

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2014.06.005

承载指数与模糊识别评价许昌市水资源承载力

周念清¹, 杨 硕¹, 朱 勍²

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学继续教育学院, 上海 200092)

摘要:将 2011 年作为研究基准年,采用负载指数和承载指数,通过建立模糊识别模型,选取人均用水量、万元 GDP 用水量、农田灌溉单位面积用水量、人均水资源占有量、水资源利用率和供水模数等 6 个评价指标,计算 2002—2011 年许昌市水资源承载力,并对其变化趋势进行分析。在此基础上,对规划年 2020 年和 2030 年许昌市水资源承载力进行预测。结果表明:许昌市水资源利用程度较低,水资源承载力整体处于可承载水平;近几年水资源承载力有所提升,但潜力有限;在特枯干旱年($P=95\%$)来水条件下,2020 年、2030 年均存在水资源超载问题。

关键词:水资源承载力;负载指数;承载指数;模糊识别模型;许昌市

中图分类号:TV213.4 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2014)06-0025-06

Evaluation of water resources carrying capacity of Xuchang City based on carrying capacity index and fuzzy recognition theory

ZHOU Nianqing¹, YANG Shuo¹, ZHU Qing²

(1. Department of Hydraulic Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. School of Continuing Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The load index and carrying capacity index were used to evaluate the water resources carrying capacity of Xuchang City, with the year 2011 used as the research base year. The fuzzy recognition model was established using six evaluation factors, including per capita water consumption, water consumption per ten thousand yuan GDP, unit area irrigation water consumption, per capita possession of water resources, the utilization efficiency of water resources, and water modulus, in order to calculate the water resources carrying capacity of the city during the period from 2002 to 2011 and analyze its change trends. On this basis, the water resources carrying capacities of Xuchang City in planning years 2020 and 2030 are predicted. The results show that the utilization of the water resources in Xuchang City is at a low level, and the water resources carrying capacity is appropriate on the whole. The water resources carrying capacity of Xuchang City has improved in recent years, but it has limited potential. The water resources will be overloaded in the extremely dry years ($P=95\%$) 2020 and 2030.

Key words: water resources carrying capacity; load index; carrying capacity index; fuzzy recognition model; Xuchang City

水资源承载力是指在区域现有经济技术水平和社会生产力条件下,水资源可以维持的最大人口数量和经济规模^[1]。水资源承载力也是衡量区域内水资源能否支撑人口、经济与环境协调和可持续发展的重要指标,对于认识和建设水资源安全保障体系,协调水资源利用与人口、经济和生态环境的可持续发展具有重要意义^[2]。国外学者大多将水资源承载力纳入可持续发展理论中进行研究^[3]。Oh 等^[4]采用水质、水量与污水处理量等指标作为影响因素研究城市的水资源承载力。Daniel 等^[5]研究在

基金项目:国家自然科学基金(41272249);高等学校博士学科点专项科研基金(20110072110020)
作者简介:周念清(1964—),男,教授,博士,主要从事水文水资源数值模拟与水环境评价方面研究。E-mail: nq.zhou@tongji.edu.cn

不破坏周围生态、社会和文化环境的基础上,评估最大人口数量来确定海滩的物理-生态承载力。Mauerhofer^[6]对环境可持续性承载力条件下的社会资本、社会能力和 社会承受能力进行了系统的讨论。Lei 等^[7]通过对 17 个国家的资源消耗与资源承载能力进行评价,分析了整个人类社会的可持续发展水平。

近年来,随着我国经济社会的快速发展,城市化进程不断加快,大量人口向城市转移,工业需水量、农业需水量、生态需水量不断上升,水资源短缺与水环境问题等逐步显现。在提倡生态文明建设和可持续发展的背景下,研究水资源承载能力所能支撑的社会经济规模已经成为我国水利工程领域研究的热点问题之一。张曦等^[8]采用模糊识别理论模型和互补理论的二元对比法,计算研究区域的水资源承载力。段青春等^[9]用“可支撑的合理规模”来描述水资源承载力,并在此基础上从“社会经济-水资源-生态环境”复合系统角度综合分析了节水措施对水资源承载力的影响。刘秀美^[10]从水资源可持续发展角度出发,采用主成分分析法、层次分析法和多元线性回归模型计算富阳市水资源最大承载能力。马峰等^[11]运用 MATLAB 软件对评价指标进行投影寻踪分析,得到了石家庄市水资源承载力等级及主要影响指标。张欣等^[12]通过构建水资源承载力多目标优化模型及相对承载指数法计算和评价了黄河三角洲水资源承载力的相对状态。周念清等^[13]应用 MODFLOW 软件对宿迁市地下水状况进行模拟,对区域地下水资源的开发利用状况进行了评价。

笔者以许昌市作为研究对象,对该地区水资源潜力负载指数、历年水资源承载力变化情况、规划年水资源承载力进行分析和计算,以便解决水资源与水生态问题,达到水资源合理配置的目的,为经济社会的可持续发展战略提供理论依据和技术支持。

1 研究区概况

许昌市地处河南省中部,位于东经 113°03′~114°19′,北纬 33°42′~34°24′之间,见图 1。该地区属北温带大陆性季风气候,降水受季风影响,年际变化大,丰水期与枯水期水量相差 2.5 倍,汛期降水量占全年降水量的 80% 以上。

2011 年许昌市域总人口 479.4 万人,中心城区人口 68.5 万人,城镇化率只有 40.92%,目前处于快速发展阶段。许昌市各县(市、区)人口空间分布不均衡,中心城区聚集度最高,人口密度达 5 161 人/km²。2011 年许昌国民经济生产总值 1 588 亿元,经济总量在河南 18 个省辖市中位列第 4,人均生产

总值位列第 6,高于河南省和全国平均水平。人口的快速增长和经济的高速发展,对许昌市水资源供应能力提出了挑战。

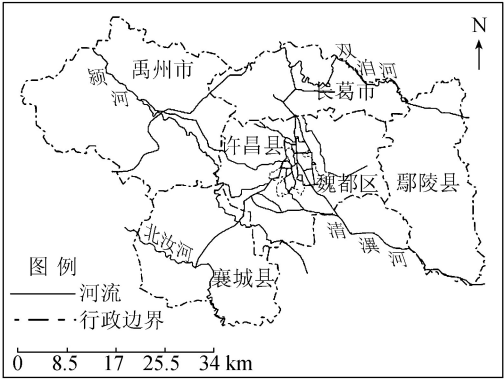


图 1 许昌市地理位置及水系分布

2 许昌市水资源利用潜力与承载力评价

2.1 水资源利用潜力评价

水资源负载指数可以用来评价区域水资源开发利用程度,通过建立区域降水、人口和农田灌溉面积与水资源量的关系来反映水资源的利用现状及未来水资源开发的难易程度^[14]。由于许昌市经济发展比较快,农业灌溉面积不能完全反映水资源利用情况,因此,可采用该地区的国内生产总值来代替。水资源负载指数计算公式为

$$C = K \sqrt{P'G} / W \tag{1}$$

其中

$$K = \begin{cases} 1.0 & R \leq 200 \\ 1.0 - 0.1(R - 200)/200 & 200 < R \leq 400 \\ 0.9 - 0.2(R - 400)/400 & 400 < R \leq 800 \\ 0.7 - 0.2(R - 800)/800 & 800 < R \leq 1600 \\ 0.5 & R > 1600 \end{cases}$$

式中: C 为水资源负载指数; P' 为人口,万人; G 为 GDP,亿元; W 为水资源总量,亿 m³; K 为与降水有关的系数; R 为降水量,mm。

根据水资源负载指数计算值将不同区域水资源开发利用潜力划分为 6 级,分级结果见表 1。

表 1 水资源负载指数分级

级别	C	水资源利用程度	水资源开发评价
I	>10	很高,潜力很小	需要调水或使用客水
II	(5,10]	高,潜力小	开发条件困难
III	(2,5]	中等,潜力不大	开发条件中等
IV	(1,2]	低,潜力很大	开发条件较容易
V	<1	较低,潜力大	兴修中小工程,开发容易
VI	0	未开发区	开发很容易

以 2011 年作为研究基准年,采用《河南省统计公报》中的人口和 GDP 数据,以及《许昌市水资源公报》中水资源总量和降水量数据,通过公式(1)计算

得到许昌市水资源负载指数 C , 见表 2。从表 2 可以看出, 魏都区(许昌市中心城区)水资源负载指数为 III 级, 其值为 3.927, 水资源利用程度处于中等水平, 开发潜力不大; 其余各县市水资源负载指数均小于 1, 有一定的开发潜力。许昌市水资源利用程度总体较低, 可以兴修拦蓄坝、调蓄湖等中小型水利工程来进一步开发利用水资源, 增强水资源的承载能力。

表 2 2011 年许昌市水资源负载指数

名称	C	负载指数分级
魏都区	3.927	III
禹州市	0.834	V
长葛市	0.978	V
许昌县	0.491	V
鄢陵县	0.449	V
襄城县	0.553	V
全 市	0.704	V

2.2 水资源承载力评价

水资源承载力 (W_{cc}) 主要反映区域人口与水资源关系, 通过人均综合用水量、区域水资源所能持续供养的人口规模(万人)或承载密度(人/ km^2)来表示。水资源承载力计算公式为

$$W_{cc} = W' / W_{pc} \tag{2}$$

式中, W_{cc} 为水资源承载力, 人; W' 为水资源可利用量, m^3 ; W_{pc} 为人均综合用水量, $\text{m}^3/\text{人}$ 。

许昌市水资源承载力计算结果见图 2。其中可利用水资源量考虑了本地自产水量、客水(上游入境水)量和中水回用量。计算结果表明, 2011 年许昌市水资源承载力为 661.1 万人, 高于 2011 年现状人口数, 许昌市水资源整体处于可承载的水平。禹州市和许昌县的水资源承载力较高, 魏都区水资源承载能力最低, 为 47.4 万人, 其次是鄢陵县。这是因为魏都区为中心城区, 人均用水量远高于其他县市水平; 而鄢陵县严重缺水, 地表水资源量稀少, 地下水资源也很有限, 因过度开采已形成了较大的水位降落漏斗, 需要严格控制地下水开采。

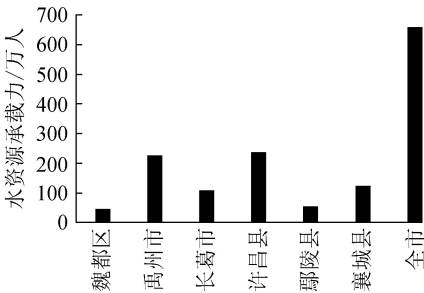


图 2 2011 年许昌市水资源承载力

2.3 水资源承载指数评价

水资源承载指数 (I) 是区域人口规模(或人口

密度)与水资源承载力(或承载密度)之比, 反映区域水资源与人口的关系。水资源承载指数及相关指标的计算公式为

$$I = P_a / W_{cc} \tag{3}$$

$$R_p = \frac{P_a - W_{cc}}{W_{cc}} \times 100\% = (I - 1) \times 100\% \tag{4}$$

$$R_w = \frac{W_{cc} - P_a}{W_{cc}} \times 100\% = (1 - I) \times 100\% \tag{5}$$

式中: I 为水资源承载指数; P_a 为现状人口数量, 人; R_p 为水资源超载率; R_w 为水资源盈余率。

许昌市各县(市、区)水资源承载指数计算结果见图 3~4。只有鄢陵县水资源处于超载状态, 水资源承载指数为 1.23, 水资源超载率为 22.5%; 其余各县市水资源均有盈余, 其中, 许昌县水资源盈余率最高, 为 63.6%, 其次是禹州市, 为 45.8%。对于整个许昌市而言, 总体水资源承载指数为 0.725, 水资源盈余率为 27.5%。

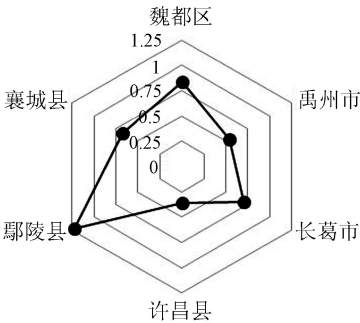


图 3 2011 年许昌市各县(市、区)水资源承载指数

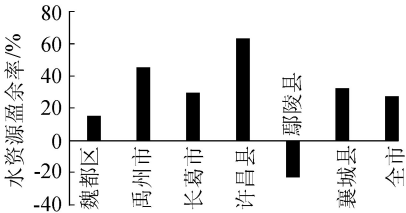


图 4 2011 年许昌市及各县(市、区)水资源盈余率

3 水资源承载力模糊识别模型分析

3.1 模糊识别模型

由于水资源承载力具有模糊性, 可采用模糊识别模型来评价水资源承载力^[15]。

设模糊概念集 A 是由识别水资源承载力的 n 个样本组成的集合, 有 m 个表示样本的整体特征的指标特征值, 则有样本集的指标特征值矩阵 $X = (x_{ij})$, 其中, x_{ij} 为样本 j 指标 i 的特征值。对样本按 m 个指标 c 个级别的指标标准特征值进行识别, 则有指标标准特征值矩阵 $Y = (y_{ih})$, 其中, y_{ih} 为级别 h 指标 i 的标准特征值。

根据从 1 级到 c 级指标标准特征值的递增或递

减关系,可以得到指标对 A 的相对隶属度为

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & x_{ij} \leq y_{ic} \text{ 或 } x_{ij} \geq y_{ic} \\ \frac{x_{ij} - y_{ic}}{y_{il} - y_{ic}} & y_{il} > x_{ij} > y_{ic} \text{ 或 } y_{il} < x_{ij} < y_{ic} \\ 1 & x_{ij} \leq y_{il} \text{ 或 } x_{ij} \geq y_{il} \end{cases}$$

(6)

h 级指标标准特征值对 A 的相对隶属度为

$$s_{ih} = \begin{cases} 0 & y_{ih} = y_{ic} \\ \frac{y_{ij} - y_{ic}}{y_{il} - y_{ic}} & y_{il} > y_{ih} > y_{ic} \text{ 或 } y_{il} < y_{ih} < y_{ic} \\ 1 & y_{ih} = y_{il} \end{cases}$$

(7)

式中: r_{ij} 为样本 j 指标 i 特征值对 A 的相对隶属度; s_{ih} 为级别 h 指标 i 标准特征值对 A 的相对隶属度; y_{ih} 为级别 h 指标 i 的标准特征值。

设样本集对 A 的各个级别的相对隶属度矩阵为: $U=(u_{hj})$,其中, u_{hj} 为样本 j 对模糊概念集 A 级别 h 的相对隶属度, $h=1,2,\cdots,c;j=1,2,\cdots,n$ 。由于样本 j 在级别区间 (a_j,b_j) 范围内,故矩阵 U 应满足归一化条件:

$$\sum_{h=a_j}^{b_j} u_{hj} = 1$$

(8)

为求解样本 j 对模糊概念集 A 的级别 h 的最优相对隶属度,建立目标函数:

$$\min\{F(u_{hj}) = \sum_{h=a_j}^{b_j} D_{hj}^2\}$$

(9)

得到样本 j 对模糊概念集 A 的级别 h 的模糊识别模型:

$$u_{hj} = \begin{cases} 0 & h < a_j \text{ 或 } h > b_j \\ U_{hj} & d_{hj} \neq 0, a_j \leq h \leq b_j \\ 1 & d_{hj} = 0 \text{ 或 } r_{ij} = s_{ih} \end{cases}$$

(10)

其中

$$U_{hj} = \left\{ \sum_{k=a_j}^{b_j} \left\{ \frac{\sum_{i=1}^m [\omega_{ij}(r_{ij} - s_{ih})]^p}{\sum_{i=1}^m [\omega_{ij}(r_{ij} - s_{ik})]^p} \right\}^{\frac{2}{p}} \right\}^{-1}$$

式中: ω_{ij} 为样本 j 的第 i 项指标对水资源承载力的权重; p 为距离参数,取 $p=2$,为欧式距离。

根据级别特征值公式可求出水资源可承载力的级别特征值:

$$H_j = (1, 2, \cdots, c)(u_{1j}, u_{2j}, \cdots, u_{cj})^T$$

(11)

级别判定标准见表 3。

表 3 级别判定标准

等级	H 取值范围	承载力状态
I 级	<1.0	很有潜力
II 级	$[1.0, 2.0)$	有潜力
III 级	$[2.0, 3.0)$	可承载
IV 级	$[3.0, 4.0)$	过载
V 级	≥ 4.0	严重过载

3.2 水资源承载力计算与分析

根据 2002—2011 年《许昌市水资源公报》和《河南省统计年鉴》,得到许昌市水资源基本资料。由于水资源承载力是对水资源所能维持的人口数量和经济规模进行分析,因此在考虑评价指标时必然要选取与水量、人口、经济相关的指标。参照现有对水资源承载力评价研究的指标标准、世界发达国家水资源规划标准以及全国水资源评价的指标体系,根据评价指标的可行性、可靠性、充分性原则,考虑许昌市水资源及其利用特点,选取以下 6 个评价指标:人均用水量 $x_1(\text{m}^3)$,万元 GDP 用水量 $x_2(\text{m}^3)$,农田灌溉单位面积用水量 $x_3(\text{m}^3/\text{hm}^2)$,人均水资源占有量 $x_4(\text{m}^3)$,水资源利用率 $x_5(\%)$,供水模数 $x_6(10\text{m}^4/\text{km}^2)$ 。许昌市 2002—2011 年水资源承载力指标特征值见表 4。

表 4 许昌市水资源承载力指标特征值

年份	x_{1j}	x_{2j}	x_{3j}	x_{4j}	x_{5j}	x_{6j}
2002	199.6	242.3	129.8	140	143	17.8
2003	165.9	201.0	111.8	379	44	14.8
2004	178.3	155.3	107.3	274	65	16.1
2005	192.9	146.2	139.0	212	92	17.7
2006	187.6	120.5	95.0	225	85	17.3
2007	176.0	90.8	88.9	213	81	15.7
2008	167.5	68.9	73.2	163	97	14.5
2009	165.1	64.3	71.5	196	84	15.1
2010	162.0	57.1	70.7	223	71	15.1
2011	182.0	49.3	72.1	190	86	15.7

参照全国各地有关水资源承载力评价的文献,将水资源承载能力由高到低分为 4 个级别。关于上述 6 项指标的标准值见表 5。

表 5 评价指标标准值

级别	x_{1j}	x_{2j}	x_{3j}	x_{4j}	x_{5j}	x_{6j}
I 级	≥ 150	≥ 24	≥ 20	≥ 1000	≥ 12	≥ 1
II 级	≥ 300	≥ 60	≥ 40	≥ 700	≥ 25	≥ 3
III 级	≥ 450	≥ 140	≥ 80	≥ 500	≥ 50	≥ 10
IV 级	≥ 600	≥ 220	≥ 100	≥ 200	≥ 75	≥ 15

根据式(6)、式(7)计算得到指标标准特征值的相对隶属度矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} 0.890 & 0.965 & 0.937 & 0.905 & 0.916 & 0.942 & 0.961 & 0.966 & 0.973 & 0.929 \\ 0 & 0.097 & 0.330 & 0.377 & 0.508 & 0.659 & 0.771 & 0.794 & 0.831 & 0.871 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.063 & 0.139 & 0.335 & 0.356 & 0.366 & 0.349 \\ 0 & 0.224 & 0.092 & 0.015 & 0.031 & 0.016 & 0 & 0 & 0.029 & 0 \\ 0 & 0.496 & 0.151 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.069 & 0 \\ 0 & 0.014 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.036 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0.667 & 0.333 & 0 \\ 1 & 0.816 & 0.408 & 0 \\ 1 & 0.750 & 0.250 & 0 \\ 1 & 0.625 & 0.375 & 0 \\ 1 & 0.794 & 0.397 & 0 \\ 1 & 0.857 & 0.357 & 0 \end{bmatrix}$$

采用层次分析法计算各项指标的权重,得到归一化的指标权重向量为:

$\omega = (0.168 \ 0.171 \ 0.173 \ 0.167 \ 0.159 \ 0.162)$
应用模糊识别公式(10)求得许昌市水资源承载力的相对隶属度矩阵:

$$U = \begin{bmatrix} 0.072 & 0.120 & 0.371 & 0.437 \\ 0.094 & 0.161 & 0.473 & 0.272 \\ 0.083 & 0.145 & 0.462 & 0.310 \\ 0.081 & 0.139 & 0.432 & 0.348 \\ 0.088 & 0.155 & 0.449 & 0.308 \\ 0.102 & 0.179 & 0.445 & 0.274 \\ 0.121 & 0.214 & 0.428 & 0.237 \\ 0.124 & 0.218 & 0.421 & 0.237 \\ 0.129 & 0.229 & 0.421 & 0.221 \\ 0.126 & 0.222 & 0.418 & 0.234 \end{bmatrix}$$

最后应用式(11)得到许昌市水资源承载力,评价结果见图5。除2002年、2004年、2005年许昌市水资源处于超载状态,其余年份均处于可承载状态。从近几年的水资源承载力系数级别特征值变化趋势分析,许昌市水资源承载力有所提升(从3.02到2.756),但潜力仍然有限。这是因为随着经济社会的快速发展,对于水量和水质的要求越来越高,仅仅依靠本地水资源已经不能满足社会发展规模,应考虑采取工程措施,增强洪水调蓄能力,同时,充分利用南水北调和引黄济源工程调水,提高水资源承载力。

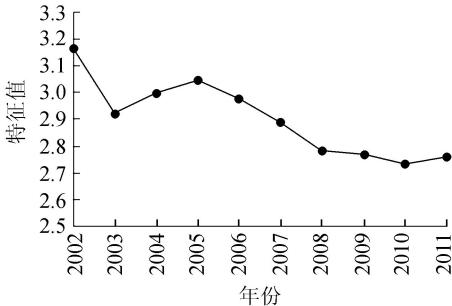


图5 不同年份许昌市水资源承载力系数级别特征值变化

4 许昌市规划年水资源承载力预测分析

规划年为2020年和2030年,可采用公式(2)对许昌市水资源承载力进行预测。进行水资源承载力预测时,水资源可利用量参考了《许昌市水生态文明建设规划》中兴建水利工程后的数据,农业用水量、工业用水量、生态用水量及人口和城镇化率参考《许昌市“十二五”规划》中的预测值,计算结果见表6。通过兴建水利工程如南水北调和引黄济源进行调水,在多年平均来水条件下,许昌市2020年和2030年水资源均能够承载社会经济的发展规模;但在特枯年($P=95\%$)来水条件下,许昌市出现水资源超载情况,2020年超载率为5.5%,2030年超载率为23.6%。说明兴建水利设施对于提高区域水资源承载力,促进区域的可持续发展具有重要作用,同时还应加大节水力度,改善水生态和环境,控制人口发展规模。

表6 许昌市规划年水资源承载力与预测值比较

规划年	来水条件	可利用水资源总量/ 亿 m ³	水资源承载力/万人		水资源超载率/%
			实际值	预测值	
2020	多年平均+外来调水	14.9853	627	515	-17.9
	95%来水+外来调水	9.4283	488	515	5.5
2030	多年平均+外来调水	15.4829	647	550	-15.0
	95%来水+外来调水	9.9805	445	550	23.6

5 结 论

- a. 2011年许昌市总体水资源负载指数为V级,水资源利用程度较低,容易被开发利用。水资源承载力整体处于可承载的水平,水资源盈余率为27.5%。
- b. 根据近10年水资源承载力系数级别特征值及变化趋势,除了2002年、2004年、2005年许昌市水资源处于超载状态,其余年份均处于可承载状态。近几年许昌市水资源承载力有所提升,但承载力提升潜力有限。
- c. 在已有规划和工程调水的基础上,对2020年和2030年的水资源承载力进行预测分析,在多年

平均来水条件下,水资源量能够满足当地经济社会发展规模,但在特枯年($P=95\%$)来水条件下,存在水资源超载情况,2020 年超载率为 5.5%,2030 年超载率为 23.6%。

d. 采用水利设施加大洪水调蓄作用,实施节水技术,加大节水力度,改善水生态和水环境,可以适当提高区域水资源承载能力,对促进区域的水资源可持续利用发挥一定的作用。考虑特别干旱年份情况,需要适度控制人口数量和经济发展规模,使之与水资源承载能力相适应。

参考文献:

[1] 张兴建,马孝义,赵文举,等. 黄土高原地区水资源承载力动态变化分析:以山西、陕西、宁夏、甘肃 4 省为例[J]. 干旱区研究,2009,26(1):115-119. (ZHANG Jianxing,MA Xiaoyi,Zhao Wenju,et al. Dynamic change in the bearing capacity of water resources in the loess plateau: a case study in Shanxi, Shaanxi, Ningxia and Gansu Provinces[J]. Ari Zone Research,2009,26(1):115-119. (in Chinese))

[2] 王丽霞,任志远,刘招,等. 基于 GIS 的陕西省水资源潜力及承载力研究[J]. 干旱资源与环境,2013,27(8):97-102. (WANG Lixia,REN Zhiyuan,LIU Zhao,et al. Water resources development potential and carrying capacity in Shaanxi province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2013,27(8):97-102. (in Chinese))

[3] 邹进,张友权,潘锋. 基于二元水循环理论的水资源承载力质量能综合评价[J]. 长江流域资源与环境,2014,23(1):117-123. (ZOU Jin,ZHANG Youquan,PAN Feng. Assessment on the quality, quantity and power potential of water resources carrying capacity based on dualistic water cycle model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2014,23(1):117-123. (in Chinese))

[4] OH K,JEONG Y,LEE D,et al. Determining development density using the urban carrying capacity assessment system[J]. Landscape and Urban Planning,2005,73:1-15.

[5] DANIEL A Z,ALLAN T W,ALICE N. Recreation carrying capacity estimations to support beach management at Praia de Faro,Portugal[J]. Applied Geography,2011,31(3):1075-1081.

[6] MAUERHOFER V. Social capital, social capacity and social carrying capacity: perspectives for the social basics within environmental sustainability[J]. Futures,2013,53:63-73.

[7] LEI K,ZHOU S Q. Per capita resource consumption and resource carrying capacity: a comparison of the sustainability of 17 mainstream countries [J]. Energy Policy,2012,42:603-612.

[8] 张曦,王武卫,齐养周,等. 基于模糊识别理论的陕西省典型县域水资源承载力评价[J]. 干旱地区农业研究,2013,31(6):232-237. (ZHANG Xi,WANG Wuwei,QI Yangzhou,et al. Assessment of water resources carrying capacity in typical counties of Shaanxi Province based on fuzzy recognition theory[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2013,32(6):232-237. (in Chinese))

[9] 段青春,刘昌明,陈晓楠,等. 区域水资源承载力概念及研究方法的探讨[J]. 地理学报,2010,65(1):82-90. (DUAN Qingchun,LIU Mingchang,CHEN Xiaonan,et al. Preliminary research on regional water resources carrying capacity conception and method[J]. Acta Geographica Sinica,2010,65(1):82-90. (in Chinese))

[10] 刘秀美. 富阳市水资源承载能力可持续发展分析[J]. 水资源与水工程学报,2010,21(1):154-160. (LIU Xiumei. Analysis on sustainable development of water resources carrying capacity in Fuyang City[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2012,21(1):154-160. (in Chinese))

[11] 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;a case study in Shijiazhuang[J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology,2012,10(3):62-66. (in Chinese))

[12] 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):47-53. (ZHANG Xin,FAN Mingyuan,CHEN Huawei,et al. Multi-objective optimization model of water resources carrying capacity in Yellow River Delta[J]. Yellow River,2013,35(12):47-53. (in Chinese))

[13] 周念清,朱蓉,朱学愚. MODFLOW 在宿迁市地下水资源评价中的应用[J]. 水文地质工程地质,2000(6):9-13. (ZHOU Nianqing,ZHU Rong,ZHU Xueyu. Application of MODFLOW on groundwater resources evaluation in Suqian City [J]. Hydrogeology and Engineering Geology,2000(6):9-13. (in Chinese))

[14] 史鉴. 关中地区水资源合理开发利用与生态环境保护[M]. 郑州:黄河水利出版社,2002:81-82.

[15] 杜守建,崔振才. 区域水资源优化配置与应用[M]. 郑州:黄河水利出版社,2009:28-30.

(收稿日期:2014-04-30 编辑:彭桃英)