

# 基于主成分分析法的西安市地下水资源承载力评价

邢旭光<sup>1</sup>, 史文娟<sup>1</sup>, 张译丹<sup>2</sup>, 谢金宇<sup>2</sup>

(1 西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048;

2 沈阳和盛国土资源技术有限公司, 辽宁 沈阳 110000)

**摘要:** 区域地下水资源承载力评价对于维护区域生态环境安全和促进社会经济可持续发展具有重要意义。运用主成分分析法, 根据地下水开发率、地下水供水模数、地下水补给模数、地下水排泄模数、人均地下水占有量、单位 GDP 用水量和水资源重复利用率等 7 项评价指标, 对西安市地下水资源承载力进行评价。综合评价结果表明: 西安市地下水资源有一定的承载力, 但整体上地下水开发率过高, 继续开发利用的潜力甚小。其中城六区综合评价值为 70.816, 地下水承载力趋于饱和且继续开发潜力最小, 周至县综合评价值为 -240.998, 地下水开发潜力最大。评价结果为地下水资源的合理开发利用提供参考。

**关键词:** 主成分分析法; 地下水资源; 承载力

中图分类号: TV21

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2013)02-0035-04

水资源承载力是指在一定流域或区域内, 其自身的水资源能够持续支撑的经济社会发展规模并维持良好生态系统的能力<sup>[1]</sup>。地下水是水资源的重要组成部分, 它关系到经济能否可持续健康发展等社会问题。水资源承载力对一个国家或地区在综合发展等方面有着重要作用<sup>[2]</sup>。因此, 无论是对于地表水资源还是地下水资源承载力进行评价都是非常必要的。对水资源承载力进行评价的方法众多<sup>[3-4]</sup>, 如: 单因素评价法、多因素模糊综合评价法、背景分析法、多目标决策分析法和主成分分析法等。目前在对比地表水资源承载力评价方面有较多研究成果<sup>[5-8]</sup>, 但对地下水资源承载力评价的相关文献却相对较少<sup>[9]</sup>, 对西安市地下水资源承载力评价更是不多。

西安市位于关中平原腹地, 属暖温带半湿润大陆性季风气候, 年平均降水量 573.1mm, 蒸发量约 900mm, 且多集中在 7、8、9、10 四个月<sup>[10]</sup>。所辖行政区包括九区四县, 即新城、碑林、莲湖、灞桥、未央、雁塔、阎良、临潼和长安区、蓝田、周至、高陵和户县, 总土地面积 9 983km<sup>2</sup>(截至 2011 年), 常住人口 846.78 万人(截至 2010 年底), 市区常住人口 646.23 万人, 占总人

口 76.32%。

截至 2010 年, 西安市供水形成了以地表水为主、地下水为辅的格局。地下水日供应量 48×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>, 由于地下水资源量有限, 因此有必要引起重视。加之市区人口过多, 对西安市整体水平有重要影响。地下水的过量开采将会导致地下水位下降以致形成地下水降落漏斗、河流湖泊干涸、水土流失、地下水水质恶化等严重问题。西安市是西北地区核心城市, 因此, 针对地下水过度开发和不合理利用等问题, 本文拟采用主成分分析法对西安市地下水资源承载力进行评价, 旨在为合理利用地下水资源、最终实现水资源可持续发展和合理利用和未来发展提供指导。

## 1 主成分分析法概述

主成分分析法, 是一种把多个变量划分为少数几个综合指标的多元统计方法, 在保证数据损失最小的前提下, 经线性组合和舍弃小部分信息, 以少数的综合变量取代原始采用的多维变量<sup>[9]</sup>。采用具有一定代表性、针对性且便于相互比较的指标, 同时客观地确定各个权重值, 很好地避免了主观性。这种方法丢失信息

收稿日期: 2012-07-09

基金项目: 陕西省自然科学基金研究计划项目(S2012JC7610); 陕西省教育厅基金(11JS076)

作者简介: 邢旭光 (1986-), 男, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 从事农业水资源研究。E-mail: xg\_xing@yeah.net

少,也弥补了过多考虑单承载因子的不足,从而解决了因参变量难以掌握导致不合理结论的缺陷。因此,该方法在地下水承载力评价方面具有一定的说服力。

### 2 主成分分析法计算步骤

(1)数据标准化处理;

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{S_j}, \quad i=1,2,\dots,I; \quad j=1,2,\dots,J$$

式中: $X_{ij}$ 为第*i*个样本的第*j*个指标的原始数据; $\bar{X}_j, S_j$ 分别为第*j*个指标原始数值的平均值和样本标准差。

(2)计算相关系数矩阵(*R*);

(3)求*R*的*J*个特征值( $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_j$ )及对应的特征向量( $U_1, U_2, \dots, U_j$ );

(4)计算主成分:主成分个数通过累积方差贡献率*E*确定;

$$E = \sum_{k=1}^m \lambda_k / \sum_{j=1}^J \lambda_j$$

一般可取当*E*>85%时的最小*m*,则可得主超平面维数*m*,从而对*m*个主成分进行综合分析,得到主成分量 $Z_k$ :

$$Z_k = \sum_{j=1}^J U_{kj} X_j, \quad j=1,2,\dots,J; \quad k=1,2,\dots,m$$

式中: $U_{kj}$ 为特征向量 $U_k$ 的第*j*个分量; $X_j$ 为评价地下水资源承载力所选取的评价指标值(见表1)。

(5)求主成分权重 $e_k$ ;

$$e_k = \lambda_k / \sum_{j=1}^J \lambda_j, \quad k=1,2,\dots,m; \quad j=1,2,\dots,J$$

(6)计算综合评价指数*Z*;

$$Z = \sum_{k=1}^m e_k Z_k$$

### 3 应用实例

西安市是西北地区核心城市,而水资源又是重要的战略资源。因此,客观、正确地评价地下水资源承载力对促进区域水资源可持续发展具有重要意义。本研究以西安市为对象,运用主成分分析法对其地下水资源承载力进行评价。

#### 3.1 参评指标的选定

本文参考水资源评价指标设计原则<sup>[11]</sup>、依据西安市水资源开发利用现状、社会经济发展状况和西安市统计年鉴(2005年),选取了地下水开发率、供水模数、补给模数、排泄模数、人均地下水占有量、单位GDP用水量和水资源重复利用率等7项指标作为该地区地下水资源承载力的评价因子。各评价因子具体数值见表1。

表1 西安市各行政区地下水资源承载力评价因子数值

Table1 The value of the assessment factors of the groundwater resources carrying capacity in the various administrative regions of Xi'an City

指标	地下水开发率	地下水供水模数	地下水补给模数	地下水排泄模数	人均地下水	单位GDP	水资源重复
	$X_1/\%$	$X_2/10^4\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$	$X_3/10^4\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$	$X_4/10^4\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$	占有量 $X_5/\text{m}^3$	用水量 $X_6/\text{m}^3$	利用率 $X_7/\%$
城六区	116.54	58.06	35.40	39.35	66	84	58.3
阎良区	149.72	47.16	24.40	28.21	212	349	49.2
临潼区	83.94	11.83	15.33	16.06	210	282	38.2
长安区	71.92	9.87	13.94	13.30	284	285	48.6
蓝田县	40.69	0.95	9.95	9.02	391	198	40.5
周至县	28.01	3.96	10.82	10.53	851	820	35.4
户县	72.55	9.37	16.31	16.59	393	277	52.7
高陵县	97.30	27.18	26.02	27.67	266	464	37.1

#### 3.2 主成分分析法的应用

为确定评价因子的主成分及权重系数,将7项评价指标数据进行标准化处理,继而计算各参评指标的相关系数矩阵*R*,并计算其特征值和累积方差贡献率*E*(见表2、3)。

由表3可知,当累积方差贡献率*E*>85%时,主成分有两个,因此,取前两个主成分进行分析,并建立主成分矩阵(见表4)。

由表3可看出对应的两个特征值分别为 $\lambda_1=5.066$ 、 $\lambda_2=1.144$ 。各个特征值的方差贡献率即为各主成分量的权重,即 $e_1=72.375\%$ 、 $e_2=16.341\%$ 。

表2 相关系数矩阵

Table2 The correlation coefficient matrix

<i>R</i>	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$
$X_1$	1						
$X_2$	0.876	1					
$X_3$	0.794	0.947	1				
$X_4$	0.824	0.965	0.997	1			
$X_5$	-0.763	-0.649	-0.675	-0.670	1		
$X_6$	-0.417	-0.365	-0.386	-0.373	0.844	1	
$X_7$	0.524	0.599	0.565	0.563	-0.559	-0.666	1

初始因子荷载矩阵中每一个荷载量表示主成分与对应变量的相关系数,主成分矩阵中第*k*列向量除以

表3 特征值及方差贡献率  
Table3 The eigenvalue and variance contribution

成分	特征值 $\lambda$	方差的%	累积方差贡献率 $E_i/\%$	主成分权重 $e_k$
1	5.066	72.375	72.375	0.7238
2	1.144	16.341	88.716	0.1634
3	0.497	7.106	95.822	-
4	0.236	3.371	99.193	-
5	0.045	0.636	99.829	-
6	0.012	0.167	99.994	-
7	0.000	0.004	100.000	-

表4 主成分矩阵  
Table4 The principal component matrix

指标	主成分	
	1	2
$Y_2$	0.931	0.323
$Y_4$	0.930	0.327
$Y_3$	0.924	0.307
$Y_1$	0.891	0.179
$Y_5$	-0.857	0.360
$Y_7$	0.733	-0.354
$Y_6$	-0.646	0.742

第  $k$  个特征值的开根后即为第  $k$  个主分量  $Z_k$  中每个指标所对应的系数<sup>[12]</sup>,即特征向量  $U_1$  和  $U_2$ (见表 5)。

由表 5 可得两个主分量  $Z_k$  的表达式:

$$Z_1 = 0.396X_1 + 0.413X_2 + 0.411X_3 + 0.413X_4 - 0.381X_5 -$$

$$0.287X_6 + 0.326X_7$$

$$Z_2 = 0.168X_1 + 0.302X_2 + 0.287X_3 + 0.306X_4 + 0.337X_5 +$$

$$0.694X_6 - 0.331X_7$$

计算综合评价值(见表 6)。综合评价值越小,说明

表5 相关系数矩阵特征向量  
Table5 The eigenvectors of the correlation coefficient matrix

特征向量	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$
$U_1$	0.396	0.413	0.411	0.413	-0.381	-0.287	0.326
$U_2$	0.168	0.302	0.287	0.306	0.337	0.694	-0.331

表6 各分区综合评价值  
Table6 The evaluating values of the various regions

分区	城六区	阎良区	临潼区	长安区	蓝田县	周至县	户县	高陵县
$Z_1$	70.650	-64.450	-97.417	-130.343	-168.199	-526.300	-165.836	-150.514
$Z_2$	120.451	352.254	280.727	300.438	268.405	856.190	331.882	439.751
$Z$	70.816	10.917	-24.632	-45.241	-77.873	-240.998	-65.790	-37.074

水资源开发潜力越大;反之,则水资源开发潜力越小。

#### 4 结果与分析

由主成分分析法评判结果(见表 6)可以看出,各分区综合评价值大小不一:城六区>阎良区>临潼区>高陵县>长安区>户县>蓝田县>周至县。在众行政分区中,城六区和阎良区综合评价值均较高,其中城六区综合评价值高达 70.816,说明与其他地区相比,西安市城六区地下水资源承载力已接近饱和值,继续开发潜力小,可知地下水逐渐成为制约该地区社会经济发展的因素;同时还可以看出,城六区和阎良区的地下水开发率分别为 116.54%、149.72%,均属过度开采水平,其继续开发潜力小,进一步印证了上述结论的正确性。如果仍继续无止境开发将影响到区域地质环境和水资源的可持续发展。临潼区、高陵县、长安区和户县地下水资源开发潜力不大,并且其承载能力逐渐趋于饱和值,该四区地下水开发率均较高,分别为 83.94%、97.3%、71.92%和 72.55%。蓝田县地下水开发已有一定规模,但仍有一定的开发潜力,相比其他地区,该区域地下水开发率较低(40.69%),人均地下水占有量较高(391m<sup>3</sup>)。周至县综合评价值最低,说明该地区地下水资源开发潜力巨大,这点也可以通过其较低的地下水

开发率(28.01%)验证;但值得注意的是,相比其他地区,该区域单位 GDP 用水量最大(820m<sup>3</sup>),水资源重复利用率最低(35.4%),因此对于该地区而言,需要进一步解决的问题是如何提高水资源利用率而实现节约水资源的目的。

作为西部大开发的前沿阵地,西安市地下水资源尽管有一定的承载力,但其开发利用程度过高,继续开发利用潜力较小。经分析认为其主要原因是该地区社会经济发展水平较高(西安市市区 2010 年人均 GDP 为 5.02 万元)、地下水的过度开发引起,同时这也被一些已发生的地质灾害所证实<sup>[13]</sup>。

#### 5 结论与建议

本文利用主成分分析法对西安市地下水资源承载力进行了评价。结果表明,西安市地下水资源有一定的承载能力,地下水开发率过高且有些地区已达到过度开采水平,继续开发利用的潜力甚小。西安市地处干旱半干旱地区,属于资源性缺水区域,只有对地下水资源进行合理保护和开发,通过外调水工程、地表水与地下水联合调度工程、挖掘中水雨水等非传统水资源的开发利用潜力等措施,才能维持其经济的可持续发展,进而保障西安市社会经济的可持续发展。

## 参考文献:

- [1] 周维博.西北地区水资源开发方略与发展高效节水农业途径[J].西北水资源与水工程,1997,8(4):11-15. (ZHOU Weibo. Water resources development plans and water-saving agriculture avenues in the northwest region of China [J]. Water Resources & Water Engineering, 1997, 8(4):11-15. (in Chinese))
- [2] 马素君,张礼达,杜发兴,等.水资源承载能力的模糊综合评价研究[J].云南地理环境研究,2006,18(3):7-9. (MA Sujun, ZHANG Lida, DU Faxing, et al. Study of fuzzy comprehensive evaluation study on water resources bearing capacity [J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2006, 18(3):7-9. (in Chinese))
- [3] 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. (YU Weidong, MIN Qingwen, LI Xiangge. Some progresses and perspectives in study on the carrying capability of water resources [J]. Arid Zoon Research, 2003, 20(1): 60-66. (in Chinese))
- [4] 朱启林,甘泓,甘治国,等.我国水资源多目标决策应用研究简述[J].水电能源科学, 2010, 28 (3): 20-23. (HU Qilin, GAN Hong, GAN Zhiguo, et al. State of art of multi-objective decision making for research in China [J]. Water Resources and Power, 2010, 28(3):20-23. (in Chinese))
- [5] Daily G C, Ehrlich PR. Socio-economic equity and earth carrying capacity [J]. Ecological Application, 1996,6(4):991-1001.
- [6] 姚治君,王建华,江东.区域水资源承载力的研究进展及其理论探析[J].水科学进展, 2002, 13(1):111-115. (YAO Zhijun, WANG Jianhua, JIANG Dong. Advances in study on regional water resources carrying capacity and research on its theory [J]. Advances in Water Science, 2002, 13(1):111-115. (in Chinese))
- [7] 赵建世,王忠静,秦韬,等.海河流域水资源承载力演变分析[J].水利学报, 2008, 39 (6): 647-651. (ZHAO Jianshi, WANG Zhongjing, QIN Tao, et al. Analysis on evolution of water resources carrying capacity of Haihe River basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(6):647-651. (in Chinese))
- [8] 黎明,李百战.重庆市都市圈水资源承载力分析与预测[J].生态学报, 2009,29 (12): 6549-6505. (LI Ming, LI Baizhan. The analysis and prediction of water resource carrying capacity in Chongqing metropolitan, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6549-6505. (in Chinese))
- [9] 傅湘,纪昌明.区域水资源承载力综合评价—主成分分析法的应用[J].长江流域资源与环境, 1999,8(2):168-173. (FU Xiang, JI Changming. A comprehensive evaluation of the regional water resource carrying capacity: application of main component analysis method [J]. Resources and Environment in the Yangtza Basin, 1999, 8(2): 168-173. (in Chinese))
- [10] 范丽萍,贾忠华,罗纨,等.西安地区 Priestley-Taylor 和 Hargreaves 方法应用比较 [J]. 水资源与水工程学报, 2007,18 (2):53-58. (FAN Liping, JIA Zhonghua, LUO Wan, et al. Comparison with the application of Priestley-Taylor and Hargreaves methods in Xi'an [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2007, 18 (2):53-58. (in Chinese))
- [11] 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. (ZUO Dongqi, DAI Shusheng, YUAN Ruhua, et al. Study on the water resources assessment indexes system [J]. Advances in Water Science, 1996, 7 (4):367-373. (in Chinese))
- [12] 林海明,张文霖.主成分分析与因子分析详细的异同和 SPSS 软件—兼与刘玉玫、卢纹岱等同志商榷[J].统计研究,2005(3):65-68. (LIN Haiming, ZHANG Wenlin. The relationship between principal component analysis and factor analysis and SPSS software: to discuss with comrades Liu Yumei, Lu Wendai [J]. Statistical Research, 2005(3):65-68. (in Chinese))
- [13] 襄贤.倾斜的大雁塔[N].中国民族报,2004-12-31(7). ( DOU Xian. Tilt of Big Wild Goose Pagoda [N]. China's National Newspaper, 2004-12-31(7). (in Chinese))

## Assessment of Groundwater Resources Carrying Capacity in Xi'an City Based on Principal Component Analysis

XING Xuguang<sup>1</sup>, SHI Wenjuan<sup>1</sup>, ZHANG Yidan<sup>2</sup>, XIE Jinyu<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Northwest Water Resources and Ecological Environment of Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Land and Resources Technology Co.Ltd, Shenyang 110000, China)

**Abstract:** Assessment of groundwater resources carrying capacity is full of great significance for maintaining the local ecological environment security and promoting sustainable socio-economic development. This paper evaluated the groundwater resources carrying capacity in Xi'an City using seven evaluation indexes, such as rate of groundwater development, modulus of groundwater supply, groundwater recharge modulus, groundwater discharge modulus, per capita consumption of groundwater, water consumption per unit of GDP and water resources recycling, based on principal component analysis. The results show that the groundwater resources in Xi'an City has a certain carrying capacity, but its rate of exploitation is too high in total and the potential of further development is small. The evaluated value of urban in Xi'an City is 70.816, and its groundwater resources carrying capacity nearly saturates and the potential of further development is the smallest. The evaluated value of Zhouzhi County is -240.998 and the potential of further development is the largest. The results provide reference for rational use of groundwater resources.

**Key words:** principal component analysis; groundwater resources; carrying capacity