

# 突发水污染事故污染云团快速追踪实验研究

周超, 陈政, 蒋婷婷, 景龙飞

( 海大学 环境学院, 江苏 南京 210098 )

**摘要:** 以南水北调中线邢石界至古运河南段(邢古段)为例,建立了该渠段水质模拟模型,模拟了污染物扩散的规律。根据模拟结果建立了按照污染物投入量、投入位置和报警响应时间进行快速插值输出峰值浓度、位置和污染带范围等结果的应急决策系统,并与模拟结果进行比较。结果表明:所建立的基于插值法的快速应急决策系统能够满足决策的精度要求,插值计算污染物浓度峰值与模拟结果相差在 0.10 mg/L 范围内,污染云团到达位置相差在 500 m 范围内,长度相差在 100 m 范围内,该系统具有快速响应、预测准确的特点。邢古段为多支流分岔口的渠道,数值模拟法建模以及运算较插值法所耗时间长,插值法可为快速决策节约时间。

**关键词:** 水污染; 突发水污染事故; 数值模拟; 插值法; 应急措施

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)02-0200-06

## Experiment on fast track of cloud cluster caused by sudden accident of water pollution

ZHOU Chao, CHEN Zheng, JIANG Tingting, JING Longfei

(College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Taking Xinggu section which is from Xingshijie to southern segment of ancient channel in the middle route of south-to-north water transfer project (Xing-Gu segment) for example, the paper established the model of water quality simulation in the section and simulated the rule of pollutant dispersion. According to the simulation results, it established emergency decision system in accordance with the amount, location and alarm response time of pollutant to carry out fast interpolation and output peak concentration, location and range of pollution zone, and compared which with the simulation results. The result shows that the fast emergency decision system can meet the accuracy requirement of decision, the peak concentration of pollutants and simulation results differ in the range of 0.10mg/L, the difference of location of pollution cloud cluster getting to is within 500m, the length difference of pollution cloud cluster is in the range of 100m. The system has the features of fast response, accurate prediction. The Xinggu section is a tributary of multi-channel. Compared with the method of numerical simulation, the interpolation method can save time of quick decision.

**Key words:** water pollution; sudden water pollution accident; numerical simulation; interpolation method; emergency measure

当今世界各地都存在水资源分布不均匀的问题,导致调水工程规模不断变大<sup>[1-3]</sup>。由于调水工程输水线路长,沿线容易发生突发水污染事故<sup>[4]</sup>。该类事故无固定的排放方式和途径,在瞬时或短时间内有大量的污染物排放,因此对环境可造成严重污染<sup>[5]</sup>。国外在 20 世纪 80 年代已经建立了自动连续监测系统,并使用了遥感、遥测手段,可在极短时间内观察、反映空气和水体污染物浓度的变化,预测

预报未来的环境质量<sup>[6]</sup>。Nigel W. T. Quinn<sup>[7]</sup>介绍了美国加州水资源局建立的一套突发环境事故响应系统,该系统可以与实际水质监测网连接,并与预测模型工具相结合,实现对水质的实时监控。Madsen 等<sup>[8]</sup>在第四届亚太地区 DHI 软件技术论坛上提出了在线监测与数学模型的集成预警模式,并作为泰国曼谷的城市水质管理决策支持系统得到了应用。随着突发性污染事件控制重要性的增加,我国应急

收稿日期:2013-11-22; 修回日期:2013-12-08

作者简介:周超(1989-),男,山西太原人,硕士研究生,研究方向为环境规划管理与评价、水生态环境保护与治理。

监测在机构、编制、机制及装备上也有了较大的提高<sup>[9]</sup>,应急监测技术与方法较为先进,网络技术和 GIS 技术运用良好。许多学者以地理信息系统(GIS)作为开发平台,建立水质预警系统,通过该系统可以识别污染源,追踪污染源的迁移过程,并应用于汉江、松花江等突发水污染事故<sup>[10-11]</sup>。刘冬华等<sup>[12]</sup>引入死区模型及其解析解,对污染物在水体中的时空变化进行快速模拟,为环境风险管理及突发环境污染应急预案提供了一定信息。Cheng C Y 等<sup>[13]</sup>应用模糊综合评价方法对水库水污染事故做出了紧急规划评估研究,为相关部门进行事故紧急管理提供依据。针对突发水污染事故,国内外学者在监测和预警方面借助模型软件建立了一些预测模型,但是这些模型的建立需要大量的基础数据,同时模型的运行需要大量的时间,目前还没有一种快速响应,同时又预测准确的应急决策系统。

本文针对南水北调中线工程自身特征,选取有毒农药三唑磷为典型污染物,在常规水质模拟的基础上,建立按照污染物投入量、投入位置和报警响应

时间进行的快速插值法的应急决策系统,并与常规一维水质模拟模型进行比较研究,对可能发生的突发水污染事故进行预测分析,迅速确定污染云团位置和浓度范围,为快速处理处置渠道中重大突发性水污染事故提供决策依据。

## 1 实验系统

### 1.1 实验装置

南水北调中线主干渠宽深比不大,可看做顺直渠道,实验装置主要由 3 部分组成:主体水槽(全长为 31.725 m、净宽 1.2 m、槽深 0.85 m)、贮水池和配水系统。主体水槽下游端设置配水系统,包括三角堰、退水闸和导流暗管,实验装置见图 1。

污染物投放点设置在稳流花墙下游 4 m 处,该处水流已基本稳定。用来观测污染物质运移扩散特性的断面分别设置在稳流花墙下游的 5 m(A)、10 m(B)、15 m(C)、20 m(D)、25 m(E)和 30 m(F)处,每个断面上分别等距设置 5 个监测点位。监测点布置如图 2。

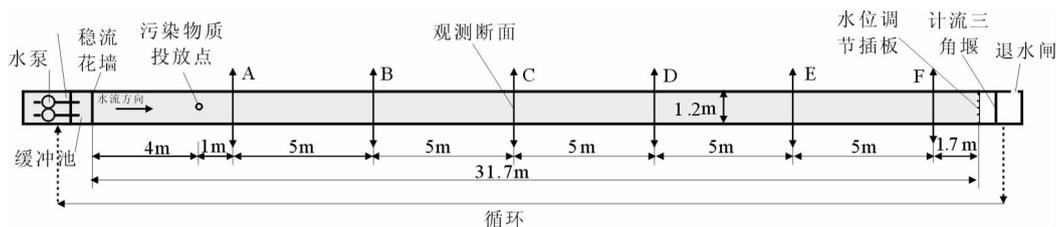


图 1 实验装置示意图



图 2 监测断面上监测点布置示意图

### 1.2 实验方案

利用水泵以及水位调节插板来控制实验工况。工况  $S_1$  上游水深 16.9 cm, 下游水深 19.8 cm, 平均流速 18.5 cm/s; 工况  $S_2$  上游水深 48.2 cm, 下游水深 52 cm, 平均流速 6.7 cm/s。

三唑磷投放实验采取瞬时投放(浓度为 100 mg/L, 体积为 1.4 L, 在约 6 s 内倾倒入水槽)(投放点见图 1), 随后在各监测断面取样, 采用高效液相色谱法(HPLC)测定三唑磷的浓度, 并分析其分布规律。

## 2 数学模拟与分析方法

### 2.1 数值模拟

2.1.1 研究对象 选取南水北调中线邢石界至古运河河南渠段(邢古段)为研究对象, 渠道概化图见图 3。

2.1.2 一维水质模型基本方程 南水北调中线主干渠宽深比不大, 污染物在较短的时间内, 基本上能在断面内均匀混合, 污染物浓度在断面上横向变化不大, 因此渠道中污染物质的迁移、转化过程可以用一维对流扩散方程来表述:

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial QC}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left( AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) = -AKC + C_q q \quad (1)$$

式中:  $C$  为物质浓度;  $D$  为纵向扩散系数;  $C_q$  为源/汇浓度;  $K$  为衰减系数。

2.1.3 边界条件和参数选择 邢古段设计流量为 220 m<sup>3</sup>/s, 坡降 1/30000 ~ 1/16200, 渠道设计水深为 6 m。根据 Fischer<sup>[14]</sup> 经验公式,  $D_x = 0.011 \frac{u^2 b^2}{hu^*}$ ,

$u^* = \sqrt{gh_i}$ , 式中:  $u$  为断面平均流速;  $b$  为水面宽度, 计算南水北调各渠段的纵向离散系数为  $92.9 \sim 116.3 \text{ m}^2/\text{s}$ 。根据均匀流谢才公式和曼宁公式, 确定该渠段综合糙率系数为  $0.0157$ 。

2.1.4 离散和求解 为保证离散过程中质量守恒以及减少数值耗散, 采用时间和空间的全隐中心差分格式对方程进行离散, 并通过追赶法进行求解。

## 2.2 快速插值法预测模型

假定已知  $x$  端点处的值  $y_i = f(x_{ki}), y_{i+1} = f(x_{k+1})$ , 要求线性插值多项式  $L_i(x)$ , 使它满足:  $L_i(x_k) = y_k; L_i(x_{k+1}) = y_{k+1}$ 。它的几何意义就是通过两点  $(x_k, y_k)$ 、 $(x_{k+1}, y_{k+1})$  的直线,  $L_i(x)$  的表达式为:  $L_i(x) = \frac{x - x_{k+1}}{x_k - x_{k+1}}y_k + \frac{x - x_k}{x_{k+1} - x_k}y_{k+1}$ 。可以看出

$L_i(x)$  是两个线性函数  $L_k(x) = \frac{x - x_{k+1}}{x_k - x_{k+1}}$ ,  $L_{k+1}(x) = \frac{x - x_k}{x_{k+1} - x_k}$  的线性组合, 其系数分别为  $y_k$  及  $y_{k+1}$ , 即  $L_i(x) = y_k L_k(x) + y_{k+1} L_{k+1}(x)$ 。

此差值法针对无支流区段, 对于有支流区段可计算出进入支流段污染物分布, 在支流段中再按上述插值法进行计算。

## 2.3 模拟工况

工况 1:  $1 \text{ t}$  非保守物质 (三唑磷) 在公路桥 1 (距起点  $632 \text{ m}$ ) 处泄漏, 见图 3。

工况 2:  $1 \text{ t}$  非保守物质 (三唑磷) 在公路桥 2 (距起点  $24\ 088 \text{ m}$ ) 处泄漏, 见图 3。

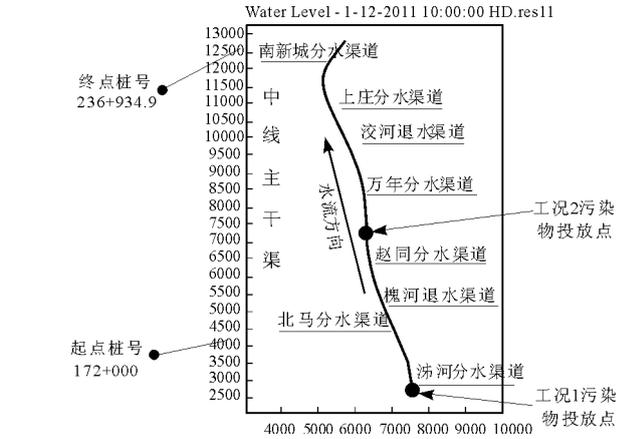
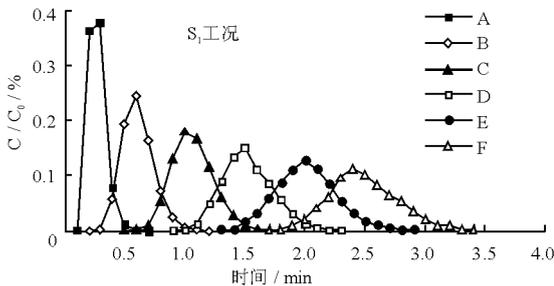


图 3 南水北调中线邢古段渠道概化图

## 3 结果分析

### 3.1 降解系数估算

图 4 是工况  $S_1$  和  $S_2$  条件下三唑磷瞬时投放时各断面的相对浓度变化曲线。

投放后三唑磷在下游各断面的浓度基本符合正态分布特征, 且其峰值相对浓度值逐渐降低。相对于  $S_1$  工况来讲,  $S_2$  工况由于水流速度小, 物质在各断面之间的停留时间长, 相对浓度峰值下降相对更大, 瞬时投放初始浓度为  $100 \text{ mg/L}$ 。由图 4 可得各监测断面三唑磷峰值浓度相对值, 见表 1。

本实验水槽没有旁侧入流, 污染物降解系数计算模型如下<sup>[15]</sup>:

$$k = \frac{u}{x} \ln \frac{C_{\text{上}}}{C_{\text{下}}} \quad (2)$$

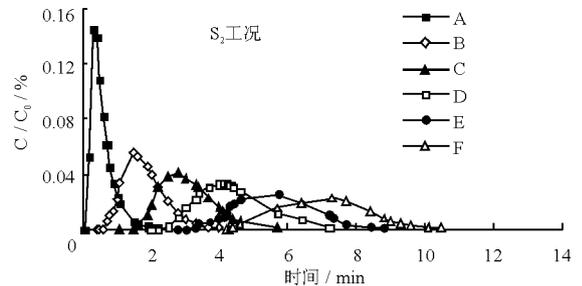


图 4  $S_1$  工况 (左)、 $S_2$  工况 (右) 三唑磷瞬时投放在各断面相对浓度变化曲线

式中:  $C_{\text{上}}$  为上断面污染物浓度检测值,  $\text{mg/L}$ ;  $C_{\text{下}}$  为下断面污染物浓度监测值,  $\text{mg/L}$ ;  $x$  为上下游距离;  $u$  为渠道平均流速,  $\text{m/s}$ ;  $k$  为污染物降解系数,  $\text{d}^{-1}$ 。经估算三唑磷的降解系数平均值为  $0.00435 \text{ d}^{-1}$ 。

## 3.2 数值模拟结果

3.2.1 主渠道数值模拟 南水北调中线邢石界至古运河南段主渠道水流流量沿程减小, 水位沿程降低。按照 2.3 工况 1、工况 2, 模拟邢古段主渠道污染物断

面浓度沿渠道纵向的分布情况, 记录污染物泄漏  $2 \text{ h}$  和  $8 \text{ h}$  的浓度分布, 见图 5, 计算参数见表 2。

表 1 三唑磷浓度值  $\text{m/s}$ ,  $\text{mg/L}$

工况	平均流速	A	B	C	D	E	F
$S_1$	0.185	0.380	0.240	0.180	0.150	0.130	0.110
$S_2$	0.067	0.144	0.056	0.041	0.033	0.029	0.026

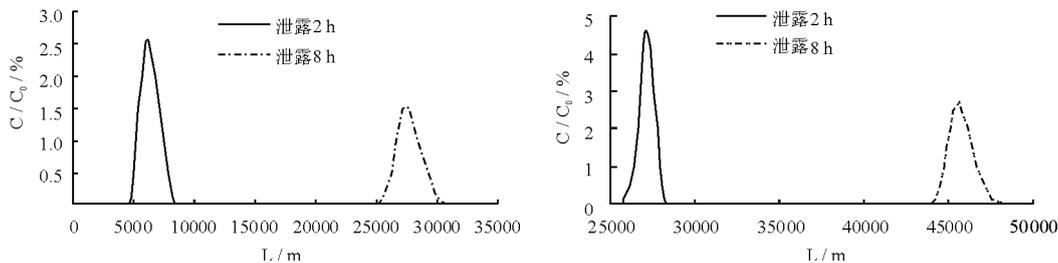


图 5 1 t 污染物在公路桥 1 处(左)、公路桥 2 处(右)泄漏浓度分布

表 2 突发水污染事故的特征参数 mg/L, min, m<sup>3</sup>/s, d<sup>-1</sup>

污染物	初始浓度	污染源排放时间	排放平均流量	降解系数
三唑磷	100	30	5.555	0.00435

由图 5 可以看出,随着泄漏时间的增加,污染物浓度降低,污染范围不断扩大,主要是由于污染物已经稀释混合完全,部分污染物经分水渠道排出总干渠以及污染物在渠道中的衰减造成的。在相同水动

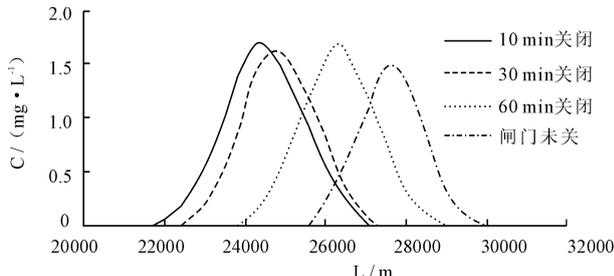
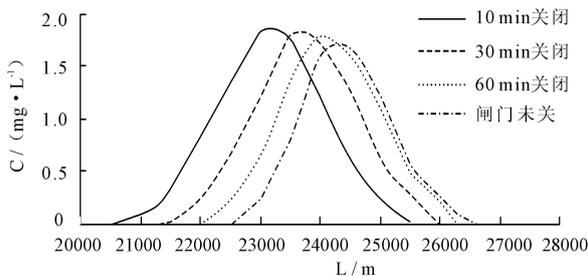


图 6 节制闸关闭 1 h(左)、2 h(右)后断面平均浓度沿程分布

由图 6 可知污染事故发生后,关闭上游节制闸门可以减缓污染物迁移速度,闸门关闭速率越快,对污染物迁移速度的影响越强。当闸门关闭后,污染带基本不受水动力扩散的影响,自身扩散占主导作用,污染带后峰位置基本保持不变,前锋不断向下游迁移,污染带影响范围变大,断面平均浓度减小。

### 3.3 基于数值模拟结果的快速插值法计算

应急决策系统主要根据模拟计算结果,按照污染物类型、投入量、投入位置和报警响应时间进行快速插值输出峰值浓度、位置和污染带范围等结果,系统核心部分为快速插值计算。以非保守物质(三唑磷)为例,建立两种典型事例,(1)根据 1t 污染物在距起点 632 m 处泄漏 2、8 h 的浓度分布(最高浓度值、污染云团到达位置及范围),计算经过  $T$  小时的浓度分布;(2)根据 1t 污染物在距起点 632、24 088 m 处泄漏 2、8 h 的浓度分布,计算 1 t 污染物在  $S$  处( $632 \text{ m} < S < 24\ 088 \text{ m}$ )泄漏 2、8 h 的浓度分布。

(1) 1 t 污染物在距起点 632 m 处泄漏 2 和 8 h

力条件下,污染云团的迁移距离和长度相同。

3.2.2 分水渠道数值模拟 各分水渠道分流量为  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ ,当污染物在分水渠道前处于超标状态,需要开启分水渠道闸门,将污染物分入支流中,防止过量污染物继续向下游扩散。本节模拟事故发生 1、2 h 后,闸门未关闭、10 min 内关闭、30 min 内关闭及 60 min 内关闭 4 种情况下,污染物断面平均浓度沿渠道纵向分布的对比情况,见图 6。

浓度分布情况,见表 3,插值计算污染物泄漏  $T$  h 浓度分布情况,见图 7。

$$\text{浓度峰值: } C = \frac{(T - 2)C_{8h} + (8 - T)C_{2h}}{6};$$

$$\text{到达位置: } X = \frac{(T - 2)X_{8h} + (8 - T)X_{2h}}{6};$$

$$\text{污染带长度: } L = \frac{(T - 2)L_{8h} + (8 - T)L_{2h}}{6}$$

由图 7 可知,污染物浓度峰值随泄漏时间的增加而降低,污染云团的长度和到达位置随泄漏时间的增加而增大。污染物进入支流时,先计算到达支流前污染物分布情况,再根据插值法计算支流中污染物分布情况。

表 3 1 t 污染物泄漏 2 h 和 8 h 分布情况 mg/L, m

泄漏时间	2 h	8 h
浓度峰值	2.59	1.53
到达位置	6226	27658
污染云团长度	3700	5442

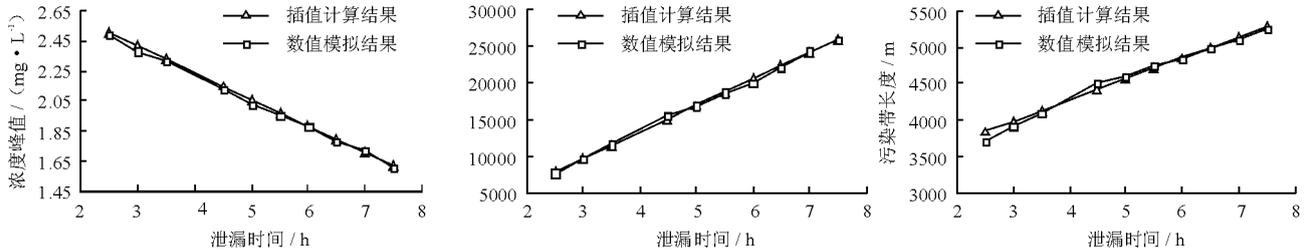


图7 1 t 污染物泄漏 T 小时分布情况

(2) 根据 1 t 污染物在距起点 632、24 088 m 处泄漏 2、8 h 的浓度分布, 见表 4, 插值计算在 S 米 ( $632 \text{ m} < S < 24\ 088 \text{ m}$ ) 处 1 t 污染物泄漏 2、8 h 浓度分布情况, 见图 8。

表4 1 t 污染物在 632 和 24 088 m 处泄漏 2、8 h 分布情况

		m, mg/L	
泄漏位置		S <sub>1</sub> 632	S <sub>2</sub> 24088
2h	浓度峰值	2.59	4.57
	到达位置	6226	27158
	污染云团长度	3700	2608
8h	浓度峰值	1.53	2.63
	到达位置	27658	45561
	污染云团长度	5442	4289

浓度峰值:

$$C = \frac{(S - 632)C_{s_2} + (24088 - S)C_{s_1}}{23456};$$

到达位置:

$$X = \frac{(S - 632)X_{s_2} + (24088 - S)X_{s_1}}{23456};$$

污染带长度:

$$L = \frac{(S - 632)L_{s_2} + (24088 - S)L_{s_1}}{23456}。$$

由图 8 可知, 污染物浓度峰值随泄漏位置距起点距离的增加而增加, 污染云团距起点距离随泄漏位置距起点距离的增加而增大, 污染云团的长度随泄漏位置距起点距离的增加而减少。

总之, 该快速插值计算系统适用于响应时间 2 ~ 8 h 之间, 排放位置为距起点 632 ~ 24 088 m 之间。当遇到不同排放量, 先插值算出在该位置泄漏 M 吨污染物 2 h 的浓度峰值; 同理算出在该位置泄漏 M 吨污染物和 8 h 浓度峰值; 再次插值算出在该位置泄漏 M 吨污染物经过 T 小时的浓度峰值、到达位置及污染带长度同理求得。

## 4 应用案例

某日接事故报警, 一辆运输车从沟北公路桥

(191 + 505) 坠入主干渠, 并有污染物泄漏。事故地点距起点 1 7631 m; 污染物为三唑磷; 泄漏量 1.2 t 左右, 泄漏浓度 120 mg/L; 响应时间 6 h。根据以上信息利用快速插值法计算浓度峰值, 污染云团到达位置以及长度。

步骤 1: 污染物质为三唑磷, 为非保守物质;  $C_0$  为 120 mg/L, 因此可在图 2 中读出污染物在 632 m 处经 2 h 响应时间浓度峰值为 3.108 mg/L, 经 8 h 响应时间浓度峰值为 1.836 mg/L。则污染物在 632 m 处经 2 h 响应的分布情况, 浓度峰值为 3.108 mg/L, 污染云团到达位置 6 226 m, 长度 3 700 m; 污染物在 632 m 经 8 h 响应的分布情况, 浓度峰值为 1.836 mg/L, 污染云团到达位置 27 658 m, 长度 5 442 m。

步骤 2: 利用步骤 1 的结果计算距起点 632 m 处 1.2 t 污染物 6 h 后的分布情况, 浓度峰值为 2.26 mg/L, 污染云团到达位置 20 514 m, 长度 4861.4 m。

步骤 3: 重复步骤 1、2 的过程, 计算距起点 24 088 m 处 1.2 t 污染物 6 h 后的分布情况, 浓度峰值为 3.932 mg/L, 污染云团到达位置 39 426.7 m, 长度 3 728.7 m。

步骤 4: 利用步骤 2、3 的结果计算距起点 17 631 m 处 1.2 t 污染物 6 h 后的分布情况, 浓度峰值为 3.472 mg/L, 污染云团到达位置 34 221 m, 长度 4 041 m。

通过数值模拟运算可求得此次事故 6 h 响应时间后的浓度峰值为 3.389 mg/L, 污染云团到达位置 34 871 m, 长度为 4 098 m, 由此可知, 插值法结果与数值模拟结果相差不大, 在可允许范围内, 相比传统数值模拟, 插值法耗时较短, 并且对事故可作出准确预测, 这将有利于快速决策。

## 5 结语

(1) 研究了溶解性污染物质三唑磷在水槽中的运移扩散规律, 并据此估算了三唑磷的综合降解系数为  $0.004\ 35 \text{ d}^{-1}$ 。

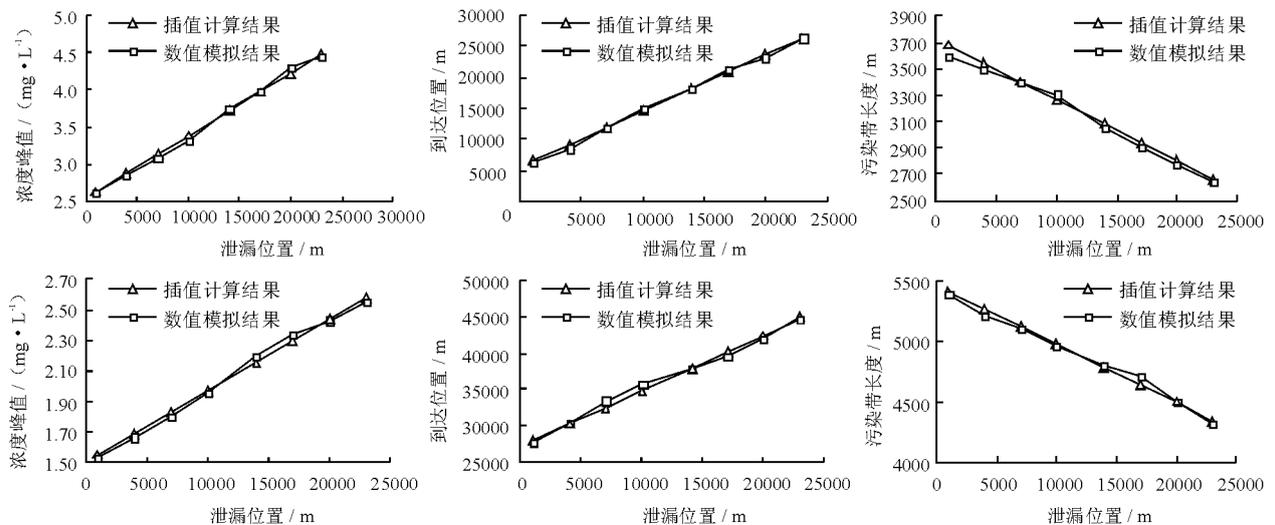


图8 1 t 污染物在 5 米处泄漏 2 h(上)、8 h(下)分布情况

(2) 随污染物泄露时间的变长,污染范围不断扩大,污染物浓度逐渐降低。同时,关闭闸门可以减缓污染物迁移速度,闸门关闭越快,对污染物迁移速度的影响越强。

(3) 重点建立了按照污染物投入量、投入位置和报警响应时间进行快速插值输出峰值浓度、位置和污染云团范围等结果的快速应急决策系统。插值计算的污染物浓度峰值和数值模拟的结果相差在 0.10 mg/L 以内,污染云团到达位置相差在 500 m 范围以内,长度相差在 100 m 范围以内,插值计算结果与模拟结果在允许范围内,精度满足计算要求,可按此方法进行计算,并将信息存储,以备应急决策使用。

#### 参考文献:

[1] 王海潮,蒋云钟,鲁帆,等. 国外跨流域调水工程对南水北调中线运行调度的启示[J]. 水利水电科技进展, 2008,28(2):79-83.

[2] 关志诚. 跨流域调水工程的关键技术与建设实践[J]. 水利水电技术,2009,40(8):89-94+107.

[3] 白莹. 黄河突发性水污染事故预警及生态风险评估模型研究[D]. 南京:南京大学,2013.

[4] 张晨. 长距离调水工程水质安全研究与应用[D]. 天津:天津大学,2008.

[5] 王敏,陈忠平. 突发性环境污染事故的应急处置[J]. 城市与减灾,2006(6):19-21.

[6] Gerhadt S. SOAP-based web services in GIS/RDBMS environment[J]. Environmental Modelling & Software,2005, 20(6):775-782.

[7] Quinn N W T, Brekke L D, Miller N L, et al. Model integration for assessing future hydroclimate impacts on water resources, agricultural production and environmental quality in the San Joaquin Basin, California[J]. Environmental Modelling & Software, 2004,19(3):305-316.

[8] Mads Nistrup Madsen. Water quality surveillance and early warning in surface waters-integration of mathematical models and on-line monitoring into a decision support system [D]. Shanghai,China: 2006.

[9] 陈宁,边归国. 我国环境应急监测车的现状与发展趋势[J]. 中国环境监测, 2007,23(6):41-45.

[10] Qiang H, Shujuan P, Jun Z. Development and application of a water pollution emergency response system for the Three Gorges Reservoir in the Yangtze River[J]. China Environmental Sciences, 2011,23(4):595-600.

[11] Zhangbo. SD-GIS-based temporal-spatial simulation of water quality in sudden water pollution accidents [J]. Computers and Geosciences, 2011,37(7):874-882.

[12] 刘冬华,刘茂. 突发性河流污染事故水质预警模型[J]. 安全与环境学报, 2009(2):89-92.

[13] Cheng C Y, Qian X. Evaluation of emergency planning for water pollution incidents in reservoir based on fuzzy comprehensive assessment [J]. Procedia Environmental Sciences, 2010,2:566-570.

[14] Fischer. Mixing in inland and coastal waters[M]. New York, USA: Academic Press, 1979.

[15] 吴纪宏. 黄河干流河段污染物降解系数分析研究[J]. 人民黄河, 2006,28(8):36-37.