

# 傍河地下水水源地污染模式研究\*

李 铎 宋雪琳 张燕君

(石家庄经济学院资源环境与工程系)

**摘 要** 傍河取水是常见的地下水供水形式之一,但水源地的水质常常受到河流污染物的威胁。近年来,随着区域地下水位的下降和开采条件的变化,河水补给地下水的形式也趋于多样化,从而影响着污染物的迁移。本文通过对河水与地下水的各种关系的分析,给出了河水污染地下水的各种模式,并综合得出其数学模型及其解,最后用实例说明其应用过程。

**关键词** 污染模式 傍河地下水水源地 金堤河 水源地污染预测

目前,城市工业和生活污水,不论是处理过的,还是未经处理的,其最终均排入河流,对河水造成不同程度的污染。河水与地下水之间的关系,随着区域地下水位的下降和开采条件的变化,也越来越复杂。因此,河水中的污染物,通过河床下地层进入含水层的运移模式也有差别。在傍河取水的水源地中,为了尽可能地掠夺河水对地下水的补给量,开采井平行于河流布置,这样地下水在含水层中的运动,可概化为一维流动。

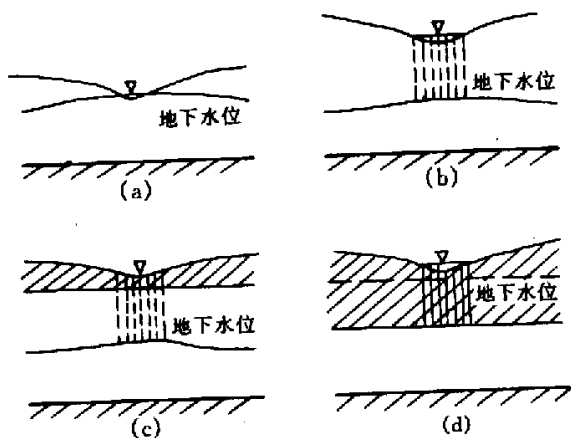


图 1 河流补给地下水模式图

Fig. 1 Illustration of the models which the river water recharges groundwater

## 1 河水补给地下水的模式

五六十年代,由于区域地下水位埋深较浅,河水与地下水的关系比较简单,多数为渗入式补给。近年来,随着区域地下水位的下降和局部地下水的超量开采,在河流的许多地段出现地下水与河流“脱节”现象。另外,由于河床下底泥层的沉积和弱透水层的存在,使地下水与河水的关系更加复杂。根据河床下底泥和地层岩性特征,以及河水位与地下水位的关系,将河流补给地下水的模式分为以下几种类型:

(1) 河床下分布有透水性较强的含水层,隔水底板埋藏较浅,河水与地下水有直接水力联系的侧向渗入式补给(图 1a)。在该条件下,河边处的地下水位与

\* 石家庄经济学院科研基金资助,编号 98005

第一作者 李铎男,1963 年生,副教授,长期从事水文地质研究,邮编 050031

河水位相一致,这时河水位就可当做该处的地下水位,地下水流可近似地看作水平流。

(2)河床下为含水层,且比较厚,地下水位低于河床,使河水与地下水脱节(图 1b),河水以垂直渗入式补给地下水,河水补给地下水的渗透速度基本上保持不变,不受地下水位高低的影响。地下水位以上的地下水流为非饱和流。

(3)河床下有底泥或亚粘土类弱透水层分布,地下水位位于底泥层之下(图 1c),河水越过底泥层后垂直下渗补给地下水,河水下渗补给地下水的渗透速度保持不变,地下水位以上的地下水流为非饱和流。

(4)河床与含水层之间的地层为弱透水层,这时含水层的地下水为承压水,河水通过越流的形式补给地下水(图 1d),其补给量取决于弱透水层的渗透性和厚度,以及河水位与地下水位之差值。地下水在弱透水层的渗透流速由达西定律确定。

2 傍河水源地的水质模型

根据以上河水补给地下水的模式,将河水中污染物在地下迁移运动的规律概括如下:

(1)对于河水补给地下水模式(图 1a),河水与地下水有密切水力联系,河水直接补给地下水,河流可被概化处理为地下水水源地的一类边界条件。如果忽略地下水的垂向流动时,地下水流可概化为垂直于河流的一维水平运动。

(2)对于河水补给地下水模式(图 1b、c),河水与地下水脱节,污染物在地下的迁移分为 2 个阶段:①为河床下的垂向非饱和一维运动;②为饱和带中水平向的一维饱和运动。

(3)对于河水补给地下水模式(图 1d),河水通过越流补给地下水,污染物在地下的迁移同样分为 2 个阶段:①为河床下的垂向一维饱和运动;②为含水层中水平向一维饱和运动。

综上所述,污染物迁移模型均可分为 2 个阶段(模式(图 1a)为缺少第一阶段的特殊情况),而每个阶段污染物的迁移均概化为一维模型,所以不同阶段的数学模型均可用下式表示:

$$\begin{aligned} D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} &= R \frac{\partial C}{\partial t} & 0 \leq x < \infty, t > 0 \\ C(x, 0) &= 0 & 0 \leq x < \infty \\ C(0, t) &= C_0 & t > 0 \\ C(\infty, t) &= 0 & t \leq 0 = 0 \end{aligned}$$

式中: $C$ ——地下水中污染物的浓度; $D$ ——弥散系数; $v$ ——地下水的实际流速; $C_0$ ——模拟区域起点的浓度; $R$ ——迟后因子。

3 金堤河水污染水源地预测实例

金堤河位于濮阳市南部,由于接受上游城镇和企业的污水排放,金堤河受到一定程度的污染,河水水质受排放量的影响,污染严重期  $COD$  最高达  $115\text{ mg/L}$ 。

目前,濮阳市城市供水的集中开采区位于金堤河北岸的濮阳市市区,形成以市区为中心的稳定降落漏斗,而金堤河南岸的开采量很小,在现状条件下,金堤河接受南岸地下水的补给,然后又补给北岸地下水。由于南岸地下水比较丰富,故在南岸建立傍河取水水源地。并就水源地建成后,是否受到金堤河水中  $COD$  的污染进行了预测。

3.1 污染预测模型

金堤河下包气带岩性以粉土为主,含水层岩性以细砂为主,水源地主要开采该含水层中的地下水。根据水文地质条件分析,金堤河水中污染组份进入水源地可概化为 2 个过程:①污染物随河水通过河床下面地层垂直下渗补给含水层,污染物的迁移可概化为垂向一维运动;②污染物进入含水层后水平迁移到水源地,由于开采井的布置与河流平行,近似地认为污染物在含水层迁移为水平一维运动。其数学模型均可用上式表示。

模型的解析解为:

$$C_i = \frac{C_0}{2} [ \operatorname{erfc}(\xi - \eta) + e^{4\xi\eta} \operatorname{erfc}(\xi + \eta) ]$$
$$\xi = \frac{x}{2\sqrt{\frac{Dt}{R}}}, \quad \eta = \frac{\frac{vt}{R}}{2\sqrt{\frac{Dt}{R}}}$$

式中: $C$ ——各组分在  $t$  时刻  $x$  处的浓度; $C_0$ ——各组分在  $x=0$  处的浓度; $x$ ——渗流长度; $t$ ——预报时间;其他符号同前式。

3.2 模型参数确定

模型参数的确定采用土柱实验法。土柱 1 模拟河床下地层结构,依实际地层结构按比例采用粉土、亚粘土互层装柱;土柱 2 模拟含水层,采用细砂装柱。土柱采用 70 型渗透仪,土柱底端进水,水流通过土柱从上端流出,采用马氏瓶定水头供水。

3.2.1 物理参数确定 自下而上对土柱进行饱水,记录饱水用去水量,可求出土柱的孔隙度。渗透系数通过达西实验求得。土柱物理参数见表 1。

表 1 土柱参数表  
Table 1 The soil parameter in column

土柱号	岩性	柱高/cm	土柱面积/cm <sup>2</sup>	孔隙度	渗透系数/m·d <sup>-1</sup>
1	粉土、粘土互层	22.3	70	0.428	0.270
2	细砂	27.3	70	0.275	5.275

3.2.2 弥散系数  $D$  的确定 选择  $\text{Cl}^-$  做为指示剂,人工配制溶液浓度  $C_0 = 396.05 \text{ mg/L}$ ,由上部出口取样测定不同时刻  $\text{Cl}^-$  的浓度  $C_i$ ,并计算  $\alpha (C = C_i / C_0)$ ,结果见图 2。

弥散系数  $D$  可利用下式求得<sup>[1]</sup>:

$$D = \left( \frac{x - vt_{0.16}}{\sqrt{t_{0.16}}} - \frac{x - vt_{0.84}}{\sqrt{t_{0.84}}} \right)^2$$

式中: $D$ ——弥散系数; $x$ ——土柱长度; $v$ ——实际流速; $t_{0.16}$ 、 $t_{0.84}$ ——出口处相对浓度达到 0.16 和 0.84 时的时刻。

由上式计算的结果为:混合柱  $D_1 = 2.452 \text{ m}^2/\text{d}$ ,细砂柱  $D_2 = 7.78 \text{ m}^2/\text{d}$ 。

3.2.3 分配系数  $K_d$  的确定 分配系数  $K_d$  采用吸附降解实验确定,人工配制含 COD 为 1628.0 mg/L 的渗透溶液,在出口处取样分析浓度的变化,当出口处浓度达到初始浓度时结束,实验结果见图 2。

分配系数  $K_d^{[2]}$ 由下式求得：

$$K_d=\frac{V\times\Delta t}{n\times L}$$

式中： $K_d$ ——分配系数； $V$ ——渗流速度； $n$ ——有效孔隙度（取给水度的经验值<sup>[3]</sup>）； $L$ ——试样长度； $\Delta t$ ——非吸附组分和吸附组分在渗出液中半浓度出现的时间差。

所取参数及计算结果见表 2。

表 2 分配系数计算表

Table 2 Distribute coefficient from calulation

土柱	$n$	$L/m$	$V/m\cdot d^{-1}$	$\Delta t/d$	$K_d$
混合柱	0.07	0.223	0.178	0.396	4.52
细纱柱	0.21	0.273	1.042	0.146	2.654

3.3 水源地污染预测

水源地污染的预测分为两个阶段：第一阶段计算预测时段末河水中  $COD$  垂直下渗穿过河床下弱透水层进入含水层的浓度；第二阶段，以该浓度作为初始浓度，计算时段末  $COD$  在含水层中水平迁移到水源地的浓度。

河床下地层的垂直渗透系数取土柱实验值  $0.027\text{ m/d}$ ，河床下地层厚度取  $5\text{ m}$ （实际厚度），河水位与河床下含水层中地下水位水头差为  $0.5\text{ m}$ ，则河床下地层中的垂向渗透速度为  $0.027\text{ m/d}$ 。含水层的渗透系数取抽水实验值  $8\text{ m/d}$ ，规划水源地距河流  $200\text{ m}$ ，水源地开采后产生的降深设置为  $20\text{ m}$ ，则地下水在含水层中的渗透速度为  $0.8\text{ m/d}$ 。

预报时，金堤河水中  $COD$  的浓度设置为两种方案：第一方案考虑污水未经处理排放，取现状河水污染的最大浓度  $120\text{ mg/L}$ ；第二方案考虑污水经处理后排放，取地面水Ⅲ类水标准要求的浓度  $6.0\text{ mg/L}$ 。

金堤河水污染受季节影响，枯水期河流流量小，污染严重；丰水期由于雨水的汇入，污染浓度稀释，一般不超标。所以预报期选择枯水季节天数  $250\text{ d}$ 。

迟后因子  $R$  由下式求得：

$$R=1+\frac{1-n}{n}\times K_d$$

式中： $R$ ——迟后因子； $n$ ——有效孔隙度； $K_d$ ——分配系数

将  $n$  和  $K_d$  代入上式求得  $R$  值，混合柱为  $61.05$ ，细砂为  $10.98$ 。

将以上参数代入模型的解，可计算出  $COD$  在时段末河床下含水层中地下水的浓度，并以该浓度作为初始浓度计算时段末  $COD$  迁移到水源地的浓度。预报结果见表 3。

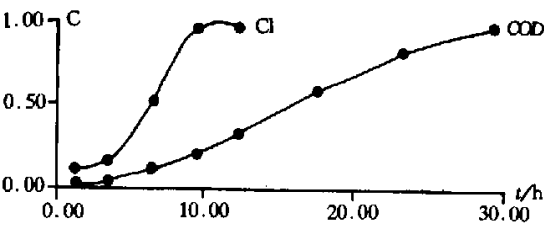


图 2  $Cl^-$  和  $COD$  实验结果图

Fig.2 Both  $Cl^-$  and  $COD$  from results of experiment

表 3 水源地 COD 污染预报结果

Table 3 COD pollution forecasting in the groundwater supply source

预报方案	时段末河床下含水层中地下水 COD 浓度 /mg·L <sup>-1</sup>	时段末水源地地下水中 COD 浓度 /mg·L <sup>-1</sup>
1	32.725	0.0
2	1.636	0.0

由此可见 ,河水中 COD 含量不同时 ,河床下含水层将受到不同程度的污染 ,但水源地不会受到 COD 的污染。

参 考 文 献

1 林年丰 李昌静等. 环境水文地质学. 北京 地质出版社 ,1990.  
2 沈照理 朱宛华等. 水文地球化学基础. 北京 地质出版社 ,1993.  
3 王大纯 张人权等. 水文地质学基础. 北京 地质出版社 ,1995.

A Study on the Pollution Model of Groundwater Supply Source beside the River

Li Duo Song Xuelin Zhang Yanjun  
( Shijiazhuang University of Economics )

**Abstract** The pumping of groundwater beside the river is one of the common types of groundwater supply. Nevertheless ,the water quality is commonly threatened by pollutants in the river. In recent years ,with the lowering of groundwater table in the region and the changing of exploitation condition ,the types which the river recharges groundwater tend to become varied , which affects the migration of pollutants. Through the analysis of various relations between river water and groundwater ,the models by which the river water pollutes groundwater and the related math models as well as their solutions are given in this paper. Finally a practical example is used to illustrate the process of application.

**Key words** pollution model groundwater supply source beside the river Jintihe River pollution forecast for groundwater supply source