

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.02.016

# 奎屯河流域健康评价

黄霄<sup>1</sup>,雷晓云<sup>1</sup>,高凡<sup>1</sup>,张新平<sup>2</sup>

(1.新疆农业大学水利与土木工程学院,新疆乌鲁木齐 830052;

2.新疆生产建设兵团勘测设计院(集团)有限责任公司,新疆乌鲁木齐 830002)

**摘要:**以新疆典型的干旱内陆河流域——奎屯河流域为研究对象,在确定流域健康评价时空尺度的基础上,提出涵盖流域水资源健康、涉水生态环境健康、社会经济健康的评价指标体系,构建基于组合赋权与协调发展度的流域健康评价模型。结果表明:现状年(2015年)处于亚健康状态的分区有:子区1、子区2、子区3、子区6,综合评价指数分别为:0.419、0.404、0.408、0.401,协调发展类型为临界协调发展;处于不健康状态的分区有:子区4和子区5,综合评价指数为0.358和0.343,协调发展类型属于中度不协调衰退型。

**关键词:**流域健康;时空尺度;组合赋权;协调发展度;奎屯河流域

**中图分类号:**TV213;X826 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)02-0097-08

**Watershed health assessment of Kuitun River Basin**//HUANG Xiao<sup>1</sup>, LEI Xiaoyun<sup>1</sup>, GAO Fan<sup>1</sup>, ZHANG Xinpings<sup>2</sup>  
(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;  
2. Xinjian Bingtuan Survey and Design Institute (Group) Co., Ltd, Urumqi 830002, China)

**Abstract:** Taking Kuitun River Basin, a typical arid inland river basin in Xinjiang, as the research object, on the basis of determining the space-time scale of watershed health assessment, the evaluation index system covering water resources health, water related ecological environment health and socio-economic health was proposed, and the watershed health assessment model based on combination weighting and coordinated development degree model was constructed. The results show that the sub healthy areas in 2015 are subregion 1, subregion 2, subregion 3 and subregion 6, whose comprehensive evaluation indexes are 0.419, 0.404, 0.408 and 0.401, respectively. The type of coordinated development is critical coordinated development. The subregions in unhealthy state are subregion 4 and subregion 5, whose comprehensive evaluation indexes are 0.358 and 0.343, respectively. And the type of coordinated development belongs to moderate uncoordinated recession type.

**Key words:** watershed health; space-time scale; combination weighting; coordinated development degree; Kuitun River Basin

流域内自然和人为过程是复杂的、动态的和空间变化的,不可持续的流域规划和管理可造成环境灾难,影响人类福祉。目前,流域已被广泛认为是许多水资源规划和管理问题的最合适的分析单位,流域健康评价(watershed health assessment, WHA)也被公认为流域研究和管理之间的最适合的结合方式<sup>[1-2]</sup>。如何界定流域健康的概念与内涵、确定评价标准、构建评价指标体系、选择评价模型及方法是流域健康评价的关键<sup>[3-4]</sup>。美国环境保护署(EPA)采

用底栖生物完整性指数(B. IBI)指标体系评价流域生态健康<sup>[5]</sup>。Jun等<sup>[6]</sup>提出了利用水资源脆弱性指数评价流域健康状况,为韩国Bukhan河流域管理提供空间优先权。Chung等<sup>[7]</sup>开发了一种基于指标的多准则方法评估流域健康状况。Sanchez等<sup>[8]</sup>使用土壤和水评估工具(SWAT),利用空间聚类技术和验证性因子分析方法进行流域健康评价。我国自20世纪90年代开始关注流域健康问题,针对干旱内陆河流域的健康评价多集中在甘肃河西走廊一

基金项目:国家自然科学基金(51409226,51769036)

作者简介:黄霄(1994—),女,硕士研究生,研究方向为内陆干旱区水文过程及水资源利用。E-mail: 1057384196@qq.com

通信作者:雷晓云,教授。E-mail: leixiaoyun888@163.com

带,新疆流域鲜有涉及<sup>[9-10]</sup>。流域的结构、功能和动态过程是以时空相互作用为特征的,其对自然或人类干扰的响应均在时空尺度下进行<sup>[11]</sup>,流域健康评价以流域巨系统为评价对象,如果忽略了其时空尺度划分,将难以保证流域健康规律及驱动因子的有效识别。目前,我国对流域健康评价的研究多从生物栖息地质量、水文、水质等方面进行<sup>[12]</sup>,而评估流域整体健康状况,尤其考虑干旱内陆河流域水资源、涉水生态环境、社会经济等方面的研究较少。本文在界定时空尺度的前提下,以新疆典型干旱内陆河流域——奎屯河流域为研究对象,确定指示奎屯河流域健康状况变化的关键指标,构建涵盖流域水资源健康、涉水生态环境健康、社会经济健康的指标体系,运用组合赋权法和协调发展度评估流域健康状况,以期为流域适应性管理及生态环境整治提供理论依据与决策支持。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

奎屯河流域地处东经  $83^{\circ}22' \sim 85^{\circ}47'$ ,北纬  $43^{\circ}30' \sim 47^{\circ}04'$ ,流域内有 31 个行政区,主要包括独山子区、奎屯市、新疆生产建设兵团第七师的 9 个团场、乌苏市以及所属的乡(镇、场)。流域总面积约为 2.83 万  $\text{km}^2$ ,山区面积约占 42%,平原面积约占 58%,是新疆天山北坡经济带的重要组成部分,是北疆具有代表性的流域之一<sup>[13]</sup>。奎屯河、四棵树河、古尔图河是组成奎屯河流域三大水系(图 1),奎屯河全长 320 km,四棵树河全长 130 km,古尔图河全长 115 km。流域地表水多年平均径流量为 16.59 亿  $\text{m}^3$ ,



图 1 奎屯河流域水系

Fig.1 Water system of Kuitun River Basin

地下水天然补给量为 0.7 亿  $\text{m}^3$ ,水资源总量为 17.29 亿  $\text{m}^3$ 。农业用水是该流域的用水大户,约占总用水量的 89%,远高于全国平均水平(62%)。近年来,受气候变化和人类活动双重影响,奎屯河流域生态环境问题日益突出,主要表现为总用水需求迅猛增长、地下水超采严重、水资源承载力不足、土壤盐渍化沙化面积日趋增加、甘家湖生态用水不足等,迫切需要构建一套完整指标体系诊断流域健康状况,以促进经济社会与水生态环境可持续发展。

### 1.2 数据来源

基础数据源包括:①1970—2015 年水文气象数据:奎屯河流域内奎屯河新渠首、四棵树河新渠首、古尔图河新渠首、奎屯、车排子、123 团等多个水文气象站降水、流量、气温、风速等资料;②2016 年发布的人口统计数据及社会经济数据:2015 年流域内人口数量、国民生产总值、流域社会保障、工业、农业、甘家湖区区内人员环境保护意识等资料,数据来源于 2016 年新疆统计年鉴、奎屯河流域规划报告、乌苏市人民政府网;③生态环境数据来源于 2015 年 30 m 分辨率 Landsat-TM 影像和中巴资源卫星数据,以地理信息系统与遥感(GIS/RS)为技术手段,对流域的自然资源,主要包括土地资源和植物资源进行解译。

## 2 研究方法

### 2.1 时空尺度界定

确定流域健康评价的时空尺度是流域健康评价工作的前提。基于资料的可获取性,考虑自然与社会经济耦合、行政区域(市、乡、镇、团场等)完整性、保证区域内自然与人类具有相对独立的空间、顺应可持续发展、自然保护区重点保护等原则<sup>[14]</sup>,将流域健康评价时间尺度选取为 2015 年,空间尺度划分基于 Ward 系统聚类法和 GIS 空间叠加方法,以奎屯河流域内 31 个行政区作为分区基本单元,聚类结果见图 2。与平原区相比,山区人口分布稀少,蒸发

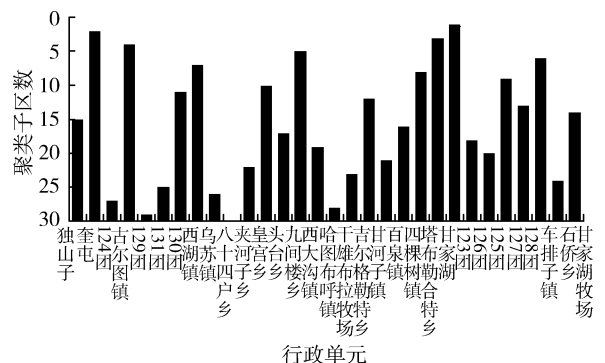


图 2 奎屯河流域分区

Fig.2 Subregion of Kuitun River Basin

量小,山区产流基本涵盖了整个流域的径流量,且山区水量充足,盐碱地面积小,受人类活动的影响少,因此,流域健康评价范围主要在平原区。在此基础上,修正区域边界,将流域灌区划分图、水功能区划图、水资源供水系统网络图等进行叠加,结果见图3,以“地理位置+供水水源”方式命名。

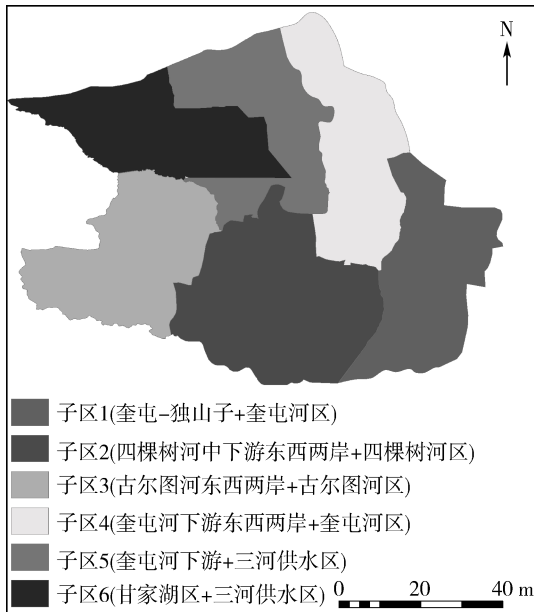


图3 奎屯河流域健康评价分区  
Fig. 3 Health assessment subregion of Kuitun River Basin

## 2.2 评价指标体系构建

利用综合健康指数法建立多层次、多指标的综合评价指标体系,对奎屯河流域健康状态进行定量评价<sup>[15]</sup>。遵循流域健康评价指标体系构建的独立性、系统性、差异性、可量化性等原则<sup>[16]</sup>,在借鉴国内外相关文献<sup>[17-20]</sup>的基础上,考虑奎屯河流域水循环与生态环境过程机理,以流域健康评价指数为目标层,以水资源健康指数、涉水生态环境健康指数、社会经济健康指数为准则层,构建含气候、地表水、地下水、水环境、土壤、植被、社会、经济条件17个指标的子区1、子区2、子区3、子区4、子区5评价指标体系。子区6(甘家湖区)位于奎屯河流域尾间地带,该区西北边为阿拉山口,东、南临近兵团七师垦区和乌苏市绿洲,地理位置十分独特;该区植被区系丰富,其西北边是甘家湖梭梭林自然保护区,梭梭是西北地区重要的固沙植物之一<sup>[21]</sup>;野生动物种类和数量较多,且该区荒漠生态环境对于保护该区生物多样性、维护物种资源的稳定性、防止沙漠化起重要作用;区内流经的河流主要发源于南、北山区,其中发源于南部山区的3条河流因其上中游大规模的开发利用,至下游甘家湖区地区水文情势均发生了较大的变化;因此,构建含气候条件、水资源、水质条件、植被条件、动物条件、社会条件、经济条件12个指标的子区6评价指标体系。奎屯河流域评价指标体系见表1、表2。

表1 子区1~5的评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of subregion 1~5

子区1~5 健康评价 指标体系	水资源健康指数 (0.383)	气候条件	年平均降水量 (0.494)	评价河段评价子区多年平均降水量
		地下水	干旱指数(0.506)	评价时段评价子区多年平均水面蒸发量与多年平均降水量的比值
			地下水开采率 (1.000)	评价时段评价子区年均地下水实际开采量与年均地下水可开采量之比
		地表水	地表水资源量开发 利用率(1.000)	评价时段评价子区供水量或用水量与水资源总量的比值
			水质综合污染指数 (0.642)	是评价水环境质量的一种重要方法,在单项污染指数评价的基础上计算得到
	涉水生态环境健康指数 (0.318)	水环境	生态基流可达度 (0.216)	评价时段实测流量与生态基流的比值
			地下水矿化度 (0.141)	反映地下水水质状况的指标
		土壤条件	土壤盐渍化率(0.573)	评价时段评价子区盐渍化面积占评价区总面积的比值
			水土流失率(0.427)	评价时段评价子区水土流失面积占评价区总面积的比值
		植被条件 (0.533)	植被覆盖率(1.000)	反映植被状况,为评价时段评价子区植被面积占评价区总面积的比值
社会经济健康指数 (0.299)	经济条件 (0.570)	万元工业值用水量 (0.198)	评价时段评价子区每万元工业产值的工业用水量	
		灌溉水综合利用系数(0.336)	表征农业供水工程达标程度	
		节水灌溉率 (0.466)	评价时段评价子区节水灌溉面积占总灌溉面积的比例	
	社会服务 (0.430)	饮水困难人口比例(0.166)	评价时段评价子区饮水困难人口数占总人口数的比值	
		防洪标准(0.693)	反映流域防洪状况	
		输水渠道损失率(0.099)	反映流域输水渠道工程的完好性	
		城镇化率(0.042)	评价时段评价子区城镇人口数占总人口数的比值	

表2 子区6的评价指标体系

Table 2 Evaluation index system of subregion 6

子区6健康评价指标体系	水资源健康指数 (0.686)	气候条件 (0.333)	年平均降水量/mm (0.211)	评价河段评价子区多年平均降水量
			干旱指数 (0.789)	评价时段评价子区多年平均水面蒸发量与多年平均降水量的比值
		水资源 (0.567)	生态输水保证率/% (1.000)	评价时段向甘家湖实际生态输水与目标生态输水的比值
	涉水生态环境健康指数 (0.211)	水质条件 (0.100)	水质矿化度/(g·L <sup>-1</sup> ) (1.000)	反映甘家湖区水质状况指标
			植被条件 (0.551)	植被覆盖率/% (0.251)
		动物条件 (0.450)	荒漠草场退化率/% (0.106)	甘家湖区60年代草场面积与现状年草场面积的差值与60年代草场面积的比值
	社会经济健康指数 (0.102)	灌木林地所占面积比例/% (0.175)	评价时段灌木林面积占评价区总面积的比值	
			白梭梭种群年龄级结构动态指数/% (0.468)	考虑到外界的干扰,反映白梭梭种群的稳定性
		社会条件 (0.333)	鼠类增长率/% (0.333)	反映鼠类灾害对甘家湖区的影响
			区内人员环境保护意识/% (1.000)	通过对评价区具有环境保护意识的人员占评价区总人数的比例来表示

### 2.3 权重的确定

为避免单一赋权方法造成的主客观影响,采用主观赋权与客观赋权相结合的方法确定指标权重。本文选取层次分析法和熵权法计算指标的综合权重。层次分析法确定指标主观权重,具体步骤见文献[22-23];熵权法确定指标客观权重,具体步骤见文献[24-25]。在主观赋权和客观赋权的基础上,计算流域健康评价指标综合权重,见表1、表2的括号中。综合权重 $Q_j$ 的计算公式为

$$Q_j = \frac{v_i w_j}{\sum_{i=1}^n v_i w_j} \quad (1)$$

式中: $v_i$ 为层次分析法计算的权重; $w_j$ 为熵权法计算的权重。

### 2.4 综合评价指数

以最佳可达状态为目标,以“近自然准则”为原则<sup>[26]</sup>,构建奎屯河流域健康评价标准。引入水资源、涉水生态环境和社会经济综合评价指数 $T$ 反映流域健康状况,公式<sup>[27-28]</sup>为

$$T = \alpha f(x) + \beta g(y) + \gamma h(z) \quad (2)$$

其中 $f(x) = \sum_{i=1}^n w_i x_i$ ,  $g(y) = \sum_{j=1}^n w_j y_j$ ,

$$h(z) = \sum_{k=1}^n w_k z_k$$

式中: $f(x)$ 、 $g(y)$ 、 $h(z)$ 分别为水资源健康指数、涉水生态环境健康指数和社会经济健康指数; $x_i$ 、 $y_j$ 、 $z_k$ 分别为水资源、涉水生态和社会经济健康指数评价

指标层下各指标的标准化值; $w_i$ 、 $w_j$ 、 $w_k$ 分别为水资源健康指数、涉水生态健康指数和社会经济健康指数评价指标层各指标的权重; $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 分别为水资源、涉水生态环境和社会经济权重。

参照人体健康等级划分的研究成果,将奎屯河流域健康标准划分为5个等级:很健康、健康、亚健康、不健康、病态。借鉴国家、地方及行业规定的标准和规范,同时查阅流域历史资料,在获取流域的背景和本底值并听取有关专家的意见后,得到不同等级下综合评价指数 $T$ 的阈值及含义(表3)。

表3 流域健康等级及含义

Table 3 Basin health level and meaning

等级	$T$	含义
病态	[0,0.2)	流域已基本丧失各项功能
不健康	[0.2,0.4)	流域健康状况受到威胁,水资源量匮乏,涉水生态环境脆弱,系统结构已经失调,流域的许多功能已经损坏,但还可以维持一部分功能
亚健康	[0.4,0.6)	流域处于健康向不健康过渡的状态,流域健康状况受到人类的干扰,水资源量及涉水生态环境均受到一定影响,但是各项功能均能正常发挥
健康	[0.6,0.8)	流域水资源相对丰富,涉水生态环境状况较好,基本满足人类社会经济发展对流域资源的合理需求
很健康	[0.8,1.0]	流域水资源丰富,涉水生态环境状况好,能够满足人类社会经济发展对流域资源的合理需求

### 2.5 协调度

用系统要素间的离差系数作为协调度的定量表达方式来反映水资源、涉水生态环境、社会经济3个子系统间的协调程度,离差系数越小,则系统间的协

调性就越好<sup>[29]</sup>,协调度计算公式<sup>[30]</sup>为

$$C = \left\{ \frac{f(x)g(y)h(z)}{\left[ \frac{1}{3}[f(x) + g(y) + h(z)] \right]^2} \right\}^k \quad (3)$$

式中: $C$ 为协调度, $0 \leq C \leq 1$ ;  $k$ 为研究中需调节子系统的数量,本研究中 $k=3$ 。

## 2.6 协调发展度

引入协调发展度反映奎屯河流域水资源、涉水生态环境和社会经济3个子系统间的协调发展情况,协调发展度越高,流域整体协调发展状况越好。协调发展度 $D$ 的计算公式<sup>[31]</sup>为

$$D = \sqrt{CT} \quad 0 \leq D \leq 1 \quad (4)$$

为衡量系统间协调发展的相对尺度,借鉴国内外有关协调发展度等级划分的研究成果<sup>[23,29]</sup>,将协调发展度阈值划分为5个区间: $[0, 0.2)$ 、 $[0.2, 0.4)$ 、 $[0.4, 0.6)$ 、 $[0.6, 0.8)$ 、 $[0.8, 1.0]$ ,分别对应的协调发展度类型为极度不协调衰退型、中度不协调衰退、临界协调发展、中度协调发展、良好协调发展。综合评价的结果分为两种情况:①当 $m = \min\{f(x), g(y), h(z)\}$ 时,为滞后型,如 $m = h(z)$ ,为社会经济滞后型。②当 $f(x) = g(y) = h(z)$ 时,流域水资源功能、涉水生态环境功能、社会经济功能同步发展,现状流域各系统间协调性良好,今后目标是实现更高水平的协调。

## 3 结果分析

利用各子区的相关数据进行计算,得到结果见表4。子区1、子区2、子区3以及子区6的健康状况属于亚健康状态,协调发展类型为临界协调发展;而子区4和子区5的健康状况属于不健康状态,协调发展类型属于中度不协调衰退型。

表4 评价模型计算结果

Table 4 Calculation results of evaluation model

子区	$f(x)$	$g(y)$	$h(z)$	$T$	$C$	$D$
子区1	0.399	0.419	0.453	0.419	0.750	0.561
子区2	0.435	0.382	0.396	0.404	0.738	0.546
子区3	0.421	0.373	0.416	0.408	0.741	0.550
子区4	0.339	0.319	0.379	0.343	0.700	0.490
子区5	0.331	0.303	0.456	0.358	0.702	0.501
子区6	0.352	0.447	0.396	0.401	0.732	0.542

由表4中 $f(x)$ 的变化趋势可知,从奎屯河流域中下游至尾间地带水资源健康指数呈下降的趋势。子区1水资源开发利用规模较大,地下水开采率已达110.68%,处于不健康的状态;地表水资源开发利用率为68.20%,处于亚健康状态。子区2的地下水开采率达127.18%,处于不健康的状态;地表水资源开发利用率为63.20%,处于亚健康状态。子区3降雨稀少,蒸发强烈,2015年年均降水量为

186.91 mm,干旱指数达11.40,处于不健康状态;水资源开发利用规模较大,地下水开采率已达99.15%,地表水资源开发利用率为70%。子区4、5位于奎屯河流域下游,平均降水量为178 mm,蒸发强烈,这两个子区平均干旱指数为10.61,处于不健康状态;同时,子区4、5灌区较多且人口分布较为密集,农业用水量与生活用水量已达到9.01亿 $m^3$ ,通过水利工程设施的引水量与河道的水量勉强维系两个子区的基本需水量,用水结构不合理,水资源承载力已经不足。子区6年均降雨稀少(158 mm),蒸发强烈,干旱指数达11.39,处于不健康的状态;奎屯河、四棵树河、古尔图河向该区的生态输水保证率低,仅为30.29%,而该区健康生态输水保证率需达到90%以上。

从表4中 $g(y)$ 的变化趋势可知,从奎屯河流域中下游至尾间地带涉水生态环境指数基本呈下降的趋势。子区1水土流失率达64.02%,已处于病态;植被覆盖率低,仅为40.25%,处于亚健康状态;该区水质综合污染指数较高(0.47),处于亚健康状态。子区2水质综合污染指数高(1.17),相当于地表水环境质量的Ⅲ类标准,该区的氟化物已处于劣V类状态;同时该区生态环境脆弱,土壤盐渍化现象严重,水土流失率达68.44%,已处于病态。子区3、4、5土壤盐渍化现象严重,植被覆盖率低,子区3平均植被覆盖率仅为39.69%,处于不健康状态。子区6水质矿化度为11 g/L,处于不健康的状态;该区植被覆盖率为65%,处于健康的状态,灌木林地所占面积比例为50%,处于亚健康状态;以梭梭和白梭梭为主的荒漠生态环境较好,在考虑到外界干扰时,甘家湖区白梭梭种群零级动态指数约为1.5%,大于0,白梭梭种群是较为稳定的;该区野生动植物丰富度达60%,处于健康的状态。综合全流域涉水生态环境健康指数来看,流域土壤盐渍化、水土流失现象较为严重,全流域耕地盐渍化面积占耕地面积的90.16%,荒地土壤盐渍化更为严重,兵团第七师荒地土壤几乎100%盐渍化,全流域无明显侵蚀面积仅为8112  $km^2$ ,占流域土地面积的28.66%。

从表4中 $h(z)$ 的变化趋势可知,从奎屯河流域中下游至尾间地带社会经济指数也基本处于下降的趋势。子区1水利工程措施不完善,输水渠道损失率为45.8%,处于亚健康的状态;该区的农业用水效率低,节水灌溉率仅为36.90%,处于不健康的状态。子区2饮水困难人口比例较高(45.95%),已处于不健康的状态;城镇化健康水平低,城镇化率为26.75%,《国家新型城镇化规划(2014—2020年)》指出城镇化健康有序发展,常住人口城镇化率应达

到 60% 左右;水利工程措施不完善,输水渠道损失率为 46.06%,处于亚健康状态;防洪标准较低,仅为 5 年一遇,抗洪能力较差。子区 3 饮水困难人口比例高(71.72%),处于不健康的状态;城镇化健康水平低,城镇化率为 41.2%;该区的农业用水效率较低,节水灌溉率为 59.78%;防洪标准较低,仅为 5 年一遇,抗洪能力较差。子区 4 万元工业值用水量较大,现状年均值为 24.16 m<sup>3</sup>/万元,处于亚健康状态;农业用水效率较低,节水灌溉率为 43.21%,处于不健康状态;饮水困难人口比例为 46.20%,处于不健康的状态。子区 5 万元工业值用水量较大,现状年均值为 24.32 m<sup>3</sup>/万元,处于亚健康状态;城镇化健康水平较低,该区域城镇化率为 44.80%,处于亚健康状态。对子区 6 的环境保护意识较高,区内人员环境保护意识比例为 69.80%;但该区的环保投资指数较低,2015 年仅为 0.38%,远小于 2.5%,今后政府应着重关注该区的投资环保建设工作。

奎屯河流域水资源匮乏,涉水生态环境完整性正逐渐衰退,社会服务功能发展极不均匀。由表 4 可见,子区 1、子区 6 属于水资源健康滞后性区域,子区 2、3、4、5 属于涉水生态环境健康滞后性区域,说明奎屯河流域水资源短缺,涉水生态环境脆弱,流域内水资源供需、水生态环境和人类经济社会发展已处于不平衡状态。各子区的协调度较高,而协调发展度较低,表明各子区的协调发展水平受水资源、涉水生态环境、社会经济间综合发展水平的制约,今后流域管理应着重提高水资源、涉水生态环境、社会经济的发展水平。

## 4 结 论

a. 奎屯河流域健康评价结果表明,现状年(2015 年)处于亚健康状态的分区有:子区 1、子区 2、子区 3、子区 6,综合评价指数分别为:0.419、0.404、0.408、0.401,协调发展类型为临界协调发展;处于不健康状态的分区有子区 4 和子区 5,综合评价指数为 0.358 和 0.343,协调发展类型属于中度不协调衰退型。

b. 从水资源、涉水生态环境、社会经济健康指数比较来看,水资源健康指数制约奎屯河流域健康发展占有最高比例,流域内总用水需求的增长,水资源承载能力已经严重不足,受人为因素与极端气候因素的影响,流域内涉水生态环境受到一定破坏,社会经济健康状况不容乐观。从流域协调发展状况来看,提高流域综合健康评价指数是协调发展该流域的关键。

### 参考文献:

[ 1 ] HAZBAVI Z, SADEGHI S H. Watershed health

characterization using reliability-resilience-vulnerability conceptual framework based on hydrological responses [ J ]. Land Degradation & Development, 2017, 28 ( 5 ): 1528-1537.

- [ 2 ] 高凡,蓝利,黄强.变化环境下河流健康评价研究进展 [ J ]. 水利水电科技进展,2017,37(6):81-87. ( GAO Fan, LAN Li, HUANG Qiang. Advances on evaluation of river health in changing environments [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37 ( 6 ): 81-87. ( in Chinese ) )
- [ 3 ] 蓝利,雷晓云,高凡,等.基于组合赋权与有序熵模型的干旱内陆河流健康评价 [ J ]. 水资源与水工程学报,2018,29(3):57-62. ( LAN Li, LEI Xiaoyun, GAO Fan, et al. Arid inland river health assessment based on combination weights and ordered entropy models [ J ]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(3):57-62. ( in Chinese ) )
- [ 4 ] 徐昕,陈青生,董壮,等.信江流域生态健康预测分析 [ J ]. 水资源保护,2016,32(4):154-159. ( XU Xin, CHEN Qingsheng, DONG Zhuang, et al. Prediction and analysis on ecological health of Xinjiang Basin [ J ]. Water Resources Protection, 2016, 32 ( 4 ), 154-159. ( in Chinese ) )
- [ 5 ] 李春晖,崔巍,庞爱萍,等.流域生态健康评价理论与方法研究进展 [ J ]. 地理科学进展,2008,27(1):9-17. ( LI Chunhui, CUI Wei, PANG Aiping, et al. Progress on theories and methods of watershed eco-health assessment [ J ]. Progress in Geography, 2008, 27 ( 1 ): 9-17. ( in Chinese ) )
- [ 6 ] JUN K S, CHUNG E S, SUNG J Y, et al. Development of spatial water resources vulnerability index considering climate change impacts [ J ]. Science of the Total Environment, 2011, 409 ( 24 ): 5228-5242.
- [ 7 ] EUNSUNG C, PATRICIA A, HYESUN P, et al. Multi-Criteria assessment of spatial robust water resource vulnerability using the TOPSIS method coupled with objective and subjective weights in the Han River Basin [ J ]. Sustainability, 2017, 9 ( 1 ): 29.
- [ 8 ] SANCHEZA G M, NEJADHASHEMIA A P, ZHANG B Z, et al. Linking watershed-scale stream health and socioeconomic indicators with spatial clustering and structural equation modeling [ J ]. Environmental Modelling and Software, 2015, 70: 113-127.
- [ 9 ] 郭巧玲.黑河流域生态需水及系统健康评价 [ M ]. 北京:中国水利水电出版社,2012:28-59.
- [ 10 ] 唐嘉琪.石羊河流域生态健康研究 [ D ]. 兰州:西北师范大学,2013.
- [ 11 ] 韩玉玲,夏继红,陈永明,等.河道生态建设:河流健康诊断技术 [ M ]. 北京:中国水利水电出版社,2012:46-48.
- [ 12 ] 于璐璐,朱丽东,吴涛,等.流域生态系统健康评价研究进展 [ J ]. 水文,2017,37(3):7-13. ( YU Lulu, ZHU

- Lidong, WU Tao, et al. Research progress of basin ecosystem health assessment [J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(3): 7-13. (in Chinese))
- [13] 高文强. 新疆奎屯河流域径流变化规律及预测模型研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2009.
- [14] 孙然好,程先,陈利顶. 基于陆地-水生态系统耦合的海河流域水生态功能分区[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8445-8455. (SUN Ranhao, CHENG Xian, CHEN Liding. Coupling terrestrial and aquatic ecosystems to regionalize eco-regions in the Haihe River Basin, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37 (24): 8445-8455. (in Chinese))
- [15] 李春华,叶春,赵晓峰,等. 太湖湖滨带生态系统健康评价[J]. 生态学报, 2012, 32(12): 3806-3815. (LI Chunhua, YE Chun, ZHAO Xiaofeng, et al. The ecosystem health assessment of the littoral zone of Lake Taihu [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32 (12): 3806-3815. (in Chinese))
- [16] 高永胜. 河流健康生命评价与修复技术研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2006.
- [17] AHN S R, KIM S J. Assessment of integrated watershed health based on the natural environment, hydrology, water quality, and aquatic ecology [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21: 5583-5602.
- [18] 牛明香,王俊. 黄河河口区生态系统健康评价指标体系探讨[J]. 水资源保护, 2016, 32(1): 57-63. (NIU Mingxiang, WANG Jun. Discussion over health assessment indicator system of ecosystem in Yellow River estuary area [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(1): 57-63. (in Chinese))
- [19] 徐宗学,武玮,殷旭旺. 渭河流域水生态系统群落结构特征及其健康评价[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(1): 23-30. (XU Zongxue, WU Wei, YIN Xuwang. Community structure characteristics and health assessment of aquatic ecosystem in Weihe Basin, China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36 (1): 23-30. (in Chinese))
- [20] 刘玉玉,许士国. 可变模糊评价方法在浑河上游河段健康评价中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(3): 64-67. (LIU Yuyu, XU Shiguo. Application of variable fuzzy evaluation method in health evaluation of upper reaches of Hunhe River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(3): 64-67. (in Chinese))
- [21] LI Y H, CHU X Z. Effect of different land use types on soil enzyme activity on the edge of Ganjiahu wetland in Xinjiang [J]. Key Engineering Materials, 2012, 500: 238-242.
- [22] 李自明. 基于多层次灰色聚类模型的河流健康综合评价研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2015.
- [23] 胡启玲,董增川,杨雁飞,等. 基于联系数的水资源承载力状态评价模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 425-432. (HU Qiling, DONG Zengchuan, YANG Yanfei, et al. State evaluation model of water resources carrying capacity based on connection number [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(5): 425-432. (in Chinese))
- [24] 郑志宏,魏明华. 基于组合赋权的河流健康模糊评价研究[J]. 水利水电技术, 2013, 44(2): 28-31. (ZHENG Zhihong, WEI Minghua. Study on combined weight based fuzzy evaluation of river health [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44 (2): 28-31. (in Chinese))
- [25] 赵江辉,沈国浩,秦伟. 基于熵权综合健康指数法的沂河健康评价研究[J]. 水资源开发与管理, 2016(1): 49-52. (ZHAO Jianghui, SHEN Guohao, QIN Wei. Research on Yihe River health evaluation based on entropy weight comprehensive health index method [J]. Water Resources Development and Management, 2016 (1): 49-52. (in Chinese))
- [26] 车越,吴阿娜,曹敏,等. 河流健康评价的时空特征与参照基线探讨[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(6): 761-767. (CHE Yue, WU A'na, CAO Min, et al. Discussion of river health assessment on spatial and temporal scale and baseline [J]. Resources Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(6): 761-767. (in Chinese))
- [27] WANG Q S, YUAN X L, CHENG X X, et al. Coordinated development of energy, economy and environment subsystems: a case study [J]. Ecological Indicators, 2014, 46: 514-523.
- [28] 孙倩,汤放华. 基于欧氏距离协调发展度聚类模型的区域协调发展状况研究:以湖南省为例[J]. 城市发展研究, 2012, 19(1): 35-40. (SUN Qian, TANG Fanghua. The regional coordination development status research based on Euclidean distance coordination development degree clustering mode: the case of Hunan Province [J]. Urban Studies, 2012, 19(1): 35-40. (in Chinese))
- [29] 翟晶,徐国宾,郭书英,等. 基于协调发展度的河流健康评价方法研究[J]. 水利学报, 2016, 47(11): 1465-1471. (ZHAI Jing, XU Guobin, GUO Shuying, et al. Research on river health assessment method based on coordinated development degree [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(11): 1465-1471. (in Chinese))
- [30] 汤铃,李建平,余乐安,等. 基于距离协调度模型的系统协调发展定量评价方法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(4): 594-602. (TANG Ling, LI Jianping, YU lean, et al. Quantitative evaluation methodology for system coordination development based on distance coordination degree model [J]. System Engineering Theory & Practice, 2010, 30(4): 594-602. (in Chinese))
- [31] 党建华,瓦哈甫·哈力克,张玉萍,等. 吐鲁番地区人口-经济-生态耦合协调发展分析[J]. 中国沙漠, 2015, 35

(1):260-266. (DANG Jianhua, WAHAP Halik, ZHANG Yuping, et al. Coupling coordinated development of population, economic and ecological system in the Turpan

Area of China [J]. Journal of Desert Research, 2015, 35 (1):260-266. (in Chinese))

(收稿日期:2019-03-11 编辑:王 芳)

(上接第 84 页)

- [18] LIU C H, TIAN F L, CHEN J W. A comparative study on source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of the Daliao River, China: positive matrix factorization and factor analysis with non-negative constraints [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55 (10): 915-920.
- [19] 汪东华, 马艳梅. 多元统计分析与 SPSS 应用 [M]. 2 版. 上海: 华东理工大学出版社, 2018.
- [20] YANG L P, MEI K, LIU X M, et al. Spatial distribution and source apportionment of water pollution in different administrative zones of Wen-Rui-Tang (WRT) River Watershed, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(8): 5341-5352.
- [21] 孙立鑫, 林山杉. 基于 WASP 模型的农田退水对查干湖水水质影响的评价 [J]. 水资源保护, 2018, 34(6): 88-94. (SUN Lixin, LIN Shanshan. Evaluation on impact of farmland withdrawal water on water quality of Chagan Lake based on WASP model [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(6): 88-94. (in Chinese))
- [22] 刘潇, 薛莹, 纪毓鹏, 等. 基于主成分分析法的黄河口及其邻近水域水质评价 [J]. 中国环境科学, 2015, 35 (10): 3187-3192. (LIU Xiao, XUE Ying, JI Yupeng, et al. An assessment of water quality in the Yellow River estuary and its adjacent waters based on principal component analysis [J]. China Environmental Science,

2015, 35(10): 3187-3192. (in Chinese))

- [23] 孔海燕, 安国安, 史淑娟, 等. 以 PCA 分析为基础的水环境质量综合评价研究 [J]. 污染防治技术, 2019, 32 (1): 6-8. (KONG Haiyan, AN Guoan, SHI Shujuan, et al. Comprehensive evaluation of water environmental quality based on PCA analysis [J]. Pollution Control Technology, 2019, 32(1): 6-8. (in Chinese))
- [24] 向东进, 李宏伟, 刘小雅. 实用多元统计分析 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2005.
- [25] 李斌, 张鑫, 李娜, 等. 北京市春夏挥发性有机物的污染特征及源解析 [J]. 环境化学, 2018, 37 (11): 2410-2418. (LI Bin, ZHANG Xin, LI Na, et al. Pollution characteristics and source analysis of volatile organic compounds in spring and summer in Beijing [J]. Environmental Chemistry, 2018, 37 (11): 2410-2418. (in Chinese))
- [26] 郝利霞. 城市河流的污染特性分析研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
- [27] 徐光宇, 柴国平, 徐明德, 等. 主成分分析法在汾河太原城区段水质评价中的应用 [J]. 环境工程, 2014, 32 (6): 122-124. (XU Guangyu, CHAI Guoping, XU Mingde, et al. Application of principal component analysis in water quality evaluation of Fenhe River in Taiyuan City [J]. Environmental Engineering, 2014, 32 (6): 122-124. (in Chinese))

(收稿日期:2019-10-21 编辑:彭桃英)

(上接第 96 页)

- [16] 朱党生, 张建永, 李扬, 等. 水生态保护与修复规划关键技术 [J]. 水资源保护, 2011, 27 (5): 59-64. (ZHU Dangsheng, ZHANG Jianyong, LI Yang, et al. Key technologies of water ecology protection and rehabilitation planning [J]. Water Resources Protection, 2011, 27 (5): 59-64. (in Chinese))
- [17] 徐伟, 董增川, 罗晓丽, 等. 基于改进 7Q10 法的滦河生态流量分析 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2016, 44 (5): 454-457. (XU Wei, DONG Zengchuan, LUO Xiaoli, et al. Analysis of ecological flow in Luanhe River based on improved 7Q10 method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(5): 454-457. (in Chinese))
- [18] 涂晶晶, 陈森林, 艾学山, 等. 河流生态流量特征图及生态流量评价方法 [J]. 水资源保护, 2015, 31 (1): 99-105. (TU Jingjing, CHEN Senlin, AI Xueshan, et al. Diagram of river ecological flow characteristics and evaluation method of ecological flow [J]. Water Resources

Protection, 2015, 31(1): 99-105. (in Chinese))

- [19] 陈昂. 环境流量研究的前沿问题与挑战 [J]. 水利水电科技进展, 2019, 39 (2): 1-6. (CHEN Ang. Frontiers and challenges of environmental flow research [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39 (2): 1-6. (in Chinese))
- [20] 尚松浩. 确定河流生态流量的几种湿周法比较 [J]. 水利水电科技进展, 2011, 31 (4): 41-44. (SHANG Songhao. Comparison of several wet-cycle methods for determining river ecological discharge [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31 (4): 41-44. (in Chinese))
- [21] 黄初龙. 福建省社会经济转型期水资源供需平衡趋势分析 [J]. 水资源保护, 2010, 26 (3): 13-17. (HUANG Chulong. Analysis on the trend of water resources supply and demand balance in the period of socio-economic transition in Fujian Province [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(3): 13-17. (in Chinese))

(收稿日期:2019-08-04 编辑:彭桃英)