

圩区水环境治理规划及地下水溶质运移预测模拟

詹红丽¹ ,张展羽¹ ,王南海² ,张文捷²

(1.河海大学水利水电工程学院 ,江苏 南京 210098 ;2.江西省水利科学研究所 ,江西 南昌 330029)

摘要 :以中国南方平原圩区为研究对象 ,分析圩区堤防采用垂直封闭截渗技术后对圩内水环境的影响 ,并建立封闭圩区水环境规划及地下水溶质运移数学模型 ,通过求解 ,得出圩区的最优水面率和滞蓄水深、最优外排装机容量和内排装机容量以及大堤的最优封闭率 ,同时预测了区域内地下水位及地下水污染动态变化情况 .

关键词 封闭圩区 ;水环境 ;优化规划 ;地下水 ;溶质运移

中图分类号 :P641.2 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2003)05-0522-04

江西省位于长江中下游南岸 ,全省圩区总面积约 7760.14 km² ,保护耕地 67.82 万 hm² .全省圩区堤线长 ,分布广 ,不少圩堤兴建年代久远 ,防洪标准偏低 ,需要加固 .圩区堤防垂直防渗工程 ,通常将防渗墙打到相对不透水层 .这种技术 ,能够有效地阻隔汛期外河水位的堤基渗透 ,减少管涌、流土和散浸等堤防隐患 ,但也会截断地下水水流通通道 ,从而形成封闭圩区 ,使圩内外地下水不能自由交换 ,有可能加重农田渍害和次生沼泽化影响 .同时 ,由于土壤中肥料、农药、盐分的淋溶而在地下水中不断积聚 ,会引起地下水水质的变化 ,给区域生态环境带来不利影响 .Jury 等^[1]首先提出模拟田间稳定流条件下保守溶质 Br⁻ 运移的传输函数模型 ,后又把该模型用于模拟非稳定流场中田间土壤示踪溶质 Br⁻ 的运移^[2~4] .高俊合等^[5]将有限元法应用于土体的非饱和溶质运移问题 .吴吉春等^[6]建立了地下水中 Cl⁻ 运移行为的局部区域二维可混溶溶质运移模型 ,并将该模型应用于山西柳泉地区 .前述的研究都是针对开放型边界 ,不涉及封闭的问题 ,因此 ,封闭圩区的科学研究与治理显得尤为重要 .

本文通过数学模型的建立及模型在江西省赣东大堤圩区的应用 ,计算得出圩区最优水面率等 ,同时预测了区域内地下水位及地下水污染的动态变化情况 .

1 数学模型的建立

1.1 圩区水环境规划数学模型

1.1.1 目标函数

以系统内除涝工程及大堤加固的总费用年值最小为优化准则 ,建立目标函数为

$$C = \min \left\{ \frac{F}{100} \left[\sum_{j=1}^P C_j X_j + \sum_{j=1}^k C_{rj} (X_j - X_{oj}) \right] + \sum_{j=1}^q C_{P+j} X_{P+j} + \sum_{j=1}^r C_{Q+j} X_{Q+j} + \alpha LC_1 + \alpha' LC_2 + \sum C_7 B_j \right\} \quad (1)$$

式中 :F——圩垸总排水面积 ,km² ;C_j——第 j 个蓄水设施每平方千米多年滞涝损失和费用年值 ,万元/km² ,j = 1 ,… ,P ;C_{rj}——第 j 个调蓄湖周围退田还湖增加的多年损失年值 ,万元/km² ,j = 1 ,… ,k ;X_j——相应的决策变量 ;α——大堤封闭率 ,其他符号意义略 .该模型中决策变量有 4 类 :各种蓄水设施的水面率 ,排涝闸闸宽 ,各抽排站的装机容量和圩堤封闭率 .

1.1.2 约束条件

约束条件有水量平衡约束 ,内、外排装机必须满足的物理关系 ,圩区高程-面积关系 ,装机容量约束 ,内、

外排站最小、最大扬程约束,排涝闸约束,各种蓄水设施水面率约束,各种蓄水设施最低蓄水位约束,圩区地下水环境约束,圩区堤防整治约束,所有变量非负约束,其他约束(结合圩区实际情况和社会、经济条件,还可能有资金、劳力、设备、政策等约束)。上述约束条件中有非线性函数,故构成了非线性规划模型。

1.2 圩区地下水溶质运移模拟数学模型

考虑到当地情况,建立潜水流动情况下的封闭圩区地下水溶质运移模拟数学模型,即:

水流方程

$$\begin{cases} K_{xx} \frac{\partial}{\partial x} \left(H \frac{\partial H}{\partial x} \right) + K_{yy} \frac{\partial}{\partial y} \left(H \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \epsilon = \mu_d \frac{\partial H}{\partial t} \\ H \Big|_{t=0} = h_{01} \\ \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{B_1} = h_{02}(\alpha), \quad \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{B_2} = h_{03} \\ H \Big|_{B_3} = h_{04}, \quad H \Big|_{B_4} = h_{05} \end{cases} \tag{2}$$

水质方程

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_T \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - u_0 \frac{\partial C}{\partial x} \\ C \Big|_{t=0} = C_{01} \\ C \Big|_{B_1} = C_{02}, \quad C \Big|_{B_2} = C_{03} \\ \frac{\partial C}{\partial n} \Big|_{B_1} = C_{04}(\alpha) \end{cases} \tag{3}$$

式中: K_{xx}, K_{yy} —— x 方向和 y 方向的主渗透系数; x, y ——坐标轴方向, m ; H ——水头, m ; t ——时间, d ; ϵ ——垂向补给强度,即单位时间单位面积上的垂向补给量(补给时为正,排泄时为负); μ_d ——重力给水度; h_{01} ——初始水头, m ; $h_{02}(\alpha), h_{03}$ ——第 1 个和第 2 个边界处的二类边界条件,即水位沿边界法向的变化率, $m \cdot m^{-1}$,其中 $h_{02}(\alpha)$ 可表达为

$$h_{02}(\alpha) = \begin{cases} -\frac{2h_B}{\alpha L}x + h_B & 0 \leq x \leq \frac{\alpha}{2}L \\ 0 & \frac{\alpha}{2}L \leq x \leq (1 - \frac{\alpha}{2})L \\ \frac{2h_B}{\alpha L}x + h_B(1 - \frac{2}{\alpha}) & (1 - \frac{\alpha}{2})L \leq x \leq L \end{cases} \tag{4}$$

h_B 为边界处实测沿法向的最大水位变化率, $m \cdot m^{-1}$; α ——大堤封闭率; h_{04}, h_{05} ——第 3 个和第 4 个边界的第 1 类边界条件, m ; D_L, D_T ——纵向和横向弥散度; u ——地下水流速, $m \cdot d^{-1}$; C ——地下水中某种污染物的浓度, $mg \cdot L^{-1}$; C_{01} ——计算区某种污染物在地下水中的初始浓度, $mg \cdot L^{-1}$; C_{02}, C_{03} ——两边界处的边界浓度条件, $mg \cdot L^{-1}$; $C_{04}(\alpha)$ ——第 1 个边界处的第 2 类边界浓度条件(其表达式类似于 $h_{02}(\alpha)$),即浓度在边界处的变化率, $mg \cdot L^{-1} \cdot m^{-1}$ 。

2 基础资料与求解方法

2.1 基础资料

选择赣东大堤樟树段为研究对象,在桩号 14+330(无垂直截渗)和 16+280(有垂直截渗)处,垂直大堤方向每隔大约 200 m 埋设一条测压管,总共埋设 8 条测压管。每隔半月测一次测压管水位和水质。所选圩区总面积约 14.8 km²,所选堤段长约 4 km;水面率 3.7%(调蓄湖 I 水面积 0.046 6 km²,调蓄湖 II 水面积 0.0665 km²,调蓄湖 III 水面积 0.157 4 km²,调蓄湖 IV 水面积 0.030 0 km²,鱼池水面积 0.022 5 km²,河网水面积 0.125 0 km²)。圩内具体情况如图 1 所示。

2.2 圩区水环境规划数学模型求解方法

用 MAP 法(逐次渐进法)将模型中的非线性约束线性化,再用单纯形法求解线性规划问题,对于 α, α' ,要通过圩区地下水环境约束条件进行验算求解,闸宽和泵站装机容量按控制区域合理分配.

2.3 圩区地下水溶质运移模拟数学模型求解方法

2.3.1 参数、边界条件及初始条件的确定

根据当地资料,取弥散度 $D_L = D_T = 0.10$,初始地下水流速 $u_0 = 0.01 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$,取主渗透系数 $K_{xx} = K_{yy} = 1$,重力给水度 $\mu_d = 0.002$.

边界条件及初始条件略.

2.3.2 求解方法

考虑到大堤有一定封闭率后,地下水运动中以弥散为主且对流较弱,采用有限元法对所建模型进行求解.

将圩区剖分为 120 000 个正方形单元格进行计算,单元格边长取 10 m,模拟计算时间步长取为 5 d,初始地下水流速 u_0 取为 $0.01 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$,对于圩区封闭率问题,将其考虑在第 2 类边界条件中,对求解进行约束,在计算过程中,对于不在结点上的地点,用其邻近结点的加权平均值替代.

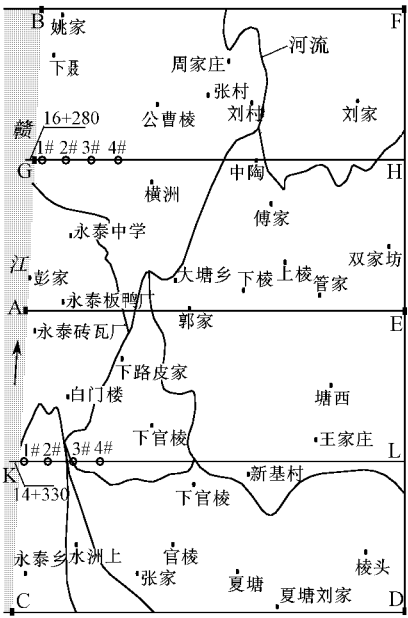


图 1 计算区平面图

Fig.1 Plan of studied area

3 模型应用及计算结果

3.1 圩区水环境规划计算结果

应用所建模型进行计算,得到优化结果,见表 1~表 3.

表 1 蓄水工程优化结果

Table 1 Optimized results of water storage works

项目	水面积 /hm ²	占圩区总面积 的百分数/%	滞蓄水深 /m
I	18.9	1.28	0.8
II	37.9	2.56	0.8
III	15.3	1.04	0.8
IV	8.1	0.55	0.8
河网	35.6	2.40	1.0
鱼池	9.9	0.67	0.8

表 2 泵站优化结果

Table 2 Optimized results

外排站	装机容量/kW
I	140
II	100
III	90
IV	370

表 3 闸优化结果

Table 3 Optimized results

闸	闸宽/m
I	12
II	9
III	7
IV	12
V	20

优化后的最优封闭率 $\alpha = 65\%$,非封闭加固率 $\alpha' = 25\%$.

3.2 圩区地下水溶质运移模拟预测结果

根据 2000 年 7 月 15 日资料预测 2000 年 12 月 15 日地下水位与地下水水质情况,通过预测值与实测值比较,水位预测最大相对误差为 5%,水质预测最大相对误差为 7%,预测值与实测值基本一致.图 2 是对不同地点地下水中总氮浓度的预测曲线,图 3 是对不同地点地下水位的预测曲线.

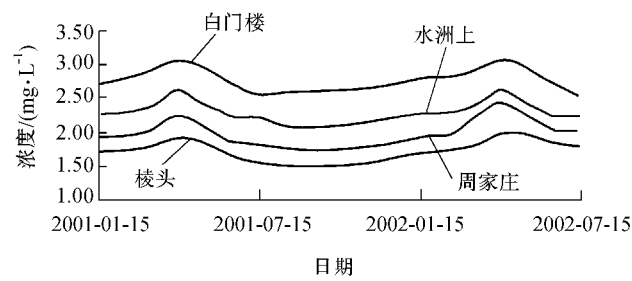


图 2 不同地点地下水中总氮浓度预测曲线

Fig.2 Predicted curves of total nitrogen

concentration in groundwater at different spots

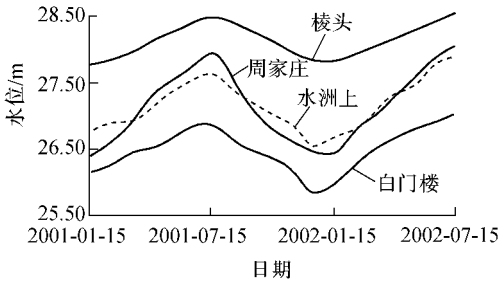


图 3 不同地点地下水位预测曲线

Fig.3 Predicted curves of groundwater

tables at different spots

3.3 结果分析

a. 由圩区水环境优化结果可知 :该地区大堤最优封闭率为 65% ,非封闭截渗加固段占大堤总长的最优百分率为 25% ,圩区优化滞涝水面率为 8.5% ,优化装机总容量为 700 kW ,闸宽合计为 60 m.

b. 通过地下水溶质运移预测模拟可知 (a)预测值与实测值比较 ,水位预测最大相对误差为 5%(白门楼)水质预测最大相对误差为 7%(棱头) ,预测值与实测值基本一致 ,说明预测结果可靠 ,可以用于模拟圩区地下水位和地下水质 .(b)采用最优封闭率等工程优化方案后 ,圩区汛期地下水位比非汛期水位高 ,同一点处的地下水位呈略微上升趋势 ,同一点处地下水中污染物浓度随时间变化 ,汛期比非汛期稍低一些 ;不同年份地下水中污染物浓度变化不明显 .(c)靠近堤防的地区地下水中污染物浓度比远离堤防地区要高 .因此 ,完善圩区内堤防带附近的田间排水工程十分重要 .

4 结 语

目前国内外对圩区整治、圩区水环境以及圩区地下水溶质运移方面的研究大多针对开放型边界 ,对有一定封闭率圩区的研究尚不多见 .文中所建立的封闭圩区水环境治理规划及地下水溶质运移预测模拟数学模型可用于有一定封闭率的圩区 .在江西省赣东大堤圩区的实际应用 ,结果表明 ,该模型设计合理 ,计算方法正确 ,可为类似地区的水利工程建设与管理提供理论指导 .文中所建立的运移模型是二维的 ,没有考虑垂直方向上的渗透梯度 ,影响了预测的精度 .在理论上比较理想的模型是三维模型 ,但涉及因素较多 ,求解较复杂 ,能否建立封闭圩区实用的三维地下水溶质运移模拟数学模型 ,有待进一步研究 .

参考文献 :

[1] JURY W A. Simulation of solute transport using a transfer functions model[J]. Water Resour Res ,1982 ,18(2) 363—368.

[2] JURY W A , SPOSITO G , WHITE R E. A transfer function model of solute transport through soil ,1 fundamental concepts[J]. Water Resour Res ,1986 ,22(2) 243—247.

[3] WHITE R E , DYSON J S , HAIGH R A. A transfer function model of solute transport through soil ,2 illustrative applications[J]. Water Resour Res ,1986 ,22(2) 248—254.

[4] JURY W A , DYSON J S , BUTTER G L. Transfer function model of field-scale solute transport under transient water flow[J]. Soil Sci Soc Am J ,1990 ,54 327—332.

[5] 高俊合 ,朱学愚 ,赵维炳 ,等 .非饱和带溶质运移问题的 SUPG 有限元解法[J]. 河海大学学报 ,1998 ,26(1) 54—58.

[6] 吴吉春 ,薛禹群 ,黄海 ,等 .山西柳泉局部区域溶质运移二维数值模拟[J]. 水利学报 ,2001(8) 38—43.

Planning for levee region water environment remediation and simulation of solute transport in groundwater

ZHAN Hong-li¹ , ZHANG Zhan-yu¹ , WANG Nan-hai² , ZHANG Wen-jie²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China ;
2. Hydraulic Research Institute of Jiangxi Province , Nanchang 330029 , China)

Abstract :With the southern plain levee regions of China as examples , the impact of levee closure by vertical closure technology on the water environment of levee regions is analyzed . In combination with practical projects , the optimal water-covering ratio , flood detention and storage depth , installed capacity of the pump stations , and the closure ratio of the levees are derived on the basis of field observation and testing , water environment planning for the levee regions , and development of a numerical model for solute transport in groundwater . Furthermore , the variations of groundwater table and groundwater pollution in the levee regions are predicted .

Key words :levee closure ; water environment ; optimized planning ; groundwater ; solute transport