

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2016. 01. 028

现代农业灌溉减排模式的建立与应用

王羽辉^{1,2}, 谢三桃², 骆克斌^{2,3}, 闫志为¹, 余 婷²

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 安徽省水利水电勘测设计院, 安徽 合肥 230088;
3. 安徽省水资源利用与水环境保护工程技术研究中心, 安徽 合肥 230088)

摘要:基于我国现代农业的经济发展模式,参照国内外相关研究成果,分析了现代农业面源污染的产生原因及其特征。从“源头控制、过程拦截、末端处理、灌溉回用、分区治理”等角度,提出了现代农业灌溉减排模式(MARIM)的构建方法,并通过环巢湖西北角的东大圩现代农业示范区工程进行实例验证。结果表明:MARIM 模式可使上、中、下圩尾水中 TN、TP 的含量分别减少 88.2%、89.6%、80.6% 和 89.1%、88.4%、82.6%,对现代农业面源污染控制与农业尾水再生利用具有显著的效果。

关键词:现代农业面源污染;现代农业灌溉减排模式;生态拦截沟;灌溉回用

中图分类号:X506;S274.3 文献标志码:A 文章编号:1004 - 6933(2016)01 - 0161 - 06

Establishment and application of modern agricultural irrigation reduction model

WANG Yuhui^{1,2}, XIE Santao², LUO Kebin^{2,3}, YAN Zhiwei¹, YU Ting²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;
2. Anhui Survey and Design Institute of Water Conservancy and Hydropower, Hefei 230088, China;
3. Anhui Engineering Technology Research Center of Water Resources Utilization and Water Environmental Protection, Hefei 230088, China)

Abstract: Based on the development pattern of modern agriculture in China, referring to relevant research conclusions from home and abroad, the cause and characteristic of modern agricultural non-point source pollution are analyzed. From the angles of “controlling at source, intercepting at process, disposing at end, recycling for irrigation, partition management”, the construction method of modern agricultural irrigation reduction model (MARIM) is proposed. Moreover, an engineering example of Dongdawei modern agricultural demonstration zone around Chaohu Lake is observed to validating the system. The results indicate that the content of TN and TP in the tail water near top, middle and bottom of the dam is reduced by 88.2%, 89.6%, 80.6% and 88.2%, 88.4%, 82.6%, respectively, which is highly efficient in controlling modern agricultural non-point source pollution and reusing agriculture tail water.

Key words: modern agricultural non-point source pollution; modern agricultural irrigation reduction model; ecological ditch with interception function; irrigation reuse

21 世纪以来,随着农业规模化生产发展,农业面源污染已威胁着地球大部分地表水环境,引起了世界各国的普遍关注。20 世纪 90 年代,全球约 30% ~ 50% 的地表水受到农业面源污染的影响^[1]。而现代农业作为农业产业结构转型的一种新型模式,其面源污染具有复杂性、随机性、广泛性等特点,控制难度很大。近年来,我国多数地区农业种植正

由传统农业向现代农业模式转变,尤其是城乡结合区域及城市经济圈周边^[2]。以巢湖为例,截至 2013 年底,环湖周边累计退出传统种植面积 20 267.7 hm²,新增蔬菜瓜果面积 7 200.4 hm²、苗木花卉面积 1 733.4 hm²、生态林面积 11 333.9 hm²、水生蔬菜面积 2 733.5 hm²,据统计,若不采取有效面源污染防治措施,每年将新增 TN 190.9 t、TP 51.8 t 入湖污染负荷^[3]。

作者简介:王羽辉(1990—),男,硕士研究生,研究方向为水利与农业面源污染防治。E-mail:391516635@qq.com
通信作者:谢三桃,高级工程师。E-mail:416946371@qq.com

当前,我国农村部分地区改革处于一个混沌期,由于产业结构主体错位、经济利益不均衡、管理机制不到位等原因,农业产业结构在调整过程中,仍存在诸多方面的问题,其中现代农业面源污染问题尤为突出。多元化农业产业结构模式造成农田灌排水体系紊乱、污染物成分复杂、农业尾水污染无序排放等现象,导致周边河湖水环境日趋恶化。基于此,本文在分析我国现代农业面源污染形势下,探讨现代农业面源污染的构成及其特点,提出现代农业灌溉减排模式理论及其技术方法,以期为现代农业面源污染治理提供技术指导与参考。

1 现代农业面源污染特征及问题识别

1.1 现代农业面源污染的特点

现代农业面源污染是指在现代农业产业区内,不同农作物田间的颗粒、氮、磷、农药及其他有机或无机污染物质,畜禽粪便,水产养殖以及乡村生活与旅游污染源等,在降水或灌溉过程中,通过区域地表径流、农田排水或地下渗漏,大量污染物质进入水体,造成的地表水和地下水的污染^[4]。

一般研究认为,面源污染主要特征是以扩散的方式发生,时断时续,绝大部分与气象水文有关,在进入地表水之前,发生在大面积的土地上^[5]。通常情况下,污染源难以或无法跟踪,不能在发生之处进行监测,即面源具有发生时间、发生源、污染物浓度3个不确定因素^[6]。与点源污染相比,面源污染的时空范围更广,不确定性更大,污染成分与过程更复杂^[7]。

现代农业是一种集约化农业产业模式,其面源污染不仅具有传统农业面源污染典型特征,同时还有一些自身的特点,主要表现为^[8-10]:①由于现代农业种植结构的不同,面源污染时空分布不均匀;②由于产业结构的多元化,面源污染成分较为复杂;③受集约化和市场化的利益驱动,经济作物的化肥、农药过量使用,面源污染物质浓度超标严重。

1.2 现代农业面源污染防治问题识别

目前,针对现代农业面源污染的防治,国内外的系统研究较为缺乏。而对于传统农业面源的治理,相关学者开展了大量的研究工作,如:WRSIS 系统、“减源-拦截-修复”(3R)理论、“四道防线”工程体系等^[11-14],为现代农业面源污染控制提供一定的理论指导和技术支撑。但这些研究成果多是基于农业种植结构与污染类型相对单一的前提下进行探讨的,技术的应用推广存在一定的局限性,不完全适应于现代农业面源污染的治理。针对现代农业面源时空分布不均、污染成分复杂、污染负荷过大的自身特点,需结合前人的研究,对现代农业面源进行分类分

区,探索一套新型的现代农业面源污染防治系统。

2 现代农业灌溉减排模式

2.1 基本概念与内涵

现代农业面源污染控制是一项复杂的系统工程,基于国内外对农业面源污染控制的研究成果,针对我国现代农业产排污特点、工程技术条件及区域社会经济发展需求等,笔者提出一套“现代农业灌溉减排模式”(modern agricultural reduction irrigation model, MARIM),该模式是以“源头控制,过程拦截,末端处理,灌溉回用,分区治理”为指导思想,将区域不同种植与产业结构的单元排水,按照污染物类型进行分区收集,导入周边的生态沟,分别汇入末端人工湿地,经湿地净化、调蓄后,再用于农业灌溉。各单元分区系统相统一,形成完整的现代农业灌溉减排模式(图1)。

2.2 工作原理

MARIM 模式是在消化、吸收和改进 WRSIS 系统经验的基础上,提出的一套切合我国现代农业面源污染治理的应用方案和设计方法。该模式主要包括3个子系统,即生态拦截沟子系统、人工湿地子系统、调蓄-灌溉子系统。其工作原理如下。

a. 源头控制。现代农业面源污染产生的源头主要来源于农作物施用的化肥农药、畜禽粪便、水产养殖投放的饵料及乡村旅游与农村生活污水等。控源是现代农业面源污染治理的根本,主要的工程和非工程措施包括:①优化调整现代农业种植结构,测土配方,科学施肥,减少农药的施用,推行减氮、控磷、增钾、缓释肥等技术。在北方地区可采用“薄、浅、湿、晒”^[15]节水灌溉方式,减少灌溉尾水的排放;②集中畜禽养殖散户,分区形成规模化、无害化的养殖场,并对畜禽粪便进行合理化利用,为农作物提供有机肥。调整水产养殖结构,推行生态养鱼模式,减少饲料的投放;③加强乡村旅游产业的科学管理,建立游客服务中心,减少旅游产生的二次污染,对区域内农村居民点生活污水采取庭院式处理工艺进行分散处理,对固体废弃物进行收集、转运、集中处置等。

b. 过程拦截。针对随地表径流或灌溉尾水迁移的污染物质,利用生态拦截和原位净化的技术,消减污染物质的浓度或延长污染物质的迁移路径,从而实现污染物迁移与扩散量的最小化。主要是在现有的沟渠塘堰基础上,通过适当的工程措施,对田间草沟与灌/排水干沟进行生态化改造,形成两级生态拦截,并利用生态沟周边的塘堰对区间尾水进行原位生态净化处理,形成“长藤结瓜”的处理模式,达到面源污染迁移过程拦截的效果。

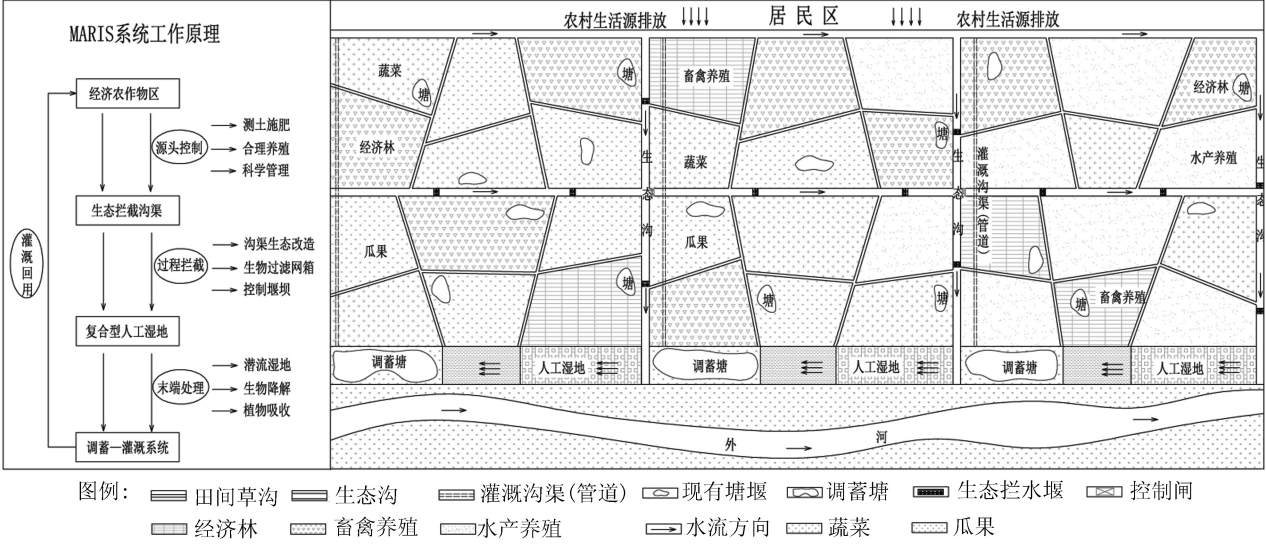


图1 现代农业灌溉减排模式工作原理

c. 末端处理。过程拦截环节对农业面源污染物去除能力有限,在此基础上,仍需对其尾水进行深度处理。通常情况下,可利用系统末端的低洼地构建复合型人工湿地,根据不同区块的面源污染特征,确定人工湿地的工艺与规模,将尾水引入人工湿地系统,通过湿地滤料和植物对污染物质进行吸收、降解,使现代农业尾水达标排放或再生利用。

d. 灌溉回用。经末端人工湿地净化处理后的出水水质基本达到地表Ⅳ类标准,符合一般农作物灌溉用水的要求。为有效利用区域水资源,减少对下游河湖水体污染负荷总量的贡献,需建立尾水灌溉回用系统。即在人工湿地出水处,构建生态调蓄塘,根据上下沟渠水系水位差,增设提升泵站,并结合现有的生态沟渠,形成灌排一体的循环体系。

e. 分区治理。系统建立过程中,结合当地农业种植结构,土地利用类型,灌排渠道分布等因素,在不破坏当地正常农业活动和尽量保证原有景观格局的基础上,进行合理规划分区,形成区域内闭合完整系统单元,以不同区域单元系统串联形成整体,以分区分块处理并联达到对区域农业面源污染的控制,区块系统看似相同却有所差异,可以针对小区域特点设置独立控制及管护,对污染严重区块系统中添加适当的工程控制措施,并设置水质或环境监测设备,对区块的处理效果研究分析。

3 MARIM 在现代农业示范区的应用

巢湖是我国水污染重点防治的“三河三湖”之一,根据巢湖周边地区气象、地形、农业灌排系统及种植结构等特点,选取合肥市东大圩现代农业示范区应用 MARIM 模式具有一定的示范作用。

东大圩位于合肥市包河区大圩镇东部,濒临巢

湖的西北岸,占地面积约 24 km²。区域属北亚热带季风湿润性气候,多年平均降雨量为 1 057. 2 mm,适于多种农作物生长发育。该地区属巢湖湖盆圩区,圩区内沟渠纵横,水网密布,水面率达 25. 8%,其中南北向灌排干沟 1 条,东西向灌排干沟 3 条,将东大圩分为上、中、下圩 3 个部分,田间毛细草沟众多。圩区地势平坦,总体呈现北高南低,东西高中间低,地面高程分布在 7. 0 ~ 9. 0 m 之间,示范区布局见图 2。

3.1 源头控制—优化种植结构

根据现代农业灌溉减排模式的设计理念,首先需进行源头控制,主要从优化产业结构、推行测土施肥及节水减排等方面,并以政府层面加大宣传力度,建立有效的奖惩机制。针对圩区上、中、下圩水系与地形的特点,在工程上示范区主要从调整圩区种植结构角度进行源头控制,对一些高污染、高消耗的经济作物种植结构进行调整(表 1)。根据《第一次全

表 1 示范区种植结构调整统计

分区	汇水面积/ km ²	各区主要产业结构面积/hm ²				
		大棚蔬菜	苗木园地	露地蔬菜	经果林	水产养殖
上圩	7. 4	224. 5	261. 8	119. 9	46. 2	27. 8
下圩	6. 7	148. 3	7. 8		520. 0	22. 5
中圩	6. 5	65. 3		44. 7	83. 0	

注:示范区内现有的沟塘湿地未列入本次调整范畴。

国污染源普查—农业污染源肥料流失系数手册》计算分析,示范区年农药使用量减少 10% ~ 15%,化肥使用量减少 15% ~ 20%。

3.2 生态拦截沟系统

秉着“因地制宜,生物降解”的设计理念,根据现场地形及沟塘水系分布情况,尽量保留田间毛细草沟,重点对排灌沟渠采取生态化改造,沟渠断面以维持现状为主,常水位以上的两侧边坡构建植被缓冲带,以下的部分可采用蜂窝状的预制块进行衬砌,

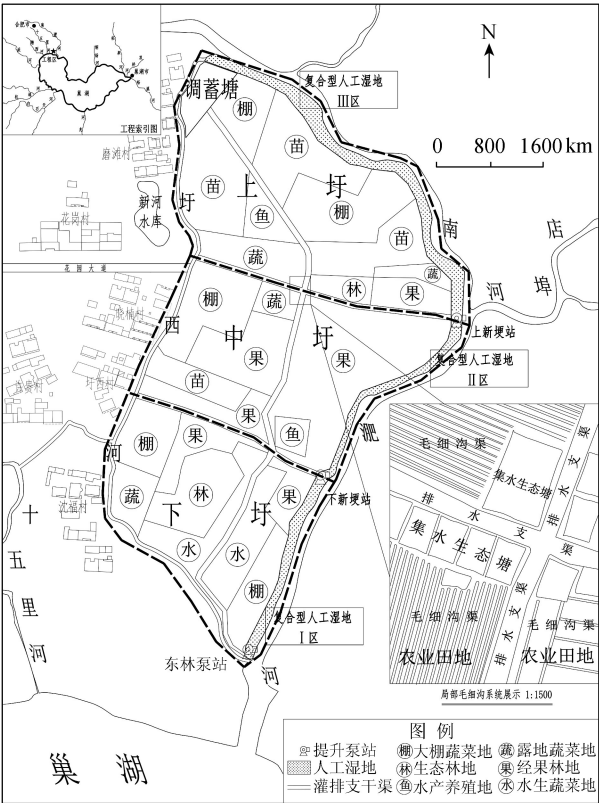


图2 东大圩现代农业灌溉减排系统平面布局

主要对坡面的污染物进行拦截。沿沟渠水流方向需设置一些生态拦水堰和拦截网箱^[16],一方面控制相邻区块的水位,另一方面可通过网箱内填料对水体中营养物质进行吸附。水面上以种植水生植物为主,栽种面积按水面的30%来控制,水面较为开阔的区域可构建一些生态浮床,水生植物主要选用一些容易成活、吸收能力强的土著物种。设计共对53.5 km长田间草沟进行清基清障,将南北中心沟、上新埂与下新埂排水沟长约14.8 km的沟渠按照骨干生态拦截沟进行改造,构建生态浮床6 300 m²,控制闸2座(主要控制上、中、下圩沟渠水位),生态网箱8座。

现代农业面源污染物浓度主要受经济作物施肥量及雨季降雨径流量的影响,试验对生态沟渠进行分段采样,进行水质分析。上、中、下圩雨季沟渠排水污染物参数值见表2。沟渠作为自然生态系统的一部分,本身具有土壤净化功能,沟渠中水生植物根系周围的微厌—好氧环境为反硝化脱氮提供必要

表2 上、中、下圩雨季沟渠排水污染物参数值

项目	上圩				中圩				下圩			
	平均值	最大值	最小值	标准差	平均值	最大值	最小值	标准差	平均值	最大值	最小值	标准差
NH ₃ -N	0.9	2.11	0.46	0.8	1.3	4.19	0.16	1.9	0.7	1.27	0.09	0.5
TN	6.4	10.6	1.24	3.8	6.8	11.52	2.49	4.1	3.6	7.05	1.26	2.5
TP	1.1	2.37	0.15	0.9	1.2	2.60	0.08	1.1	0.7	1.21	0.10	0.4

注:以上、中、下圩中心沟进行分段取样。

条件,有效削减了污染物质。经过改造的生态沟渠较传统沟渠,净化效果有明显提高,TN、NH₃-N和TP平均削减率分别为47%、35%和49%,沟渠出水水质明显好转,同时由于受降雨影响,不同的降雨强度及历时,径流污水浓度差异很大,对污染物去除效果也有一些差异。

3.3 人工湿地净化系统

人工湿地的规模与工艺主要由各农作物单元尾水排放量和污染物浓度决定。目前普遍使用“ $K_A-\rho^*$ ”模型^[17]来初步估算湿地面积,即

$$A = \frac{0.0365Q}{R} \ln \left(\frac{\rho_e - \rho^*}{\rho_i - \rho^*} \right)$$

式中,A为所需人工湿地面积, hm²; Q为污水流量, m³/d; ρ_e 为目标出水质量浓度, mg/L(地表Ⅴ类水质标准); ρ_i 为进水质量浓度, mg/L(生态拦截沟末端出水水质); ρ^* 为背景质量浓度值, mg/L(地表Ⅳ类水质标准); k为一级反应速率常数, m/a。

由于现代农业区排水受各种种植结构水肥管理方式、气象条件等因素影响,且排水产生具有随机性,因此按照现代农业灌溉排水标准采用“平均排除法”和“降雨—径流”相关关系法^[18]分别计算排水量,取两者中的较大值作为设计排水流量,以TN和TP作为水质控制指标。根据圩内各片区农作物种植结构、多年平均降雨径流量及污染物质浓度特征,并根据地形条件、拟选用湿地工艺及湿地运行管理费用等相关因素,综合确定人工湿地面积。通过理论计算并结合场地实际情况,上圩、中圩、下圩构建的“潜流+表流”复合型人工湿地实际面积分别为21.1 hm²、12.9 hm²、11.1 hm²,由于示范区现状用地受限,实际面积均比理论计算值小,中圩面积差值较为明显,计算分析结果见表3。表流湿地主要是利用南淝河右侧现有的塘洼湿地,对其进行功能化和生态化改造。

根据各片区农作物灌溉需求,结合表流湿地与圩内沟塘水系的调蓄容量及水力停留时间综合分析,各片区“调蓄—灌溉”子系统的调蓄塘容积可消化在这些水系中统筹调配,该子系统需新建提升泵站2座,灌溉渠道生态改造8.3 km,控制涵闸3座。

通过复合人工湿地对污染物进水和出水质量浓

表3 上、中、下圩复合型人工湿地规模计算分析

分区	指标	日均流量/ (m ³ · d ⁻¹)	设计进水 质量浓度/ (mg · L ⁻¹)	目标出水 质量浓度/ (mg · L ⁻¹)	背景值/ (mg · L ⁻¹)	速率常数/ (m · a ⁻¹)	水力负荷/ (m · d ⁻¹)	所需湿地 面积/hm ²	模型出水 质量浓度/ (mg · L ⁻¹)
上圩	TN	7532	9.4	7.5	1.5	35	0.35	2.13	6.09
	TP	7532	1.39	1.12	0.02	30	0.36	2.08	0.89
	TN	7532	6.09	2	1.5	30	0.04	20.31	1.55
	TP	7532	0.89	0.2	0.02	25	0.04	17.33	0.06
中圩	TN	6791	10.56	7.4	1.5	35	0.22	3.05	5.33
	TP	6791	2.14	1.5	0.02	30	0.23	2.98	1.05
	TN	6791	5.33	2	1.5	35	0.05	14.43	1.57
	TP	6791	1.05	0.2	0.02	30	0.03	14.42	0.05
下圩	TN	6589	5.63	4.5	1.5	35	0.3	2.19	3.68
	TP	6589	0.84	0.71	0.02	30	0.36	1.84	0.54
	TN	6589	3.68	2	1.5	30	0.06	11.82	1.61
	TP	6589	0.54	0.2	0.02	25	0.03	10.18	0.08

度(表4)监测显示,人工湿地净化系统对污染物质有一定的去除效果,上、中、下圩复合型人工湿地对于 TN、NH₃-N、TP 去除效率的范围分别在 57.7% ~ 76.3%、21.0% ~ 26.9%、19.4% ~ 37.3%。总体上来看,人工湿地对 TN 的去除效果明显,对 NH₃-N 的去除效果相对较差。就上、中、下圩复合型人工湿地净化效果横向比较来看,中圩对于污染物去除效果最低。分析认为,一方面中圩种植结构复杂,且经济作物使用率高,污染物排放浓度较其他两圩的大 1 ~ 2 倍;另一方面由于受用地面积的限制,中圩复合人工湿地净化系统的实际面积未达到计算的理论值,后期在工程优化过程中可对其工艺进行适当调整,提高湿地的脱氮除磷效果。由表 4 可以看出,下圩污染物浓度相对较低,主要是其种植结构比较简单,且多为生态林与藕塘,经湿地处理基本上能达到地表水Ⅳ标准。

3.4 MARIM 应用效果评价

根据水量平衡计算结果与实测进出口水水质指标,上中下圩各主要排水节点、生态沟、复合人工湿地和典型塘堰进出口处 TN、TP 指标值总量及净化效果如表 5 所示。

表 5 数据表明在东大圩现代农业示范区,生态拦截沟与复合型人工湿地对农作物尾水具有明显的净化效果,MARIM 模式使上、中、下圩尾水中 TN、TP 的含量分别减少 88.2%、89.6%、80.6% 和 89.1%、88.4%、82.6%。据统计,每年可消减入河 TN 和 TP 总量分别为 26.5t/a、3.1t/a。上、中圩与下圩处理效果产生差异的原因主要是由于各片区农作物种植结构不同。

相比较杨林章等^[10]结合太湖地区实际情况提出的生态拦截型沟渠系统,它主要由工程部分和植物部分组成,能减缓流速,促进流水携带颗粒物质的沉淀,有利于构建植物对沟壁、水体和沟底中逸出养分的立体式吸收和拦截,实现对农田排出养分的控制。沟渠系统对农田径流中 TN、TP 的去除效果分别达到 48.1% 和 40.2%。而 MARIM 模式在此基础上,增加了末端复合人工湿地子系统,将 TN、TP 的去除效果均提高 40% 以上,同时利用调蓄湿塘,进行灌溉回用,从而减少污染物对外河的排放。

4 结 语

随着我国社会主义新农村建设步伐的加快,农

表4 上、中、下圩复合型人工湿地净化效果及去除率

分区	进水质量浓度/(mg · L ⁻¹)			出水质量浓度/(mg · L ⁻¹)			去除率/%		
	TN	NH ₃ -N	TP	TN	NH ₃ -N	TP	TN	NH ₃ -N	TP
上圩	5.95	1.82	1.02	1.41	1.33	0.64	76.3	26.9	37.3
中圩	6.84	2.11	1.55	2.89	1.66	1.25	57.7	21.0	19.4
下圩	1.31	0.34	0.33	0.36	0.25	0.23	72.3	26.5	30.3

表5 MARIM 模式进出口 TN、TP 指标总量值及净化效果

分区	生态拦截型沟渠				复合型人工湿地				总去除率/%	
	进水口总量/(t·a ⁻¹)		出水口总量/(t·a ⁻¹)		进水口总量/(t·a ⁻¹)		出水口总量/(t·a ⁻¹)			
	TN	TP	TN	TP	TN	TP	TN	TP	TN	TP
上圩	13.87	2.27	9.61	1.65	9.61	1.65	1.63	0.25	88.2	89.1
中圩	14.36	3.12	9.95	2.26	9.95	2.26	1.49	0.36	89.6	88.4
下圩	2.65	0.65	1.84	0.47	1.84	0.47	0.51	0.11	80.6	82.6

村土地流转与农业集约化生产已成为农村改革的一个重大方向,而现代农业面源污染是导致城镇河湖水体富营养化最主要诱因之一,进行现代农业面源污染控制工程建设已经成为我国地表水环境保护工作的当务之急。根据现代农业面源污染的特点,提出以处理面源为主的脱氮除磷目标,构建了现代农业灌溉减排模式,通过产业结构调整与测土施肥等政府引导方式进行源头控制、过程削减的生态沟渠沿程净化,末端强化净化的复合人工湿地构建和尾水净化处理后灌溉回用,有效削减了排放到外河的污染负荷,污染物总去除率达到了 80% 以上,系统末端出水水质得到显著改善,基本达到地表水Ⅳ类标准。

MARIM 模式以“源头控制、过程拦截、末端处理、灌溉回用、分区治理”理论为指导,在综合利用国内外先进的农业面源污染控制技术的基础上,重点从现代农业面源的识别和归类出发,分区采取污染处理措施,并通过农业尾水净化处理后再生利用,最终实现现代农业生态系统的良性循环与健康发展,为区域社会经济可持续发展与生态环境改善提供资源保障。MARIM 模式实施后的维护管理非常关键,政府部门须主导建立相应的运管机制,确保系统的长效运行。

参考文献:

[1] NOVOTNY V. Diffuse pollution from agriculture a worldwide outlook [J]. Water Science and Technology, 1999, 39 (3): 1-13.

[2] 马成文,赵迎斌,张志平. 安徽省农业产业结构调整探讨[J]. 特区经济, 2006 (4): 192-194. (MA Chenwen, ZHAO Yinbin, ZHANG Zhiping. Consider on Anhui structure of agricultural production adjustment [J]. Special Zone Economy, 2006 (4): 192-194. (in Chinese))

[3] 金玥. 巢湖污染现状分析与整治研究[J]. 巢湖学院学报, 2013, 15 (1): 20-26. (JIN Yue. Analysis of pollution situation about Chaohu lake and management countermeasure [J]. Journal of Chaohu College, 2013, 15 (1): 20-26. (in Chinese))

[4] 唐浩,熊丽君,黄沈发,等. 农业面源污染防治研究现状与展望[J]. 环境科学与技术, 2011, 34 (12): 107-112. (TANG Hao, XIONG Lijun, HUANG Shenfa, et al. Review on the characteristics and control measurements of agricultural non-point source pollution [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34 (12): 107-112. (in Chinese))

[5] 李其林,魏朝富,王显军,等. 农业面源污染发生条件与污染机理[J]. 土壤通报, 2008, 39 (1): 169-176. (LI Qilin, WEI Zhaofu, WANG Xianjun, et al. Mechanism

and condition of agricultural non-point source pollution [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39 (1): 169-176. (in Chinese))

[6] US Environmental Protection Agency. Non-Point Source Pollution from Agriculture. [EB/OL]. [2015-02-22]. <http://www.epa.gov/region8/water/nps/npsurb.html>.

[7] 宋涛,成杰民,李彦,等. 农业面源污染防治研究进展[J]. 环境科学与管理, 2010, 35 (2): 39-42. (SONG Tao, CHENG Jiemin, LI Yan, et al. The research of agricultural non-point source pollution [J]. Environmental Science and Management, 2010, 35 (2): 39-42. (in Chinese))

[8] 柴世伟,裴晓梅,张亚雷,等. 农业面源污染及其控制技术研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20 (6): 192-195. (CAI Shiwei, PEI Xiaomei, ZHANG Yalei, et al. Research on agricultural diffuse pollution and controlling technology [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20 (6): 192-195. (in Chinese))

[9] RITA C, JITENDRA S, SAMIRA J. Agriculture non-point source pollution control good management practices chesapeake bay experience [M]. Washington D C: Environmentally & Socially Development Unit, Europe and Central Asia, The World Bank, 2002.

[10] 杨林章,冯彦房,施卫明,等. 我国农业面源污染治理技术研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21 (1): 96-101. (YANG Linzhang, FENG Yanfang, SHI Weiming, et al. Review of the advances and development trends in agricultural non-point source pollution control in China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21 (1): 96-101. (in Chinese))

[11] 李玲君,李琳娜,邵孝侯,等. 湿地-水塘-地下灌排改进系统的效应[J]. 水资源保护, 2012, 28 (3): 75-78. (LI Lingjun, LI Linna, SHAO Xiaohou, et al. Effects of improved wetland reservoir sub-irrigation system [J]. Water Resources Protection, 2012, 28 (3): 75-78. (in Chinese))

[12] 艳红,山广茂. 稻田退水污染处理方法初探: WRSIS 技术引进与改良[J]. 长春大学学报, 2012, 22 (3): 698-700. (YAN Hong, SHAN Guangmao. Preliminary study on pollution treatment of drainage water in paddy field: a discussion on the introduced and refined WRSIS [J]. Journal of Changchun University, 2012, 22 (3): 698-700. (in Chinese))

[13] 吴永红,胡正义,杨林章. 农业面源污染控制工程的“减源-拦截-修复”(3R) 理论与实践[J]. 农业工程学报, 2011, 27 (5): 1-6. (WU Yonghong, HU Zhengyi, YANG Linzhang. Strategies for controlling agricultural non-point source pollution: reduce-retain-restoration (3R) theory and its practice [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27 (5): 1-6. (in Chinese))

(FAN Yinqin, CAI Huanjie. A comparative study on crop water requirement calculation of single crop coefficient method and the dual crop coefficient approach[J]. Journal of Water Resources, 2002(3):50-54. (in Chinese))

[9] 李润杰,孙海兵,冯玲正,等.柴达木盆地节水农业体系建设探讨[J]. 节水灌溉, 2005(2):38-40. (LI Runjie, SUN Haibing, FENG Lingzheng, et al. Discussion on the construction of water-saving agriculture system in Qaidam Basin[J]. Water Saving Irrigation, 2005(2):38-40. (in Chinese))

[10] 鹿强,周和平.干旱区农业灌溉用水定额研究[J]. 中国

水利, 2011(21):45-46. (LU Qiang, ZHOU Heping. Research of agricultural irrigation water quota in arid zone [J]. China Water Conservancy, 2011(21):45-46. (in Chinese))

[11] 李海霞,包淑萍,马如国,等.宁夏清水河扬水灌区灌溉回归水初步分析[J]. 宁夏工程技术, 2007,6(2):104-107. (LI Haixia, BAO Shuping, MA Ruguo, et al. Preliminary analysis of return-water in Ningxia Qingshui River pumping irrigation [J]. Ningxia Engineering Technology, 2007,6(2):104-107. (in Chinese))

(收稿日期:2015-04-07 编辑:徐 娟)

(上接第 119 页)

[35] RODRIGUEZ-RODRIGUEZ C E, BARON E, GAGO-FERRERO P, et al. Removal of pharmaceuticals, polybrominated flame retardants and UV-filters from sludge by the fungus *Trametes versicolor* in bioslurry reactor [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 233: 235-243.

[36] LIU Y S, YING G G, SHAREEF A, et al. Biodegradation of the ultraviolet filter benzophenone-3 under different redox conditions [J]. Environmental Toxicology and Chemistry/SETAC, 2012, 31(2):289-295.

[37] GAGO-FERRERO P, BADIA-FABREGAT M, OLIVARES A, et al. Evaluation of fungal-and photo-degradation as potential treatments for the removal of sunscreens BP3 and BP1 [J]. The Science of the Total Environment, 2012, 427/428:355-363.

[38] NGUYEN L N, HAI F I, YANG S, et al. Removal of pharmaceuticals, steroid hormones, phytoestrogens, UV-filters, industrial chemicals and pesticides by *Trametes versicolor*: role of biosorption and biodegradation [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2014, 88: 169-175.

[39] CHEN X, DENG H. Removal of ultraviolet filter from water by electro-ultrafiltration [J]. Desalination, 2013, 311:211-220.

[40] PHAN H V, HAI F I, KANG J, et al. Simultaneous nitrification/denitrification and trace organic contaminant (TrOC) removal by an anoxic-aerobic membrane bioreactor (MBR) [J]. Bioresour Technol, 2014, 165:96-104.

(收稿日期:2015-04-24 编辑:徐 娟)

(上接第 166 页)

[14] 董斌,茆智,李新建,等.灌溉-排水-湿地综合管理系统的引进和改造应用[J]. 中国农村水利水电, 2009(11):9-12. (DONG Bin, MAO Zhi, LI Xinjian, et al. Introduction, adaptation and application of wetland-reservoir-subirrigation-system in rice-based irrigation systems of South China [J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(11):9-12. (in Chinese))

[15] 覃万国. “薄、浅、湿、晒”灌溉技术对杂交水稻的增产效果[J]. 中国农村水利水电, 1996(11):17-18. (QIN Wanguo. Yield increasing effect of hybrid rice from “Thin-Shallow-Wet-Dry” Irrigation [J]. China Rural Water and Hydropower, 1996(11):17-18. (in Chinese))

[16] 李丹,詹红丽,郭富庆. WRSIS 系统的初步改进设计及

试验效果分析[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(5):120-123. (LI Dan, ZHAN Hongli, GUO Fuqing. Preliminary improved design and experiment on WRSIS [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(5):120-123. (in Chinese))

[17] 赵荣,陈东宇,周少奇,等. k-C* 模型的人工湿地模拟研究[J]. 环境工程学报, 2012, 6(1):163-167. (ZHAO Rong, CHEN Dongyu, ZHOU Shaoqi, et al. Modeling of k-C* model for constructed wetland [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(1):163-167. (in Chinese))

[18] 郭元裕. 农田水力学[M]. 3 版. 北京:中国水利水电出版社, 1997.

(收稿日期:2015-06-17 编辑:徐 娟)