

河流-含水层系统中水文要素的变化过程分析

束龙仓¹, CHEN Xun-hong²

(1. 河海大学水资源环境学院, 江苏 南京 210098;

2. Conservation and Survey Division, University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, NE 68588, USA)

摘要:以美国内布拉斯加州中部普拉特河谷河流-含水层系统为例,采用可视化的 MODFLOW 中的 Zone Budget 模块,方便、快捷地分析了该研究区系统中水文要素的变化过程,即:降水、蒸发、地下水开采、河流得水、河流失水、侧向流入流出、含水层储存量随时间的变化过程。共计算了模型模拟的 5 a 期间内逐月和季节性的各要素变化情况。其计算结果表明:降水是地下水的主要补给来源,地下水开采则是其消耗的主要方式,开采具有明显的季节性。同时蒸发也使含水层失去一定的水量。河流与含水层之间有着密切的水量交换,这些信息对普拉特河谷,或类似地区的水资源合理开发利用和管理都是非常重要的。

关键词: 河流-含水层系统;可视化的 MODFLOW;水文要素;河流失水;河流得水;普拉特河谷

中图分类号: P641.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2003)03-0251-04

河谷区所有水文要素的变化过程将为该地区水资源合理开发利用和管理提供全面、系统的信息。在分析这些水文要素时,通常采用水均衡的方法,将某一地区、某一时段内的所有水文要素的变化情况用列表的形式来表达。通过分析水均衡要素的变化情况,可加深对研究区天然条件和人为开采条件下的水文过程的认识,同时水均衡信息也可用于水资源管理。目前,已有许多水均衡研究的成果,包括:Patte 用解析模型分析了拉斯维加斯河谷(Las Vegas Valley)供水和用水的有关要素^[1]。Gronberg 等计算了加利福尼亚州 San Joaquin 河谷区的水均衡要素,并评价了地下水的补给和灌溉效益^[2]。还有一些使用解析模型和经验模型来进行水均衡分析的例子,这些例子都将实际的水文系统进行简化,或在系统中不存在地下水开采^[3~5]。还有一些成果只考虑了稳定流问题,不能反映出水文要素随时间变化的特点^[6]。Berger 于 2000 年研究了内华达州中北部 Humboldt 河流域在 30 a 内的各水均衡要素,包括降水、地表径流、开采量、地下水的补给、地下径流、蒸发蒸腾的平均年体积,该研究成果提供了一个很好的水均衡分析的例子^[7]。然而,用这些解析法只分析了不同水文单元的平均年水均衡。

选择内布拉斯加州中部普拉特河谷为研究区,对地下水系统中的水文要素进行分析。这些要素包括:降水、蒸发、地下水开采、河水得到地下水的补给(以下简称河流得水)、河流向地下水排泄(以下简称河流失水)、侧向流入流出等。由于采用的是非稳定流模型,所以确定了各要素随时间变化的具体情况。

1 研究区简介

研究区位于美国内布拉斯加州中部普拉特河谷地区,总面积约 1 118 km²。研究区多年平均降水量为 625.35 mm(1963~1994 年),多年平均蒸发量为 1 133.86 mm,蒸发作用只发生在每年 5~9 月份。研究区的地下水水位等值线图表明,地下水自西向东流动,总体上与河流的流向近似平行。地下水水位由西侧的 670 m 逐渐下降到东侧的 610 m。普拉特河从研究区的西部流入,横穿中部,由东部流出。根据普拉特河卡尼市(Kearney)测站 1983 至 1986 年的观测资料,多年平均河水位为 651.72 m,平均流量为 3 733.83 × 10⁶ m³。研究区内的普拉特河与冲积含水层之间的水力联系密切^[8]。

该区的农业发展主要依赖于地下水灌溉。研究区的含水层系统为高平原含水层系统的一部分,包括非承压的冲积层、淤泥和粘土层(隔水层)、Ogallala 组的地层。隔水层将浅层的冲积层和 Ogallala 组的地层分开,冲

积层主要由未固结的砂和砾石组成. Ogallala 组的下覆地层为白垩系的页岩, 构成整个含水层系统的隔水底板. 由于冲积含水层的渗透性良好, 使大部分灌溉井都位于该层内, 灌溉开采地下水集中在每年的 6~8 月份.

2 水文要素变化过程分析

对研究区的河流-含水层系统, 建立了地下水水流模拟模型, 并用美国地质调查局研制的可视化的 MODFLOW^[9] 对模型进行求解, 用 1981 年 10 月 1 日至 1986 年 9 月 30 日的观测资料对模型进行了识别. 模型的识别结果显示: 不但每个观测孔的计算水位与观测水位非常接近, 而且计算的地下水位等值线与观测的地下水位等值线也拟合得很好.

在模型的识别过程中, 用可视化的 MODFLOW 中 Zone Budget 的功能计算了全区以及沿河流分布的均衡区的水均衡要素. 表 1 为 5 a 模拟期内逐年的所有流入项和流出项的变化值, 既包括每个均衡项的总体积, 也有各项占流入项和流出项的比例. 降水补给对本区地下水来说是极其重要的, 在所有流入项中所占比例最大. 地下水的开采是流出项中最重要的一项. 河流与地下水之间的补排关系较复杂, 部分河段为河流得水, 另一部分河段则为河流失水, 但对整个河流来说, 得到的水要比失去的水量大. 模型中通用水头边界表示的侧向径流是含水层在边界处的流入和流出量. 模拟结果表明这两者数值接近. 因为所采用的是非稳定流模型, 所以可分析各均衡要素随时间(年或月)的变化情况, 这些信息对河谷区的水资源管理是非常重要的.

2.1 降水入渗与蒸发

计算结果表明降水入渗补给随时间逐月变化很大, 最大补给量在 $(1.0 \sim 2.1) \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$. 年补给量为 $162.2 \times 10^6 \sim 253.2 \times 10^6 \text{ m}^3$, 占含水层年总流入量的 40% 左右(表 1). 计算的潜水年蒸发蒸腾量为 $33.4 \times 10^6 \sim 42.4 \times 10^6 \text{ m}^3$, 占含水层年总流出量的 8% 左右(表 1). 这两者的差为潜水含水层获得的净降水入渗补给量. 图 1 为 5 a 内净降水入渗补给量随时间的变化情况(图中横坐标的第 1 天为 1981 年 10 月 1 日, 以下类同). 在第 2 个模拟年的 7 月, 第 3 个模拟年的 8、9 月, 该值为负值, 表明在这期间, 含水层不但得不到降水的补给, 由于蒸发还要失去一部分水量. 计算结果显示 5 a 内每年的净降水入渗补给量分别为 $166.4 \times 10^6 \text{ m}^3$, $167.1 \times 10^6 \text{ m}^3$, $167.2 \times 10^6 \text{ m}^3$, $215.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ 和 $128.8 \times 10^6 \text{ m}^3$, 都明显小于对应年的降水入渗补给量.

表 1 不同水文要素年水均衡分析

Table 1 Annual water balance analysis for different hydrologic elements																
模拟时段		储存量		开采量		河流失水		河流得水		蒸发蒸腾		侧向径流		降水补给		小计
		/10 ⁶ m ³	/%	/10 ⁶ m ³	/%	/10 ⁶ m ³	/%	/10 ⁶ m ³	/%	/10 ⁶ m ³	/%	/10 ⁶ m ³	/%	/10 ⁶ m ³	/%	
第 1 模拟年	流入	202.9	37.3			31.3	5.7					107.1	19.7	203.4	37.4	544.7
	流出	130.9	24.0	138.5	25.4			105.7	19.4	37.1	6.8	132.5	24.3			544.7
第 2 模拟年	流入	126.3	27.0			33.6	7.2					97.7	20.9	209.5	44.9	466.9
	流出	89.5	19.2	146.1	31.1			87.8	18.8	42.4	9.1	101.2	21.7			467.0
第 3 模拟年	流入	135.1	28.3			35.8	7.5					100.3	21.0	206.7	43.3	477.9
	流出	123.1	25.8	141.1	29.5			81.9	17.1	39.5	8.3	92.5	19.4			477.9
第 4 模拟年	流入	96.5	19.8			35.5	7.3					101.8	20.9	253.2	52.0	487.0
	流出	133.1	27.3	149.7	30.7			79.7	16.4	37.4	7.7	87.1	17.9			487.0
第 5 模拟年	流入	101.8	25.5			36.7	9.2					98.7	24.7	162.2	40.6	399.3
	流出	67.1	16.8	134.9	33.8			77.3	19.4	33.4	8.4	86.7	21.7			399.3
5 a 平均	流入	132.5	27.9			34.6	7.3					101.1	21.3	207.0	43.6	475.2
	流出	108.7	22.9	142.1	29.9			86.4	18.2	38.0	8.0	100.0	21.0			475.2

2.2 河流-含水层相互作用

普拉特河在模拟模型中为一线形的源、汇项, 在研究区的西部, 河水位高于地下水位, 河流失水; 在研究区的东部, 河水位低于地下水位, 河流得水. 计算结果表明 5 a 内河流的净得水量(即河流得水减去河流失水)始终是正值(图 2), 表示对整个研究区来说, 河流是获得地下水补给的. 每年的补给量分别为 $74.5 \times 10^6 \text{ m}^3$, $54.2 \times 10^6 \text{ m}^3$, $45.9 \times 10^6 \text{ m}^3$, $44.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ 和 $40.6 \times 10^6 \text{ m}^3$.

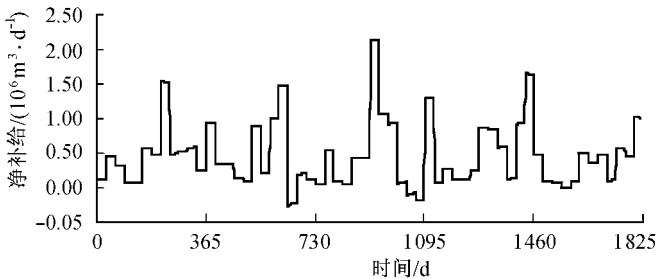


图 1 5a 模拟期内净补给量变化曲线

Fig.1 Variation of net recharge for a five-year period

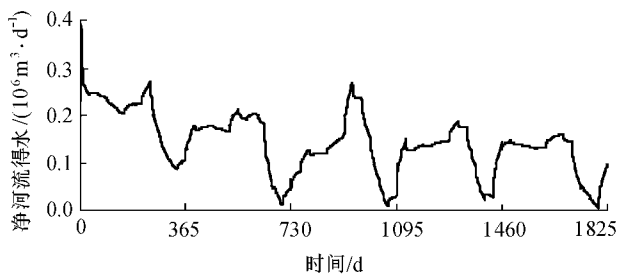


图 2 5a 模拟期内净河流得水量变化曲线

Fig.2 Variation of net river gaining for a five-year period

2.3 地下水开采

地下水开采主要集中在 6~8 月的灌溉期内 模拟结果显示地下水开采量的季节性变化非常明显 ,在灌溉期内 ,开采量可达 $1.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$,而非灌溉期仅 $0.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ (图 3) .地下水的年开采量在 $134.9 \times 10^6 \text{ m}^3 \sim 146.1 \times 10^6 \text{ m}^3$,其平均值为 $142.1 \times 10^6 \text{ m}^3$,约占含水层总流出量的 30%(表 1) .灌溉开采地下水的量约占地下水总开采量的 87%左右 .

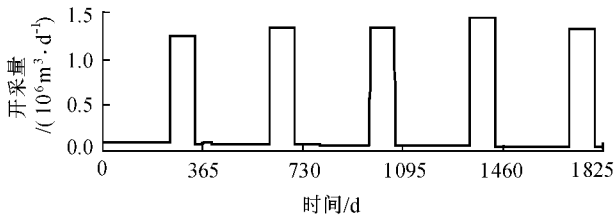


图 3 研究区灌溉期、非灌溉期地下水开采量变化曲线

Fig.3 Variation of groundwater mining rate in studied area during irrigation and non-irrigation seasons

3 结 论

实例研究表明 ,可视化的 MODFLOW 可成功地用于任一研究区的水均衡要素随时间变化过程的分析 ,而传统的解析法很难对逐个要素随时间变化过程进行分析 ,而这些信息对指导水资源的合理开发利用与管理是非常重要的 .例如 ,根据计算的河流得水和河流失水的具体情况 ,可以分析河水与地下水之间的相互作用等 .

通过对普拉特河谷区的水文要素变化过程的分析 ,可得到以下重要信息 :降水入渗补给是该地区地下水的主要补给来源 ,其入渗补给随时间变化非常明显 .年平均补给量约 $207 \times 10^6 \text{ m}^3$,占含水层年总流入量的 43.6%左右 .潜水含水层的蒸发作用季节性变化尤为突出 ,只在 5~9 月份存在 .潜水年蒸发蒸腾量为约 $38 \times 10^6 \text{ m}^3$,占含水层年总流出量的 8% .含水层每年的净降水入渗补给量明显小于对应年的降水入渗补给量 .

在研究区的西部 ,普拉特河水位高于地下水位 ,河流失水 ,在东部 ,河水位低于地下水位 ,河流得水 .对整个研究区来说 ,河流是获得地下水补给的 .

地下水开采主要集中在灌溉期内 ,其开采量可达 $1.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$,而非灌溉期仅 $0.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$.研究区灌溉开采地下水的量约占地下水总开采量的 87%左右 .

参考文献 :

[1] PATT R O. Las Vegas valley water budget :relationship of distribution ,consumptive use ,and recharge to shallow ground-water[M]. US : U S Environmental Protection Agency ,1978.3—61.

[2] GRONBERG J A M ,BELITZ K. Estimation of a water budget for the central part of the west San Joaquin valley[M]. US :U S Geological Survey ,1992.2—22.

[3] GINSBERG M H. Water budget model of the south-central sand hills of Nebraska[D]. Lincoln ,Nebraska :University of Nebraska-Lincoln , 1987.

- [4] GONTHIER J G ,KLEISS A B. Ground-water flow patterns and water budget of a bottomland forested wetland ,black swamp ,eastern Arkansa[M]. US :U S Geological Survey ,1996.2—71.
- [5] SACKS A L ,SWANCER A ,LEE T M. Estimating ground-water exchange with lakes using water-budget and chemical mass-balance approaches for ten lakes in ridge area of Polk and highlands counties[M]. US :U S Geological Survey ,1998.2—52.
- [6] MCGUIRE V L ,KILPATRICK J M. Hydrogeology in the vicinity of the Nebraska management systems evaluation area site[M]. US :U S Geological Survey ,1998.4—25.
- [7] BERGER L D. Water budget estimates for the 14 hydrographic areas in the middle Humboldt river basin[M]. US :U S Geological Survey ,2000.2—55.
- [8] 束龙仓 ,CHEN Xun-hong. 美国内布拉斯加州普拉特河河床沉积物渗透系数的现场测定[J]. 水科学进展 ,2002 ,13(5) :629—633.
- [9] HARBAUGH W A ,MCDONALD G M. User 's documentation for MODFLOW-96 ,an update to the U S geological survey modular finite-difference ground-water flow mode[M]. US :U S Geological Survey ,1996.1—56.

Variation process of hydrologic elements of river-aquifer system

SHU Long-cang¹ , CHEN Xun-hong²

- (1. *College of Water Resources and Environment , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China ;*
2. *Conservation and Survey Division , University of Nebraska-Lincoln , Lincoln ,NE 68588 , USA)*

Abstract : By use of the zone budget module in visual MODFLOW , the variation of hydrologic elements , including precipitation , evaporation , groundwater mining , river gaining and lossing , lateral flows along the domain boundaries , and the volume of water storage in aquifers , of the river-aquifer system of the Platte River Valley , Central Nebraska , is analyzed. The monthly and seasonal variations of each element are simulated for five years , and the calculated results indicate that precipitation is the main source of groundwater recharge , groundwater mining with seasonal characteristics is the main consumption , and evaporation also removes a certain volume of water from the aquifer , and that a close water exchange exists between the river and the aquifer. The information obtained is of significance to reasonable development and utilization of water resources of the Platte River Valley and other similar regions.

Key words : river-aquifer system ; visual MODFLOW ; hydrologic element ; river lossing ; river gaining ; Platte River Valley