

滹沱河流域平原区人类活动对浅层地下水 干扰程度量化研究

王金哲, 张光辉, 聂振龙, 严明疆, 王莹
(中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北石家庄 050061)

摘要: 在滹沱河流域平原区, 人类活动和气候变化是造成浅层地下水区域性下降的双重因素, 人类活动在浅层地下水从“天然—人工”二元影响转化过程中在时空上经历了怎样的变化, 是值得探讨的问题。选用综合指数法, 通过筛选人类活动对浅层地下水干扰指标, 建立评价体系, 对滹沱河流域平原区在不同时代的人类活动对浅层地下水的干扰程度进行了量化研究。研究结果表明, 空间上, 不同时代都表现出从西部向东部干扰程度逐渐减小; 从整个研究区看, 干扰程度增大的趋势从西部向东部逐渐推进; 干扰程度从分级简单的0~0.4发展到目前0.2~1.0不同级别共存的复杂分布状态。时间上, 随着时间的推移, 整个研究区的干扰程度都表现出增强趋势, 在不同地区增强幅度不一致; 人类活动对浅层地下水干扰影响经历了从不占据主导作用→逐渐占据主导作用→几乎完全占据主导作用。

关键词: 滹沱河流域; 人类活动; 干扰程度; 量化研究

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)02-0065-05

中图分类号: P641.2, X24

Disturbing Degree of Mankind Activities to Groundwater in the Hutuo River Valley Area

WANG Jin-zhe, ZHANG Guang-hui, NIE Zhen-long, YAN Ming-jiang, WANG Ying
(Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Shijiazhuang, Hebei 050061, China)

Abstract: Mankind activity and climate variety are the duplex factor of shallow groundwater decline in the valley area of Hutuo River. The questions are worth discussing that how the shallow groundwater changes from crude state to false state and what change the shallow groundwater in space and time has. After all, the discussion will provide the gist for mankind controlling their activities, self-restraining groundwater, and ensuring the harmonious relation between mankind and groundwater. This article chooses integrated index means, filters the disturbing index, and establishes the quantitative analysis system. On the base of the above, the disturbing degree of mankind activities to shallow groundwater is quantitatively analyzed. Results show that spatially, the disturbing degree decreases gradually from the west to the east in different ages; in view of the whole area, the disturbing degree increases from the west to the east; and the disturbing degree increases from 0~0.4 to 0.2~1.0. Temporari-ly, the disturbing degree in the whole area increases along with time, but it is different in different areas. The disturbance of mankind activities to shallow groundwater goes through different stages.

Keywords: Hutuo River valley; mankind activity; disturb degree; quantitative analysis

浅层地下水系统的变化不仅与当地的自然地理环境有关, 也和人类活动强度密切相关。目前, 大规模人类活动无时不在悄然改变着天然水循环的大气、地表、土壤和地下各个过程, 致使现代环境下水循环呈现出明显的“天然—人工”二元特性^[12]。但由于人类活动是一个抽象的综合性概念, 许多方面量化比较困难, 因而以往的研究多为定性或集中于单一因素的分析^[35]。

如何将人类活动对水循环的干扰影响分离出来从而直观认识其作用程度已成为近几年的研究热点。基于此, 近几年也有学者在人类活动对水循环的影响量化研究进行了有益的探索, 采用的方法归纳起来有地球动力学方法^[6]、人工神经网络缺省因子检验法^[7]、变异系数法^[8]和投影寻踪回归模型^[9]。但不同的研究方法有不同的适用范围和优缺点, 从计算精度、步骤繁琐程

收稿日期: 2009-10-13

修回日期: 2009-12-01

资助项目: 中国地质科学院水文地质环境地质研究所基本科研业务项目“流域尺度人类活动对浅层地下水干扰程度及机制研究”(SK07022); 国家重点基础研究发展规划(973)项目“海河流域二元水循环模式与水资源演变机理”(2006CB403401)

作者简介: 王金哲(1969—), 女(汉族), 河北省元氏县人, 副研究员, 主要从事地下水资源评价和可持续利用研究。E-mail: 5885970@sina.com。

度、指标容量等方面考虑,本研究尝试采用加权综合指数法,选取研究区影响浅层地下水系统的典型人类活动作为指标,以 MAPGIS 为数据处理平台,建立了人类活动对浅层地下水干扰程度量化研究的指标体系,并以滹沱河流域平原区为例,进行了实例验证。

1 评价方法

1.1 方法原理

加权综合指数法是通过加权来测定一组项目的综合变动状况。该方法将与评价目标有关的所有要素综合整理在一起,确定各要素的相对重要性,给出定量指标,然后通过数学方法求解,作为综合分析、评价的基础^[10]。在本项研究中,综合指数法就是将影响浅层地下水系统的分指标指数和权重进行迭加形成综合指数,根据综合指数量化评价人类活动对浅层地下水系统造成的干扰程度。

其评价模型如下:

$$R = \sum_{i=1}^n a_i X_i \quad (1)$$

式中: R ——综合评价指数; a_i ——评价参数的权重; X_i ——评价参数; n ——评价参数的个数。

1.2 权重计算

权重计算时选用灰色关联度法。其计算模型为:

设有 m 个与母因素(x_0)有一定关联作用的子因素(x_1, x_2, \dots, x_m),每个评价因子都有 n 个统计值,构成母序列和子序列。

母、子序列在 $t=1$ 到 $t=n$ 的关联性用关联系数表示:

$$\xi_{ok}(i) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}}{\Delta_{ok}(i) + \zeta \Delta_{\max}} \quad (2)$$

式中: $\Delta_{\min}, \Delta_{\max}$ —— m 条子线在区间 $[1, n]$ 母线的距离 $\Delta_{ok}(i)$ 的最大值与最小值; ζ ——分辨系数,一般取 0.5。

于是有第 k 条子线与母线在 $[1, n]$ 间的关联度为:

$$r_{ok} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi_{ok} \quad (3)$$

采用公式(4)使关联度和为“1”对关联度进行标准化,标准化后的关联度即可做为每个评价因子的权重。

$$r'_{ok} = \frac{r_{ok}}{\sum_{k=1}^m r_{ok}} \quad (4)$$

1.3 综合评价

根据计算出来的一系列 R 值,对照相应的评价分级标准,然后根据评价区的具体条件进行综合分析,判别评价对象的真实状况,判别依据见表 1。一般认为,人类活动对地下水干扰程度大于 0.5 时,人类活动对地下水动态起主导作用^[6]。

表 1 人类活动对浅层地下水干扰程度综合指数等级划分及其含义

综合指数	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1
干扰程度级别	干扰程度低区	干扰程度较低区	干扰程度一般区	干扰程度较强区	干扰程度强区
含义	人类活动对浅层地下水系统的平衡几乎没有影响,浅层地下水系统恢复能力强。	人类活动对浅层地下水系统有较弱影响,层地下水系统能较快恢复自身平衡。	人类活动对浅层地下水系统有一定影响,浅层地下水系统恢复需要一定时间。	人类活动对浅层地下水系统有较强的干扰,浅层地下水系统自身平衡恢复需要较长时间甚至不能修复。	人类活动对浅层地下水系统干扰强烈,浅层地下水系统破坏严重,不能修复。

2 研究区概况

滹沱河流域平原区位于河北省中南部,地处滹沱河以南、滏阳河以北、太行山以东山前倾斜平原,主要包括石家庄地区和衡水地区的大部分县市,邢台地区的柏乡、新河两县小部分区域包括在内。总面积 8 204 km²。

该区属温带半湿润、半干旱大陆性季风气候,降水量年际变化较大,多年平均降雨量 493 mm。滹沱河曾是本区最大河流,属海河的子牙河水系,自西向东贯穿该区,在献县与滏阳河交汇,流域面积 2.48 × 10⁴ km²,目前已干涸。黄壁庄水库和岗南水库是位于滹沱河出山口的两个串联水库,库容分别是 1.50 × 10⁹ m³ 和 1.20 × 10⁹ m³。

3 评价体系构建及数据处理

3.1 评价体系构建

体系的构建首先需选取指标,指标选取依据主导型、可度量、可操作性和覆盖面广的原则,并考虑可直观反映研究区地下水系统的现状因子,影响和反映人类活动的简单易解释因子,人类活动与地下水系统在内的相互影响、相互制约的表征因子,并能通过更新数据就可以调整为新的指标^[11]。从上述因素考虑,选取了 8 个指标作为滹沱河流域平原区人类活动对浅层地下水干扰程度量化研究的评价因子,分别为开采量、人口、机井数量、粮食产量、农作物播种面积、蔬菜产量、水浇地面积和工业总产值。

3.2 数据处理

3.2.1 指标变量数据整理 滹沱河流域平原区包含19个县市。指标的原始数据变量序列搜集整理于1958—2008年石家庄市、衡水和邢台市统计年鉴,通过核算8个指标变量分别在20世纪50—90年代和21世纪初期的平均值,得到8个指标在不同时代的变量值。

3.2.2 变量数据标准化 为使8个指标之间具有可比性,从而完整地组合到一起,首先统一这些指标的量纲。采用极值标准化方法对指标进行标准化。

3.2.3 变量数据提取 根据研究区现有资料局限、研究程度、面积范围大小和评价精度要求,运用MAPGIS软件对研究区进行网格化,选取的剖分网格为正方形。由于该区地下水资源评价、水文地质条件、开发利用程度等方面研究程度较高,根据基础数据的最小单元和示范区面积,确定剖分网格间距为1.25 km,共剖分单元128×76个,其中有效计算单元共计5 645个。

3.3 确定权重

采用灰色关联度法确定权重。通常情况下,浅层地下水的变化指标用地下水水位或地下水埋深表示,在本研究中,用地下水开采量作为浅层地下水系统变化的特征值。原因有两个方面:一是根据收集资

料的实际情况,指标变量都是以县为单位的多年动态变化值,每个年代人类活动对浅层地下水的干扰都是在前期各项人类活动多年累计基础上叠加的结果。即各项指标反映的是以县为单位的区域值,而通常意义上的地下水水位或地下水埋深是反映某一点的值,不能把人类活动对区域地下水系统的干扰很好地反映出来。二是地下水开采量是与地下水互动相关的变量,能较准确地表征浅层地下水系统的变化,而且一个地区的地下水开采量是用这一地区内不同位置点的开采量值进行累加得到的变量。所以,用地下水开采量作为浅层地下水系统变化的特征值,也就是母序列。子序列为7个指标变量,经过计算,得到人类活动对浅层地下水干扰程度评价7个指标的权重值(表2)。

3.4 评价指数计算

在取得各指标的基本参数和权重后,运用公式(1)就可得到人类活动对浅层地下水的干扰程度这一综合指数。

把不同时代的综合指数与相对应的坐标建立空间对应关系,借助MAPGIS工作平台,使用空间分析的DTM功能就可绘制工作区人类活动对浅层地下水干扰程度的分布图。

表2 人类活动各指标对浅层地下水的干扰权重

指标	人口	开采井	粮食产量	播种面积	工业总产值	蔬菜产量	水浇地面积
权重计算值	0.603 6	0.808 8	0.772 3	0.730 3	0.593 6	0.714 9	0.824 1
标准化值	0.119 6	0.160 2	0.153 0	0.144 7	0.117 6	0.141 6	0.163 3

4 研究区人类活动对浅层地下水干扰程度定量评价

本研究中绘制了20世纪50—90年代和21世纪初期的类活动对浅层地下水干扰程度分布(图1),通过对5个时段进行评价,可纵观20世纪50年代以来人类活动对滹沱河流域平原区浅层地下水系统干扰程度的演变特征。

20世纪50年代,滹沱河流域平原区农业落后,工业不发达,河道自然溢流,湿地遍布,浅层地下水的开采量为 $1.35 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。这一时期人类活动为低基数发展阶段,对浅层地下水干扰程度综合指数变化区间为0~0.4,都小于0.5,也就是,浅层地下水系统保持自然平衡状态,以自然因素调节为主,人类活动没有占据主导地位。人类活动对浅层地下水干扰程度0~0.2之间的分布面积为2 461.5 km²,主要分布在研究区的中东部;0.2~0.4之间的分布面积为6 343.5 km²,主要分布研究区的西部地区。这一时

期,人类活动对浅层地下水系统的干扰程度较弱,大部分地区的浅层地下水系统自身修复能力较强。

20世纪60年代,“以蓄为主”推动的第一次水利建设高潮和围绕建成“上蓄、中疏、下排、适当地滞”防洪体系开始的第二次水利建设高潮,使研究区的地下水系统不再处于平静的自然平衡状态,自然状态下的补、径、排关系被破坏。但受当时经济技术条件的限制,人类活动对浅层地下水的干扰程度较弱,浅层地下水的开采量为 $1.71 \times 10^9 \text{ m}^3$,地下水系统可以修复,之后建立新的平衡。这一时期,人类活动对浅层地下水的干扰程度综合指数变化区间为0~0.4,0~0.2之间的分布面积为1 750.5 km²,主要分布在中西部;0.2~0.4之间的分布面积为6 343.5 km²,主要分布在东部。与20世纪50年代相比,干扰程度低的区域在减小,干扰程度较低的区域在逐渐增大,也就是说,人类活动对浅层地下水的干扰程度增强,浅层地下水系统对遭到的破坏可以自身修复。

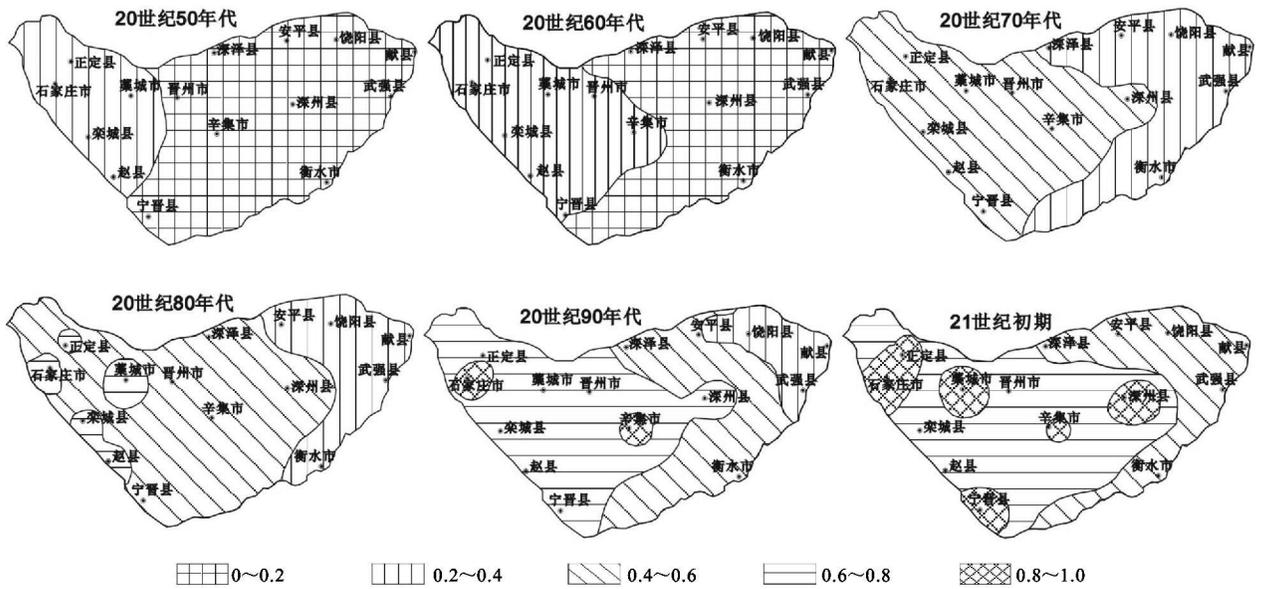


图 1 滹沱河流域平原区不同时代人类活动对浅层地下水干扰程度分布图

20 世纪 70 年代, 围湖造田和大规模的打井高潮, 以及工业的复苏使人类活动出现高潮, 对地下水的影响明显增强, 浅层地下水开采量增加为 $2.55 \times 10^9 \text{ m}^3$, 表现为水浇地面积的增加使得农业对地下水的开采量明显增加, 20 世纪 60 年代中期水浇地面积近为 $3.00 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 20 世纪 70 年代末为 $2.03 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。这一时期, 滹沱河流域平原区人类活动对浅层地下水干扰程度综合指数变化区间为 $0 \sim 0.6$, 出现了人类活动对浅层地下水干扰占主导作用的大面积区域, 面积有 $5\,321.4 \text{ km}^2$, 位于研究区的西部和中部大部分地区。干扰程度低的区域急剧缩减, 仅为 79.6 km^2 , 几乎消失殆尽。与 20 世纪 60 年代相比, 人类活动对浅层地下水的干扰程度仍在增强, 大部分地区的浅层地下水系统修复需要较长时间。

20 世纪 80 年代, 研究区水利化程度进一步发展, 机井数量大幅增加, 粮食产量增长效果显著, 与之相应, 浅层地下水系统受到强烈的扰动, 浅层地下水开采量为 $3.03 \times 10^9 \text{ m}^3$, 是研究时段的最大消耗时期。这一时期, 滹沱河流域平原区人类活动对浅层地下水干扰程度综合指数变化区间为 $0.2 \sim 0.7$, 人类活动对浅层地下水的干扰强度向更强方向发展, 出现干扰程度较强的区域, 面积为 $1\,414.4 \text{ km}^2$, 主要分布在中部和西部。而且, 干扰程度低的区域完全消失, 干扰程度低至一般的区域在 20 世纪 70 年代基础上有所减小, 减小面积为 $1\,414.4 \text{ km}^2$, 即这部分缩减的区域转化为干扰程度较强的区域。与 20 世纪 70 年代相比, 人类活动对浅层地下水的干扰程度不断增强, 地下水系统遭到的破坏不断增强, 可以自身修复

的区域不断缩小。

20 世纪 90 年代, 随着地下水的资源功能、生态功能和地质环境功能等诸多问题的出现, 人类活动被迫进入理性高基数发展阶段, 主动探求更好的水资源利用配置, 如 1995 年的黄壁庄水库水引入石家庄市、合理井灌和渠灌等, 但受区内地理位置和缺少地表水的现实, 造成人们仍然不得不以开采地下水为主, 浅层地下水的开采量为 $2.82 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。这一时期, 人类活动对浅层地下水干扰程度综合指数变化区间为 $0.2 \sim 0.8$, 干扰程度继续增强, 干扰程度占主导作用的区域继续迅速扩展, 出现干扰程度强的区域, 位于石家庄市。干扰程度较强的区域面积从 20 世纪 70 年代的 0 km^2 增至 90 年代的 $4\,899.1 \text{ km}^2$, 主要位于研究区的西部和中部地区, 干扰程度低的区域萎缩至研究区东部的小部分区域, 干扰程度较低的区域萎缩的速度加快, 与 20 世纪 80 年代相比, 从 $3\,404 \text{ km}^2$ 缩减到 $1\,297.7 \text{ km}^2$, 减少了 $2\,106.3 \text{ km}^2$ 。干扰程度低的区域完全消失。说明人类活动对浅层地下水的干扰程度持续增强, 地下水系统遭到的破坏持续增强, 绝大部分地区的浅层地下水系统修复需要较长时间, 甚至不能修复。

进入 21 世纪, 滹沱河流域平原区实施了农业上的节水降耗措施和工业生产用水的循环率等技术推广应用, 石家庄市作为地下水的用水大户也从 20 世纪 90 年代开始加大地表水入市力度, 这些措施的实施, 使人类活动对浅层地下水的干扰程度有所降低, 浅层地下水的开采量为 $2.77 \times 10^9 \text{ m}^3$, 相比 20 世纪 90 年代有所减小。但由于前期的发展和积累, 人类

活动强度对浅层地下水的干扰强度在 20 世纪 90 年代的基础上继续增大。目前, 综合指数变化区间为 0.2~1.0, 0.4~1.0 之间分布的区域几乎占据整个研究区, 面积为 7 374.6 km², 占研究区总面积的 83.8%。干扰程度强的区域为中上游的石家庄市和正定县、辛集市、宁晋县和深州市的县城位置, 呈斑块状分布, 面积有 1 624 km²。说明人类活动对浅层地下水的干扰程度持续增强, 地下水系统遭到的破坏更为严重, 不能修复的区域逐渐扩展。

从 20 世纪 50 年代到 21 世纪初期, 人类活动对滹沱河流域平原浅层地下水的干扰程度在时空分布上呈现出明显的特征。空间上, 不同时代都表现出从西部向东部干扰程度逐渐减小; 从整个研究区看, 干扰程度增大的趋势从西部向东部逐渐推进; 干扰程度从分级简单的 0~0.4 发展到目前 0.2~1.0 不同级别共存的复杂分布状态。时间上, 随着时间的推移, 整个研究区的干扰程度都表现出增强态势, 在不同地区增强幅度不一致, 人类活动对浅层地下水干扰影响经历了不占据主导作用→逐渐占据主导作用→几乎完全占据主导作用的发展过程。

5 结论

采用加权综合指数法量化评价人类活动对区域浅层地下水干扰程度的方法, 根据主导性、可度量性、可操作和覆盖面广的原则, 选取了量化评价指标, 在此基础上, 对近 50 a 来滹沱河流域平原区人类活动对浅层地下水的干扰程度进行了量化评价。总的来看, 人类活动对滹沱河流域平原区浅层地下水干扰程度时空分布上呈现出明显的特征。

在空间上, 不同时代都表现出从西部向东部干扰程度逐渐减小; 从整个研究区发展形势看, 干扰程度增大的趋势从西部向东部逐渐推进; 干扰程度从分级

简单的 0~0.4 发展到目前 0.2~0.4, 0.4~0.6, 0.6~0.8 和 0.8~1.0 不同级别共存的复杂分布状态。

在时间上, 随着时间的推移, 整个研究区的干扰程度都表现出增强态势, 在不同地区增强幅度不一致; 人类活动对浅层地下水干扰影响经历了从不占据主导作用到逐渐占据主导作用再到几乎完全占据主导作用的发展过程。

[参 考 文 献]

- [1] 王浩, 王建华, 秦大庸, 等. 基于二元水循环模式的水资源评价理论方法[J]. 水利学报, 2006, 37 (12): 1496-1502.
- [2] 王建华, 江东. 黄河流域二元水循环要素反演研究[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 89-90.
- [3] 陈志清. 历史时期黄河下游的淤积决口改道与人类活动的关系[J]. 地理科学进展, 2001, 20(1): 44-50.
- [4] 李新, 周宏飞. 人类活动干预后的塔里木河水资源可持续利用问题[J]. 地理研究, 1998, 17(2): 171-177.
- [5] 刘昌明, 成立. 黄河干流下游断流的径流序列分析[J]. 地理学报, 2000, 55(3): 257-265.
- [6] 杨建强, 罗先香, 高振会. GIS 支持下人类活动对地下水动态影响的定量分析[J]. 水科学进展, 2003, 14(3): 358-362.
- [7] 冯绍元, 霍再林, 康少忠, 等. 干旱内陆区自然—人工条件下地下水动态的 ANN 模型[J]. 水利学报, 2007, 38(7): 873-878.
- [8] 许月卿. 土地利用对地下水位的影响[J]. 地理研究, 2005, 24(2): 222-228.
- [9] 张翠云, 王昭. 黑河流域人类活动强度的定量评价[J]. 地球科学进展, 2004(S): 387-390.
- [10] 贾俊平. 统计学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 395-396.
- [11] 夏军, 黄国和, 庞进武, 等. 可持续水资源管理: 理论·方法·应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 152-156.