

基于经济社会发展水平的延安市 水资源承载力分析及预测

庄妍, 周维博, 李云排, 曹雷

(长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 选取延安市近十年的总人口、GDP等14项统计资料,利用主成分分析法分析研究了水资源承载力变化的驱动因子和总体趋势,并通过多元线性回归模型,基于经济社会发展目标对2015年和2020年延安市水资源的供需状况进行了预测。结果表明:社会经济状况、农业发展水平和水资源条件是影响承载力变化的三大成分,人口、GDP是主要驱动因子。近十年来水资源承载能力呈逐年下降趋势,随着社会经济的快速发展,2015、2020年仍将缺水0.38、0.46亿 m^3 ,水资源承载能力严重不足。

关键词: 水资源承载力; 经济社会发展水平; 主成分分析法; 多元线性回归; 延安市

中图分类号:TV213.9 文献标识码:A 文章编号:1672-643X(2014)03-0199-05

Analysis and forecast of carrying capacity of water resources in Yan'an based on development level of economy and society

ZHUANG Yan, ZHOU Weibo, LI Yunpai, CAO Lei

(School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The paper used principal component analysis (PCA) to study the driving factors and overall trend of change of water resources carrying capacity according to ten years statistical data of GDP and total population in Yan'an city from 2001 to 2010. Based on the goals of economic and social development, it forecast the situation of supply and demand of water resources of Yan'an city in 2015 and 2020 by use of multiple linear regression model. The results show that the three components that affect carrying capacity of water resources are socioeconomic status, agricultural development level and water resource conditions. Moreover, population and GDP are the main driving factors. , the carrying capacity water resources declined year by year In recent ten years. With the rapid development of social economy, the water shortage in Yan'an in 2015 and 2020 will be 38 million cubic meters and 46 million cubic meters respectively. The carrying capacity of water resources is serious short.

Key words: carrying capacity of water resources; level of economic and social development; principal component analysis (pca); multiple linear regression; Yan'an

水资源承载力是指在某一历史发展阶段,以可预见的技术、经济和社会发展水平为依据,以可持续发展为原则,以维护生态环境良性发展为条件,在水资源得到合理的开发利用下,研究区域内人口增长与经济发展的最大容量^[1]。水资源承载力研究需综合考虑区域水资源条件、社会经济发展状况和生态环境等多因素的影响,目前研究常用的方法有主成分分析法^[2]、模糊综合评判法^[3]、多目标决策分

析法^[4]、系统动力学法^[5]、人工神经网络法^[6]等。主成分分析法是对高维变量系统进行降维,得到最佳综合与简化,常用于分析一定年份水资源承载状况;模糊评价方法是用模糊数学对受多种因素制约的事物和现象做出总体评价的方法,容易因信息遗失而造成误判;多目标模型建模难度大,求解方法复杂;系统动力学方法通过建立各系统间的数学关系式,模拟不同情景下的水资源承载力状况,常因参数

收稿日期:2014-01-19; 修回日期:2014-02-24

作者简介:庄妍(1990-),女,新疆奎屯人,硕士研究生,主要从事水资源开发利用方面的研究。

通讯作者:周维博(1956-),男,陕西乾县人,教授,博士生导师,从事水资源与水环境及节水灌溉方面的教学与研究工作。

选择不同导致计算结果的偏差较大;人工神经网络法需要大量的训练样本,且易出现过拟合现象。

本文在总结前人众多研究成果的基础上,以延安市为例,充分考虑水资源承载能力的影响因素,构建了相关指标评价体系。鉴于各因素间复杂的耦合关系,采用主成分分析法简化分析研究了水资源承载力变化的驱动因子,得到延安市近十年的水资源综合承载力变化情况,并结合多元线性回归模型对未来水资源承载力的变化趋势进行预测,为延安市水资源的可持续开发利用提供科学依据。

1 研究方法

主成分分析法可以把影响水资源承载力的多个因子,用少数几个相互独立的主成分的线性组合来反映原有多个因子的绝大部分信息,表达不同时段水资源承载力的状况^[7]。设区域水资源承载力系统原来有 p 个评价指标,分别用 X_1, X_2, \dots, X_p 来表示,经主成分分析后将得到 $m (m < p)$ 个新变量,分别用 Z_1, Z_2, \dots, Z_m 表示,则主要分析计算步骤如下:

(1) 数据的标准化处理

$$y_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{S_j} \quad (1)$$

($i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J$)

式中: X_{ij} 为第 i 个样本中第 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标准差。

(2) 计算相关系数矩阵 R 。

(3) 计算 R 的 j 个特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_j$ 以及特征向量 U_1, U_2, \dots, U_j 。

(4) 计算累计贡献率 E , 确定主成分。

$$E = \sum_{k=1}^m \lambda_k / \sum_{j=1}^J \lambda_j \quad (2)$$

一般取 $E > 85\%$ 时最小的 m , 得到主成分:

$$Z_k = \sum_{j=1}^J U_{kj} X_{kj} \quad (k = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

式中: U_{kj} 为特征向量 U_k 的第 j 个分量。

(5) 求主成分权重 e_k

$$e_k = \lambda_k / \sum_{j=1}^J \lambda_j \quad (k = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

由于只采用 m 个主成分,须将 e_k 归一化,得到最终的权重值 e'_k 。

(6) 加权求取综合评价指数 Z

$$Z = \pm \sum_{k=1}^m e'_k Z_k \quad (5)$$

式中:效益型指标为正,成本型指标为负。效益型指

标是指属性值越大越好的指标,如降雨量等;成本型指标是指属性值越小越好的指标,如总人口、农业用水量等。本次研究中除降雨量外,其它指标均为成本型指标。

最后,通过综合评价指数 Z 的得分来判断表明水资源承载力状况的好坏, Z 值越高,承载力越好,反之,越坏。

2 延安市水资源承载力变化及驱动力分析

延安市地处陕西省北部、黄河中游,多年平均降水量为 390 ~ 700 mm,由南向北递减,多年平均蒸发量为 950 ~ 1000 mm,干旱出现频率为 40.8%,属内陆干旱半干旱气候。境内河流属黄河水系,以北洛河、延河、清涧河、仕望河、云岩河、涪水为骨干,形成密如蛛网的水系网,总控制集水面积 34 759 km²,多年平均水资源总量为 13.35 亿 m³,人均占有量仅为 610 m³ 左右,属于资源性缺水地区^[8]。

2.1 水资源承载力驱动因子的选取

根据延安市 2001 - 2010 年的统计资料,选取与人口、环境、社会经济和水资源等有关的 15 个驱动力影响因子: X_1 总供水量,万 m³; X_2 GDP,亿元; X_3 社会固定资产投资,亿元; X_4 人均国内生产总值,元; X_5 农业用水量,万 m³; X_6 总人口,万人; X_7 城镇化率,%; X_8 建筑业、三产及生态环境用水量,万 m³; X_9 工业用水量,万 m³; X_{10} 有效灌溉面积,万亩; X_{11} 降水量,mm; X_{12} 粮食产量,万 t; X_{13} 城镇居民生活用水量,万 m³; X_{14} 农村居民生活用水量,万 m³; X_{15} 工业废水排放量,万 t,构建评价指标体系。

利用 SPSS 软件对数据进行标准化处理,处理结果见表 1,然后计算出相关系数 R ,最后计算样本相关矩阵特征值、方差以及累积方差贡献率,计算结果详见表 2。

由表 2 得,前 3 个主成分的累积贡献率已经达到 91.344% > 85%,因此确定主成分个数为 3。计算出它们的因子荷载情况,详见表 3。

分析计算结果得出:主成分 1 与 $X_1, X_2, X_3, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{13}, X_{14}$ 呈强烈的正相关性,相关系数达 0.9 以上,它们主要反映了人口、水环境污染情况、经济技术的发展水平;主成分 2 与 X_{10}, X_{12} 呈正相关性,与 X_5, X_{14} 呈负相关性,这些指标均与农村发展情况有关,主要反映了农业发展水平;主成分 3 与降水量 X_{11} 呈较强的正相关性,可间接反映出当地水资源的状况。三大主成分较全面地囊括了人口

表 1 延安市水资源承载力指标数据标准化值

年份	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
X_1	-1.421	-1.059	-1.025	-0.644	-0.685	0.538	0.960	1.060	1.110	1.166
X_2	-1.260	-1.176	-1.024	-0.800	-0.331	0.247	0.662	1.107	0.979	1.596
X_3	-1.039	-0.998	-0.806	-0.600	-0.551	-0.215	0.179	0.607	1.318	2.104
X_4	-1.264	-1.178	-1.028	-0.807	-0.328	0.258	0.680	1.124	0.980	1.563
X_5	-1.055	-0.087	-0.477	-0.832	-1.764	0.264	1.331	1.253	1.185	0.183
X_6	-1.893	-1.490	-0.733	0.100	0.237	0.263	0.492	0.647	1.048	1.328
X_7	-1.483	-1.083	-0.631	-0.467	-0.307	-0.032	0.215	0.529	1.258	2.002
X_8	-1.456	-1.427	-1.346	-0.240	0.223	0.547	0.545	1.000	1.010	1.144
X_9	-1.423	-1.344	-1.087	-0.530	-0.214	0.759	0.696	0.796	0.847	1.500
X_{10}	-0.613	0.340	0.354	0.495	1.267	0.991	-1.197	-2.224	0.307	0.280
X_{11}	0.169	0.179	2.358	-1.407	-0.346	-0.018	0.781	-1.074	-0.713	0.072
X_{12}	-0.852	-0.264	-0.815	0.706	0.827	-1.284	-1.408	0.490	1.070	1.530
X_{13}	-1.295	-1.233	-0.999	-0.449	-0.046	0.081	0.423	0.642	0.779	2.097
X_{14}	-0.655	-0.886	-0.880	-0.601	-0.539	0.202	1.406	1.107	1.794	-0.948
X_{15}	-1.182	-1.203	-1.114	-0.837	0.169	-0.113	0.699	1.354	0.682	1.546

表 2 主成分的特征值及贡献率 %

主成分	特征值	贡献率	累积贡献率
1	10.556	70.372	70.372
2	2.043	13.623	83.995
3	1.102	7.348	91.344
4	0.647	4.311	95.655
5	0.330	2.203	97.858

表 3 驱动因子的荷载情况

指标	主成分 1	主成分 2	主成分 3
X_1	0.972	-0.188	0.050
X_2	0.992	-0.040	0.073
X_3	0.935	0.151	0.132
X_4	0.992	-0.049	0.069
X_5	0.690	-0.633	0
X_6	0.931	0.198	0.061
X_7	0.948	0.198	0.185
X_8	0.962	0.084	-0.079
X_9	0.971	0.014	0.114
X_{10}	-0.279	0.709	0.342
X_{11}	-0.363	-0.309	0.843
X_{12}	0.473	0.723	-0.301
X_{13}	0.957	0.205	0.142
X_{14}	0.618	-0.576	-0.276
X_{15}	0.962	0.002	-0.001

2.2 结果分析

计算出 2001 - 2010 年影响延安市水资源承载力的三大主成分得分和综合得分,并绘制成趋势图,详见图 1。

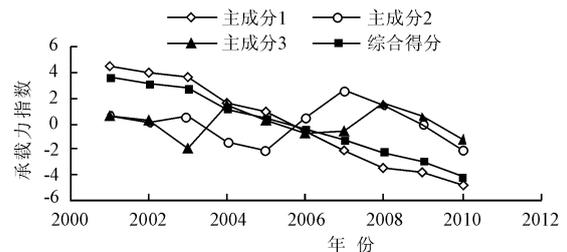


图 1 水资源承载力变化趋势图

从图 1 可以看出,三大主成分和综合得分均有正负之分,正值代表高于平均水平,负值代表低于平均水平。主成分 1 的得分呈逐年下降趋势,这主要是因为与其相关性较大的人口、GDP、社会固定资产投资等因素逐年提高所致,人口增长、生活水平的日益提高直接导致了生活用水量的迅速递增,使得水资源承载能力有所下降;主成分 2 的得分具有较强的波动性,它代表了农业发展水平。因地理条件限制,农业发展主要受到灌溉条件的制约。延安市属内陆干旱半干旱气候,降水少,不能满足作物生长的需水要求,不灌溉会出现严重减产,因此对水资源有较强的依赖性。据调研,延安地区农田作物的整体灌溉程度很低,主要依靠天然降水进行农田灌溉补给,缺乏人工水利措施对农业生产进行支撑,因此呈现较强的波动性。主成分 2 的得分在 2004、2008、

环境、社会经济和水资源等方面的水资源承载力驱动因子,能很好地反映出延安市水资源承载能力。

2009年出现下降,主要是因为这三年期间与其正相关较大的有效灌溉面积基本不变,粮食产量低,而负相关性较大的农业用水量仍然较多所致,说明延安市农业发展水平和节水灌溉技术仍然比较落后;主成分3的得分也具有波动性,主要是因为与其正相关较强的降水量的波动性较大,间接反映出降水量较大时水资源承载能力较强,反之较弱;综合分析延安市水资源承载能力呈逐年下降趋势。

由表2、表3可知,反映人口、社会经济、环境等因素的主成分1对整体的贡献率已达到70.372%,是水资源承载力的主要驱动力。分析主成分1荷载较大的因子,发现 X_2 与 X_1 、 X_3 、 X_4 、 X_7 、 X_8 、 X_9 、 X_{13} 、 X_{15} 的相关系数均达到0.93以上,考虑到其荷载较大的还有 X_6 ,因此可用 X_2 、 X_6 来代表主成分1,即可认为人口和GDP是影响水资源承载力的主要驱动因子。

3 延安市水资源承载力预测

一个地区水资源的承载力是由水资源的需求量和供给量构成,供给量一般具有很大的稳定性,而需求量的预测对于一个区域水资源承载力的预测具有重要意义^[9]。根据上文分析得出水资源承载力变化的主要驱动因素人口和GDP,应用SPSS统计分析软件进行多元线性回归分析,计算得出延安市总用水量与人口、GDP的多元线性回归模型:

$$Y = 9307.434 + 13.040X_2 + 21.587X_6$$

式中: Y 为需水量,万 m^3 ; X_2 为GDP,亿元; X_6 为人口,万人。

3.1 模型的可靠性分析

对模型进行相关性检验,检验结果见表4,发现需水量与GDP、人口的相关系数 R 达到0.972,拟合线性回归的确定性系数 R^2 为0.944,调整后为0.929,说明模型拟与数据的拟合程度很好。

表4 模型拟合度检验

R	R^2	调整后 R^2	标准估计的误差
0.972	0.944	0.929	999.075

对模型进行方差及显著性检验,详见表5,结果显示回归平方和为 1.19×10^8 ,残差平方和为 6.99×10^6 ,总平方和为 1.26×10^8 ,对应的F统计量的值为59.44,显著性水平仅为 4.05×10^{-5} ,远小于0.05,可以认为所建立的回归方程有效。

将2001-2010年的GDP和人口数据带入模

型,计算出需水量,结果见表6。比较预测值与实际用水量,发现最大相对误差为7.7%,且大部分年份的相对误差在 $\pm 5\%$ 之间,预测误差相对较小,进一步说明模型可靠度较高。

表5 方差分析及显著性检验

模型	平方和	自由度	显著性水平
回归	1.19×10^8	59.44	4.05×10^{-5}
残差	6.99×10^6		
总计	1.26×10^8		

表6 预测结果误差分析

年份	总供水量	需水量预测值	相对误差 万 m^3 , %
2001	15059	15650	3.92
2002	16340	15984	-2.18
2003	16461	16593	0.80
2004	17811	17452	-2.01
2005	17666	19027	7.70
2006	22003	20950	-4.78
2007	23496	22359	-4.84
2008	23852	23859	0.03
2009	24028	23490	-2.24
2010	24228	25578	5.57

3.2 水资源承载力变化趋势预测

(1)人口增长率预测。延安市的人口增长受社会体制、国家政策及社会经济、环境资源、出生率、死亡率、迁入率、迁出率等多种因素的综合影响,近十年常住人口年平均综合增长率为11‰,人口自然增长率已经稳定在6‰以下,机械增长率波动较大。据《延安市国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》,“十二五”期间,规划延安人口自然增长率控制在6.5‰以下,考虑未来延安市社会经济发展对劳动力的需求,机械增长率在规划期内仍将保持在相对较高水平,最终确定2010-2020年人口综合平均增长率为12.5‰。

(2)GDP增长率预测。2010年延安市GDP达到885.42亿元,比“十五”末翻一番,年均增长14.7%。据《延安市国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》,“十二五”期间生产总值力争突破2000亿元,最终确定2010-2020年GDP平均增长率为15%。

(3)供需平衡分析。根据上述研究,采用多元线性回归模型预测出延安市2015年、2020年总需水量分别为4.09亿、4.76亿 m^3 。依据《延安市水中长期供求规划》,在不考虑外调水的情况下,

2015、2020年可供水量分别为3.71亿、4.30亿 m^3 ,水资源供需情况详见表7。

表7 水资源供需平衡分析 亿 m^3 , %

年份	2015	2020
需水量	4.09	4.76
可供水量	3.71	4.30
缺水量	0.38	0.46
缺水率	9.29	9.66

由表7可知,延安市在经济社会高速发展的同时,对水资源的需求量将大大增加,未来水资源承载力严重不足,2015、2020年缺水率将分别高达9.29%和9.66%。根据《延安市节水型社会建设“十二五”规划》^[10],延安市在2015年可节水3172万 m^3 ,随着各行各业用水定额的控制以及节水技术的推行,2020年可节水量为4567万 m^3 ,仍然不能解决缺水问题。因此,延安市必须加大非常规水源的利用,加强水生态与环境的保护和治理,同时还应加强水源地的保护和建设,尽快完成黄河引水工程,以解决水资源短缺问题,促进经济社会与环境的和谐快速发展。

4 结 语

本文通过主成分分析,得出影响延安市水资源承载力变化的因素可分为社会经济状况、农业水平和水资源条件三大类,其中社会经济状况是其主要驱动因素,人口和GDP是其主要驱动因子。人口增长、GDP增加、农业发展水平低等因素共同导致了生活和工农业用水的急剧增加,致使水资源承载力的压力不断加大。

通过综合评价分析,近10年来延安市水资源承载力呈逐年下降趋势,通过建立多元线性回归模

型和相关规划,在不考虑外调水的前提下,预测出延安市2015、2020年的缺水量分别为0.38、0.46亿 m^3 ,水资源承载能力严重不足,评价结果与《延安市水中长期供求规划》中相差无几,结果真实可信。由于延安市属于资源性缺水城市,大力推行开源和节流并重政策的同时,必须考虑实施黄河引水工程,才能加大延安市水资源的承载能力。

参考文献:

- [1] 李令跃,甘泓. 试论水资源合理配置和承载能力概念与可持续发展之间的关系[J]. 水科学进展,2000,11(3): 307-313.
- [2] 孙毓蔓,夏乐天,王春燕. 基于主成分分析的南京市水资源承载力研究[J]. 人民黄河,2010,32(10):74-75.
- [3] 周维博. 河西走廊灌溉农业发展的水资源承载能力分析[J]. 自然资源学报,2002,17(5):564-570.
- [4] 姚治君,刘宝勤,高迎春. 基于区域发展目标下的水资源承载力研究[J]. 水科学进展,2005,16(1):109-113.
- [5] 韩俊丽,段文阁,李百岁. 基于SD模型的干旱区城市水资源承载力模拟与预测——以包头市为例[J]. 干旱区资源与环境,2005,19(4):188-191.
- [6] 胡荣祥,徐海波,任小松,等. BP神经网络在城市水环境承载力预测中的应用[J]. 人民黄河,2012,34(8):79-81.
- [7] 周亮广,梁虹. 基于主成分分析和熵的喀斯特地区水资源承载力动态变化研究——以贵阳市为例[J]. 自然资源学报,2006,21(5):827-833.
- [8] 周维博,李云排,董起广,等. 延安市水中长期供求规划[R]. 西安:长安大学,2013.5.
- [9] 姚慧,郑新奇. 多元线性回归和BP神经网络预测水资源承载力以济南市为例[J]. 资源开发与市场,2006,22(1):17-19.
- [10] 周维博,刘晓宇,等. 延安市节水型社会建设“十二五”规划[R]. 西安:长安大学,2011.8.