

# 河流污水饱和入渗对沿岸地下水水质影响预测研究

王超, 王沛芳, 刘桂文

(河海大学环境科学与工程学院, 江苏南京 210098)

**摘要:** 在分析野外现场观测资料的基础上, 建立河流污水饱和入渗对沿岸地下水水质影响的数学模型, 应用全隐式差分和时间中心差分格式离散方程, 并在计算过程中选择调用. 以河流污水的保守性污染因子  $Cl^{-1}$  和非保守性污染因子  $NH_4^+-N$  为例研究模型参数, 应用江苏徐州市奎河的徐村和黄桥断面实测资料进行建模和验模, 为污染河道沿岸地下水开发利用和水环境保护提供技术支持.

**关键词:** 污染河道, 饱和入渗, 数学模型, 迁移转化

中图分类号: X523      文献标识码: A      文章编号: 1000-198X(2002)06-0011-05

污染河道的污染物随入渗水体进入土壤及地下水, 对沿河两岸地下水环境造成一系列的不利影响. 为了科学合理地确定其影响范围和程度, 采用数学模型进行沿岸地下水水质的预测预报是十分必要的. 河道污染物入渗进入地下水的过程与河水补给形式有着十分密切的关系. 一般来说, 河水向地下水的补给形式可分为饱和入渗和非饱和入渗补给. 饱和入渗补给形式一般发生在我国南方地区或河流的中下游, 并且地下水埋深较浅, 河流水位及河床底部与地下水位相差较小, 河床土壤渗透充分, 土壤含水率饱和, 形成饱和连续河水入渗. 非饱和入渗补给形式一般发生在我国北方地区或河流的中上游, 并且地下水埋深较深, 河流水位及河床底部与地下水位相差较大, 河床土壤渗透不充分, 土壤含水率非饱和, 形成非饱和带河水入渗. 本文在分析野外现场观测资料<sup>[1]</sup>的基础上, 研究河流污水饱和入渗对沿岸地下水水质影响的模拟途径, 建立河流污水饱和入渗和污染物迁移的基本方程, 运用有限差分法、离散水分方程和污染物浓度方程, 得到适合于河流污水入渗对沿岸地下水水质影响的数学模型. 利用现场观测资料率定和检验参数, 为污染河道沿岸地下水开采范围的确定提供有效的预测预报手段, 实现地下水的合理开发利用.

## 1 基本方程

### 1.1 水分运动方程

假设河水入渗通过土壤时, 其土壤结构不发生变化, 认为沿河流纵向方向的地下水动力条件变化很小, 仅考虑离岸方向和垂向的水分运动. 则二维立面水分运动方程为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [K_s K_r(h) \frac{\partial h}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial z} [K_s K_r(h) (\frac{\partial h}{\partial z} - 1)] - S \quad (1)$$

式中:  $\theta$ ——土壤体积含水率 [ $L^3 L^{-3}$ ];  $h$ ——土壤水有效压力水头 [ $L$ ];  $K_s$ ——饱和水力传导率 [ $LT^{-1}$ ];  $K_r(h)$ ——相对水力传导率 [ $L^0$ ];  $S$ ——源漏项 [ $T^{-1}$ ];  $x$ ——离河岸方向的纵向坐标 [ $L$ ];  $z$ ——垂直向下的垂向坐标 [ $L$ ];  $t$ ——时间 [ $T$ ].

水分运动方程的初始和边界条件:

$$h = h_f(x, z) \quad t = 0 \quad (x, z) \in \Omega \quad (2)$$

$$\theta = \theta_f = \theta(h_f) \quad t = 0 \quad (x, z) \in \Omega \quad (3)$$

$$-K_s K_r(h) \frac{\partial h}{\partial x} = \alpha(t) \quad t > 0 \quad x = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial h}{\partial z} = 0 \quad t > 0 \quad z = 0 \text{ 和 } z = H \quad (5)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad t > 0 \quad x = L \quad (6)$$

式中:  $h_f, \theta_f$ ——计算区域  $\Omega$  内的初始压力水头 [L] 和含水率 [L<sup>3</sup>L<sup>-3</sup>];  $i(t)$ ——河流污水入渗速度 [LT<sup>-1</sup>];  $H, L$ ——计算区域  $\Omega$  内的纵向长度 [L] 和垂向深度 [L].

## 1.2 污染物入渗迁移方程

饱和入渗条件下, 污染物在土壤及地下水中迁移转化的二维立面浓度方程可概化为

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_D C}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \theta D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \theta D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \theta D_{xz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \\ &\frac{\partial}{\partial z} \left( \theta D_{zx} \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial \theta v_x C}{\partial x} - \frac{\partial \theta v_z C}{\partial z} - \lambda R_D C \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} D_{xx} &= D_m + \alpha_L v_x^2 / |v| + \alpha_T v_z^2 / |v| & D_{zz} &= D_m + \alpha_L v_z^2 / |v| + \alpha_T v_x^2 / |v| \\ D_{xz} &= D_{zx} = (\alpha_L - \alpha_T) v_x v_z / |v| \\ R_D &= \theta + \rho K_D \end{aligned}$$

式中:  $R_D$ ——迟滞系数;  $C$ ——污染物液相浓度 [ML<sup>-3</sup>];  $v_x, v_z$ ——土壤孔隙水纵向和垂向流速 [LT<sup>-1</sup>];  $D_{xx}, D_{zz}, D_{xz}, D_{zx}$ ——纵向、垂向和交叉弥散系数 [L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>];  $D_m$ ——污染物分子扩散系数;  $\alpha_L, \alpha_T$ ——纵向和垂向弥散度;  $\lambda$ ——衰减系数 [T<sup>-1</sup>];  $K_D$ ——分配系数;  $\rho$ ——土壤的体积密度 [ML<sup>-3</sup>].

污染物浓度方程的初始条件和边界条件:

$$C(x, z, t) = C_f \quad t = 0 \quad (x, z) \in \Omega \quad (8)$$

$$-\theta D_x \frac{\partial C}{\partial z} + v_x \theta C = i(t) C_0 \quad t > 0 \quad x = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0 \quad t > 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0 \quad t > 0 \quad (11)$$

式中:  $C_f$ ——计算区域污染物初始浓度 [ML<sup>-3</sup>];  $C_0$ ——河流污水的污染物浓度 [ML<sup>-3</sup>].

## 2 氮在土壤及地下水中迁移特性及模拟

氮不仅会引起江河湖库水体富营养化, 而且是危害地下水环境的主要污染因子. 因为污水处理设施较难去除氮类污染物, 所以, 研究河流污水中氮污染因子对土壤及地下水环境影响具有重要意义. 试验研究表明, 氮在土壤及地下水中的环境行为非常复杂, 主要包括硝化、反硝化、吸附、积累、水解、气化等过程. 氮的转化主要取决于土壤水体的 pH 值以及土壤的通气性、含水率、温度、细菌数和胶粒特性等因素. 当然, 氮的这些转化和影响实际上是同时发生的, 并形成非线性方式. 为了实现河流污水入渗对地下水水质影响的研究, 本文选择氮的主要的迁移转化因素作为研究对象, 其基本方程可表示为

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_D C}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \theta D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \theta D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \theta D_{xz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \\ &\frac{\partial}{\partial z} \left( \theta D_{zx} \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial v_x C}{\partial x} - \frac{\partial v_z C}{\partial z} - K_a \theta C \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta Y}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \theta D_{xx} \frac{\partial Y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \theta D_{zz} \frac{\partial Y}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \theta D_{xz} \frac{\partial Y}{\partial z} \right) + \\ &\frac{\partial}{\partial z} \left( \theta D_{zx} \frac{\partial Y}{\partial x} \right) - \frac{\partial v_x Y}{\partial x} - \frac{\partial v_z Y}{\partial z} - K_b \theta Y \end{aligned} \quad (13)$$

式中:  $C$ ——土壤水溶液中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的浓度 [ML<sup>-3</sup>];  $Y$ ——土壤水溶液中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的浓度 [ML<sup>-3</sup>];  $K_a, K_b$ ——一阶衰减转化系数 [T<sup>-1</sup>]. 方程式 (12) 及 (13) 中的  $v_x, v_z$  可表示为

$$v_x = - \frac{K_s K_f(h)}{\theta} \frac{\partial h}{\partial x} \quad v_z = - \frac{K_s K_f(h)}{\theta} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (14)$$

式 (1) 及 (12) 及 (13) 为水分和氮污染物迁移转化基本方程. 本文运用全隐式差分格式和时间中心差分格式进行离散. 在计算过程中, 通过格式的选择调用, 确定最合适的计算模式, 克服出现在真解周围波动和导致数值

解耗散的现象.当采用差分格式时,需要平均模型中的水力传导率项来产生相邻单元体内的水力传导率. Appelf<sup>[2]</sup>对饱和系统( $K_r = 1.0$ )采用算术平均和调和平均的算法进行比较后认为:水力传导率的空间变化函数应结合单元体大小来决定;Haverkamp和Vauclair<sup>[3]</sup>研究了非饱和系统( $K_r < 1.0$ )的水力传导率认为:单元体内部的水力传导率采用几何平均较好.然而,上述两类方法均将 $K_s, K_r(h)$ 统一起来离散,从而使估算结果不十分理想.本文采用分散平均方法来分别表示参数 $K_s$ 和 $K_r(h)$ ,该方法将饱和和水力传导率( $K_s$ )和相对水力传导率( $K_r(h)$ )分散开来估算,即采用调和平均估算饱和水力传导率部分,采用几何平均或权重算术平均来估算相对水力传导率部分,取得了良好的效果<sup>[4]</sup>.

### 3 模型模拟

数值模型被用来模拟计算江苏徐州奎河徐村和黄桥断面.该河流的污染状况及地质条件详见文献[1].计算区域为垂直于奎河东岸的徐村与黄桥两个断面,区域水平距离为河岸至取水井之间的200m,垂向深度为地下1.4m至10.0m之间的8.6m.即长200m,深8.6m的计算范围,其中地下水位(埋深2.0m)以上0.6m为毛细管作用流动区,以下为非毛细管作用的饱和流动区.按数值计算要求,区域被划分为8600个四边形单元网格,垂向网格间距 $\Delta z$ 为2.0cm,水平向网格间距 $\Delta x$ 为100cm.特别是采用了双动力函数模型,这种小网格单元划分改进了数值解的收敛性.

利用徐州奎河徐村和黄桥现场观测的资料<sup>[1]</sup>,进行河流污水饱和入渗对沿岸地下水水质影响预测模型的参数率定.以非吸附和衰减的保守性因子率定水动力参数和污染物弥散系数,此时方程(12)(13)中的 $R_D = 1, K_a = K_b = 0$ 采用徐村断面1998年1月29日、4月5日、6月10日的实测值,运用反问题求解技术<sup>[5]</sup>率定出方程组中的有关参数.

$Cl^{-1}$ 和 $NH_4^+ - N$ 是同时检测的不同污染因子,水分运动的水力参数相同,污染物弥散系数相近.因此,将保守性 $Cl^{-1}$ 率定的水动力特性参数和污染物弥散系数直接代入到方程(1)和(7)中,然后再代入到方程(12)和(13),运用反问题求解技术率定 $R_D, K_a, K_b$ 参数<sup>[6]</sup>,这种方法有效地提高了参数率定效率,降低了非保守性污染物参数率定反问题求解对角矩阵的维数,精度完全满足要求.参数率定成果见表1和表2.

表1 水动力特性参数率定平均值

Table 1 Average value of hydrodynamic parameters

$z/cm$	饱和含水率 $Q_{s, i=1}$ ( $cm^3 \cdot cm^{-3}$ )	剩余含水率 $\theta_{r, i=1}$ ( $cm^3 \cdot cm^{-3}$ )	水力传导率 $K$ ( $cm \cdot s^{-1}$ )	压力水头 $h$ /cm	土壤适合系数 $\delta$ /cm <sup>-1</sup>
0.000 ~ 60.00	0.463	0.050	$4.08 \times 10^{-4}$	3	0.66
60.00 ~ 460.0	0.446	0.045	$3.25 \times 10^{-4}$	2	0.57
460.0 ~ 860.0	0.424	0.060	$2.57 \times 10^{-3}$	0	0.30

表2 污染因子氮迁移转化参数率定均值

Table 2 Average value of nitrogen transport and transformation

$z/cm$	$D_m$ ( $m^2 \cdot h^{-1}$ )	$\alpha_L$ /m	$\alpha_T$ /m	$R_D$ /h	$K_a$ /h <sup>-1</sup>	$K_b$ /h <sup>-1</sup>
0.000 ~ 60.00	$1.8 \times 10^{-6}$	0.04	0.01	1.8	0.023	0.008
60.00 ~ 460.0	$1.8 \times 10^{-6}$	0.05	0.01	1.6	0.018	0.008
460.0 ~ 860.0	$1.8 \times 10^{-6}$	0.05	0.01	1.6	0.016	0.008

取表1、2中的参数代入研制的数值计算模型进行模拟计算,并输入徐村断面1998年8月15日,1999年1月29日、4月5日、6月10日、8月15日和黄桥断面所有观测资料进行模型验证.图1为黄桥断面1999年1月29日 $NH_4^+ - N$ 和 $NO_3^- - N$ 模型计算值与实测值,由图可知,数值计算值与实测值吻合良好. $NH_4^+ - N$ 在地下水中运移的衰减速率明显高于 $NO_3^- - N$ .当 $NH_4^+ - N$ 随河流水体入渗地下水的一定范围内( $L < 70m$ )衰减很快,浓度下降明显,之后的运移中衰减较慢,达到取水井时,其浓度较低.而 $NO_3^- - N$ 随河流水体入渗地下水的一定范围内( $L < 70m$ )衰减虽然也较快,但明显低于 $NH_4^+ - N$ ,并在之后的运移中浓度值基本恒定.这主要是由于 $NH_4^+ - N$ 运移中转化为 $NO_3^- - N$ ,使 $NO_3^- - N$ 浓度下降不明显.图2为徐村和黄桥断面在1998年8月15日,1999

年1月29日、4月5日、6月10日、8月15日  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度实测值与计算值比较,两者误差均在15%之内.这表明本模型应用于河流污水入渗对地下水环境影响模拟效果较好.

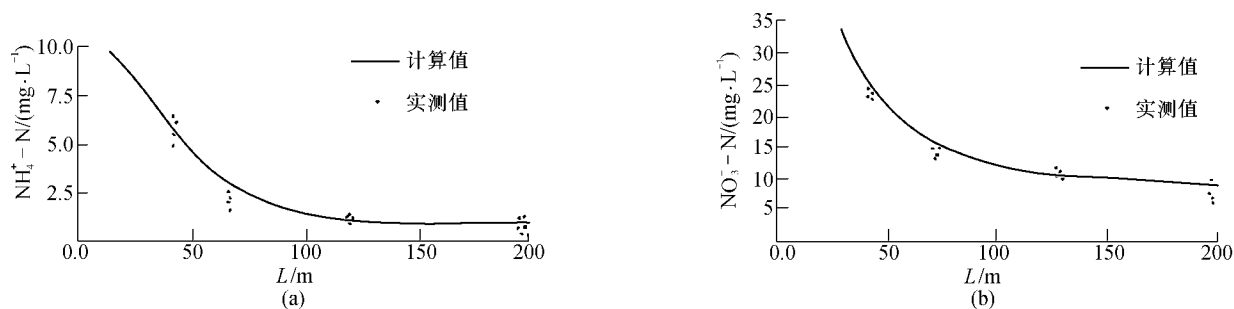


图1 黄桥断面1999年1月29日  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  模型计算值与实测值

Fig.1 Comparison of calculated and observed  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  values for January 29, 1999

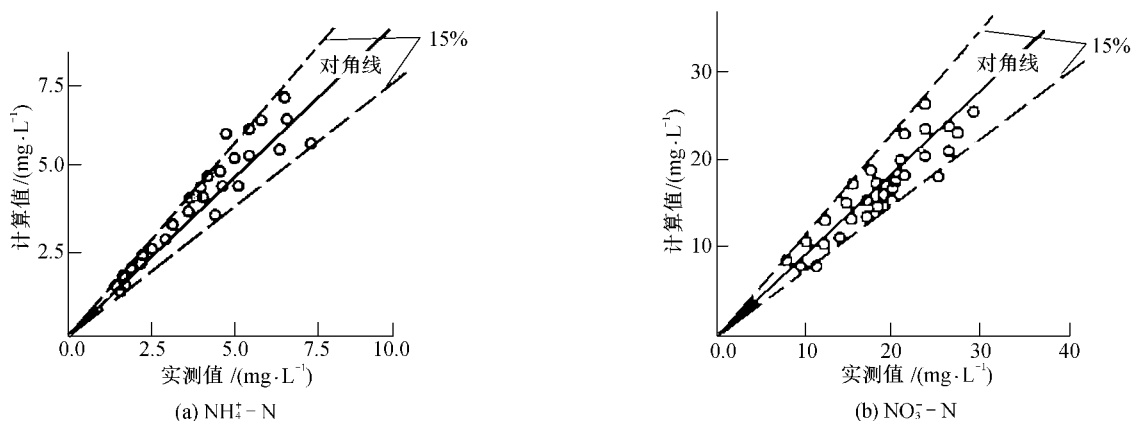


图2 两个断面  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度的计算值与实测值比较

Fig.2 Comparison of calculated and observed concentration of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and  $\text{NO}_3^- - \text{N}$

### 4 结 语

根据河流污水饱和入渗对沿岸地下水水质影响规律,采用分块连续方式描述非线性水力特性,分析氮迁移转化过程,运用有限差分格式离散水分和污染物在土壤中运移方程,应用分散平均方法估算水力传导率,得到了数值计算模型.经现场观测资料验证表明,计算预测值与实测值吻合良好,说明该计算模式是可行的,计算结果是可靠的,可以为污染河道沿岸地下水开发利用和水环境保护提供决策依据.

### 参考文献:

[1] 王超,李勇,包振琪. 污染河道对沿岸地下水环境影响规律的研究[J]. 水科学进展, 2002, 13(5): 529 ~ 536.

[2] Appel C A. A note on computing finite different interblock transmissivities[J]. Water Resources Research, 1976, 12(3): 561 ~ 563.

[3] Haverkamp R, Vauclin M. A note on estimating finite difference interblock hydraulic conductivity values for transient unsaturated flow problems[J]. Water Resources Research, 1979, 15(1): 181 ~ 187.

[4] 王超,阮晓红,朱亮. 水分及非保守性污染物在土壤中运移数值模拟[J]. 河海大学学报, 1996, 24(3): 5 ~ 11.

[5] Mishra S, Parker J C. Parameter estimation for coupled unsaturated flow and transport[J]. Water Resources Research, 1989, 25(3): 385 ~ 396.

[6] 王超,顾斌杰. 非饱和土壤溶质迁移转化模型参数优化估算[J]. 水科学进展, 2002, 13(2): 184 ~ 190.

## Prediction of impact of river wastewater saturated infiltration on offshore groundwater quality

WANG Chao , WANG Pei-fang , LIU Gui-wen

( College of Environmental Science and Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China )

**Abstract :** A mathematical model is developed for analysis of the impact of river wastewater saturated infiltration on offshore groundwater quality based on field data. The discrete equations with implicit differential and time-center differential formats are used in calculation. With the conservative pollution factor  $\text{Cl}^-$  and non-conservative pollution factor  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  for river wastewater as examples for research of model parameters , the model is established and verified based on the field data of Xucun and Huangqiao cross sections at Xuzhou City , Jiangsu Province , providing a technologic support for groundwater development and water environment protection in riparian areas along polluted rivers.

**Key words :** polluted river ; saturated infiltration ; mathematical model ; transport and transformation

---

### 水利人的网上家园——水信息网

水信息网是由水利部海河水利委员会主办、天津市龙网科技发展有限公司承办的面向水利的大型行业门户网站,自 1999 年 11 月 19 日开通以来,水信息网为读者提供了全面、及时的国内国际水利行业新闻、图片视频信息和科技学术论文,拥有一大批涵盖行业高层领导、学界名家的忠实用户。水信息网现已成为业内影响较广的网站之一,也是目前我国较大的行业网络媒体之一。水信息网等水利行业四大骨干网站的开通与发展被列入我国 20 世纪水利大事年表。

水利部部长汪恕诚,副部长敬正书、张基尧、翟浩辉、陈雷,纪检组长刘光和,总工程师高安泽、何文垣,天津市市长李盛霖、副市长孙海麟等领导先后视察网站,并多次对网站的发展作了直接指示。

全心全意为水利人服务是水信息网一贯奉行的宗旨,水信息网希望能为读者提供最完善的服务。水事频道报道国内各类一线媒体的水利新闻,更新速度快;技术频道拥有全世界范围的原创征文,并与多家国内权威水利学术(技术)刊物有合作伙伴关系;国际频道关注国际热点,每天都有最新译稿上网;商务频道商家云集,蕴涵无限商机。水信息网有涵盖水利行业方方面面的 16 个大型水利数据库,并设有学者之家和记者之家,来自技术界和新闻界的众多名家们在这里筑起自己的温馨家园,水信息网还拥有充分展示网络多媒体优势的水利视频新闻栏目……

水信息网域名: <http://www.hwcc.com.cn> 或 <http://www.waterinfo.net.cn>

网管信箱: [news@hwcc.gov.cn](mailto:news@hwcc.gov.cn) 联系电话: 022-24102117 24102110 联系人:汪先生,史小姐

(汪浩波供稿)