

农田排水沟渠调控农业非点源污染研究综述

宋常吉¹, 李强坤¹, 崔恩贵²

(1. 黄河水利科学研究院, 郑州 450003; 2. 河南省人民胜利渠管理局, 新乡 453000)

摘要: 农业非点源污染日益成为亟待解决的问题,随着农业非点源污染的深入研究,农田排水沟渠在调控非点源污染上的作用逐渐得到大家的关注。在简要分析农田排水沟渠特征及功能的基础上,归纳总结了排水沟渠系统对氮、磷非点源污染的迁移转化机理;结合目前研究状况,提出今后尚需进一步研究的问题,包括沟渠内植物和底泥二次污染、农田排水沟渠非点源污染溶质净化与内源污染形成机理研究、农田排水沟渠对农田生态系统生物多样性的影响以及土壤次生盐碱化与灌区农田排水沟渠之间关系研究等,以期对农田排水沟渠对农业非点源污染调控作用的研究提供参考。

关键词: 农田排水沟渠; 农业非点源污染; 迁移转化; 生态环境

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)05-0222-06

Review on regulation and control of agricultural non-point source pollution by use of agricultural drainage ditch

SONG Changji¹, LI Qiangkun¹, CUI Engui²

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China;

2. Administration Office of "People's Victory Canal", Xinxian 453000, China)

Abstract: Agricultural non-point source pollution is becoming a pressing problem. With the further research of agricultural non-point source pollution, the effects of drainage ditch in reducing agricultural non-point source pollution has been gradually paid more attention. On the base of brief analysis for the feature and function of diainage ditche. This paper reviewed the migration and transformation of drainage ditches for nitrogen and phosphorus from non-point source pollution. In the light of current research conditions, the paper put forward the problems of further research, which include the secondary pollution of plant and sediment in ditches, the solute purification and the formation mechanism of endogenous pollution of non-point source pollution in the agricultural drainage ditches, the influence of agriculture drainage ditch on the biodiversity of farmland ecosystem and the research on the relationship between secondary soil salinization and agricultural drainage ditches. The purpose is to provide the reference for the study of controlling the agricultural non-point source pollution.

Key words: agricultural drainage ditches; agricultural non-point source pollution; migration and transformation; ecological environment

水源是经济社会发展的重要支撑和保障,随着近年化肥和农药过量使用而产生的非点源污染对水体水质产生了严重的影响。2010年国家三部委联合发布的《第一次全国污染源普查公报》,我国农业污染源年排放化学需氧量 1324.09 万 t,总氮 270.46 万 t,总磷 28.47 万 t,分别占全国污染物总排放量的 43.7%、57.2%、64.9%,农业源已成为主

要污染源^[1]。随着点源污染治理水平的相对提高,非点源污染问题日益引起人们的关注和重视^[2-4]。

农业非点源污染主要是指人们从事农业生产活动时,农田中的土粒、氮、磷、农药及其他有机或者无机污染物质在降水或灌溉过程中,通过地表径流、排水沟渠地下渗漏并伴随着一系列的物理、化学和生物转化进入水体而造成的污染,主要包括化肥污染、

收稿日期:2014-03-27; 修回日期:2014-07-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51379085);黄河水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助(HKY-JBYW-2013-16)

作者简介:宋常吉(1987-),男,河南漯河人,助理工程师,工学硕士,主要研究方向为农业水土环境。

农药污染、集约化养殖厂污染、农膜污染、固体废弃物污染等^[5]。农业非点源污染是造成地表水和地下水污染的主要因素,对水环境和农业生态系统造成了严重危害,农业非点源污染的治理已迫在眉睫。农田排水沟渠通常是指天然形成的裸露在地表或者以排水为目的而挖掘的水道,是农业和农村生活污水进入河流的通道,因其具有排水和湿地生态双重功能而成为研究热点,国内外研究者开始关注如何利用农田排水沟对物质的阻隔和过滤功能减轻和防治农业非点源污染,充分发挥其生态服务功能和环境效应^[6-8]。农业非点源的污染的控制技术有很多,本文结合近年来的参考文献,阐述了农田排水沟的特征和作用,探讨了农田排水沟对非点源污染物的作用机理和研究现状,为农田排水沟对农业非点源污染的控制提供参考。

1 农田排水沟渠的特征及其功能

1.1 农田排水沟渠的特征

农田排水沟渠是农田排水汇入河流和湖泊的通道,是占地面积最大的农田排水设施,由特殊的植物、土壤、微生物所组成的半自然综合体,它可以将流经沟渠的污染物溶解或吸附在土壤颗粒表面,随沟渠坡面漫流或沟渠径流迁移,降低进入受纳水体中的氮、磷含量^[9-10]。

沟渠系统一般起始于田间毛沟或农沟,经支沟、干沟或总干沟排入外界大面积的水体,还包括一些与支、干沟相串联的水塘和季节性区域河流。作为排水和灌溉为主要目的的人工水道,沟渠中生长着适应于此环境的水生植物,一般有芦苇、蒲草等挺水植物,在年内周期性地生长变化,夏秋季生长旺盛,冬春季枯萎;沟渠底层主要是底泥沉积物,主要由农田流失的土壤和自然形成的底泥两部分组成,随水位升降周期性的暴漏、淹没,自身含有丰富的有机质,有较好的团粒结构,吸附能力强,作为沟渠湿地的基质与载体为微生物和水生植物提供了生长的载体和营养物质。因此沟渠具有河流和湿地的双重特征,是一种人类活动影响下的半自然化的人工湿地水文生态系统。

1.2 农田排水沟渠的功能

农田排水沟渠作为农田水利基础设施的重要组成部分,不仅具有汇水、持水、水流通道的作用,而且担负着水质净化及维持生物多样性的功能,同时对于维持农业生态系统平衡和流域生态系统健康有着重要作用。农田排水沟渠一般呈规则的线性形状,

和陆地之间有着密切的物质和有机体交换;作为排水渠道,大量由于农户过度施肥和农药等原因而产生的诸如氮、磷等污染物通过沟渠进入下游河流湖泊中造成水体富营养化,从而造成农田生态系统生物多样性减少等生态问题^[6]。农田排水沟渠独特的生态系统对控制农业非点源污染起着重要作用,基质底泥、植物和微生物是农田排水沟渠的主要组成部分,农田排水沟对农业非点源污染的净化作用就是三者协同作用的结果。

2 农田排水沟对控制农业非点源污染物的作用机理

农业非点源污染物包括各种营养盐、重金属和有机物质,其中氮、磷是水体富营养化的主要营养物,所以本文主要介绍农田排水沟对控制氮磷的作用机理。

2.1 农田排水沟对控制氮的作用机理

通常认为,氮的去除途径主要包括植物的吸收、截留沉淀、介质的吸附以及微生物的硝化和反硝化脱氮^[11],含氮的物质主要以有机氮、氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)和亚硝态氮($\text{NO}_2^- - \text{N}$)的形式存在,一般可以分为有机氮和无机氮。

2.1.1 植物吸收 植物是农田排水沟渠中必不可少缺少的一部分,它通过自身的生长及协助沟渠内的物理、化学、生物等作用去除沟渠中的营养物质。被污染水中的有机氮在碱性条件下,会被土壤表层吸附,经过微生物的铵化作用或矿化作用形成氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$);无机氮作为植物生长过程中不可或缺的物质,可以直接通过植物网络状的根系直接被摄取,合成植物蛋白质等有机氮,通过植物收割从污水和湿地系统中去除^[12]。植物只能吸收一部分氮,一般占投配氮量的8%~16%^[13]。因此植物吸收不是农田排水沟主要脱氮途径。

2.1.2 截留沉淀 污染物以地表径流、潜层渗流的方式由农田通过农田排水沟渠进入水体,沟渠中的水生植物形成密集的过滤带。沟渠中的植物过滤带能增加地表水流的水力粗糙度,降低水流速度以及水流作用于土壤的剪切力,增加了水流停留时间,进而降低污染物的输移能力,促进其在沟渠中沉淀,有利于悬浮物的沉降。沟渠中植物的地下茎和根形成纵横交错的地下茎网,水流缓慢时重金属和悬浮颗粒被其阻隔而沉降,防止其随水流失,同时又在其表面进行离子交换、整合、吸附、沉淀等,不溶性胶体为根系吸附,凝集的菌胶团把悬浮性的有机物和新陈

代谢产物沉降下来^[14]。

2.1.3 介质吸附 介质的吸附主要是对还原态氨氮而言的。无论是表面流湿地中的无机沉淀物,还是潜流湿地中的介质,亦或是天然沟渠湿地的底泥,都可以通过阳离子交换吸附去除溶液中的铵离子。湿地基质对氨氮的吸附作用在初期是明显的,在一定的氨氮浓度下,会有一定量的氨氮吸附到提供的吸附位上,达到平衡吸附状态,当水中氨氮浓度减少后,湿地基质同时也会向系统释放吸附的氨氮,在新浓度下重新获得平衡;当 pH 值为 9.3、氨和铵离子的比例是 1:1 时,通过挥发造成的氨氮损失开始变得显著^[15],通常在农田排水沟渠中,pH 值变化不是很剧烈,一般不会超过 8。因此,介质对氨氮的吸附和氨的挥发是湿地除氮的重要方面,但不是湿地除氮的主要途径。

2.1.4 微生物作用 对比上述几个途径,微生物的硝化和反硝化作用是氮素去除的最主要途径,通常占到总氮去除率的 80% 以上。沟渠中的各种水生植物具有表面积很大的根(茎)网络,可以把植物光合作用产生的氧一部分传送到根部,扩散到周围底质中,形成根区局部的好氧环境,发生硝化作用;相反在根部周围形成厌氧环境发生反硝化作用。因此植物根区周围连续呈现出好氧、厌氧状态,沟渠沉积物表面附着的大量微生物可同时对氮进行硝化和反硝化等作用,最终达到微生物吸收降解氮磷等营养物质的目的。同时,这些根茎网络为微生物的附着、栖生、繁殖提供了条件。植物通过茎和叶在有氧条件下,排水中的有机氮首先被土壤吸附,然后湿地系统中的微生物通过氨化作用将有机氮转化为无机氮(主要表现为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$),然后再进行硝化和反硝化反应。

硝化是氨通过亚硝化菌和硝化菌氧化成硝酸盐的过程,这是一个好氧反应过程。在好氧条件下,氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)首先被亚硝化菌氧化为亚硝酸根(NO_2^-),进而被硝化菌氧化为硝酸根(NO_3^-),是主要通过植物吸收的另一种无机氮。反硝化作用是氮去除的主要方式,在硝酸盐存在的厌氧条件下,反硝化细菌首先将硝酸盐还原成 N_2O ,随后还原成 N_2 ,具体流程为: $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$,硝酸盐最终被还原成大气中浓度为 78% 的 N_2 ,因此反硝化作用意味着硝酸盐真正地从湿地系统中去除^[16]。反硝化作用是沟渠系统能永久去除氮污染的唯一自然过程,也是 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除的主要途径。因此,去除农田排水沟氮的主要途径是硝化-反硝化作用。

2.2 农田排水沟对控制磷的作用机理

磷在排水沟渠中主要以溶解态和吸附态存在,磷向水体的迁移一方面通过径流或排水以溶解态的形式迁移,另一方面以泥土颗粒形式迁移,磷负荷的 90% 通过颗粒态迁移,在沟渠中溶解态磷是农田磷流失的主要形式。溶解态和吸附态可相互交换,吸附和溶解处于动态平衡,两者可进一步划分成无机磷和有机磷,可溶的无机磷是植物可以利用的,而有机磷和颗粒状磷必须经微生物转化成无机形式后能被植物吸收^[17]。磷在沟渠湿地中的迁移转化是底泥吸附、植物吸收和微生物的分解和协同等作用降低水体中磷的含量^[18]。

2.2.1 底泥吸附 底泥吸附被看做是湿地去除磷的主要方式。底泥中磷的存在形式有无机和有机两种形态,通常河流及湿地底泥中的矿物质低,而有机质含量高,磷在底泥中主要以有机态的形式存在,但在湿地淹水缺氧条件下,有机磷的矿化速度很慢,所以认为湿地中的磷的迁移转化机理的研究集中在无机磷上。在酸性和中性条件下,可溶性的无机磷化物很容易与 Fe^{3+} 和 Al^{3+} 发生吸附和沉淀反应,生成溶解度很低的磷酸铁和磷酸铝等;在碱性条件下,磷的吸附主要与 Ca^{2+} 形成磷酸钙被截留在底泥中。土壤和底泥对磷的吸附主要发生在表层,随深度增加,吸附能力下降,这是由于表层土壤和底泥处于好氧状态,铁、铝呈无定性的氧化态形式,吸附能力强,能与磷形成难溶的复合物^[19]。这种沉淀反应是一个可逆的过程,当湿地排水中磷的浓度较低时,底泥吸附的一部分磷有可能重新释放到水中^[20]。尽管沟渠可消减农田径流磷的输出,但当底泥对磷的吸附能力出现饱和状态,沟渠底泥会向水体释放磷的风险,造成磷的二次污染。

2.2.2 植物作用 植物对水体中的磷有一定的净化作用。磷是植物生长不可缺少的重要元素,但只有可溶性无机磷才可以被植物吸收利用,而有机磷必须经微生物转化成无机形式后才能被植物吸收;植物吸收磷主要是通过根部首先吸收底泥空隙水中的磷,使水体与底泥之间产生浓度梯度,进而促进磷向下迁移,提高磷在整个沟渠系统中的净化水平。沟渠中的植物增加水深和水力停留时间,从而延长水中的营养物质停留时间,是营养物质发生反应的时间更充分,进而提高去除污染物的潜力^[21];植物的存在不仅对水体中的磷有截留效应,还由于自身的吸收在植物根区形成浓度梯度,打破了底泥-水界面的平衡,促进磷在界面的交换作用,进而加速磷

进入底泥的速度^[22]。

2.2.3 微生物作用 沟渠中微生物对磷的去除包括对磷的同化和对磷的过量积累。由于沟渠湿地中植物光合作用光反应、暗反应交替进行以及内部不同区域对氧消耗量存在差异,从而导致系统中好氧和厌氧情况交替出现,使磷的过量释放和过程积累得以顺利完成。具有除磷作用的好氧微生物在有氧条件下先将有机磷及溶解性差的无机磷酸盐吸附,并通过自身酶系统的分解非溶解态含磷化合物和有机磷转化成溶解态的无机磷,促进植物吸收、底泥吸附、沉淀等^[23],进而把磷从水中去除;厌氧微生物在厌氧条件下利用铁结合态的铁磷等,促进磷从底泥中转化为溶解态被释放出来。

3 农田排水沟渠在农业非点源污染中的研究进展

应用农田排水沟渠处理农业非点源污染可以看做是从人工湿地水处理技术发展而来的。Meuleman(1993)等的研究指出,天然沟渠能够吸收水体中氮磷污染物,其中对磷素的去除率高达90%~95%^[24];20世纪90年代末期,美国研究开发了与农田排水系统和地下供水系统相结合的“湿地-控制排水-供水池塘-地下灌溉(WRSIS)”系统,取得了良好的生产及生态效益。Woltemade(2001)在美国马里兰、伊利诺斯、依阿华等地开展湿地接纳农田排水的试验结果表明:所有试验区的湿地都能降低氮和磷的浓度,但氮磷的去除率与湿地的大小、汇水面积及农田排水在湿地中的滞留时间有很大关系,同时也存在着再次污染的威胁^[25]。

农田排水沟渠对非点源污染物的拦截、吸收的相关研究在国内开始较晚。晏维金(1999)等和姜翠玲等通过研究沟渠湿地对农业非点源污染物净化研究表明沟渠湿地可通过底泥截留吸附、植物吸收和微生物降解等作用有效地截留氮磷污染物;另一方面如果不对水生植物进行收割,沟渠湿地系统本身又是一个潜在的污染源^[26-27],徐红灯等通过动态模拟实验研究对比不同排水沟渠对农田流失氮、磷的截留作用,同时通过静态模拟实验探讨了水生植物对氮、磷在水-沉积物-水生植物这一微观系统中的截留过程^[28];翟丽华等系统分析了沟渠系统氮-磷输出特征^[29];王岩等通过对三种不同类型农田排水沟渠氮磷拦截效果比较,进而探讨生态沟渠对农田排水氮磷的去除机理^[30];李强坤等以黄河上游青铜峡灌区为例,开展了农业非点源污染物在排

水沟渠中的模拟与应用研究^[31],何明珠等对滇池柴河流域农田生态沟渠杂草的氮磷富集效应进行了研究^[32],余红兵等研究了水生美人蕉、铜钱草、黑三棱、狐尾藻和灯心草5种水生植物及其不同生物量对生态沟渠氮、磷的吸收效果^[33],在此基础上,也有学者将沟渠湿地对农业非点源污染物降解的研究进一步扩展到沟塘湿地进行试验研究,彭世章^[34]、何军^[35]、吴军^[36]等对沟塘湿地对农业非点源污染的研究表明沟塘湿地对农田排水中的TN、TP的综合去除率可达到70%~80%。

以上研究表明,农田排水沟渠周期性的排水特征及其底泥中滋生的微生物、水生植物等构成了排水沟渠独特的生态结构,当农田排水流经时,通过植物吸收、底泥吸附、微生物作用等方式可以有效地截留和转化农田排水中的氮、磷等非点源污染物,另一方面,随着水文及生物环境等条件改变,植物、底泥等又会向水体中释放污染物,形成内源污染。农田排水沟渠对农业非点源污染物的去除有重要作用,但是农业非点源污染物在农田排水沟渠系统中的迁移模型的研究比较薄弱,因此积极构建农业非点源污染物在沟渠中的迁移转化模型很有必要。

4 结 语

(1)农田排水沟渠独特的生态结构对非点源溶质具有明显的净化效果,但也潜伏着诱发内源污染甚至进一步扩散的威胁。农田排水沟渠是自然沟渠,水生植物大部分都是对农民没有利用价值的野生植物,地上部分死亡以后,其残体内的营养物质将再次释放产生二次污染,如何对野生植物进行后续处理是亟待解决的问题,姜翠玲等研究建议利用可收割经济作物代替野生植物达到防止二次污染,然而这对农民的积极性并非有效,同时收割植被会导致废水流速变大,减少悬浮物的沉积,并且对土壤微生物及土壤的理化性质产生影响,所以是否定期收割或收割多少人工湿地的植被值得商榷;底泥吸附被看做是湿地去除非点源污染中磷的主要方式,但当排水沟渠中磷的浓度较低时,底泥吸附的一部分磷有可能重新释放到水中造成二次污染,国外广泛采用的是底泥清淤措施,若弃置沟渠旁在降雨条件下再次随地表径流汇入沟渠同样造成污染,所以底泥清淤的后处理问题同样值得关注。

(2)应用农田排水沟渠“拦截”农业非点源污染尚未形成完善的理论体系,当前的研究主要集中于局部或单条沟渠的对比试验、水生植物备选及生态

结构形式探讨等层面,关于农田排水沟渠水—土—植物系统内各介质间非点源溶质的迁移转化机理尚不清楚,农田排水沟渠非点源污染溶质净化与内源污染形成机理也有待进一步研究,因此需从区域整体利益角度找到排水沟渠营养元素“源—汇”功能的“平衡点”,合理安排农田排水沟渠的整体布局 and 最佳管理模式,最大限度地发挥农田沟渠截留养分的功能,避免和减少农田养分通过沟渠流失到河流湖泊。

(3)农田排水沟渠作为农业流域中的一个特殊生态系统,在维持农田生态系统生物多样性方面具有独特作用。农田排水过程中田间过多的化肥和农药进入沟渠,导致水体恶化,沟渠内的生物栖息环境遭到破坏,青蛙蟾蜍等有益动物种群减少,病虫害爆发,农民则会施用更多农药导致恶性循环;有研究表明底泥清淤前的底质向上覆水释放磷素的速率要比清淤后底质慢,同时沟渠清淤活动对于所有幼虫类型的存在有影响,农田排水沟对农田生态系统生物多样性影响的研究在国外已经开始相关工作,国内鲜有研究。

(4)土壤次生盐碱化与灌区农田排水沟渠有密切的关系。造成灌区土壤次生盐碱化的主要原因是灌区灌溉用水过量,但是作为灌区排水渠道的农田排水沟渠中种植大量的水生植物,必然影响到区域排涝泄洪能力,在排水不畅的条件下,地下水补给量大于排泄量,农田地下水水位大幅度上升,潜水蒸发造成土层表面积盐加剧。因此,区域生态环境是需要考虑的问题,对灌区引水排水进行综合调控,统一调度,农田排水沟渠的规划和排水配套设施和沟渠湿地运用与区域生态环境间关系的研究是亟待思考的问题。

参考文献:

- [1] 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[G]. 2010.
- [2] 郭鸿鹏,朱静雅,杨印生,等. 农业非点源污染防治技术的研究现状及进展[J]. 农业工程学报. 2008,24(4):290–295.
- [3] 仓恒谨,许炼峰,李志安,等. 农业非点源污染控制中的最佳管理措施及其发展趋势[J]. 生态科学. 2005,24(2):173–177.
- [4] 李强坤,胡亚伟,孙娟. 农业非点源污染物在排水沟渠中的迁移转化研究进展[J]. 中国生态农业学报. 2010,18(1):210–214.
- [5] 张水龙,庄季屏. 农业非点源污染研究现状与发展趋势[J]. 生态学杂志,1998,17(6):51–55.
- [6] 陆海明,孙金华,邹鹰,等. 农田排水沟渠的环境效应与生态功能综述[J]. 水科学进展,2010,21(5):719–725.
- [7] 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.
- [8] Strock J S, Dell C J, Schmidt J P. Managing natural processes in drainage ditches for nonpoint source nitrogen control[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 62(4): 188–196.
- [9] Jiang C L, Fan X Q, Cui G B, et al. Removal of agricultural non-point source pollutants by ditch wetlands: implications for lake eutrophication control[J]. Hydrobiologia, 2007,581: 319–327.
- [10] Tanner C C, Nguyen M L, Sukias J P S. Nutrient removal by a constructed wetland treating subsurface drainage from grazed dairy pasture[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2005, 105(1): 145–162.
- [11] 周晓夏. 人工湿地对农田排水净化效果的研究[D]. 西安:西安理工大学,2005.
- [12] 杨敦,徐丽花,周琪. 潜流式人工湿地在暴雨径流污染控制中应用[J]. 农业环境保护,2002,21(4):334–336.
- [13] 高拯民. 城市污水土地处理设计利用手册[S]. 北京:中国标准出版社,1991.
- [14] 梁笑琼,李怀正,程云. 沟渠在控制农业面源污染中的作用[J]. 水土保持应用技术,2011(6):21–25.
- [15] 韩雪征. 沟渠湿地对农业面源污染的生态修复研究[D]. 邯郸:河北工程大学,2009.
- [16] Hernandez M E, Mitsch W J. Denitrification in created riverine wetlands: Influence of hydrology and season[J]. Ecological Engineering, 2007, 30(1): 78–88.
- [17] 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.
- [18] 张燕,阎百兴,刘秀奇,等. 农田排水沟渠系统对磷面源污染的控制[J]. 土壤通报,2012,43(3):745–750.
- [19] Reddy K R, O Connor G A, Gale P M. Phosphorus sorption capacities of wetland soils and stream sediments impacted by dairy effluent[J]. Journal of Environmental Quality, 1998, 27(2): 438–4473.
- [20] 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.
- [21] Kroger 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.
- [22] Li E H, Li W, Wang X L, et al. Experiment of emergent macrophytes growing in contaminated sludge: Implication for sediment purification and lake restoration[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(4): 427 – 434.
- [23] Moore M T, Kr? ger R, Locke M A, et al. Nutrient mitigation capacity in Mississippi Delta, USA drainage ditches [J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(1): 175 – 184.
- [24] Meuleman A F M, Beltman B. The use of vegetated ditches for water quality improvement[J]. *Hydrobiological*, 1993, (253): 375.
- [25] Woltemade C J. 恢复湿地可降低农业排水氮、磷浓度 [J]. *水土保持科技情报*, 2001, (5): 10 – 11 + 16.
- [26] 晏维金,尹澄清,孙 濮,等. 磷氮在水田湿地中的迁移转化及径流流失过程 [J]. *应用生态学报*, 1999, 10(3): 312 – 316.
- [27] 姜翠玲,范晓秋,章亦兵. 农田沟渠挺水植物对 N、P 的吸收及二次污染防治 [J]. *中国环境科学*, 2004, 24(6): 702 – 706.
- [28] 徐红灯,席北斗,王京刚,等. 水生植物对农田排水沟渠中氮、磷的截留效应 [J]. *环境科学研究*, 2007, 20(2): 84 – 88.
- [29] 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.
- [30] 王 岩,王建国,李 伟,等. 三种类型农田排水沟渠氮磷拦截效果比较 [J]. *土壤*, 2009, 41(6): 902 – 906.
- [31] 李强坤,胡亚伟,李怀恩. 农业非点源污染物在排水沟渠中的模拟与应用 [J]. *环境科学*, 2011, 32(5): 1273 – 1278.
- [32] 何明珠,夏体渊,李立池,等. 滇池流域农田生态沟渠杂草氮磷富集效应的研究 [J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2012, (4): 157 – 163.
- [33] 余红兵,肖润林,杨知建,等. 五种水生植物生物量及其对生态沟渠氮、磷吸收效果的研究 [J]. *核农学报*, 2012, 26(5): 798 – 802.
- [34] 彭世彰,高焕芝,张正良. 灌区沟塘湿地对稻田排水中氮磷的原位削减效果及机理研究 [J]. *水利学报*, 2010, 41(4): 406 – 411.
- [35] 何 军,崔远来,吕 露,等. 沟渠及塘堰湿地系统对稻田氮磷污染的去除 [J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(9): 1872 – 1879.
- [36] 吴 军,崔远来,赵树君,等. 沟塘湿地对农田面源污染的降解试验 [J]. *水电能源科学*, 2012, 30(10): 107 – 109 + 149.

(上接第 221 页)

- [2] Johnson R, Pankow J, Bender D, et al. MTBE – To what extent will past releases contaminate community water supply wells [J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, 34(9): 210A – 217A.
- [3] Prah J, Ashley D, Blount B, et al. Dermal, oral, and inhalation pharmacokinetics of methyl tertiary butyl ether (MTBE) in human volunteers [J]. *Toxicological Sciences*, 2004, 77(2): 195 – 205.
- [6] Francois A, Mathis H, Piveteau P, et al. Biodegradation of methyl tert – butyl ether and other fuel oxygenates by a new strain, *Mycobacterium austroafricanum* IFP 2012 [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, 68(6): 2754 – 2762.
- [7] Sutherland J, Adams C, Kekobad J. Treatment of MTBE by air stripping, carbon adsorption, and advanced oxidation: technical and economic comparison for five groundwaters [J]. *Water research*, 2004, 38(1): 193 – 205.
- [8] Wu T N. Electrochemical removal of MTBE from water using the iridium dioxide coated electrode [J]. *Separation and Purification Technology*, 2011, 79(2): 216 – 220.
- [9] Mohebbi S. Degradation of methyl t – butyl ether (MTBE) by photochemical process in nanocrystalline TiO₂ slurry: Mechanism, by – products and carbonate ion effect [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2013, 1(4): 1070 – 1078.
- [10] Huang K C, Couttentye R A, Hoag G E. Kinetics of heat – assisted persulfate oxidation of methyl tert – butyl ether (MTBE) [J]. *Chemosphere*, 2002, 49(4): 413 – 420.
- [11] 胡勤海,毛柯辉,朱妙军,等. O₃/H₂O₂ 法降解甲基叔丁基醚 (MTBE) 的试验研究 [J]. *环境科学*, 2008, 29(5): 1244 – 1248.