



哈尔滨市水资源环境承载能力评价

马诗敏, 崔健, 郇恒飞, 孙家全

中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034

摘要: 哈尔滨市是全国主要缺水城市之一。为了合理使用水资源, 维持水资源的可持续发展状况, 维护社会经济, 进行哈尔滨市水资源环境承载能力评价研究显得十分必要。本研究分析了水资源环境承载力主要影响因素, 采用隶属度函数确定各单项指标隶属度, 结合 Delphi 法得出评判结果矩阵, 并采用数据离散化, 提高了此评价方法的表达能力。根据水资源环境承载力评价结果, 分析了哈尔滨市水资源环境承载力变化趋势, 为以后相关研究提供了依据。

关键词: 水资源; 环境承载力; 隶属函数; Delphi 法; 哈尔滨市

ENVIRONMENT CARRYING CAPACITY EVALUATION OF WATER RESOURCES IN HARBIN CITY

MA Shi-min, CUI Jian, HUAN Heng-fei, SUN Jia-quan

Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China

Abstract: Harbin is one of the major water shortage cities in China. To rationally utilize water resources, maintain the sustainable development of water resources and social economy, it is necessary to evaluate the environment carrying capacity of water resources in Harbin. In this study, the main influencing factors of water resources environment carrying capacity are analyzed, the membership function is used to determine the membership degree of each single index, the evaluation result matrix is obtained with combination of Delphi method, and the expressiveness of evaluation method is improved by data discretization. According to the evaluation results of water resources environment carrying capacity, the change trend of water resource-environment carrying capacity in Harbin is analyzed, which provides basis for related research in future.

Key words: water resources; environment carrying capacity; membership function; Delphi method; Harbin City

0 前言

中国是人口大国, 但是淡水资源较少, 仅为全球的 6%。中国北方地区国土面积占全国的 64%, GDP 占 44%, 人口占 60%, 但水资源仅为 19%^[1]。随着我国社会经济发展, 用水需求量激增, 地表水出现了污染及匱

乏、地下水出现了超采及污染现象, 天然水资源存储量逐年减少。哈尔滨市多年平均水资源总量为 $114.24 \times 10^8 \text{ m}^3$, 人均水资源占有量 $1\ 350 \text{ m}^3$, 市民年占有水量仅占世界人均水平的 12.5%^[2]。为了合理地使用水资源, 使社会经济能够持续、稳定、健康地发展, 进

收稿日期: 2022-01-16; 修回日期: 2023-04-11. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局项目“东北振兴区资源环境承载能力监测评价”(DD20221730).

作者简介: 马诗敏(1967—), 女, 博士, 正高级工程师, 从事环境地质调查与评价工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail// xamashimin@126.com

行新时期的水资源环境承载能力评价研究显得十分必要。

许多学者对水资源的承载力进行了探讨^[2-15]。汪恕诚将水环境承载力定义为在一定的水域,其水体能够继续被使用,并仍保持良好生态系统运作时,所能容纳污水及污染物的最大能力^[1];李清龙等认为水环境承载力是某一时期、某种状态或条件下,满足某一环境质量要求,评价区域在自我调节状态下,能够支撑人口、经济及社会可持续发展的能力^[2];侯丽敏等将水环境承载力定义为在某一特定时期、某种状态或条件下,某流域(区域)水环境系统以自我维持、自我调节,可持续保持良好生态系统状态为前提,所支撑的人口、生态、经济及维持社会可持续发展能力^[3]。

本研究对水环境承载能力做如下描述:在一定的时期,一定的水域,以一定的环境质量要求为依据,以水环境能够自我调节,可持续发挥其正常水平为前提,能够支撑人口、生态及社会经济可持续发展的最大规模。

本研究参考了《“十四五”水安全保障规划》《哈尔滨市国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》《哈尔滨统计年鉴》及《水资源公报》,根据社会经济可持续发展和生态环境保护对水资源环境的要求,查清哈尔滨市水资源及其开发利用现状,开展水资源环境承载能力评价研究,为水资源可持续利用提供技术支撑。

1 哈尔滨水资源环境承载力评价指标体系构建

根据国家发展改革委、水利部编制的《“十四五”水安全保障规划》,本研究采用水资源支撑能力、水资源需水压力、水生态涵养能力、社会压力、水资源安全利用等5个方面内容构建哈尔滨水资源环境承载能力评价指标体系。

1.1 构建原则

(1)系统性原则:参考了《“十四五”水安全保障规划》《哈尔滨市国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》《哈尔滨统计年鉴》及《水资源公报》,并搜集参考各类技术规范,选取相互独立,又彼此联系的指标,构成评价指标体系。

(2)科学性原则:以专业知识角度,深入分析资

源、环境、生态环境等方面,选取的指标体系能够客观地反映区域水资源环境利用情况和生态系统结构。尽量选择那些具有综合性的、有代表性的指标。评价指标的选取必须保证评价结果真实性与科学性。

(3)可行性原则:指标选取既要符合理论要求,又要考虑数据获取难易程度,指标选取保持真实性和实用性;选取易于在实际评价领域中应用的评价方法。

(4)综合性原则:指标选择要考虑周全,统筹兼顾,从整体出发,结合《“十四五”水安全保障规划》,全面地反映影响水资源环境承载能力的各个方面^[16]。

1.2 构建分类框架及指标体系

基于指标体系建立原则,构建评价指标体系,包括目标层、系统层、指标层。

(1)目标层确立:指标体系目标层是对评价对象总目标的综合描述和整体反映,本研究以研究区水资源环境承载能力作为目标层。

(2)系统层确立:系统是具有一定层次的特定功能有机整体,由若干相互作用、相互依赖的多个要素组成。根据《“十四五”水安全保障规划》,确定水资源支撑能力、水资源需水压力、水生态涵养能力、社会压力、水资源安全利用等5个方面为系统层。

(3)指标层确立:深入分析哈尔滨地区水资源环境,将系统层内涵进行分解,根据属性不同选择相应指标。水资源支撑能力由人均水资源占有量、地表水优良比例、水资源开发利用指标层组成;水资源需水压力由人均日生活用水量、单位灌溉面积用水量、万元工业增加值用水量、万元GDP用水量、工业用水重复利用率指标层组成;水生态涵养能力由生态环境用水率、森林覆盖率、人均公共绿地面积指标层组成;社会压力由人口密度、城市化率指标层组成;水资源安全利用由用水总量、万元GDP用水量下降率、万元工业增加值用水量下降率、农田灌溉水有效利用系数、饮用水水源地水量达标率、农村自来水普及率、城区污水处理率指标层组成。指标层共包括20个指标。

水资源环境承载力分为低(e1)、中(e2)、高(e3)三个等级,水资源环境承载能力评价指标体系见表1。

表 1 水资源环境承载能力评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of environment carrying capacity of water resources

目标层	准则层	指标层	指标	属性	数据	数据来源	评判标准			依据标准
							低	中	高	
水资源支撑能力			人均水资源占有量/m ³	正	1350	哈尔滨市人民政府网站	<1000	1000~2000	>2000	国际公认的标准
			地表水优良比例/%	正	84.6	哈尔滨市人民政府网站	<83.4	83.4~84.9	>84.9	《“十四五”水安全保障规划》
			水资源开发利用率/%	正	低	哈尔滨市人民政府网站	<20	20~40	>40	《哈尔滨市生态环境保护“十四五”规划》(征求意见稿)
水资源需水压力			人均日生活用水量/L	负	68	哈尔滨市人民政府网站	<80	80~100	>100	《城市居民生活用水量标准(GB/T 50331—2002)》
			单位灌溉面积用水量/(m ³ /hm ²)	负	低	《哈尔滨市生态环境保护“十四五”规划》(征求意见稿)	<6000	6000~7500	>7500	《哈尔滨市生态环境保护“十四五”规划》(征求意见稿)
			万元工业增加值用水量/m ³	负	90	哈尔滨市人民政府网站	<50	50~90	>90	哈尔滨“十三五”经济社会主要发展指标
			万元 GDP 用水量/m ³	负	124.41	《哈尔滨市生态环境保护“十四五”规划》(征求意见稿)			>57.2	水利部 2020 全国万元 GDP 用水量平均值
水环境承载力			工业用水重复利用率/%	正	95	哈尔滨市双城区国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要	<80	80~94	>94	水利部《工业废水循环利用实施方案》2025 年目标
			生态环境用水率/%	负	1.15	《哈尔滨市生态环境保护“十四五”规划》(征求意见稿)	<1	1~3.4	>3.4	《哈尔滨市生态环境保护“十四五”规划》(征求意见稿)
		水生态涵养能力	森林覆盖率/%	正	46	哈尔滨“十四五”开局之年 2021 年数据	<10	10~40	>10	《森林法》及哈尔滨市“十四五”生态环境保护规划主要指标
			人均公共绿地面积/m ²	正	10.4	统计年鉴	<10	10~14.8	>14.8	《2020 年中国国土绿化状况公报》
		社会压力	人口密度/(人/km ²)	正	104.19	2020 年第七次人口普查数据	<100	100~300	>300	2020 年第七次人口普查数据
			城市化率/%	正	62	统计年鉴	<60	60~64.72	>64.72	国家发展改革委资料
			用水总量/10 ⁸ m ³	负	62.67	哈尔滨市人民政府网站资料	<73.8	73.8~74.50	>74.50	哈尔滨市人民政府网站资料(2020、2025 年标准)
			万元地区生产总值用水量下降率/%	负	24	哈尔滨市人民政府网站	<16	16~28	>28	“十四五”节约型社会建设主要目标指标;《“十四五”水安全保障规划》
			万元工业增加值用水量下降率/%	负	26	哈尔滨市人民政府网站	<16	16~39.6	>39.6	“十四五”节约型社会建设主要目标指标;《“十四五”水安全保障规划》
		水资源安全利用	农田灌溉水有效利用系数	正	0.626	哈尔滨市人民政府网站	<0.565	0.565~0.58	>0.58	“十四五”节约型社会建设主要目标指标;《“十四五”水安全保障规划》
		饮用水水源地水量达标率/%	正	100	哈尔滨“十四五”开局之年 2021 年数据			>95	全国重要饮用水水源地安全保障达标建设目标要求	
		农村自来水普及率/%	正	95	哈尔滨市人民政府网站	<83	83~84	>84	水利部统计数据;《“十四五”水安全保障规划》	
		城区污水处理率/%	正	95.23	哈尔滨市人民政府网站资料	<95.05	95.05~97.53	>97.53	《2020 年城乡建设统计年鉴》; 2020 年全国县城污水处理率统计数据	

2 评价数学模型

前人通过各种方法对水资源承载力进行了研究:陈文婷等采用时差相关分析和模糊神经网络判断白洋淀流域水环境可持续状态^[17];马诗敏等采用层次分析法、专家打分法(Delphi法),确定了评价指标体系中各指标权重,对地下水环境进行综合评价及可开采潜力进行分析,为地下水资源的合理利用提供了依据^[18];高素莲等以《水环境承载力评价方法(试行)》对济南市水环境承载力进行评价^[19];王晓艳等结合各项指标的变异程度采用AHP-熵权法对水环境承载力进行综合评价,计算出各项指标的权重,为多指标综合评价提供依据^[20];顾琦玮等以北京市朝阳区为例,构建水资源、水污染、水环境状态和生态功能的PSR逻辑关系,采用ANP-正态云模型对水环境承载力进行评价^[21];万炳彤等为提高模型预测精度,利用交叉验证法对SVR参数进行优化,分析水环境演变趋势及空间差异^[22]。

由于水资源环境承载能力评价指标等级之间没有明确界限,它的划分是模糊界限划分,本研究采用隶属度函数确定各单项指标隶属度。此方法兼顾了分析方式模糊性,结合Delphi法得出评判结果矩阵,并采用数据离散化,以提高此评价方法的表达能力。

2.1 隶属度函数计算过程

(1)对区域内各单项指标进行分级综合评价,确定主要评价因素 u_i ($i=1,2,\dots,20$)和评价等级 $E(j)$ ($j=1,2,3$),即建立评价因素集 U 和评价等级集合 E :

$$U=\{u_1, u_2, \dots, u_{20}\}; E=\{e_1, e_2, e_3\}$$

(2)根据评价因素 u_i 与评价等级 e_j 的模糊关系,确定或选择其隶属函数

$$u_{ij}(a < x_i \leq b) = \frac{1}{b-a} \int_a^b u_{ij}(x) dx$$

$$(i=1,2,\dots,m; j=1,2,3)$$

矩阵中 u_{ij} 为对应因素 U_i 的对应等级 e 的隶属度,可推测各评价因素各分级数值。将隶属度进行模糊化处理,消除了各评价等级相差一级的现象,使隶属函数在各级之间能平滑过渡。对于 e_2 级即中间区间,隶属度为1,令其落在区间中点,中点向两侧按线性递减处理,两侧边缘点的隶属度为0.5。对 e_1 、 e_3 两侧区间,则令距临界值越远属两侧区间的隶属度

越大,隶属度为0.5在临界值上则属两侧等级,按上述设想构造了各评价等级的隶属函数的计算式。令各评价因素的 u_{i1} 和 u_{i2} 等级的临界值为 e_1 ; u_{i2} 和 u_{i3} 的临界值为 e_2 ; 等级区间中点值为 e_2 , $e_2=(e_1+e_3)/2$ 。对于正向指标各评语集相对隶属度函数的计算公式为:

$$u_{e1}(x_i) = \begin{cases} 0.5(1 + \frac{e_1 - x_i}{e_2 - x_i}), & x_i \geq e_1 \\ 0.5(1 - \frac{x_i - e_1}{e_2 - e_1}), & e_2 \leq x_i < e_1 \end{cases}$$

$$u_{e2}(x_i) = \begin{cases} 0.5(1 - \frac{e_1 - x_i}{e_2 - x_i}), & x_i \geq e_1 \\ 0.5(1 + \frac{x_i - e_1}{e_2 - e_1}), & e_2 \leq x_i < e_1 \\ 0.5(1 + \frac{e_3 - x_i}{e_3 - e_2}), & e_3 \leq x_i < e_2 \\ 0.5(1 - \frac{e_3 - x_i}{e_2 - x_i}), & x_i < e_3 \\ 1, & x_i \geq e_3 \end{cases}$$

$$u_{e3}(x_i) = \begin{cases} 0.5(1 + \frac{e_3 - x_i}{e_2 - x_i}), & x_i < e_3 \\ 0.5(1 - \frac{x_i - e_3}{e_2 - e_3}), & e_3 \leq x_i < e_2 \end{cases}$$

对于逆向指标各评语集相对隶属度函数的计算公式为:

$$u_{e1}(x_i) = \begin{cases} 0.5(1 + \frac{e_1 - x_i}{e_2 - x_i}), & x_i < e_1 \\ 0.5(1 - \frac{x_i - e_1}{e_2 - e_1}), & e_1 \leq x_i < e_2 \end{cases}$$

$$u_{e2}(x_i) = \begin{cases} 0.5(1 - \frac{e_1 - x_i}{e_2 - x_i}), & x_i < e_1 \\ 0.5(1 + \frac{x_i - e_1}{e_2 - e_1}), & e_1 \leq x_i < e_2 \\ 0.5(1 + \frac{e_3 - x_i}{e_3 - e_2}), & e_2 \leq x_i < e_3 \\ 0.5(1 - \frac{e_3 - x_i}{e_2 - x_i}), & x_i < e_1 \\ 1, & x_i \geq e_1 \end{cases}$$

$$u_{e3}(x_i) = \begin{cases} 0.5(1 + \frac{e_3 - x_i}{e_2 - x_i}), & x_i \geq e_3 \\ 0.5(1 - \frac{e_3 - x_i}{e_3 - e_2}), & e_2 \leq x_i < e_3 \end{cases}$$

根据哈尔滨市各指标的具体数值,通过上述公式计算出各评判因素对应于各个等级 e_1 、 e_2 和 e_3 的隶属度如下:

$$R = \begin{pmatrix} 0.150 & 0.850 & 0 \\ 0 & 0.930 & 0.070 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.875 & 0.125 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0.417 & 0.583 & 0 \\ 0.48 & 0.52 & 0 \\ 0.496 & 0.504 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.833 & 0.167 \\ 0.076 & 0.924 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0.427 & 0.537 & 0 \end{pmatrix}$$

2.2 评价指标权重矩阵确定

水环境是复杂多变的, 可以看作是由多种因素交织而成的复杂系统. 在对系统进行评价时, 应客观、准确地把握系统的特点, 根据各因素重要程度分别赋予不同权重, 才能揭示其发展规律. 本研究根据哈尔滨水环境的具体情况, 结合 Delphi 法, 比较指标间的重要程度, 采用 AHP 法构造评价矩阵, 求解各评价指标权重. 根据计算结果构造权重矩阵 A 如下:

$$A = \begin{pmatrix} 0.0258 & 0.0258 & 0.0555 & 0.0285 & 0.0739 \\ 0.0699 & 0.0335 & 0.0698 & 0.0699 & 0.0205 & 0.0415 & 0.0322 \\ 0.0641 & 0.0907 & 0.0228 & 0.0525 & 0.0494 & 0.0907 \\ 0.0415 & 0.0415 \end{pmatrix}$$

2.3 水资源环境承载能力评价

根据上述 A 和 R 矩阵数值, 将 $B=A \cdot R$ 按普通矩阵计算规则即可求得哈尔滨市水环境承载力的最终评判结果矩阵 B 如下:

$$B = (0.327 \quad 0.271 \quad 0.402)$$

为了定量反映各级别隶属度对目标的影响程度, 对评价标准 e1、e2、e3 在 0~1 之间进行离散, 令 $\beta = (0.95, 0.5, 0.05)$, 级别越高对水环境承载力的贡献就

越高, 评分值也就越高, 表明水环境承载力越大. 综合评价取上述计算所得到的 b_j 和 β_j 值, 用如下公式进行计算:

$$\beta = \frac{\sum_{j=1}^3 (b_j \cdot \beta_j)}{\sum_{j=1}^3 b_j}$$

哈尔滨水环境承载力综合评价成果 b_j 值对 e1、e2 和 e3 的隶属度分别为 0.327, 0.271, 0.402, 得到哈尔滨水环境承载力的现状综合评分值为 0.467, 哈尔滨市水环境承载力处于中等偏高水平.

3 分析及建议

(1) 水资源支撑能力: 按照国际公认的标准, 人均水资源低于 3 000 m³ 为轻度缺水, 低于 2 000 m³ 为中度缺水, 低于 1 000 m³ 为重度缺水, 低于 500 m³ 为极度缺水. 哈尔滨人均水资源占有量为 1 350 m³, 属于中度缺水地区. 主要原因是水资源开发利用效率较低, 水资源利用效率不高, 污水处理厂尾水回用能力不足, 农业灌溉用水效率偏低. 整体来看, 哈尔滨水资源支撑能力较弱.

(2) 水资源需水压力: 城市居民生活用水量标准为 80~100 L(人·d), 哈尔滨市仅为 68 L(人·d), 用水量较低; 单位灌溉面积用水量高于评判标准范围 6 000~7 500 m³/hm²; 万元工业增加值用水量为 90 m³, 接近评判标准范围 50~90 m³ 上限值; 万元 GDP 用水量为 124.41 m³, 远高于评判标准值 57.2 m³; 工业用水重复利用率为 95%, 高于评判标准范围 80~94%. 整体来看, 水资源需水压力较低.

(3) 水生态涵养能力: 生态环境用水率为 1.15%, 低于全国平均生态环境用水率(3.4%). 人均公共绿地面积为 10.4 m², 低于城市人均公园绿地面积达 14.8 m² 的水平. 整体来看, 哈尔滨水生态涵养能力较弱.

(4) 社会压力: 第六次人口普查数据为 1 064 万, 第七次人口普查数据为 933 万, 减少了 131 万人口. 人口密度、城市化率均低于正常值, 社会压力较高.

(5) 水资源安全利用: 用水总量、万元 GDP 用水量下降率及万元工业增加值用水量下降率均低于限值. 农田灌溉水有效利用系数、饮用水水源地水质达标率、农村自来水普及率、城区污水处理率均高于限值. 整

体来看,水资源安全利用效果较好。

综合来看,哈尔滨市水源地水质状况良好,水质安全能得到保证。水环境承载力处于中等偏高水平,但人均水资源占有量、城市居民生活用水量均低于标准值,水生态涵养能力均较弱,供需矛盾突出。

建议对节水管理体制进行改革,重点应从农业、工业与日常生活节水方面强化节水体系建设,加强节水改造与升级,减少各类输水、配水损失,形成市场化运行机制,完善水资源管理制度,通过水生态修复增加水量、改善水环境质量、增强水生态涵养能力。

参考文献(References):

- [1]陈茂山,吴浓娣,廖四辉. 深刻认识当前我国水安全呈现出新老问题相互交织的严峻形势[J]. 水利发展研究, 2018, 18(9): 2-7.
Chen M S, Wu N D, Liao S H. Current situation of water security in China: Old and new problems [J]. Water Resources Development Research, 2018, 18(9): 2-7. (in Chinese)
- [2]李佳鸿. 黑龙江省水资源承载力评价及水资源优化配置研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2016.
Li J H. Evaluation of water resources carrying capacity and optimal allocation of water resources in Heilongjiang Province [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016.
- [3]汪恕诚. 水环境承载能力分析 with 调控[J]. 水利发展研究, 2002, 2(1): 2-6.
Wang S C. Analysis and control of water environment carrying capacity [J]. Water Resources Development Research, 2002, 2(1): 2-6. (in Chinese)
- [4]李清龙,张焕祯,王路光,等. 水环境承载力及其影响因素[J]. 河北工业科技, 2004, 21(6): 30-32.
Li Q L, Zhang H Z, Wang L G, et al. Water environmental carrying capacity and the affecting factors [J]. Hebei Journal of Industrial Science & Technology, 2004, 21(6): 30-32.
- [5]侯丽敏,岳强,王彤. 我国水环境承载力研究进展与展望[J]. 环境保护科学, 2015, 41(4): 104-108.
Hou L M, Yue Q, Wang T. Research and prospect of the theoretical framework of water environmental carrying capacity in China [J]. Environmental Protection Science, 2015, 41(4): 104-108.
- [6]秦伯强,施雅风. 青海湖水文特征及水位下降原因分析[J]. 地理学报, 1992, 47(3): 267-273.
Qin B Q, Shi Y F. The hydrological characteristics and the causes of the declining of water level in Qinghai Lake [J]. Acta Geographica Sinica, 1992, 47(3): 267-273.
- [7]许有鹏. 干旱区水资源承载力综合评价研究——以新疆和田河流域为例[J]. 自然资源学报, 1993, 8(3): 229-237.
Xu Y P. A study of comprehensive evaluation of the water resource carrying capacity in the arid area: A case study in the Hetian River Basin of Xinjiang [J]. Journal of Natural Resources, 1993, 8(3): 229-237.
- [8]匡耀求,孙大中. 基于资源承载力的区域可持续发展评价模式探讨——对珠江三角洲经济区可持续发展的初步评价[J]. 热带地理, 1998, 18(3): 249-255.
Kuang Y Q, Sun D Z. An assessment of sustainability of regional development based on the carrying capacity of resources: A case study of the Pearl River Delta economic zone [J]. Tropical Geography, 1998, 18(3): 249-255.
- [9]汪党献,王浩,马静. 中国区域发展的水资源支撑能力[J]. 水利规划设计, 2001(4): 13-18.
Wang D X, Wang H, Ma J. Regional water resources development capacity in China [J]. Water Resources Planning and Design, 2001(4): 13-18. (in Chinese)
- [10]王在高. 清镇市水资源的现状分析及持续开发的设想[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2001, 19(1): 22-25.
Wang Z G. Analysis of the present situation and tentative plan of sustainable exploitation for water resources in Qingzhen [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Science), 2001, 19(1): 22-25.
- [11]许新宜. 浅谈水资源的承载能力与合理配置[J]. 中国水利, 2002(10): 42-44.
Xu X Y. Analysis of water load capacity and rational distribution [J]. China Water Resources, 2002(10): 42-44.
- [12]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.
Cheng G D. Evolution of the concept of carrying capacity and the analysis framework of water resources carrying capacity in northwest of China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(4): 361-367.
- [13]蒋剑勇,薛毅. 浙江省水资源优化配置的思考[J]. 生态经济, 2004(S1): 150-152.
Jiang J Y, Xue Y. Consideration on optimal allocation of water resources in Zhejiang [J]. Ecological Economy, 2004(S1): 150-152. (in Chinese)
- [14]耿福明. 区域水资源承载力分析及配置研究[D]. 南京:河海大学, 2007.
Geng F M. Research on regional water resources carrying capacity and allocation [D]. Nanjing: Hohai University, 2007.
- [15]段春青,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 C Q, Liu C M, Chen X N, et al. Preliminary research on regional water resources carrying capacity conception and method [J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(1): 82-90.

- Langmaitan area, East Kunlun[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(5): 1508-1522.
- [40]莫宣学. 岩浆作用与青藏高原演化[J]. *高校地质学报*, 2011, 17(3): 351-367.
- Mo X X. Magmatism and evolution of the Tibetan Plateau [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2011, 17(3): 351-367.
- [41]郑永飞, 陈伊翔. 大陆俯冲带壳幔相互作用[J]. *地球科学*, 2019, 44(12): 3961-3983.
- Zheng Y F, Chen Y X. Crust-mantle interaction in continental subduction zones[J]. *Earth Science*, 2019, 44(12): 3961-3983.
- [42]王涛, 王晓霞, 郭磊, 等. 花岗岩与大地构造[J]. *岩石学报*, 2017, 33(5): 1459-1478.
- Wang T, Wang X X, Guo L, et al. Granitoid and tectonics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(5): 1459-1478.
- [43]张薇洁. A型花岗岩成因的热力学模拟[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- Zhang W J. Thermodynamic modeling of the origin of A-type granites [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [44]王金芳, 李英杰, 李红阳, 等. 内蒙古西乌旗德勒哈达早白垩世A型花岗岩形成时代: 锆石 U-Pb 定年证据[J]. *中国地质*, 2018, 45(1): 197-198.
- Wang J F, Li Y J, Li H Y, et al. Formation age of the Delehada Early Cretaceous A-type granite in Xiwu Banner, Inner Mongolia: evidence from zircon U-Pb chronology[J]. *Geology in China*, 2018, 45(1): 197-198.
- [45]王存智, 黄志忠, 赵希林, 等. 下扬子地区姚村 A型花岗岩年代学、地球化学特征及岩石成因[J]. *中国地质*, 2021, 48(2): 549-563.
- Wang C Z, Huang Z Z, Zhao X L, et al. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of Early Cretaceous Yaocun A-type granite in the Lower Yangtze Region[J]. *Geology in China*, 2021, 48(2): 549-563.
- [46]尚永明, 李小伟, 祝新友, 等. 内蒙古赤峰五十家子岩体成因及其对岩石圈伸展减薄的指示[J]. *中国地质*, 2022, 49(4): 1323-1345.
- Shang Y M, Li X W, Zhu X Y, et al. Petrogenesis and its implications for the lithospheric thinning of the Wushijiazui pluton in Chifeng, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 2022, 49(4): 1323-1345.
- [47]Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters [J]. *Chemical Geology*, 1985, 48: 43-55.
- [48]王泉, 余友, 韦健, 等. 黑龙江东部伊春-延寿晚三叠世—早侏罗世花岗岩岩基带深部约束机制[J]. *矿产勘查*, 2017, 8(2): 229-238.
- Wang Q, Yu Y, Wei J, et al. Deep constraints mechanism of Late Triassic-Early Jurassic Yichun-Yanshou granite batholith belt, eastern Heilongjiang[J]. *Mineral Exploration*, 2017, 8(2): 229-238.

(上接第 354 页/Continued from Page 354)

- [16]马诗敏, 徐新阳, 倪金, 等. 陆海统筹资源环境承载能力评价体系构建[J]. *地质与资源*, 2021, 30(2): 186-192.
- Ma S M, Xu X Y, Ni J, et al. Evaluation system construction for the resources and environment carrying capacity of sea-land coordination [J]. *Geology and Resources*, 2021, 30(2): 186-192.
- [17]陈文婷, 夏青, 苏婧, 等. 基于时差相关分析和模糊神经网络的白洋淀流域水环境承载力评价预警[J]. *环境工程*, 2022, 40(6): 261-271.
- Chen W T, Xia Q, Su J, et al. Evaluation and early warning of water environmental carrying capacity in Baiyangdian Basin based on time-difference correlation analysis and fuzzy neural network [J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40(6): 261-271.
- [18]马诗敏, 李旭光, 杨泽, 等. 内蒙古奈曼旗水环境承载力评价[J]. *地质与资源*, 2017, 26(6): 603-607.
- Ma S M, Li X G, Yang Z, et al. Evaluation on the water environment bearing capacity in Naiman Qi, Inner Mongolia [J]. *Geology and Resources*, 2017, 26(6): 603-607.
- [19]高素莲, 姜腾龙, 张峰, 等. 济南市水环境承载力评价[C]/中国环境科学学会 2021 年科学技术年论文集(二). 北京: 中国环境科学学会, 2021: 49-51.
- Gao S L, Jiang T L, Zhang F, et al. Evaluation of water environment carrying capacity in Jinan[C]/Beijing: Chinese Society for Environmental Sciences, 2021: 49-51. (in Chinese)
- [20]王晓艳, 章四龙, 刘磊. 基于 AHP-熵权法的水环境承载力模糊综合评价[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(9): 206-212.
- Wang X Y, Zhang S L, Liu L. Fuzzy comprehensive evaluation of water environmental carrying capacity based on AHP-entropy method [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44(9): 206-212.
- [21]顾琦玮, 张亮, 赵晓辉, 等. 基于 ANP-正态云模型的区域水环境承载力评价[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2021, 19(5): 506-515.
- Gu Q W, Zhang L, Zhao X H, et al. Evaluation of regional water environment carrying capacity based on ANP-normal cloud model[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2021, 19(5): 506-515.
- [22]万炳彤, 赵建昌, 鲍学英, 等. 基于 SVR 的长江经济带水环境承载力评价[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(2): 896-905.
- Wan B T, Zhao J C, Bao X Y, et al. Evaluation of water environment bearing capacity of Yangtze River economic belt based on SVR model [J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(2): 896-905.