

农业非点源污染田间模型及其应用

李强坤^{1,2,3}, 李怀恩², 胡亚伟¹, 陈伟伟¹, 孙娟¹

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

摘要 非点源污染的负荷量化研究是控制、评价和管理非点源污染的基础。农业非点源污染负荷估算包括农田排水估算和排水中的污染物浓度预测 2 个环节。依据水量平衡原理, 农田排水应用 DRAINMOD 模型估算; 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, 农田排水中的污染物浓度变化则视作对应于此脉冲输入的响应过程, 而污染物在田间的复杂迁移转化过程以逆高斯概率密度函数隐含表达。以此为基础, 构建了农田尺度农业非点源污染负荷估算模型。以青铜峡灌区典型试验区为例, 对稻田排水沟中硝态氮(NO_3^- -N)和总磷(TP)的负荷过程进行了模拟, 结果表明, 模型估算结果和实测污染物负荷过程非常接近, Nash-Sutcliffe 模拟效率系数分别为 0.963 和 0.945, 表明该模型具有较高的可靠性。

关键词 农业非点源污染; 估算模型; 污染物负荷

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)12-3509-05

Establishment and Application of the Estimation Model for Agricultural Non-point Source Pollution in the Field

LI Qiang-kun^{1,2,3}, LI Huai-en², HU Ya-wei¹, CHEN Wei-wei¹, SUN Juan¹

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

Abstract The quantitative research on pollution loads is the basis of control, evaluation and management of non-point source pollution. The estimation of agricultural non-point source pollution loads includes two steps: evaluation of water discharge and prediction of pollutant concentration in agricultural drain. Water discharge was calculated by DRAINMOD model based on the principle of water balance on farmland. Meanwhile, the synthesis of fertilization and irrigation is used as an impulse input to the farmland, the pollutant concentration changes in agricultural drain is looked as the response process corresponding to the impulse input, the complex migratory and transforming process of pollutant in soil are expressed impliedly by Inverse Gaussian Probability Density Function. Based on the above, the estimation model of agricultural non-point source pollution loads at field scale was constructed. Taking the typical experimentation area of Qingtongxia Irrigation District in Ningxia as an example, the loads of nitrate nitrogen and total phosphorus in paddy-field drain was simulated by this model. The results show that the simulated accorded with measured data approximately and Nash-Sutcliffe coefficient is 0.963 and 0.945 respectively.

Key words agricultural non-point source pollution; estimation model; pollution loads

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^[1~3]。农业非点源污染是指农业生产活动中所引起的各种污染物(盐分、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。20 世纪 70 年代以来,国内外非点源污染的治理实践表明,非点源污染的负荷量化研究是控制、评价和管理非点源污染的基础^[4]。回顾国外几十年来非点源污染数学模型的研究进展,无论是早期的 CREAMS (chemicals runoff and erosion from agricultural management systems)^[5],还是近期的 SWAT (soil water assessment tool)^[6]、NGNPS (agricultural

nonpoint source)^[7]等都侧重于由于降雨径流所诱发的水土流失型非点源污染研究,而对于没有土壤侵蚀或者土壤侵蚀很少的农业非点源污染则相对研究较少,况且国外模型参数多、理论性强、机制复杂,难以在国内具体推广应用。而国内则由于研究基础薄弱、监测资料少等,相关研究开展不多,难以适应农业非点源污染控制和管理工作的需要。

在当前研究的基础上,本文将农业非点源污染估算分解为农田灌溉(降雨)排水估算和排水中的污

收稿日期: 2008-12-29 修订日期: 2009-02-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(50879027, 90610030); 黄河水利科学研究院院所专项基金项目(HKY-JBYW-2007-16); 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,硕士,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, E-mail: liqiangk@126.com

染物浓度预测 2 个环节. 依据水量平衡原理, 农田排水应用 DRAINMOD 模型估算, 同时, 借助于随机理论的发展, 构建了以逆高斯分布为概率密度函数的农田排水污染物浓度预测模型, 并将二者结合, 建立了田间尺度的农业非点源污染负荷估算模型. 经实例检验, 本模型具有较好的模拟效果, 且结构简单, 便于运用.

1 模型构建

1.1 模型原理

农田灌溉(降雨)排水中的污染负荷过程主要受两方面因素影响, 一是农田灌溉(降雨)排水量的大小, 二是排水中的污染物浓度. 其负荷过程可用式(1)表示为:

$$W_p(t) = \int_{t_1}^{t_2} Q(t) c(t) dt \quad (1)$$

式中, $W_p(t)$ 为农田排水中的污染物负荷过程 ($\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$), $Q(t)$ 为农田排水过程 ($\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$), $c(t)$ 农田排水中污染物浓度过程 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), t_1 、 t_2 为估算起止日期.

根据式(1), 分别估算农田排水及其中的污染物浓度, 即可得出农田灌溉排水中的污染物负荷过程.

1.2 农田灌溉排水模型

近年来的研究表明, 基于土壤水分运移的农田灌溉排水模型已取得较大进展, 如 SWAP(soil-water-atmosphere-plant)、DRAINMOD 等模型的开发, 在国内外都有许多成功运用的先例^[8,9]. 结合项目实际情况, 本文选用 DRAINMOD 模型估算农田灌溉排水过程.

DRAINMOD 模型是 20 世纪 70 年代末由美国北卡罗来纳州立大学 Skaggs 博士^[10] 开发的一个田间规模水文模型, 可以日或小时为时段模拟农田排水. DRAINMOD 模型所依据的基础是水量平衡原理, 在时段 Δt 内, 土壤内部(从地表到不透水层)的水量平衡方程为:

$$\Delta V = F - D - \text{ET} - \text{DS} \quad (2)$$

式中, ΔV 为土壤中的水量变化 (cm), F 为地表入渗量 (cm), D 为侧向排水量 (cm), ET 为腾发量 (cm), DS 为深层渗漏量 (cm).

DRAINMOD 模型假设侧向排水均发生在饱和区域, 在地下水位上升到地表之前应用 Hooghoudt 公式(3)计算, 在地下水位上升到地表以后, 田面有积水时, 则应用 Kirkham 公式(4)计算.

$$q = \frac{8kd_e m + 4km^2}{L^2} \quad (3)$$

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

其中 g 可由式(5)计算:

$$g = 2 \ln \left\{ \frac{\tan[\pi(2d - r)/4h]}{\tan(\pi r/4h)} \right\} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \ln \left\{ \frac{\cosh(\pi mL/2h) + \cos(\pi r/2h)}{\cosh(\pi mL/2h) - \cos(\pi r/2h)} \cdot \frac{\cosh(\pi mL/2h) - \cos[\pi(2d - r)/2h]}{\cosh(\pi mL/2h) + \cos[\pi(2d - r)/2h]} \right\} \quad (5)$$

式中, q 是排水量 ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$), 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), H 是地面积水深度 (cm), b 是从地表到排水管的深度 (cm), h 是不透水层的深度 (cm), r 是排水管的半径 (cm).

入渗率采用 Green-Ampt 公式计算, 见式(6):

$$f = A/F + B \quad (6)$$

式中, $A = k_s MS_{av}$, $B = k_s$, 分别以 $\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 计, k_s 为垂向饱和导水率 ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$), M 为土壤亏水量 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), S_{av} 为土壤湿润锋处的吸力 (cm).

DRAINMOD 模型的主要输入参数包括气象、土壤、农田排水系统的设计管理以及灌溉次数、水量等, 均可根据研究区具体情况予以确定. 由于 DRAINMOD 模型研发之初主要是针对农田暗管排水, 在明沟排水条件下, 为模拟实际排水过程, 应对模型中的排水模数、排水暗管的有效管径等有关参数做适当调整, 详见文献[11]中对模型的有关改进.

1.3 农田排水中污染物浓度估算模型

由于土壤质地、孔隙结构等在区域范围内具有很强的空间变异性和随机性, 导致污染物在土壤中的迁移转化是一个非常复杂的过程. 20 世纪 80 年代, 就有不少学者认为溶质在土壤中的运移现象是土壤内在不稳定过程的表现, 适于用随机过程的方法来研究其数量特征^[12,13]. 其中, Jury 等提出的传递函数模型(transfer function model, TFM)理论为其代表. 在传递函数模型中, Jury 等将溶质的输出表征为输入通量的函数, 而溶质在土壤中发生的动力学过程可由概率密度函数表示^[14].

基于以上认识, 可以把模拟时刻 t 之前 t' 时刻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 $c_{in}(t - t')$, 农田向外界(排水沟)输出的污染物浓度则可以看作是对应于此脉冲输入的一

个响应过程,可用传递函数 $f(t)$ 来表达, $f(t)$ 是各种作用的综合函数表示,既包含污染物在土壤中的迁移转化过程也包括作物在不同生长期根系吸收、地下水位等各种水力特性对这种迁移转化过程的影响,其本质是向田间注入一个单位浓度的脉冲输入时田间向外界排出污染物浓度的一个响应过程,可称之为浓度单位线; $c_{out}(t)$ 则是向土壤中注入 $c_{in}(t - t')$ 脉冲浓度时农田排水中的污染物浓度响应过程. 因此,农田排水中的污染物浓度可用卷积表示为:

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

式中各符号含义同上,浓度单位取 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

由于溶质在土壤中的迁移转化机制十分复杂,其输出过程也几无规律可循,因此作用函数 $f(t)$ 应具有很好的弹性和适应性,能够拟合农田排水中污染物浓度的复杂变化过程. 其次,鉴于目前我国农业非点源污染研究尚处于起步阶段,各项监测资料十分有限,函数中的各有关参数应易于确定. 综合比较之下,本项研究选用逆高斯分布 (inverse gaussian distribution) 作为式(7)中的传递函数,见式(8).

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

式中,参数 μ 和 λ 的取值区间均为 $(0, \infty)$, 二者的量纲相同,均为自变量 t 的量纲. 随着参数 μ 和 λ 的变化,逆高斯分布可组合出各种不同的曲线形状,弹性好,适应性强. 另外,逆高斯分布还具有明确的物理意义,其概念密度函数本身就是对流扩散方程的脉冲解,因此,以逆高斯分布作为田间脉冲输入的响应过程也就有充分的理论依据.

根据其数理统计性质,逆高斯分布中参数 μ 和 λ 的初值可分别用矩法和极大似然法估计^[15], 分别见式(9)、式(10). 估计参数初值后,可进一步利用文献^[16]中推荐的方法进行参数加速优选,得出最优参数.

矩法估计:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

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

极大似然法估计:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

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

式中, n 为监测试验次数; x_i 为第 i 次试验数据; 其他符号含义同上.

综合前文,农田灌溉排水以及其中的污染物浓度均可由以上公式确定,代入式(1)即可估算出农田排水中的污染物负荷过程. 需要指出的是,上述模型虽然是在农田灌溉排水的基础上推导的,但同样适用于多雨湿润地区. 在自然降水条件下,日(时)降水量可直接作为 DRAINMOD 模型的输入资料推求农田排水,同时,由于土壤本身所含的污染物浓度变化是一个非常缓慢的过程,因此,可借鉴上述浓度单位线建立过程,直接推求单位降水(1 或 10 cm)农田排出的污染物浓度单位线,进而得到实测降水条件下的污染物浓度变化,最后,同样利用式(1)计算污染负荷过程.

2 模型运用

2.1 试验概况

青铜峡灌区是我国古老的特大型灌区之一,位于黄河上游青铜峡-石嘴山河段,现状灌区总土地面积 6 239 km^2 ,灌溉面积 33.75 $\times 10^4 \text{ hm}^2$,是宁夏引黄灌区的重要组成部分,年均引黄水量约 60 亿 m^3 ,排引比高达 0.5 ~ 0.6,年均 30 余亿 m^3 灌溉退水以各种形式回归黄河干流,其携带的农业非点源污染物对黄河干流水质影响很大.

青铜峡灌区农业非点源污染试验区位于永宁县望洪镇东、西玉村(东经 106°11'、北纬 38°11'),该地区地处干旱地带,多年平均降水量 170 ~ 210 mm,年蒸发量在 1 000 ~ 1 500 mm 之间. 试验区内土壤为粉质壤土,作物种植以水旱轮作为主,水田主要为水稻,旱田包括小麦、玉米等,水旱田隔年换茬. 区内条田长度约 600 m,田间排水以明沟为主,农沟基本呈等间距平行布设,间距 100 m,沟深 100 cm,每条农沟控制面积约 6 hm^2 . 农业非点源污染试验在该区包括多个项目,本项研究拟以其中 2 条稻田排水沟为研究对象,其中 1 号排水沟为试验沟,为参数估计提供试验数据,2 号排水沟为模拟沟,其监测数据用来验证模型拟合的准确程度,两条排水沟间距约 500 m.

本项试验于 2008 年 5 ~ 9 月进行. 试验区稻田 5 月上旬播种结束,5 月 8 日开始引水灌溉,自 5 月 9 日开始,在农沟末端开始进行退水监测并提取退水水样,每 5 d 1 次,直至稻田排水过程结束. 退水过程

监测采用量水堰观测,水样采用中泓一线法在水深1/2处提取,每次1 000 mL,分析指标包括铵态氮($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^- \text{-N}$)、总氮(TN)、总磷(TP)等,按照《水和废水监测分析方法》(第四版),铵态氮采用纳氏试剂光度法、硝态氮用离子色谱法,总氮采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法、总磷采用钼锑抗分光光度法.

根据以往研究成果^[17,18],硝态氮是农田排水中氮流失的主要形式,因此,本研究以硝态氮和总磷为模拟对象.

2.2 农田灌溉排水计算

DRAINMOD 模型所需的日最高最低气温、日(小时)降水量等气象资料采用试验区所在永宁县气象局资料,土壤侧向导水率由现场用钻孔法测得,土壤水分特性曲线在实验室用离心机法测定,其它参数可依据模型原理由此换算.代入模型运行可求得稻田生长期总排水量为49.0 cm,2号排水沟控制稻田排水过程如图1所示.

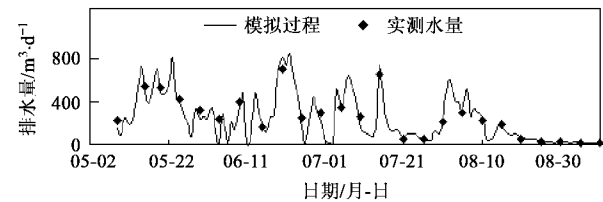


图1 灌溉排水过程模拟
Fig.1 Simulation for agricultural drain

表1 模拟地块施肥情况统计

Table 1 Statistical table of fertilization amount in simulation area						
施肥阶段	日期	肥料类型	施肥量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	折纯量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	灌水量(田间水深)/cm	折算浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
基肥	播种前	碳铵	750	132.75	15	89
		磷肥	125	15		10
返青-分蘖期追肥	5月30日	尿素	225	101.25	10	101
		磷肥	150	18		18
拔节-抽穗期追肥	6月30日	尿素	255	114.75	10	115

将表1中的折算浓度作为稻田的注入浓度 c_{in} ($t-t'$),代入式(7),可推算得出模拟排水沟农田排水中的硝态氮和总磷浓度过程,见图3.

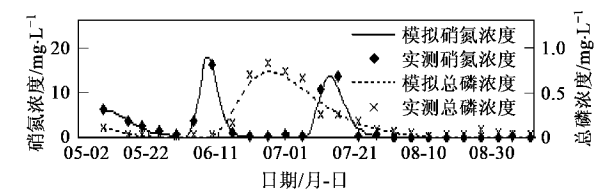


图3 农田排水中硝氮和总磷浓度变化过程模拟
Fig.3 Simulation for concentration of nitrate nitrogen and total phosphorus in agricultural drain

2.3 农田排水中污染物浓度估算

根据1号排水沟在不同时段稻田排水中所监测的硝态氮、总磷浓度,采用矩法估计 μ 、 λ 的初值,并采用加速优选方法求得最优参数.代入式(2),即可得出水稻在不同生长期对应单位脉冲输入的响应过程 $f(t)$,也即在不同生长期内向稻田注入单位浓度污染物时农田排水中的污染物浓度,将不同模拟时段的 $f(t)$ 值相连接,则可得到整个生长期农田排水中的污染物浓度变化过程,称之为浓度单位线.图2所示分别为硝态氮和总磷的浓度单位线.

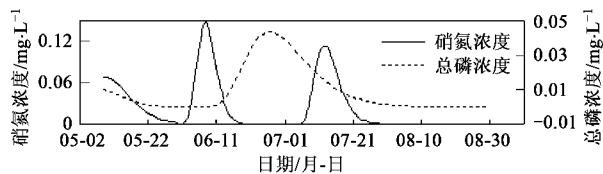


图2 稻田排水中硝氮和总磷的浓度单位线
Fig.2 Concentration unit line of nitrate nitrogen and total phosphorus in agricultural drain

调查模拟排水沟控制稻田地块的施肥过程见表1.表1中施肥量为农户调查数据,其中碳铵按含氮量17.7%折纯,磷肥按含磷12%折纯,尿素按含氮45%折纯.灌水量15 cm为稻田第一次灌溉农渠进水口量水堰测得,其后田间水深10 cm为田间多点实测水深平均值.折算浓度为折纯氮、磷溶于相应水体以后的质量浓度.

2.4 农田排水中污染物负荷估算

将农田排水及其中污染物浓度变化过程代入式(1),可求得2号排水沟控制稻田生长期硝氮和总磷的流失量分别为71.08 kg、6.76 kg,以日为步长的污染物流失过程见图4.

2.5 估算合理性检验

将2号排水沟实测所得排水量、硝氮、总磷浓度以及计算所得最终负荷分别点绘于图1、图3和图4,可以看出,模型模拟的排水、污染物浓度以及污染负荷过程与各实测过程结合较好.

同时,选用 Nash-Suttcliffe 模拟效率系数(NSC)

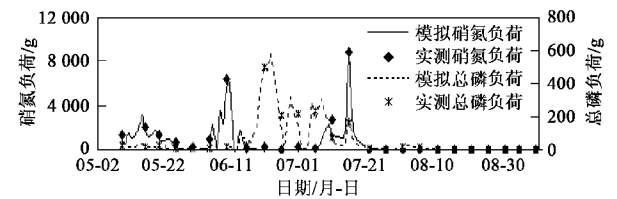


图 4 农田排水中硝氮和总磷负荷过程模拟

Fig.4 Simulation for loading of nitrate nitrogen and total phosphorus in agricultural drain

评价模型估算结果. 计算公式为：

$$NSC = 1 - \frac{\sum (x_{obs} - x_{calc})^2}{\sum (x_{obs} - \bar{x}_{obs})^2} \tag{11}$$

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 $0 \sim 1$ 之间, NSC 越大, 说明计算值与观测值匹配程度越好.

将 2 号排水沟实测所得数据与模型模拟结果分别代入式(11), 排水量、硝氮、总磷浓度以及最终负荷过程 Nash-Suttcliffe 模拟效率系数见表 2.

表 2 Nash-Suttcliffe 模拟效率系数计算结果

Table 2 Calculation results of Nash-Suttcliffe coefficients

模拟项目	排水量	硝氮浓度	总磷浓度	硝氮负荷	总磷负荷
NSC	0.880	0.972	0.964	0.963	0.945

由表 2 中模拟系数可以看出, 模型具有较好地模拟效果.

3 结论

(1) 将农业非点源污染负荷估算分解为农田灌溉排水估算和排水中的污染物浓度预测 2 个环节, 并建立了农业非点源污染负荷估算模型.

(2) 依据水量平衡原理, 农田排水应用 DRAINMOD 模型估算.

(3) 借助于随机理论的发展, 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, 构建了以逆高斯分布为概率密度函数的农田尺度排水污染物浓度预测模型.

(4) 以宁夏青铜峡灌区农业非点源污染试验区为例, 模拟了稻田排水沟中硝氮和总磷的负荷过程, 经实测数据检验, Nash-Suttcliffe 模拟效率系数分别

为 0.963 和 0.945, 表明该模型具有较好的模拟效果.

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, 李怀恩, 胡亚伟, 等. 黄河干流潼关断面非点源污染负荷估算[J]. 水科学进展, 2008, 19(4) : 460-466.

[5] Johson M G, Berg N. A frame work for nonpoint pollution control in the Great Lakes basin [J]. Soil and Water Cons, 1979, 34 (4) : 68-73.

[6] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment. Part 1 : model development [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34 (1) : 73-89.

[7] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, et al. AGNPS, Agricultural nonpoint source pollution model for evaluating agricultural watershed [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1989, 44(2) : 168-173.

[8] 王少丽, 许迪, Prashe S O, 等. 施用有机氮肥条件下地下排水中硝态氮流失的模拟研究[J]. 水利学报, 2006, 37(1) : 89-96.

[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] Skaggs R W. Field evaluation of a water management simulation model[J]. Trans ASAE, 1982, 25(3) : 667-674.

[11] 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.

[12] Bresler E. Simultaneous transport of solute and water under transient unsaturated flow conditions [J]. Water Resources Research, 1973, 9 (4) : 975-986.

[13] Yang J Z. Experimental and numerical studies of solute transport in two-dimensional saturated-unsaturated soil [J]. Journal of Hydrology, 1988, 97(3) : 303-322.

[14] White R E, Dyson J S, Haigh R A. A transfer function model of solute transport through soil, 2 Illustrative applications [J]. Water Resources Research, 1986, 22(2) : 248-254.

[15] 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.

[16] 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. 40-68.

[17] 李强坤, 李怀恩, 胡亚伟, 等. 青铜峡灌区氮素流失试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27 (2) : 683-686.

[18] 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负荷估算[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23 (4) : 15-18.