

基于“量-质-域-流”四维指标体系的水资源荷载状况评价

——以黑河流域三地市为例

周云哲, 粟晓玲, 周正弘

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 随着社会经济用水不断增加, 水资源供需矛盾加剧, 水资源系统出现荷载不均衡现象, 制约了区域发展, 危及生态环境良性循环。本文从水资源系统的负荷需求和承载能力出发, 基于“量、质、域、流”四个维度构建水资源荷载均衡评价指标体系, 采用指标规范化的正态云模型, 评价2015年黑河流域张掖市、酒泉市、阿拉善盟水资源配置方案的荷载均衡状况, 并依据负荷与承载能力评分二维坐标, 分出低负荷-高承载能力、低负荷-低承载能力、高负荷-高承载能力和高负荷-低承载能力四个分区。评价结果表明: 2015年三地水资源荷载状况均为IV级, 张掖市综合评分为3.697, 酒泉市为3.657, 阿拉善盟为3.901, 三地均处于高负荷-低承载能力区域; 三地在水质维度上处于低负荷-高承载能力区间, 水质维度评分均处于II级, 酒泉市水质评分优于张掖市, 张掖市水质评分优于阿拉善盟; 在水量、水域、水流维度上均处于高负荷-低承载能力区间, 水量方面三地处于IV级, 张掖市优于酒泉市, 酒泉市优于阿拉善盟; 水域方面张掖和阿拉善盟评分均处于V级, 酒泉评分处于IV级; 水流方面三地均处于V级。需要采取调控手段在水量、水域、水流方面上进行“增强承载”和“卸荷”。

关键词: 水资源荷载; 四维指标体系; 正态云模型; 负荷指标; 承载能力指标; 黑河流域

中图分类号: P333 **文献标志码:** A

Evaluation of water resource load balance based on four dimensional index system (quantity-quality-watershed-flow)

—— A case study in three cities of Hei River basin

ZHOU Yun-zhe, SU Xiao-ling, ZHOU Zheng-hong

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: With increasing water consumption for social and economic activities, the challenges between supply and demand of water resources have become severe. The loading state of water resources system has become unbalanced, which could restrain regional development and endanger the virtuous cycle of ecological environment. Based on a four dimensional indexes including quantity, quality, watershed, and flow, an evaluation index system of water resources loading state from both aspects of loading and carrying capacity was constructed. A normal cloud model of the normalized indicators was used to evaluate the loading state of water resources allocation schemes in three cities of Zhangye, Jiuquan, and Alxa in Hei River basin in 2015. According to the two-dimensional coordinates of loading score and carrying capacity score, the loading state was divided into four quadrants: low loading-high carrying capacity, low loading-low carrying capacity, high loading-high carrying capacity, and high loading-low carrying capacity. The result indicated that overall water resources loading states of three cities were classified as class IV, high loading-low carrying capacity, based on the comprehensive scores, Zhangye was 3.697, Jiuquan was 3.657, Alxa was 3.901. The quality loading state of three cities was in low loading-high carrying capacity quadrant, class II. The water quality score of Jiuquan was superior to that of Zhangye. The water quality score of Zhan-

gye was superior to that of Alxa. In the aspects of quantity, watershed and flow, the loading states fell into high loading-low carrying capacity quadrant. The quantity loading state of three cities were class IV. The water quality score of Zhangye was superior to that of Jiuquan, The water quality score of Jiuquan was superior to that of Alxa. The watershed loading states of Zhangye and Alxa were class V, Jiuquan was class IV. The flow loading state of three cities were class V. The control measures of “enhancing capacity” and “decreasing load” need to be executed in the aspects of quantity, watershed, and flow.

Keywords: water resource load balance; four-dimensional index system; normal cloud model; load index; carrying capacity index; Hei River basin

水是生命之源,生态之基,生产之要^[1]。20 世纪以来,人类社会经济发展,需水量增加导致严重的水供需矛盾,许多地区水资源开发利用超过了水资源的承载能力,危及自然、社会经济系统正常运转,引发水资源短缺、水质恶化、水域生态退化、河道断流等问题,严重地阻碍了社会经济的可持续发展,因此,区域水资源承载状况评价对地区社会经济系统和生态系统协调发展具有重要意义。

黑河流域内有 35 条小支流,随着用水不断增加,部分支流逐步与干流失去地表水联系,上游出山口多年平均径流量为 24.75 亿 m^3 ,其中干流莺落峡站为 16.19 亿 m^3 ,梨园河梨园堡站 2.37 亿 m^3 ,其他沿山支流 6.58 亿 m^3 。黑河流域中游地区用水量占总用水量的 90% 以上,农业是用水主体,大规模水土资源开发和经济社会的快速发展,导致流域生态环境体系不断恶化,水安全问题日益突出,黑河中游张掖、酒泉两市和下游阿拉善盟水资源供需矛盾日益紧张,社会经济发展用水严重挤占了生态环境用水,出现生态退化、水域面积萎缩,河流断流等情况。水资源的过度开发利用导致用水负荷大于承载能力,荷载状况呈超载状态。黑河中游张掖和酒泉两市的社会经济发展用水导致下游阿拉善盟额济纳旗河段生态环境不断恶化,产生的负面影响越来越大,特别是 20 世纪 90 年代下游尾间湖居延海曾出现干涸见底的情况,引起社会各界高度关注。近十年来,黑河流域通过全流域综合治理,以及“九七”分水方案的落实,虽然下游河段和居延海恢复了部分水域,但中下游地区水资源荷载状况仍是用水负荷严重大于水资源承载能力,呈现严重超载状态。水资源荷载严重失衡问题是制约中下游地区发展的重要因素之一,因此从负荷和承载能力两方面开展黑河流域中下游水资源荷载状况评价,事关该地区社会、经济、环境生态的协调发展和人民生活水平的提高,研究内容可为区域水资源合理利用及生态环境建设提供依据。

国外对水资源承载力的研究通常与可持续发展理论相结合。Harris 等^[2] 计算了农业水资源承载力;Rijsberman 等^[3] 指出可持续发展过程中,承载力对保障水安全起到重要作用;Koop^[4] 依据 27 个国家 45 个直辖市的实测数据,从气候变化、城市化进程、水环境污染方面构建水资源承载能力评价指标体系,并指出该指标体系具有国家之间的适用性。

国内关于水资源承载力的研究可以分为三类。第一类:从水资源承载客体出发,分析一定时空范围内水资源系统所能承载的人口和经济总量。王浩等^[5] 针对内陆干旱区生态环境脆弱的特点,探讨了水资源承载力的主要研究内容、特性和影响因素,分析计算了西北重点地区水资源的承载规模。谢高地等^[6] 在定义水资源承载能力的基础上,估算了我国水资源人口承载力、水资源对居民生活、工业和农业的承载力、水资源环境承载力及水资源超载率。王建华等^[7] 从水资源、社会经济、水生态、水环境综合角度,基于“量、质、域、流”四大方面构建水资源承载力评价指标体系,以承载人口数量为水资源承载力度量标准,对天津市 2015 年水资源承载状况进行评价。第二类:从水资源承载主体和客体出发,在研究区域中设置不同的经济社会用水情景与发展方案,通过仿真模拟等手段分析水资源系统的承载能力能否满足用水负荷。何仁伟等^[8] 建立贵州省毕节市水资源承载力系统动力学模型,进行动态模拟和调试,对五种用水调控方案进行评价并做出对比分析。第三类:在构建水资源承载力评价指标体系基础上,对现状年进行综合评价。金菊良等^[9] 建立了基于熵和改进的模糊层次分析法的水资源可持续利用综合评价模型,以计算综合评分的方式评价汉中盆地水资源可持续利用和承载状况。袁伟^[10] 和周亮广等^[11] 建立水资源承载能力的评价指标体系,采用主成分分析法获得水资源承载能力的主要驱动因子,计算水资源承载能力综合评分。宰松梅等^[12] 基于支持向量机理论,以水资源承载力

指数的形式反映 1995-2008 年新乡市水资源承载状况。

目前关于水资源承载力的研究未能形成一个标准的理论体系,但是总体来看,水资源承载力的研究越来越趋向于具体化、多维化。鉴于以往研究大多是基于水资源子系统、经济社会子系统和生态环境子系统进行水资源承载力评价,很少从水资源系统荷载均衡的角度进行分析,以往的综合评价仅仅给出评价地区的分数序列,并没有从水资源承载力和承载能力分析地区荷载均衡状况,没有对地区水资源荷载均衡状况进行详细的诊断,造成评价结果不完善。针对这一问题,本文从水资源系统结构的负荷需求和承载能力角度出发,构建“量-质-域-流”四个维度的水资源荷载均衡评价指标体系,采用指标规范化的正态云模型,对黑河流域张掖市、酒泉市、阿拉善盟 2015 年水资源荷载状况进行评价。

1 “量-质-域-流”四维水资源荷载均衡评价指标体系构建

1.1 水资源荷载系统

水资源荷载系统由承载主体与负荷客体组成。水资源承载主体主要由区域水资源的自然禀赋条件、入境水量、自产水资源的可供水量组成。水资源负荷客体主要由社会经济系统和生态环境系统组成,是水资源的消耗过程。

1.2 水资源荷载系统表征指标

将评价指标分为负荷指标和承载能力指标两类。负荷指标包括对地区水资源荷载系统有增大负荷和削弱承载能力作用的指标;承载能力指标包括对地区水资源荷载系统有卸载负荷和增强承载能力作用的指标。考虑水资源、社会经济发展、水生态、水环境等方面,从水量、水质、水域、水流四个维度构建水资源承载状况评价指标体系。以数据可获得性、代表性、科学性和整体性为指标选取原则。

水量维度上考虑地区水资源自然禀赋条件和社会经济发展用水水平,选取人均水资源量、产水模数、干旱指数、灌溉水利用系数、万元工业增加值用水量、人均日生活用水量、缺水率和地表水损耗系数 8 个指标。万元工业增加值用水量、人均日生活用水量反映地区社会经济系统的用水水平,缺水

率反映了地区水资源供需矛盾程度,地表水损耗系数表示地区供水过程中的损耗程度,上述 4 个指标定为负荷指标;人均水资源量、产水模数及干旱指数表征地区的水资源自然禀赋情况,灌溉水利用系数表征灌溉水有效利用程度,以上 4 个指标定为承载能力指标。

水质维度上考虑河湖主要污染物浓度和污水处理水平,选取河道化学需氧量(COD)浓度、氨氮浓度、优良水质河长比例、污水处理达标率 4 个指标。COD 浓度和氨氮浓度指标反映了社会经济系统的排污状况,定为负荷指标;优良河长比例和污水处理达标率均反映了污水处理系统运行状态,对水资源承载系统有增强承载能力的作用,定为承载能力指标。

水域维度上考虑地区水资源利用程度、森林植被覆盖程度和地下水开采状况,选取水资源开发利用程度、森林覆盖率和地下水开采系数 3 个指标。水资源开发利用程度体现地区水资源开发利用程度,国际上通常认为对一条河流的开发利用不能超过其水资源量的 40%,否则就会挤占生态流量,使河道环境自净能力锐减,因此将其定为负荷指标;森林覆盖率的提高对水土保持和荒漠化防治有积极的作用,可提升地区水资源承载能力,因此定为承载能力指标;地下水开采率是地下水开采量与地下水可开采量的比值,反映地下水的开采程度,定为负荷指标。

水流维度上考虑地区河湖连通性和生态环境方面的供需平衡,选取生态环境缺水率、生态环境补水比例、河网密度 3 个指标。生态环境缺水率表征地区生态用水与生态需水之间的矛盾,体现了地区生态需水的不满足程度,为负荷指标;生态环境补水比例反映地区对生态文明建设的重视程度,其值增加对水资源承载能力有提升作用,定为承载指标;河网密度表征地区水系连通发达程度,水系连通越发达,抵抗水旱灾害的能力越强,水体自净能力越强,定为承载能力指标。“量-质-域-流”四维水资源配置方案评价体系见表 1。

2 评价方法

采用熵权法赋权,以正态云模型为主体,通过规范变换函数对指标等级阈值进行变换^[13],利用规范变换后的评价标准对水资源配置方案的承载状况进行评价,评价流程见图 1。

表 1 “量-质-域-流”四维水资源承载状况评价指标体系

Table 1 Four dimensional evaluation index system of “quantity-quality-watershed-flow” of water resource loading state

准则层 Principal level	指标代码 Index code	指标 Index	单位 Unit	I	II	III	IV	V
量 Quantity	C ₁	人均水资源量* Per capita water resource	m ³	4000	3000	2000	1000	500
	C ₂	产水模数* Average water resource quantity of each person	10 ⁴ m ³ ·km ⁻²	30	20	12	6	2
	C ₃	干旱指数* Drought index	-	0.1	0.5	1	3	6
	C ₄	灌溉水利用系数* Utilization coefficient of irrigation water	-	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4
	C ₅	地表水耗损系数# Loss coefficient of surface water	-	0.1	0.4	0.55	0.7	0.85
	C ₆	万元工业增加值用水量# Water consumption of ¥10k industrial value-generation	m ³	10	20	40	100	200
	C ₇	缺水率# Water shortage rate	%	1	5	10	15	20
	C ₈	人均日生活用水量# Daily water consumption per capita	L	60	80	100	130	160
质 Quality	C ₉	化学需氧量# COD	mg·L ⁻¹	5	15	20	30	40
	C ₁₀	氨氮浓度# Ammonium nitrogen concentration	mg·L ⁻¹	0.15	0.5	1	1.5	2.5
	C ₁₁	优良水质河长比例# River length ratio of excellent quality water	%	100	90	75	65	50
	C ₁₂	污水处理率# Sewage treatment rate	%	100	85	70	60	50
域 Watershed	C ₁₃	水资源开发利用# Utilization ratio of water resources	%	10	20	30	45	60
	C ₁₄	地下水开采系数# Coefficient of groundwater exploitation	-	0.5	0.75	0.9	1.05	1.3
	C ₁₅	森林覆盖率# Forest coverage	%	55	45	35	27	19
流 Flow	C ₁₆	生态环境缺水率# Water shortage rate of ecological environment	%	0.1	1	2	6	15
	C ₁₇	生态环境补水比例# Water supplement ratio of ecological environment	%	8	6	4	2	1
	C ₁₈	河网密度# River density	km·km ⁻²	0.8	0.6	0.35	0.1	0.05
综合标准 Comprehensive standard				1~1.5	1.5~2.5	2.5~3.5	3.5~4.5	4.5~5

注: I ~ V 等级顺序为从优至差, “#”表示负荷指标, “*”表示承载能力指标。

Note: The I ~ V orders of rank is from good to bad. “#” is load index, “*” is carrying capacity index.

2.1 确定评价指标权重

熵权法作为一种客观确定权重的方法,有效地反映指标数据隐含信息,具有权重客观性和可操作性,广泛应用于土地利用评价^[14]、水质评价^[15]、电力系统评价^[16]等研究。熵权法原理与计算方法参见文献[13]。

2.2 基于规范变换的正态云模型评价

云模型是李德毅院士于 20 世纪 90 年代提出一

种基于模糊数学和概率论的不确定分析方法^[17]。云模型兼顾随机性和模糊性,实现了由定量指标向定性评价的转换,克服传统评价方法在考虑模糊性和随机性方面的不足。正态云模型是云模型的一类,在土地利用评价^[18]、大坝安全评价^[19]、电能质量评价^[20]、生态风险综合评价^[21]、地震灾害风险综合评价^[22]等领域广泛应用。

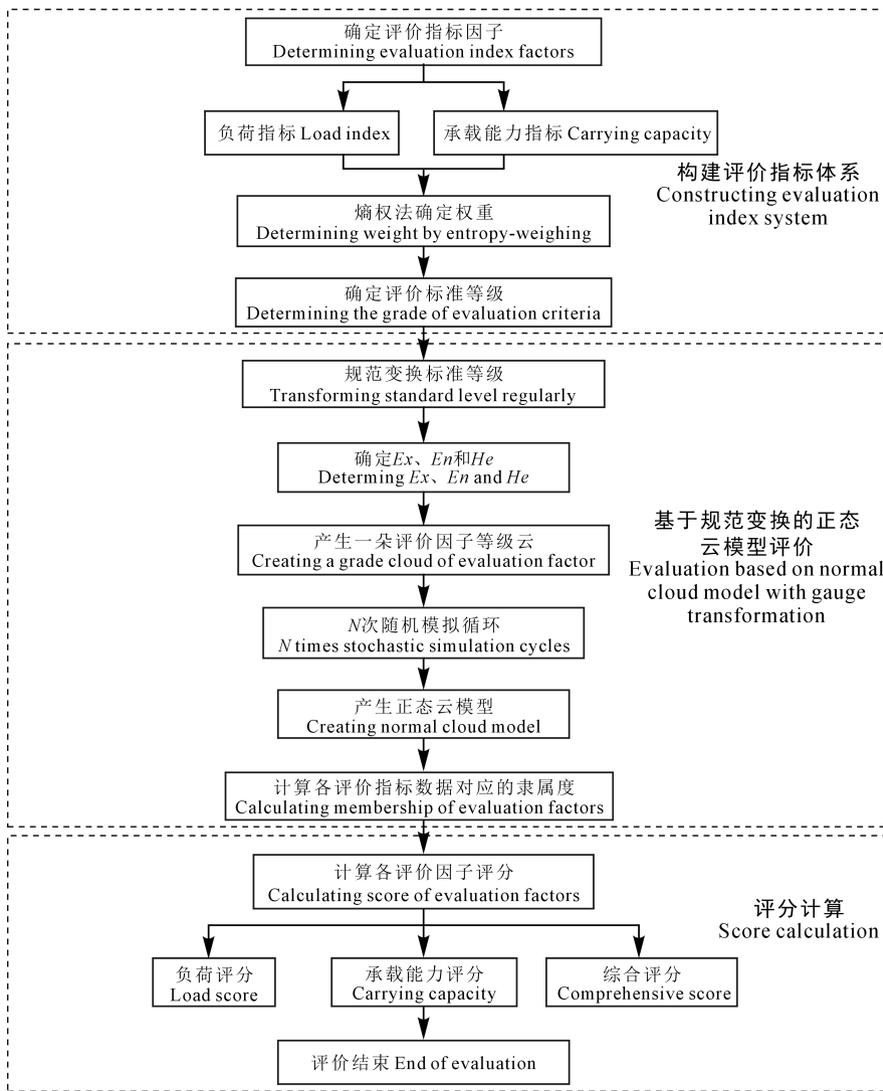


图1 评价过程流程图

Fig.1 Flow chart of evaluation process

在正态云模型评价过程中,由于评价指标体系中各指标的量纲不同,数量级差异较大,每个指标对应的正态云模型超熵值 He 差别很大,不能规范统一地体现不确定性。针对这一问题,本文引入李祚泳等^[23]提出的指标规范值,适当设定水资源承载状况评价体系中各指标“参照值”和规范变换函数,使规范变换后的等级标准特征与变换前的等级标准特征基本一致。采用规范后的评价指标体系进行正态云模型评价,可以统一超熵值 He ,使评价过程更加一致、规范^[13]。经过反复试算,各指标具体的规范函数确定如下:

(1)对于正向指标 $C_1、C_{17}、C_{18}$ 采用变换函数:

$$x_{ik} = \frac{1}{5} \ln(c_i/c_{i0}) \quad (1)$$

(2)对于正向指标 $C_2、C_4、C_{15}$ 采用变换函数:

$$x_{ik} = \frac{1}{5} \ln(c_i/c_{i0})^2 \quad (2)$$

(3)对于正向指标 $C_{11}、C_{12}$ 采用变换函数:

$$x_{ik} = \frac{1}{5} \ln(c_i/c_{i0})^3 \quad (3)$$

(4)对于逆向指标 $C_3、C_6、C_7、C_{16}$ 采用变换函数:

$$x_{ik} = \frac{1}{5} \ln(c_{i0}/c_i)^{0.5} \quad (4)$$

(5)对于逆向指标 $C_5、C_7、C_8、C_9、C_{10}、C_{13}$ 采用变换函数:

$$x_{ik} = \frac{1}{5} \ln(c_{i0}/c_i) \quad (5)$$

(6)对于逆向指标 C_8 采用变换函数:

$$x_{ik} = \frac{1}{5} \ln(c_{i0}/c_i)^2 \quad (6)$$

(7)对于逆向指标 C_{14} 采用变换函数:

$$x_{ik} = \frac{1}{5} \ln(c_{i0}/c_i)^3 \quad (7)$$

式中,变换函数中 c_{i0} 是对指标 c_i 设定的“参照值”,

x_{ik} 是通过变换函数得到评价体系中第 i 个指标第 k 个 ($k = 1, 2, 3, 4, 5$) 等级标准阈值的规范变换值。

规范后的评价指标体系见表 2。

基于规范变换的正态云模型确定各负荷指标评分 f_i 和各承载能力指标评分 P_j 以及综合评分的方法过程参见文献[13]。

2.3 计算负荷评分和承载能力评分

为了直观描述水资源配置方案的“量 - 质 - 域 - 流”四维水资源荷载均衡状况, 根据得到的各指标评分计算“量 - 质 - 域 - 流”四个维度上的负荷评分 F 和承载能力评分 P :

$$F = \frac{\sum_{i=1}^m w_i f_i}{\sum_{i=1}^m w_i} \quad (8)$$

$$P = \frac{\sum_{j=1}^n w_j p_j}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (9)$$

式中, w_i 为各负荷指标权重; f_i 为各负荷指标评分; w_j 为各承载能力指标权重; p_j 为各承载能力指标评分; m 为负荷指标个数; n 为承载能力指标个数。

表 2 规范变换后的评价指标体系
Table 2 The evaluation index system after gauge transformation

准则层 Principal level	参照值 Reference value c_{i0}	指标 Index	单位 Unit	I	II	III	IV	V
量 Quantity	220	人均水资源量 Per capita water resource	m^3	0.580	0.523	0.441	0.303	0.164
	0.18	产水模数 Modulus of water production	$10^4 m^3 \cdot km^{-2}$	0.512	0.471	0.420	0.351	0.241
	30	干旱指数 Drought index	-	0.570	0.409	0.340	0.230	0.161
	0.22	灌溉水利用系数 Utilization coefficient of irrigation water	-	0.516	0.463	0.401	0.328	0.239
	1.8	地表水耗损系数 Loss coefficient of surface water	-	0.578	0.301	0.237	0.189	0.150
	2200	万元工业增加值用水量 Water consumption of ¥10k industrial value generation	m^3	0.535	0.465	0.396	0.304	0.235
	180	缺水率 Water shortage rate	%	0.519	0.358	0.289	0.248	0.220
	250	人均日常生活用水量 Daily water consumption per capita	L	0.571	0.456	0.367	0.262	0.179
质 Quality	90	化学需氧量 COD	$mg \cdot L^{-1}$	0.578	0.358	0.301	0.220	0.162
	4.8	氨氮浓度 Ammonium nitrogen concentrations	$mg \cdot L^{-1}$	0.693	0.452	0.314	0.233	0.130
	40	优良水质河长比例 River length ratio of excellent quality water	%	0.550	0.487	0.377	0.291	0.134
	40	污水处理率 Sewage treatment rate	%	0.550	0.452	0.336	0.243	0.134
域 Watershed	150	水资源开发利用率 Utilization ratio of water resources	%	0.542	0.403	0.322	0.241	0.183
	1.55	地下水开采系数 Coefficient of groundwater exploitation	-	0.679	0.436	0.326	0.234	0.106
	12	森林覆盖率 Forest coverage rate	%	0.609	0.529	0.428	0.324	0.184
流 Flow	100	生态环境缺水率 Water shortage rate of ecological environment	%	0.530	0.461	0.391	0.281	0.190
	0.5	生态环境补水比例 Water supplement ratio of ecological environment	%	0.555	0.497	0.416	0.277	0.139
	0.027	河网密度 River density	$km \cdot km^{-2}$	0.678	0.620	0.482	0.262	0.123

将地区承载能力评分与负荷评分构成坐标系,坐标系中分出高负荷-高承载能力区、高负荷-低承载能力区、低负荷-低承载能力区、低负荷-高承载能力区四个象限,见图2。

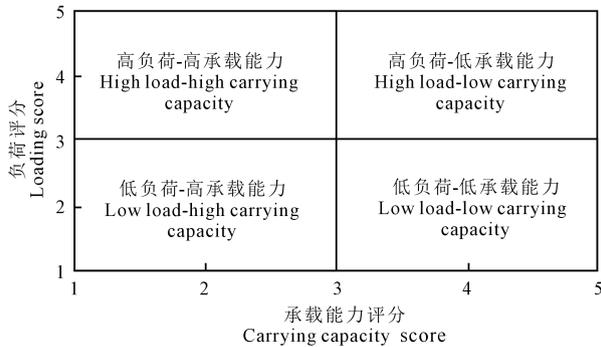


图2 承载能力评分与负荷评分二维坐标图

Fig.2 The two-dimensional coordinates of loading score and carrying capacity score

将“量-质-域-流”四维水资源负荷评分与承载能力评分绘制在图中,对2015年黑河流域中下游两市一盟在四个维度上的荷载状况进行诊断分析。

3 黑河流域中下游水资源荷载状况评价

3.1 研究区概况

黑河是我国第二大内陆河,发源于青海祁连山,流经青海、甘肃、内蒙古三省区,流域属于典型大陆性气候,干旱少雨,流域面积14.29万 km^2 。莺落峡断面为黑河上、中游分界点,上游主要为产区,莺落峡断面至正义峡断面为黑河中游,行政区主要有张掖市和酒泉市。张掖市是古丝绸之路要地,农牧业发达,是甘肃省粮食基地,战略地位十分重要。酒泉市拥有全国重要的石油化工基地与航天基地,也是甘肃省重要的灌溉农业区。正义峡断面以下为黑河下游,行政区为阿拉善盟,地处亚洲大陆腹地,干旱少雨,风大沙多,沙漠戈壁横贯全境,地表水资源短缺且分布不均,主要集中于额济纳旗,占全盟的87%。

建国以来黑河流域中游地区大规模水土资源开发和经济社会的高速发展增大了用水负荷,导致下游阿拉善盟入境水量大幅减少,出现河湖干涸、林草面积萎缩、地下水位下降等生态问题。“九七”分水方案实施后下游地区生态有所好转,但水资源短缺依然是制约流域发展的“瓶颈”。

3.2 数据来源

本文选取2015年黑河流域中下游张掖市、酒泉

市和阿拉善盟作为评价区域,数据主要来源于以下方面:(1)公开数据为2015年甘肃省水资源公报、两市一盟2015年统计年鉴、环境状况公报及国民经济和社会发展统计公报。(2)走访调查:走访黄河水利委员会,获得2015年黑河流域数据报表等资料。

3.3 评价结果

基于规范变换后的评价指标体系,超熵 He 统一取值为0.005,计算过程由MATLAB软件编写模型运行程序,2015年张掖市、酒泉市、阿拉善盟三地市各指标数据、权重及指标评价分数结果见表3。

3.4 评价结果分析

从表3的综合评分可以看出,张掖市、酒泉市和阿拉善盟2015年水资源荷载状况评分分别为3.697、3.657、3.901,均为IV级,处于高负荷-低承载能力区间,阿拉善盟水资源荷载状况劣于张掖和酒泉两市。

从表3准则层指标评分可以看出,水量维度上,张掖、酒泉和阿拉善盟评分均处于IV级。从表4承载能力评分看,张掖市和酒泉市的水量承载能力优于阿拉善盟,主要原因是自然气候和水资源禀赋条件较好。三地市气候干旱,干旱指数常年在10以上,其中阿拉善盟干旱指数常年在18以上,降水量少,蒸发量大,地均水资源量极少。从负荷评分(表4)看,张掖市的水量负荷压力高于酒泉市和阿拉善盟。张掖市缺水率高于酒泉市和阿拉善盟,水量负荷压力来自农业灌溉用水、工业用水和城乡居民用水,并且为保障黑河下游生态系统健康需要严格遵循分水方案,控制正义峡下泄水量以达到分水要求。地均水资源较少、灌溉水利用系数较低、缺水率较高是三地市水量维度上的问题所在。三地市水量维度荷载均衡状况为高负荷-低承载能力(图3)。

水质维度上,张掖、酒泉和阿拉善盟评分均处于II级(表3)。从承载能力评分(表4)看,三地市污水处理能力正常,各监测断面水质状况均达到I级或II级标准。从负荷评分(表4)看,阿拉善盟水质负荷高于张掖市和酒泉市,主要是因为阿拉善盟处于下游,来水量少,河流自净能力低于上中游。三地市水质维度荷载均衡状况均为低负荷-高承载能力(图3)。

分别计算张掖市、酒泉市和阿拉善盟的负荷评分与承载能力评分,结果见表4。

表 3 2015 年张掖市、酒泉市、阿拉善盟指标数据、权重及评价分数
Table 3 The data, weight, and evaluation scores of Zhangye, Jiuquan and Alxa in 2015

准则层 Principal level	权重 Weight	指标 Index	数据 Data			单位 Unit	评分 Score		
			张掖 Zhangye	酒泉 Jiuquan	阿拉善盟 Alxa		张掖 Zhangye	酒泉 Jiuquan	阿拉善盟 Alxa
量 Quantity	0.067	人均水资源量 Per capita water resource	2711	3166	2438	m ³	1.827	1.42	2.268
	0.086	产水模数 Modulus of water production	7.17	1.86	0.1	10 ⁴ m ³ · km ⁻²	3.765	4.642	5
	0.074	干旱指数 Drought index	12.2	>18	>18	-	5	5	5
	0.05	灌溉水利用系数 Utilization coefficient of irrigation water	0.55	0.575	0.58	-	3.875	4.217	3.861
	0.038	地表水耗损系数 Loss coefficient of surface water	0.6	0.6	0.5	-	3.121	3.121	2.942
	0.047	万元工业增加值用水量 Water consumption of ¥10k industrial value-generated	58	75.5	51	m ³	2.761	3.112	2.804
	0.059	缺水率 Water shortage rate	16.8	11.66	11.1	%	4.68	4.21	4.23
	0.041	人均日生活用水量 Daily water consumption per capita	115	134	106	L	3.013	2.778	2.735
	0.462	准则层 Principal level	-	-	-	-	3.589	3.685	3.789
质 Quality	0.04	化学需氧量 COD	10.26	7.93	7.28	mg · L ⁻¹	1.427	1.298	1.256
	0.057	氨氮浓度 Ammonium nitrogen concentrations	0.44	0.36	0.78	mg · L ⁻¹	2.382	1.955	2.953
	0.04	优良水质河长比例 River length ratio of excellent quality water	94.4	93.2	100	%	1.445	1.486	1.000
	0.042	污水处理率 Sewage treatment rate	87.8	87.1	85	%	2.386	2.395	2.58
	0.179	准则层 Principal level	-	-	-	-	1.96	1.807	2.05
域 Watershed	0.078	水资源开发利用率 Utilization ratio of water resources	57	43	96.51	%	4.417	3.39	5
	0.056	地下水开采系数 Coefficient of groundwater exploitation	2.17	1.32	1.92	-	5	5	5
	0.071	森林覆盖率 Forest coverage rate	17.26	5.52	7.77	%	4.574	5	5
	0.205	准则层 Principal level	-	-	-	-	4.631	4.387	5
流 Flow	0.069	生态环境缺水率 Water shortage rate of ecological environment	9.15	10.71	14.5	%	4.656	5	5
	0.044	生态环境补水比例 Water supplement ratio of ecological environment	1.59	2.57	2.33	%	4.837	4.136	4.713
	0.041	河网密度 River density	<0.05	<0.05	<0.05	km · km ⁻²	5	5	5
	0.154	准则层 Principal level	-	-	-	-	4.799	4.753	4.918
综合评分 Comprehensive score							3.697	3.657	3.901

根据表 4 结果,将张掖市、酒泉市、阿拉善盟在“量-质-域-流”四维水资源负荷评分与承载能力评

分绘制在二维图中,对三地市 2015 年水资源在四个维度上的荷载状况进行诊断分析,如图 3。

表 4 “量-质-域-流”四维负荷评分与承载能力评分结果

Table 4 The evaluation scores of loading score and carrying capacity score based on the four dimensional indexes system, quantity-quality-watershed-flow

地区 Prefecture	负荷评分 Load score					承载能力评分 Carrying capacity score				
	量 Quantity	质 Quality	域 Watershed	流 Flow	总负荷 Total loading	量 Quantity	质 Quality	域 Watershed	流 Flow	总承载能力 Total carrying capacity
张掖 Zhangye	3.503(IV)	1.988(II)	4.661(V)	4.656(V)	3.684(IV)	3.819(IV)	1.927(II)	4.574(V)	4.916(V)	3.710(IV)
酒泉 Jiuquan	3.398(III)	1.684(II)	4.063(IV)	5.000(V)	3.464(III)	3.891(IV)	1.952(II)	5.000(V)	4.553(V)	3.839(IV)
阿拉善盟 Alxa	3.272(III)	2.253(II)	5.000(V)	5.000(V)	3.791(IV)	4.201(IV)	1.809(II)	5.000(V)	4.851(V)	4.001(IV)

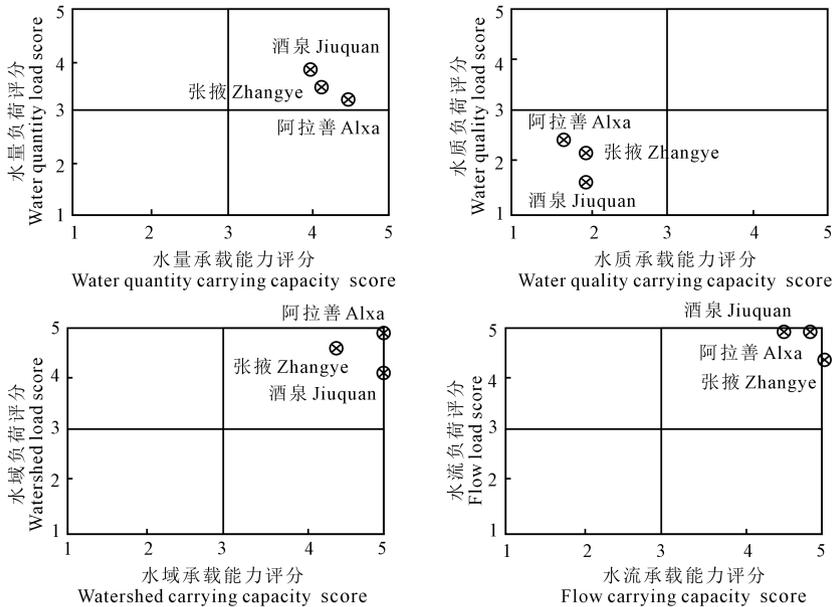


图 3 “量-质-域-流”四维负荷评分与承载能力评分二维分布

Fig.3 The two-dimensional coordinates of loading score and carrying capacity score based on the four dimensional indexes system, quantity-quality-watershed-flow

水域维度上,张掖和阿拉善盟评分均处于 V 级,酒泉评分处于 IV 级(表 3)。从承载能力评分(表 4)看,三地市森林覆盖率较低,均处于 V 级。从负荷评分看(表 4),三地市水资源开发利用率高,超出了国际上普遍认为的 40% 上限。张掖和阿拉善盟的水资源开发利用率高,阿拉善盟的水资源开发利用率高达 96%,严重地挤占了生态水域,危及生态系统。三地市普遍存在地下水超采问题,存在私自开凿取水井的现象。三地市水资源系统水域荷载均衡状况为高负荷-低承载能力(图 3)。

水流维度上,张掖、酒泉和阿拉善盟评分均处于 V 级(表 3)。从承载能力评分(表 4)看,三地市生态补水不足,河网密度低,河湖连通性差,部分兴建的水利工程阻断了河道径流的连续性,造成水利工程断面以下径流减少,河道生态环境恶化。从负荷评分(表 4)看,三地市生态缺水量大,生态用水被大量挤占。河网连通性差,生态环境补水无法满足生态需水,这样的水流状态是不健康的,无法抵御水旱灾害,严重时甚至会威胁到地区社会经济的发展。

三地市水资源系统水流荷载均衡状况均为高负荷-低承载能力(图 3)。

4 结 论

在总结水资源承载力的研究发展基础上,本文讨论了水资源承载系统的结构组成和表征指标,借鉴了工程力学的荷载概念,从水资源承载系统的负荷与承载能力角度出发,构建“量-质-域-流”四维水资源荷载状况评价指标体系。利用指标规范化的正态云模型对 2015 年黑河流域张掖市、酒泉市和阿拉善盟三地市水资源荷载状况进行评价,并对三地市水资源负荷和承载能力分别做出诊断分析。

评价结果表明,张掖市、酒泉市和阿拉善盟 2015 年水资源荷载状况均为 IV 级,处于高负荷-低承载能力区间,阿拉善盟水资源荷载状况劣于张掖和酒泉两市。水量方面,由于水资源量短缺,三地用水量大,水资源供需矛盾突出,处于高负荷-低承载能力区间;水质方面,由于三地污染负荷低,水体

(下转第 231 页)