

华北平原地下水资源承载力模糊综合评价

刘敏, 聂振龙, 王金哲, 汪丽芳

(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: 华北平原地下水资源承载力评价对保障水资源—生态环境—社会经济协调可持续发展具有极其重要的意义。采用模糊综合评价方法对华北平原市级地下水资源承载力进行分析,并结合灰色关联理论进一步探讨地下水资源承载力的影响因素。结果表明,华北平原地区各城市地下水资源承载力平均得分为0.38,其中尚具一定开发潜力的仅占19.0%,已接近开发潜力和地下水资源已严重超采且已出现地质环境问题的分别占38.1%和42.9%,总体承载力很小。经计算,地下水资源开采量与人口、第一产业产值、第三产业产值、GDP、工业产值的灰色关联度依次为:0.71,0.63,0.59,0.58和0.56,故影响华北平原地下水承载力最主要的因素为人口的剧增,农业灌溉用水的增加以及社会经济高速发展等社会因素。

关键词: 地下水; 承载力; 华北平原; 模糊综合评价

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)06-0311-05

中图分类号: TV213

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.06.060

Fuzzy Comprehensive Evaluation of Groundwater Resources Carrying Capacity in North China Plain

LIU Min, NIE Zhen-long, WANG Jin-zhe, WANG Li-fang

(*Institute of Hydrogeology and Environmental Geology,*

Chinese Academy of Geological Science, Shijiazhuang, Hebei 050061, China)

Abstract: Groundwater resources carrying capacity evaluation is extremely important in preserving harmonious and sustainable development of water resources, ecosystem, society and economy. In this study, fuzzy comprehensive evaluation of the groundwater resources carrying capacity in North China Plain (NCP) was conducted and grey relational theory was used in analyzing the influencing factors of groundwater resources carrying capacity. The results showed that the mean value of groundwater carrying capacity in cities of NCP was 0.38, among which cities that of much developed in groundwater but still with a little exploitation potential accounted for 19.0% of the total, while that close to potential and over-exploitation accounted for 38.1% and 42.9%, respectively. So groundwater resources had been over-exploited with extremely weak carrying capacity in NCP. The grey correlation degrees of groundwater exploitation with population, the first industry output, the third industry output, GDP and industry output were 0.71, 0.63, 0.59, 0.58, and 0.56, respectively. Generally, the most important influencing factors of the groundwater resources carrying capacity in NCP were the growth of population, the increased agriculture irrigation and the rapid economic and social development.

Keywords: groundwater; carrying capacity; North China Plain; fuzzy comprehensive evaluation

随着人口的剧增和社会经济的快速发展,社会各方面对水的需求迅速增长,水资源供需矛盾日益突出^[1]。在许多国家和地区,仅靠地表水资源已不能满足当地社会经济可持续发展的需求,尤其是在一些干旱、半干旱地区,地下水往往是一个地区主要、甚至唯

一的水源。因而,地下水资源已然成为区域经济发展的基础资源之一,合理开发利用地下水资源并维持地下水资源的可持续利用,是一项重要而艰巨的任务。华北平原地处半干旱半湿润地区,是地下水支撑农业高产的重要粮食产区之一,该地区水资源有限且气候

收稿日期:2013-03-04

修回日期:2014-03-20

资助项目:国家重点基础研究(973)发展计划项目“华北平原地下水演变机制与调控”(2010CB428805-4);中央级公益性科研院所基本科研业务费(SK201306)

作者简介:刘敏(1982—),女(汉族),河北省邯郸市人,博士,助理研究员,主要从事气候变化与水文水资源、水文地质等方面的研究。E-mail: agnes0505@163.com。

呈暖干化趋势^[2-3],由于近几十年来社会经济快速发展、人口剧增,生产、生活用水量剧增,造成地下水严重超采,地下水位持续下降,地下水水质恶化,生态系统遭到严重破坏^[4],地下水资源承载能力的可持续性面临严重挑战。因而很有必要对华北平原地区地下水资源承载能力进行准确评价,这不仅是华北地区水循环和地下水资源可持续发展研究的重要课题,也对保障水资源—生态环境—社会经济—粮食安全的协调可持续发展具有重要意义。

目前,国际上对水资源承载力的单项研究成果较少,大多将其纳入可持续发展的理论范畴^[5-9]。在我国,关于水资源承载力的研究相对较多,尤其是 20 世纪 90 年代以来相关研究成果不断涌现^[10-15],研究方法也层出不穷,主要包括经验估算法、指标体系评价法和复杂系统分析法等 3 类^[11]。而关于地下水资源承载力的研究相对较少,直到 2000 年以后才不断增多^[1,16-21],各种方法和指标也颇为丰富,并成为水资源承载力研究领域的一个研究热点。门宝辉等^[16]、王顺久等^[17]分别采用物元模型、投影寻踪模型对关中平原地下水资源承载力进行评价。屈吉鸿等^[19]应用多目标决策的逼近理想解技术建立了地下水资源承载力评价模型,并采用正交投影法进行改进。王荣晶等^[20]以人民胜利渠灌区为典型灌区,从地下水资源系统功能角度出发建立了层次模糊综合评价模型来评价大型灌区的地下水资源承载力。王威等^[21]对宝鸡峡灌区地下水资源承载力进行了模糊综合评价。然而地下水资源承载力分析远比地表水复杂,除需要考虑以上文章中考虑的地下水资源利用率、地下水资源开发利用程度、供水模数、需水模数、地下水资源耕地灌溉率等因素外,水文地质条件和地下水超采可能带来和已经带来的环境问题也是不可忽略的主要因素,且各因素间相互作用、相互影响和制约,因而有关地下水资源承载力的研究还相对薄弱。基于以上分析,并考虑到指标选择的完全性和相对独立性,本研究选择了 9 个指标,并将其分为资源拥有指数、资源利用指数和环境问题指数 3 类,根据专家打分法确定其权重,采用模糊综合评价方法对华北平原地区地下水承载力进行综合评价,并结合灰关联理论进一步探讨华北平原地区地下水承载力的影响因素及调控对策。

1 方法简介

1.1 模糊综合评价方法^[22-23,1]

设有两个有限论域 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}$; $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$,其中 U 代表综合评判的因素所组

成的集合, V 代表评语所组成的集合,则模糊综合评判为下列模糊变换:

$$B = A \cdot R \quad (1)$$

式中: A —— U 的模糊子集,而评判结果 B 是 V 上的模糊子集,并且可表示为 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$, $0 \leq a_j \leq 1$,其中 a_i 即为 U 对 A 的隶属度,表示单因素 U_i 在评定因素中所起作用大小的变量,也在一定程度上代表根据单因素 U_i 评定等级的能力,而 b_j 则为等级 V_j 对综合评定所得模糊子集 B 的隶属度,表示综合评判的结果。

评判矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: r_{ij} —— U_i 的评价等级 V_j 隶属度,因而矩阵 R 中的第 i 行 $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$ 即为对第 i 个因素 U_i 的评价结果。其值的推求可根据各评价因素的实际数值对照各因素的分级指标来分析推求。为避免各等级之间数值相差不大,而评价等级相差一级的跳跃现象,使隶属函数在各等级之间平滑过渡,对其进行模糊化处理:对于 V_2 级即中间区间,令其落在区间中点隶属度为 1,而侧边缘点的隶属度为 0.5,中间点向两侧按线性递减处理。对于 V_1 和 V_3 两侧区间,则令距临界值越远属于两侧区间的隶属度越大。在临界值上则属于两侧等级的隶属度各为 0.5。

评价计算中 $A = (a_1, a_2, \dots, a_m)$ 代表各个因素的综合评价重要性的权系数,因此满足 $\sum_{i=1}^m a_i = 1$ 。同时模糊变换也即退化为普通矩阵计算,即:

$$B_j = \min \left\{ 1, \sum_{i=1}^m a_i r_{ij} \right\} \quad (3)$$

1.2 灰色关联度分析的基本原理^[23]

灰色关联分析方法是通过对关联度来表征事物之间的密切程度,常用的关联度有面积关联度、相对速率关联度、斜率关联度等。其中斜率关联度由于具有可处理数据中的负数或零值以及关联度分辨率较高的优点而经常被使用。关联系数可用公式(4)来确定:

$$\xi_{ij}(k) = 1 / \left(1 + \left| \frac{\Delta x_i(k)}{\sigma_i} - \frac{\Delta x_j(k)}{\sigma_j} \right| \right) \quad (4)$$

$$(i, j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m)$$

式中: n ——变量个数; k ——样本容量; σ —— x 的标准差; \bar{x} —— x 均值。

采用平均值作为信息集中的一种处理方法:

$$r_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \xi_{ij}(k) \quad (5)$$

式中: r_{ij} ——第 j 个变量对第 i 个变量的关联度,其余符号意义同上。

2 结果与讨论

2.1 华北地区地下水资源承载力模糊综合评价

2.1.1 评价指标的选择 影响区域地下水资源承载力的因素很多,既有直接的因素,又有间接的因素;既有气候和水文地质条件的自然因素,又有支撑社会经济发展规模差异的因素。根据指标体系建立的完全性原则,简捷易得性原则,相对独立性原则和客观性原则,并参照前人水资源评价指标体系的研究成果^[24-26],在充分考虑不同区域地下水资源的特点、开发利用方式及人口、社会、经济、环境发展状况的基础上,选取了 9 个相对性评价指标,主要包括:人均地下水资源可利用量:地下水资源可利用量与人口数量的比值($\text{m}^3/\text{人}$);人均地下水天然资源量:地下水天然资源量与人口数量的比值($\text{m}^3/\text{人}$);人均地下水资源供水量:地下水资源开采量与人口数量的比值($\text{m}^3/\text{人}$);地下水资源利用率:地下水资源开采量(供水量)与地下水

资源可利用量的比值(%);地下水资源量供水比例:地下水资源量在工农业生活供水中所占比例(%);浅层地下水位降落漏斗中心埋深(m);浅层地下水位降落漏斗影响面积(km^2);深层地下水位降落漏斗中心埋深(m);深层地下水位降落漏斗影响面积(km^2)。

2.1.2 评价指标分级值的确定 按上述因素对地下水资源承载力影响程度划为 3 个等级 V_1, V_2, V_3 。其中 V_1 表示该区承载能力较大, V_3 表示地下水资源承载力已接近最小值,进一步开发利用的潜力较小, V_2 介于 V_1 和 V_3 之间,表明该区水资源开发利用已有相当规模,但仍有一定的开发利用潜力。为定量反应各级因素对地下水资源的影响程度,对 V_1, V_2 和 V_3 进行 0~1 之间评分, $\alpha_1 = 0.95, \alpha_2 = 0.5, \alpha_3 = 0.05$,数值越高,表明水资源开发潜力越大,承载力也越大,综合评定时,按上述 α_j 的值以及 B 矩阵中各等级隶属度 b_j 的值,按公式(6)计算地下水资源承载力分级的综合评分值:

$$a = \sum_{j=1}^3 b_j^k \cdot \alpha_j / \sum_{j=1}^3 b_j^k \quad (6)$$

各评价指标的分级值详见表 1。

表 1 综合评价指标的分级值

评价因素	V_1	V_2	V_3
人均地下水资源可利用量($\text{m}^3/\text{人}$)	>600	300~600	<300
人均地下水资源量($\text{m}^3/\text{人}$)	$>1\ 400$	600~1\ 400	<600
人均地下水资源供水量($\text{m}^3/\text{人}$)	>250	190~250	<190
地下水资源利用率/%	<80	80~120	>120
地下水资源供水比例/%	<60	60~80	>80
浅层地下水位降落漏斗中心埋深/m	<10	10~30	>30
浅层地下水位降落漏斗影响面积/ km^2	0	0~500	>500
深层地下水位降落漏斗中心埋深/m	<20	20~60	>60
深层地下水位降落漏斗影响面积/ km^2	0	0~500	>500
评价分值	0.95	0.50	0.05

2.1.3 评价指标权重的确定 确定指标权重的方法很多,目前国内外广泛采用的方法有语言化评价法、区间打分法(即隶属频度)、特尔斐法及层次分析法,本文将所选择的 9 个指标归为资源拥有、资源利用和环境问题 3 类(表 2),结合层次分析法和专家打分法原理,最后调整各指标的相对权重为:人均地下水资源可利用量 0.210,人均地下水天然资源量 0.09,人均地下水供水量 0.045,地下水资源利用率 0.210,地下水资源供水比例 0.045,浅层地下水降落漏斗中心埋深及影响面积分别为 0.06 和 0.1,深层地下水将来漏斗中心埋深及影响面积分别为 0.1 和 0.14。

2.1.4 地下水承载力评价结果分析 利用模糊综合评价模型对华北地区 21 个城市地下水资源承载力进行综合分析,结果详见表 3。由表 3 可以看出,华北平

原地区各城市地下水资源承载力总体较小,其综合得分值均小于 0.6,对 V_1 的隶属度均较小,最大不超过 0.4,综合得分平均值仅为 0.38。从空间上来看,除平原南端部分城市和东部沿海个别城市地下水资源承载力略大外,其它均较小。根据各城市综合得分值并考虑其对 V_1, V_2 和 V_3 的隶属度,将其分为 3 组(表 2)。

第 1 组中,新乡、聊城、濮阳和滨州市对 V_2 的隶属度均高于对 V_1 和 V_3 的隶属度,且综合评分值分别达到 0.575, 0.488, 0.475, 0.474,均大于 0.45,表明这 4 个城市地下水资源已达到相当的规模,但尚具一定开发潜力;秦皇岛、济南等 8 个城市对 V_1 和 V_2 的隶属度有所减小,对 V_3 的隶属度均较第 1 组大,大多数城市对 V_3 的隶属度最大,综合评分值均在 0.4

~0.45 之间,说明这 8 个城市的地下水资源开发利用已接近其开发潜力,结合相关资料,发现有的城市已出现地质环境问题;第 3 组城市对 V_1 和 V_2 的隶属度明显下降,对 V_1 的隶属度大多已达不到 0.2,同时对 V_3 的隶属度明显增大,它们的综合评分值均小于 0.4,近一半城市已小于 0.3,沧州甚至小于 0.2,说明这些城市的地下水资源已严重超采,且已经出现严重的地质环境问题。综合分析发现,地下水资源尚具一定开发潜力的第一组仅占 19.0%,已接近开发潜

力的第 2 组也仅占 38.1%,而地下水资源已严重超采且已出现地质环境问题的第 3 组已达 42.9%,且华北平原地区各城市地下水资源承载力平均得分为 0.38,故总的来说,除个别城市外,华北地区地下水资源已严重超采,且已形成多个地下水漏斗区并带来严重地质环境问题,地下水资源承载力的可持续性面临严重挑战。若不保护地下水资源并继续开采,将会加深地下水漏斗,造成地下水枯竭,引起地面沉降等一系列严重环境问题。

表 2 华北平原地区地下水承载力指标及权重

项目	分类(权重)	评价指标(权重)
地下水承载力综合指数	资源拥有方面(0.3)	人均地下水资源可利用量(0.7)
		人均地下水天然资源量(0.3)
	资源利用方面(0.3)	人均地下水供水量(0.15)
		地下水资源利用率(0.7)
		地下水资源供水比例(0.15)
		浅层地下水降落漏斗中心埋深(0.15)
	环境问题方面(0.4)	浅层地下水降落漏斗影响面积(0.25)
		深层地下水降落漏斗中心埋深(0.25)
		深层地下水降落漏斗影响面积(0.35)

表 3 华北地区地下水资源承载力模糊综合评价结果

地市名	V_1	V_2	V_3	综合得分
新乡市	0.381	0.407	0.213	0.575
聊城市	0.257	0.459	0.284	0.488
濮阳市	0.270	0.405	0.325	0.475
滨州市	0.265	0.413	0.322	0.474
秦皇岛	0.251	0.328	0.422	0.423
济南市	0.262	0.281	0.457	0.412
德州市	0.281	0.243	0.477	0.412
焦作市	0.247	0.306	0.447	0.410
保定市	0.159	0.478	0.363	0.408
鹤壁市	0.230	0.325	0.446	0.403
东营市	0.267	0.247	0.486	0.402
北京市	0.184	0.412	0.403	0.401
天津市	0.226	0.291	0.483	0.384
安阳市	0.177	0.361	0.462	0.372
邯郸市	0.148	0.336	0.516	0.334
石家庄	0.170	0.247	0.583	0.314
邢台市	0.168	0.245	0.587	0.311
唐山市	0.052	0.402	0.546	0.278
廊坊市	0.065	0.342	0.594	0.262
衡水市	0.106	0.234	0.661	0.250
沧州市	0.000	0.190	0.810	0.136

2.2 华北平原地下水资源承载力影响因素及调控对策

华北平原属半干旱半湿润地区,降水量较少,且近 50 a 气候呈暖干化趋势^[2-3],水资源量极其有限,因而气候、水文等自然条件先天不足。与此同时,华

北平原又是我国地下水支撑农业高产的主要粮食产地之一,且近几十年人口剧增、社会经济飞速发展,先天水资源不足加上需求猛增造成地下水超采日趋严重。本研究采用灰色理论方法计算地下水开采量与人口、GDP 及三产产量的灰关联度,经计算,影响地下水开采量的因素由大到小依次为:人口>第一产业>第三产业>GDP>工业,其灰关联度依次为:0.71,0.63,0.59,0.58,0.56。其中第一产业的主要构成为农业,第三产业是近几十年社会经济发展的主要推动力,由此可知,人口剧增是地下水超采的最大原因,其次为由此带来的农业灌溉用水增加和社会经济的快速发展。建议地下水承载力的调控途径可从两个方面考虑。(1) 增加地下水可利用量的途径。具体包括:利用山前冲洪积扇的调蓄能力,进行人工雨洪调蓄;在中东部平原,发展浅层弱渗透含水层淡水开采技术;在中东部平原,发展微咸水改造利用技术。(2) 提高的用水效率的途径。具体包括:发展农业节水技术,提高农业用水效率;提高工业用水重复利用率;调整产业结构,改变经济增长模式,提高总体用水效率;加强宣传教育,提高公众节水意识,提高全社会用水效率。

3 结论

(1) 华北平原地下水资源已严重超采且已引起严重的环境问题,总体承载力很小。地下水资源开发

利用已达到相当规模但尚具有一定开发潜力的城市仅占19.0%,为新乡、聊城、濮阳和滨州市,其它城市地下水资源开发利用潜力已接近其极限,多数已严重超采且出现一系列环境地质问题。地下水开采量与人口、第一产业、第三产业、GDP和工业的灰关联度依次为:0.71,0.63,0.59,0.58和0.56,表明人口剧增是地下水超采的最大原因,其次为农业灌溉用水的增加和社会经济的快速发展。

(2) 华北平原其在气候上属半干旱半湿润地区,降水量较少、水资源有限,且近50 a气候呈干旱化趋势,研究认为华北地区地下水承载力减小与其气候水文条件也有着密不可分的关系,区域气候条件是地下水长期超采的自然原因,而人口的剧增、农业灌溉的增加和社会经济的快速发展是地下水超采的社会动因,华北地区地下水长期超采是自然条件(区域气候变化、水文地质条件)和社会经济活动相互叠加的结果,但由于缺乏长序列、多台站的降水资料,地下水资源承载力的自然影响因素还有待进一步的分析。

(3) 考虑到社会经济—水资源—生态环境的协调可持续发展,不建议继续开发地下水资源,可考虑外调水、雨水利用及微咸水改造利用等,并在有限的地下水资源量基础上提高用水效率,如发展节水农业技术,提高工业用水重复利用率,提高公众节水意识等。

[参 考 文 献]

- [1] 张鑫,王纪科,蔡焕杰,等. 区域地下水资源承载力综合评价研究[J]. 水土保持通报,2001,21(3):24-27.
- [2] Liu Min, Shen Yanjun, Zeng Yan, et al. Trend in pan evaporation and its attribution over the past 50 years in China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20(4):557-568.
- [3] 刘敏,沈彦俊. 海河流域近50 a水文要素变化分析[J]. 水文,2010,30(6):74-77.
- [4] 张兆吉,费宇红. 华北平原地下水可持续利用调查评价[M]. 北京:地质出版社,2009,.
- [5] Villarroya F, Aldwell C R. Sustainable management of groundwater resources [J]. Environmental Geology, 1998,34(2/3):111-115.
- [6] Walter L F. Climate Change and the Sustainable Use of Water Resources [M]. Germany: Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K, 2012.
- [7] Olli V, Pertti V. China's 8 challenges to water resources management in the first quarter of the 21st Century [J]. Geomorphology, 2001, 41(2/3):93-104.
- [8] Prakash C T, Bhagwati J. Environmental changes and sustainable development of water resources in the Himalayan headwaters of India [J]. Water Resources Manage, 2012,26(4):883-907.
- [9] 朱一中,夏军,谈戈. 关于水资源承载力理论与方法的研究[J]. 地理科学进展,2002,21(2):180-188.
- [10] 余卫东,闵庆文,李湘阁. 水资源承载力研究的进展与展望[J]. 干旱区研究,2003,20(1):60-66.
- [11] 袁鹰,甘泓,王忠静,等. 浅谈水资源承载力能力研究进展与发展方向[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2006,4(1):62-67.
- [12] 陈守煜,胡吉敏. 可变模糊评价法及在水资源承载能力评价中的应用[J]. 水利学报,2006,37(3):264-277.
- [13] 张宝成,孙林岩. 国内外水资源承载力的研究综述[J]. 当代经济科学,2006,28(6):97-101,126.
- [14] 袁伟,楼章华,田娟. 富阳市水资源承载能力综合评价[J]. 水利学报,2008,39(1):103-108.
- [15] 宰松梅,温季,仵峰,等. 河南省新乡市水资源承载力评价研究[J]. 水利学报,2011,42(7):783-788.
- [16] 门宝辉,王志良,梁川,等. 物元模型在区域地下水资源承载能力综合评判中的应用[J]. 四川大学学报:工程科学学报,2003,35(1):34-37.
- [17] 王顺久,杨志峰,丁晶. 关中平原地下水资源承载力综合评价的投影寻踪方法[J]. 资源科学,2004,26(6):104-110.
- [18] 万星,丁晶,张晓丽. 区域地下水资源承载力综合评价的集对分析方法[J]. 城市生态与城市环境,2006,19(2):8-10.
- [19] 屈吉鸿,陈南祥,黄强,等. 改进的逼近理想解在地下水资源承载力评价中的应用[J]. 水利学报,2008,39(12):1309-1315.
- [20] 王荣晶,张运凤,张永华,等. 大型灌区地下水资源承载力评价指标体系及评价方法研究[J]. 华北水利水电学院学报,2009,30(3):4-8.
- [21] 王威,张鑫,胡笑涛. 宝鸡峡灌区地下水资源承载力模糊综合评判[J]. 人民黄河,2010,32(7):38-39.
- [22] 楼世博. 模糊数学[M]. 北京:科学出版社,1983.
- [23] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2002.
- [24] 潘理中,金懋高. 中国水资源与世界各国水资源统计指标的比较[J]. 水科学进展,1996,7(4):376-380.
- [25] 左东启,戴树声,袁汝华,等. 水资源评价指标体系研究[J]. 水科学进展,1996,7(4):367-373.
- [26] Vrba J H, R, Girman J, et al. Groundwater Resources Sustainability Indicators[C]. Alicante(Spain): International Symposium on Groundwater Sustainability,2006.