [11] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000(1): 1-6.
- [12] 李继影, 牛志春, 陈桥, 等. 江苏省太湖流域水生态健康评估的初步实践及展望[J]. 环境监测管理与技术, 2018, 30(5): 1-3.
- [13] 付斌, 刘宏斌, 胡万里, 等. 凤羽河小流域水质氮磷特征及影响因素分析[J]. 环境监测管理与技术, 2016, 28(5): 34-38.
- [14] ZHANG G H, LIU G B, WANG G L, et al. Effects of vegetation cover and rainfall intensity on sediment-bound nutrient loss, size composition and volume fractal dimension of sediment particles[J]. Pedosphere, 2011, 21(5): 676-684.
- [15] 肖强, 张维理, 王秋兵, 等. 太湖流域麦田土壤氮素流失过程的模拟研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005(6): 25-30.
- [16] 武晓莉. 自然降雨条件下不同处理措施坡地果园氮磷流失特征[D]. 福州: 福建农林大学, 2012.
- [17] 梁斐斐, 蒋先军, 袁俊吉, 等. 降雨强度对三峡库区坡耕地土

(下转第21页)