

# 农业非点源污染物在排水沟渠中的模拟与应用

李强坤<sup>1,2</sup>, 胡亚伟<sup>1</sup>, 李怀恩<sup>3</sup>

(1. 黄河水利科学研究院, 郑州 450003; 2. 水利部黄河泥沙重点实验室, 郑州 450003; 3. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

**摘要:**排水沟渠系统是农业非点源污染田间产污和外界受纳水体之间的过渡带. 通过对排水沟渠系统不同级别排水沟渠间递推关系以及农田排水和非点源污染物在其中迁移转化过程的分析, 应用水动力学基本方程和污染物迁移转化方程, 构建了农田排水及其中非点源污染物在排水沟渠中的一维迁移模型, 并对模型求解进行了探讨; 在此基础上, 以黄河上游青铜峡灌区第一排水沟渠系统为例, 结合具体情况, 通过对研究区初步概化, 进行了模型示例运用. 通过对模型计算结果的合理性分析, 排水沟渠系统逐日排水量模拟结果与实测数据结合较好, Nash-Sutcliffe 模拟效率系数达到 0.82, 其中典型污染物浓度过程也较为合理, 表明所建农业非点源污染物排水沟渠模型具有较好的应用效果.

**关键词:**农业非点源污染; 排水沟渠; 数学模型

中图分类号: X592 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)05-1273-06

## Simulation and Application of the Agricultural Non-point Source Pollutants in Drainage Ditch

LI Qiang-kun<sup>1,2</sup>, HU Ya-wei<sup>1</sup>, LI Huai-en<sup>3</sup>

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China; 2. Key Laboratory of the Yellow River Sediment of Ministry of Water Resource, Zhengzhou 450003, China; 3. Institute of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Drainage ditch system is the transitional zone between yield in the field and receiving waters for agricultural non-point source pollutants. Based on the brief analysis of the migration and transformation process of agricultural non-point source pollutants in drainage ditch system, the one-dimensional transport model of agricultural non-point source pollutants in drainage ditch system was constructed on the basis of the equation of continuity of flow and pollutants migration transform. Taking the Di Yi drainage ditch system, in the Qing-Tong-Xia irrigation district at the Yellow River upstream, as an example, combining with actual situation, the drainage discharge and concentration of nitrate nitrogen and total phosphorus were simulated by this model. The results show that the simulated drainage discharge accords with measured data approximately and Nash-Sutcliffe coefficient is 0.82, the simulated concentration of nitrate nitrogen and total phosphorus in farmland drainage was reasonable.

**Key words:** agricultural non-point source pollution; drainage ditch; mathematical model

近年来,随着水环境问题的突出以及点源污染治理水平的相对提高,非点源污染尤其是化肥、农药的大量使用而引起的农业非点源污染问题日益引起人们的关注和重视<sup>[1-3]</sup>. 农业非点源污染是指农业生产活动中,在灌溉水(降水)的动力作用下,各种污染物(营养物、农药、病菌等)通过农田地表径流、农田排水和地下渗漏等,以低浓度、大范围的形式从土壤圈向水圈扩散的过程. 由于形成机制复杂,影响因素众多,农业非点源污染的监测、控制和管理都十分困难<sup>[4]</sup>. 根据农业非点源污染的产移特点,可将其整个过程划分为田间产污的“源”环节和通过排水沟渠向外界水体输送的“汇”环节<sup>[5]</sup>. 排水沟渠是农田非点源污染物田间产出和受纳水体(湖泊、江河)间的过渡带,污染物在其中的迁移转化对控制其最终输出负荷有非常重要的作用<sup>[6-8]</sup>. 因此,结合

排水沟渠系统中水生植物、沟渠湿地、缓冲带等生态工程技术运用,对农业非点源污染物进行截留和去除已成为当前农业非点源污染控制的一项主要措施<sup>[9-11]</sup>.

在对农业非点源污染田间模型构建与应用以及灌区主要农业非点源污染物迁移特征分析的基础上<sup>[12,13]</sup>,本研究以农业非点源污染物在排水沟渠中的模拟为重点,在构建排水沟渠中农业非点源污染物迁移方程的同时,并结合宁夏青铜峡灌区第一排

收稿日期: 2010-05-23; 修订日期: 2010-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(50879027); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07212-004-01-7); 黄河水利科学研究院科研院所专项基金项目(HKY-JBYW-2009-13); 水利部黄河泥沙重点实验室开放基金项目(2009004)

作者简介: 李强坤(1968~),男,博士,高级工程师,主要研究方向为生态水文与环境水文、农业水土环境等, E-mail: liqiangk@126.com

水沟沟渠系统进行了示例应用,以期为进一步的农业非点源污染负荷量化研究及控制提供依据。

## 1 排水沟渠中水污运移过程

### 1.1 不同级别排水沟渠中运移

农业排水沟渠是农田灌溉工程的重要组成部分,它不仅是农田灌溉(降雨径流)退水的主要输送通道,同时也是农业非点源污染物迁移的廊道<sup>[14-16]</sup>。农业非点源污染物在地表径流和土壤水动力作用下,以“面源”方式从田间流失或渗漏产出后,首先在田间农(毛)沟中积聚并沿程汇集,之后在农田排水动力作用下,经支沟、干沟或总干沟排入外界大面积水体。田间农(毛)沟末端可以看作是农业非点源污染“源”、“汇”环节的分界点,也是农业非点源污染物在排水沟渠中运移的起点。

农业非点源污染物这一逐级排放过程可概化为图 1。

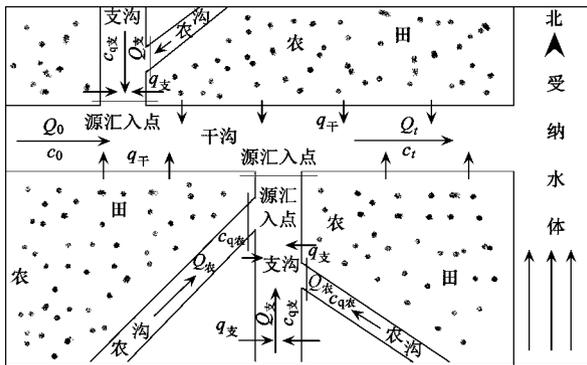


图 1 逐级排水沟渠模拟概化示意

Fig. 1 Simulating diagram of different grade drainage ditch

图 1 中,  $Q_{农}$ 、 $Q_{支}$  分别表示由农沟、支沟进入下一级排水沟的水量 ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ),  $c_{q农}$ 、 $c_{q支}$  分别表示由农沟、支沟进入下一级排水沟水量中所含某类污染物的浓度 ( $mg \cdot L^{-1}$ ),  $q_{支}$ 、 $q_{干}$  表示支、干级排水沟所接受的农级排水沟控制排水深度和支、干级排水沟控制排水深度之间的侧向排水量 [ $m^3 \cdot (s \cdot m)^{-1}$ ].

### 1.2 不同排水深度水污运移

支、干级排水沟除一方面接受上一级农(毛)、支级排水沟末端的“点源”排放外,另一方面,由于支、干级排水沟切割深度较大以及农业非点源污染的“面源”污染特征,支、干级排水沟还接受农田农(毛)级排水沟控制排水深度和支、干级排水沟控制排水深度之间的渗漏排水和污染物,一般称这部分排水为二次排水或农田深层排水,见图 2。

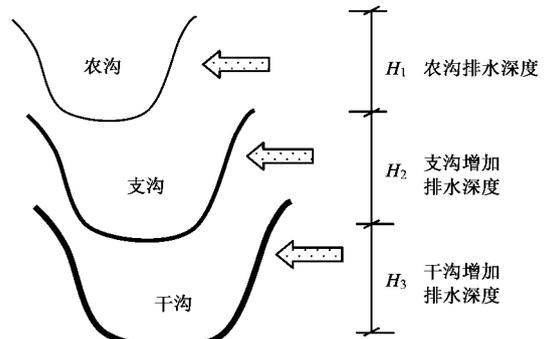


图 2 不同级别排水沟控制排水深度示意

Fig. 2 Simulating diagram of depth controlled by different grades drainage ditch

如图 2 中所示,农沟主要接纳田间深度  $H_1$  层排水,而支沟除接纳农沟排水外,由于切割深度大于农沟,同时接纳控制区域内  $H_2$  深度层排水,同理,干级排水沟切割深度进一步增大,除接纳支沟排水外,还接纳  $H_3$  深度层排水。深层排水一般水量较小,其中所含氮磷等各类污染物浓度也较小,在非灌溉季节一般构成排水沟渠系统中的“基流”。

## 2 模型构建

农田排水沟渠中同时包括有农田排水的演进过程以及农业非点源污染物的迁移转化过程,其中农田排水的演进是农业非点源污染物迁移的主要动力。根据图 1 中农田排水和其中的污染物的传输过程,农田排水可应用水流连续方程进行模拟,污染物迁移转化可应用一维非保守性污染物迁移扩散方程进行模拟,并依据逐级排水沟渠的递推关系,连续模拟农田灌溉所排出的水、污在不同级别排水沟渠中的运移,直至排向外界水体,推算出典型区农业非点源污染物最终输出负荷。

### 2.1 水流运动方程

考虑到排水沟渠中水体和污染物均以沿沟渠方向纵向迁移为主,因而在一维条件下,设  $Q(x, t)$  为  $t$  时刻通过排水沟渠断面  $A(x, t)$  的流量 ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ),  $q$  ( $q_{支}$  或  $q_{干}$ ) 为侧向流量强度 [ $m^3 \cdot (s \cdot m)^{-1}$ ],  $A$  为渠道过水断面面积 ( $m^2$ ), 则  $t$  时刻该断面的水流连续方程可写为:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

### 2.2 污染物迁移转化方程

考虑污染物纵向迁移,忽略垂向和横向变化,应用非保守性污染物迁移扩散方程,可以将排水沟渠中农业非点源污染物迁移转化方程写为:

$$(1 + K) \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = K_s \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial c_q}{\partial t} + \frac{\partial c'}{\partial t} \quad (2)$$

式中,  $c$  为排水沟渠中某类污染物的浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),  $c_q$  为各排水沟渠“点源”汇入口某类污染物的浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),  $c'$  为支干级排水沟所接纳的深层排水中某类污染物的浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),  $K_s$  为污染物剪切流弥散系数 ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $K$  为综合衰减系数 ( $\text{s}^{-1}$ ).

综合衰减系数  $K$  是农业非点源污染物在排水沟渠系统中多种作用的综合, 其中包括: 水体中污染物沉降过程; 已经沉降的污染物再悬浮过程; 渠底沉积物对水体中污染物的截留、吸附过程; 渠底沉积物中微生物对截留污染物的生物分解、转化过程; 水生植物对污染物的吸收和相互间的转化过程; 渠底沉积物的释放过程(当水流中污染物浓度低于沉积物中污染物浓度时, 沉积物中污染物释放形成的“内源”污染对水体中浓度的影响). 由于在实际工作中, 以上这几种作用很难监测、区分, 因此一般取其综合作用效果. 具体计算过程中, 可根据不同级别排水沟渠典型渠段断面资料通过两点法 [式(3)] 或反问题求解技术推算<sup>[17]</sup>.

$$K = U/x \ln(c_{\text{上}}/c_{\text{下}}) \quad (3)$$

式中,  $c_{\text{上}}$ 、 $c_{\text{下}}$  为排水沟渠典型渠段上、下断面某类污染物浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ );  $U$  为渠段平均流速 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $x$  为上、下断面间渠段长度 ( $\text{m}$ ).

### 2.3 整体模型

综合水流连续方程式和污染物迁移转化方程, 农业非点源污染污染物在排水沟渠中的整体模型可以写为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ (1 + K) \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = K_s \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial c_q}{\partial t} + \frac{\partial c'}{\partial t} \\ \text{初始条件: } c(x, t) = \begin{cases} c_0 & (x \in G, t > 0) \\ 0 & (x \in G, t > 0) \end{cases} \\ \text{边界条件: } f_1(x, t) \leq c(x, t) \leq f_2(x, t) \\ (x \in G, t > 0) \end{array} \right. \quad (4)$$

### 2.4 模型求解

模型求解时, 水流方程采用四点隐式差分格式离散, 污染物质随流沿程迁移扩散方程采用显式差分格式. 模型计算时段可以任选, 空间步长小于计算排水沟相邻两“源”汇入口间距, 时间步长小于排水水流在相邻两“源”汇入口间的最小传播时间. 其中水量采用第一类 (Dirichlet) 边界条件, 排水过程模拟上边界条件为田间末级排水沟 (田间毛沟或农

沟) 末端控制水量, 下边界条件为各排水沟口或总排干沟出口控制水位, 计算模型为封闭性模型; 污染物迁移转化计算采用第二类 (Neumann) 边界条件, 设定田间末级排水沟末端污染物浓度  $c_0(x, t)$  为初始条件, 模型中各汇入口作为内边界处理.

计算时, 以本级排水沟渠的起点流量、污染物浓度为初始条件, 上级排水沟渠输水输污过程概化为本级排水沟渠的“源”汇入口, 而本级沟渠的末端流量、污染物浓度过程则为下一级排水沟渠的“源”汇入口, 具体求解过程可以采用非耦合求解, 即先单独求解水流连续方程, 求出有关水力要素后, 再求解污染物衰减弥散方程, 推求沟渠污染物输出结果, 如此交替进行.

以上模型求解过程可利用计算机编程实现.

## 3 模型应用

### 3.1 示例沟渠概况

模型以宁夏青铜峡灌区第一排水沟为示例典型. 第一排水沟位于宁夏永宁县西南部, 是青铜峡灌区最早开挖的排水干沟之一, 总干排水沟现状全长 26.4 km, 共有干支级排水沟 32 条, 全长 69.6 km, 控制排水面积  $2.06 \times 10^4 \text{ hm}^2$ . 总干排水沟在宁夏永宁县望洪堡北侧穿惠农渠入黄河, 入黄口上游约 500 m 为排水沟入黄控制站望洪堡水文站. 模型计算时段为 2008 年 5~9 月农田灌溉排水期.

### 3.2 排水沟渠概化

为便于模型运算, 对第一排水沟控制排水区域及其排水系统进行概化, 概化过程中遵循以下原则: ①第一排水沟控制排水面积不变, 作物种植结构不变, 使得模拟区与排水沟实际控制排水区田间产污负荷相等; ②每条农沟接纳田间排水面积按实际控制区约  $6 \text{ hm}^2$  控制, 并按 100 m 等间距汇入支级排水沟; ③支、干级排水沟、第一排水沟总长度不变, 确保农田排水、污染物在排水沟渠系统中的迁移路径长度不变.

遵循以上原则, 将第一排水沟控制的不规则排水区域可以概化为规则、便于模拟的标准排水田块, 见图 3.

### 3.3 初值输入

模型计算过程中, 各级排水沟计算初值按以下设定:

(1) 支、干、总干排水沟中起始流量  $Q_0$ 、污染物初始浓度  $c_0$  均设定为 0, 即  $\{Q_0(x, t) = 0, c_0(x, t) = 0, (x = 0, t = 0)\}$ ; 支级排水沟汇入流量为农

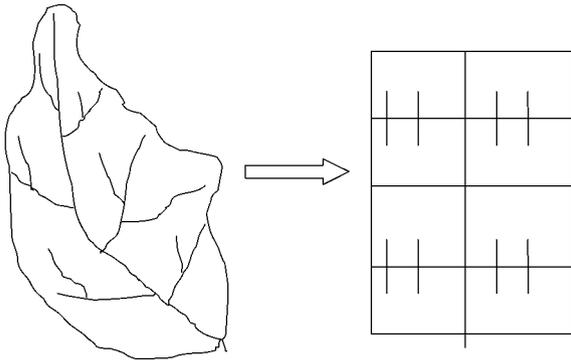


图3 排水沟渠系统概化示意

Fig.3 Simulating diagram of drainage system

级排水沟末端排水量, 污染物浓度为所推算的农级排水沟末端各类污染物浓度, 因此, 进入支级排水沟的污染物负荷即为应用农业非点源污染田间模型计算所得农业非点源污染物田间负荷<sup>[12]</sup>; 侧向入流

表1 各级排水沟渠污染物实测综合衰减系数变化/ $s^{-1}$ Table 1 Degradation coefficient of pollutants in drainage ditch/ $s^{-1}$ 

污染物	支沟	干沟	总排干
硝酸盐氮	4.62E-04 ~ 8.50E-04	1.15E-04 ~ 2.10E-04	1.70E-03 ~ 6.20E-03
总磷	2.32E-03 ~ 5.23E-03	1.62E-04 ~ 7.50E-04	1.78E-04 ~ 6.00E-04

型运算中结合有关监测试验资料逐步率定。

(4) 因概化区域内各农沟间距取为 100 m, 考虑到农沟中最大流速不大于  $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 为了不遗漏各农沟汇入点, 所以空间步长取 50 m, 时间步长取 1 min.

(5) 模型计算时段为 2008 年 5 ~ 9 月. 计算过程中, 轮灌周期按照实际灌溉情况, 支渠 3 d 为一个周期, 不同农级排水沟按各自排水日期依次叠加进入支级排水沟, 干级排水沟、第一排水沟照此类推。

### 3.4 计算结果

将以上初值输入模型, 首先计算出第一排水沟出口处逐日流量过程, 结果见图 4.

在此基础上, 应用污染物浓度迁移模型逐级进行排水系统中污染物浓度计算, 可得出第一排水沟出口处逐日污染物浓度过程, 依次见图 5、图 6.

### 3.5 模拟结果检验与合理性分析

模型计算结果的合理性分析包括 2 个方面, 一是模拟水量的合理性分析, 二是污染物浓度的合理性分析. 分析方法采取主观图示法评判和客观 Nash-Sutcliffe 模拟效率系数 (NSC) 评价的方法.

将第一排水沟出口控制水文站望洪堡水文站 2008 年实测逐日实测流量同时点绘于图 4, 从中可

量为通过调整排水深度应用 DRAINMOD 模型计算田间进入支级排水沟的水量<sup>[18,19]</sup>, 考虑到田间埋深 1 m 以下各类污染物浓度变化较小, 因此, 这部分排水中所携带的各类污染物浓度分别按水、旱田 1 m 深度处土壤水中污染物浓度值计算; 沟底高程  $h$ , 沟渠中水体流速  $U_x$ , 渠道比降  $a$ , 底宽  $B$ , 边坡  $m$  等按照相关试验资料以及支级排水沟实际情况取值; 如此类推, 干级排水沟、总干排水沟按相同方法确定模型中相关初值.

(2) 污染物综合衰减系数  $K$  值确定. 选取硝酸盐氮、总磷为模拟典型农业非点源污染物, 依据各级排水沟渠典型断面监测试验资料, 采用两点法计算, 由式(3)确定. 根据不同月份监测资料计算所得同级排水沟不同月份的综合衰减系数变化范围见表 1, 计算过程中可根据不同月份分别选用.

(3) 糙率  $n$ 、污染物剪切流弥散系数  $K_s$  可在模

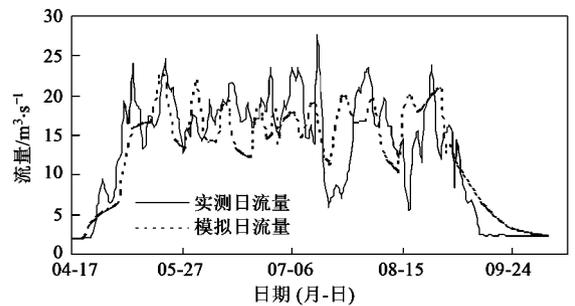


图4 第一排水沟出口逐日实测流量过程与模拟过程对比

Fig.4 Comparison of measured discharge and simulated in Di Yi drainage ditch

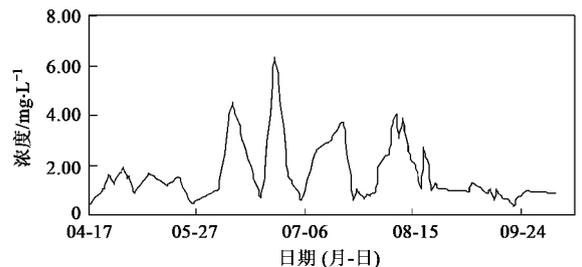


图5 第一排水沟出口逐日硝氮浓度模拟过程

Fig.5 Simulation process of nitrate nitrogen concentration in Di Yi drainage ditch

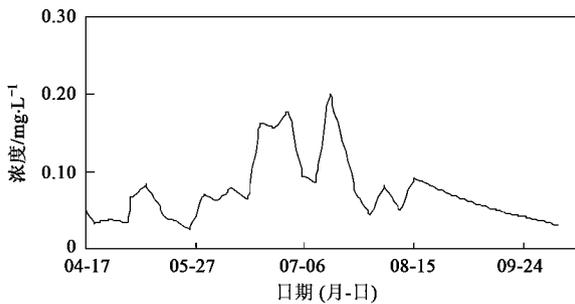


图6 第一排水沟出口逐日总磷浓度模拟过程

Fig. 6 Simulation process of total phosphorus concentration in Di Yi drainage ditch

以看出,在7月20日之前,模拟所得排水过程峰谷变化与实测排水过程基本一致,但具体峰谷数值有所出入,7月20日以后,模拟峰谷过程有提前趋势。另外,第一排水沟除主要接纳农田排水外,沿沟部分乡镇企业、养殖及农村生活废水也排入沟渠内,从图4中可以看出,模拟所得农田排水量略小于水文站实测入黄口实际排水量。考虑到模型输入值均为概化值,排水量与各类污染物浓度均为田间模型计算结果,而实际排水系统输水过程中变数很多,相对于控制区  $2.06 \times 10^4 \text{ hm}^2$  而言,模拟过程基本是可行的。

同时,选用 Nash-Sutcliffe 模拟效率系数(NSC)评价模型计算结果<sup>[20]</sup>。计算公式为:

$$\text{NSC} = 1 - \frac{\sum (x_{\text{obs}} - x_{\text{calc}})^2}{\sum (x_{\text{obs}} - \bar{x}_{\text{obs}})^2} \quad (5)$$

式中,  $x_{\text{obs}}$  为实测值,  $x_{\text{calc}}$  为模型计算值,  $\bar{x}_{\text{obs}}$  为实测值的算术平均值。当模型计算值和实际监测值相等时,  $\text{NSC} = 1$ , 模拟效果最好; 通常 NSC 在 0 ~ 1 之间, NSC 越大, 说明计算值与观测值匹配程度越好, 一般当  $\text{NSC} > 0.75$  时, 表示模拟结果可以接受。

根据第一排水沟入黄口望洪堡水文站逐日监测数据以及模型计算结果, 计算第一排水沟模拟逐日排水量 Nash-Sutcliffe 模拟效率系数为 0.82 ( $> 0.75$ ), 表明本研究所建模型对田间排水沟渠中水量的模拟能够满足要求。

从图5、图6所模拟的第一排水沟出口处典型污染物浓度过程可以看出, 控制排水区5月初开始灌溉, 出口处农田排水中的污染物浓度有一个变化过程; 从5月底~8月中旬是农田的频繁灌溉和施肥期, 农田排水中的污染物浓度始终维持较高水平; 8月底以后随着作物进入成熟期, 灌溉和施肥次数

减少, 农田排水量和其中的污染物浓度也呈现出明显的消退过程。农田排水和其中的污染物浓度同作物的灌溉、施肥过程具有很好的同步性, 这和类似研究成果是一致的<sup>[21-23]</sup>。

由于望洪堡水文站污染物浓度监测数据较少, 一年仅在不同季节各取样一次, 监测数据难以对所模拟逐日污染物浓度过程进行检验。另外, 第一排水沟除接纳农田排水外, 还接纳有其它“点源”(乡镇企业、养殖废水等)、“非点源”(农村生活废水等)污染物, 尤其是“点源”污染, 虽然水量较小但浓度较高, 对第一排水沟出口处的污染物浓度也影响较大。同时, 也缺乏可以对比的类似研究成果, 不能进行模型实测数据检验。只能从模拟过程的合理性进行分析。从模拟过程看, 模型中污染物运移所应用的一维水质模型方程较为成熟且应用广泛, 本研究中所做的改进也符合农业非点源污染物迁移的基本特征, 且模型中各污染物相应系数均采用典型沟渠实测值, 其它参数均按不同级别排水沟实际情况取值, 因此, 第一排水沟出口各类污染物浓度的模拟结果也具有一定的可信度。

#### 4 结论

(1) 农田排水和其中的非点源污染物在向外界接纳水体输出过程中, 不同级别排水沟渠间存在逐级“源”汇入递推关系, 同时由于切割深度不同, 不同级别排水沟渠又存在因控制排水深度不同而引起的深层排水问题。

(2) 基于水动力学基本方程和污染物迁移扩散方程, 考虑不同排水沟渠中水污运移具体情况, 构建了农业非点源污染物在排水沟渠中的输移模型。

(3) 以黄河上游青铜峡灌区第一排水沟沟渠系统为典型, 进行了模型的示例运用。通过对模型计算结果的合理性分析, 排水沟渠系统逐日排水量模拟结果与实测数据结合较好, Nash-Sutcliffe 模拟效率系数达到 0.82, 典型污染物浓度也具有一定的可信度, 表明所建农业非点源污染物排水沟渠模型具有较好的应用效果。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 龙天渝, 李继承, 刘腊美. 嘉陵江流域吸附态非点源污染负荷研究[J]. 环境科学, 2008, 29(7): 1810-1817.
- [3] 周慧平, 高超. 巢湖流域非点源磷流失关键源区识别[J]. 环境科学, 2008, 29(10): 2696-2702.

- [ 4 ] 李强坤, 孙娟, 胡亚伟, 等. 青铜峡灌区农业非点源污染控制措施及其效果分析[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(增刊): 141-144.
- [ 5 ] Li Q, Sun J, Li H. Model and application of the pollutant concentration in agricultural drainage [ A ]. In: The 2nd Conference on Environmental Science and Information application Technology (ESIAT 2010) [ C ]. Wuhan, 2010: 9-12.
- [ 6 ] Carlier N, Marsily G D. Assessment and modeling of the influence of man-made networks on the hydrology of a small watershed: implications for fast flow components, water quality and landscape management [ J ]. Journal of Hydrology, 2004, **34** (5): 76-95.
- [ 7 ] Wriedt G, Rode M. Modeling nitrate transport and turnover in a lowland catchment system [ J ]. Journal of Hydrology, 2006, **36** (8): 157-176.
- [ 8 ] Birkinshaw S J, Ewen J. Nitrogen transformation component for SHETRAN catchment nitrate transport modeling [ J ]. Journal of Hydrology, 2000, **30**(2): 1-17.
- [ 9 ] 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.
- [ 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, Ecosystem and Environment, 2005, **132**(5): 145-162.
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] 李强坤, 李怀恩, 胡亚伟, 等. 农业非点源污染田间模型及其应用[J]. 环境科学, 2009, **30** (12): 3509-3513.
- [ 13 ] 李强坤, 孙娟, 胡亚伟, 等. 青铜峡灌区氮磷运移特征试验研究[J]. 环境科学, 2010, **31** (9): 2048-2055.
- [ 14 ] 毛战坡, 尹澄清, 王雨春, 等. 污染物在农田溪流生态系统中的动态变化[J]. 生态学报, 2003, **23**(12): 2614-2623.
- [ 15 ] 陆琦, 马克明, 卢涛, 等. 三江平原农田渠系中氮素的时空变化[J]. 环境科学, 2007, **28**(7): 1560-1566
- [ 16 ] 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): 211-214.
- [ 17 ] 王沛芳, 王超, 唐劲松, 等. 河道沿岸芦苇带对氨氮的削减特性研究[J]. 水科学进展, 2003, **14** (3): 311-317.
- [ 18 ] 贾忠华, 罗纨, 方树星, 等. 宁夏银南灌区排水现状分析及计算[J]. 农业工程学报, 2006, **21**(3): 60-65.
- [ 19 ] 罗纨, 贾中华, R W Skaggs, 等. 利用 DRAINMOD 模型模拟银南灌区稻田排水过程[J]. 农业工程学报, 2006, **22**(9): 53-57.
- [ 20 ] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual Models-PT 1 [ J ]. Journal of Hydrology, 1970, **10** (3): 282-290.
- [ 21 ] 闫莉, 黄锦辉, 张建军, 等. 宁夏农灌退水对黄河水质的影响研究[J]. 人民黄河, 2007, **29**(3): 35-36
- [ 22 ] 于涛, 陈静生. 农业发展对黄河水质和氮污染的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2004, **18**(5): 1-7.
- [ 23 ] 李强坤, 李怀恩, 孙娟, 等. 基于单元分析的青铜峡灌区农业非点源污染负荷估算[J]. 生态与农村环境学报, 2007, **23** (4): 15-18.