

基于风险矩阵的多要素水资源承载力综合评价方法

徐翔宇¹, 郦建强¹, 金菊良^{2,3}, 陈磊^{2,3}, 董涛⁴, 陈梦璐^{2,3}, 张浩宇^{2,3}

- (1. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120; 2. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009;
3. 合肥工业大学水资源与环境系统工程研究所, 安徽 合肥 230009;
4. 安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院水资源安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230088)

摘要:为合理综合量-质-域-流四要素评价区域水资源承载力,提出了基于量-质-域-流四要素和风险矩阵的水资源承载力评价模型(QQSS-RM)。首先,构建量-质-域-流四要素子系统下48个初步评价指标,用专家咨询信息和遗传层次分析法(AGA-AHP)计算四要素子系统中各评价指标的权重,通过筛选和分析采用8个综合评价指标构建区域水资源承载力评价指标体系;其次,参考相关文献和专家意见得到8个综合评价指标的4个评价等级标准;最后,构建基于量-质-域-流四要素和风险矩阵的水资源承载力评价模型。将QQSS-RM用于西辽河流域3个水资源三级区的水资源承载力评价,结果表明:西拉木伦河及老哈河、乌力吉木伦河和西辽河下游区间3个水资源三级区的水资源承载力评价等级分别为超载、临界超载和超载,评价结果显示西辽河流域的水资源承载状况较差。该评价结果与西辽河流域的水资源承载状况基本保持一致,表明QQSS-RM应用于区域水资源承载力评价有较好的推广价值。

关键词:水资源承载力评价;量-质-域-流;风险矩阵;短板法;西辽河

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2020)01-0001-09

Comprehensive evaluation method of multi-factor water resources carrying capacity based on risk matrix//XU Xiangyu¹, LI Jianqiang¹, JIN Juliang^{2,3}, CHEN Lei^{1,2}, DONG Tao⁴, CHEN Menglu^{2,3}, ZHANG Haoyu^{2,3}(1. *General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China*; 2. *School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China*; 3. *Institute of Water Resources and Environmental Systems Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China*; 4. *Key Laboratory of Water Conservancy and Water Resources of Anhui Province, Water Resources Research Institute of Anhui Province and Huaihe River Commission, Ministry of Water Resources, Hefei 230088, China*)

Abstract: In order to reasonably synthesize the carrying capacity of regional water resources by the four elements of water quantity, water quality, water space and stream flow, a water resources carrying capacity evaluation model based on the four elements and a risk matrix (QQSS-RM) was proposed. Firstly, 48 preliminary evaluation indicators under the subsystem of quantity-quality-space-stream were constructed and the weight of each evaluation index in the four elements was calculated by expert consultation information method and genetic analytic hierarchy process. Through screening and analysis, 8 comprehensive evaluation indexes were obtained to construct the evaluation index system for the regional water resources carrying capacity. Secondly, 4 evaluation grade criteria of 8 comprehensive evaluation indexes were obtained by referring to relevant literature and expert opinions. Finally, an evaluation model of water resources carrying capacity based on QQSS-RM was constructed, which was applied to three third grade zones of water resources in the Xiliao River Basin. The results show that the water resources carrying capacity evaluation level of Xilamulun River and Laoha River, Wulijimulun River and the downstream of Xiliao River are overloaded, critical overloaded and overloaded respectively, showing a poor water resources carrying capacity of the Xiliao River Basin. The evaluation results are basically consistent with the current status of the Xiliao River Basin, indicating that the QQSS-RM model has better application value in regional water resources carrying capacity evaluation.

Key words: water resources carrying capacity evaluation; quantity-quality-space-stream; risk matrix; short board method; Xiliao River

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401303);国家自然科学基金(51579059, 51479045)

作者简介:徐翔宇(1986—),女,高级工程师,博士,主要从事水资源研究。E-mail: xuxiangyu@gwip.org.cn

通信作者:金菊良(1966—),男,教授,博士,主要从事水资源系统工程研究。E-mail: JINJL66@126.com

水资源是维持区域社会稳定、保障区域经济稳定增长和维护区域生态环境可持续发展的重要自然资源,承载力是一个物理概念,指物体在不产生任何破坏时所能承受的最大负荷^[1]。水资源承载力是承载力概念在水资源、经济社会和生态环境3个子系统所组成的复合系统中的具体体现。水资源承载力的研究最早可追溯到20世纪70年代,国际相关组织针对资源匮乏国家的土地、水等资源的承载力进行相关研究,并提出了水资源承载力的相关概念^[2]。国内,施雅风等^[3]最早明确提出水资源承载力概念,随后有关水资源承载力的研究取得了许多成果^[4-11]。

水资源承载力评价是结合相关定性概念和评价模型量化地判断区域水资源的承载状态,它是水资源承载力预警的重要组成部分,其评价结果对优化区域水资源配置和促进区域生态环境可持续发展等方面具有现实的指导意义。当前,水资源承载力的评价方法主要有综合评价方法^[12-16]、系统分析方法^[17-21]和经验公式方法^[22]等。王建华等^[1]在研究水资源-经济社会-生态环境3大系统相互关系的基础上,从量-质-域-流4个维度出发赋予水资源承载力新的内涵,是研究水资源承载力的一次有益探索。目前,从量-质-域-流4个维度评价区域水资源承载力尚存在一些难点,其中一个关键问题是如何同时考虑四要素的评价结果以得到水资源承载状态的综合评价结果。当前,解决上述问题一般采用短板法^[22]或加权和综合法^[23]。短板法取各要素中最差的评价结果作为最终的综合评价结果,这种极端的取值往往造成水资源承载力综合评价结果与区域水资源实际承载状况有较大的偏差。加权和综合法则是将四要素的评价结果通过加权综合得到最终的综合评价结果。这种加权的方法属于黑箱方法,一方面忽略了水资源承载过程的物理含义,使得综合评价的过程缺乏物理解释性,另一方面在计算四要素权重时存在一定的模糊性和随机性,导致综合评价结果具有较大的不确定性。风险矩阵是一种定性与定量相结合的综合评价方法,用于多要素的合成时可充分考虑各合成要素提供的信息,根据评价对象的综合过程通过修正风险矩阵的合成规则达到综合评价的目的,具有适用性广、可操作性强等特点。风险矩阵已在区域水资源承载力评价中得到初步应用^[24-25],初步验证了其综合评价过程具有物理解释性这一特点。鉴于此,本文将风险矩阵应用于水资源承载力的量-质-域-流四要素评价结果的综合评判,得到区域水资源承载力综合评价的最终结果,构建基于量-质-域-流四要素和风险矩阵的水资源承载力综合评价模型(evaluation model of water

resources carrying capacity based on water quantity-water quality-water space-stream flow four elements and risk matrix, QQSS-RM),并在西辽河流域进行实证分析研究。

1 基于四要素和风险矩阵的水资源承载力评价模型

构建区域水资源承载力QQSS-RM评价模型的思路是采用综合评价的方法得到量-质-域-流四要素的水资源承载力评价等级,通过分析四要素的内在含义,先用风险矩阵分别将水域、水流要素作为水量、水质要素的修正要素考虑水量-水域(水质-水流)二要素综合后的承载力评价等级,再用风险矩阵综合水量-水域双要素和水质-水流双要素的评价等级,最终得到区域水资源承载力的评价结果。

1.1 水资源承载力评价指标体系

受区域水资源承载力评价对象时空差异等客观因素的影响,建立合适的水资源承载力评价指标体系一直以来都是水资源承载力评价研究中的重点和难点,本文参考相关文献分别选取量-质-域-流四要素以及各要素子系统中包含的评价指标,建立区域水资源承载力初步评价指标体系^[26-28]。评价指标数据集记为 $\{x_{h_gk} | h=1,2,\dots,H;g=1,2,\dots,G;k=1,2,\dots,n_g\}$,其中 H 、 G ($G=4$)和 n_g 分别为评价样本的总数、要素子系统的总数和第 g 要素中评价指标总数。

1.2 四要素中各评价指标的权重

合理确定四要素中各评价指标的权重是科学评价区域水资源承载力的的重要组成部分,本文采用专家咨询信息和遗传层次分析法计算四要素中各评价指标的权重 w_{gk} (w_{gk} 表示第 g 要素中第 k 个评价指标的权重)。设专家 r 对第 g 要素中第 k 个评价指标的重要性排序值为 $\{x(g,k,r) | g=1,2,3,4;k=1,2,\dots,n_g;r=1,2,\dots,R\}$,其中 R 为咨询的专家总人数,则第 g 要素中第 k 个评价指标的重要性排序值对应的均值和标准差计算式为^[29]

$$\bar{x}(g,k) = \sum_{r=1}^R x(g,k,r)/R \quad (1)$$

$$s(g,k) = \left\{ \sum_{r=1}^R [x(g,k,r) - \bar{x}(g,k)]^2 / (R-1) \right\}^{0.5} \quad (2)$$

显然,重要性排序值越小则该指标的重要性越高^[26-29],根据文献^[29]建立第 g 要素的互反判断矩阵为

$$P_g = (p_{g,k,l}) \quad (3)$$

其中 $p_{g,k,l} = \bar{x}(g,l)/\bar{x}(g,k)$

式中: $p_{g,k,l}$ 为第 g 个要素中第 k 个评价指标优于评价指标 l 的程度($l=1, 2, \dots, n_g$)。当 $p_{g,k,l}=1$ 时表示评价指标 k 和 l 同等重要;当 $p_{g,k,l}>1$ 时表示评价指标 k 比 l 重要,且 $p_{g,k,l}$ 越大表示评价指标 k 比 l 越重要,反之亦然^[29-30]。

通常情况判断矩阵 P_g 可能不具有满意的一致性。设 P_g 的修正判断矩阵为 $Q_g=(q_{g,k,l})$, Q_g 中各评价指标的权重仍记为 w_{gk} ,则使式(4)达到最小值的 Q_g 为 P_g 的最优一致性判断矩阵^[30]。

$$\min C(n_g) = \sum_{k=1}^{n_g} \sum_{l=1}^{n_g} |q_{g,k,l} - p_{g,k,l}| / n_g^2 + \sum_{k=1}^{n_g} \sum_{l=1}^{n_g} |q_{g,k,l} \cdot w_{gl} - w_{gk}| / n_g^2 \quad (4)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} q_{g,k,k} = 1 \\ 1/q_{g,l,k} = q_{g,k,l} \in [p_{g,k,l}(1-d), p_{g,k,l}(1+d)] \\ \cap [1/9, 9] \\ w_{gk} > 0 \\ \sum_{k=1}^{n_g} w_{gk} = 1 \end{cases}$$

$$(k=1, 2, \dots, n_g-1; l=k+1, \dots, n_g)$$

式中: $C(n_g)$ 为一致性指标系数; d 为非负参数,根据经验可从区间 $[0, 0.5]$ 内取值。利用加速遗传算法^[31]求解式(4)较为简便而有效^[30]。当 $C(m) \leq 0.2$ 时一般认为判断矩阵 P_g 具有满意的一致性,此时得到第 g 个要素中的第 k 个评价指标的权重 w_{gk} 具有较高的可信度,否则可以改变非负参数 d 或修改原判断矩阵 P_g 使之满足一致性要求。

1.3 评价等级标准

参考相关文献^[25]将区域水资源承载力划分为4个等级:不超载、临界超载、超载和严重超载。不超载,代表区域水资源承载力可以支撑区域经济发展、保持社会稳定和维持生态环境可持续发展;临界超载,代表区域水资源承载力可以维持区域经济、社会、生态环境3个系统正常运行,但同时存在水资源承载力超载的风险;超载,代表水资源不足以支撑区域经济、社会、生态环境3个系统,区域存在水资源短缺,水环境破坏和饮用水供应不足等水问题;严重超载,代表区域存在水资源匮乏,水质污染严重,水域空间遭受严重侵占或河流断流等严重水问题。

1.4 区域水资源承载力等级

水量要素所考虑的是当维持人类生活生产、支撑社会经济发展和维系生态环境可持续发展所用的水量超出区域水循环可更新的水资源量时,由此带来地下水过度开发等问题,而这类问题是阻碍人类生活、制约区域经济发展和破坏生态环境的重要因

素。水域要素所考虑的是区域为了经济发展、防洪排涝、农业灌溉等需求修建水库、河道等水利工程,对原有的水域空间的侵占或改变。区域水域空间的侵占和改变将直接影响区域的水量,进一步影响区域水量要素的承载状况。因此,综合相关研究结果和专家的意见,将水域要素作为水量要素的修正要素,运用风险矩阵判断水量-水域2个要素综合后的承载力等级结果见表1。

表1 基于风险矩阵方法的水量-水域二要素综合评价等级

水域承载状况 评价等级	水量承载状况评价等级			
	不超载	临界超载	超载	严重超载
不超载	不超载	临界超载	超载	严重超载
临界超载	不超载	临界超载	超载	严重超载
超载	临界超载	临界超载	超载	严重超载
严重超载	超载	超载	严重超载	严重超载

水质要素所考虑的是人类生产生活和经济发展都会产生一定数量的污染物,造成区域水资源的质量下降。当污染物入河量一旦超过水体的纳污能力,就会造成水体的相关功能丧失,此时劣质的水资源则较难满足人类生活、经济发展、灌溉排水和维持生态环境等对水质的基本要求。水流要素所考虑的是河流水资源的过度使用或者是在河流上建设拦阻工程,造成河流水流流速减缓,严重时可能导致断流等现象。较快的水流速度可以加快河流内的水循环,对修复水质有一定的积极作用,进一步影响水质要素的承载状况。因此,将水流要素作为水质要素的修正要素,运用风险矩阵判断水质-水流2个要素综合后的承载力等级,结果见表2。

表2 基于风险矩阵方法的水质-水流二要素综合评价等级

水流承载状况 评价等级	水质承载状况评价等级			
	不超载	临界超载	超载	严重超载
不超载	不超载	临界超载	超载	严重超载
临界超载	不超载	临界超载	超载	严重超载
超载	临界超载	临界超载	超载	严重超载
严重超载	超载	超载	严重超载	严重超载

参考文献^[25],运用风险矩阵综合考虑区域水量-水域二要素综合后的评价等级和水质-水流二要素综合后的评价等级,判断量-质-域-流四要素综合后的区域水资源承载力等级,结果见表3。

表3 基于风险矩阵方法的量-质-域-流四要素综合评价等级^[25]

水质-水流2 要素综合 评价等级	水量-水域二要素综合评价等级			
	不超载	临界超载	超载	严重超载
不超载	不超载	临界超载	超载	严重超载
临界超载	不超载	临界超载	超载	严重超载
超载	临界超载	超载	超载	严重超载
严重超载	超载	超载	严重超载	严重超载

2 西辽河流域水资源承载力评价

2.1 研究区概况

西辽河流域位于我国东北地区西南部,流经河北、辽宁、内蒙古和吉林四省,河流全长 829 km。西辽河流域地理坐标为:东经 119°04' ~ 125°01',北纬 42°00' ~ 45°00',北以松辽流域分水岭为界和松花江流域接壤,东接东辽河流域,南临辽河干流和大、小凌河,西与七老图山、努鲁儿虎山、医巫闾山和滦河流域毗邻。西辽河流域面积 13.52 万 km²,行政区划包括吉林省、辽宁省、内蒙古自治区和河北省,分别占流域面积的 2.62%, 2.58%, 91.89% 和 2.91%。西辽河流域上游为老哈河,下游为西辽河干流,主要支流有西拉木伦河、教来河、新开河和乌力吉木伦河等。西辽河流域地处中温带半干旱季风气候区,大陆性气候显著,表现为春季干燥多风,夏季湿热多雨,秋季凉爽,冬季严寒少雪的气候特点。西辽河流域降水量从东南向西北逐渐减少,从 650 mm 减少到 325 mm,实测年最大降水量 1 007.1 mm、年最小降水量 158.9 mm。降水量在时间上分布不均匀,6—9 月降水量占全年总降水量的 80% 以上。

2.2 四要素水资源承载力评价

参考相关文献并征询相关专家的意见和建议,依据构建水资源承载力指标体系的系统性原则、综合性原则、动态性原则和实践性原则^[26]。在构建

量-质-域-流四要素的评价指标体系时,将考虑各要素所囊括的评价指标分成支撑力指标和压力指标。水量要素的支撑力指标主要包括区域水资源总量和可利用水总量等,水量要素的压力指标主要包括维持人类生活、经济发展和生态环境所需要的水资源量等。水质要素的支撑力指标主要包括水资源系统的纳污能力等,水质要素的压力指标主要包括人类生活和企业发展等相关人类活动会产生一定的入河污染物等。水域要素的支撑力指标主要包括天然水域面积和河网密度等,水域要素的压力指标主要包括人类活动开发利用水域岸线和取用生态水等。水流要素的支撑力指标主要包括天然水流状态和区域的生态流量等,水流要素的压力指标主要包括人类活动造成水流阻隔等情况。综上分析,建立西辽河水资源承载力评价指标体系,各个评价指标如表 4 所示。这里采用在各种评价指标体系评价中计算权重都是适用的一种改进层次分析法,即 AGA-AHP 法计算四要素中各评价指标的权重 w_{gk} ,如表 4 所示。

表 4 所提供区域水资源承载力的初步评价指标体系可较为完善、系统反映了一般区域水资源的承载状况,但综合全部的 48 个指标评价区域水资源承载力在资料获取等方面存在较大的难度,实际上也无必要。在此基础上,根据用 AGA-AHP 计算的四要素评价指标的权重大小和评价指标是否能代表区域水资源的承载状况,制定两个筛选原则,筛选出

表 4 区域水资源承载力评价的初步指标体系^[26]

子系统	符号	评价指标	权重	子系统	标号	评价指标	权重
水量	X1	区域用水总量	0.124	水质	X25	污染物入河排放量	0.043
	X2	平原区地下水开采量	0.070		X26	劣于 IV 类水的河长比例	0.040
	X3	超采区地下水开采量	0.074		X27	万元 GDP 废水排放量	0.028
	X4	区域可利用水量	0.189	水域	X28	水域岸线开发利用程度	0.200
	X5	区域地下水可开采量	0.131		X29	区域水资源开发利用程度	0.216
	X6	区域水资源总量	0.046		X30	区域生态可利用水量	0.114
	X7	年降水量	0.044		X31	天然水域面积率	0.055
	X8	径流深	0.056		X32	河道基流量	0.066
	X9	区域人均用水量	0.054		X33	河网密度	0.056
	X10	万元 GDP 用水量	0.036		X34	年径流量	0.038
	X11	万元工业增加值用水量	0.042		X35	湿地减少率	0.056
	X12	农田灌溉亩均用水量	0.040		X36	地下水超采面积比例	0.077
	X13	城镇人均综合用水定额	0.034		X37	植被覆盖率	0.063
	X14	农村人均综合用水定额	0.033		X38	湖泊萎缩率	0.059
	X15	灌溉用水定额	0.029		X39	河流库径比	0.220
水质	X16	水功能区水质达标率	0.254		X40	生态流量保障率	0.218
	X17	区域氨氮入河量	0.151		X41	河道平均流速	0.085
	X18	区域 COD 入河量	0.088		X42	河道底质结构	0.058
	X19	区域 COD 允许入河量	0.099	水流	X43	河网密度(水网密度)	0.066
	X20	区域氨氮允许入河量	0.097		X44	河流阻隔单元数	0.075
	X21	区域水体纳污容量	0.080		X45	河流断流几率	0.068
	X22	河湖水质综合达标率	0.038		X46	河道淤积率	0.071
	X23	污水排放达标率	0.042		X47	湖泊换水率	0.085
	X24	生活污水达标率	0.040		X48	径流系数变化率	0.055

相关评价指标,分析得到综合评价指标,用综合评价指标构建区域水资源承载力的评价指标体系^[26];

①水量要素中区域用水总量、区域可利用水量、区域水资源总量、平原区及超采区地下水开采量和区域地下水可开采量指标对应的权重较大。区域用水总量反映区域经济社会和生态环境对水资源系统的实际耗水量,将区域用水总量和区域可利用水量比较得到区域用水程度,是反映区域水资源量是否能够保障区域经济社会和维持生态环境的直接体现。将地下水开采量和地下水可开采量比较得到区域地下水开采程度,是反映区域地下水是否被过度开发的直接度量标准。因此,将区域用水程度和地下水开采程度作为水量要素的综合评价指标。

②水质要素中水功能区水质达标率、区域氨氮入河量和允许入河量、区域 COD 入河量和允许入河量所对应指标的权重较大。水功能区水质达标率的含义是满足水功能区水质达标个数和水功能区总个数的比值,可以反映出区域水资源被污染的情况。综合考虑区域污染物入河量和区域污染物允许入河量 2 个方面得到区域污染物限制排放量,考虑将污染物入河量和污染物限制排污量的比值作为水质污染程度度量标准。因此,将水功能区水质达标率和水质污染程度作为水质要素的综合评价指标。

③水域要素中区域水资源开发利用程度和水域岸线开发利用程度 2 个评价指标的权重较大,作为水域要素的综合评价指标。

④水流要素中河流库径比和生态流量保障率 2 个评价指标的权重较大,作为水流要素的综合评价指标。综上,构建得到西辽河水量-质-域-流四要素水资源承载力评价指标体系,如图 1 所示。

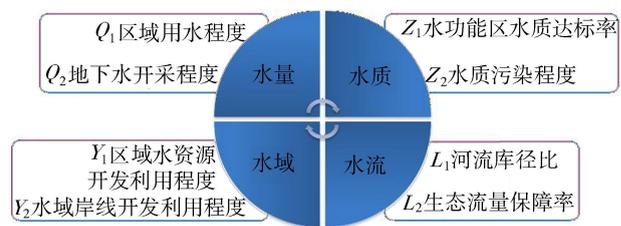


图 1 水资源承载力评价指标体系

参考文献[26]得到量-质-域-流四要素的权重,计算各要素选取的各评价指标的权重如表 5 所示。

表 5 水资源承载力评价指标权重

要素	权重	指标	权重
水量	0.455	区域用水程度 Q_1	0.382
		地下水开采程度 Q_2	0.618
水质	0.260	水功能区水质达标率 Z_1	0.368
		水质污染程度 Z_2	0.632
水域	0.151	区域水资源开发利用程度 Y_1	0.519
		水域岸线开发利用程度 Y_2	0.481
水流	0.134	河流库径比 L_1	0.502
		生态流量保障率 L_2	0.498

单个要素所包含评价指标的不超载、临界超载、超载和严重超载 4 个等级划分标准需要结合评价区域经济发展水平、生态环境现状和社会人口等因素来合理确定。综合相关专家意见和相关参考文献^[22],得到西辽河水资源承载力 8 个综合评价指标的等级划分标准,如表 6 所示。

选择西辽河流域的水资源三级区作为评价单元,包括西拉木伦河及老哈河、乌力吉木伦河和西辽河下游区间。收集相关资料计算得到 4 个要素中各评价指标值,将这些评价指标值与评价指标等级标准比较,得到各评价指标的水资源承载力评价等级。根据四要素中各评价指标的权重对各评价指标的水资源承载力评价等级进行加权计算,最后得到西辽河流域三级区的量-质-域-流各要素的评价结果如表 7 所示。

为进一步直观化地反映西辽河流域水资源承载力量-质-域-流各要素水资源承载状态的空间差异,作图如图 2 所示。

图 2(a)所示西辽河流域水量要素的承载状况总体较好。由表 7 可知:西拉木伦河及老哈河区域的用水总量低于区域用水总量的控制指标,且地下水开采量较少,水量要素的综合评价等级处于不超载;乌力吉木伦河的用水程度较低,但地下水开采程度相对较高,考虑到地下水开采程度的权重高于区域用水程度,水量要素综合评价等级为临界超载;西

表 6 水资源承载力评价指标等级划分标准

要素	指标	指标含义	不超载	临界超载	超载	严重超载
水量 ^[22]	Q_1	区域用水总量/区域可利用水量	<0.9	[0.9, 1)	[1, 1.2)	≥1.2
	Q_2	地下水开采量/地下水控制开采量	<0.9	[0.9, 1)	[1, 1.2)	≥1.2
水质 ^[22]	Z_1	水功能区水质达标个数/水功能区总个数	>0.8	[0.6, 0.8)	[0.4, 0.6)	<0.4
	Z_2	污染物入河量/污染物限制排污量	<1.1	[1.1, 1.2)	[1.2, 3)	≥3
水域	Y_1	水资源开发利用量/区域水资源总量	<0.4	[0.4, 0.6)	[0.6, 0.9)	≥0.9
	Y_2	岸线开发利用长度/岸线可开发利用总长	<0.05	[0.05, 0.1)	[0.1, 0.15)	≥0.15
水流	L_1	河段水库总调节库容/河段年径流量	<0.4	[0.4, 0.6)	[0.6, 0.9)	≥0.9
	L_2	满足生态基流的时段/总时段	≥0.9	[0.7, 0.9)	[0.5, 0.7)	<0.5

注:生态流量是指维系河流、湖泊和沼泽等水生态系统的完整性、系统性和稳定性,保障人类生存与发展的合理需求,需要保留在河流、湖泊、沼泽内的流量及其过程。生态流量过程中枯水期最小值通常称为生态基流。

表7 西辽河流域单要素水资源承载力评价等级

子系统	水资源三级区	指标	指标值	单指标评价等级	综合等级
水量	西拉木伦河及老哈河	Q_1	0.72	不超载	不超载
		Q_2	0.81	不超载	
	乌力吉木伦河	Q_1	0.85	不超载	临界超载
		Q_2	1.06	临界超载	
	西辽河下游区间	Q_1	0.98	临界超载	临界超载
		Q_2	1.17	临界超载	
水质	西拉木伦河及老哈河	Z_1	0.68	临界超载	超载
		Z_2	2.71	超载	
	乌力吉木伦河	Z_1	0.89	不超载	不超载
		Z_2	0.96	不超载	
	西辽河下游区间	Z_1	0.91	不超载	临界超载
		Z_2	1.15	临界超载	
水域	西拉木伦河及老哈河	Y_1	0.692	超载	临界超载
		Y_2	0	不超载	
	乌力吉木伦河	Y_1	0.823	超载	临界超载
		Y_2	0.005	不超载	
	西辽河下游区间	Y_1	1.107	严重超载	超载
		Y_2	0.045	不超载	
水流	西拉木伦河及老哈河	L_1	1.66	严重超载	严重超载
		L_2		严重超载	
	乌力吉木伦河	L_1	0.42	临界超载	超载
		L_2		严重超载	
	西辽河下游区间	L_1	5.39	严重超载	严重超载
		L_2		严重超载	

注:20世纪80年代以来,特别是2000年以后,受自然因素和人类活动的双重影响,西辽河断流时间增加、断流情况加重,将生态流量过程中枯水期最小值通常称为生态基流,致使生态基流为0。

水量要素评价结果 ■ 可载

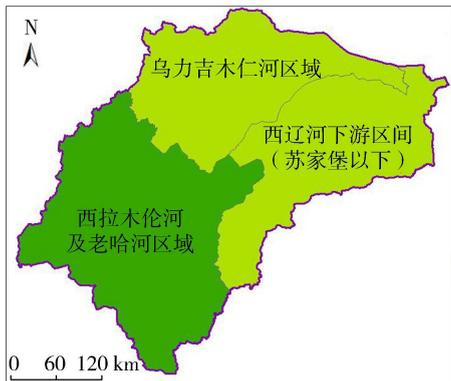
辽河下游区间用水程度和地下水开采程度相对较高,水量要素综合评价等级为临界超载。

图2(b)所示西辽河流域水质要素的承载状况一般。由表7可知:西拉木伦河及老哈河区域水功能区水质达标情况一般,水质污染程度严重,水质要素的综合评价等级为超载;乌力吉木伦河的水功能区水质达标情况较好,水质污染程度较低,水质要素的综合评价等级为不超载;西辽河下游区间水功能区水质达标情况较好,水质污染程度一般,考虑到水质污染程度的指标权重高于水功能区水质达标率,水质要素的综合评价等级为临界超载。

图2(c)所示西辽河流域水域要素的承载状况较差。由表7可知:尽管西拉木伦河及老哈河、乌力吉木伦河和西辽河下游区间的水域岸线开发利用程度很低,但该3个区域的水资源开发利用程度普遍很高,综合考虑得出3个区域水域要素的综合评价等级分别为临界超载、临界超载和超载。

图2(d)所示西辽河流域水流要素的承载状况很差。由表7可知:西拉木伦河及老哈河、乌力吉木伦河和西辽河下游区间的河流库径比较大,表明河流被阻隔较为严重,而常年的河流断流导致生态流量无法得到保障,综合考虑得出3个区域水流要素的综合评价等级分别为严重超载、超载和严重超载。

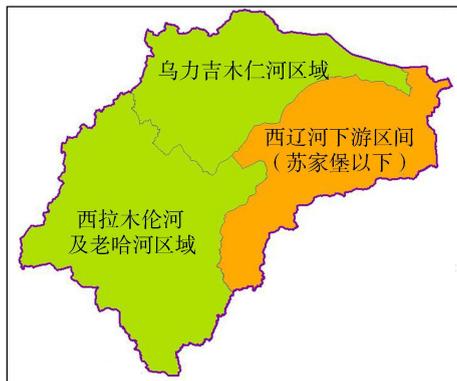
■ 临界超载 ■ 超载 ■ 严重超载



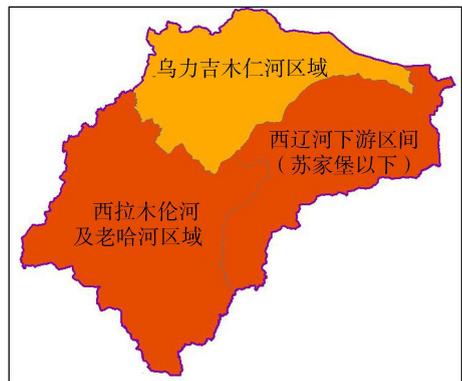
(a) 水量要素



(b) 水质要素



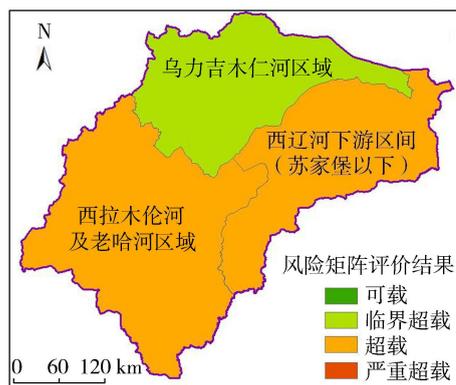
(c) 水域要素



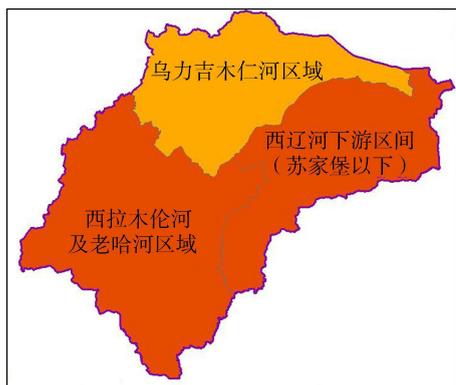
(d) 水流要素

图2 西辽河流域量-质-域-流各要素水资源承载状态评价结果

将上述四要素的评价结果用风险矩阵法和短板法进行合成得到西辽河流域水资源承载力的综合评价结果如图3所示。



(a) 风险矩阵法



(b) 短板法

图3 西辽河流域量-质-域-流四要素水资源承载状态综合评价结果

采用风险矩阵法,得到西拉木伦河及老哈河、乌力吉木伦河和西辽河下游区间的水资源承载力综合评价等级分别为超载、临界超载和超载,表明西辽河流域的水资源承载状况较差;采用短板法,上述3个水资源三级区的水资源承载力综合评价等级分别为严重超载、超载和严重超载,表明西辽河流域的水资源承载状况非常差。风险矩阵法、短板法两种方法所得结果总体上保持一致,同时也存在一定的差异。短板法直接采用量-质-域-流四要素中最差的评价等级作为区域水资源承载力评价等级,这种方法得到的综合评价结果较为保守,不能客观反映出区域水资源的实际承载状况。例如,乌力吉木伦河的水量要素、水质要素和水域要素评价结果较好,水流要素的评价结果差,综合考虑得到区域的水资源承载状况应该是一般,而用短板法得到的结果是超载等级,与区域水资源的实际承载状况存在较大的差异。将风险矩阵应用到量-质-域-流四要素的等级合成,可进一步考虑四要素之间的内在关联,将水量与水域、水质与水流分别进行评价等级合成,评价过程具有物理解析意义。用短板法进行等级合成时,若某

单一要素的评价结果很差,最终的综合评价结果必然也很差,不合理地忽略了其他评价要素的重要性,而采用风险矩阵法的综合评价结果就要科学合理得多。

3 结论

a. 将量-质-域-流四要素应用于区域水资源承载力评价时,难点是如何综合考虑四要素得到最终的区域水资源承载力评价结果。目前常用方法是运用短板法进行四要素的合成,将四要素中最差的评价等级作为区域水资源承载力的最终评价结果。风险矩阵法是一种定量和定性相结合的综合评估方法,风险矩阵在进行双要素的合成时,可充分考虑合成要素的内在含义和相互关系。本文用风险矩阵综合量-质-域-流四要素得到区域水资源承载力的评价结果,提出了基于风险矩阵的量-质-域-流四要素水资源承载力评价模型(QQSS-RM)。

b. QQSS-RM 在西辽河流域水资源承载力的评价结果表明,基于风险矩阵进行量-质-域-流四要素的合成所得到的区域水资源承载力综合评价结果更加符合区域水资源的实际承载状况,在将量-质-域-流四要素进行两两合成时,充分考虑合成要素的相互关系和内在联系,增强评价过程的物理解释性。风险矩阵方法不仅避免了短板法进行多要素合成时忽略其他要素的重要性,使得评价结果较差的不足,同时也克服了短板法评价结果的跳跃性和不稳定性,以及由此产生的与区域水资源的实际承载状况的差异。

c. 本文提出的水资源承载力评价模型进一步完善了风险矩阵方法在水资源承载力评价上的应用,为水资源承载力评价提供了新方法,使评价结果更具解释性、更趋科学合理。

参考文献:

[1] 王建华,姜大川,肖伟华,等. 水资源承载力理论基础探析:定义内涵与科学问题[J]. 水利学报, 2017, 48(12):1399-1409. (WANG Jianhua, JIANG Dachuan, XIAO Weihua, et al. Study on theoretical analysis of water resources carrying capacity: definition and scientific topics[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(12):1399-1409. (in Chinese))

[2] 王晗,余文学,贾亦真. 郑州市水资源承载力综合评价[J]. 水利经济, 2018, 36(6):57-61. (WANG Han, YU Wenxue, JIA Yizhen. Comprehensive evaluation of carrying capacity of water resources in Zhengzhou City [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2017, 48(12):1399-1409. (in Chinese))

- [3] 施雅风,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.
- [4] 左其亭. 水资源承载力研究方法总结与再思考[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(3):1-6. (ZUO Qiting. Review of research methods of water resources carrying capacity [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2017,37(3):1-6. (in Chinese))
- [5] 刘童,杨晓华,宋帆. 水资源承载力评价的 Logistic 集对分析模型及其应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(1):27-33. (LIU Tong, YANG Xiaohua, SONG Fan. Logistic set pair analysis model for water resources carrying capacity assessment and its application [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2019,40(1):27-33. (in Chinese))
- [6] 黄显峰,李宛谕,方国华,等. 基于 SPA 和云理论的水资源承载能力评价研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2019,40(1):9-15. (HUANG Xianfeng, LI Wanyu, FANG Guohua, et al. Evaluation of water resources carrying capacity based on set pair analysis and cloud theory [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2019,40(1):9-15. (in Chinese))
- [7] 金菊良,张浩宇,宁少尉,等. 效应全偏联系数及其在区域水资源承载力评价中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2019,40(1):1-8. (JIN Juliang, ZHANG Haoyu, NING Shaowei, et al. Effect full partial connection number and its application in evaluation of regional water resources [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2019, 40(1):1-8. (in Chinese))
- [8] 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))
- [9] 董涛,金菊良,吴成国,等. 基于承载过程的安徽省水资源承载力动态评价[J]. 水电能源科学, 2018,36(7):17-22. (DONG Tao, JIN Juliang, WU Chengguo, et al. Dynamic evaluation of water resources carrying capacity in Anhui Province based on carrying process[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2018,36(7):17-22. (in Chinese))
- [10] 金菊良,董涛,郦建强,等. 不同承载标准下水资源承载力评价[J]. 水科学进展, 2018,29(1):31-39. (JIN Juliang, DONG Tao, LI Jianqiang, et al. Water resources carrying capacity evaluation method under different carrying standards [J]. Advances in Water Science, 2018,29(1):31-39. (in Chinese))
- [11] DOU Ming, MA Junxia, LI Guiqiu, et al. Measurement and assessment of water resources carrying capacity in Henan Province, China [J]. Water Science and Engineering, 2015,8(2), 102-113.
- [12] 袁艳梅,沙晓军,刘煜晴,等. 改进的模糊综合评价法在水资源承载力评价中的应用[J]. 水资源保护,2017,33(1):52-56. (YUAN Yanmei, SHA Xiaojun, LIU Yuqing, et al. Application of improved fuzzy comprehensive evaluation method to water resources carrying capacity evaluation[J]. Water Resources Protection,2017,33(1):52-56. (in Chinese))
- [13] DONG X, YING L U, ZHOU Z, et al. Comprehensive assessment of water environment carrying capacity of Yunnan Province [J]. Journal of Landscape Research, 2017(3):80-85.
- [14] 李辉,金菊良,吴成国,等. 基于联系数的安徽省水资源承载力动态诊断评价研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018,16(1):42-49. (LI Hui, JIN Juliang, WU Chengguo, et al. Dynamic evaluation and diagnostic analysis for water resources carrying capacity in Anhui Province based on connection number[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1):42-49. (in Chinese))
- [15] CUI Yi, FENG Ping, JIN Juliang, et al. Water resources carrying capacity evaluation and diagnosis based on set pair analysis and improved the entropy weight method [J]. Entropy, 2018, 20(5):1-20.
- [16] 孟珍珠,唐德善,魏宇航,等. 和谐论在水资源承载力综合评价中的应用[J]. 水资源保护,2016,32(3):54-58. (MENG Zhenzhu, TANG Deshan, WEI Yuhang, et al. Application of harmony theory to evaluation of water resources carrying capacity [J]. Water Resources Protection,2016,32(3):54-58. (in Chinese))
- [17] FENG L H, ZHANG X C, LUO G Y. Application of system dynamics in analyzing the carrying capacity of water resources in Yiwu City, China[J]. Mathematics & Computers in Simulation, 2008, 79(3):269-278.
- [18] 吴琼,陈韦丽. 多目标优化模型在城市水资源承载力研究方面的应用[J]. 人民珠江, 2009, 30(5):12-15. (WU Qiong, CHEN Weili. Application of multi-objective optimization model to research on urban water resources carrying capacity[J]. Pearl River, 2009, 30(5):12-15. (in Chinese))
- [19] HE Renwei, LIU Shaoquan, LIU Yunwei. Application of system dynamics in analyzing the carrying capacity of water resources in karst region of Southwest China: a case study in Bijie Region, Guizhou Province [J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(11):1376-1382.
- [20] YANG J, LEI K, KHU S, et al. Assessment of water resources carrying capacity for sustainable development

- based on a system dynamics model: a case study of Tieling City, China[J]. *Water Resources Management*, 2015, 29(3):885-899.
- [21] 左其亭,张修宇. 气候变化下水资源动态承载力研究[J]. *水利学报*, 2015, 46(4):387-395. (ZUO Qiting, ZHANG Xiuyu. Dynamic carrying capacity of water resources under climate change[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(4):387-395. (in Chinese))
- [22] 李云玲,郭旭宁,郭东阳,等. 水资源承载能力评价方法研究及应用[J]. *地理科学进展*, 2017, 36(3):342-349. (LI Yunling, GUO Xuning, GUO Dongyang, et al. An evaluation method of water resources carrying capacity and application[J]. *Progress in Geography*, 2017, 36(3):342-349. (in Chinese))
- [23] 张丽洁,康艳,粟晓玲. 基于正态云模型的黄河流域水资源承载力评价[J]. *节水灌溉*, 2019, 44(1):76-83. (ZHANG Lijie, KANG Yan, LI Xiaoling. Water resources carrying capacity evaluation of Yellow River Basin based on normal cloud model[J]. *Water Saving Irrigation*, 2019, 44(1):76-83. (in Chinese))
- [24] 金菊良,陈磊,酆建强,等. 基于集对分析和风险矩阵的水资源承载力评价方法[J]. *人民长江*, 2018, 49(7):35-41. (JIN Juliang, CHEN Lei, LI Jianqiang, et al. Evaluation method of water resources carrying capacity based on set pair analysis and risk matrix[J]. *Yangtze River*, 2018, 49(7):35-41. (in Chinese))
- [25] 金菊良,董涛,酆建强,等. 区域水资源承载力评价的风险矩阵方法[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(2):46-50. (JIN Juliang, DONG Tao, LI Jianqiang, et al. Risk matrix method for evaluating regional water resources carrying capacity[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2018, 39(2):46-50. (in Chinese))
- [26] 金菊良,沈时兴,陈梦璐,等. 遗传层次分析法在区域水资源承载力评价指标体系筛选中的应用[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(2):1-6. (JIN Juliang, SHEN Shixing, CHEN Menglu, et al. Application of genetic analytic hierarchy process in screening the evaluation index system of regional water resources carrying capacity[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2019, 40(2):1-6. (in Chinese))
- [26] 崔东文,金波. 基于WDO-PP模型的文山州近10年水资源承载力评价[J]. *水利经济*, 2016, 34(6):43-49. (CUI Dongwen, JIN Bo. Evaluation of carrying capacity of water resources of Wenshan Prefecture in latest 10 years based on WDO-PP model[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2016, 34(6):43-49. (in Chinese))
- [27] 于倩雯,吴凤平. 基于组合赋权的青海省水资源承载力模糊物元分析[J]. *水利经济*, 2017, 35(2):26-30. (YU Qianwen, WU Fengping. Fuzzy matter-element analysis of carrying capacity of water resources in Qinghai Province based on combination weighting[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2017, 35(2):26-30. (in Chinese))
- [28] 邹乐乐,金菊良,周玉良. 基于遗传模糊层次分析法的水库诱发地震综合风险评价指标体系筛选模型[J]. *地震地质*. 2010, 32(4):628-637. (ZOU Lele, JIN Juliang, ZHOU Yuliang. Filtration model of integrated risk assessment index system of reservoir induced seismicity based on fuzzy analytic hierarchy process and accelerating genetic algorithm [J]. *Seismology and Geology*, 2010, 32(4):628-637. (in Chinese))
- [29] 金菊良,魏一鸣,潘金锋. 修正AHP中判断矩阵一致性的加速遗传算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2004, 24(1):63-69. (JIN Juliang, WEI Yiming, PAN Jinfeng. Accelerating genetic algorithm for correcting judgement matrix consistency in analytic hierarchy process [J]. *System Engineering Theory and Practice*, 2004, 24(1):63-69. (in Chinese))
- [30] 金菊良,杨晓华,丁晶. 标准遗传算法的改进方案:加速遗传算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2001, 21(4):8-13. (JIN Juliang, YANG Xiaohua, DING Jing. An improved simple genetic algorithm: accelerating genetic algorithm[J]. *System Engineering Theory and Practice*, 2001, 21(4):8-13. (in Chinese))
- [31] 季晓翠,王建群,傅杰民. 基于云模型的滨海小流域水生态文明评价[J]. *水资源保护*, 2019, 35(2):74-79. (JI Xiaocui, WANG Jianqun, FU Jiemin. Evaluation of water ecological civilization in small coastal watershed based on cloud model[J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(2):74-79. (in Chinese))

(收稿日期:2019-03-12 编辑:郑孝宇)

