



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.03.007

王晓玮, 邵景力, 崔亚莉, 等. 基于 DPSIR 和主成分分析的阜康市水资源承载力评价[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(3): 37-42, 48. WANG Xiaowei, SHAO Jingli, CUI Yali, et al. Evaluation of water resources carrying capacity of Fukang based on DPSIR and principal component analysis[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(3): 37-42, 48. (in Chinese)

基于 DPSIR 和主成分分析的阜康市水资源承载力评价

王晓玮¹, 邵景力¹, 崔亚莉¹, 赵辉², 郭秀红², 孙倩¹

(1. 中国地质大学(北京) 水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 水利部 水资源管理中心, 北京 100053)

摘要: 针对新疆自治区阜康市水资源日益短缺及生态环境逐渐恶化的现实情况, 根据 DPSIR 框架展开水资源承载力因子分析, 构建了水资源承载力多因素基础指标体系; 应用主成分分析法筛选出主要指标, 采用熵权法进行赋权; 构建综合评价模型对水资源承载力进行计算。研究表明: 筛选出的 4 个主成分累计贡献率为 92.016%, 能充分代表多因素基础指标体系; 阜康市九年间(2006 年-2014 年)水资源承载力综合评分值在 0.498~0.531 之间波动, 下降速率缓慢且波动幅度减小, 整体上处于开发饱和阶段。社会和经济发展的压力带来的农业用水的增加是导致水资源承载力下降的主要指标, 扩大地下水开采和推行的节水灌溉等压采措施则在很大程度上缓解了下降的趋势。

关键词: 阜康; 水资源承载力; DPSIR; 主成分分析; 熵权法

中图分类号: P641.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)03-0037-06

Evaluation of water resources carrying capacity of Fukang based on DPSIR and principal component analysis

WANG Xiaowei¹, SHAO Jingli¹, CUI Yali¹, ZHAO Hui², GUO Xiuhong², SUN Qian¹

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Water Resources Management Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China

Abstract: Fukang city in Xinjiang province is faced with increasing scarcity of water resources and worsening ecology. Based on DPSIR, we conducted factor analysis of water resources carrying capacity (WRRC) and built a basic indicator system. Principal component analysis was used to select the main indicators of WRRC and entropy weight analysis was used to determine their weights. A comprehensive evaluation model was built to calculate and evaluate the WRRC of Fukang. The results showed that the selected 4 main indicators can well represent the basic indicator system with an accumulative contribution rate of 92.016%. The WRRC of Fukang fluctuated between 0.498-0.531 during 2006-2014. The rate of decline was slow and the fluctuation range decreased with time. Generally, the utilization has reached saturation. The increased use of agricultural water resulting from social and economic development was a main indicator of the decline in WRRC. But the trend of decline was strongly relieved by the expanding groundwater exploitation and water resources management practices in Fukang.

Key words: Fukang; water resources carrying capacity; DPSIR; main component analysis; entropy method

近年来, 水资源的供需矛盾日渐加剧, 水资源的 可持续利用成为亟待解决的课题, 水资源承载力研

收稿日期: 2016-10-12 修回日期: 2016-12-16 网络出版时间: 2017-05-06

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170506.1115.007.html>

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(41502228); 水利部行政事业性项目(1261521610010)

Funds: National Natural Science Foundation of China(41502228); Administrative Project of the Ministry of Water Resources of China (1261521610010)

作者简介: 王晓玮(1982-), 男, 山东泰安人, 博士研究生, 主要从事地下水资源管理研究。E-mail: wangxw@cugb.edu.cn

通讯作者: 邵景力(1959-), 男, 山东枣庄人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文学及水资源专业的教学和科研工作。E-mail: jshao@cugb.edu.cn

究也以其基础性特点成为研究的热点和重点。在水资源相对短缺的西北内陆河流域的平原地区,水资源的供需矛盾影响到社会经济和生态环境的各方面,水资源承载力的分析计算和评价被公认为是寻求该区域可持续发展道路的重要依据^[1,2]。

国内对水资源承载力的研究成果中^[3],虽然尚未统一定义,但是对其内涵认识较为统一,即水资源承载力是一个描述水资源支持人类活动能力阈值的概念。目前的研究通常综合考虑多因素指标进行量化综合评价,常用的量化方法主要有层次分析法^[6]、模糊综合评判法^[7-8]、主成分分析法^[9-10]、多目标决策分析法^[11]、系统动力学法^[12-13]、BP 神经网络评价^[14-15]等。作为可持续发展研究的内容之一,水资源承载力研究需要研究水资源与社会经济生态资源复合系统之间的关系,目前研究中指标选择主要着眼于水资源状态评价,对影响这种状态的驱动力以及针对驱动力所做出的政策响应研究较少。驱动-压力-状态-影响-响应(DPSIR)指标体系可以很好地拓展指标体系的内涵^[16-17],但是目前将其应用到水资源承载力评价中的研究较少^[18],特别是在西北地区研究较少。

阜康市位于新疆自治区天山北麓,其水资源循环赋存条件、开发利用状况及社会经济系统与生态系统的相互作用关系在西北内陆流域具有典型性。由于扩大灌溉面积导致的对水资源的不合理开发利用,引发了诸如河流断流、地下水位下降、地下水降落漏斗范围扩张、自然生态环境恶化等一系列严重的地质环境问题^[19-22]。本文按照 DPSIR 模型选择指标体系,综合采用主成分分析法与熵权法,评价阜康市 2006 年-2014 年水资源承载力,以期揭示水资源承载力在社会经济发展中的变化及其主要的影响因素。

1 研究方法

1.1 基于 DPSIR 模型构建多因素指标体系

DPSIR 模型是一种基于因果关系组织相关指数的评价模型,其因果关系链可以表示为驱动力(Driving force) — 压力(Pressure) — 状态(State) — 影响(Impact) — 响应(Response)。该模型不仅能显示社会发展对环境系统的影响,还涵盖了环境状态对人类行为和社会系统的反馈。

将 DPSIR 模型应用于水资源承载力的分析,因果关系链可以表述为:潜在的社会经济驱动力 — 对水资源系统的压力 — 资源环境状态 — 状态变化带来的不利影响 — 人类社会对影响的响应^[18]。各因子

对水资源承载力基本要素的展现可以表征为具体的评价指标。

(1) 驱动力指标:主要包括经济发展指标和人口指标。

(2) 压力指标:主要是社会经济发展对水资源的需求,包括了三生(生产、生活、生态)需水量指标和污水排放量等指标。

(3) 状态指标:包括水资源开发利用程度指标和水资源可利用量指标。

(4) 影响指标:包括水位指标、水质指标、生态系统变化指标等。

(5) 响应指标:包括财政投入指标、生态恢复指标等。

依据上述理念和原则可以构建一个具有循环回路的指标初选框架,根据资料收集的难易程度等进行筛选后,可以得到涉及多个领域的多因素基础指标体系。

1.2 水资源承载力主成分分析

采用主成分分析法(principal component analysis)对基础指标体系进行筛选。主成分分析法是一种对高维变量的降维处理技术^[23],是把给定的一组原始多变量线性变换为另一组少数的综合变量的多元统计方法。主要包括以下步骤:

(1) 建立原始数据矩阵 X 。

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: x_{ij} 代表第*i*年第*j*个指标的原始数据。应对影响水资源承载力原始数据进行正向化处理,改为负值,包括主要的D、P、S指标。

(2) 对原始数据进行标准化。

$$x'_{ij} = (x_{ij} - \bar{x}_j) / S_j \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: x_{ij} 为原始数据矩阵中的元素; \bar{x} 和 S_j 分别为第*j*个指标原始数值的平均值和标准差。

(3) 得到数据的相关系数矩阵。

$$R = [r_{jk}]_{p \times p} \quad (3)$$

式中: r_{jk} 为指标*j*和指标*k*的相关系数。

(4) 计算相关矩阵 R 的特征值 λ 。依据主成分累积方差贡献率来确定主成分个数

$$E = \sum_{i=1}^k \lambda_i / \sum_{i=1}^n \lambda_i \geq 80\% \quad (4)$$

式中: k 为主成分个数; E 为主成分累积方差贡献率,一般取 80% 以上。

(5) 求相关矩阵 R 的特征向量,确定主成分。

若 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_k \geq 0$, 则相应的单位特征向

量为:

$$a_i = (a_{1i}, a_{2i}, \dots, a_{ni}) \quad (5)$$

主成分可以根据标准化后的指标变量和评价指标求得

$$F_i = a_{1i}C_1 + a_{2i}C_2 + \dots + a_{ni}C_n \quad (6)$$

式中: F_i 为第 i 主成分, $i = 1, 2, \dots, n$; C_n 为评价指标。

1.3 权重的确定

为客观确定筛选后的各主成分指标的权重,引入熵权法(entropy weight method)^[24],计算综合指标。

(1)数据的归一化处理,进行坐标平移,得到归一化判断矩阵 F

$$f'_{ij} = \frac{f_{ij} - \min f_{ij}}{\max f_{ij} - \min f_{ij}} \quad (7)$$

式中: f_{ij} 为第 i 个样本第 j 个主成分的值; f'_{ij} 为平移后指标的值。

(2)定义第 j 项指标的熵值。

$$H_j = \frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^n \ln P_{ij} \quad (8)$$

$$P_{ij} = \frac{f'_{ij}}{\sum_{i=1}^n f'_{ij}} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (9)$$

(3)计算各指标的熵权。

$$W_j = \frac{1 - H_j}{m - \sum_{j=1}^m H_j} \quad (1 \leq j \leq m, \sum_{j=1}^m W_j = 1) \quad (10)$$

1.4 计算水资源承载力

建立综合评价模型,计算各个年度水资源承载力综合得分值 S_i :

$$S_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m W_j^2 (1 - P_{ij})} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (11)$$

2 研究区概况

阜康市行政区划隶属于新疆维吾尔自治区昌吉回族自治州,东接吉木萨尔县,西临乌鲁木齐市米东新区,南隔博格达峰与乌鲁木齐县相望,北连阿勒泰地区富蕴县。行政区面积 11 572.8 km²。位于天山北坡,目前经济主体是农业。

阜康市南高北低,自南向北依次为山区、平原、沙漠地貌,人工绿洲主要分布在洪积扇中下部和冲积平原。阜康市属于典型的温带大陆性干旱气候,南部山区年降水量 540~700 mm,是水资源的形成区;平原区至沙漠区多年平均降水量 140~210 mm,多年平均蒸发量 1 850 mm,是水资源的散失区。阜康市地表河流域范围均在行政区内,主要补给来源为冰川和积雪融水及大气降水;地下水主要补给来源是地表水入渗和少量降水入渗,由产流区到散失区,地表水和地下水多次转化。全市市属水资源总量为

2.87 亿 m³,其中地表水来水近 10 年平均径流量 1.672 4 亿 m³,平原区多年地下水补给量为 1.67 亿 m³,地下水可开采量为 0.920 6 亿 m^{3[25]}。

阜康市的水资源开发利用规模不断增加。各河流之间通过引水渠等水利设施基本上纳入了一个统一的水网中;全市共有机井总数为 1430 眼(不含行政区内新疆建设兵团所辖机井),其中农牧灌溉为 1075 眼。2000 年至 2009 年地下水开采量由 0.915 亿 m³ 增加到 1.759 亿 m^{3[20]}。2013 年,全市用水总量 4.07 亿 m³,其中引地表水 1.36 亿 m³,开采地下水 2.71 亿 m^{3[25]}。目前农牧业生产用水占总用水量的 85.2%^[25],占地下水总开采量的 93.32%。山区水库的修建使地表水在出山口以前被大量截留,进而平原区大量超采地下水,各类地质环境问题和环境问题日益加剧。如根据阜康市 14 个地下水监测点水位监测资料,2005 年-2013 年监测点平均水位埋深增加了 5 m 左右。

3 结果和讨论

3.1 水资源承载力评价结果

依据数据收集的难易程度,筛选出 16 个评价指标建立基础评价指标体系,评价周期确定为 2006 年-2014 年(表 1),对阜康市水资源承载力动态进行综合评价。

采用 SPSS 软件进行因子分析,得到主成分的特征值和贡献率。筛选 4 出前个主成分(累积贡献率 92.016%),其解释原始信息的能力分别为 58.122%、16.356%、9.938% 和 7.600%。对原始指标数据标准化后,结合 4 个主成分的得分系数值进行计算,即可得到不同年份主成分的得分情况(表 2)。

根据式(7)-式(11),计算的主成分得分值,求得 4 个主成分因子的权重分别为 0.271 09、0.313 52、0.263 86 和 0.151 53,此权重代表了该主成分指标在问题中提供有用信息量的多寡^[23]。最终得到 2016 年-2014 年九年间阜康市水资源承载力的综合评分值(图 1),得分值总体上在 0.498 4~0.531 2 之间波动,极值出现在 2006 年和 2009 年。可以看出,虽然总体上水资源承载力综合评分值呈减少趋势,但减速缓慢,且近几年曲线波动幅度也逐渐减小,这表明阜康市的水资源开发状况具有明显的饱和阶段的特征。

3.2 水资源承载力变化的主要驱动因子

通过分析主成分负荷量,可以得到驱动综合得分变化的主成分与变量之间的相关性。主成分分析

表 1 筛选后的阜康市基础评价指标体系

Tab. 1 The selected basic evaluation indicator system for Fukang

目标层	准则层	因素层	年份								
			2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
压力指标 <i>D</i>		总人口 D_1 /万人	16.28	16.62	16.94	16.80	16.71	16.76	16.86	16.92	16.75
		第一产业增加值 D_2 /(亿元·a ⁻¹)	5.45	6.61	8.61	10.23	14.15	18.04	21.89	23.06	26.06
		第二产业增加值 D_3 /(亿元·a ⁻¹)	27.55	31.82	40.8	41.2	50.27	63.35	72.97	74.82	85.03
		农牧民人均纯收入 D_4 /(元·a ⁻¹)	5 680	6 200	6 776	7 609	9 206	10 666	12 236	13 798	15 332
		城镇居民可支配收入 D_5 /(元·a ⁻¹)	8 736	10 280	11 600	12 778	14 042	15 449	17 300	20 307	24 355
驱动力指标 <i>P</i>		粮食作物种植面积 P_1 /万 hm ²	1.15	0.90	1.21	2.33	2.87	2.70	2.58	2.74	2.60
		经济作物种植面积 P_2 /万 hm ²	1.59	1.54	1.36	1.63	1.41	1.90	2.24	1.97	3.04
		农业用水量 P_3 /万 m ³	14 000	16 693	18 216	27 215	26 342	29 830	33 318	34 700	35 500
状态指标 <i>S</i>		引水量 S_1 /万 m ³	9 500	10 043	9 769	12 982	13 592	13 520	12 000	9 500	7 567
		地下水开采量 S_2 /万 m ³	5 800	6 850	8 447	14 000	17 261	19 870	21 000	22 800	24 133
		人均水资源量 S_3 /m ³	1 966	1 926	1 889	1 905	1 914	1 754	1 743	1 696	1 713
		年降水量 S_4 /mm	191	291.80	126.70	242.70	208.20	255.20	178.10	231.50	173.90
影响指标 <i>I</i>		平均地下水水位降幅 I_1 /m	0.05	1.30	0.38	0.91	0.25	0.31	1.04	1.22	0.90
		当年人工造林面积 R_1 /hm ²	1 840	2 582	2 890	3 757	1 932	2 420	1 553	2 200	3 013
响应指标 <i>R</i>		新增节水灌溉面积 R_2 /hm ²	580	1 800	4 314	11 473	5 000	7 800	5 700	4 200	3 400
		水利、环境和公共设施投资额 R_3 /万元	8 000	10 000	12 000	15 547	35 497	20 014	60 679	60 111	144 557

注: 原始数据来自 2006 年-2014 年《阜康市国民经济和社会发展统计公报》、2007 年-2015 年《新疆统计年鉴》、2007 年-2015 年《阜康年鉴》、阜康市水利局和林业局网站政务信息公开中的统计数据、阜康市地下水监测数据等, 个别年份无数据的采用外推法确定。

表 2 阜康市 2006 年-2014 年各主成分得分矩阵

Tab. 2 Component score coefficient matrix of Fukang during 2006-2009

年份	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
F ₁	- 12.909 3	- 9.703 72	- 7.095 95	- 3.034 26	- 1.776 47	2.814 598	7.573 019	9.637 489	14.494 57
F ₂	- 3.394 89	- 1.071 14	- 0.778 1	4.296 783	1.697 33	2.828 529	0.147 618	- 0.245 78	- 3.480 37
F ₃	- 1.547 02	2.274 898	0.430 695	1.913 983	- 2.250 72	- 1.150 42	- 1.123 65	0.493 153	0.959 075
F ₄	0.268 836	1.850 707	- 2.494 57	- 0.688 12	0.082 775	0.505 194	0.330 376	0.864 428	- 0.719 63

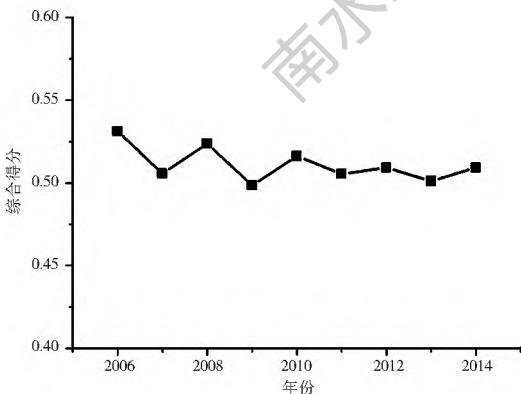


图 1 阜康市 2006 年-2009 年水资源承载力综合得分值

Fig. 1 Comprehensive scores of water resources carrying capacity in Fukang during 2006-2009

得到的因子负荷矩阵可以明确显示这种相关关系 (表 3)。

结果表明: 第 1 主成分在第一、二产业增加值、城镇和农村居民可支配收入等压力指标上的载荷较高, 均在 0.97 以上普遍大于 0.99, 同时在粮食

和经济作物播种面积、农业用水量等驱动力指标上也有较大的载荷, 高于 0.79, 并且在地下水开采量指标上的载荷达到了 0.969, 突出表明社会经济发展的压力驱动了对水资源的大规模开发利用; 第 2 主成分与引水量、新增节水灌溉面积等指标存在较强的正相关, 载荷数分别为 0.965 和 0.749, 基本上反映了地区农业活动的情况; 第 3 主成分与当年人工造林面积有较大的正相关, 载荷数为 0.902, 反映了人类对水资源情况变化的正面响应; 第 4 主成分与年总降水量和地下水水位降幅等指标呈较强的正相关, 载荷数分别为 0.912 和 0.709, 反映了自然条件和人类驱动对地下水状态的改变。在熵权法中, 指标的熵值越小, 权重越大, 提供的信息量越多, 4 个主成分中, 第 2 个主成分权重最大为 0.3135 2, 表明在西北地区农业为主的发展模式下, 引来地表水量的多寡是重要的影响因素, 而不断增加的节水灌溉

面积使用水效率不断提高,增加了水资源的承载力;同时,第 1 个主成分的权重也非常高,达到 0.271 09,表明经济发展对水资源需求的压力不断增加,但同时迅速增加的地下水开采供应量,在很大程度上缓解了这种压力。

表 3 主成分因子的负荷矩阵

Tab.3 Matrix for the principal components

变量	主成分			
	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄
总人口 D ₁	0.493	0.265	0.608	-0.060
第一产业增加值 D ₂	0.999	0.020	0.000	0.005
第二产业增加值 D ₃	0.994	0.000	0.043	-0.028
农牧民人均纯收入 D ₄	0.996	-0.062	0.017	0.026
城镇居民可支配收入 D ₅	0.972	-0.144	0.140	0.004
粮食种植面积 P ₁	0.799	0.550	-0.009	-0.027
经济作物种植面积 P ₂	0.838	-0.374	0.048	0.023
农业用水量 P ₃	0.951	0.234	0.158	0.091
引水量 S ₁	-0.148	0.965	-0.055	0.078
地下水开采量 S ₂	0.969	0.231	0.037	0.035
人均水资源量 S ₃	-0.934	0.019	-0.070	-0.085
年降水量 S ₄	-0.151	0.260	-0.078	0.912
平均地下水位降幅 I ₁	0.357	-0.270	0.359	0.709
当年人工造林面积 R ₁	-0.132	-0.061	0.902	0.092
新增节水灌溉面积 R ₂	0.150	0.749	0.589	0.059
水利、环境和公共设施投资额 R ₃	0.858	-0.395	0.071	-0.094

总体上可以认为,压力指标(D)和驱动力指标(P)普遍对承载力的变化起主导作用,不断增大的经济发展和社会进步压力带来的需水量特别是农业需水量的增加,导致了水资源承载力总体上呈下降趋势。同时,为了满足水资源需求而采取的扩大地下水开采措施(S)以及人类主动性的增加节水灌溉面积的活动(R),对水资源承载力起到了提升的作用,减缓了承载力下降的幅度和波动幅度。但是在西北内陆河流域独特的水文地质条件下,增加地下水的开采量长期来看会导致一系列环境地质问题和生态问题,因此这种模式并非是不可持续的。

4 结论和建议

(1)采用 DPSIR 模型建立了新疆自治区阜康市的水资源承载力多因素评价指标体系,包括 13 个指标;采用主成分分析法对指标进行降维,采用熵权法构建综合评价模型,对 2006 年-2014 年的水资源承载力进行了评价。研究结果共筛选了 4 个主成分,累计贡献率为 92.016%;通过熵权法计算求得 4 个主

成分因子的权重分别为 0.271 09、0.313 52、0.263 86 和 0.151 53;最终得到阜康市 2006 年-2014 年水资源承载力综合评分值在 0.498 4~0.531 2 之间波动,总体上缓慢下降,波动减小;评价结果表明阜康市的水资源开发利用具有饱和阶段特征。

(2)通过分析主成分负荷量可以看出,由于社会和经济发展的压力,阜康市不断扩大的农业种植面积和农灌需水量,是导致水资源承载力持续下降的主要影响指标;为了缓解水资源供需矛盾,不断扩大地下水开采量,并且大力推广节水灌溉,这两个指标表明“开源节流”对水资源系统的变化形成了积极的响应,抵消了一部分社会经济发展对水资源系统的压力。但是这种扩大地下水供给的模式是不可持续的。

(3)研究区内地下水和地表水同源且多次转化,不同的水资源开发利用模式对中下游生态系统和地下水的采补平衡作用也不相同。目前新疆自治区的用水总量控制指标已经分解到了县一级,应对总量指标进行进一步的细化和合理界定,以生态作为重要的约束条件,将“水-生态-社会经济”作为一个综合系统,综合研究水循环系统演变与社会经济和生态环境系统的互动关系,结合国民经济用水情况、历史现状、压采能力等因素,来确定总量控制指标,才能实现水资源承载力的恢复和上升。

参考文献(References):

[1] 王浩,陈敏建,何希吾,等.西北地区水资源合理配置与承载力研究[J].中国水利,2004(22):43-45.(WANG Hao, CHEN Minjian, HE Xiwu, et al. Research on reasonable water allocation and bearing capacity of water in northwest area [J]. China Water Resources, 2004(22): 43-45. (in Chinese))

[2] 汪党献,王浩,马静.中国区域发展的水资源支撑能力[J].水利学报,2000(11):21-26,33.(WANG Dangxian, WANG Hao, MA Jing. Water resources supporting capacity for regional development in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(11): 21-26, 33. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2000.11.004

[3] 刘晓,陈隽,范琳琳,等.水资源承载力研究进展与新方法[J].北京师范大学学报:自然科学版,2014,50(3):312-318.(LIU Xiu, CHEN Jun, FAN Lirilin, et al. Progress and review of new methods in water resources capacity research[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2014, 50(3): 312-318. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2015.03.062. (in Chinese))

[4] 党丽娟,徐勇.水资源承载力研究进展及启示[J].水土保持研究,2015,22(3):341-348.(DANG Lijuan, XU Yong. Review of research progress in carrying capacity of water resources [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(3): 341-348. (in Chinese)) DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2015.03.062

- [5] 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 Zone Research, 2003, 20(1): 60-66. DOI: 10.13866/j.azr.2003.01.013. (in Chinese))
- [6] 马金珠, 李相虎, 贾新颜. 干旱区水资源承载力多目标层次评价——以民勤县为例[J]. 干旱区研究, 2005, 22(1): 11-16. (MA Jizhu, LI Xianghu, JIA Xinyan. Evaluation of the carrying capacity of water resources in arid areas by using multi-objective hierarchical analysis[J]. Arid Zone Research, 2005, 22(1): 11-16. DOI: 10.13866/j.azr.2005.01.003. (in Chinese))
- [7] 刘敏, 聂振龙, 王金哲, 等. 华北平原地下水资源承载力模糊综合评价[J]. 水土保持通报, 2014, 34(6): 311-315. (LIU Min, NIE Zhenlong, WANG Jinzhe, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of groundwater resources carrying capacity in North China Plain[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(6): 311-315. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2014.06.060. (in Chinese))
- [8] 田静宜, 王新军. 基于熵权模糊物元模型的干旱区水资源承载力研究——以甘肃民勤县为例[J]. 复旦学报: 自然科学版, 2013, 52(1): 86-93. (TIAN Jingyi, WANG Xinjun. Assessment of the carrying capacity of water resources in arid areas based on entropy fuzzy matter element model[J]. Journal of Fudan University: Natural Science, 2013, 52(1): 86-93. (in Chinese))
- [9] 邵磊, 周孝德, 杨方廷, 等. 基于主成分分析和熵权法的水资源承载能力及其演变趋势评价方法[J]. 西安理工大学学报, 2010, 26(2): 170-176. (SHAO Lei, ZHOU Xiaode, YANG Fangting, et al. Research on water resources carrying capacity and evaluation method of evolution tendency based on principal component analysis and entropy weight method[J]. Journal of Xian University of Technology, 2010, 26(2): 170-176. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4710.2010.02.009. (in Chinese))
- [10] 邢旭光, 史文娟, 张译丹, 等. 基于主成分分析法的西安市地下水资源承载力评价[J]. 水文, 2013, 33(02): 35-38. (XING Xuguang, SHI Wenjuan, ZHANG Yidan, et al. Assessment of water resources carrying capacity in Xi'an City based on principal component analysis[J]. Journal of China Hydrology, 2013, 33(02): 35-38. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2013.02.008. (in Chinese))
- [11] 张欣, 范明元, 陈华伟, 等. 黄河三角洲水资源承载力多目标优化计算[J]. 人民黄河, 2013, 35(12): 47-49. (ZHANG Xin, FAN Mingyuan, CHEN Huawei, et al. Assessment of water resources carrying capacity in Xi'an City based on principal component analysis[J]. Yellow River, 2013, 35(12): 47-49. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2013.12.016. (in Chinese))
- [12] 姜秋香, 董鹤, 付强, 等. 基于 SD 模型的城市水资源承载力动态仿真——以佳木斯市为例[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(5): 827-831. (JIANG Qiuxiang, DONG He, FU Qiang, et al. Dynamic simulation of urban water resources carrying capacity based on system dynamic model[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(5): 827-831. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.2015.05.003. (in Chinese))
- [13] 崔海升. 基于系统动力学模型的哈尔滨市水资源承载力预测研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014. (CUI Haisheng. Prediction research on Harbin water resources carrying capacity by system dynamic model[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014 (in Chinese))
- [14] 郭晓英, 陈兴伟, 陈莹, 等. 基于粗糙集和 BP 神经网络组合法的水资源承载力动态变化分析[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(2): 236-240. (GUO Xiaoying, CHEN Xingwei, CHEN Ying, et al. Dynamic variation analysis of water resources carrying capacity in Xiamen City based on rough set theory and BP neural network[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(2): 236-240. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.2015.02.010. (in Chinese))
- [15] 马峰, 王千, 蔺文静, 等. 基于指标体系投影寻踪模型的水资源承载力评价——以石家庄为例[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(3): 62-66. (MA Feng, WANG Qian, LIN Wenjing, et al. Evaluation of water resources carrying capacity based on index system with parameter projection pursuit model[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(3): 62-66. DOI: 10.3724/SP.J.1201.2012.03062. (in Chinese))
- [16] 来海亮, 汪克献, 吴涤非. 水资源及其开发利用综合评价指标体系[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 95-101. (LAI Hailiang, WANG Gangxian, WU Difei. Comprehensive assessment indicator system for water resources and its development and use[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1): 95-101. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2006.01.016. (in Chinese))
- [17] 陈洋波, 陈俊合, 李长兴, 等. 基于 DPSIR 模型的深圳市水资源承载能力评价指标体系[J]. 水利学报, 2004(7): 98-103. (CHEN Yangbo, CHEN Junhe, LI Changxing, et al. Indicators for water resources carrying capacity assessment based on driving forces-pressure-state impact response model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(7): 98-103. DOI: 10.13243/j.cnki.slx.2004.07.017. (in Chinese))
- [18] 高超, 梅亚东, 吕孙云, 等. 基于 AHP-Fuzzy 法的汉江流域水资源承载力评价与预测[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(9): 21-28. (GAO Chao, MEI Yandong, LYU Sunyun, et al. Assessment and Prediction of Water Resources Carrying Capacity Based on AHP-Fuzzy Method[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(9): 21-28. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2014.09.005. (in Chinese))
- [19] 陈春艳. 新疆阜康绿洲景观格局动态变化及其影响因子分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学自然地理学, 2011. (CHEN Chunyan. Study on Landscape of Fukang Oasis and Analysis of Factors that effect on it[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2011. DOI: 10.7666/d.d173024. (in Chinese))
- [20] 胡娟, 丁国梁, 王芳. 浅谈阜康市地下水资源利用与保护修复措施[J]. 地下水, 2011, 33(6): 37-39. (HU Juan, DING Guoliang, WANG Fang. Discussion on groundwater utilization and protection of Fukang[J]. Groundwater, 2011, 33(6): 37-39. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1184.2011.06.016. (in Chinese))

(下转第 48 页)

DOI: 10.1007/s11707-014-0406-2

- [15] 李慧, 靳晟, 雷晓云, 等. SWAT 模型参数敏感性分析与自动率定的重要性研究——以玛纳斯河径流模拟为例[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(1): 79-82. (LI Hui, JIN Sheng, LEI Xiaoyun, et al. Study on the importance of sensitivity analysis and auto calibration of SWAT model: Taking the case study of Manasi Watershed[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2010, 21(1): 79-82. (in Chinese))
- [16] 黄清华, 张万昌. SWAT 模型参数敏感性分析及应用[J]. 干旱区地理, 2010, 33(1): 8-15. (HUANG Qinghua, ZHANG Wan chang. Application and parameters sensitivity analysis of SWAT model[J]. Arid Land Geography, 2010, 33(1): 8-15. (in Chinese))
- [17] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, Williams J R. Soil and water assessment tool theoretical documentation, version 2009[M]. Grassland, Soil and Research Service, 2009.
- [18] 宋明丹, 冯浩, 李正鹏, 等. 基于 Morris 和 EFAST 的 CERES-Wheat 模型敏感性分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 124-166. (SONG Ming dan, FENG Hao, LI Zheng peng, et al. Global sensitivity analyses of DSSAT-CERES-Wheat model using Morris and EFAST methods[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 124-166. (in Chinese)) DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.020
- [19] Reusser D E, Buytaert W, Zehe E. Temporal dynamics of model parameter sensitivity for computationally expensive models with the Fourier amplitude sensitivity test[J]. Water Resources Research, 2011, 47: W07551. DOI: 10.1029/2010WR009947
- [20] 王建栋, 郭维栋, 李红祺. 拓展傅里叶幅度敏感性检验(EFAST)在陆面过程模式中参数敏感性分析的应用探索[J]. 物理学报, 2013, 62(5): 050202. (WANG Jiandong, GUO Weidong, LI Hongqi. Application of extended Fourier amplitude sensitivity test (EFAST) method in land surface parameter sensitivity analysis[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(5): 050202. (in Chinese)) DOI: 10.7498/aps.62.050202

(上接第 42 页)

- [21] 蒋惠, 李云华. 新疆阜康市平原区地下水开发利用现状及对生态环境的影响[J]. 水利水电快报, 2008, 29(S1): 50-52. (JIANG Hui, LI Yunhua. Utilization and impact on ecology for groundwater in Fukang plain areas[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2008, 29(S1): 50-52. DOI: 10.15974/j.cnki.slsdkb.2008.s1.006. (in Chinese))
- [22] 向伟玲. 阜康市地下水时空动态变化及生态影响研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学生态学, 2007. (XIANG Weiling. Temporal and spatial dynamic variation of groundwater ecological impact research of Fukang[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2007 (in Chinese))
- [23] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. (XU Jianguo. Mathematical methods in contemporary geography[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002 (in Chinese))
- [24] 熊黑钢, 付金花, 王凯龙. 基于熵权法的新疆奇台绿洲水资源承载力评价研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(10): 1382-1387. (XIONG Heigang, FU Jinhua, WANG Kailong. Evaluation of water resource carrying capacity of Qitai Oasis in Xinjiang by entropy method[J]. Chinese Journal of Eco Agriculture, 2012, 20(10): 1382-1387. DOI: 10.3724/SP.J.1011.2012.01382. (in Chinese))
- [25] 阜康市水利局. 阜康市水资源基本情况[E/OL]. <http://swj.fk.gov.cn/swj/fksl/szygk/2015/221299.htm>, 2015/10/11. (Fukang Water Resources Bureau. The basic information of water resources in Fukang[E/OL]. <http://swj.fk.gov.cn/swj/fksl/szygk/2015/221299.htm>, 2015/10/11. (in Chinese))