

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20210106

长白山区水资源承载力综合评价及影响因素识别

聂思雨^{1,2}, 张旭^{1,2}, 李红艳^{1,2}, 周艳春^{1,2}

(1. 长春工程学院 水利与环境工程学院, 吉林 长春 130021;
2. 吉林省城市污水处理重点实验室, 吉林 长春 130021)

摘要:为推进长白山区经济发展和水资源合理开发利用,选取14个指标建立长白山区水资源承载力综合评价指标体系,采用熵权法的TOPSIS模型对2015—2019年的长白山区水资源承载力进行综合评价,并用障碍因素模型分析其影响因素。结果表明:长白山区水资源承载力综合评价指数处于0.284~0.73,具有显著的地区差异性,从西至东,水资源承载力呈现减小趋势,临江县与长白县的水资源可承载力较高,安图与和龙市承载能力低,其中和龙市处于弱可承载状态;人口是影响总体水资源承载力的首要障碍因子,通过优化水资源配置,调整用水结构,能够提升和保持该地区的水资源承载能力。

关键词:长白山区;水资源承载力;熵权法;TOPSIS模型;障碍因子

中图分类号:TV213

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2022)02-0042-06

0 引言

在新型城市化快速发展过程中,水资源短缺等问题日益突出^[1],部分地区水资源开发利用远超过了水资源承载能力^[2],因此,水资源承载力的综合评价是水资源与经济社会可持续发展理论基础。20世纪以来承载力相继被应用到社会-经济-自然系统的研究中^[3]。国内外学者在水资源承载力的概念、评价方法等^[4]展开了综合研究,通常评价其等级来分析水资源利用情况。

目前,主要的评价方法有系统动力学法、TOPSIS模型法、模糊综合评价法以及多种方法的集成应用^[5-7],为了降低人为因素的影响,TOPSIS模型可以依托熵值法来确定权重,从而缩减主观评价误差。此外,大多以时间跨度相对较短的年平均或某一代表年份为研究尺度,且以西北,华北等水资源短缺问题较为突出的区域作为研究对象^[8],而对长白山区多年水资源承载力评价研究相对较少。长白山区是我国重要的水源保护区,面临区域水资源量丰富但水资源利用效率低、部分矿泉水资源遭到无序开发等问题^[9],为

促进和保障长白山水源源头区与吉林省中下游城市的经济社会长期平稳快速的发展,对长白山区水资源承载能力的研究显得尤为迫切。

综上所述,以长白山区水源源头区所涉及的县市为研究目标,构建研究区水资源承载力评价指标体系,采用熵权TOPSIS模型进行水资源承载力的综合评价,利用障碍因子诊断模型识别水资源承载力主要影响因素,通过GIS平台探究水资源承载力的时空变化特征,为长白山区水资源合理利用及吉林省中下游地区水资源的协同发展奠定理论基础。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

长白山是松花江、图们江、鸭绿江三江之源,位于吉林省东南部(125°10'E~131°18'E,40°52'N~44°30'N),属于湿润半湿润的地区。森林覆盖率80%以上,水功能区达标率达到70%,具有良好的生态环境和广阔的发展潜力。本文选取长白山多水源的源头区为研究对象,包括安图县、和龙市、抚松县、临江市及长白朝鲜族自治县(见图1)。

收稿日期:2021-03-03

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2019YFC0409102)

作者简介:聂思雨(1989—),女,黑龙江大兴安岭人,讲师,博士研究生,主要研究方向为水生态水资源管理。E-mail:nsy727@126.com

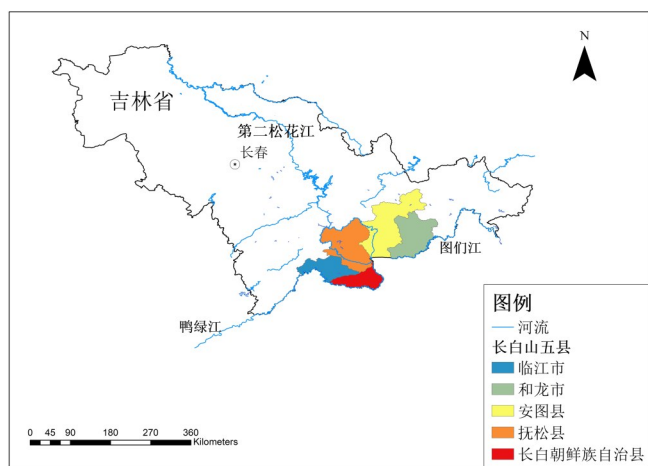


Fig.1 Location of the study area

据2015—2019年《白山市水资源公报》《延边州水资源公报》统计,和龙市用水量较大(见图2)。由于水资源量分布差异性问题的,研究区水资源承载力的综合评价不仅为长白山服务也承担着为整个流域区域经济社会发展服务,具有重要的实际意义。

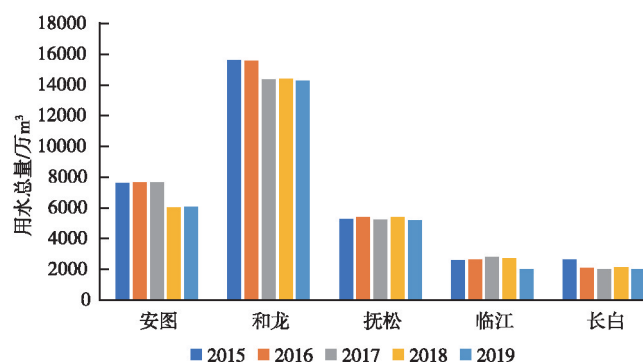


Fig.2 The water consumption of the study area during 2015—2019

1.2 数据来源

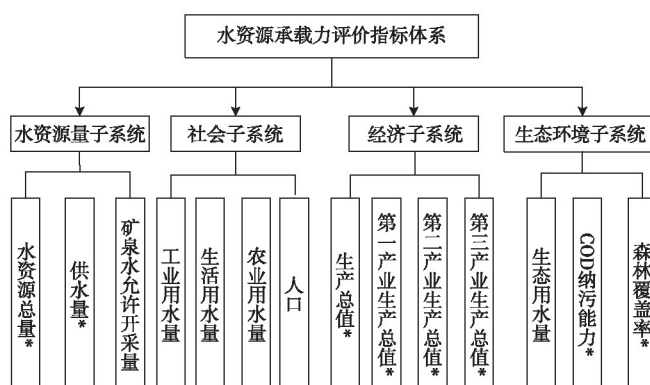
选取水资源总量、供水总量、农业用水量、人口等14个指标数据作为基础资料,数据主要参考2015—2019年《国民经济和社会发展统计公报》《延边州统计年鉴》《延边州水资源公报》《白山市水资源公报》《白山市统计年鉴》等。

2 研究方法

2.1 指标体系的构建

水资源承载力系统是复杂的综合性系统,应针对目标区域,从水资源、经济、社会、生态环境子系统出

发建立科学的指标体系^[10]。长白山区矿泉水资源丰富,水资源系统选取的指标是水资源总量、供水总量,矿泉水允许开采量。对于经济与社会系统,主要由用水量、生产总值来体现。生态环境系统同样是衡量水资源承载力的重要因子之一,区域生态环境主要包括生态需水、森林覆盖率等。因此,遵循系统性、层次性、综合性、可操作性等原则,构建长白山区水资源承载力综合评价指标体系,如图3所示。



注:带*为正向指标(指标越高越好,表示水资源承载力越优秀),未标记的指标为负向指标(指标越高,表示水资源承载力越差)。

图3 长白山区水资源承载力指标体系

Fig.3 Index system of water capacity in Changbai Mountain

2.2 综合评价方法

2.2.1 熵值法

确定评价指标权重有主观赋权法和客观赋权法。为减少主观因素的影响,本文采用客观赋权法中的熵值法来计算指标的权重^[11],具体步骤见文献[5]。最终可以得到子系统中各指标的权重(w_i)。

2.2.2 Topsis 模型

TOPSIS是较为灵便的评价手段,此方法能够按照与最优方案的接近度来排列各个目标对象的顺序,从而保证所选方案的绝佳性。利用熵值法确定权重基础上,创建规范矩阵,明确理想解,量化分析承载力所得的最优解便是正解,负理想解是承载力分析各指标的最劣解,选用欧式距离计算各个承载力指标 i 与理想解的接近度,计算承载力综合评价指数^[12]。目标对象与最优解间的距离越近,所得的综合评价指数 C_i 越接近1。

2.3 承载力评价标准的确定

通过接近度来表征水资源承载能力综合评价指数,值越大,承载能力越强^[13]。依据水利部印发的指标文件《全国水资源承载能力监测预警技术大纲》,参考前人研究中的评价指标分级标准^[14-15],将各指标对应

表1 长白山地区水资源承载力评价指标分级

Table1 Classification of water capacity in Changbai Mountain area

C 值	>0.8	[0.6,0.8]	[0.4,0.6)	[0.2,0.4)	<0.2
指标	理想承载	良好可承载	可承载	弱可承载	不可承载
水资源总量/亿 m ³	>20	[15,20]	[10,15)	[5,10)	<5
供水总量/万 m ³	>7660	[6000, 7660]	[3000,6000)	[1000,3000)	<1000
矿泉水资源允许开采量/(万 m ³ /d)	<2	[2.8, 3.1]	[4.5,7.3]	[7.3,8.4]	>10.1
工业用水/万 m ³	<360	[360,580]	(580,724]	(724,869]	>1086
生活用水/万 m ³	<656	[656,1049]	(1049,1311]	(1311,1573]	>1967
农业用水/万 m ³	<1694	[1694,2710]	(2710,3388]	(3388,4066]	>5082
人口/(万人)	<9	[9,14]	(14,20]	(20,30]	>37
生产总值/(万元)	>140	[112, 140]	[93,112)	[75, 93)	<46.5
第一产业生产总值(万元)	>10	[8,10]	[6,8)	[5,6)	<4
第二产业生产总值(万元)	>80	[60,80]	[40,60)	[30,50]	<26
第三产业生产总值(万元)	>46	[40,46]	[30,40)	[15,30)	<15
生态用水/万 m ³	<162	[162,203]	(203,244]	(244,304]	>304
COD纳污能力/(万 t/a)	>2000	[1500,2000]	[1000,1500)	[500,1000)	<500
森林覆盖率/%	>60	[35,60]	[20,35)	[10,20)	<10

表2 长白山区水资源承载力各评价指标权重

Table2 The weights of water capacity in Changbai Mountain

指标	2015	2016	2017	2018	2019	指标	2015	2016	2017	2018	2019
水资源总量	0.045	0.035	0.064	0.059	0.051	生产总值	0.068	0.068	0.102	0.098	0.098
供水总量	0.108	0.126	0.073	0.103	0.129	第一产业生产总值	0.129	0.01	0.01	0.013	0.012
矿泉水允许开采量	0.01	0.012	0.013	0.015	0.012	第二产业生产总值	0.037	0.027	0.01	0.032	0.003
工业用水	0.106	0.112	0.085	0.089	0.102	第三产业生产总值	0.006	0.004	0.013	0.045	0.021
生活用水	0.057	0.06	0.062	0.081	0.086	生态用水	0.012	0.181	0.261	0.113	0.119
农业用水	0.304	0.325	0.275	0.317	0.336	COD纳污能力	0.002	0.003	0.003	0.002	0.002
人口	0.115	0.035	0.027	0.033	0.03	森林覆盖率	0.001	0.002	0.002	0.002	0.001

着承载程度划分为5个等级(见表1)。

2.4 障碍因子识别

采用障碍因素诊断模型识别对水资源承载力产生负面作用的主要因素。计算如下:

(1)计算第 j 个指标的因子贡献度 T_j

$$T_j = w_j \quad (1)$$

(2)计算第 i 区第 j 个指标的偏离度 S_{ij}

$$S_{ij} = 1 - X'_{ij} \quad (2)$$

(3)计算第 i 区第 j 个指标的障碍因子 P_{ij}

$$P_{ij} = S_{ij} T_j / \sum_{j=1}^n S_{ij} T_j \times 100\% \quad (3)$$

3 结果与分析

3.1 水资源承载力结果分析

2015—2019年长白山区水资源承载力评价指标

权重结果(见表2),综合评价结果(见表3)。

2015—2019年研究区水资源承载力均处于可承载状态,和龙市处于弱可承载状态,临江县与长白县的水资源可承载程度相对较高,开发潜力较大。其中,2016年水资源综合评价指数差异性最为明显。基于表2中评价指标权重,农业用水量、工业用水量、生产总值较大,说明长白山区2015—2019年经济社会发展水平的变化是缩小区域差异性的原因之一。

表3 综合评价指标数据

Table3 Data on comprehensive evaluation indicators

指标	2015	2016	2017	2018	2019
安图	0.561	0.625	0.411	0.584	0.56
和龙	0.383	0.284	0.371	0.256	0.265
抚松	0.481	0.521	0.642	0.585	0.595
临江	0.628	0.715	0.593	0.651	0.669
长白	0.637	0.73	0.6	0.631	0.626

3.1.1 水资源承载力时间演变特征

2017年,安图县水资源承载力综合评价指数显著下降,从可承载状态降至弱可承载临界处。临江和长白县最大达到0.7以上,接近理想可承载(见图4)。2015之后,和龙地区水资源承载程度呈下降趋势,可承载力状态接近弱可承载的下边界,变化显著。

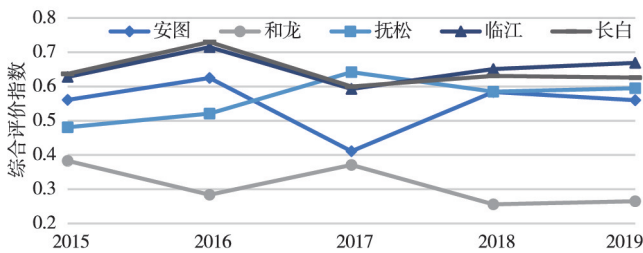


图4 水资源承载力综合评价指数趋势
Fig.4 Trends of comprehensive evaluation index

安图县在2017年后水资源量显著降低,生态用水量小幅增加,和龙市在2016年后水资源量及生产总值负向变化明显,抚松、临江、长白地区生态用水量、生产总值、水资源总量正向变化较大(见图5),说明时间维度上水资源承载力呈较好趋势受水资源量影响之外,主要与生态环境、经济社会两个子系统指标改善有密切联系,表明水资源承载力会随着经济社会不断发展、生态环境保护力度的加大不断提升。

3.1.2 水资源承载力空间演变特征

基于ArcGIS获取研究区水资源承载力的空间分布图(见图6),由西至东,水资源承载力程度呈现减小趋势,2015—2019年5县区水资源承载力空间差异性明显,按评价等级可划分为可承载区和良好可承载区。

良好可承载区:主要分布在临江县、抚松县和长

白县,该类型区内径流系数较高,人均水资源可利用量较大,超过2200 m³/人,具有开发潜力。可承载区:包括安图与和龙市,人均水资源可利用量相对较小,且近5年人均总用水量较大。因此,水资源承载力的提高可能与经济社会结构有关,使得水资源支撑社会经济发展的潜力空间有限。

3.2 水资源承载力主要影响因素计算及结果分析

依据各评价指标障碍因子的核算结果(见表4),表明水资源量、人口、生活用水量、生态用水量在个别县市障碍度均较高,人口是最高的障碍因子。

和龙与安图地区水资源承载力的障碍因素主要为生态、生活用水、人口。和龙地区水资源承载力相对较弱的原因是人均水资源量较少,天然水资源禀赋条件相对较弱,另一个因素是人均用水量较大造成的,这可能与用水结构有关。

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1)评价指标体系的探讨。建立指标体系需筛选反映区域特色的指标,尝试将矿泉水资源量作为水资源子系统的指标之一,但根据综合评价结果其权重较低影响较小;污水处理能力、水功能区水质达标率等能够表征区域生态环境,而研究区水生态环境普遍较好,对水资源的促进作用不明显,因此没有选取该项指标。针对研究区的评价指标体系还需要完善,挖掘反映长白山区水资源特点的指标,持续改进与提高水资源承载力综合评价的准确性。

(2)长白山区水资源承载力的综合探讨。国内学者目前开展了对长白山区靖宇县、抚松县、安图县单

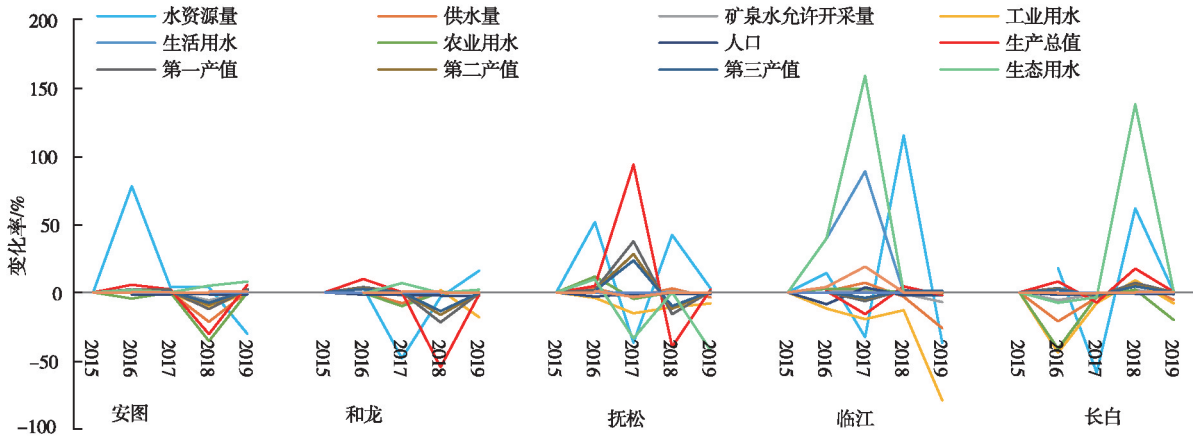


图5 长白山区水资源承载力评价指标变化率
Fig.5 The change rate of evaluation index in Changbai Mountain area

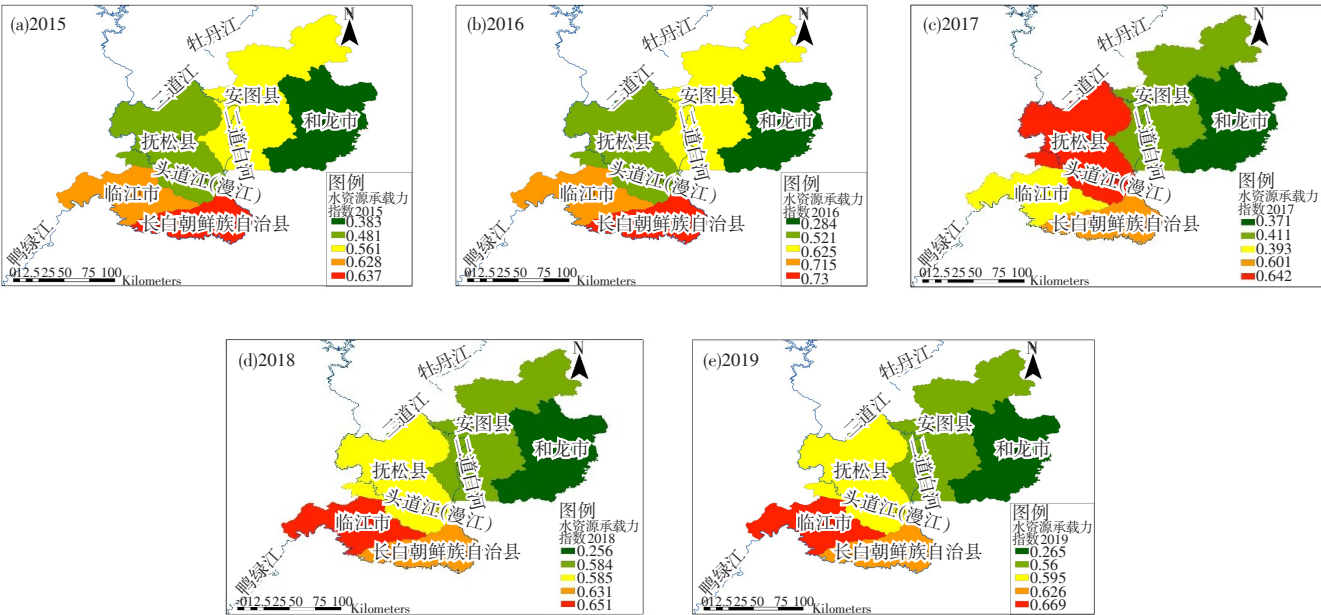


图6 长白山区各市(县)水资源承载力空间演变

Fig.6 The spatial evolution of water capacity in Changbai Mountain

表4 障碍因素的具体核算

Table4 Obstacle factors of water capacity in Changbai Mountain

地区	水资源量	供水总量	矿泉水量	工业用水	生活用水	农业用水	人口	生产总值	第一产业生产总值	第二产业生产总值	第三产业生产总值	生态用水	COD纳污能力	森林覆盖率
安图	2.16	1.81	0.80	1.96	3.93	0.57	4.98	2.57	1.03	0.90	0.64	1.76	0.00	0.41
和龙	4.97	0.00	1.84	1.61	4.11	0.00	6.58	2.87	1.15	1.01	0.00	0.17	0.02	0.04
抚松	0.76	2.21	0.28	0.00	0.00	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	1.13	0.14	0.26
临江	4.16	2.85	1.54	2.10	3.45	0.80	7.78	1.99	0.80	0.70	0.24	1.64	0.20	0.38
长白	5.08	2.94	1.88	3.79	3.12	0.80	12.30	2.95	1.18	1.03	1.55	1.48	0.18	0.35

个行政单元某一年份的水资源承载力评价研究,本研究尝试将长白山多流域源头区所涉及的多个县市作为研究对象,确定近5年的水资源承载力综合评价指数以及时空变化趋势,其中和龙地区水资源承载力较弱,若持续下降,进而引起中下游地区水资源短缺等问题。而由于长白山区在资源环境、社会经济等条件具有非均匀性,还需结合多源数据细化不同县区的指标体系,进一步深入研究对小尺度(空间栅格尺度的)的长白山区资源环境承载力综合评价,对长白山区流域中下游地区的生态环境保护和社会可持续发展起到重要的参考作用。

4.2 结论

(1)长白山区水资源承载力在2015—2019年间呈现出改善趋势,水资源承载力综合评价指数处于0.284~0.73,均处于可承载状态,其中和龙市处于弱可承载状态,临江市与长白县的水资源可承载程度相对较高,开发潜力较大。

(2)地区性差异是水资源承载力的显著特性,长白山区从西至东方向,水资源承载力程度呈现减小趋势,空间差异性明显,良好可承载区主要分布在临江市、抚松县和长白县这三个地区,安图与和龙市属于可承载区。

(3)依据障碍因素诊断并排序,水资源量、人口、生活、生态用水量在个别县市区障碍度均较高,人口是影响总体水资源承载力的首要障碍因子。根据障碍因子,优化水资源配置,调整用水结构,能够提升和保持该地区的水资源承载能力,进一步为长白山区中下游地区提供水资源支撑奠定理论基础。

参考文献:

[1] MINGBO C, DONGSHENG Z, QIANG Z, et al. Determining the scale of coal mining in an ecologically fragile mining area under the constraint of water resources carrying capacity [J]. Journal of Environmental Management, 2021,279(2):116-121.
[2] PENG T, DENG H, LIN Y, et al. Assessment on water resources carrying capacity in karst areas by using an innovative DPES-

- BRM concept model and cloud model [J]. *Science of the Total Environment*, 2020,767:144–153.
- [3] 吴凡, 陈伏龙, 丁文学, 等. 基于模糊集对分析:五元减法集对势的新疆水资源承载力评价[J]. *长江科学院院报*, 2020,1:1–10. (WU Fan, CHEN Fulong, DING Wenxue, et al. Water resources carrying capacity evaluation of Xinjiang Based on Fuzzy Set Pair Analysis and five-variable subtraction set pair potential [J], *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020,1:1–10. (in Chinese))
- [4] PIRES A, MORATO J, PEIXOTO H, et al. Sustainability assessment of indicators for integrated [J]. *Water Resources Management*, 2016:139–147.
- [5] 左其亭, 张志卓, 吴滨滨. 基于组合权重TOPSIS模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J]. *水资源保护*, 2020,36(2):1–7. (ZUO Qiting, ZHANG Zhizhuo, WU Binbin. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model [J]. *Water Resources Protection*, 2020,36(2):1–7. (in Chinese))
- [6] 张礼兵, 胡亚南, 金菊良, 等. 基于系统动力学的巢湖流域水资源承载力动态预测与调控[J]. *湖泊科学*, 2021,33(1):242–254. (ZHANG Libing, HU Yanan, JIN Juliang, et al. Dynamic prediction of water resources carrying capacity of Chaohu Basin and system optimization regulation based on system dynamics simulation [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021,33(1):242–254. (in Chinese))
- [7] 张旭, 刘新华, 张桂林, 等. 新疆阿克苏河流域水资源承载力变化分析[J]. *水电能源科学*, 2020,38(9):44–47. (ZHANG Xu, LIU Xinhua, ZHANG Guilin, et al. Analysis of change of water resources carrying capacity in Aksu River basin of Xinjiang [J]. *Water Resources and Power*, 2020,38(9):44–47. (in Chinese))
- [8] 金菊良, 沈时兴, 崔毅, 等. 半偏减法集对势在引黄灌区水资源承载力动态评价中的应用[J]. *水利学报*, 2021:1–14. (JIN Juliang, SHEN Shixing, CUI Yi, et al. Dynamic evaluation of water resources carrying capacity in the Yellow River diversion irrigation district based on semipartial subtraction set pair potential [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021:1–14. (in Chinese))
- [9] BIAN J, SUN X, ZHANG B, et al. Study on the natural mineral water resource bearing capacity and its driving factors in Fusong County, Changbai Mountain Area, Jilin Province of China [J]. *Water Resources*, 2019,46(3):332–343.
- [10] 赵义平, 于向前, 刘伟, 等. 基于投影寻踪模型的镶黄旗水资源承载力评价及其在水源调配中的应用[J]. *水文*, 2018,38(6):72–76. (ZHAO Yiping, YU Xiangqian, LIU Wei, et al. Evaluation of water resources carrying capacity in xianghuang banner based on projection pursuit model and its application in water resources allocation [J]. *Journal of China Hydrology*, 2018,38(6):72–76. (in Chinese))
- [11] WEI X, SHEN L, LIU Z, et al. Comparative analysis on the evolution of ecological carrying capacity between provinces during urbanization process in China [J]. *Ecological Indicators*, 2020,112:106–129.
- [12] LIN S S, SHEN S L, ZHOU A, et al. Approach based on TOPSIS and Monte Carlo simulation methods to evaluate lake eutrophication levels [J]. *Water Research*, 2020,187:1–15.
- [13] 李少朋, 赵衡, 王富强, 等. 基于AHP-TOPSIS的江苏省水资源承载力评价[J]. *水资源保护*, 2020:1–10. (LI Shaopeng, ZHAO Heng, WANG Fuqiang, et al. Evaluation of water resources carrying capacity in Jiangsu Province based on AHP-TOPSIS [J]. *Water Resources Protection*, 2020:1–10. (in Chinese))
- [14] 林龙圳, 李达, 林震. 基于熵权-TOPSIS模型的库布齐沙漠地区水资源承载力评价[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2020,54(4):640–648. (LIN Longzhen, LI Da, LIN Zhen. Evaluation of water resources carrying capacity in Kubuqi Desert Area based on entropy weight and TOPSIS model [J]. *Journal of Central China Normal University (Natural Sciences)*, 2020,54(4):640–648. (in Chinese))
- [15] 徐晨光, 黄佳, 满洲. 基于SD-EF模型的郑州市水资源承载力研究[J]. *中国农村水利水电*, 2020(12):9–14. (XU Chenguang, HUANG Jia, MAN Zhou. Water resources carrying capacity of Zhengzhou City based on SD-EF model [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020(12):9–14. (in Chinese))

Assessment on Water Resource Carrying Capacity and Identification of Influencing Factors in Changbai Mountain

NIE Siyu^{1,2}, ZHANG Xu^{1,2}, LI Hongyan^{1,2}, ZHOU Yanchun^{1,2}

(1. College of Water Conservancy & Environment Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China;
2. Key Laboratory of Urban Sewage Treatment of Jilin Province, Changchun 130012, China)

Abstract: To enhance economic development and the utilization of water resources in the Changbai Mountains, 14 indicators were selected to establish a comprehensive evaluation index system for the water capacity of the mountains. The TOPSIS model was combined with the entropy method to measure the water capacity of the Changbai Mountains during 2015–2019, while an obstacle method comprehensively evaluated the influencing factors. The results show that, according to the index, the water capacity of the Changbai Mountains measured is between 0.284–0.730, with significant regional differences. From west to east, the water capacity decreases. The water capacity of Linjiang County and Changbai County is relatively high, while that of Antu and Helong is low. Human population is the primary obstacle factor to the water capacity of the study area. By optimizing the water configuration and adjusting the structure of water usage, the water capacity of the region could be maintained or even improved.

Keywords: Changbai Mountain; water capacity; entropy weight method; TOPSIS model; obstacle factor