

GIS-PMODFLOW 联合系统在松嫩平原西部潜水环境预警中的应用

汤 洁, 卞建民, 林年丰, 杨建强

(吉林大学环境与资源学院, 吉林 长春 130026)

摘要: 针对松嫩平原西部地下水潜水位变化对环境产生影响的现状, 运用 GIS-PMODFLOW 联合系统确定了地下水环境预警警戒线, 采用以不至于发生土壤盐碱化的潜水临界水位作为上警戒线值, 以潜水开采极限深度作为下警戒线值。在对系统模型概化的基础上, 进行了潜水位的数值模拟和预报。利用 GIS 空间分析方法对图像数据进行栅格叠加和属性判断, 通过对预报水位与警戒水位对比, 进行水环境预警。结果表明, 研究区 2015 年的警情较 1999 年增加, 且以灌溉后潜水位上升引起的土壤次生盐渍化的警情为主。

关键词: GIS-PMODFLOW; 潜水位; 水环境预警; 数值模拟; 次生盐渍化; 联合系统; 松嫩平原
中图分类号: P338.9; P641.74 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2006)04-0483-07

预警的概念最早应用于军事领域的雷达技术及弹道导弹防御系统, 近年来预警理论在洪水预报、经济系统、气象以及环境工程地质灾害防治等方面的应用较为广泛, 但在资源与环境科学领域的预警理论研究和应用相对较少, 目前关于水资源环境预警研究文献尚不多见^[1-4]。

松嫩平原西部地域辽阔, 属半干旱半湿润的大陆性季风气候区, 多年平均降水量为 400~500 mm, 其中 6~9 月份降水量占全年总降水量的 74%~84%。多年平均蒸发量自东部向西部逐渐增大, 为 1400~2100 mm。有较丰富的水、土、生物资源和石油资源, 为我国重要的农、牧业基地和能源基地。该区河流稀少, 分布不均, 闭流面积很大, 地表径流量少, 地下水较为丰富。近年来, 由于上游地区兴建了水库, 河水被截流, 西部和中部的洮儿河、霍林河及蛟流河下游河水水量减少, 甚至河床干涸, 地下水的补给量也呈减少趋势。在全球气候变暖及人类开发强度加大的双重影响下, 生态环境急剧恶化, 水资源匮乏, 土地盐碱化、沙化和退化现象十分严重。干旱、土地盐碱化和局部地下水位下降已成为该区主要的水环境问题。多年来, 中国科学院、大专院校以及生产部门, 在该区进行了大量科学研究和生产实践, 为水资源的合理开发和生态环境的综合治理做出了贡献。但是从地下水水位变幅开展水资源环境预警尚属首次。

本文采用 GIS-PMODFLOW 联合系统^[5,6], 通过对水文地质条件的概化, 建立起潜水水流数值模型, 借助于 PMODFLOW 软件包, 应用有限差分法对潜水流场进行了数值模拟并做出预测, 以揭示潜水水流的运移机制, 并对潜水位进行预报。在 GIS 平台中通过现状水位与警戒水位进行比较运算, 以此对现状和未来的水环境进行预警。

1 预警警戒线确定

本区东、南、西三面地形较高, 北部较低, 为一个簸箕形的含水盆地。地下水汇水范围广阔, 补给来源比较充沛, 主要有大气降水垂直补给、霍林河下游散流区垂直补给, 山区地下水侧向补给和河流侧向补给。在西北山区和长岭松辽分水岭及高平原为地下水侧向补给区。洮儿河、蛟流河中上游地表径流在沿河两侧补给地下

收稿日期: 2005-02-01; 修订日期: 2005-07-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40572170)

作者简介: 汤洁(1957-), 女, 吉林长春人, 吉林大学教授, 博士生导师, 主要从事水资源及生态环境系统工程研究。

E-mail: tangjie@jlu.edu.cn

水, 松花江、嫩江在汛期也有部分地表水补给地下水。

本文以潜水水位变化幅度作为主要研究对象。采用以不至于发生土壤盐碱化的潜水临界水位作为上第四纪孔隙潜水(Q_3-Q_4), 含水层岩性为粉砂、细砂、砂砾石。含水层厚度由南向北逐渐增厚, 从1~5 m到18~23 m不等, 最大为40 m。潜水的埋深一般为1~3 m、3~5 m, 岗地为5~10 m, 山前倾斜平原为10~30 m。潜水是该区进行农业灌溉的一种重要水源。警戒线值, 以潜水开采极限深度作为下警戒线值。经过长期观测和综合研究, 设定研究区潜水含水层的开采极限深度为由地表到潜水含水层厚度的1/2处的距离, 超过该深度开发水资源将会产生枯竭。

松嫩平原西部地域辽阔, 地貌类型、土层结构和水文地质条件复杂多变, 获取全区的潜水临界深度十分困难。为此, 提出防止土壤积盐的合理潜水深度的概念, 即将土壤盐渍化速度控制在较低值时地下潜水水位应满足的变幅。以1996年的潜水位为基准值, 利用地球动力学模型进行反演^[9], 求出合理的潜水水位。

根据地球动力学原理, 若要确定自然因素和人为因素对地下水系统的影响, 应从以下方面考虑: 地下水动态变化的产出要素的增长, 是由投入要素的增加及人文作用对地下水系统的影响产生的(这里的“增长”可能是负的)。人文作用在地下水动态变化产出要素中的贡献率可由下式计算得到:

$$K_1 = \left| \frac{\Delta M/M}{\Delta Y/Y} \right| \times 100\% \quad (1)$$

式中 Y 为潜水水位值, $\Delta Y/Y$ 为地下水潜水水位变化; M 为人类活动对地下水的影响程度, 本文采用土壤盐碱化程度, $\Delta M/M$ 为人类活动的贡献率; K_1 为影响强度系数。

根据1983年、1996年潜水位资料和1983年、1995年土地盐碱化遥感解译数据, 利用GIS图形叠加及分析功能, 将潜水位和土地盐碱化图叠加形成潜水位对土地盐碱化的影响强度栅格图(略)和在人为作用下潜水位对土壤盐碱化的影响强度栅格图(略)。通过对土壤类型图、土地盐碱化图和地下水潜水位图的叠加分析与计算发现, 潜水位对土壤盐渍化的影响系数大于0.5的地区占计算区的10.28%, 影响系数介于0.3~0.5之间的地区占12.77%, 这些地区是盐碱化发展严重的地区。假设在1996年至2015年将土壤盐碱化的发展速度控制在1%, 即该区每个单元土壤盐碱化程度增加1%。其地下水潜水位和土壤盐渍化关系如下式。

$$\frac{H_2 - H_1}{H_1} \times \frac{M_1}{M_2 - M_1} < 50\% \text{ 或 } 30\% \quad (2)$$

即表示在人类作用下潜水位对土壤盐碱化的影响强度系数大于0.5~0.3的单元达到50%或30%。

式中 H_1 为单元1996年的潜水位; H_2 为单元2015年的潜水位; M_1 为单元1996年的土壤盐渍化强度; M_2 为单元2015年土壤盐渍化的强度。

若已知 H_1 、 M_2 、 M_1 , 通过式(2)可求出 H_2 的值。

通过对该区遥感解译数据的分析, 得到了本区1989~2001年12年间土壤盐碱化的发展速度为2.61%/a, 为保护生态环境, 遏制土壤盐碱化的发展, 我们认为该区土壤盐渍化加重速度应控制在1%, 在此条件下2015年人类活动所控制的潜水位值为 H_2 。应用GIS将各单元的 H_2 值绘制成松嫩平原西部平原水环境预警潜水位警戒线图, 见图1。

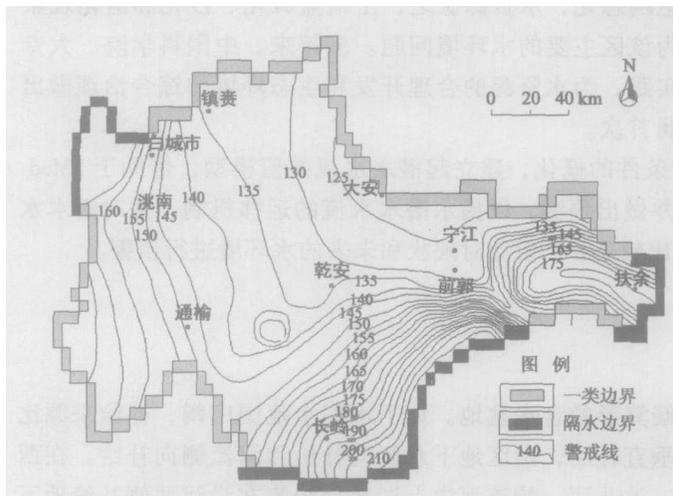


图1 松嫩平原西部水环境预警潜水位警戒线图

Fig. 1 Upper water table threshold of the early warning in west of Songnen plain

2 潜水水位预测模型的建立

2.1 系统模型概化

(1) 含水层空间分布 研究区潜水含水层可划分: ①西部山前倾斜平原扇形地的孔隙潜水含水层, 由中、上更新统冲洪积砂卵石、卵石层组成, 颗粒粗大, 渗透性极强($K=140\sim 300\text{ m/d}$); ②河谷平原、东部高平原及霍林河流域中游孔隙潜水含水层, 由砂及砂砾石层组成, 渗透性较强($K=10\sim 100\text{ m/d}$); ③松拉河间地块及低平原西部的孔隙潜水含水层, 由细砂、中细砂及粉细砂组成, 渗透性较弱($K=10\sim 20\text{ m/d}$); ④低平原中部乾安、大安一带的孔隙潜水含水层, 多由黄土状亚砂土、粉细砂及亚砂土组成, 颗粒很细, 渗透性很差($K=3\sim 10\text{ m/d}$)^[10]。研究区水文地质概念模型见图2所示。根据图2可以了解研究区边界的分布、性质、水文地质参数分区及观测井分布等情况。

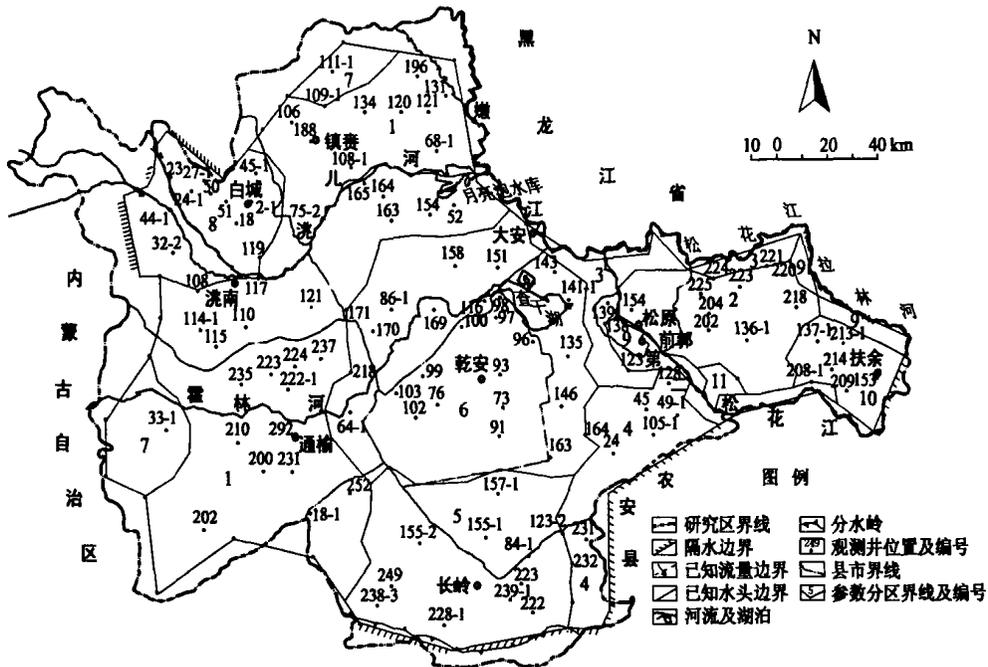


图2 松嫩平原西部潜水水文地质概念模型图

Fig. 2 Groundwater hydrogeological conceptual model for west of Songnen plain

(2) 侧向边界概化 计算区西北角的洮儿河冲洪积扇形地, 与其周边以火山岩为主的基岩山区相邻, 渗透性较弱, 可将西北部边界概化为隔水边界。对于常年有水的洮儿河和蛟流河河谷, 则可作为流量边界, 利用上下游水文站的径流资料和地下水等水位线图, 进行综合分析, 利用水量均衡关系计算地表水向地下水的转化量。南部边界以地下分水岭为界, 概化为二类零流量边界。计算区东北部以嫩江、松花江、拉林河和第二松花江常年有水的江河为界, 均为潜水的排泄边界, 概化为一类水头边界, 正东为高平原的地下分水岭, 概化为隔水边界。除以上各边界外, 其它边界上的水位动态观测井较多, 故可概化为已知水位的一类边界。

(3) 垂向边界概化 根据潜水位的动态变化资料, 降水入渗、河道渗漏、人工开采、灌溉渗漏、潜水蒸发均会影响潜水的变化, 因而, 上部边界为水量交换边界; 下部边界则分两种情况, 当在单一潜水含水层分布区, 如冲洪积扇形地孔隙潜水区或河谷平原区, 其下部均为相对隔水的底板, 可概化为隔水边界; 上部为孔隙潜水, 下部为孔隙承压含水层的双层含水层, 则垂向边界属于越流边界, 研究区越流层为大青沟组的弱透土层。

2.2 数学模型的建立

根据上述的水文地质概念模型, 建立潜水水流数学模型如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left[K(H-B) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K(H-B) \frac{\partial H}{\partial y} \right] - \frac{K}{M} (H_0 - H) + Q_r - Q_d - \sum_{i=1}^n Q_i(x_i, y_i, t) \delta(x - x_i, y - y_i) = \mu \frac{\partial H}{\partial t} \\ h(x, y, t) |_{t=0} = h_0(x, y, t) & (x, y) \in D \\ h(x, y, t) |_{\Gamma_1} = h_1(x, y, t) & (x, y) \in D, t > 0 \\ K(h-B) \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q(x, y, t) & (x, y) \in D, t > 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中 K 为潜水含水层渗透系数, m/d ; μ 为潜水含水层给水度; h 、 H_0 为地下水位、潜水水位, m ; B 为含水层底板标高, m ; Q_r 为入渗补给强度, m/d ; Q_d 为排泄强度 (包括开采), m/d ; Q_i 为井开采量, m^3/d ; h_0 为初始水位, m ; h_1 为类边界点的水位, m ; q 为二类边界单宽流量, m^2/d ; x 、 y 为坐标, m ; D 为计算区范围; Γ_1 、 Γ_2 为一类及二类边界; n 为边界上的内法线; n 为开采井总数。

2.3 模型求解

本计算区域采用传统的四边形剖分, 将含水层剖分为一层、38 行、70 列, 共 2660 个单元。其中定水头单元 149 个, 无效计算单元 753 个, 变水头计算单元 (即有效计算单元) 1408 个。单元尺寸与警戒线栅格单元尺寸保持一致。计算区面积为 35201.17 km^2 , 占整个松嫩平原西部面积的 74.77%, 单元平均面积为 25 km^2 。行间距 (ΔC_i) 和列间距 (Δr_i) 均为 5000 m, 厚度 (Δw_k) 视具体情况而定。

2.4 数学模型的校正和检验

将计算单元的水头与实测水头进行对比, 进而反求相关的水文地质参数。模型校正时段选取 1996 年 10 月 15 日到 1997 年 3 月 30 日, 时间步长为 15 d, 共 11 个时段。在该时段内的源汇项少, 地下水位处于平水期, 计算较简单。

潜水含水层计算模型参数分区基本上与区域水文地质单元范围一致。各参数区的初值根据已有勘察和研究阶段所进行的抽水试验成果而定。模型识别时段为冬季, 无大气降水入渗补给和农业灌溉, 潜水的蒸发可以忽略不计。越流补给 (排泄) 与河流 (湖泊) 渗漏补给 (排泄) 等源汇项可直接加入相应的计算单元, 城镇生活用水则按强度分配到单元上。

最后将源汇项和初始地下水位输入数学模型, 通过水文地质参数的匹配, 直到调参时段末地下水水位计算值与实测值拟合误差达到要求为止。检验结果表明, 拟合误差 $< 0.5 \text{ m}$ 者达到 70% 以上, 说明所建立的水文地质概念模型和数学模型是正确可靠的。

为了进一步验证其可靠性, 对所建立的区域数学模型进行了检验。选择地下水年内低水位期 (1997 年 3 月 11 日至 5 月 11 日, 共计 61 d) 和地下水水位上升期 (1997 年 5 月 11 日至 8 月 11 日, 共计 92 d) 作为检验时段, 以低水位期的水位作为初始流场, 将各时段的源汇项输入已识别后的数学模型, 并计算出两个时段末刻的水位值。两个检验时段末计算水位与实测水位的拟合误差检验结果表明, 各时段水位观测点拟合误差 (0.5 m 的井点数达到总水位点总数的 73%, 所建的数学模型可用于地下水预报。

2.5 潜水水位预报

根据研究区的远景发展规划目标, 将水位预报期限定为 15 年, 即 1999–2015 年。鉴于 1999 年 5 月的地下水动态观测资料较全, 水位观测井较多, 故将此阶段的潜水位作为预报基础值。

边界及源汇项的处理 降水量是地下水的主要补给来源, 研究中采用 Monte Carlo 方法进行预报。对研究区一类边界选取 10 个有长期水位观测资料的边界井, 求出水位时间关系方程, 相关检验结果均较显著。其它边界井则按插值法得出。潜水模型源汇项的预测主要依据该区各行业用水规划及水利规划, 同时根据源汇项与

时间或其它易于确定变量的相关关系进行预测, 如河流与地下水的关系, 采用河水渗漏与降水及河流径流量之间的相关模型进行。

水位预报结果及分析 从预报结果(图3)中可以看出, 到2015年时, 计算区内潜水流场的整体形态及地下水流动方向均未发生明显变化, 水位降深值较小, 最大降深值 < 5.5 m。在预报时段内, 区内潜水位多数地段仅随年降水量有微小的变动。在开采量较大的白城冲洪积扇区, 水位出现了持续的下降现象, 但降幅较小, 平均年降幅为0.25 m。在前郭县和镇赉县以地表水为水源的水田区, 由于灌溉水的回渗补给, 潜水位有所上升, 如143号和210号井潜水位在15年期间有12年水位上升。这一现象表明, 水田的开发会增加潜水的补给量, 但随着潜水位上升, 将出现盐碱化发展的危险。

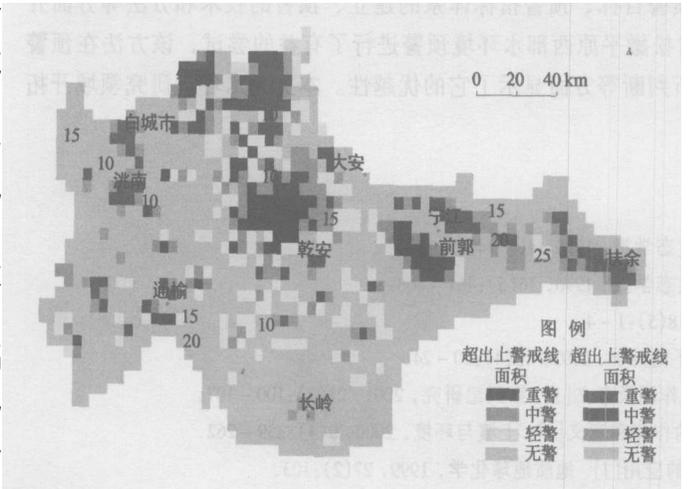


图3 松嫩平原西部2015年潜水水位预报结果

Fig. 3 Forecasted water tables of the early warning in west of Songnen plain

3 潜水环境预警

在水位预报的基础上, 通过计算现状和预测期水位, 并与警戒水位进行对比, 以达到预警的目的。利用GIS空间分析功能进行栅格图层叠加和属性判断, 其中运用了多层栅格数据复合中的算术运算方法和矢量多边形叠置分析方法^[7, 8]。应用MapInfo软件, 将警戒线图、潜水流线现状图层和预测图层经栅格化处理后, 进行预警判断。分别以超出上、下警戒线一定的数据区间为不同警度值, 对警情进行分级。结果见图4和表1。

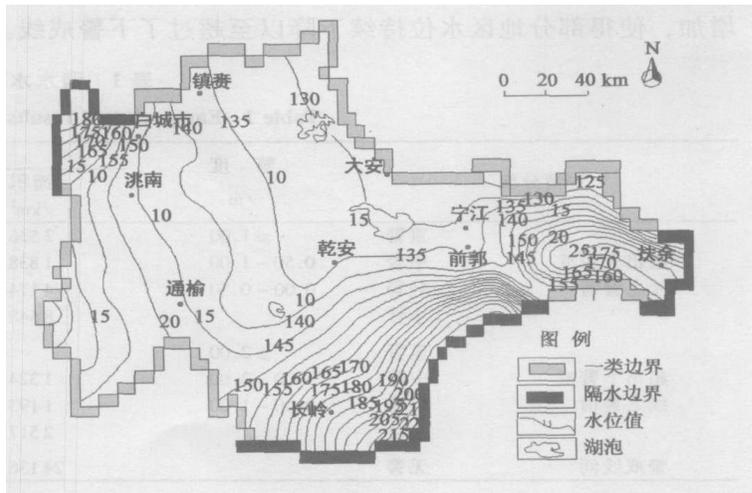


图4 地下水环境2015年预警栅格图

Fig. 4 Grid map of early warning on water environment in west of Songnen plain in 2015

超出上警戒线警情主要分布在较大型的灌区及其周边, 如前郭灌区、镇赉灌区等地, 警情的存在和警情的等级说明灌区的排水工程未能充分发挥作用, 加之灌区多年引地表水或地下水灌溉人为抬高了潜水水位所致。到2015年, 若此状况不能改变, 将会引起警情的扩大。还有一部分警情发生在大安的西南与乾安、通榆一带, 该地区地势较为低平, 存在许多碟形封闭洼地、泡沼和低平地, 农田灌溉时排水不畅, 引起潜水水位抬升, 导致土壤次生盐碱化。超出下警戒线的警情主要分布在松-拉河间地块以及西部山前倾斜平原水资源相对较丰富、开采程度较大的地区。松-拉河间地块大部分地区潜水水位高于承压水位, 在人工开采孔隙承压水的影响下, 潜水发生越流补给承压含水层。在大量开采承压含水层的情况, 越流作用更加

明显, 加之大量开采该层水资源, 导致水位降至警戒线之下。西部山前倾斜平原的潜水也以越流的形式补给承压含水层。近年来该区气候渐趋干旱, 降水量减少, 地下水的补给来源明显减小, 同时, 地下水的开采量逐年

增加,使得部分地区水位持续下降以至超过了下警戒线。

表 1 潜水水位预警结果

Table 1 Early warned results of the phreatic water tables

警情分级	警 度 /m	1999 年		2015 年		
		面积 / km ²	占计算区面积 / %	面积 / km ²	占计算区面积 / %	
超出上警戒 线之警情	重警	≥1.00	2 536	7.20	3 468	9.85
	中警	0.50~ 1.00	1 838	5.22	2 365	6.72
	轻警	0.00~ 0.50	4 174	11.86	3 913	11.12
	小计		8 548	24.28	9 746	27.69
超出下警戒 线之警情	重警	≥2.00				
	中警	1.00~ 2.00	1 324	3.76	1 503	4.27
	轻警	0.00~ 1.00	1 193	3.39	1 419	4.03
	小计		2 517	7.15	2 922	8.3
警戒线间	无警		24 136	68.57	22 533	64.01

4 结 论

水资源环境预警是一个新的研究课题,它涉及到许多新理论和新方法。在地下水环境预警中,明确预警的目标、确定警戒线十分重要。采用 GIS-PMODFLOW 系统进行地下水环境的预警是一个新探索。

预警结果表明,该区既有因灌溉使地下水位上升而引起的土壤次生盐碱化的警情,也有由于大量开采地下水引起局部地区地下水位下降的警情。因此,科学、合理地开发地下水资源,是保证本区经济和环境可持续发展的重要基础。

水环境系统十分复杂,涉及影响因子较多,受自然地理条件、水文条件和人为因素等控制,各地区的预警目标存在较大差异。因此,有必要从环境特征、预警目标、预警指标体系的建立、预警的技术和方法等方面开展深入的研究。本文利用 GIS-PMODFLOW 联合系统对松嫩平原西部水环境预警进行了有益的尝试,该方法在预警警戒线的确定、潜水位数值模拟与预报和预警分析判断等方面显示了它的优越性。本文为水环境研究领域开拓了一个新的研究方向。

参考文献:

- [1] 傅伯杰. 区域生态环境预警的理论及其应用[J]. 应用生态学报, 1990, 4(4): 436- 439.
- [2] 许学工. 黄河三角洲生态环境的评估和预警研究[J]. 生态学报, 1996, 16(5): 461- 468.
- [3] 陈国阶. 对环境预警的探讨[J]. 重庆环境科学, 1996, 18(5): 1- 4.
- [4] 陈治谏, 陈国阶. 环境影响评价的预警系统研究[J]. 环境科学, 1992, 13(4): 20- 24.
- [5] 林年丰, 汤 洁. GIS EIS 联合系统在第四纪研究中的作用及意义[J]. 第四纪研究, 2001, 21(2): 100- 107.
- [6] 林年丰, 汤 洁. GIS 与环境模拟在环境地质研究中的作用和意义[J]. 土壤与环境, 2000, 9(4): 259- 262.
- [7] 何延波, 杨 琨. 遥感和地理信息系统在水文模型中的应用[J]. 地质地球化学, 1999, 27(2): 103.
- [8] 尹魁浩, 翁立达. 地理信息系统技术在水资源开发利用和保护领域中的应用[J]. 水资源保护, 1999(1): 10- 14.
- [9] 樊胜岳, 徐建华. 水土流失和沙漠化系统中人文作用分析的通用数学模型[J]. 地理科学, 1992, 12(4): 305- 307.
- [10] 王占兴, 宿青山, 林绍志, 等. 白城地区地下水及第四纪地质. 地质专报(六), 水文地质工程地质第三号[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
- [11] 魏文秋, 于建营. 地理信息系统在水文学和水资源管理中的应用[J]. 水科学进展, 1997, 8(3): 296- 300.
- [12] 刘 勇, 井文涌. 地理信息系统技术及其在环境科学中的应用[J]. 环境科学, 1997, 18(2): 62- 65.

Application of integrated system of GIS PModflow to water environment early warning in west of Songnen plain^{*}

TANG Jie, BIAN Jiarmin, LIN Niarr feng, YANG Jiar qiang

(College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: With the effect of the groundwater table changes on the environment, the coupling technology with GIS and PModflow is used to define the threshold of the groundwater environment early warning in the paper. By means of this method, the phreatic water table without salinization is defined as the maximum limit, while the pumping limit of the phreatic water as the minimum limit. On the basis of the system model generalization, the water table is simulated and predicted. The spatial analysis of GIS is used for overlaying the grid and the attribute judgment. The water environment precaution compares the predicted water with the threshold water table. Results show that the precaution state occurs more in 2015 than 1999, and mainly with the secondary salinization due to the phreatic water table uplift.

Key words: GIS PModflow; phreatic water table; water environment early warning; mathematical simulation; secondary salinization; integrated system; Songnen plain

第二届国际应力-水流-热-化学耦合学术大会在河海大学召开

第二届国际应力-水流-热-化学耦合学术大会于 2006 年 5 月 22~25 日在河海大学召开。水利部副部长胡四一、中国长江三峡工程开发总公司副总经理曹广晶任组织委员会名誉主席,河海大学校长张长宽教授出席开幕式并致欢迎辞。

本届会议的主题涉及工程研究中的 THMC 耦合研究的理论与实践,包括水利水电工程中的 THMC 耦合,边坡工程中 THMC 耦合,核废料处置工程中 THMC 耦合,石油天然气储库工程中 THMC 耦合,地质介质中 THMC 耦合,环境岩土工程中 THMC 耦合,自然灾害与环境工程中 THMC 耦合以及矿业工程中的 THMC 耦合研究等。来自中国、美国、英国、法国、俄罗斯、德国、意大利、西班牙、瑞士、瑞典、挪威、加拿大、澳大利亚、日本、韩国及中国香港等国家和地区的 100 余名专家、学者通过探讨不同领域中 THMC 耦合研究的热点问题,促进国内外 THMC 耦合的科技合作和创新研究,提高 THMC 耦合的试验技术和应用水平。

第三届国际应力-水流-热-化学耦合学术大会将于 2009 年在法国召开。

《水科学进展》编辑部

^{*} The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China(No.40572170).