

薛利红, 何世颖, 段婧婧, 等. 基于养分回用-化肥替代的农业面源污染氮负荷削减策略及技术[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1226-1231.

XUE Li-hong, HE Shi-ying, DUAN Jing-jing, et al. Agricultural non-point source pollution source nitrogen load reduction strategy and technology of nutrient reusing in agricultural fields to replace fertilizer[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7): 1226-1231.

基于养分回用-化肥替代的农业面源污染氮负荷削减策略及技术

薛利红^{1,2}, 何世颖^{1,2}, 段婧婧^{1,2}, 张志勇^{1,2}, 杨林章^{1,2*}

(1.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 2.农业部长江下游平原农业环境重点实验室, 南京 210014)

摘要:有效削减农业面源氮污染负荷是提升水环境质量的關鍵,也是当前关注的热点之一。氮排到水体是污染源,但其本身是农作物生长必需的营养元素。为此,提出了基于养分回用-替代化肥的农业面源污染氮负荷削减策略,利用农业生产系统对农业面源污染排放的氮进行消纳和回用,减少农田化肥氮投入并有效削减排入到水环境中的氮,达到农业生产与环境保护的双赢。重点介绍了面源污水中氮的农田直接回用、水生植物回收-有机肥还田替代、环境材料吸附净化-回收还田等几种技术途径及其应用,并指出了目前存在的不足及以后发展的方向。

关键词:农业面源污染; 氮负荷; 养分回用; 化肥替代

中图分类号: X592 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2017)07-1226-06 doi:10.11654/jaes.2017-0949

Agricultural non-point source pollution nitrogen load reduction strategy and technology of nutrient reusing in agricultural fields to replace fertilizer

XUE Li-hong^{1,2}, HE Shi-ying^{1,2}, DUAN Jing-jing^{1,2}, ZHANG Zhi-yong^{1,2}, YANG Lin-zhang^{1,2*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Key laboratory of Agro-Environment in downstream of Yangtze River Plain, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China)

Abstract: The effective reduction of agricultural non-point source nitrogen pollution load is the key to improve water environmental quality, and it is also one of the hot issues in the world. Nitrogen is a pollutant when discharged into the water, but it is an essential macro-nutrient for crops. Therefore, a strategy of reusing the nitrogen from agricultural non-point source pollution as a nutrient in the agricultural system to replace chemical fertilizer was put forward in this paper. Then the technical approaches to reduce the N load from agricultural non-point source pollution based on this strategy were introduced, including the direct irrigation with the polluted water into farmland, using the aquatic plants to absorb the nitrogen then produce organic fertilizer and apply to the farmland, using the environmental material to adsorb the nitrogen and recycled into farmland. The shortcomings of the current research and future development direction were also discussed.

Keywords: agricultural non-point source pollution; nitrogen load; nutrient reusing; replacement of chemical fertilizer

农业面源污染是指在农业生产和生活活动中,溶解的或固体的污染物,如氮、磷、农药及其他有机或无机污染物质,从非特定的地域,通过地表径流、农田排水和地下渗漏进入水体引起水质污染的过程。由于农

业生产活动的广泛性和普遍性,加上农业面源污染涉及范围广、随机性大、隐蔽性强、不易溯源、难以监管、治理难度大^[1],农业面源污染已成为影响农村生态环境质量的重要污染源,成为现代农业和社会可持续发

收稿日期: 2017-07-05

作者简介: 薛利红(1977—),女,河南修武人,研究员,主要研究方向为农田养分管理与农业面源污染控制。E-mail: njxuelihong@gmail.com

* 通信作者: 杨林章 E-mail: Lzyang@issas.ac.cn

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503106); 国家重点研发计划课题(2016YFD0801101); 江苏省自主创新项目(CX(15)1004)

Project supported: The Special Fund for Agro-scientific Research on Public Interests(201503106); The National Key Research and Development Program of China(2016YFD0801101); The Jiangsu Agriculture Science and Technology Innovation Fund(CX(15)1004)

展的瓶颈。2015年中央1号文件特别强调,要加强农业面源污染治理。农业面源排放的污染物中,氮是最主要且最难以防治的污染物,是目前水污染控制的重点和难点。研究表明,太湖流域农业面源污染排放的氮所占比重约为58%*,是农村河道富营养化和水环境质量恶化的罪魁祸首之一。据监测,太湖农村河道总氮浓度普遍在 $4\sim 6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,离2020年全面消除劣V类的目标还相差甚远。国家及各个地方政府均出台了水十条,明确提出了水体水质达标要求和氮减排目标。《江苏省十三五太湖流域水环境综合治理行动方案》明确指明,太湖流域污染物控制指标包括COD、氨氮、总磷和总氮,水体水质控制指标为高锰酸盐指数、氨氮、总磷和总氮,并提出了水体总氮和氨氮的具体指标(稳定达到V类)以及流域总氮污染物排放量比2015年削减16%以上的总量指标。可见控制农业面源氮污染负荷是提升流域水环境质量的關鍵,是当前亟需解决的难题之一。

1 农业面源污染氮的主要来源及其负荷

农业面源污染氮主要来源于农田种植业(包括未被利用的秸秆、通过地表径流或主动排水排放到水体的农田尾水)、农村生活污水(未处理的分散农村生活污水以及生活污水处理厂排放的尾水)、畜禽养殖(小型分散畜禽养殖产生的畜禽粪便及废水、沼气工程产生的沼液等)以及池塘水产养殖(清塘排放的尾水)。根据国家环境保护部2010年发布的“全国第一次污染源普查公报”数据^[1],全国畜禽养殖业粪便年产量为2.43亿t,每年向水体排放总氮102.5万t;水产养殖业每年向水体排放总氮8.21万t;农田尾水即种植业通过径流向水体排放的总氮为32.01万t。据住建部门调查,2010年,全国村镇污水总产生量达136.2亿t,占全国生活污水排放总量的22.9%,排放总氮约80万t;而我国生活污水进行处理的行政村只占6%,农村生活污水的处理率不足10%,太湖流域上海、浙江、江苏等省市行政村污水处理率较高的地区也仅达到48.6%、31.9%和19.6%(2015年第五届中国农村和小城镇水环境治理论坛),大部分生活污水未经处理直接排放。这些农业面源污染氮排放直接加剧了水环境的恶化,以太湖流域为例,农村生活污水直接排放的氮对太湖污染的贡献率可达35%~40%,畜禽养殖废水可达12%^[3-4]。江苏省太湖流域国考断面污染来源

分析表明,除了上游来水污染外,生活污水处理厂尾水排放和由支流汇入的农业面源污染是影响考核断面水质达标的主要因素^[5]。

2 基于养分回用-替代化肥的农业面源污染氮负荷削减策略

氮排放到周围水体中是污染源,但其对于农业生产系统来说是一种必需的大量营养元素。因此,若能利用农业生产对农业面源污染排放的氮进行消纳和回用,不仅能减少农田化肥氮的投入,提高农田生产力,又能有效削减排入到水环境中的氮,减少环境治理成本,达到农业生产与环境保护的双赢。根据国家环保部最新的《畜禽养殖业污染物排放标准(二次征求意见稿)》以及现行的《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002),产生的养殖废水和农村生活污水即使全部经过处理达标排放,生活污水尾水中总氮依然高达 $15\sim 20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,养殖尾水总氮浓度也高达 $40\sim 70\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、氨氮浓度高达 $25\sim 40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,远高于我国《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)对总氮的要求。如果直接排入水体,相当于每年至少排入水体总氮71.6万t,是巨大的污染源。如果这些氮资源全部农田回用,相当于155万t尿素,可节约氮肥投入约31亿元,并减少巨额的环境治理费用,经济、环境和社会效益显著。为此,本文提出了基于养分回用-替代化肥的农业面源污染氮负荷削减策略,即通过尾水的直接回用,或经过“植物吸收-有机肥生产-农田回用”途径,把排放的氮磷回用到农田生态系统,减少排入到水环境中的面源氮,从而有效提升水环境质量。该策略也可理解为环境中氮磷资源的交换利用或交易行为(氮交易),把要处理的各种污水中的氮磷资源回收利用,既减少污水处理(提标改造)的成本,也可减少农田化肥的投入,有效削减整个区域的氮磷排放负荷,实现区域水体水质达标以及氮减排的目标。

3 基于养分回用-替代化肥的农业面源污染氮负荷削减技术

农业面源氮污染物从形态上可以分为固态和液态,其中固态主要包括秸秆、畜禽粪便等,液态主要包括生活污水及其尾水、畜禽和水产养殖废水、沼气工程产生的沼液以及农田尾水等。秸秆和畜禽粪便等固态污染物可以直接回田,或者通过堆肥等技术手段转

*余晖等,“十一五”国家水专项太湖项目“太湖流域环境综合调查与湖泊富营养化综合控制方案研究(2008ZX07101-001)”技术报告

换成有机肥后回用到农田,相关技术比较成熟而且研究较多^[6]。面源污水由于量大面广而相对难以治理,为此,下文重点介绍面源污水中氮的农田回用-化肥替代的技术途径及其研究进展。

3.1 面源污水农田灌溉回用技术

农业面源污水如农田尾水、生活污水、工程尾水等,其除了氮磷养分略高于农田灌溉水水质标准外,其余指标均满足农田灌溉水质标准。因此,可以通过农田灌溉直接对这部分污水中的氮进行回用,不仅能避免直接排放对水体的污染,还能减少农田化肥氮投入,而且污水中富含的其他养分如磷、有机物等也能促进养分的吸收转化,从而提高土壤肥力,保证作物产量^[7-13]。对于干旱地区,还能有效节约水资源。污水农田灌溉历史悠久,且被广泛应用于世界各地,所涉及的农作物有水稻、玉米、棉花、甜菜、温室作物及蔬菜等^[8-14]。稻田作为一种特殊的人工湿地,生育期内蓄水层的存在使其不仅能够大量消纳净化周围的河道水体,还能消纳利用生活污水尾水、养殖废水、沼液中的氮、磷达到减少化肥投入的作用^[10-13,15-19]。研究表明,正常灌溉下,太湖流域每公顷稻田一季可消纳面源污水 5000 t 左右,可利用污水中的氮 100~130 kg,减少化肥投入 40%~50%左右,并保证水稻高产和环境安全^[7]。通过在稻田内部设计沟渠将其改造成沟灌渗滤型稻田湿地,连续进水并保证水力停留时间在 5~7 d,就能保证出水总氮浓度稳定在 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,达到地表水(湖库) V 类水标准,而且对外源污水的消纳处理能力大幅加强,水稻旺盛生长期的日处理水量可达 $160 \sim 200 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[18]。而稻田在我国广泛分布,太湖流域耕地中近 80% 均为稻田,因此利用稻田来消纳净化面源污水的潜力巨大。由于面源污水量大,而农田灌溉水需求有限而且具有阶段性,并且对水质有一定的要求,因此要削减面源污水中的氮,仍需寻求其他的技术途径。

3.2 面源污水的水生植物回收-有机肥还田替代技术

对于那些不能直接农田回用的面源污水,可因地制宜建设一些水生植物净化塘,利用水生植物的养分高效吸收功能,对面源污水中的氮磷等养分进行吸收富集,这些水生植物收割处理后可加工成有机肥回用到农田,从而使得面源污水中的氮磷养分得到资源化再利用。目前利用水生植物净化污水的技术已比较成熟并逐步走向工程化应用。研究表明去除氮效果较好且在实践中应用较多的水生植物包括凤眼莲、狐尾藻、铜钱草、芦苇、再力花、美人蕉、灯芯草、睡莲、菖蒲、金

鱼藻、马来眼子菜、菹草、菱、薹菜、慈姑、茭白等^[20-27]。污水中氮的去除除了水生植物的直接吸收外,微生物的硝化反硝化起主要作用^[20,23]。为了保证对面源污水的净化效果,确保出水水质,可以合理搭配沉水植物、挺水植物以及漂浮植物,形成不同的水生植物系统^[21];水生植物净化塘可采用多级串联形式,采用不同的水生植物塘组合^[26];且必须保证一定的面积规模,面积规模大小与采用的水生植物种类和污水中氮磷浓度有关。如利用凤眼莲净化生活污水工程尾水,尾水生产能力(t 或 m^3)与净化塘水面面积(m^2)为 1:3 至 1:5 之间为宜,且凤眼莲种苗最佳初始投放量为 $0.5 \sim 1.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[25];用绿狐尾藻净化养猪场废水,每头猪需配置 $2 \sim 3 \text{ m}^2$ 生态塘;用水生植物净化塘或湿地来净化农田尾水时,塘的配置比例以 1%~3% 为宜^[26-28]。江苏省农业科学院采用凤眼莲对南京市高淳东坝污水处理厂尾水进行净化,尾水经过三级串联净化塘净化后,平均总氮和氨氮浓度分别由进水的 $(9.86 \pm 3.51) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(0.49 \pm 0.09) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低至出水的 $(2.51 \pm 1.52) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(0.20 \pm 0.08) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其中 7 月和 8 月出水总氮浓度平均为 $(1.47 \pm 0.27) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,可以达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) IV 类水标准^[29]。中国科学院亚热带农业生态研究所利用绿狐尾藻构建生态湿地消纳养殖废水中的氮磷,对养殖废水中氨氮的去除率可达 90% 以上^[30]。

水生植物的后端资源化利用方面,江苏省农业科学院研发了一套专门用于水生植物采收、脱水和粉碎的小型化移动式装备,可实现水生植物的快速采收并堆制有机肥,制定了水葫芦高温堆肥技术操作规程(DB 32/T 1872—2011),生产的有机肥能达到国家相关标准。水生植物还可作为绿肥直接还田,有些水生植物如绿狐尾藻因含有较高的蛋白质、粗纤维含量等,还可加工成优质饲料用于养殖业,从而实现资源化利用^[26,31]。

3.3 面源污水中氮的环境材料吸附净化-回收还田技术

利用对铵离子具有强选择性吸附的环境材料去除面源污水中的氨氮,是一种快速、高效、操作简便、没有二次污染、可回收且低成本的方法。目前应用较多的吸附剂有黏土类(沸石、硅藻土、高岭土、凹凸棒土、膨润土等)、废渣类(粉煤灰、煤矸石、花生壳、甘蔗渣)、炭类(活性炭、生物炭)等类型^[32]。其中利用农业废弃物如稻麦秸秆、花生壳、甘蔗渣等制成的吸附剂用于污水中氨氮的净化已取得了良好进展,且成本

低、环境友好;吸附氨氮后还可作为土壤添加剂施入农田,从而改善土壤结构,增加土壤肥力,提高养分利用效率,实现面源污水中氮从水体向农田的安全有效转移。

利用农业废弃物烧制而成的生物炭具有较大的比表面积,其表面含有较多的羧基、羰基、酚羟基、内酯基等含氧官能团,对氨氮等阳离子的吸附能力较强,已成为当前低污染水净化的研究热点。研究发现,桉树废木屑制备的生物炭对氨氮的最大吸附量为 $1.24 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[33],稻壳生物炭对氨氮的平均吸附量为 $1.78 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[34]。为进一步提高生物炭的吸附能力,需要对其进行改性。研究表明改性后的生物炭对氨氮的吸附去除能力大幅加强,如硝酸改性后的竹炭对氨氮的去除率由20.1%提高到了82.2%^[35]; KMnO_4 改性后的玉米芯生物炭是改性前的5.64倍^[36],用铁、镁金属离子改性的生物炭分别是改性前的1.6倍和3.2倍,铁镁联合改性对氨氮的吸附提高了3.5倍^[37]。此外,利用微生物改性生物炭也能提高其对废水的处理效果,固定了硝化与反硝化微生物的生物炭对氨氮的去除率达到了70%以上,固定了光合细菌的生物炭对水中的COD、氨氮和磷酸根都有明显的去除效果^[38]。

生物炭施入土壤后,能够提高土壤对氨氮和硝氮的固持作用,从而提高氮肥利用率^[39]。此外,研究发现生物炭吸附的氮可以再次释放,而且是植物可吸收利用的有效态^[40]。但目前将吸附氨氮的生物炭材料用于还田的研究还鲜有报道。江苏省农业科学院以生物炭及镁改性生物炭为材料,吸附氨氮后施用于稻田,小区试验结果表明,施加吸附氨氮后的生物炭处理的氮素损失比对照处理降低了10%左右(数据尚未发表),说明利用生物炭作为载体吸附净化面源污水中的氮素并归还于土壤是可行的,但对作物增产及土壤培肥的效果等还有待于进一步验证。

4 存在的不足及未来展望

4.1 技术工艺与参数完善

目前针对农业面源氮污染负荷的削减技术很多,“十一五”和“十二五”水专项研发的农业面源污染控制技术就有88项,但技术成熟度总体不够,技术就绪度整体在4~7之间,大多处于工艺装备研究和试验工程研究阶段即技术示范阶段,离规模化运行还有一段距离^[41]。尤其是面源污水中氮削减的相关技术,技术工艺体系不完善,技术应用参数不明确,缺乏相应的技术规范或标准,这就使得技术在实际应用时难以应

对农业面源污水的复杂多变性,不仅限制了推广应用范围及规模,还影响了污染控制的效果。因此未来应着重加强相关技术参数的研究,建立技术参数数据库,并注重技术规范和标准的制定,从而使技术在实际应用时有据可依、有章可循。

4.2 经济环境综合效益及风险评估

目前对技术应用的效果、污染物的去除机制等研究相对较多,也涉及到了成本效益分析,但往往局限于狭隘的经济效益分析,很少考虑污染减排带来的环境效益。由于污染减排将导致环境污染损失的减少,因此,可将降低的“环境污染损失”等同“污染减排效益”,或者直接采用污染治理成本法来估算^[42]。此外,农业生态系统是一个复杂的系统,面源污水中的氮通过不同途径以不同载体形式回用到农田后带来的影响是多方面的,加上其可能同时带入其他物质,因此,需要综合全面评估其对农作物产量及品质、土壤肥力变化、氮磷养分损失的各个途径包括径流、渗漏、氨挥发及温室气体排放等的影响,并加强风险评估,从而确定适宜的农田回用方式和用量,避免可能带来的负面影响如尾水和沼液等农田直接回用可能带来的土壤重金属积累风险、抗生素等带来的食品安全风险等^[43-44],确保农业健康可持续发展。

4.3 相关政策扶持

随着工业点源治理力度的加大以及畜禽养殖业的关停并转,当前水体中总氮居高不下的重要原因生活污水排放的氮^[3-5]。利用农业系统建设植物净化湿地塘以及农田回用等措施对生活污水中氮磷进行资源化利用,可实现污水处理和农业生产的双赢。如果能将排污权交易引入农业面源污染控制,就可以通过污水处理厂(工业)与农业之间的交易来减少污水的治理成本,实现社会收益最大化^[45]。根据“谁受益、谁补偿”的原则,可将污水处理的提标改造资金补偿给农业建设植物净化回收湿地塘,并通过试点工程逐渐提出相应的补偿机制及补偿标准,制定相应的建设规范,加快氮磷养分回用技术的应用与相关工程的推广实施。

参考文献:

- [1] 杨林章,施卫明,薛利红,等.农村面源污染治理的“4R”治理技术——总体思路与“4R”治理技术[J].农业环境科学学报,2013,32(1):1-8.
YANG Lin-zhang, SHI Wei-ming, XUE Li-hong, et al. Reduce-Reuse-Restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: General countermeasures

- and technologies[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1): 1-8.
- [2] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国家统计局, 中华人民共和国农业部. 第一次全国污染源普查公报. 2010. http://www.stats.gov.cn/tjgb/qttjgb/qgqttjgb/t20100211_40262116.htm.
- [3] 盛学良, 舒金华, 彭补拙, 等. 江苏省太湖流域总氮、总磷排放标准研究[J]. *地理科学*, 2002, 22(4): 449-452.
SHENG Xue-liang, SHU Jin-hua, PENG Bu-zhuo, et al. Study on emission standards of total nitrogen and total phosphorous at Taihu Valley in Jiangsu Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(4): 449-452.
- [4] 张利民, 孙卫红, 程 炜, 等. 太湖入湖河流环境综合治理[J]. *环境监测管理与技术*, 2009, 5:1-5.
ZHANG Li-min, SUN wei-hong, CHENG Wei, et al. Overall treatment of water environment for inflow rivers of Lake Taihu[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2009, 5:1-5.
- [5] 黄 卫, 张 璘, 金浩波. 江苏省太湖流域国家考核断面污染源调查与评价[J]. *环境监控与预警*, 2012, 4(2):34-38.
HUANG Wei, ZHANG Lin, JIN Hao-bo. Pollution source inquisition and estimation of national check fracture of Taihu Lake Valley in Jiangsu Province[J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2012, 4(2):34-38.
- [6] 常志州, 黄红英, 靳红梅, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与实践——氮磷养分循环利用技术[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(10):1697-1704.
CHANG Zhi-zhou, HUANG Hong-ying, JIN Hong-mei, et al. Reduce-Retain-Reuse-Restore technology for controlling the agricultural non-point pollution in countryside in China: Reuse of N and P in agricultural waste[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(10):1697-1704.
- [7] Jiménez B. Treatment technology and standards for agricultural wastewater reuse: A case study in Mexico[J]. *Irrigation and Drainage*, 2005, 54(Suppl1): S23-S33.
- [8] 谢迎新, 熊正琴, 赵 旭, 等. 富营养化河水灌溉对稻田土壤氮磷养分贡献的影响: 以太湖地区黄泥土为例[J]. *生态学报*, 2008, 28(8):3618-3625.
XIE Ying-xin, XIONG Zheng-qin, ZHAO Xu, et al. Contribution of nitrogen and phosphorus on eutrophied irrigation water in a paddy soil: A case study in Taihu Lake Region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3618-3625.
- [9] Agrafioti E, Diamadopoulos E. A strategic plan for reuse of treated municipal wastewater for crop irrigation on the Island of Crete[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 105: 57-64.
- [10] Akponikpè P B I, Wima K, Yacouba H, et al. Reuse of domestic wastewater treated in macrophyte ponds to irrigate tomato and eggplant in semi-arid West-Africa: Benefits and risks[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(5): 834-840.
- [11] Kang M S, Kim S M, Park S W, et al. Assessment of reclaimed wastewater irrigation impacts on water quality, soil, and rice cultivation in paddy fields[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 2007, 42(4): 439-445.
- [12] Li S, Li H, Liang X Q, et al. Phosphorus removal of rural wastewater by the paddy-rice-wetland system in Tai Lake Basin[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 171(1): 301-308.
- [13] Sun H, Zhang H, Yu Z M, et al. Combination system of full-scale constructed wetlands and wetland paddy fields to remove nitrogen and phosphorus from rural unregulated non-point sources[J]. *Environmental Geochemistry & Health*, 2013, 35(6): 801-809.
- [14] Tzanakakis V E, Paranychianakis N V, Angelakis A N. Soil as a wastewater treatment system: Historical development[J]. *Water Science and Technology*, 2007, 7(1): 67-75.
- [15] 姜丽娜, 王 强, 陈丁江, 等. 沼液稻田消解对水稻生产、土壤与环境安全影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(7): 1328-1336.
JIANG Li-na, WANG Qiang, CHEN Ding-jiang, et al. Effect of paddy field disposal of biogas slurry on the rice production, soil quality and environmental safety[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(7): 1328-1336.
- [16] 尹爱经, 薛利红, 杨林章, 等. 生活污水氮磷浓度对水稻生长及氮磷利用的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(4): 768-776.
YIN Ai-jing, XUE Li-hong, YANG Lin-zhang, et al. Effects of the N and P concentrations in domestic wastewater on the growth' N and P uptakes of rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(4): 768-776.
- [17] 马资厚, 薛利红, 潘复燕, 等. 太湖流域稻田对3种低污染水氮的消纳利用及化肥减量效果[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, 32(4): 570-576.
MA Zi-hou, XUE Li-hong, PAN Fu-yan, et al. Utilization of nitrogen in wastewater low in pollution degree in paddy fields and its effect on reducing fertilizer application in Tai Lake Region[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(4): 570-576.
- [18] 薛利红, 杨林章. 太湖流域稻田湿地对低污染水中氮磷的净化[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(1):117-124.
XUE Li-hong, YANG Lin-zhang. Purification of water with low concentrations of N and P in paddy wetlands in Taihu Lake Region[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(1): 117-124.
- [19] 薛利红, 俞映惊, 杨林章. 太湖流域稻田不同氮肥管理模式下的氮素平衡特征及环境效应评价[J]. *环境科学*, 2011, 32(4): 1133-1138.
XUE Li-hong, YU Ying-liang, YANG Lin-zhang. Nitrogen balance and environmental impact of paddy field under different N management methods in Taihu Lake Region[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(4): 1133-1138.
- [20] 何 娜, 张玉龙, 孙占祥, 等. 水生植物修复氮、磷污染水体研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2012, 34(3):73-78.
HE Na, ZHANG Yu-long, SUN Zhan-xiang, et al. Research advances on phytoremediation of nitrogen and phosphorus polluted water by aquatic macrophytes[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2012, 34(3):73-78.
- [21] 高吉喜, 叶 春, 杜 鹃, 等. 水生植物对面源污水净化效率研究[J]. *中国环境科学*, 1997, 17(3):247-251.
GAO Ji-xi, YE Chun, DU Juan, et al. Study of removing ability of macrophytes to N, P in run-off[J]. *China Environmental Sciences*, 1997, 17(3):247-251.
- [22] Zhu J, Zhu X Y. Treatment and utilization of wastewater in the Beijing Zoo by an aquatic macrophyte system[J]. *Ecological Engineering*, 1998, 11(1):101-110.
- [23] 高 岩, 易 能, 张志勇, 等. 凤眼莲对富营养化水体硝化、反硝化脱氮释放 N₂O 的影响[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(2):349-359.

- GAO Yan, YI Neng, ZHANG Zhi-yong, et al. Effect of water hyacinth N_2O emission through nitrification and denitrification reactions in eutrophic water[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(2): 349-359.
- [24] Brisson J, Chazarenc F. Maximizing pollutant removal in constructed wetlands: Should we pay more attention to macrophyte species selection [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(13):3923-3930.
- [25] 张志勇, 郑建初, 刘海琴, 等. 凤眼莲对不同程度富营养化水体氮磷的去除贡献研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1):152-157.
ZHANG Zhi-yong, ZHENG Jian-chu, LIU Hai-qin, et al. Role of *Eichhornia crassipes* uptake in the removal of nitrogen and phosphorus from eutrophic waters[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1):152-157.
- [26] 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.
LIU Hong-jiang, CHEN Liu-gen, ZHU Pu-ping, et al. Primary study on building recycling system of rice paddy loss nutrient[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(10):2275-2279.
- [27] Karpuzcu M E, Stringfellow W T. Kinetics of nitrate removal in wetlands receiving agricultural drainage[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 42: 295-303.
- [28] Tournebize J, Chaumont C, Mander Ü. Implications for constructed wetlands to mitigate nitrate and pesticide pollution in agricultural drained watersheds[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 103: 415-425.
- [29] 邱园园, 张志勇, 张晋华, 等. 凤眼莲深度净化污水厂尾水生态工程中温室气体的排放特征[J]. 农村与生态环境学报, 2017, 33(4): 364-371.
QIU Yuan-yuan, ZHANG Zhi-yong, ZHANG Jin-hua, et al. Greenhouse gases emission in operation of constructed *Eichhornia crassipes* ecological ponds in depth purifying tail water from sewage treatment plants[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(4): 364-371.
- [30] 余红兵, 何洋, 李红芳, 等. 室内绿狐尾藻湿地系统对高氨氮废水的净化作用[J]. 草业科学, 2016, 33(11):2189-2195.
YU Hong-bing, HE Yang, LI Hong-fang, et al. Purification effects of indoor *Myriophyllum elatinoide*s wetland system on ammonium nitrogen wastewater[J]. *Pratacultural Science*, 2016, 33(11):2189-2195.
- [31] 盛婧, 郑建初, 陈留根, 等. 水葫芦富集水体养分及其农田施用研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(10):2119-2123.
SHENG Jing, ZHENG Jian-chu, CHEN Liu-gen, et al. Absorption of water nutrients by hyacinth and its application in wheat production[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(10): 2119-2123.
- [32] 陈莉荣, 杜明展, 李玉梅, 等. 吸附剂在氨氮废水处理中的应用研究进展[C]. 中国环境科学学会学术年会论文集, 2011: 1020-1024.
CHEN Li-rong, DU Ming-zhan, LI Yu-mei, et al. Advances in application of adsorbent in ammonia wastewater treatment[C]. Proceedings of the China Environmental Science Association, 2011:1020-1024.
- [33] 邢英, 李心清, 周志红, 等. 生物炭对水体中铵氮的吸附特征及其动力学研究[J]. 地球与环境, 2011, 394(4): 511-516.
XING Ying, LI Xin-qing, ZHOU Zhi-hong, et al. Adsorption and kinetics of ammonia from aqueous medium onto biochar[J]. *Earth and Environment*, 2011, 394(4): 511-516.
- [34] 张爱莉, 朱义年, 纪锐琳, 等. 竹炭对氨氮的吸附性能及其影响因素的研究[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(6): 19-21.
ZHANG Ai-li, ZHU Yi-nian, JI Rui-lin, et al. Adsorption of ammonia by bamboo-charcoal[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(6): 19-21.
- [35] 周珊, 陈斌, 王佳莹, 等. 改性竹炭对氨氮的吸附性能研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2007, 33(5): 584-590.
ZHOU Shan, CHEN Bin, WANG Jia-ying, et al. Study on adsorption of ammonia nitrogen by modified bamboo carbon[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2007, 33(5): 584-590.
- [36] 王旭峰, 郑立安, 刘毛, 等. 改性玉米芯生物炭对废水中铜和氨氮的吸附[J]. 工业水处理, 2017, 37(1): 37-41.
WANG Xu-feng, ZHEN Li-an, LIU Mao, et al. Adsorption characters of Cu^{2+} and NH_4^+-N in wastewater by modified corn cob biochar[J]. *Industrial Water Treatment*, 2017, 37(1): 37-41.
- [37] 陈靖, 李伟民, 丁文川, 等. Fe/Mg 负载改性竹炭去除水中的氨氮[J]. 环境工程学报, 2015, 9(11): 5187-5192.
CHEN Jing, LI Wei-min, DING Wen-chuan, et al. Removal of ammonia nitrogen by Fe/Mg-modified bamboo charcoal[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(11): 5187-5192.
- [38] He S Y, Zhong L G, Duan J J, et al. Bioremediation of wastewater by iron oxide-biochar nanocomposites loaded with photosynthetic bacteria [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017, 8: 1-10.
- [39] 王洪媛, 盖霞普, 翟丽梅, 等. 生物炭对土壤氮循环的影响研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(19): 5998-6011.
WANG Hong-yuan, GAI Xia-pu, ZHAI Li-mei, et al. Effect of biochar on soil nitrogen cycling: A review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(19): 5998-6011.
- [40] Zhu K R, Fu H, Zhang J H, et al. Studies on removal of NH_4^+-N from aqueous solution by using the activated carbons derived from rice husk [J]. *Biomass & Bioenergy*, 2012, 43: 18-25.
- [41] 朱昌雄, 李红娜, 耿兵, 等. 农业面源污染控制关键技术成果及其评价[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2016.
ZHU Chang-xiong, LI Hong-na, GENG Bing, et al. Key technical achievements and evaluation of agricultural non-point source pollution control[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2016.
- [42] 李红祥, 王金南, 葛察忠. 中国“十一五”期间污染减排费用-效益分析[J]. 环境科学学报, 2013, 33(8):2270-2276.
LI Hong-xiang, WANG Jin-nan, GE Cha-zhong. A cost-benefit analysis of the pollution reduction during the eleventh five-year period in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(8):2270-2276.
- [43] Chen W, Lu S, Jiao W, et al. Reclaimed water: A safe irrigation water source? [J]. *Environmental Development*, 2013, 8(1): 74-83.
- [44] 徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 等. 生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(10): 3963-3970.
XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, et al. Effect of straw incorporation and domestic sewage irrigation on ammonia volatilization from paddy fields[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(10): 3963-3970.
- [45] 李志勇, 洪涛, 王燕, 等. 排污权交易应用于农业面源污染控制研究[J]. 环境与可持续发展, 2012(5): 37-41.
LI Zhi-yong, HONG Tao, WANG Yan, et al. Research on emission trading to be applied to agricultural non-point source pollution control [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2012(5): 37-41.