

# 基于 QUAL2K 模型的农田排水沟 水质模拟研究

洪建权<sup>1</sup>, 马 勇<sup>2</sup>, 丁世洪<sup>2</sup>, 邹家荣<sup>1</sup>, 贺园春<sup>1</sup>, 罗 纨<sup>1</sup>

(1. 扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 2. 扬州市江都区昭关灌区管理处, 江苏 扬州 225261)

**摘要:**水质模型是研究农业非点源污染、进行水质评价及预测的重要手段。根据实地调查与监测数据,利用 QUAL2K 模型模拟了农田排水沟塘对于排水中氨氮、总磷 2 种污染物的去除情况。QUAL2K 模型可用于农田排水沟水质变化过程的模拟预测,为优化排水沟塘系统的污染物去除能力提供理论依据。

**关键词:**QUAL2K 模型;水质模拟;农田排水;水质净化

中图分类号:S276 文献标识码:B 文章编号:1007-7839(2020)04-0015-05

## Study on water quality simulation of farmland drainage ditches based on QUAL2K model

HONG Jianquan<sup>1</sup>, MA Yong<sup>2</sup>, DING Shihong<sup>2</sup>, ZOU Jiarong<sup>1</sup>, HE Yuanchun<sup>1</sup>, LUO Wan<sup>1</sup>

(1. College of Hydraulic Science Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu;  
2. Administrative Office of Yanyun Irrigation Area in Jiangdu District, Yangzhou 225261, Jiangsu)

**Abstract:** Water quality model is an important method to study agricultural non-point source pollution, evaluate and predict water quality. According to the field investigation and monitoring data, QUAL2K model was used to simulate the removal of ammonium nitrogen and total phosphorus in the drainage of farmland drainage ditches and ponds. QUAL2K model could be used to simulate and predict the water quality change process of farmland drainage ditches and provide theoretical basis for optimizing the pollutant removal capacity of drainage ditch and pond system.

**Key words:** QUAL2K model; water quality simulation; farmland drainage; water purification

随着经济水平的提高,农业生产过程中对化肥农药的使用量增加,农田排水造成的水体污染,水环境恶化等问题也日益突出。此类农业非点源污染一般是在降雨、灌溉过程中,随地表、地下径流进入农田排水系统。从土壤中淋洗出来的化肥、农药等污染物直接排入接纳水体,会导致接纳水体污染物超标、水体富营养化等一系列水环境问题,是目前农业水环境治理问题的瓶颈。农业排水沟塘系统作为一种连接农田与接纳水体的天然缓冲带,具

有类似于湿地的功能,可去除农田排水中的化肥、农药等营养物质,是最直接的污染物净化场所,也是农业生产中不可替代的生态资源<sup>[1]</sup>。

研究发现,沟塘湿地系统对污染物的去除效果与其在田间复杂的分布以及与农田的水力联系密切相关<sup>[2]</sup>。除了现场观测试验以外,现有研究中较多采用河流水质模型预测方式来分析农田排水沟中污染物浓度沿程变化情况,以及沟塘系统对水质净化的效果。河流水质模型描述河流污染物的迁

收稿日期:2019-12-23

基金项目:江苏省水利科技项目(2017052,2018052)

作者简介:洪建权(1996—),男,硕士研究生,主要从事农业水资源管理与环境保护研究工作。E-mail:hjq775852123@

移和转化过程及其它们之间的复杂联系<sup>[3]</sup>,可以预测河流水质的变化情况,研究水体的污染自净能力以及排污的情况等<sup>[4]</sup>。相关水质模型包括 QUAL2K 模型、Streeter - Phelps 模型、WASP 模型、QUASAR 模型和 MIKE 模型等。其中,由美国国家环保局推出的 QUAL2K 河流水质模型是目前应用最为广泛,综合性较强的模型之一<sup>[5]</sup>,能够全面准确地模拟污染物在不同水体中的降解过程。QUAL2K 模型在中国用于水质分析的研究仍处于初期阶段,部分学者将其用于模拟一维、稳态的中小型河流水质变化<sup>[6]</sup>。如郭永彬等<sup>[7]</sup>利用 QUAL2K 模型,探讨了汉江中下游的水质变化的趋势,并对比 QUAL2K 模型和 QUAL2E 模型模拟结果的差异;结果发现 QUAL2K 模型比 QUAL2E 模型模拟的精度要高。方晓波等<sup>[8]</sup>利用 QUAL2K 模型和一维水质模型模拟了 2009 年钱塘江流域的水质情况,利用 TMDL 管理模型,对典型河段的 COD、NH<sub>3</sub>-N 和 BOD 负荷的减少和分布进行研究,为流域总量的控制提供理论依据。杨乐等<sup>[9]</sup>根据秦淮河水情水质特点,选取 DO、NH<sub>3</sub>-N、COD 作为控制因子,利用 QUAL2K 模型构建了秦淮河水质优化管理模型,验证了模型适用于秦淮河水质优化管理。

农田沟塘排水系统类似于河道水流汇集系统,但现有研究中对此类水系水质的变化过程研究相对较少。因此,本文以江苏省扬州市江都区京杭大运河东侧的昭关灌区一个农田排水沟塘系统为研究对象,选取氨氮、总磷为控制因子,运用 QUAL2K 模型模拟分析了污染物在农田排水沟塘水系内沿程的变化情况,在检验模型适用性的基础上,探讨了优化排水沟塘系统的污染物去除能力。研究结果可为类似农田沟塘系统污染物治理提供借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 QUAL2K 模型介绍

QUAL2K 模型是美国国家环保局 (U. S. EPA) 推出的一个一维的稳态综合性河流水质模型。模型适用于枝状复杂河流网路,允许沿河有多个排污口、取水口、支流分析入流点、面源负荷对受纳水体水质的影响。QUAL2K 模型的基本方程是一维平流-扩散物质迁移方程,该方程考虑了平流弥散、稀释、水质组分自身反应、水质组分间的相互作用以及组分的外部源和汇对组分浓度的影响<sup>[10]</sup>。对于任意一种水质组分都可以按如下方程进行计算<sup>[11]</sup>,方程如下:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial \left( AD_L \frac{\partial C}{\partial x} \right)}{A \partial x} - \frac{\partial (AUC)}{A \partial x} + \frac{dC}{dt} + \frac{S}{V} \quad (1)$$

式中:  $C$  为污染物浓度, mg/L;  $t$  为时间, d;  $A$  为断面面积, m<sup>2</sup>;  $D_L$  为河流纵向弥散系数, m<sup>2</sup>/d;  $X$  为河流纵向坐标, m;  $U$  为河流平均流速, m/s;  $S$  为组分外部的源和汇, mg/L;  $V$  为计算单元体积, m<sup>3</sup>。方程等式右侧的 4 项分别代表弥散、平流、水质组分反应、水质组分的源和汇<sup>[12]</sup>。

### 1.2 研究区概况

研究区位于江苏省扬州市江都区内京杭大运河东侧的昭关灌区 (119°25'E、32°22'N), 研究区地势平坦, 属于典型的南方平原河网地区; 年平均温度 14.9℃, 年降水量约 1 000 mm; 研究区内普遍实行稻麦轮作。图 1 显示了研究区主要排水分布区域的农田与沟塘的分布及水力联系, 图 2 概化了该排水区域的沟塘与农田水力联系及水流方向网络图。本文研究的排水区域包含 14 个单元, 包括 9 条农沟、4 条支沟和 1 个池塘, 占沟塘面积的比例为 46.8%, 占农田面积的比例为 6.7%。根据 QUAL2K 模型原理, 本文计算中做了如下概化:



图 1 研究区主要沟塘排水系统分布以及排水分区情况

根据水质模拟需要, 对该区农田排水沟流网进行概化并划分其河段及计算单元。模型的概化工作, 首先将排水沟划分成一系列恒定非均匀流河段, 然后再将每个河段划分成若干个等长的计算单元。河段的划分原则如下: 同一河段具有相同的水力、水质特性和参数, 各河段间的水力、水质参数各不相同。其中, 计算单元是 QUAL2K 模型进行水质计算的最小单元, 模型要求各个河段上的计算单元是等长的<sup>[13]</sup>。

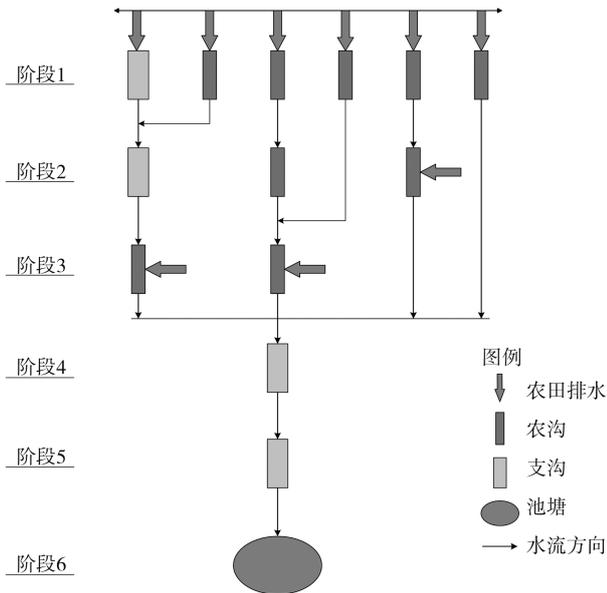


图2 研究区主要沟塘系统与农田水力联系及水流方向网络图

根据图 1、图 2 所显示的研究区主要沟塘分布及排水分区情况, 并且区内排水基本上集中在此, 所以选择区内主要排水区域作为模型模拟区域。该排水区域主干段全长 500 m, 分为 5 段; 其中 2 条支流汇入, 分别划分为 3 个河段和 2 个河段, 分别为 300 m 和 200 m, 共划分 10 个河段。由于农田排水沟排水距离短, 排水范围小, 故每个河段设置 2 个计算单元; 另外还有 3 处点源汇入。研究区主要排水区域河段划分及污染源汇入示意图, 见图 3。

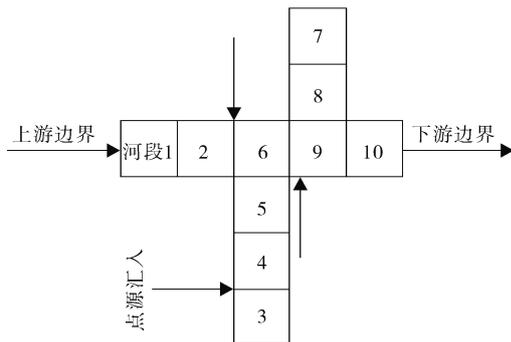


图3 研究区主要排水区域河段划分及污染源汇入示意

### 1.3 QUAL2K 模型参数率定

模型参数的确定是建模工作的核心内容, 可靠的参数是模拟结果成败的关键。本研究涉及的主要参数为水力参数和水质参数, 包括排水沟平均氮磷浓度、平均气象数据以及排水沟的平均入流流量等监测值, 其他参数均采用模型推荐值。本文选定 2017 年稻作期间水质监测数据平均值为模型率定期, 2018 年稻作期间水质监测数据平均值为模型验证期, 经过多次模拟调试, 确定最终的参数值 (表 1

~2)。

主要水质参数包括有机氮水解系数  $k_{ln}$ 、氨氮硝化系数  $k_{na}$ 、有机磷水解系数  $k_{lp}$  等。基于文献报道的参数适宜取值区间<sup>[14]</sup>, 对参数进行合理调试, 直至得到满意的拟合结果。率定后得到的主要水质参数, 见表 1。

表 1 QUAL2K 模型水质参数率定结果

指标	参数	单位	符号	取值	取值范围
有机氮	水解系数	1/d	$k_{ln}$	0.1	0 ~ 5
有机氮	沉降系数	m/d	$v_{on}$	1	0 ~ 2
氨氮	硝化系数	1/d	$k_{na}$	0.3	0 ~ 10
有机磷	水解系数	1/d	$k_{lp}$	0.3	0 ~ 5
有机磷	沉降系数	m/d	$v_{op}$	0.8	0 ~ 2

QUAL2K 模型提供了 3 种方法来计算各河段水力学特征, 分别是溢流堰法、流量系数法和曼宁系数法。本研究采用的是曼宁系数法, 根据相关资料得到人工混凝土衬砌河道取值 0.02; 对于天然河道, 模型推荐取值 0.04, 故研究区排水支沟取值 0.04。主要水力学特征参数如表 2 所示。

表 2 QUAL2K 模型水力参数

河段	曼宁系数	河床底宽/ m	河床比降	边坡坡度/ (°)
排水农沟	0.02	0.4	0.001	1.67
排水支沟	0.04	8	0.001	0

## 2 结果与讨论

### 2.1 2018 年稻作期间农田排水沟系统污染物氨氮浓度实测值与模拟值对比

稻作期间农田排水沟系统污染物氨氮浓度实测值与模拟值, 见图 4, 由图可见, 研究区 6 个监测点, 从左至右依次标为 G1、G2、G3、G4、G5、G6。监测点 G2、G3、G4、G5、G6 的氨氮模拟值分别为 340、520、610、288、221  $\mu\text{g/L}$ , 与相对应实测值为 395、813、867、101、253  $\mu\text{g/L}$ , 除去 G5 监测点, 平均相对误差为 23.06%。因此利用 QUAL2K 模型能较好反映出该研究区排水沟系统氨氮沿程的变化情况。

从初始上游边界到下游边界氨氮质量浓度呈现先缓慢下降再急剧上升最后再持续下降的趋势。一开始由于排水沟的自净作用加上没有点源与支

流的汇入,氨氮质量浓度缓慢下降,而后随着点源与支流1的汇入氨氮质量浓度很快上升的最大,说明支流1汇入的水质较差;之后降低说明农田排水沟对污染物有一定的净化作用,且净化作用大于支流2的汇入,也说明支流2汇入的水质较支流1汇入的水质状况较好。经计算,实测值与模拟值对氨氮质量浓度的去除率分别为49.4%和55.8%。

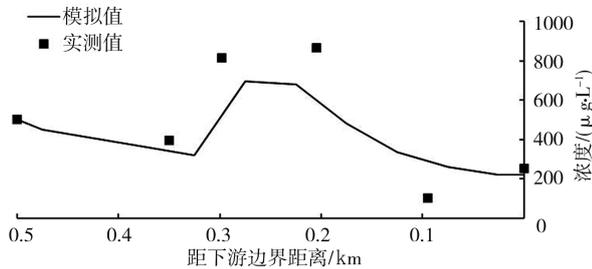


图4 研究区排水沟氨氮模拟结果

## 2.2 2018年稻作期间农田排水沟系统污染物总磷浓度实测值与模拟值对比

稻作期间农田排水沟系统污染物总磷质量浓度实测值与模拟值,见图5,由图可知,研究区5个监测点G2、G3、G4、G5、G6的总磷质量浓度模拟值分别为235、209、255、247、148.5  $\mu\text{g/L}$ ,与相对应实测值221、197、269、287、146  $\mu\text{g/L}$ 的相对误差保持在15%以内,平均相对误差为6.66%。因此QUAL2K模型具有较好的模拟精度,且模拟精度要高于氨氮,能准确的反映出该研究区排水沟系统总磷沿程的变化情况。

从初始上游边界到下游边界总磷质量浓度总体呈现上下波动态势。造成上述变化的主要原因是由于沿程点源与支流的汇入,一开始总磷质量浓度上升缓慢,基本保持不变,而后随着沿程有段下降的趋势。接着由于支流1的汇入,造成总磷的质量浓度上升到最高值,说明支流1汇入的水质很差,远超过了排水沟本身的自净作用。而后随着沿程的距离下降到最低,说明支流2汇入的稀释作用,对排水沟水质有所改善。经计算,实测值与模拟值对总磷的去除率分别为27%和25.8%。

## 2.3 农田排水沟塘系统污染物去除效果模拟综合评价

取6个监测点的实测值与模拟值进行排水沟塘系统污染物去除效果模拟评价,采用相关系数 $R^2$ 和Nash-Sutcliffe系数NSE作为水质模拟精度评价指标,Nash-Sutcliffe系数一般用以验证水文模型模拟结果的好坏。一般来说,对于 $R^2$ 和NSE大于等于0.50即认为结果是可接受的,其值越接近1,则

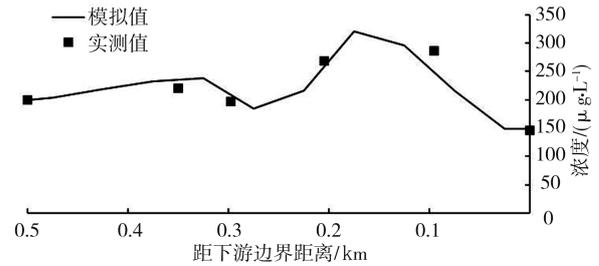


图5 研究区排水沟总磷模拟结果

模型可信度越高<sup>[15]</sup>。从表3整体来看,模拟值与实测值之间的相关系数 $R^2$ 都在90%以上。模型验证期 $R^2$ 和NSE值都大于0.5, $R^2$ 值在0.9以上,NSE值在0.5以上,模拟值和实测值拟合程度较好,表明模型能够较好地模拟农田排水沟污染物氨氮及总磷在沟内的迁移转化过程,对于优化分析排水沟水质净化能力具有一定的指导意义。

表3 氨氮、总磷模拟精度评价结果

时期	$R^2$		NSE值	
	氨氮	总磷	氨氮	总磷
率定期	0.90	0.91	0.42	
验证期	0.91	0.94	0.59	0.84

## 3 结论

本文以江都某一研究区为例,建立了农田排水沟的QUAL2K水质模型,对排水沟氨氮、总磷2种污染物水质指标进行模拟验证,结果表明:

1)农田排水沟主干段6个监测点的水质指标模拟,除去个别监测点,平均相对误差均在25%左右,采用相关系数 $R^2$ 和Nash-Sutcliffe系数NSE进行模拟评价,两者值都大于0.5,模拟值与实测值相关性较好,能够达到模型精度的要求。

2)对农田排水沟污染物水质指标模拟精度总磷要高于氨氮,农田排水沟对2种氮磷污染物的去除率在25%~60%之间不等。

3)通过QUAL2K模型模拟农田排水沟塘系统氮磷污染物随排水沟沿程变化规律,能够较好地对比农田排水沟进行水质模拟预测。

## 参考文献:

- [1] 贾忠华,陈诚,罗纨,等. 农业排水沟塘系统污染物去除监测区代表性分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3):110-117.
- [2] 罗纨,朱金城,贾忠华,等. 排水沟塘分布特性及与

- 农田水力联系对水质净化能力的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10):161-167.
- [3] 汪家权, 陈众, 武君. 河流水质模型及其发展趋势[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2004(6): 242-247.
- [4] 戴凌全, 李华, 陈小燕. QUAL2K 模型及其主要参数确定[J]. 灾害与防治工程, 2009, 67(2):69-74.
- [5] 张丽, 吴金亮, 杨国范, 等. QUAL2K 模型在苏子河水质模拟中的应用[J]. 人民黄河, 2013, 35(12):83-85.
- [6] 周华. 河流综合水质模型 QUAL2K 应用研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2010, 8(1):71-75.
- [7] 郭永彬, 王焰新. 汉江中下游水质模拟与预测—QUAL2K 模型的应用[J]. 安全与环境工程, 2003, 10(1):4-7.
- [8] 方晓波. 钱塘江流域水环境承载能力研究[D]. 杭州:浙江大学, 2009.
- [9] 杨乐, 钱钧, 吴玉柏, 等. 基于 QUAL2K 模型的秦淮河水水质优化方案[J]. 水资源保护, 2013, 29(3):51-55.
- [10] 周小珍. 河流综合水质模型 QUAL2K 的应用综述[J]. 黑龙江生态工程职业学院学报, 2019, 32(4): 22-24.
- [11] 唐伟. 基于 QUAL2K 模型的水质模拟研究—以武进港小流域为例[D]. 南京:南京大学, 2011.
- [12] 翟敏婷, 辛卓航, 韩建旭, 等. 河流水质模拟及污染源归因分析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(8):3457-3464.
- [13] 杨海林, 杨顺生. 河流综合水质模型 QUAL2E 在河流水质模拟中的应用[J]. 云南环境科学, 2003, 22(2):22-25.
- [14] 赵琰鑫, 陈岩, 吴悦颖. QUAL2K 河流水质模拟模型理论方法与应用指南[M]. 北京:气象出版社, 2015.
- [15] 耿润哲, 王晓燕, 庞树江, 等. 潮河流域非点源污染控制关键因子识别及分区[J]. 中国环境科学, 2016, 36(4):1258-1267.