

植物修复农田退水氮、磷污染研究进展

罗良国¹, 陈崇娟^{1,2}, 赵天成³, 刘汝亮³, 杨林章^{4*}

(1.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 农业清洁流域创新团队, 农业部农业环境重点实验室, 北京 100081; 2.中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 3.宁夏农林科学院, 宁夏 银川 750002; 4.江苏省农科院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014)

摘要:水环境污染是造成全球水资源水质性紧缺非常重要的因素。农业面源污染则是继工业源污染实施清洁生产得到有效治理之后水体污染主要的贡献者,特别是地表水中过量氮、磷的主要来源,受到越来越多的关注和重视。植物修复技术因其可以对受污染水体进行原位修复和避免二次污染等特点,逐渐被人们应用到污染水体的治理中。本文从植物修复农田退水氮、磷污染视角,综述了农田退水氮、磷在主要去除途径与影响因素方面所取得的研究进展,并针对植物修复农田退水实践中存在的问题,提出了继续强化植物组合对水污染负荷消减能力的研究,进一步扩展对植物的经济利用价值、生态景观价值和社会效益开展研究,以及深化植物修复从室内模拟到野外小区域示范、再到大区域的推广应用研究等建议,以期为进一步提升治理农田面源污染效果提供技术支撑。

关键词:植物修复;农田退水;氮;磷

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2016)01-0001-09 doi: 10.13254/j.jare.2015.0230

引用格式:

罗良国, 陈崇娟, 赵天成, 等. 植物修复农田退水氮、磷污染研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(1): 1-9.

LUO Liang-guo, CHEN Chong-juan, ZHAO Tian-cheng, et al. Progress on Phytoremediation of Drainage Water N and P Pollution in Farmland Drainage Ditches: A Review[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(1): 1-9.

Progress on Phytoremediation of Drainage Water N and P Pollution in Farmland Drainage Ditches: A Review

LUO Liang-guo¹, CHEN Chong-juan^{1,2}, ZHAO Tian-cheng³, LIU Ru-liang³, YANG Lin-zhang^{4*}

(1.Agricultural Clean Watershed Group, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS; Key Laboratory for Agricultural Environment MOA, Beijing 100081, China; 2.College of Resources & Environmental Sciences, China Agriculture University, Beijing 100193, China; 3.Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China; 4.Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: Water pollution is a main issue that contributes to the water quality-induced shortage of global water resources. After cleaner production technology successfully applied to the industrial pollution control, agricultural non-point source pollution has been the biggest contributor to water pollution, in particular, the leading source of excess nitrogen and phosphorus in surface water and gaining more attention. The phytoremediation technology has been gradually applied to improve surface water quality because of the advantages in its insitu remediation and no secondary pollution. This paper summarized the progress made on the main approaches, influencing factors and issues of removing N and P in farmland drainage water using phytoremediation. Recommendations regarding to the future research in strengthening plant combination, its economic and social efficiencies, and the implementation from small scale demonstration to large scale extension will be proposed. It would further support improving the effect of agricultural nonpoint source pollution control.

Keywords: phytoremediation; drainage water from farmland; nitrogen; phosphorus

收稿日期: 2015-09-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31170416); “十二五”国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-004, 2014ZX07105-001); 中国农科院农业清洁流域创新项目

作者简介: 罗良国(1966—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为农业面源污染防治治理与农业清洁生产研究。E-mail: luoliangguo@caas.cn

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

世界人口的快速增长,导致人们对粮食的刚性需求与日俱增。通过多施化肥来提高产量和收益已成为绝大多数农民的定式思维和习惯。较之工业源污染实施清洁生产得到有效治理,过量施肥导致的农田面源污染已成为水体污染最大的污染源^[1-2],不仅影响到农业的可持续发展,也威胁到全人类的健康,受到世界各国的密切关注^[3-7]。

在美国,农业面源排放的营养物质占国家地表水污染负荷的 67%^[8];瑞典不同流域水体中来自农业的氮占流域总输入氮的 60%~87%^[9]。相比之下,我国作为化肥的生产和应用大国,氮肥的使用居世界之首,农业面源污染问题亦不容乐观。据估计,在我国水体污染中,来自农业源的氮占到了水体污染的 81%,磷占到 93%^[7]。而农田生产中,又以水稻生产中不合理田间肥水管理方式导致的营养流失较大,其中氮肥的损失达 30%~70%^[10]。我国水稻种植面积占总耕地面积的 26.18%,种植区域广泛;而大面积的水稻种植区主要分布在秦岭黄河以南,占到 70.19%^[11-12]。因此,由稻田直渗、侧渗、地表径流(含人工排水)等方式所带来的水体污染不可忽视。薛利红等^[13]研究表明,南方太湖流域稻季氮素环境排放总量与施氮量之间呈显著正相关,约占总施氮量的 30%,其中径流和渗漏分别占到排放总量的 25%和 18%。而宁夏引黄灌区作为我国西北内陆大型人工灌区,有大小排水沟 200 多条,水稻生产上的大水大肥方式导致氮肥随农田沟渠退水流失进入黄河达到 20%~65%^[14];灌溉期排水沟水质总体为重度污染,劣 V 类水质占 70.0%^[15]。

从农田系统角度,农田沟渠处于农田系统的末端,承接来自农田地表径流与农田渗漏合流产生的地表水即农田退水,退水中所含氮、磷污染物将沿着沟渠流向区域低位的湖泊或河流,是小流域中湖泊或河流水体污染的源。因此,在农田退水进入湖泊或河流之前,高效去除农田退水中过量的氮、磷营养物质成为确保湖泊和河流良好水质的关键,而通过沟渠中种植植物来消减、去除退水中过量氮、磷的方法因其成本低、效果好、无二次污染并具有景观、经济等多种功能已成为国内外学者开展农田面源污染防控与治理试验示范研究的焦点^[16-19]。本文将围绕植物修复农田退水氮、磷的主要去除途径、影响因素、存在问题进行综述,以期能够为进一步防控与治理农田面源污染提供相应的参考依据。

1 农田退水的氮磷污染特征

农田退水的氮、磷污染特征主要表现在 4 个方面:

一是农田沟渠退水氮、磷污染发生与水稻整个生长季同步,且与田间施肥和灌溉时间保持高度一致。在我国西北宁夏引黄灌区,整个生育期的田间渗漏水中铵态氮浓度和硝态氮浓度与田间施肥量及灌水量呈显著相关^[20];稻田对退水中氮、磷负荷的贡献分别为 77.3%和 75.7%^[21]。二是农田退水中氮、磷浓度指标不同程度地超过了地表水环境质量标准,达到中度污染、甚至重度污染水质标准。如宁夏青铜峡灌区稻田沟渠退水中,铵态氮平均浓度 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,高于地表水环境质量 III 类水质标准,达到中度污染;总氮浓度 $4.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,大大高于地表水环境质量 V 类水质准限值($2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),属于重度污染^[21]。湖北四湖流域约 42%的农田沟渠水体水质属于地表水环境质量 IV 类,则介于中度与重度污染之间,污染比较严重^[22]。三是农田沟渠退水中氮、磷输出主要形态是氨氮、硝氮和可溶性磷酸盐;灌溉和降雨时,农田沟渠退水中氮、磷迁移转化规律相似,氨氮、总氮、可溶性磷和总磷均沿程和随时间呈指数递减变化^[23-24],硝态氮呈二次多项式曲线变化^[23]。四是绝大多数农田退水并没有因其富集氮、磷养分回灌农田,而是自由排放流入地势低洼或下游的池塘、湖泊或河流,成为下游水体的污染源。农田退水中的氮、磷是湖泊、河流水质退化的主要贡献者^[25-27]。

2 植物修复技术

国际上,受污染水体的修复方法通常有物理、化学和生物-生态法 3 种。从应用趋势和综合环境效益角度,生物-生态方法是水体环境修复中最应推崇的举措之一。而植物修复技术(Phytoremediation)是生物-生态方法中较为关键的一种技术,它主要是利用特定的水生或陆生植物在土壤、沉积物、污泥、地表水、地下水等受污染点对重金属、有机污染物和其他大量无机污染物如氮、磷等进行原位的吸收、降解和固定,具有耗能低、效果好的特点^[16,28]。考虑到我国人均耕地面积少、土地资源有限,植物修复技术因对污染水体原位修复和收获植物兼有生态、景观、经济等多重价值,其推广优势明显。

水生或陆生植物主要通过以下 3 种作用净化受污染水体:

(1)通过发达的网络状根系直接吸收水体中可利用的 NO_3^- 、 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 离子,并最后通过收获植物永久的去除氮、磷,同时水体中的碎屑也会被拦截沉淀下来;

(2)植物发达的根系不仅为微生物提供附着的载体,根系分泌物还为微生物提供碳源,为微生物的生存和繁殖创造良好的条件;同时通过茎叶的传送将光合作用产生的氧扩散到根区周围,使水中同时存在好氧和缺氧的环境,强化了各类微生物的协同作用,从而实现对污染物质的分解转化和去除^[29];

(3)植物本身可以间接抑制藻类的生长。栽种的植物为了更好的生长,必须从水体中获取其生长必需的营养物质和元素,从而与藻类形成竞争,很大程度上抑制了藻类的疯长。

3 植物修复农田退水氮、磷的研究进展

农田沟渠中生长的植物表明沟渠系统不仅具有灌溉和排水功能,还兼具一定的环境保护功能。国内外的很多研究表明^[17-19,30-31],沟渠植物可以有效地消纳和去除水体中的氮、磷,而且其去除能力受到一系列因素的影响(图1);利用水生或陆生高等植物净化污水的方法成本低、效果好、简单易行。除此之外,沟渠植物还具有景观价值,若定期收获植物还能产生良好的经济效益^[32]。

3.1 农田退水中氮、磷的去除途径

农田排水沟渠是独特的“植物-底泥-微生物”系统,属于人工湿地系统。当带有大量营养物质的田间排水流经沟渠系统时,通过植物直接吸收、微生物吸收和降解、底泥吸附等一系列作用,水体中的氮、磷等营养成分将发生一系列的物理、化学和生物转化过程

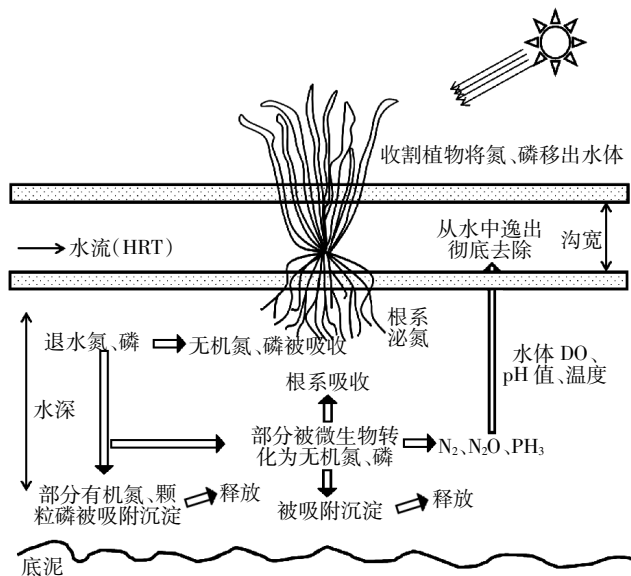


图1 沟渠退水中氮、磷的去除途径和影响因素

Figure 1 Removal pathway and influence factors for nitrogen and phosphorous in drainage ditches water

(如图1),从而高效的去除水体中过量的氮、磷营养物质,降低地表水体的污染负荷^[33]。

3.1.1 植物吸收

作为农田沟渠生态系统的关键部分,植物在减轻农田退水氮、磷污染过程中,不但可以直接吸收水体中和沉积物中的 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 PO_4^{3-} 离子合成蛋白质、核酸等物质,而且可同时抑制沉积物中营养物质的释放^[34],还可通过其生命活动改变根系周围的水体微环境,影响微生物对污染物的转化和去除过程。因而,有植物生长的沟渠对水体的净化能力要好于没有植物的沟渠^[35],并且植物的根系越发达,对污染物质的去除能力也就越强。例如 Gersberg 等^[36]发现香蒲(*Typhalatifolia*)没有灯芯草(*Scirpusvalidus*)和芦苇(*Phragmitescommunis*)的根系发达,导致其对水体的净化能力比灯芯草和芦苇弱,这与植物光合作用产生的氧一部分经茎叶传输到达植物根部,使得像灯芯草和芦苇根区范围大的植物更容易在水体中产生氧化环境,促进了硝化作用。在周小平等^[37]的研究中,浮床空心菜(*Ipomoea aquatic*)、水芹(*Oenanthejavanica*)2种植物组织累积的氮、磷量分别占各自系统去除量的40.32%~63.87%。但是也有研究认为植物对磷的吸收能力较弱^[38-39]。沟渠植物组合模式则提供了另外一条有效去除农田退水过量氮、磷营养物的途径。杨林章等^[40]利用“沟壁狗牙根(*Cynodondactylon*)+沟底空心菜(*Ipomoea aquatic*)”(夏季)和“沟壁黑麦草(*Loliummultiflorum*)+沟底水芹(*Oenanthejavanica*)”(冬季)植物组合模式累积的氮可达到 $200.75 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,磷为 $35.93 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$;沟渠植物对农田排水中氮磷的平均去除率达到48.36%和40.53%。

3.1.2 微生物作用

沟渠中的微生物可以对氮、磷营养物质进行分解和转化。田间排水中的有机氮首先被底泥吸附,经微生物的作用转化为 NH_4^+ , NH_4^+ 可以直接被植物吸收或在碱性条件下发生氨化反应生成 NH_3 ,从水体中彻底去除;也可能在氧化环境下经硝化细菌的作用生成为 NO_3^- ,被植物吸收或再经反硝化作用转化成为气态的 N_2 和 N_2O ,从水体中逸散出去。所以,微生物在水体氮污染的治理中占有非常重要的作用。Hansen 等^[41]的试验中发现,芦苇(*Phragmitesaustralis*)对氨氮的摄取量十分巨大,主要在于芦苇发达根系统的内部存在大量的硝化细菌,其氧化还原电位及硝化速率比未生长植物的区域高;微生物可以通过芦苇根部的好氧区和缺氧区进行硝化和反硝化作用,提高氮的去除率。农田

退水中的磷营养物质其 80% 以上是颗粒状磷,而颗粒状磷和有机磷都必须经微生物转化成无机磷后才能被植物直接吸收利用,植物根区周围的氧化微环境较适宜微生物对有机磷的降解^[42]。吴湘等^[43]认为在缺氧条件下磷酸盐可通过还原作用转化为 PH_3 释放到大气中,但经该途径去除的磷的量十分有限,一般低于 1.5%,几乎可以忽略。

3.1.3 底泥吸附

作为沟渠湿地的基质和载体,底泥在营养物质的去除中占有重要的作用,不仅为沟渠中的微生物和植物提供了生长的载体和营养物质,更因其含大量的有机质,有很好的团粒结构,吸附能力强,微生物种数繁多,有助于吸附、降解污染物,所以底泥本身对氮、磷也有一定的净化作用。杨林章等^[40]研究表明农田排水沟沟渠底泥所累积的氮、磷量分别达到 $25.47 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $9.14 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。Moustafa^[42]发现底泥对磷的吸附量最大可达到 90%,而底泥对磷的吸附能力和底泥中铁、铝氧化物的含量存在正相关关系^[44]。但也有研究者认为只有在处于好氧状态的底泥表层,铁、铝等才呈无定性的氧化态,可以与无机磷形成溶解度很低的磷酸盐,沉积在底泥中,而随着深度的增加,好氧状态逐渐转为缺氧、厌氧状态,对磷的吸附能力也随之降低^[45],不过,这种沉淀反应可能是可逆的^[44]。当污染水体中磷的浓度较低时,已经被底泥吸附的部分磷可能会重新释放到水体中,导致底泥对可溶磷的吸附沉淀并不能完全的将磷从水体中去除。目前,底泥对磷的吸附能力并没有准确的量化数据。徐红灯等^[46]认为沟渠底泥对铵态氮也有很强的吸附和硝化能力,其最大的饱和吸附量和硝化量可达 $1.3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

尽管植物吸收同化、微生物的转化降解以及底泥的吸附和沉淀作用是沟渠退水中氮、磷营养物质去除的 3 种主要途径,但它们并不是单独作用,往往同步发生,相互影响,相互交织进行,这涉及影响退水氮、磷去除的更多因素的综合作用。

3.2 影响氮、磷去除的因素

3.2.1 植物生长

统计显示,目前研究过的能够净化水体氮、磷污染的植物有八十多种,主要是一年生或多年生草本植物和花卉^[36,41,47-50]。已用于或可用于净化水体的植物主要有芦苇、美人蕉、空心菜、香蒲、黑麦草、灯芯草、水稻、菖蒲、牛筋草、凤眼莲、水芹菜等等。这些植物之所以能够有效地截留和转化营养物质,除了植物自身的吸收作用之外,还因为植物的存在可以改变根系周围

的微环境,从而加速氮、磷的去除。

大量研究显示植物可以修复水体氮、磷污染,但不同植物去除氮、磷的能力不同。如 Kröger 等^[48]发现在密西西比河流域的沟渠中,香蒲(*Typhalatifola* L.)和黑三棱(*Sparganiumamericanum* Nutt.)对氮、磷的去除有差异。Tyler 等^[50]在密西西比河利用蓉草(*Leersiaoryzoides*)、香蒲(*Typhalatifola*)、黑三棱(*Sparganiumamericanum*)净化沟渠水质的研究表明蓉草和香蒲在 48 h 时对铵态氮和硝态氮的去除速度明显比黑三棱快,去除效果也很好。卢进登等^[51]对芦苇(*Phragmitescommunis*)、荻(*Miscanthussacchariflorus*)、水稻(*O. sativa* L.)、雍菜(*Ipomoea aquatic Forsskal*)、香蒲(*Typhalatifola* L.)、美人蕉(*Canna generalis Bailey*)、牛筋草(*Eleusineindica*(L.)Gaerth)7 种植物的水体净化能力的比较研究显示芦苇的去除效果最好,实验中以总磷的去除计算,每平方米的芦苇可以将 117.93 m^3 的 V 类水质净化为 III 类水质。基于不同植物对氮、磷的去除效果和去除速率不一样,在试验中应根据不同植物的吸收特点选择合适的植物。

然而,同一种植物在不同时间及不同部位对氮、磷吸收也不一样。卢少勇等^[52]认为在植物生长期,氮、磷主要集中于植物茎叶,地上部的氮、磷含量高于地下部;衰亡期植物的营养物质会转移到地下部分,腐败分解后会对水体造成二次污染。因此,对沟渠植物进行管理时,选择合理的收割时间是关键。韩例娜等^[53]研究表明黑三棱(*Sparganiumstoloniferum*)、灯芯草(*Juncuseffusus*)、狐尾藻(*Myriophyllumspicatum*)、美人蕉(*Canna indica*)、铜钱草(*Hydrocotyle vulgaris*)和水芹菜(*Oenanthejavanica*)7 种植物中,前 6 种植物对氮磷的累积量都是地上部高于地下部,只有水芹菜对磷的累积量是地上部小于地下部,而氮的累积表现与前 6 种植物一致。还有一种另外就是香蒲(*Typha*)对氮、磷的累积呈现地上部与地下部累积量相等^[54]。收割植物地上部分可以彻底移出水体污染物是人们利用植物修复技术净化水体最大的动因,因而选择地上部氮、磷累积量高的植物对水体净化更有利。

不过,不同的植物对氮、磷的吸收有时间和空间上的限制,导致某些单一植物系统的去除效率并不是很高,而植物组合可以提高浮床植物系统的多样性和适应性,避免单一植物在栽种后可能遇到的天气、季节以及营养物质浓度多变的影响。Lucas 等^[55]利用澳大利亚当地的 4 种植物的组合在 3 种基质上对营养负荷高的水质进行净化,结果显示任意一种基质上植

物组合对总氮、总磷、氮氧化物的累积负荷的去除都有较好的效果。也有研究发现,水葫芦(*Eichhorniacras-sipes*)和浮萍(*Lemna minor*)组合形式在营养物质的去除方面要比单一的水葫芦去除效果好^[56-57]。Tripathi等^[57]认为水葫芦(*Eichhorniacras-sipes*)和浮萍(*Lemna minor*)的等比例组合效果比其他2种植物组合形式和单个植物都好,但实验中3种植物组合形式对氮、磷的去除效果之间并没有显著差异。蒋跃等^[58]研究发现美人蕉(*Canna indica*)和再力花(*Thaliadealbata*)的不同栽种面积比可以保证组合系统比单种植物对一种污染物更强的去除能力,暗示可以根据水体污染特点和植物吸收特性选择适合的植物组合类型。也有发现认为,植物组合的去除效果并不比单个植物好。如Picard等^[59]研究证实苔草(*Carexlacustris*)、水葱(*Scirpus validus*)、藨草(*Phalarisarundinacea*)、香蒲(*Typhalatifolid*)4种植物组合系统对氮、磷的消减与水葱、芦苇、香蒲单个植物的去除效果几乎没有差异。而林启存等^[60]的植物组合试验表明,对TN、TP、 NH_4^+-N 的去除效果由强到弱依次是聚草组(*Myrtophllumspi-catum*)>圆币草组(*Hydrocotyleverticillata*)>组合组。显然,植物组合一定比单种植物对农田沟渠退水氮、磷营养物质的去除效果好还有待进一步的探讨。

3.2.2 环境条件

(1)温度。温度对植物的生长至关重要,而水中的微生物对水温更加敏感。有试验研究表明,氮去除的最佳温度是30℃^[61]。在湿地系统中,水温为10℃时硝化作用会被抑制,水温为6℃时硝化作用的速率下降特别快^[62],这与温度的改变影响硝化菌的活性密切相关。Beutel等^[63]认为硝酸盐去除率和水温呈显著正相关。当温度由4℃增加到25℃时,湿地沉积物中的反硝化率增加了2个数量级^[64]。可见,温度对微生物的活动影响显著,调控适当的温度可以有效提高类似农田沟渠这样的人工湿地中氮、磷污染的去除效率。

(2)pH值。沟渠水质的酸碱度不仅影响植物的生长更会影响微生物的生命活动。比如硝化作用的最佳pH值是7.5~8.6,反硝化作用的最适宜pH值是7~8,而氨化作用的最佳pH值是6.5~8.5^[65],表明湿地处于碱性条件下有利于氮的去除。pH对磷去除率的影响主要体现在底泥对磷的吸附和沉淀作用,因为可溶性的无机磷化合物与底泥中的 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 发生反应主要是在中性或酸性条件下进行,而与 Ca^{2+} 易在碱性条件下发生沉淀作用^[66]。因此,碱性条件下有利于氮的去除,而中性或偏酸性条件有利于促进磷的去除作用。

实践中,可以根据水体的污染特点通过调节水体pH值的方式来提高水体的净化效率。

(3)溶解氧。水体中的溶解氧含量主要影响植物根部的呼吸作用以及微生物硝化反硝化过程。低溶解氧限制硝化作用促进反硝化作用,反之,溶解氧浓度较高时促进硝化作用抑制反硝化作用,而反硝化作用是从水体中彻底去除氮的主要途径。在湿地系统中,反硝化去除的硝态氮占到60%~95%^[67]。Beutel等^[63]研究表明水体中硝酸盐的去除率与溶解氧呈显著负相关关系,而阳辉等^[68]则认为水体中氨氮与亚硝态氮的含量和溶解氧呈负相关,但在氨氮含量一定时,硝酸盐含量和溶解氧呈正相关。在给氧条件下,氨氮的去除转化更为彻底,并且当溶解氧为8.5~11.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,氨氮的去除率最大^[69]。此外,溶解氧水平也影响底泥中氮、磷营养物质释放,并且当溶解氧 $>7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,底泥中氮的释放以硝酸盐氮为主;溶解氧 $<1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,以氨氮为主;底泥只有在溶解氧 $<1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时会释放磷,其余情况下,都会对底泥中磷的释放起抑制作用^[70]。

(4)沟渠结构。农田沟渠的长短、水深、边坡形式等特征都会影响氮、磷的去除。徐红灯^[71]发现农田排水沟渠中的氨氮、总氮、溶解性总磷、总磷沿程呈指数递减变化。Martin等^[72]认为水位变化会影响沟渠沉积物中氮、磷的转化分解,即水位较低时水体中溶解氧含量相对较高,硝化反应占主导;水位较高时水体反硝化作用较强。王沛芳等^[73]研究表明与宽浅型河道相比,深窄型河道水生生物量较少,河道水体与水生生物的接触程度低,不利于水生植物对氮及其化合物的吸收,会降低氮的去除率。导致差异的根源是河道的几何尺寸对河道水体动力条件影响较大,一般来说,大河道纵坡比较小,水体流速小,氮、磷在河道中的水力停留时间较大,有利于氮、磷的去除。

(5)水力停留时间。沟渠系统的流速和水力停留时间与污染物的降解去除密切相关,是维持系统正常运行并充分发挥净化效果的重要参数。在农田沟渠这样的人工湿地绝大部分的磷以颗粒态的形式迁移,所以沟渠水体的流速对磷的沉降和去除有很大的影响^[73]。有研究表明复合垂直流人工湿地在夏季的最佳停留时间为6h,冬季12h;水平潜流人工湿地的最佳停留时间在夏季为6~8h,冬季则为24~36h^[74];而最有利于污水中有机物去除的栽植人工湿地水力停留时间是2d^[75]。不过,Werner等^[76]认为相对较长的水力停留时间,既可以使水中离子的沉淀和其他反应进行彻底,从而改善去除效果,也容易使沉淀物重新溶

解到水流中而降低去除效果;但是缩短水力停留时间,微生物和植物与污染物的接触时间就减少,不能将污染物完全吸收转化,进而导致污染物去除率降低。但沟渠植物可增加沟渠的阻力,降低水流速度,拦截泥沙,促进悬浮颗粒物的沉积,延长了水力停留时间,进而可大大提高沟渠对营养物质的去除潜力。

4 问题及展望

众多学者开展植物对农田排水沟水质的修复能力及其影响因素的研究表明,人们已经意识到农田退水对地表水环境的重要影响,基于植物修复技术原位修复、成本低、效果好等优点,通过在沟渠中栽种植物实现对农田退水过量氮、磷进行去除无疑为农业面源污染治理提供了一种选择途径。尽管目前将植物修复技术应用于农业面源污染所导致的污染水体的修复与净化研究不少,但绝大部分研究更多地关注植物对水体污染负荷的消减能力,植物修复技术本身的机理研究还不够,且植物的经济利用价值、生态景观价值和社会效益方面关注较少,也需要进行深入的探讨。因此,未来研究还有待在以下几个方面进一步拓深和加强。

(1)强化沟渠植物系统对农田退水营养物质去除能力的定量化研究。大量研究表明,农田沟渠系统中沟渠植物吸收、微生物转化降解、底泥吸附是农田退水中过量氮、磷营养物质去除的主要途径,而当下对这3种途径还缺少更多定量化的认识。

(2)强化沟渠植物优选与植物优化组合研究。尽管用于改善沟渠水质研究的植物已达几十种,但是沟渠植物的地域适应性和污染水体的特异性,决定了已通过验证而具有良好处理效果的植物不一定对所有农田沟渠退水水质改善具有普适性,还需有针对性地开展区域沟渠植物优选或优化组合研究。

(3)强化野外原位沟渠广泛的示范、应用研究。目前,在利用植物修复技术防控与治理农业面源污染已有的研究中,多是小范围模拟实验,野外大范围的应用几乎没有,更没有形成完整的理论体系。因此将模拟或小规模试验推向生产实践中大范围的农田沟渠退水修复还需要更多的示范试验研究。

(4)强化沟渠植物适季收获循环利用研究。采用植物修复技术控制农业面源污染并不只是降低农田退水的氮、磷污染,更要防止在治理污染过程中造成二次污染的问题,其中植物的定期收割和利用就是很重要的问题。因此,在关注植物对水体污染负荷的消

减能力的同时,也要关注植物的后期处理和利用。不管是用作生物能源还是牲畜饲料或其他用途,都需要进一步开展其收获后的资源化循环利用研究。

(5)强化沟渠植物景观栽植设计研究。沟渠植物的栽植如果赋予灵活多元化的景观设计,既能创造田园美景,又能让人们陶冶情操,并在享受美景中不断增强环保修养与行动,促进植物修复技术在农田退水水质改善中的应用,实现环境效益、经济效益和社会效益的协调统一。

参考文献:

- [1] Yang Yong, Chen Ying, Zhang Xiao-lan, et al. Methodology for agricultural and rural NPS pollution in a typical county of the North China plain[J]. *Environmental Pollution*, 2012, 168: 170-176.
- [2] Thompson S P, Piehler M F, Paerl H W. Denitrification in an estuarine headwater creek within an agricultural watershed[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(6): 1914-1923.
- [3] Poe A C, Piehler M F, Thompson S P, et al. Denitrification in a constructed wetland receiving agricultural runoff[J]. *Wetlands*, 2003, 23(4): 817-826.
- [4] Sharpley A N, McDowell R W, Kleinman P J A. Phosphorus loss from land to water: Integrating agricultural and environmental management [J]. *Plant and Soil*, 2001, 237(2): 287-307.
- [5] Withers P J, Davidson I A, Foy R H. The contribution of agricultural phosphorus to eutrophication[G]. *Proceedings of the Fertiliser Society*, 1995, 356: 1-32.
- [6] 杨林章, 施卫明, 薛利红, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——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-Retain-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. (in Chinese)
- [7] Ongley E D, Zhang X L, Yu T. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(5): 1159-1168.
- [8] Poe A C, Piehler M F, Thompson S P, et al. Denitrification in a constructed wetland receiving agricultural runoff[J]. *Wetlands*, 2003, 23(4): 817-826.
- [9] Lena B V. Nutrient preserving in riverine transitional strip[J]. *Journal of Human Environment*, 1994, 3(6): 342-347.
- [10] 朱兆良. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科技出版社, 1992: 213-249.
ZHU Zhao-liang. Nitrogen in soils of China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing House, 1992: 213-249. (in Chinese)
- [11] 沈冰, 王全九, 李怀恩, 等. 土壤中农用化合物随地表径流迁移研究述评[J]. *水土保持通报*, 1995, 15(3): 1-7.
SHEN Bing, WANG Quan-jiu, LI Huai-en, et al. Review on the research of agro-chemical compound in soil moving with surface runoff

- [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1995, 15(3):1-7. (in Chinese)
- [12] 董心普. 广西有机稻产业化发展研究[D]. 南宁:广西大学, 2013.
DONG Xin-pu. Research on development of organic rice industry in Guangxi Province[D]. Nanning:Guangxi University, 2013. (in Chinese)
- [13] 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):1133-1139.
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):1133-1139. (in Chinese)
- [14] 张晴雯, 张惠, 易军, 等. 青铜峡灌区水稻田化肥氮去向研究[J]. 环境科学学报, 2010, 30(8):1707-1714.
ZHANG Qing-wen, ZHANG Hui, YI Jun, et al. The fate of fertilizer-derived nitrogen in a rice field in the Qingtongxia irrigation area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(8):1707-1714. (in Chinese)
- [15] 宁夏回族自治区环境保护厅. 宁夏回族自治区环境状况公报[R]. 2012.
Ningxia Hui Autonomous Region Environmental Protection Bureau. Ningxia Hui Autonomous Region environmental bulletin[R]. 2012. (in Chinese)
- [16] Abe K, Kato K, Ozaki Y. Vegetation-based wastewater treatment technologies for rural areas in Japan[J]. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 2010, 44(3):231-242.
- [17] 姜翠玲, 崔广柏, 范晓秋, 等. 沟渠湿地对农业非点源污染物的净化能力研究[J]. 环境科学, 2004, 25(2):125-128.
JIANG Cui-ling, CUI Guang-bai, FAN Xiao-qiu, et al. Purification capacity of ditch wetland to agricultural non-point pollutants[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(2):125-128. (in Chinese)
- [18] Moore M T, Kröger R, Locke M A, et al. Nutrient mitigation capacity in Mississippi Delta, USA drainage ditches[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(1):175-184.
- [19] Kröger R, Holland M M, Moore M T, et al. Hydrological variability and agricultural drainage ditch inorganic nitrogen reduction capacity[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36(6):1646-1652.
- [20] 易军, 张晴雯, 杨正礼. 宁夏引黄灌区稻田氮素浓度变化与迁移特征[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4):771-777.
YI Jun, ZHANG Qing-wen, YANG Zheng-li. Concentration change and migration characteristics of nitrogen in the paddy field of Ningxia Yellow River Irrigation Area[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4):771-777. (in Chinese)
- [21] 黄仲冬. 基于 SWAT 模型的灌区农田退水氮磷污染模拟及调控研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2011.
HUANG Zhong-dong. Application of SWAT model to simulate farmland drainage pollution and management practices research[D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011. (in Chinese)
- [22] 薛莲, 金卫斌, 艾天成, 等. 湖北四湖流域农田排水沟渠水质评价[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(z1):79-84.
XUE Lian, JIN Wei-bin, AI Tian-cheng, et al. Water quality evaluation of agriculture drainage ditches in four lakes region of Hubei Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(z1):79-84. (in Chinese)
- [23] 徐红灯. 农田排水沟渠对流失氮、磷的截留和去除效应[D]. 北京:北京化工大学, 2007.
XU Hong-deng. Interception and removal effect of agriculture drainage ditch on nitrogen and phosphorus[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2007. (in Chinese)
- [24] 翟丽华, 刘鸿亮, 席北斗, 等. 沟渠系统氮、磷输出特征研究[J]. 环境科学研究, 2008, 21(2):35-39.
ZHAI Li-hua, LIU Hong-liang, XI Bei-dou, et al. Study on the transportation and transformation of N and P in headwater ditches[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(2):35-39. (in Chinese)
- [25] Ahiablame L M, Chaubey I, Smith D R, et al. Effect of tile effluent on nutrient concentration and retention efficiency in agricultural drainage ditches[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98:1271-1279.
- [26] 吴晓妮. 滇池流域不同类型农田沟渠对氮磷的截留与去除效应[D]. 昆明:云南大学, 2013.
WU Xiao-ni. Interception and removal effects of the different types of agriculture drainage ditches on nitrogen and phosphorus in Dianchi Lake watershed[D]. Kunming:Yunnan University, 2013. (in Chinese)
- [27] 于涛, 陈静生. 农业发展对黄河水质和氮污染的影响:以宁夏灌区为例[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(5):1-7.
YU Tao, CHEN Jing-sheng. Impacts of the agricultural development on the water quality and nitrogen pollution of the Yellow River:Case of Ningxia Irrigation Area[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2004, 18(5):1-7. (in Chinese)
- [28] 王庆海, 却晓娥. 治理环境污染的绿色植物修复技术[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(2):261-266.
WANG Qing-hai, QUE Xiao-e. Phytoremediation—a green approach to environmental clean-up[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(2):261-266. (in Chinese)
- [29] Hans Brix. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?[J]. *Water Science and Technology*, 1997, 35(5):11-17.
- [30] Wang Zhi, Zhang Zhi-yong, Zhang Ying-ying, et al. Nitrogen removal from Lake Caohai, a typical ultra-eutrophic lake in China with large scale confined growth of *Eichhornia crassipes*[J]. *Chemosphere*, 2013, 92(2):177-183.
- [31] 姜翠玲, 范晓秋, 章亦兵. 非点源污染物在沟渠湿地中的累积和植物吸收净化[J]. 应用生态学报, 2005, 16(7):1351-1354.
JIANG Cui-ling, FAN Xiao-qiu, ZHANG Yi-bing. Accumulation of non-point source pollutants in ditch wetland and their uptake and purification by plants[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(7):1351-1354. (in Chinese)
- [32] 余红兵, 张树楠, 肖润林, 等. 沟渠水生植物资源化利用研究[J]. 草业学报, 2013, 22(6):143-149.
YU Hong-bing, ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, et al. Utilization of harvested aquatic plants as a mulch[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(6):143-149. (in Chinese)
- [33] 姜翠玲. 沟渠湿地对农业非点源污染物的截留和去除效应[D]. 南京:河海大学, 2004.

- JIANG Cui-ling. Retention and removal effect of ditch wetlands on non-point source pollutants from agricultural drainage[D]. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese)
- [34] Wang Chao, Zheng Sha-sha, Wang Pei-fang, et al. Effects of vegetations on the removal of contaminants in aquatic environments: A review[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2014, 26(4):497-511.
- [35] 陆宏鑫, 吕伟娅, 严成银. 生态沟渠植物对农田排水中氮磷的截留和去除效应[J]. *江苏农业学报*, 2013, 29(4):791-795.
LU Hong-xin, LY Wei-ya, YAN Cheng-yin. Interception and removal of nitrogen and phosphorus by ecological ditch plant in agricultural drainage ditch[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2013, 29(4):791-795. (in Chinese)
- [36] Gersberg R M, Elkins B V, Lyon S R, et al. Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetlands[J]. *Water Research*, 1986, 20(3):363-368.
- [37] 周小平, 王建国, 薛利红, 等. 浮床植物系统对富营养化水体中氮、磷净化特征的初步研究[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(11):2199-2203.
ZHOU Xiao-ping, WANG Jian-guo, XUE Li-hong, et al. N and P removal characters of eutrophic water body under planted float[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(11):2199-2203. (in Chinese)
- [38] 缪绅裕, 陈桂珠, 黄玉山, 等. 人工污水中的磷在模拟秋茄湿地系统中的分配与循环[J]. *生态学报*, 1999, 19(2):236-241.
MIAO Shen-yu, CHEN Gui-zhu, HUANG Yu-shan, et al. Allocation and circulation of phosphorus in artificial wastewater within a simulated mangrove wetland system[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(2):236-241. (in Chinese)
- [39] Sundaravadevel M, Vigneswaran S. Constructed wetlands for wastewater treatment[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2001, 31(4):351-409.
- [40] 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.
YANG Lin-zhang, ZHOU Xiao-ping, WANG Jian-guo, et al. Ecological ditch system with interception function and its effects on controlling farmland non-point pollution[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(11):1371-1374. (in Chinese)
- [41] Hansen J I, Andersen F O. Effects of *Phragmites australis* roots and rhizomes on redox potentials, nitrification and bacterial numbers in the sediments[G]. Proceedings of the 9th Nordic Symposium on Sediments, 1981, 68-71.
- [42] Moustafa M Z. Analysis of phosphorus retention in free-water surface treatment wetlands[J]. *Hydrobiologia*, 1999, 392(1):41-53.
- [43] 吴 湘, 叶金云, 肖肖娥, 等. 生态浮岛植物在富营养化养殖水体中去磷途径的初步分析[J]. *水产学报*, 2011, 35(6):905-910.
WU Xiang, YE Jin-yun, YANG Xiao-e, et al. Ways of phosphorus removal from eutrophic aquaculture water by ecological floating culture plants[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2011, 35(6):905-910. (in Chinese)
- [44] Tanner C C, Sukias J P S, Upsdell M P. Substratum phosphorus accumulation during maturation of gravel-bed constructed wetlands[J]. *Water Science and Technology*, 1999, 40(3):147-154.
- [45] Reddy K R, Connor G A O, Gale P M. Phosphorus sorption capacities of wetland soils and stream sediments impacted by dairy effluent[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(2):438-447.
- [46] 徐红灯, 席北斗, 翟丽华. 沟渠沉积物对农田排水中氨氮的截留效应研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(5):1924-1928.
XU Hong-deng, XI Bei-dou, ZHAI Li-hua. Interception effect of ditch sediment on NH_4^+-N in agricultural drainage ditch[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(5):1924-1928. (in Chinese)
- [47] 付晓云, 何兴元. 5 种水生植物脱氮除磷能力比较[J]. *西北林学院学报*, 2014, 29(3):79-82.
FU Xiao-yun, HE Xing-yuan. Comparison of nitrogen and phosphorus removal capability of five aquatic plants[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2014, 29(3):79-82. (in Chinese)
- [48] Kröger R, Moore M T, Locke M A, et al. Evaluating the influence of wetland vegetation on chemical residence time in Mississippi Delta drainage ditches[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(7):1175-1179.
- [49] 陈永华, 吴晓芙, 郝 君, 等. 4 种木本植物在潜流人工湿地环境下的适应性及去污效果[J]. *生态学报*, 2014, 34(4):916-924.
CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HAO Jun, et al. The adaptability and decontamination effect of four kinds of woody plants in constructed wetland environment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(4):916-924. (in Chinese)
- [50] Tyler H L, Moore M T, Locke M A. Influence of three aquatic macrophytes on mitigation of nitrogen species from agricultural runoff[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2012, 223(6):3227-3236.
- [51] 卢进登, 陈红兵, 赵丽娅, 等. 人工浮床栽培 7 种植物在富营养化水体中的生长特性研究[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2006, 7(7):58-61.
LU Jin-deng, CHEN Hong-bing, ZHAO Li-ya, et al. Study on the growth characteristics of seven plants cultivated on artificial floating rafts in eutrophic water[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2006, 7(7):58-61. (in Chinese)
- [52] 卢少勇, 金相灿, 余 刚. 人工湿地的磷去除机理[J]. *生态环境*, 2006, 15(2):391-396.
LU Shao-yong, JIN Xiang-can, YU Gang. Phosphorus removal mechanism of constructed wetland[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(2):391-396. (in Chinese)
- [53] 韩例娜, 李裕元, 石 辉, 等. 水生植物对农田排水沟渠氮、磷迁移生态阻控效果比较研究[J]. *农业现代化研究*, 2012, 33(1):117-120.
HAN Li-na, LI Yu-yuan, SHI Hui, et al. Study on comparison of different aquatic plant on nitrogen and phosphorus ecological control measures in drainage ditch of farmland in Southern China[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2012, 33(1):117-120. (in Chinese)
- [54] 郭长城, 胡洪营, 李锋民, 等. 湿地植物香蒲体内氮、磷含量的季节变化及适宜收割期[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(3):1020-1025.
GUO Chang-cheng, HU Hong-ying, LI Feng-min, et al. Seasonal dynamics of nitrogen and phosphorus of wetland plants *Typha* at Nansihu Lake[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(3):1020-1025. (in Chinese)

- [55] Lucas W C, Greenway M. Nutrient retention in mature vegetated biore-tention systems under elevated nutrient loads[G]. Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress, 2008, 4.
- [56] Sinha A K, Sinha R K. Sewage management by aquatic weeds (water hyacinth and duckweed): Economically viable and ecologically sus-tainable bio-mechanical technology[J]. *Environmental Education and Information*, 2000, 19(3): 215–226.
- [57] Tripathi B D, Upadhyay A R. Dairy effluent polishing by aquatic macrophytes[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2003, 143: 377–385.
- [58] 蒋 跃, 童 琰, 由文辉, 等. 3种浮床植物生长特性及氮、磷吸收的优化配置研究[J]. 中国环境科学, 2011, 31(5): 774–780.
JIANG Yue, TONG Yan, YOU Wen-hui, et al. Comparison of the growth characteristics and the optimize configuration modes of the ni-trogen and phosphorus uptake capacity of three kinds of plant cultivat-ed on the floating-bed[J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(5): 774–780. (in Chinese)
- [59] Picard C R, Fraser L H, Steer D. The interacting effects of temperature and plant community type on nutrient removal in wetland microcosms [J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(9): 1039–1047.
- [60] 林启存, 冯晓宇, 许宝青, 等. 低温季节 2 种水生植物及其组合对富营养化城市河水的净化效果试验[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(34): 16765–16767.
LIN Qi-cun, FENG Xiao-yu, XU Bao-qing, et al. Purification efficien-cies of two kinds of aquatic plants and their combination on eutrophication of urban river in low temperature season[J]. *Journal of Anhui A-gricultural Science*, 2012, 40(34): 16765–16767. (in Chinese)
- [61] Wood S L, Wheeler E F, Berghage R D, et al. Temperature effects on wastewater nitrate removal in laboratory-scale constructed wetlands[J]. *Transactions of the ASAE*, 1999, 42(1): 185–190.
- [62] Werker A G, Dougherty J M, McHenry J L, et al. Treatment variability for wetland wastewater treatment design in cold climates[J]. *Ecological Engineering*, 2002, 19(1): 1–11.
- [63] Beutel M W, Newton C D, Brouillard E S, et al. Nitrate removal in sur-face-flow constructed wetlands treating dilute agricultural runoff in the lower Yakima Basin, Washington[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(10): 1538–1546.
- [64] Sirivedhin T, Gray K A. Factors affecting denitrification rates in exper-imental wetlands: Field and laboratory studies[J]. *Ecological Engineer-ing*, 2006, 26(2): 167–181.
- [65] Al-Omari A, Fayyad M. Treatment of domestic wastewater by subsur-face flow constructed wetlands in Jordan[J]. *Desalination*, 2003, 155(1): 27–39.
- [66] Xiong J B, Mahmood Q. Adsorptive removal of phosphate from aqueous media by peat[J]. *Desalination*, 2010, 259(1–3): 59–64.
- [67] Spieles D J, Mitsch W J. The effects of season and hydrologic and chemical loading on nitrate retention in constructed wetlands: A com-parison of low- and high-nutrient riverine systems[J]. *Ecological Engi-neering*, 1999, 14(1–2): 77–91.
- [68] 阳 辉, 樊贵盛, 吉晋兰. 潇河流域水体氮素分布特征及其与溶解氧的关系[J]. 水土保持通报, 2014, 34(5): 89–92.
YANG Hui, FAN Gui-sheng, JI Jin-lan. Nitrogen distribution in water of Xiaohe river watershed and its relationship with dissolved oxygen[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(5): 89–92. (in Chi-nese)
- [69] 陈 婷, 姚 萌, 刘春杰. 底泥中氮的释放与溶解氧量的关系[J]. 净水技术, 2012, 31(1): 70–72, 92.
CHEN Ting, YAO Meng, LIU Chun-jie. Relationship between dis-solved oxygen level in water and nitrogen released in river sediment[J]. *Water Purification Technology*, 2012, 31(1): 70–72, 92. (in Chinese)
- [70] 李 薇. 溶解氧水平对富营养化水体底泥氮磷转化影响的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
LI Wei. Study on the impact of DO on the release of nitrogen and phos-phorus from sediment in eutrophic water[D]. Nanjing: Nanjing Univer-sity of Science & Technology, 2014. (in Chinese)
- [71] Martin H W, Ivanoff D B, Graetz D A, et al. Water table effects on his-tosol drainage water carbon, nitrogen, and phosphorus[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26(4): 1062–1071.
- [72] 王沛芳, 王 超, 胡 颖. 氮在不同生态特征沟渠系统中的衰减规-律研究[J]. 水利学报, 2007, 38(9): 1135–1139.
WANG Pei-fang, WANG Chao, HU Ying. Nitrogen degradation effi-ciency in channels with different ecological characteristics[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(9): 1135–1139. (in Chinese)
- [73] Cole C A, Brooks R P. A comparison of the hydrologic characteristics of natural and created mainstem floodplain wetlands in Pennsylvania[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 14(3): 221–231.
- [74] 靳同霞, 张永静, 王程丽, 等. 2 种人工湿地的水力停留时间及净化效果[J]. 环境工程学报, 2012, 6(3): 883–890.
JIN Tong-xia, ZHANG Yong-jing, WANG Cheng-li, et al. Hydraulic retention time and purification effect of two kinds of constructed wet-lands[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(3): 883–890. (in Chinese)
- [75] 李 静, 姜冰冰, 王飞宇, 等. 北京市杨镇一中人工湿地设计及污水-处理效果[J]. 湿地科学, 2012, 10(1): 102–108.
LI Jing, JIANG Bing-bing, WANG Fei-yu, et al. Design and treatment effect of constructed wetland wastewater disposal project in Yangzhen No. 1 Middle School of Beijing[J]. *Wetland Science*, 2012, 10(1): 102–108. (in Chinese)
- [76] Werner T M, Kadlec R H. Wetland residence time distribution model-ing[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 15(1–2): 77–90.