

基于“源”、“汇”过程的农业非点源污染模型构建及应用*

李强坤^{1,2} 胡亚伟^{1,2} 孙娟¹ 李怀恩³

(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 根据农业非点源污染产移特点,将农业非点源污染模型分为田间产污的“源”模块以及模拟污染物在排水沟渠中运移的“汇”模块,其中“源”模块又包括农田灌溉(降水)排水子模块及农田灌溉(降水)排水中污染物浓度计算子模块。应用 DRAINMOD 模型模拟田间尺度的灌溉(降水)排水,同时将农田的施肥和灌溉过程“合成”作为田间污染物浓度的脉冲输入,以逆高斯分布作为综合作用函数,建立农田尺度的灌溉排水污染物浓度估算模型,二者结合构成农业非点源污染田间产污模块;应用一维水动力学基本方程和非保守性污染物迁移方程,建立农业非点源污染物沟渠“汇”模块。并以黄河上游青铜峡灌区为例进行了示例应用,依据典型田块以及排水沟渠农业非点源污染监测试验资料,结合灌区作物种植结构,计算了2008年5~9月青铜峡灌区输出污染负荷,结果为盐分470 099 t、总磷98.17 t、总氮3 593 t、硝态氮2 122 t、氨态氮426 t。通过示例验证,表明所建模型具有较好的模拟效果,可进一步推广应用。

关键词 农业非点源污染 估算模型 “源”、“汇”模块 青铜峡灌区 污染负荷
中图分类号: X592 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2011)06-1424-07

Establishment and application of source/sink-based agricultural non-point source pollution model

LI Qiang-Kun^{1,2}, HU Ya-Wei^{1,2}, SUN Juan¹, LI Huai-En³

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

Abstract Improving control standards of point (PSP) and non-point (NSP) source pollutions are recent highlights of water and environmental issues. Agricultural non-point source pollution (AGNSP) problems caused especially by heavy use of chemical fertilizers and pesticides are prominent in this regard. Quantitative research on pollution loads is the basis of control standard, evaluation and management of AGNSP. Using AGNSP and unit-load characteristics, an AGNSP model was developed that uses source/sinks modules determine the complex migration routes of pollutants. The source module was further divided into farmland irrigation drainage and farmland contaminant concentration estimation sub-modules. The sink module was also divided into farmland drainage and pollutant migration/transformation sub-modules. By integrating the modules, a complete AGNSP load model was therefore established. The integrated AGNSP model was tested in the Qingtongxia Irrigation District (QID) in upstream reaches of the Yellow River. The 2008 crop pattern was used in the developed AGNSP model to simulate AGNSP load and output in QID. Based on the simulation results, salinity, total phosphorus, total nitrogen, nitrate nitrogen and ammonia nitrogen in QID were 470 099 t, 98.17 t, 3 593 t, 2 122 t and 426 t, respectively. The application of the established AGNSP model indicated that the model presented preferable simulated results, and was practicable in the similar studies.

Key words Agricultural non-point source pollution, Estimation model, Source/sink module, Qingtongxia Irrigation District, Pollution load

(Received Dec. 27, 2010; accepted May 31, 2011)

* 国家自然科学基金项目(50879027)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2011CB403303)和黄河水利科学研究院科研院所专项基金项目(HKY-JBYW-2010-12)资助

李强坤(1968-),男,博士,高级工程师,主要从事生态水文与环境水文、农业水土环境等方面研究工作。E-mail: liqiangk@126.com

收稿日期: 2010-12-27 接受日期: 2011-05-31

近年来,随着水环境问题的日益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^[1-2]。农业非点源污染是指农业生产活动中,在灌溉(降水)动力作用下,所引起的各种污染物通过农田地表径流、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。不同于点源污染,非点源污染具有广泛性和潜伏性,其浓度和负荷等均具有不确定性特点,因而导致非点源污染的监测、控制和处理比较困难和复杂。国外自 20 世纪 70 年代开始系统研究非点源污染问题,回顾近 40 年来的研究进展,描述非点源污染负荷的数学模型始终是研究的重点,开发的一系列经典模型,如 CREAMS(Chemicals Run off and Erosion from Agricultural Management Systems)^[3]、EPIC(Erosion Productivity Impact Calculator)^[4]、SWAT(Soil and Water Assessment Tool)^[5]等,对非点源污染的研究和控制都有很好的促进作用。我国虽然自 20 世纪 80 年代已开始非点源污染方面的探索研究,但由于重视程度不够,相关研究开展不多,缺乏适应于现状农业条件下的非点源污染计算模型。而国外开发的一系列农业非点源污染模型由于基础数据匮乏、监测资料少等各种原因难以在国内大范围推广应用。依据农业非点源污染产移特点^[6],本文将农业非点源污染模型划分为田间产污的“源”模块以及在排水沟渠中运移的“汇”模块分别构建,并以黄河上游青铜峡灌区为例进行了非点源污染负荷模拟计算应用,以供进一步研究借鉴和参考。

1 模型构建

1.1 整体思路

现阶段我国农业非点源污染具有单元特征突出、周期性明显以及迁移路径复杂等特点,据此,可将农业非点源污染整体模型划分为表征田间产污过程的“源”模块和污染物在排水沟渠中迁移转化的“汇”模块,“源”、“汇”模块以田间排水沟末端为分界点。模型整体构建思路见图 1,一方面,将农业非点源污染产生和迁移过程分为“源”、“汇”两个环节分别模拟,另一方面将模拟内容划分为水分运动和污染物迁移两部分。

依据上述思路,农业非点源污染模型可表达为:

$$W_{ansp,out,j} = W_{ansp,pro,j} \eta_j \quad (1)$$

式中, $W_{ansp,out,j}$ 为 j 类农业非点源污染物向外界水体输出的负荷量(kg), $W_{ansp,pro,j}$ 为作物在灌溉(降水)作用下排进田间排水沟(一般为农沟) j 类污染物的污染负荷(kg), η_j 为 j 类污染物向外界水体排出的负荷占田间产污负荷的比例,可称之为排污系数。

其中, $W_{ansp,pro,j}$ 表示田间产污负荷,可由下式计算:

$$W_{ansp,pro,j} = \int_{t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^m A_i \alpha_{i,j} dt \quad (2)$$

式中, t_1 、 t_2 为研究起止时间; A_i 为 i 类土地利用面积,也即 i 类作物种植面积(hm^2); $\alpha_{i,j}$ 为 i 类作物单位面积 j 类污染物的产出量,也即 i 类作物 j 类污染物的单元负荷强度($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。单元负荷强度可定义为一定水肥耦合作用下不同土地利用方式单元面积的产污负荷,一般可通过典型区监测试验,由(3)式计算:

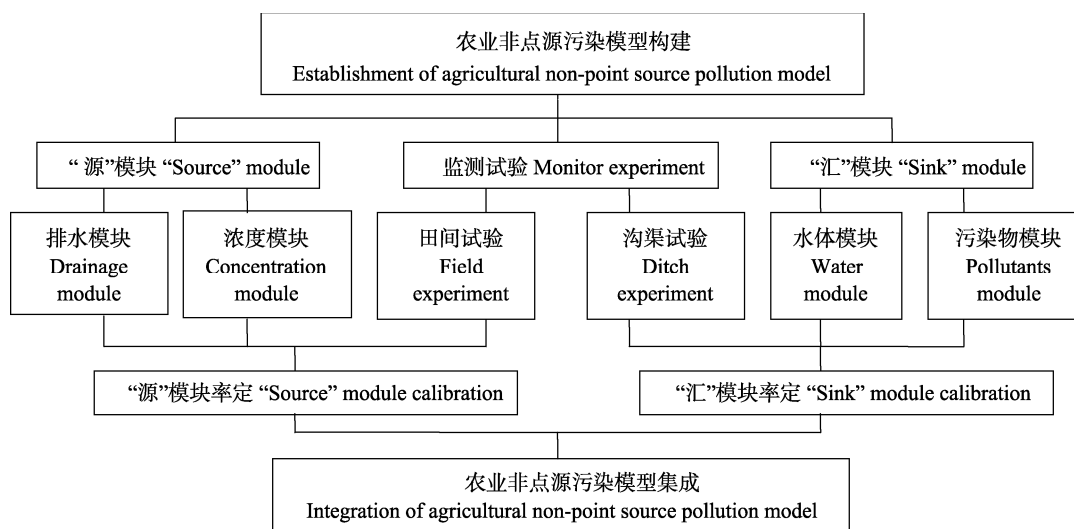


图 1 农业非点源污染模型构建框图

Fig. 1 Construction diagram of agricultural non-point source pollution model

$$\alpha_{i,j} = W_{ansp,pro,i,j} / A_i = \int_{t_1}^{t_2} W_{w,dra} C_{ansp,pro,i,j} dt / A_i \quad (3)$$

式中, $W_{ansp,pro,i,j}$ 为 i 类作物在灌溉(降水)作用下排进田间排水沟(一般为农沟) j 类污染物的污染负荷(kg); $C_{ansp,pro,i,j}$ 为 i 类作物排进末级排水沟 j 类污染物的浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 由农田灌溉排水中污染物浓度预测模型估算; $W_{w,dra}$ 为 i 类作物排进末级排水沟的水量(m^3), 由农田灌溉排水模型估算; 其他符号意义同前。

j 类污染物经田间产出后向外界水体排出的排污系数 η_j 可通过典型排水沟渠监测试验, 应用(4)式计算:

$$\eta_j = W_{out,j} / \sum_{i=1}^m W_{ansp,pro,i,j} \quad (4)$$

式中, $W_{out,j}$ 为进入田间末级排水沟的 j 类污染物总和及迁移至外界水体的污染负荷(kg), 可由监测试验(没有点源污染进入)或经农业非点源污染物在排水沟渠中的迁移转化模型模拟求得。

综合上述(1)~(4)式为农业非点源污染整体模型, 其中(2)、(3)式表示农业非点源污染物的田间产出过程, 可以称为“源”模块; (4)式表示农业非点源污染物在排水沟渠中的输移过程, 称为“汇”模块。

1.2 “源”模块构建^[7]

“源”模块包括 2 个子模块, 一个是农田灌溉(降水)排水子模块, 另一个是农田灌溉(降水)排水中污染物浓度估算子模块, 目的在于计算田间产污负荷。

1.2.1 农田灌溉(降水)排水子模块

农田灌溉(降水)排水子模块选用美国北卡罗来那州立大学 R.W.skaggs 博士开发的 DRAINMOD 模型^[8-9], 在地下水水位上升到地表前、后分别应用 Hooghoudt 公式(5)和 Kirkham 公式(6)计算。

$$q = \frac{8kd_e m + 4km^2}{L^2} \quad (5)$$

$$q = \frac{4\pi k(t+b-r)}{gL} \quad (6)$$

式中, q 为排水量($\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$), k 为侧向饱和导水率($\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$), d_e 是排水管到不透水层的深度(cm), m 是两排水管中部水头(cm), L 是排水管间距(cm), t 是地面积水深度(cm), b 是从地表到排水管的深度(cm), r 是排水管的半径(cm)。

1.2.2 农田灌溉(降水)排水中污染物浓度预测子模块

农田灌溉(降水)排水中的污染物浓度受农田灌

溉(降水)水量和田间施肥量影响较大, 把施肥和灌溉过程“合成”考虑, 就等同于把一定的施肥量溶解于一定的灌水量当中, 而向土壤中注入了具有一定浓度的“化肥溶液”。施肥过程和灌溉过程相对于作物漫长的生长期而言, 历时较短, 可以将这一过程凝聚为一个时间点, 看做是瞬时注入, 也即一个脉冲过程。农田灌溉(降水)排水中的污染物浓度变化过程可以看做具有一定浓度的“化肥溶液”以脉冲形式注入农田“混合反应器”以后, “混合反应器”向外界排出的一个污染浓度过程^[10]。因此, 在向土壤中注入 $C_{in}(t-t')$ 脉冲浓度时, 农田灌溉(降水)排水中的污染物浓度 $C_{out}(t)$ 可表示为脉冲浓度 $C_{in}(t-t')$ 与综合作用函数 $f(t)$ 的卷积。

$$C_{out}(t) = \int_0^{\infty} C_{in}(t-t')f(t')dt' \quad (7)$$

选用逆高斯分布(Inverse Gaussian Distribution)作为模型中的综合作用函数, 其表达式为^[11]:

$$f(t) = \sqrt{\frac{\lambda}{2\pi t^3}} \exp\left[-\frac{\lambda(t-\mu)^2}{2\mu^2 t}\right] \quad (t > 0) \quad (8)$$

式中, 参数 μ 和 λ 的初值可分别用矩法和极大似然法估计^[12], 见式(9)和(10), 并进一步利用文献[13]中推荐的方法进行参数加速优选, 得出最优参数。

矩法估计:

$$\mu = \sum_{i=1}^n x_i \quad \lambda = \frac{\bar{x} \times \mu^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (9)$$

极大似然法估计:

$$\mu = \sum_{i=1}^n x_i \quad \lambda = \frac{\mu^2}{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i\right]^2 \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}\right] - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i} \quad (10)$$

式中, n 为监测试验次数, x_i 为第 i 次试验数据, 其他符号意义同上。

1.3 “汇”模块构建

“汇”模块以田间排水沟末端为起点, 同时包括农田灌溉(降水)排水的演进过程以及其中污染物的迁移转化过程。其中, 农田灌溉(降水)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(降水)所排出的水、污染物在不同级别排水沟渠中的运移, 直至排向外界水体。

综合水流连续方程和污染物迁移转化方程, 农业非点源污染物在排水沟渠中的整体模型可以表达为:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} &= q(1+K) \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \\ K_s \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial C_q}{\partial t} + \frac{\partial C'}{\partial t} \end{aligned} \right. \quad (11)$$

初始条件:

$$C(x,t) = \begin{cases} C_0 \dots\dots\dots(x \in G, t > 0) \\ 0 \dots\dots\dots(x \in G, t > 0) \end{cases}$$

边界条件:

$$f_1(x,t) \leq C(x,t) \leq f_2(x,t) \dots\dots\dots(x \in G, t > 0)$$

式中, Q 为 t 时刻通过排水沟渠断面 A 的流量($m^3 \cdot s^{-1}$), q 为侧向流量强度[$m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$], C 为排水沟渠中某类污染物的浓度($mg \cdot L^{-1}$), C_q 为各排水沟渠“点源”汇入口某类污染物的浓度($mg \cdot L^{-1}$), 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($mg \cdot L^{-1}$), K_s 为污染物剪切流弥散系数($m^2 \cdot s^{-1}$), K 为综合衰减系数(s^{-1}).

2 模型应用

2.1 研究区概况

模型示例应用以黄河上游青铜峡灌区为例。研究区位于宁夏北部, 处于干旱半干旱地区, 农牧业发展主要依靠过境黄河水。受引水条件便利和传统用水方式影响, 多年来灌区一直沿用大引大排的灌排模式, 1997~2006 年, 青铜峡灌区年均引黄水量 $5.7 \times 10^9 m^3$, 同期排入黄河水量约 $3.1 \times 10^9 m^3$, 排引比(排水量占引水量的比例)高达 50%~60%。灌区排水方式以明沟为主, 干沟、支沟、斗沟和农沟组成

排水系统。农田中流失的氮磷等农业非点源污染物直接进入灌区排水系统, 兼之部分排水沟接纳工、企业以及生活等废污水, 同时受农村养殖污染以及垃圾滤液等影响, 多数排水沟水质较差, 未经处理直接进入黄河干流, 对黄河干流该河段水质影响较大^[14-16]。

根据以往研究^[17], 结合研究区排水实际情况, 选取盐分、总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮(NH_4^+-N)和硝态氮($NO_3^- -N$)为典型污染物。为便于计算, 将研究区土地利用方式划分为水田和旱田两种。同时, 以 2008 年 5~9 月作物生长期作为青铜峡灌区农业非点源污染负荷估算的典型时段, 水、旱田种植面积资料选用 2008 年各地市统计资料。

2.2 典型监测试验

青铜峡灌区农业非点源污染试验区位于宁夏永宁县望洪镇东玉村和西玉村, 属青铜峡灌区汉延渠灌域。试验区监测试验具体布设见图 2。

如图所示, 试验中分别取水作(水稻)、旱作(小麦加玉米)为典型田块, 农级排水沟水旱田各取 2 条。试验时间为 2008 年 5~9 月作物灌溉期。水田农沟每 5 d 取样 1 次, 旱田农沟按其实际灌溉过程取样; 支、干和总排干级排水沟每月典型沟段上下断面各取样 1 次。水样采用中泓一线法取样, 每个水样 1 000 mL, 分析指标包括氨态氮(NH_4^+-N)、硝态氮($NO_3^- -N$)、总磷(TP)、盐分和总氮(TN)。分析方法按照《水和废水监测分析方法(第 4 版)》中相关规定进行^[18]。

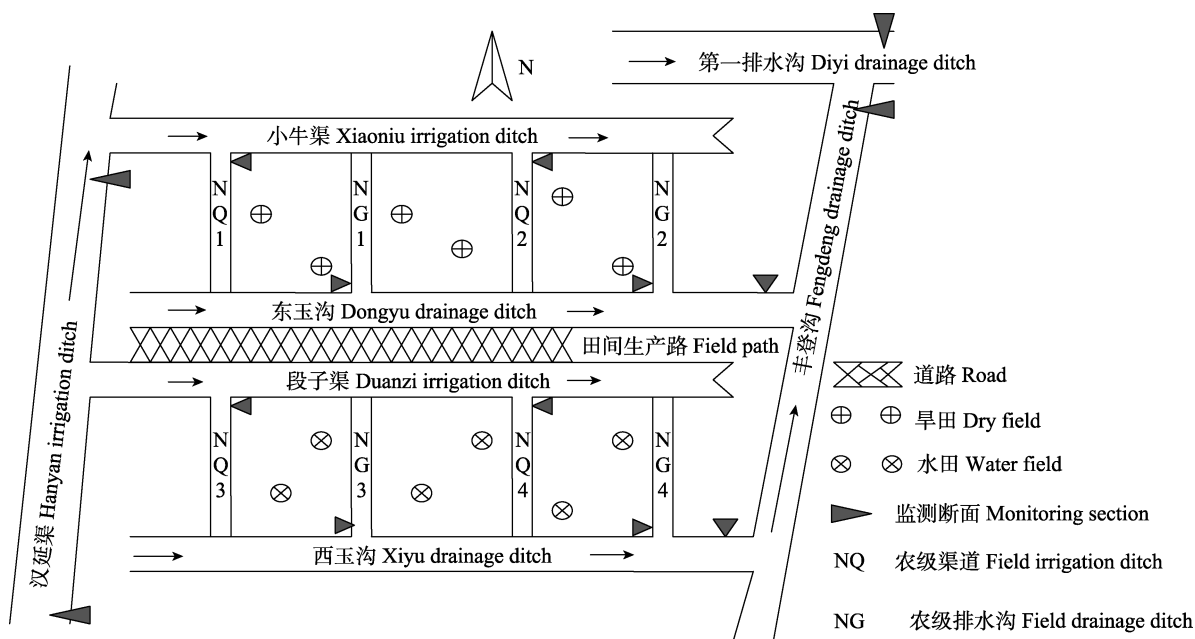


图 2 试验区田间监测点布设示意图

Fig. 2 Schematic diagram for layout of the monitoring sections in field of investigated area

2.3 田间产污计算

2.3.1 田间排水计算

田间排水量应用 DRAINMOD 模型计算, 将模型所需各项参数结合研究区具体情况分别依次输入, 可得出水、旱田排向各级排水沟渠的水量, 见表 1。

表 1 不同土地利用方式下各级别排水沟的田间排水量
Table 1 Water discharge of every class drainage ditch under different land use types

土地利用方式 Land use type	农沟 Field drain- age ditch	支沟 Branch drainage ditch	干沟 Main drain- age ditch	合计 Total
水田 Water field	62	7.6	6.3	75.9
旱田 Dry field	4.4	2.1	1.5	8.0

应用田间产污监测试验资料, 同时可以推求一定土地利用方式下的各类污染物综合作用函数 $f(t)$, 结合田间实际灌溉水量和施肥量“合成”化肥溶液, 依据公式(7)可计算得出农田灌溉排水中各类污染物浓度过程。详细计算过程可参见文献[7]。

2.3.2 单元负荷强度

在计算得出田间排水量和排水中污染物浓度的基础上, 可计算得出每条农沟在研究时段输出的污染负荷。农沟中的污染负荷可认为是两侧农田的产污负荷, 根据每条农沟实际控制排水面积, 应用前文公式(3)可计算得出不同土地利用方式下研究时段各类污染物的单元负荷强度, 见表 2。

根据研究区有关市、县统计数据, 分水、旱田统计青铜峡灌区 2008 年作物种植结构, 结合表 2 中不同土地利用方式下的田间单元负荷强度, 应用公式(2)可计算得出各地市田间产污负荷, 结果见表 3。

表 2 不同土地利用方式下研究时段各类污染物的单元负荷强度

Table 2 Load intensity of different pollutants in studied period under different land use types $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

污染物 Pollutant	水田 Water field	旱田 Dry field
盐分 Salinity	5 200	7 32
总磷 Total phosphorus	1.77	0.05
总氮 Total nitrogen	48.82	7.63
硝态氮 Nitrate nitrogen	30.03	5.05
氨态氮 Ammonia nitrogen	6.84	0.33

2.4 排污系数计算

排污系数计算以青铜峡灌区第一排水沟排水系统为典型。第一排水沟全长 26.4 km, 有支斗沟 32 条, 全长 69.6 km, 控制排水面积 $2.06 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。在望洪堡北侧穿惠农渠入黄河, 在入黄口上游约 500 m 为第一排水沟入黄控制站望洪堡水文站, 其实测水文资料可对模型计算结果进行校验。

模型计算过程中, 各级排水沟计算初值按以下设定: 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; 支级排水沟汇入流量为农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“源”模块计算所得农业非点源污染物田间负荷; 侧向入流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; 排水沟沟底高程 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。

表 3 青铜峡灌区各县市 2008 年 5~9 月农业非点源污染田间产污负荷
Table 3 Field pollution load of agricultural non-point source pollution of different areas of Qingtongxia Irrigation District from May to September, 2008

污染物 Pollutant	土地利用类型 Land use type	银川 Yinchuan	永宁 Yongning	贺兰 Helan	灵武 Lingwu	石嘴山 Shizuishan	平罗 Pingluo	吴忠 Wuzhong	青铜峡 Qingtongxia	合计 Total
盐分 Salinity	水田 Water field	58 438	32 770	93 588	62 119	14 262	72 398	35 370	38 646	407 592
	旱田 Dry field	24 382	26 223	26 597	15 046	19 777	32 230	15 199	20 577	180 032
	合计 Total	82 820	58 994	120 185	77 165	34 039	104 628	50 570	59 224	587 623
总磷 Total phosphorus	水田 Water field	19.89	11.15	31.86	21.14	4.85	24.64	12.04	13.15	138.74
	旱田 Dry field	1.67	1.79	1.82	1.03	1.35	2.20	1.04	1.41	12.30
	合计 Total	21.56	12.95	33.67	22.17	6.21	26.84	13.08	14.56	151.04
总氮 Total nitrogen	水田 Water field	549	308	879	583	134	680	332	363	3 827
	旱田 Dry field	254	273	277	157	206	336	158	214	1 877
	合计 Total	803	581	1 156	740	340	1 016	491	577	5 703
硝态氮 Nitrate nitrogen	水田 Water field	337	189	540	359	82	418	204	223	2 354
	旱田 Dry field	168	181	183	104	136	222	105	142	1 242
	合计 Total	506	370	724	463	219	640	309	365	3 596
氨态氮 Ammonia nitrogen	水田 Water field	77	43	123	82	19	95	47	51	536
	旱田 Dry field	11	12	12	7	9	15	7	9	81
	合计 Total	88	55	135	88	28	110	53	60	617

此外, 计算过程中, 轮灌周期按照实际灌溉情况, 支渠 3 d 为 1 个周期, 不同农级排水沟按各自排水日期依次进入支级排水沟, 干级排水沟和第一排水沟照此类推。实际计算过程可利用计算机编程, 由支级排水沟、干级排水沟和第一排水沟逐级递推计算。

根据“汇”模块计算所得第一排水沟出口断面处水、污过程以及应用“源”模块计算的第一排水沟控制排水区田间产污过程, 由式(4)可计算得出典型排水区的排污系数, 见表 4。

2.5 输出污染负荷计算

根据计算出的田间产污负荷, 以表 4 所列典型排水区第一排水沟各类污染物排污系数作为青铜峡灌区农业非点源污染排污系数, 应用式(1), 可计算

得出青铜峡灌区 2008 年 5~9 月各类农业非点源污染物输出负荷, 见表 5。

2.6 模型验证

模型验证分“源”、“汇”环节分别进行。“源”环节验证包括对 DRAINMOD 模型计算所得田间排水过程的验证以及田间排水中污染物浓度和负荷的验证, 验证资料采用田间对照排水沟的实际监测资料; 由于第一排水沟污染物组成复杂, “汇”环节验证主要应用第一排水沟入黄控制断面望洪堡水文站实测流量过程进行水量模拟验证。

模型验证方法选用 Nash-Suttcliffe 模拟效率系数(NSC)对模拟结果进行评价, 其计算公式见式(12), 计算结果见表 6。

表 4 青铜峡灌区排水系统各类污染物排污系数计算结果

Table 4 Calculated results of pollutants export coefficients of different pollutants of drainage system of Qingtongxia Irrigation District

污染物 Pollutant	盐分 Salinity	总磷 Total phosphorus	总氮 Total nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen	氨态氮 Ammonia nitrogen
排污系数 Pollutant export coefficient	0.80	0.65	0.63	0.59	0.69

表 5 青铜峡灌区 2008 年 5~9 月农业非点源污染输出污染负荷

Table 5 Export pollution load of agricultural non-point source pollution of Qingtongxia Irrigation District from May to September, 2008

土地利用方式 Land use type	盐分 Salinity	总磷 Total phosphorus	总氮 Total nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen	氨态氮 Ammonia nitrogen
水田 Water field	326 073	90.18	2 411	1 389	370
旱田 Dry field	144 025	7.99	1 182	733	56
合计 Total	470 099	98.17	3 593	2 122	426

表 6 Nash-Suttcliffe 模拟效率系数计算结果

Table 6 Calculation results of Nash-Suttcliffe model efficiency coefficient

模拟项目 Simulation project	田间排水量 Field discharge	硝态氮浓度 Nitrate nitrogen concentration	总磷浓度 Total phosphorus concentration	硝态氮负荷 Nitrate nitrogen load	总磷负荷 Total phosphorus load	第一排水沟排水 Diyi drainage ditch discharge
Nash-Suttcliffe coefficient	0.880	0.972	0.964	0.963	0.945	0.82

$$NSC = 1 - \frac{\sum (x_{obs} - x_{calc})^2}{\sum (x_{obs} - \bar{x}_{obs})^2} \quad (12)$$

式中, x_{obs} 为实测值, x_{calc} 为模型计算值, \bar{x}_{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, $NSC = 1$, 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。根据以往经验, 当 $NSC > 0.75$ 时, 可以认为模拟效果较好。从表 6 中所列结果可以看出, “源”、“汇”模块 Nash-Suttcliffe 效率系数均在可接受范围之内, 表明本文所建模型模拟结果较好。

另一方面, 考虑到青铜峡灌区为一狭长性灌区, 灌溉面积多达 $32.43 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 尤其是银川以南(一般称银南灌区)和银川以北(银北灌区)在土壤理性结

构和排水条件方面尚有一定的差异, 作为示例应用, 本文在计算过程中将银南灌区的试验成果直接应用于银北灌区, 在具体推广应用时, 还需结合各地试验资料作进一步修正。

3 结论

(1) 依据农业非点源污染在产移环节的不同特点, 构建了基于“源”、“汇”模块的农业非点源污染整体模型;

(2) 以 DRAINMOD 模型作为农田灌溉排水子模块, 同时将“水肥”过程合成, 选用逆高斯分布作为综合作用函数, 构建了农田排水中污染物浓度估算子模块, 二者合并构成农业非点源污染“源”模块;

(3) 依据灌区不同级别排水沟渠的递推关系, 应用水流连续方程进行水量演进模拟, 应用一维非保

守性污染物迁移扩散方程模拟农业非点源污染物迁移转化, 构成农业非点源污染“汇”模块;

(4)以黄河上游青铜峡灌区为例进行了示例应用, 以 2008 年 5~9 月为典型时段, 计算了灌区农业非点源田间产污负荷、排污系数及其最终输出负荷。对模拟结果进行 Nash-Sutcliffe 模拟效率系数验证, 结果表明, 所建模型的模拟结果较好。

参考文献

- [1] 郭鸿鹏, 朱静雅, 杨印生. 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] 朱万斌, 王海滨, 林长松, 等. 中国生态农业与面源污染减排[J]. 生态环境, 2007, 23(10): 184-187
- [3] Knisel W G. CREAMS: A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems[M]. Washington D C: Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1980
- [4] Williams J R, Renard K G, Dyke P T. EPIC—A new method for assessing erosion's effect on soil productivity[J]. Soil and Water Cons, 1983, 38(5): 381-383
- [5] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool user's manual: Version 2000[R]. Temple, Texas: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 2001
- [6] 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
- [7] 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
- [8] Skaggs R W. Field evaluation of a water management simulation model[J]. Trans ASAE, 1982, 25(3): 667-674
- [9] 罗纨, 贾中华, Skaggs R W, 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
- [10] Li Q K, Sun J, Li H E. Model and application of the pollutant concentration in agricultural drainage[A]//The 2nd conference on environmental science and information application technology (ESIAT 2010)[C]. Wuhan: IEEE, 2010: 9-12
- [11] Tweedie M C K. Statistical properties of inverse gaussian distributions. I.[J]. Ann Math Statist, 1957, 28(2): 362-377
- [12] 金秀岩. 逆高斯分布参数的估计[J]. 长春师范学院学报: 自然科学版, 2006, 25(4): 25-26
- [13] 李怀恩, 沈晋. 非点源污染数学模型[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1996: 22-68
- [14] 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
- [15] 任学蓉, 周怀东, 李卫东. 黄河宁夏段氨氮污染状态分析[J]. 中国水利, 2006(5): 40-43
- [16] 张爱平, 杨世琦, 易军, 等. 宁夏引黄灌区水体污染现状及污染源解析[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(6): 1295-1301
- [17] 李强坤, 李怀恩, 胡亚伟, 等. 基于单元分析的青铜峡灌区农业非点源污染估算[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(4): 15-18
- [18] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002