

# 基于模糊综合评判的杭锦旗水资源承载力评价

王睿<sup>1,3</sup>, 周立华<sup>1,2</sup>, 陈勇<sup>1</sup>, 赵敏敏<sup>1,3</sup>, 郭秀丽<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000;  
2. 中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 库布齐沙漠横贯杭锦旗全境, 水资源承载力是制约其生态环境与社会经济发展的关键因素。选取人均水资源量、水资源利用率、生态用水率、供水量模数、农民年人均纯收入、人口密度、耕地灌溉率 7 个主要因素作为评价指标, 应用模糊综合评判模型, 定量评价了杭锦旗 2008—2014 年水资源承载力动态变化情况。结果表明: 杭锦旗水资源承载力总体上表现为逐年上升趋势, 综合评分值最大为 0.508, 但是在 2008—2009 年出现了波动, 同时杭锦旗水资源开发利用已接近其承载力极限, 但仍有一定的开发潜力, 能保证杭锦旗经济社会发展需求。

**关键词:** 模糊综合评价; 水资源; 杭锦旗; 承载力

**中图分类号:** TV213

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2017)02-0320-05

## Evaluation of Water Resources Carrying Capacity in Hangjin County Based on Fuzzy Comprehensive Model

WANG Rui<sup>1,3</sup>, ZHOU Lihua<sup>1,2</sup>, CHEN Yong<sup>1</sup>, ZHAO Minmin<sup>1,3</sup>, GUO Xiuli<sup>1,3</sup>

(1. Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Institutes of Science and development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Hobq desert traverses the whole territory of Hangjin County. Water resources carrying capacity is the key factor that restrains eco-environment and social-economic development of this county. We selected the per capita water resources, water resources use rate, ecological water use rate, water supply modulus, farmers per capita net income, population density and farmland irrigation rate as evaluation indices. Based on fuzzy comprehensive method, we carried out a quantitative evaluation on the dynamic of water resources carrying capacity from 2008 to 2014 in Hangjin County. The results showed that the water resources carrying capacity in Hangjin County was on the positive tendency, the maximum comprehensive evaluation value was 0.508, but there were fluctuations in 2008 and 2009. Water resources carrying capacity in Hangjin County is close to its bearing capacity limit, but there is still a certain development potential to ensure economic and social development demands in Hangjin County.

**Keywords:** fuzzy comprehensive evaluation; water resources; Hangjin County; carrying capacity

水资源承载力是指一个区域的水资源,在特定历史发展时期,最大可支撑社会经济的能力<sup>[1-4]</sup>。水资源承载力作为可持续发展研究中的重要组成部分,国内外学者对此进行了相关研究并取得了诸多成果。国外学者关于水资源承载力的研究多为单项成果,侧重于水资源管理的经济手段与政策措施的研究<sup>[5-7]</sup>。20 世纪 80 年代末,国内学者提出了水资源承载力<sup>[8]</sup>。之后,有学者从水资源定义、评价方法等

方面对水资源承载力进行了深入研究。程国栋<sup>[9]</sup>将水资源承载力概括为:一个区域在特定历史发展时期,充分考虑可预见的文化、科技、制度和价值观等因素的影响,在科学的开发管理下,水资源可支撑生态经济系统良性发展的能力。苏永红、冯起等<sup>[10]</sup>采用模糊综合评价法,定量评价了石羊河流域的水资源承载力。宰松梅、温季等<sup>[11]</sup>采用支持向量机模型,根据水资源承载力影响因素,提出了 8 项指标评价体系,

收稿日期:2016-05-25

修回日期:2016-06-10

资助项目:国家科技支撑计划项目“沙漠化地区生态修复及衍生产业发展技术与示范”(2015BAC06B01);国家重点研发计划项目“中国北方半干旱荒漠区沙漠化防治关键技术与示范”(2016YFC0500909)

第一作者:王睿(1986—),男,甘肃武都人,博士研究生,研究方向为生态经济与区域可持续发展。E-mail:wangruiwr2009@126.com

通信作者:周立华(1974—),男,山东费县人,博士,研究员,研究方向为生态经济与区域可持续发展。E-mail:lhzhou@lzb.ac.cn

利用水资源承载力指数分析了新乡市水资源承载能力。不同学者们尽管对水资源承载力概念表述和研究方法不同,但都突出了水资源对生态经济系统的支撑力和科学评价水资源承载力的重要性。

水资源是人类生产与生活的重要物质基础<sup>[12]</sup>,随着社会经济的快速发展,人类对水资源需求量日益增大,水资源短缺成为当前我国许多城市的发展的瓶颈。因此,研究水资源承载力对于水资源科学合理利用意义重大。鄂尔多斯作为内蒙古重要的煤炭基地和经济新兴城市,正处于跨越式发展阶段,而杭锦旗作为全市经济发达的旗县之一,近年来由于人口急剧增长和经济快速发展,导致了水环境污染逐渐加剧、水资源消耗逐年增加、水资源利用问题日益突出,严重威胁着区域生态安全和经济发展。因此,在经济快速发展的情况下,科学评价杭锦旗水资源承载力十分必要。鉴此,本文基于模糊综合评价法,定量分析杭锦旗2008—2014年水资源承载能力情况,试图为杭锦旗水资源开发利用和生态保护提供科学依据,从而对区域水资源科学管理和社会经济可持续发展具有重要的现实意义。

## 1 研究区概况

杭锦旗位于内蒙古自治区鄂尔多斯市西北部,地跨鄂尔多斯高原与河套平原,东与达拉特旗、东胜区接壤,南与伊金霍洛旗、乌审旗为邻,西与鄂托克旗毗连,北与巴彦淖尔市隔黄河相望,地处 $116^{\circ}55'—109^{\circ}16'E$ , $39^{\circ}22'—40^{\circ}52'N$ 。全旗年平均气温 $6.8^{\circ}C$ ,冬季严寒而漫长,年平均降水量245 mm,降水量60%集中在7—9月份,年平均蒸发量2720 mm,年平均风速 $3.0 m/s$ ,春季最大风速可达 $28.7 m/s$ ,并伴随沙尘暴天气。杭锦旗境内分布有两大水系,一是阿拉善水系,二是摩林河水系。地表水、地下水较为丰富,年均地表水资源量 $8 \times 10^7 m^3$ ,可利用量 $3.72 \times 10^6 m^3$ ,地下水资源量为4.35亿 $m^3$ ,地下水可开采量为2.32亿 $m^3$ ,年均水资源可利用总量为4.5亿 $m^3$ 。

杭锦旗辖5个镇、1个苏木、1个管委会,2014年末全旗户籍人口14.2万人。其中,非农业人口2.68万人,农业人口11.5万人,全年城镇常住居民人均可支配收入实现3.15万元,全年城镇常住居民人均消费支出1.96万元,农村牧区常住居民人均可支配收入实现1.33万元。2014年完成地区生产总值84.23亿元<sup>[13]</sup>。

库布齐沙漠由西向东横贯全境,将全旗分成沿河和梁外两大区。全旗约60%的土地沙化,沙丘以 $5 m/a$ 的速度向前推进,沙漠化过程加剧,生物多样性减少,生态环境恶化,水资源消耗增加,水污染现象突出,已严重威胁区域生态安全和社会经济的健康发展。

## 2 研究方法和数据来源

### 2.1 研究方法

2.1.1 模型评判因素的选取、分级和评分 基于杭锦旗水资源的实际情况,选择具代表性且便于度量的评价指标,应当遵循以下原则<sup>[14]</sup>:(1)科学性;(2)全面性和概括性相结合;(3)系统性与独立性相结合;(4)定性与定量相结合;(5)可比性与可操作性相结合原则。借鉴全国水资源供需分析中的评价指标体系<sup>[15]</sup>,参考专家建议,充分考虑杭锦旗水资源特点,选取人均水资源量( $u_1$ ):区域水资源总量与总人口之比;水资源利用率( $u_2$ ):现状75%频率的用水量与可供水资源量之比;生态用水率( $u_3$ ):生态环境用水量与总用水量之比;供水量模数( $u_4$ ):频率75%的供水量与土地面积之比;农民年人均纯收入( $u_5$ ):农民年总收入与农民总人口之比;人口密度( $u_6$ ):总人口与土地面积之比;耕地灌溉率( $u_7$ ):有效灌溉面积与耕地面积之比,共计7个评价指标,并根据评价指标对水资源承载力的影响程度分为3个等级,具体见表1。

表1 各评价指标的分级数值

评价指标	$V_1$	$V_2$	$V_3$
$u_1/m^3$	<1500	1500~3000	>3000
$u_2/\%$	>75	75~50	<50
$u_3/\%$	<1	1~5	>5
$u_4/(万 m^3 \cdot km^{-2})$	>15	1~15	<1
$u_5/元$	<2800	11000~2800	>11000
$u_6/(人 \cdot km^{-2})$	>30	5~30	<5
$u_7/\%$	>60	20~60	<20

其中: $V_1$ 级属于水资源承载力状况较差,表明其已接近饱和值,进一步开发潜力较小,水资源已成为制约社会经济的发展的瓶颈,继续发展下去将会导致水资源短缺,应采取必要措施加以解决; $V_3$ 级属于水资源承载力情况较好,表明水资源承载力仍有很大潜力,水资源需求有保障,水资源供给情况较为乐观; $V_2$ 级属于介于两者之间,表明水资源供给和开发利用已接近其承载力极限,可持续利用程度一般,但仍有一定开发利用潜力,水资源的供给需求能基本保证区内社会经济发展。为了更准确反映当地水资源承载力情况,对上述3个评判等级进行1分制评分, $a_1=0.05$ , $a_2=0.5$ , $a_3=0.95$ ,这样则可以定量反映各评判等级对承载力的影响程度,数值越高代表水资源可开发利用潜力越大。

综合评定时,通过 $a_i$ 的值和 $B$ 矩阵中各等级隶属度 $b_i$ 的值,按照下式计算综合评分值:

$$a = \frac{\sum_{j=1}^3 b_j^k a_j}{\sum_{j=1}^3 b_j^k}$$

式中:  $a$  为综合评判结果矩阵  $B$  的水资源承载力的综合评分值, 通过分析可见  $a$  值越高, 代表区域水资源承载力越大。  $k$  值是为突出占优势的等级的作用, 本文根据杭锦旗实际情况选为 1。

2.1.2 评判因素隶属度计算 隶属函数  $U_{vi}(u_i)$  的

表 2 各评价指标对各评价等级的临界值

参数	评价指标							$a_j$
	$u_1/\text{m}^3$	$u_2/\%$	$u_3/\%$	$u_4/(\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	$u_5/\text{元}$	$u_6/(\text{人} \cdot \text{km}^{-2})$	$u_7/\%$	
$k_1$	1500	75	1	15	2800	30	60	0.05
$k_2$	2250	62.5	3	8	6900	17.5	40	0.5
$k_3$	3000	50	5	1	11000	5	20	0.95

对于评价指标  $u_2, u_4, u_6, u_7$ , 各评语级隶属函数计算式为:

$$U_{v_1}(u_i) = \begin{cases} 0.5(1 + \frac{u_i - k_1}{u_i - k_2}) & u_i > k_1 \\ 0.5(1 - \frac{k_1 - u_i}{k_1 - k_2}) & k_2 < u_i \leq k_1 \\ 0 & u_i \leq k_2 \end{cases}$$

$$U_{v_3}(u_i) = \begin{cases} 0 & u_i < k_2 \\ 0.5(1 - \frac{k_3 - u_i}{k_3 - k_2}) & k_2 \leq u_i < k_3 \\ 0.5(1 + \frac{u_i - k_3}{u_i - k_2}) & u_i \geq k_3 \end{cases}$$

$$U_{v_2}(u_i) = \begin{cases} 0.5(1 - \frac{u_i - k_1}{u_i - k_2}) & u_i > k_1 \\ 0.5(1 + \frac{k_1 - u_i}{k_1 - k_2}) & k_2 < u_i \leq k_1 \\ 0.5(1 + \frac{u_i - k_3}{k_2 - k_3}) & k_3 < u_i \leq k_2 \\ 0.5(1 - \frac{k_2 - u_i}{k_2 - u_i}) & u_i \leq k_3 \end{cases}$$

$$U_{v_3}(u_i) = \begin{cases} 0 & u_i > k_1 \\ 0.5(1 - \frac{u_i - k_3}{k_2 - k_3}) & k_2 < u_i \leq k_2 \\ 0.5(1 + \frac{k_3 - u_i}{k_2 - u_i}) & u_i \leq k_3 \end{cases}$$

对于评价指标  $u_1, u_3, u_5$ , 各评语级隶属函数计算式为:

$$U_{v_1}(u_i) = \begin{cases} 0.5(1 + \frac{k_1 - u_i}{k_2 - u_i}) & u_i < k_1 \\ 0.5(1 - \frac{u_i - k_i}{k_2 - k_1}) & k_1 \leq u_i < k_2 \\ 0 & u_i \geq k_2 \end{cases}$$

$$U_{v_2}(u_i) = \begin{cases} 0.5(1 - \frac{k_1 - u_i}{k_2 - u_i}) & u_i < k_1 \\ 0.5(1 + \frac{u_i - k_i}{k_2 - k_1}) & k_1 < u_i \leq k_2 \\ 0.5(1 + \frac{k_3 - u_i}{k_3 - k_2}) & k_2 < u_i \leq k_3 \\ 0.5(1 - \frac{u_i - k_3}{u_i - k_2}) & u_i > k_3 \end{cases}$$

值是根据各评价因素的实际数值对照各因素的分级指标来推求得出。为了消除评判等级之间数值差别不大的弊端, 使隶属函数的值在各级间能够平滑过渡, 采用模糊化对其处理, 按照以上思路构建各评价等级隶属函数计算式。现将各评价等级  $V_1$  与  $V_2$  的临界值定为  $k_1, V_2$  与  $V_3$  等级的临界值定为  $k_3, V_2$  等级区间的中点值则为  $k_2, k_2 = (k_1 + k_3)/2$ 。各评价指标对各评价等级的临界值见表 2。

## 2.2 数据来源

本文参考 2008—2014 年《鄂尔多斯统计年鉴》、《杭锦旗统计年鉴(2008—2014)》、1960—2010 年《杭锦旗辉煌 50 年》和 2013 年《鄂尔多斯市水资源调查评价报告》等资料, 通过实地考察与调研, 对所收集的数据进行统计分析, 根据杭锦旗的具体情况, 选取人均水资源量、水资源利用率、生态用水率、供水量模数、农民年人均纯收入、人口密度、耕地灌溉率 7 个评价指标对水资源承载力进行评价。杭锦旗水资源承载力评价指标及原始数据见表 3。

## 3 结果与分析

根据杭锦旗社会经济条件和自然状况实际, 分别统计不同年份杭锦旗水资源承载力 7 个评价指标的实际数值, 计算求得杭锦旗各评价因素的数值(表 3)。按照上述隶属度函数计算式分别计算每个评判指标对各个评价等级的隶属度  $r_{ij}, r_{ij}(k)$  则代表第  $i$  个元素对第  $j$  个级别的隶属度, 从而计算出整个综合评价矩阵  $R$  的值。

根据各评价因素对水资源承载能力影响程度大小情况, 参照全国水资源承载力评价标准, 结合专家建议, 将各评价因素对水资源承载能力的影响赋予不同的权重<sup>[16-17]</sup>, 权重矩阵  $A = (0.1, 0.2, 0.1, 0.2, 0.1, 0.2, 0.1)$ 。在矩阵  $A$  与  $R$  的数据基础上, 按照  $B = A \cdot R$  计算公式, 得出杭锦旗水资源承载力最终评价结果矩阵  $B$ 。各年各指标隶属度矩阵  $R$  计算结果如下:

表 3 杭锦旗评价因素指标统计

年份	$u_1/m^3$	$u_2/\%$	$u_3/\%$	$u_4/(万 m^3 \cdot km^{-2})$	$u_5/元$	$u_6/(人 \cdot km^{-2})$	$u_7/\%$
2008	2874.1	66.7	4.73	1.43	6954	7.48	69.9
2009	2824.2	67.6	5.25	1.45	7783	7.61	98
2010	2787.9	68.5	5.7	1.47	8694	7.71	59.5
2011	2771.4	69.4	5.84	1.49	9956	7.76	97.9
2012	2856.1	70.3	5.84	1.52	11334	7.57	96.3
2013	2836.4	71.2	4.67	1.54	12657	7.62	95.7
2014	2816.5	72.1	3.96	1.56	13246	7.67	97.3

注:基础数据来源于杭锦旗统计年鉴(2008—2014年)及鄂尔多斯市水资源调查评价报告(2013年)。

$$R_{2008} = \begin{bmatrix} 0.416 & 0.584 & 0 \\ 0.168 & 0.832 & 0 \\ 0.433 & 0.567 & 0 \\ 0 & 0.531 & 0.469 \\ 0 & 0.994 & 0.006 \\ 0 & 0.599 & 0.401 \\ 0.666 & 0.334 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{2014} = \begin{bmatrix} 0.378 & 0.622 & 0 \\ 0.384 & 0.616 & 0 \\ 0.240 & 0.760 & 0 \\ 0 & 0.540 & 0.460 \\ 0 & 0.323 & 0.677 \\ 0 & 0.607 & 0.393 \\ 0.825 & 0.175 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{2009} = \begin{bmatrix} 0.383 & 0.617 & 0 \\ 0.204 & 0.796 & 0 \\ 0.556 & 0.444 & 0 \\ 0 & 0.532 & 0.468 \\ 0 & 0.892 & 0.108 \\ 0 & 0.604 & 0.396 \\ 0.488 & 0.513 & 0 \end{bmatrix}$$

如对 2008 年杭锦旗水资源承载力最终评价结果矩阵  $B$  的计算如下:

$$B = A \times R = (0.1, 0.2, 0.1, 0.2, 0.1, 0.2, 0.1)$$

$$R_{2010} = \begin{bmatrix} 0.359 & 0.641 & 0 \\ 0.240 & 0.760 & 0 \\ 0.629 & 0.371 & 0 \\ 0 & 0.534 & 0.466 \\ 0 & 0.781 & 0.219 \\ 0 & 0.608 & 0.392 \\ 0.828 & 0.172 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\times \begin{bmatrix} 0.416 & 0.584 & 0 \\ 0.168 & 0.832 & 0 \\ 0.433 & 0.567 & 0 \\ 0 & 0.531 & 0.469 \\ 0 & 0.994 & 0.006 \\ 0 & 0.599 & 0.401 \\ 0.666 & 0.334 & 0 \end{bmatrix} = (0.185, 0.640, 0.175)$$

$$R_{2011} = \begin{bmatrix} 0.281 & 0.719 & 0 \\ 0.276 & 0.724 & 0 \\ 0.648 & 0.352 & 0 \\ 0 & 0.535 & 0.465 \\ 0 & 0.627 & 0.373 \\ 0 & 0.610 & 0.390 \\ 0.827 & 0.173 & 0 \end{bmatrix}$$

因此 2008 年杭锦旗水资源承载力的综合评分值:

$$a = \frac{\sum_{j=1}^3 b_j^k a_j}{\sum_{j=1}^3 b_j^k} = (a_1, a_2, a_3) \times (b_1, b_2, b_3)^T = (0.05, 0.5,$$

$$R_{2012} = \begin{bmatrix} 0.404 & 0.596 & 0 \\ 0.288 & 0.712 & 0 \\ 0.648 & 0.352 & 0 \\ 0 & 0.537 & 0.463 \\ 0 & 0.462 & 0.538 \\ 0 & 0.603 & 0.397 \\ 0.822 & 0.178 & 0 \end{bmatrix}$$

$0.95) \times (0.185, 0.640, 0.175)^T = 0.487$ 。同理,可得出杭锦旗其他年份水资源承载力综合评分结果(表 4)。

表 4 杭锦旗 2008—2014 年水资源承载力综合评价

年份	$V_1$	$V_2$	$V_3$	综合评分值
2008	0.185	0.640	0.175	0.487
2009	0.184	0.633	0.183	0.499
2010	0.229	0.577	0.194	0.484
2011	0.231	0.561	0.208	0.489
2012	0.245	0.529	0.226	0.491
2013	0.225	0.539	0.236	0.505
2014	0.221	0.541	0.238	0.508

从表 4 中可以看出,2008—2014 年杭锦旗综合评分值对  $V_2$  的隶属度均明显大于  $V_3$  与  $V_1$  的隶属度,这说明杭锦旗水资源开发利用已接近其承载力极限,社会经济发展对水资源需求是有一定保证的,仍具有一定的开发利用潜力。在杭锦旗不同年份中,2008—2012 年水资源承载力不容乐观,综合评分值

$$R_{2013} = \begin{bmatrix} 0.391 & 0.609 & 0 \\ 0.308 & 0.692 & 0 \\ 0.418 & 0.582 & 0 \\ 0 & 0.539 & 0.461 \\ 0 & 0.356 & 0.644 \\ 0 & 0.605 & 0.395 \\ 0.820 & 0.180 & 0 \end{bmatrix}$$

均在0.5以下,评价结果对 $V_1$ 的隶属度大于 $V_3$ 的隶属度,对 $V_2$ 的隶属度高达0.64,该时段内水资源的开发利用已具相当规模,能保证区域经济社会发展,应注重水资源利用和社会经济相协调。2013—2014年杭锦旗水资源承载力综合评分均在0.5分以上,评价结果对 $V_1$ 的隶属度下降,对 $V_3$ 的隶属度上升,且2010—2014年以来,综合评分值基本呈逐年递增的状态,这说明杭锦旗近几年来水资源承载能力一直保持良好,且水资源承载力正逐年回升。

从各年各指标隶属度矩阵 $R$ 的计算结果可以看出,杭锦旗2008—2014年人均水资源量 $u_1$ 对 $V_1$ 的隶属度降低,对 $V_2$ 的隶属度逐年增大,表明此时期水资源开发利用具有一定的潜力,水资源承载力较大。杭锦旗2008—2014年水资源利用率 $u_2$ 对 $V_2$ 的隶属度高于0.6,且均高于对 $V_1$ 的隶属度,但是对 $V_1$ 的隶属度逐年增加,对 $V_2$ 的隶属度逐年降低,说明杭锦旗水资源开发利用程度较为乐观,仍具有一定的开发利用潜力,但应科学合理利用水资源以确保其承载力的进一步提高。杭锦旗2008—2011年生态用水率 $u_3$ 对 $V_1$ 的隶属度高于对 $V_2$ 的隶属度,且对 $V_1$ 的隶属度逐年增加,对 $V_2$ 的隶属度逐年降低,但2012—2014年却表现出相反趋势,这表明水资源承载力呈现出先下降后提高的态势。杭锦旗2008—2011年供水量模数 $u_4$ 对 $V_2, V_3$ 的隶属度均在0.5左右,变化稳定,同时农民年人均纯收入 $u_5$ 对 $V_2$ 的隶属度逐年降低,对 $V_3$ 的隶属度逐年增加,反映出杭锦旗水资源承载力呈现良好的增长趋势。杭锦旗2008—2014年人口密度 $u_6$ 对 $V_2$ 的隶属度增加,对 $V_3$ 的隶属度降低,均高于对 $V_1$ 的隶属度,表明水资源开发利用具有一定的潜力。杭锦旗2008—2014年耕地灌溉率 $u_7$ 对 $V_1$ 的隶属度较高,除2008年和2009年外,高达0.8以上,明显高于对 $V_2$ 的隶属度,表明耕地灌溉率是影响水资源承力的主要因素。

近年来杭锦旗水资源承载力状况逐步上升,呈现出良好发展趋势,具有一定的水资源开发利用前景,能保证杭锦旗国民经济社会发展需求,这与前人对鄂尔多斯水资源承载力研究结果较为一致,且本研究评价结果和杭锦旗水资源实际状况吻合,今后杭锦旗在水资源利用过程中,控制耕地灌溉面积增长,着重优化农业结构,以确保水资源承载力的进一步提高。

## 4 结论

(1) 总体上,杭锦旗水资源承载力表现为逐年上升态势。从以上综合评分值分析杭锦旗水资源承载

力在2010年后逐步上升,2014年评分值达到最大,这说明杭锦旗水资源承载力的发展态势是良好的,存在一定的上升空间,这与近年来杭锦旗实行节水型社会建设密不可分。

(2) 通过以上分析,2008—2014年杭锦旗综合评分值对 $V_2$ 的隶属度均明显大于 $V_3$ 与 $V_1$ 的隶属度,表明杭锦旗水资源开发利用已接近其承载力极限,水资源供给对国民经济发展能提供一定的保障,具有一定的开发潜力,今后应在农业耕地灌溉上科学合理用水,确保水资源承载力的进一步提高。

(3) 2008—2012年杭锦旗水资源承载力综合评分值均在0.5以下,对 $V_1$ 的隶属度大于 $V_3$ 的隶属度,对 $V_2$ 的隶属度高达0.64,表明此年份内杭锦旗水资源开发利用具有相当规模,但仍有一定的开发潜力,通过分析得出,水资源利用率和耕地灌溉率是影响水资源承载力的主要因素。

### 参考文献:

- [1] 施雅凤,曲耀光. 乌鲁木齐河流域水资源承载力及其合理利用[M]. 北京:科学出版社,1992.
- [2] 龙腾锐,姜文超. 水资源(环境)承载力的研究进展[J]. 水科学进展,2003,14(2):249-253.
- [3] 王建华,江东. 水资源承载力的概念与理论[J]. 甘肃科学学报,1999,11(2):1-4.
- [4] Christofidis D. Water, irrigation and the food crisis[J]. International Journal of Water Resources Development, 1998,14(3):405-415.
- [5] Rijberman M A, van De Ven F H M. Different approaches to assessment of design and management of sustainable urban water systems [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2000,20(3):333-345.
- [6] Harris J M, Kennedy S. Carrying capacity in agriculture: global and regional issues [J]. Ecological Economics, 1999, 29(3):443-461.
- [7] Ehrlich A H. Looking for the Ceiling: Estimates of Earth's Carrying capacity [J]. American Scientist, 1996, 84(5): 494-495.
- [8] 新疆水资源软科学课题组. 新疆水资源及其承载力的开发战略对策[J]. 水利水电技术,1989,14(6):2-9.
- [9] 程国栋. 承载力概念的演变及西北水资源承载力的应用框架[J]. 冰川冻土,2002,24(4):361-367.
- [10] 苏永红,冯起,刘蔚,等. 应用模糊综合评判方法评价石羊河流域水资源承载力[J]. 干旱区研究,2009,26(2): 169-175.
- [11] 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.

## 4 结论

陕西省丹汉江流域农业非点源污染区划按敏感度可分为 5 级敏感区。从 5 级敏感区的空间分布来看可归纳为中心城市污染控制区,干流污染综合治理区和山地丘陵污染防治区 3 个敏感控制区。

农业非点源污染源类型主要包括农业种植型、畜禽养殖型、生活排放型三个基本类型及其组合形式。且该地区有从单一污染源向复合型污染源转移的趋势。

农业非点源污染一级敏感区和污染类型二级划分结果表明,丹汉江干流是主要敏感区域,且污染类型多为复合型。随干流向南北两侧敏感性递减,所对应的污染类型也依次向组合型、单一型变化。

### 参考文献:

- [1] Edwards A C, Withers P J A. Transport and delivery of suspended solids, nitrogen and phosphorus from various sources to freshwaters in the UK [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 350(3): 144-153.
- [2] Lacroix A, Beaudoin N, Makowski D. Agricultural water nonpoint pollution control under uncertainty and climate variability [J]. *Ecological Economics*, 2005, 53(1): 115-127.
- [3] 余炜敏,魏朝富,谢德体. 太湖流域与长江三峡库区农业非点源污染对比研究[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 115-118.
- [4] Munafò M, Cecchi G, Baiocco F, et al. River pollution from non-point sources: a new simplified method of assessment [J]. *Journal of Environmental Management*, 2005, 77(2): 93-98.
- [5] 周慧平,高超,朱晓东. 关键源区识别: 农业非点源污染控制方法[J]. *生态学报*, 2005, 25(12): 3368-3374.

- [6] 张汪寿,耿润哲,王晓燕,等. 基于多准则分析的非点源污染评价和分区: 以北京怀柔区北宅小流域为例[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(1): 258-266.
- [7] Zhuang Y, Thuminh N, Niu B, et al. Research Trends in Non Point Source during 1975—2010 [J]. *Physics Procedia*, 2012, 33(1): 138-143.
- [8] 周亮,徐建刚,孙东琪,等. 淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制[J]. *环境科学*, 2013, 34(2): 547-554.
- [9] 张淑荣,陈利顶,傅伯杰. 农业区非点源污染敏感性评价的一种方法[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(2): 56-59.
- [10] 杨柳,马克明,郭青海,等. 汉阳非点源污染控制区划[J]. *环境科学*, 2006, 27(1): 31-36.
- [11] 秦迪岚,黄哲,罗岳平,等. 洞庭湖区污染控制区划与控制对策[J]. *环境科学研究*, 2011, 24(7): 748-755.
- [12] 马彩虹,张静. 陕南汉江流域 INDV 时空差异分析[J]. *西北师范大学学报: 自然科学版*, 2013, 49(5): 103-107.
- [13] 王星,李占斌,李鹏,等. 陕西省丹汉江流域面源污染现状及防治对策[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(6): 186-189.
- [14] 张春玲,李娅妮. 陕西省丹汉江流域水质现状及防护对策[J]. *水资源与水工程学报*, 2007, 18(3): 87-90.
- [15] 张海龙,齐实,路倩倩,等. 基于水功能区的湖北省农业非点源污染控制区划[J]. *中国水土保持科学*, 2014, 12(2): 1-8.
- [16] 段华平,朱林,孙勤芳,等. 农村环境污染控制区方法与应用研究[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(3): 426-432.
- [17] 李强坤,李怀恩,胡亚伟,等. 农业非点源污染田间模型及其应用[J]. *环境科学*, 2009, 30(12): 3509-3513.
- [18] 赵倩,马健,问青春,等. 浑河上游大苏河乡农业非点源污染负荷及现状评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(2): 126-131.
- [19] 孙勤芳,段华平,赵建波,等. 基于清单分析的农村非点源污染控制区划方法[J]. *生态与农村环境学报*, 2011, 27(4): 104-109.

(上接第 324 页)

- [12] Postel S L, Daily G C, Ehrlich P R. Human appropriation of renewable fresh water [J]. *Science-AAAS Weekly Paper Edition*, 1996, 271(5250): 785-787.
- [13] 杭锦旗统计局. 杭锦旗 2014 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. <http://www.hjq.gov.cn/zq/tjj/tjjgg/201504/20150430-1380934.html>.
- [14] 段新光,栾芳芳. 基于模糊综合评判的新疆水资源承载力

评价[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(3): 119-122.

- [15] 黄永基,马清真. 区域水资源供需分析方法[M]. 南京: 河海大学出版社, 1990.
- [16] 陈洁荣,郭瑜. 区域水资源承载能力的模糊优选评判分析及其在张掖地区的应用[J]. *水利水电技术*, 2012, 23(3): 1-5.
- [17] 张华侨,窦明,赵辉,等. 郑州市水安全模糊综合评价[J]. *水资源保护*, 2010, 26(6): 42-46.