

哈长城市群水资源承载力时空格局及耦合协调度*

丁月龙^{1,3}, 高腾¹, 赵春子^{1,2}, 朱卫红^{1,2}

1. 延边大学地理与海洋科学学院, 吉林 延吉 133000
2. 延边大学融合学院, 吉林 延吉 133000
3. 东北师范大学地理科学学院, 吉林 长春 130024

摘要: 为客观认识哈长城市群建设与发展中水资源承载力现状, 保障水资源开发利用的可持续发展, 本研究构建哈长城市群水资源承载力评价体系, 采用改进熵权TOPSIS模型、空间自相关分析、耦合协调度评价模型综合评价2012—2019年哈长城市群水资源承载力时空变化格局及各子系统间的耦合协调度。结果表明: 1) 哈长城市群水资源承载力呈先降后升趋势变化, 整体处于水资源合理状态, 水资源禀赋是影响水资源承载力提升的主要因素; 2) 水资源承载力空间分布上黑龙江省城市水资源承载力水平优于吉林省城市; 3) 城市群各子系统承载力评分中社会经济子系统评分(0.22)最高, 其次是水资源子系统(0.18), 生态环境子系统(0.07)最低, 水资源子系统评分城市间差异较大, 主要受人均水资源量、产水模数、年降水量影响; 4) 城市群水资源承载力与耦合协调度之间存在较强的正相关关系, 哈长城市群平均耦合协调度为0.37, 整体水平较低, 处于轻度失调状态。

关键词: 水资源; 哈长城市群; 水资源承载力; 改进熵权法; TOPSIS模型; 耦合协调度

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2023)02-0146-10

The temporal-spatial pattern and coupling coordination degree of water resources carrying capacity in the Harbin-Changchun urban agglomeration

DING Yuelong^{1,3}, GAO Teng¹, ZHAO Chunzi^{1,2}, ZHU Weihong^{1,2}

1. College of Geography and Ocean Sciences, Yanbian University, Yanji 133000, China
2. College of Integration Science, Yanbian University, Yanji 133000, China
3. School of Geographical Science, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

Abstract: To objectively understand the current situation of water resources carrying capacity in the construction and development of Harbin-Changchun urban agglomeration and ensure the sustainable development of water resources development and utilization, this study constructs the evaluation system of water resources carrying capacity of Harbin-Changchun urban agglomeration and adopts the improved entropy weight TOPSIS model, spatial autocorrelation analysis and coupling coordination degree evaluation model to comprehensively evaluate the spatial and temporal patterns of water resources carrying capacity of Harbin-Changchun urban agglomeration and the coupling coordination degree among subsystems from 2012 to 2019. The results show that: 1) The water resources carrying capacity of Harbin-Changchun urban agglomeration shows a trend of decreasing first and then increasing, and the overall is in reasonable state of water resources, and water resources endowment is the main factor

* 收稿日期: 2022-03-04

录用日期: 2022-05-20

网络首发日期: 2022-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(41830643); 中央引导地方科技发展资金吉林省基础研究专项(202002024JC); 延边大学应用基础项目(延大科合字2020年第18号)

作者简介: 丁月龙(2000年生), 男; 研究方向: 水文水资源; E-mail: dingyl@nenu.edu.cn

通信作者: 赵春子(1977年生), 女; 研究方向: 水文水资源; E-mail: czzhao@ybu.edu.cn

affecting the improvement of water resources carrying capacity. 2) The spatial distribution of water resources carrying capacity of cities in Heilongjiang Province is better than cities in Jilin Province. 3) Among the subsystems in the urban agglomeration, the socio-economic subsystem score (0.22) is the highest, followed by the water resources subsystem (0.18) and the ecological environment subsystem (0.07) is the lowest. The score of the water resources subsystem varies greatly among cities and is mainly influenced by per capita water resources, water production modulus, and annual precipitation. 4) There is a strong positive correlation between the water resources carrying capacity of urban agglomerations and the coupling coordination degree, and the average coupling coordination degree of the Harbin-Changchun urban agglomeration is 0.37, with a low overall level and in a state of slight imbalance.

Key words: water resources; Harbin-Changchun urban agglomeration; water resources carrying capacity; improved entropy method; TOPSIS model; coupling coordination degree

水资源作为基础性自然资源与战略性经济资源,是人类社会发展不可或缺的重要组成部分,随着全球气候变化的加剧,全球范围内工业化和城镇化的快速推进,其供需矛盾愈加突出,水资源已然成为制约区域经济社会可持续发展的限制性因素(李雨欣等,2021;刘雁慧等,2019;党丽娟等,2015)。本文认为水资源承载力指一个流域、一个地区乃至一个国家,在某一历史发展阶段,在社会可持续发展、生态良性循环发展的前提下,最大可承载的人口、环境和经济规模的能力。作为反映区域水资源与人口增长、社会经济发展、生态环境质量协调程度的重要指标,深刻理解区域水资源承载力的变化趋势,对于保障区域水资源安全、推动水资源与社会经济和生态环境之间协调发展、更加合理推进城市群建设具有重要意义(李静等,2021)。

水资源承载力作为承载力概念在水资源领域的具体拓展,国外学者早期研究多从承载力为切入点,对伊利诺伊斯河的承载力研究;Tramblay et al.(2018)从气候变化的视角对北非水资源未来可利用性进行评价研究;Wei et al.(2017)对澳大利亚水资源的社会价值及环境可持续性进行研究;Sawunyama et al.(2005)通过RS与GIS对非洲东南部流域小水库调蓄能力的承载力进行研究。我国水资源承载力研究始于20世纪80年代,为调节水资源与社会经济发展之间的关系,施雅风等(1992)于1989年提出水资源承载力的概念,并以乌鲁木齐河流域为研究对象开展了干旱半干旱区的水资源承载力研究。继而,国内学者以水资源的供需关系为研究思路,在长期研究中对水资源

承载力的概念进行补充并且不断赋予其新的内涵。如程超等(2016)通过水资源生态足迹模型对滇中城市群的水资源生态承载力平衡性进行研究;田培等(2021)通过改进熵权TOPSIS模型等方法对长江中游城市群水资源承载力时空变化特征进行综合评价。

本文拟从水资源、社会经济、生态环境等3个维度出发,以2012—2019年为研究时段,对哈长城市群及其范围内的10市、1州的水资源承载力进行研究,构建水资源承载力评价指标体系,利用改进熵权法、TOPSIS模型、空间自相关分析及耦合协调度评价模型综合分析城市群水资源承载力时空变化格局与各子系统间的耦合协调度,以期正确认识该地区水资源支撑能力的现状,为哈长城市群水资源综合管理与配置、社会经济与生态环境协调发展以及现代化高质量绿色城市群建设提供理论依据。

1 研究区概况

哈长城市群规划范围包括黑龙江省哈尔滨市、齐齐哈尔市、牡丹江市、大庆市和绥化市,吉林省长春市、吉林市、四平市、辽源市、松原市和延边朝鲜族自治州(以下简称延边州),总面积26.4万km²。2020年哈长城市群的经济总量2.04万亿元、人口总量4260万,分别占全国2.02%、2.95%。哈长城市群属于温带季风气候,且地势具有东南高、中西部低的特点,降水量分布呈现东多西少,城市群内主要有松花江、牡丹江、图们江、嫩江、第二松花江等河流,水资源分布东多西少(见图1)。

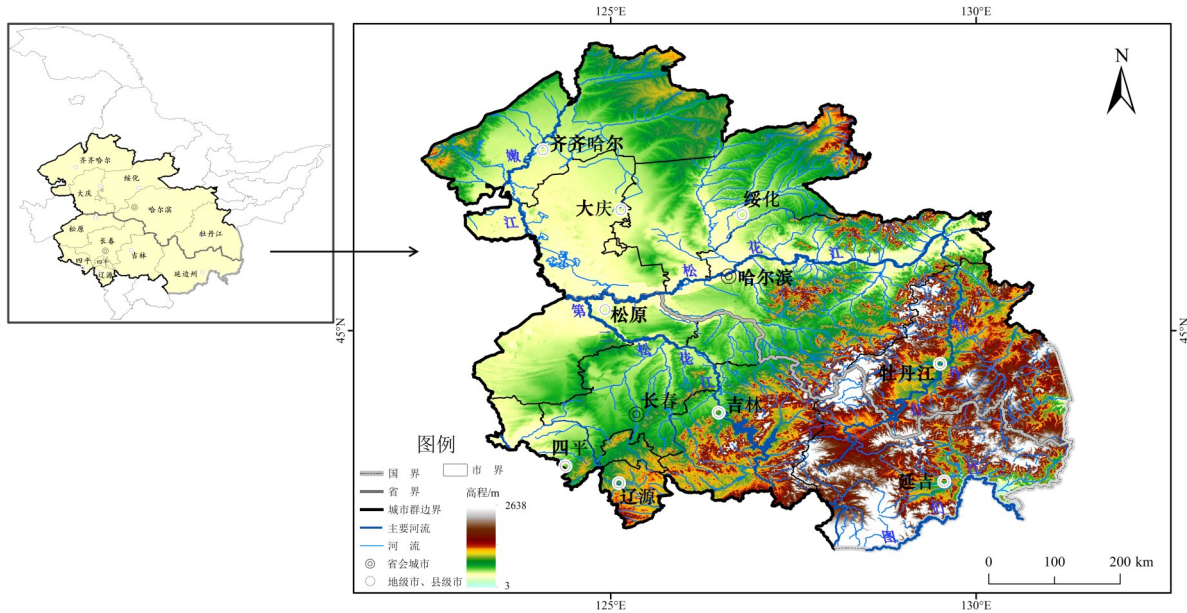


图1 哈长城市群区位图

Fig. 1 Location of Harbin-Changchun urban agglomeration

2 研究方法

2.1 数据来源

本文主要使用水资源总量、年降水量、供水量、用水量、人口总量、区域面积、GDP总量、工业废水排放量等统计数据构建部分评价指标。其中水资源总量、降水量、地表水资源量、供水量及用水量来源于《吉林省水资源公报》(吉林省水利厅, 2012—2019)、《黑龙江统计年鉴》(黑龙江省统计局, 2013—2020), 部分年降水量来源于中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心与国家科技基础平台; 人口总量、工业废水排放量来源于《中国城市统计年鉴》(国家统计局, 2013—2020); 其余统计数据来源于《吉林统计年鉴》(吉林省统计局, 2013—2020)、《黑龙江统计年鉴》等。2012—2013年部分数据的缺失, 采用KNN法进行补充。

2.2 评价指标体系构建

水资源承载力评价指标构建时需考虑区域水资源禀赋状况, 水资源与社会经济、生态环境之间的相互关系(Davijani et al., 2016; 王保乾等, 2020; 田培等, 2019), 哈长城市群中黑龙江省城市受特殊地理位置限制, 部分水文、经济、生态环境数据无法公开, 因此遵循科学性、典型性、综合性、可获取性, 从水资源、社会经济、生态环境3个子系统出发建立评价指标体系。水资源作为

水资源承载力的主体, 对水资源子系统本文综合选取人均水资源量、产水模数等指标描述区域水资源禀赋、利用与空间分布状况。人类作为水资源承载力的客体, 选取社会经济层面可获取且具有代表性的指标构成社会经济子系统。人口增长与经济社会发展需综合考量生态环境的良性循环, 因此选取建成区绿化覆盖率、城市污水日处理能力、人均工业废水排放量构成生态环境子系统。具体指标体系如表1所示。

2.3 改进熵权法

熵权法是一种根据不同评价指标数据离散程度分别确定指标权重的客观赋权方法, 可以反映各项指标的真实情况, 在水资源承载力评价研究中具有较好的效果(林龙圳等, 2020; 张毅, 2020)。在传统熵权法中, 指标熵值越趋向1, 熵值的微小变化会使权重发生倍变化, 造成部分评价指标权重与实际重要程度不符, 为克服传统熵权法的不足, 学者们对传统熵权法进行了改进。本文采用改进熵权法(李英海等, 2010)确定哈长城市群各项指标的权重, 使各项指标评价更客观。对各项指标权重的计算步骤如下:

1) 因数据量纲不一, 需对异质指标数据进行标准化处理。将哈长城市群11个城市与水资源承载力19个评价指标的原始数据列为矩阵, 采用极差法对指标体系中的正向数据和负向数据进行标准化:

表1 哈长城市群水资源承载力评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of water resources carrying capacity of Harbin-Changchun urban agglomeration

目标	准则子系统	指标	计算方法	指标意义	类型
水资源承载力	水资源子系统	人均水资源量 C_1	水资源总量/人口总量	水资源人均拥有量情况	+
		地表水资源占比 C_2	地表水资源量/水资源总量	水资源的丰枯情况	+
		产水模数 C_3	水资源总量/区域面积	区域单位面积产水情况	+
		人均水资源利用量 C_4	用水量/人口总量	水资源人均利用情况	-
		供水模数 C_5	供水量/区域面积	区域单位面积供水能力	-
		水资源开发利用率 C_6	供水量/水资源总量	水资源的开发利用程度	-
		年降水量 C_7	统计数据	降水对水资源的影响情况	+
	社会经济子系统	人口密度 C_8	人口总量/区域面积	人口密集程度	-
		人口自然增长率 C_9	统计数据	人口增长对水资源的动态压力	-
		城镇化率 C_{10}	城镇人口/人口总量	城镇化水平	+
		居民消费价格指数 C_{11}	统计数据	居民生活水平	+
		城市人均生活用水量 C_{12}	统计数据	城市居民人均用水情况	-
		第三产业比重 C_{13}	统计数据	区域经济结构优化程度	+
		人均GDP C_{14}	统计数据	区域经济发展水平	+
		GDP增长率 C_{15}	统计数据	区域经济发展能力	+
		万元GDP用水量 C_{16}	用水总量/GDP总量	区域经济发展与水资源的协调程度	-
生态环境子系统	建成区绿化覆盖率 C_{17}	统计数据	城市绿化情况	+	
	城市污水日处理能力 C_{18}	统计数据	城市污水处理能力	+	
	人均工业废水排放量 C_{19}	工业废水排放量/人口总量	工业废水对环境的影响	-	

$$Y_{ij} = \begin{cases} \frac{X_{ij} - \min\{X_{ij}\}}{\max\{X_{ij}\} - \min\{X_{ij}\}}, & \text{正向数据} \\ \frac{\max\{X_{ij}\} - X_{ij}}{\max\{X_{ij}\} - \min\{X_{ij}\}}, & \text{负向数据} \end{cases}$$

$$W_{3j} = \frac{1 + \bar{H} - H_j}{\sum_{j=1, H_j \neq 1}^m (1 + \bar{H} - H_j)}$$

式中 $X_{ij}(i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$ 为第 i 个城市的第 j 项指标值; Y_{ij} 的值称为标准化后的值。

式中 $k = 1/\ln(n)$, $0 \leq H_j \leq 1$; W_j 表示第 j 项指标的权重, W_{0j} 和 W_{3j} 为改进后的权重值, H_j 是第 j 项指标的熵值, \bar{H} 则是所有不为 1 的熵值平均值。 W_j 越大, 说明该评价指标对水资源承载力综合评价的作用越大。

2) 计算第 i 个城市第 j 项指标值在哈长城市群中所占的比重

$$P_{ij} = X_{ij} / \sum_{i=1}^n X_{ij}$$

2.4 TOPSIS 模型

3) 分别计算各指标的熵值 H_j 和各指标权重 W_j :

TOPSIS 模型为逼近理想解的评价方法, 是一种对多方案、多指标的系统进行评价决策的模型(石晓昕等, 2021; 高升等, 2021; 徐富刚等, 2021)。它是以各城市为评价对象, 通过对各评价对象与理想解接近程度进行评价的方法。通过计算各城市水资源承载力与理想解的贴进度 S_i 来进行评价, S_i 在本文代表水资源承载力得分, 取值范围为 $[0, 1]$, 与理想解越接近, 评价效果越好, 计算步骤如下:

$$H_j = -k \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij}$$

$$W_j = \begin{cases} (1 - \bar{H})W_{0j} + \bar{H}W_{3j}, & H_j < 1 \\ 0, & H_j > 1 \end{cases}$$

$$W_{0j} = \frac{1 - H_j}{m - \sum_{j=1}^m H_j}$$

1) 构建加权标准化评价矩阵

$$Z_{ij} = Y_{ij}W_j$$

式中 Z_{ij} 为评价矩阵, W_j 为第 j 项指标的权重, Y_{ij} 为标准化值。

2) 记

$$Z_j^+ = \max\{Z_{ij} | i = 1, 2, \dots, n\}, j = 1, 2, \dots, m,$$

$$Z_j^- = \min\{Z_{ij} | i = 1, 2, \dots, n\}, j = 1, 2, \dots, m.$$

确定正理想解 $Z^+ = (Z_1^+, \dots, Z_m^+)$ 和负理想解 $Z^- = (Z_1^-, \dots, Z_m^-)$ 。

3) 确定正向距离 D^+ 与负向距离 D^-

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_j^+ - Z_{ij})^2},$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_j^- - Z_{ij})^2}.$$

4) 确定水资源承载力得分

$$S_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}.$$

划分水资源承载力得分为 5 个等级(何刚等, 2019; 康艳等, 2014), 见表 2。

表 2 水资源承载力等级标准

S_i	[0.3, 0.4)	[0.4, 0.5)	[0.5, 0.6)	[0.6, 1]	
分级	V	IV	III	II	I
内涵	匮乏	短缺	合理	协调	充裕

2.5 空间自相关

空间自相关能够反映研究区域与临近区域是否具有关联性, 既可以考察全局空间聚集现象、区域总体的空间关联程度和差异程度, 也可以分析局部空间与相邻区域空间聚集程度(Tobler et al., 1970; 杜婉婷等, 2018)。基于 GeoDa 与 ArcGIS 软件通过全局 Moran's I 指数探究城市群水资源承载力是否存在空间相关性, 在此基础上通过局部 Moran's I 指数分析城市群内在何处出现聚集或异常值, 了解某一区域与周围区域水资源承载力发展水平。

2.6 耦合协调度评价模型

为探究水资源子系统、社会经济子系统、生态子系统之间的耦合协调度, 本文构建耦合协调度评价模型(刘定惠等, 2011):

$$C = \sqrt[3]{X_1 X_2 X_3 / [(X_1 + X_2 + X_3) / 3]^3}$$

式中 C 表示耦合度, 取值范围为 $[0, 1]$, X_1 、 X_2 、 X_3 分别表示水资源子系统、社会经济子系统、生

态环境子系统的承载力评分, 由各子系统评价指标的值乘以指标权重得到。

$$D = \sqrt{CT},$$

$$T = \alpha X_1 + \beta X_2 + \gamma X_3,$$

式中 D 为耦合协调度, T 表示综合评价价值, α 、 β 、 γ 为各子系统的待定系数。在水资源承载力系统中, 因水资源子系统、社会经济子系统和生态环境子系统同等重要, 故 $\alpha = \beta = \gamma = 1/3$ 。

3 结果与分析

3.1 时间变化特征

应用改进熵权法与 TOPSIS 模型对哈长城市群 11 个城市的水资源承载力进行评价, 各城市水资源承载力得分取平均值代表哈长城市群整体水资源承载力水平。如图 2 所示, 在 2012—2019 年间, 哈长城市群水资源承载力整体处于水资源合理状态, 呈先降后升趋势变化, 得分在 0.45~0.50 之间缓慢变化, 在 2019 年水资源承载力得分最高, 为 0.50, 处于水资源协调状态。2013—2015 年, 哈长城市群水资源承载力呈缓慢下降趋势变化, 2015 年水资源承载力得分最低, 为 0.45, 从 2016 年开始水资源承载力呈上升趋势变化。通过分析可知, 2014—2015 年间城市群水资源总量、年降水量、地表水资源量较 2013 年出现不同程度的减少, 其中水资源总量分别减少 55% 和 78%、年降水量分别减少 37% 和 27%、地表水资源量分别减少 9% 和 13%, 而同期城市群人口总量较 2013 年仅减少了 1% 和 2%, 对指标影响较小。基于上述因素的变化, 导致指标体系中的正向指标如人均水资源量、地表水资源占比、产水模数、年降水量等数值呈现下降趋势, 负向指标水资源开发利用率较 2013 年则增加了 36% 和 33%, 综合作用导致水资源承载力在此期间呈下降趋势变化。自 2016 年起, 城市群水资源总量、年降水量等数值开始回升, 城市群人口总量虽呈下降趋势但整体波动幅度在 0.24%~2.31% 间, 对指标影响程度较小, 因此城市群水资源承载力水平有所提升。由此可见, 水资源禀赋是限制哈长城市群水资源承载力提升的主要因素。

3.2 空间变化特征

3.2.1 空间分布变化 由哈长城市群水资源承载力空间分布(图 3)可知, 2012—2017 年期间, 仅大

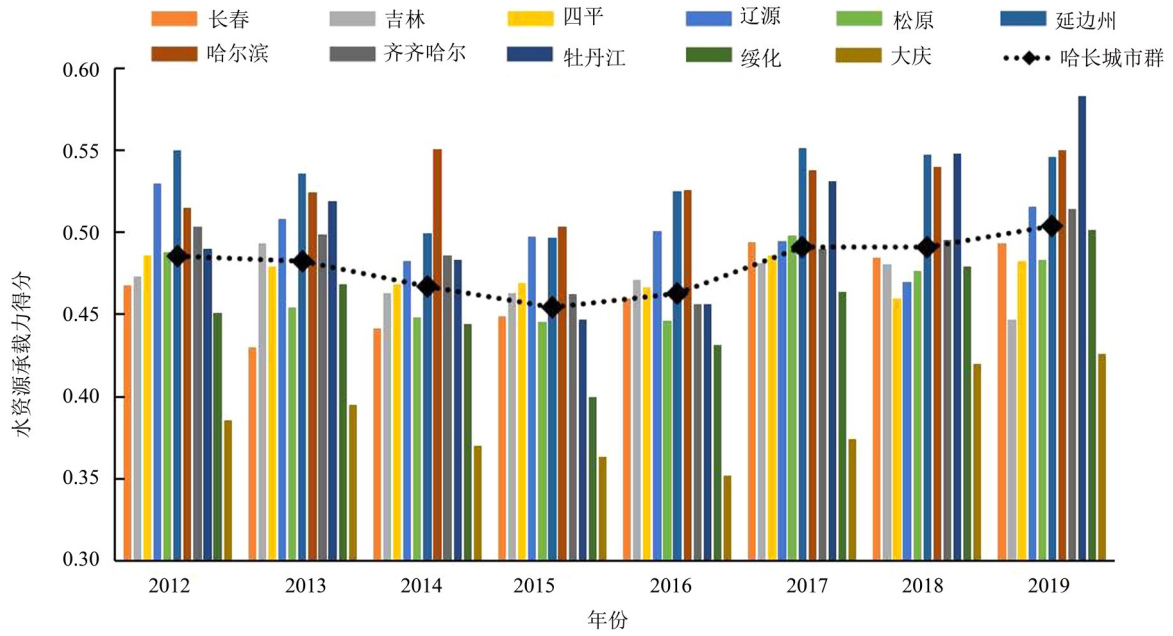


图2 2012—2019年哈长城市群水资源承载力变化趋势

Fig. 2 Trend of water resources carrying capacity in the Harbin-Changchun urban agglomeration from 2012 to 2019

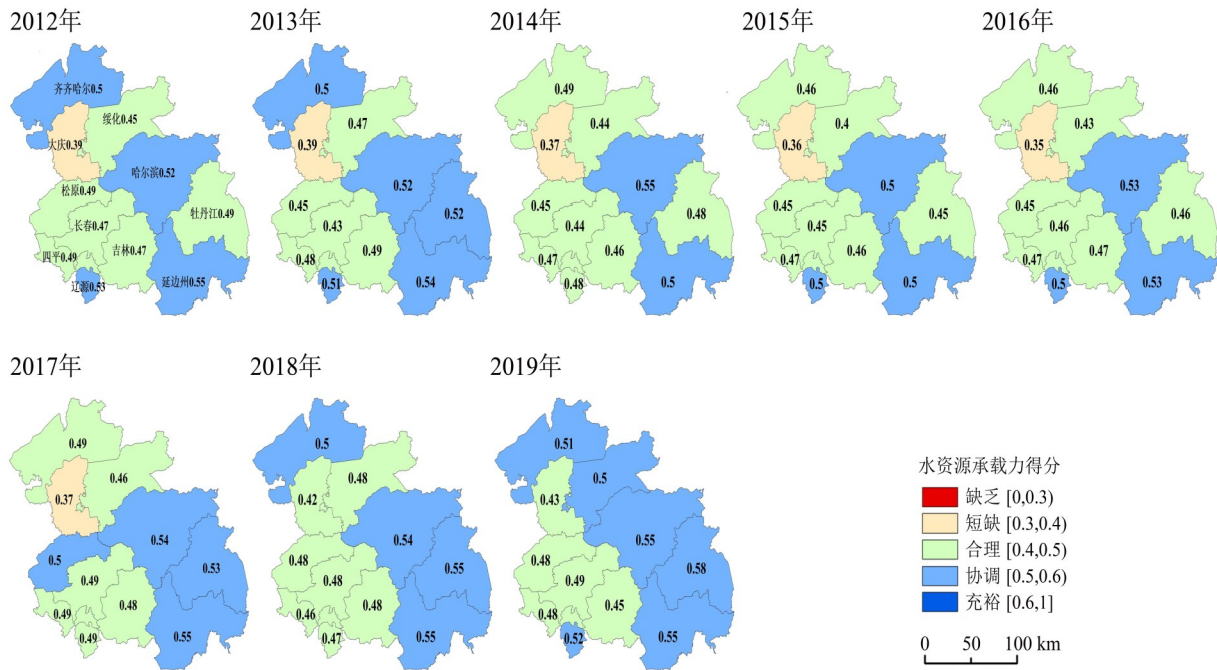


图3 2012—2019年哈长城市群水资源承载力空间分布

Fig. 3 Spatial different of water resources carrying capacity in the Harbin-Changchun urban agglomeration from 2012 to 2019

庆市水资源承载力为短缺状态, 其他城市各年份水资源承载力水平较高, 均为合理和协调状态。大庆市水资源承载力的短缺状态, 其主要原因是水资源子系统中水资源总量平均值仅为13.29亿 m^3 , 远低于城市群平均值43.44亿 m^3 ; 在社会经济子系统中, 第三产业比重平均值为26%, 较城市群平均值低40%; 在生态环境子系统中, 人均工业废水

排放量较城市群平均值高45%; 2018年起大庆市改善为合理状态。

从省际空间分布上来看, 哈长城市群中黑龙江省城市主要分布于松花江干流流域、嫩江流域和牡丹江流域, 水资源禀赋优越, 其中哈尔滨市位于东流松花江段, 水资源总量、地表水资源量丰富水资源承载力得分较高, 始终为协调状态;

牡丹江市、齐齐哈尔市和绥化市分别有松花江的 3 条支流牡丹江、嫩江、呼兰河流经,水资源总量较为丰富,水资源承载力主要在合理与协调状态。吉林省城市群主要分布在图们江流域、第二松花江(西流松花江)流域,其中延边州主要位于图们江流域,水资源总量、地表水资源量丰富水资源承载力得分较高,始终为协调状态;第二松花江流经吉林市、长春市和松原市,水资源总量较东流松花江少,水资源承载力整体处于合理状态;辽源市位于辽河流域地表水资源量较丰富,水资源承载力整体处于协调状态。总体而言,黑龙江省城市水资源承载力水平优于吉林省城市,通过对比评价指标数据可知,指标权重前五位的产水模数、城市污水日处理能力、人均水资源量、人均 GDP 和年降水量黑龙江省城市平均值均高于吉

林省城市,省际空间上形成黑龙江省城市水资源承载力水平优于吉林省城市的差异。

3.2.2 空间自相关分析 利用 GeoDa 软件构造空间权重矩阵进而获得 2012—2019 年哈长城市群水资源承载力全局与局部 Moran's I 指数。由全局 Moran's I 指数(表 3)可知,除 2012 和 2014 年,其他年份 Moran's I 指数均 >0 ,表明哈长城市群水资源承载力在空间上有相关性,其中 2017—2018 年的全局 Moran's I 指数为 0.138 和 0.323,且 $P < 0.1$, $Z > 1.64$,具有统计学意义,呈现空间正相关,说明哈长城市群水资源承载力具有显著的空间集聚特征。在时间维度上,2012—2019 年哈长城市群全局 Moran's I 指数整体呈增长趋势,城市群水资源承载力空间集聚趋势增强。

表 3 2012—2019 年哈长城市群水资源承载力全局 Moran's I 指数

年份	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Moran's I	-0.084	0.110	-0.128	0.030	0.065	0.138	0.323	0.127
P	0.393	0.099	0.414	0.182	0.145	0.046	0.012	0.102
Z	0.18	1.33	-0.23	0.90	1.15	1.71	2.48	1.32

由局部 Moran's I 指数绘制 LISA 聚类图(图 4),局部空间自相关空间关联模式主要有高-高、高-低、低-高、低-低 4 种类型。2013—2014 和 2017—2019 年的牡丹江市,2013 年和 2018 年的延边

州,2015—2016 年的吉林市,水资源承载力均较高,为高-高模式和高值聚集中心;2012 年和 2014—2015 年的齐齐哈尔市,2014—2015 年的哈尔滨市,水资源承载力高于周围城市,为高值异质中

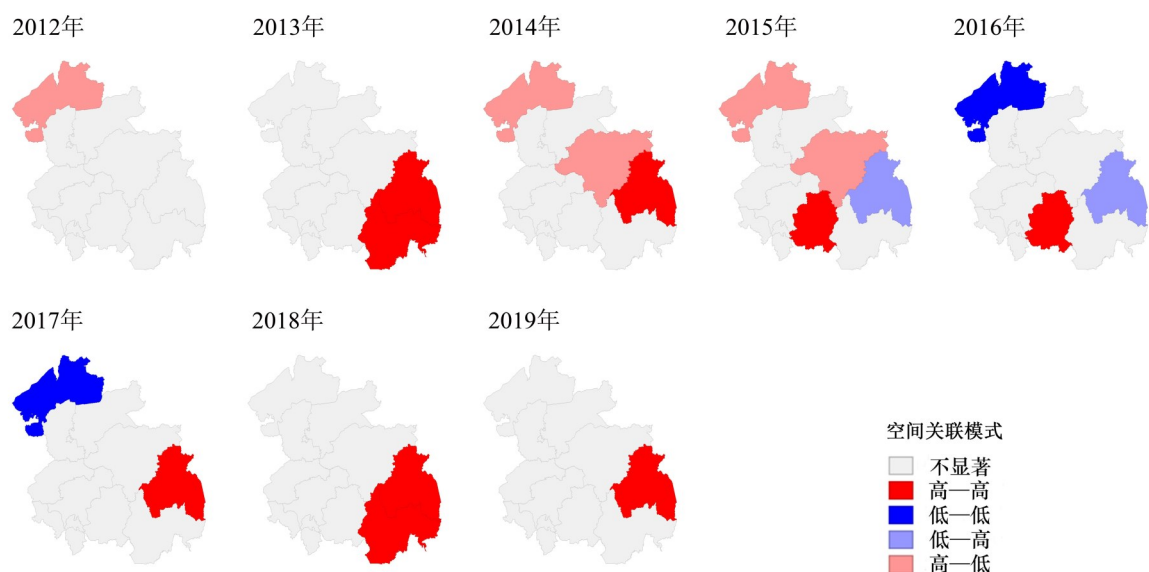


图 4 2012—2019 年哈长城市群水资源承载力 LISA 聚类图

Fig. 4 LISA cluster map of water resources carrying capacity in the Harbin-Changchun urban agglomeration from 2012 to 2019

心, 且为高-低模式; 2015—2016年的牡丹江市水资源承载力低于周围城市, 为低值异质中心, 为低-高模式; 2016—2017年的齐齐哈尔市是低值聚集中心, 为低-低模式。总体而言, 受水资源禀赋及空间分布影响, 黑龙江省城市水资源承载力虽较高, 但内部空间差异较明显, 吉林省城市水资源承载力整体水平较平均, 内部空间差异较小。

3.3 子系统分析

3.3.1 子系统差异性分析 由哈长城市群各城市子系统承载力评分(图5)可知, 城市群水资源子系统承载力平均评分为0.18, 且城市间评分差异较大, 绥化市(0.24)、牡丹江(0.23)和延边州(0.22)评分较高, 大庆市(0.08)评分最低, 吉林省城市水资源子系统承载力平均评分(0.17)较黑龙江省城市(0.19)低, 其中吉林省仅延边州超过城市群平均水平。对比两省城市2012—2019年水资源子系统各项指标标准化后的值发现, 权重最高的3项指标(产水模数、人均水资源量和年降水量)平均值, 吉林省城市均低于黑龙江省城市, 从而造成吉林省城市水资源子系统承载力平均评分低于黑龙江省。

城市群社会经济子系统承载力指标, 各城市间差异不大, 平均评分为0.22; 吉林省城市该指标均值(0.23)高于黑龙江省城市均值(0.20); 其中松原市(0.21)、牡丹江市(0.21)和绥化市(0.13)低于城市群平均水平。绥化市该指标评分最低, 主要

原因是受哈尔滨市区位及哈齐高铁布局等因素的影响, 哈尔滨市对绥化市经济发展的辐射能力较弱, 并且绥化市第三产业比重、城镇化率、人均GDP远低于城市群平均水平。

城市群生态环境子系统承载力指标, 各城市间差异较小, 平均评分仅为0.07。其中吉林市(0.06)低于城市群平均水平, 黑龙江省范围的哈尔滨市为0.12, 高于平均值, 其他各市均低于0.07。对比该系统的3个子系统指标发现, 吉林市日污水处理能力低于城市群平均水平, 但其人均污水排放量则高于城市群平均水平; 齐齐哈尔市、牡丹江市、绥化市建成区绿化覆盖率和城市污水日处理能力低于城市群平均水平, 大庆市建成区绿化覆盖率低于城市群平均水平, 而人均污水排放量要高于城市群平均水平。总之, 两省城市生态环境子系统承载力平均评分, 均达到城市群平均水平, 但吉林省仅吉林市未超过城市群平均水平, 黑龙江省则除哈尔滨市外均未超过城市群平均水平。

3.3.2 子系统耦合协调度 利用水资源承载力各子系统承载力评分 X_1 、 X_2 、 X_3 计算得到, 2012—2019年哈长城市群水资源承载力水资源、社会经济和生态环境子系统耦合协调度(图6), 将其等级划分为轻度失调(0.30~0.40]和濒临失调(0.40~0.50]。结果发现, 哈长城市群平均耦合协调度(0.37), 为轻度失调。其中, 哈尔滨市耦合协调度最高为0.42, 处于濒临失调, 其水资源承载力各子系统承载力评分均高于城市群平均水平; 其他城市均为轻度失调。大庆市耦合协调度(0.31)最低, 其水资源子系统承载力平均评分仅为0.08, 由于大庆市人均水资源量远低于城市群平均水平, 人均水资源利用量、供水模数、水资源开发利用又高于城市群平均水平, 因此导致水资源子系统评分在城市群中最低, 综合导致大庆市耦合协调度最低。通过对11个城市的水资源承载力与耦合协调度建立线性回归方程可得两组数据间的相关系数 $R^2=0.73$, 说明两组数据间存在着较强的正相关关系。

哈长城市群耦合协调度呈先缓慢下降, 后平稳上升的趋势变化。2012—2016年水资源子系统承载力评分呈波动上升趋势, 社会经济子系统承载力评分呈缓慢下降趋势, 生态环境子系统承载力评分整体变化不大。2016年哈长城市群耦合协

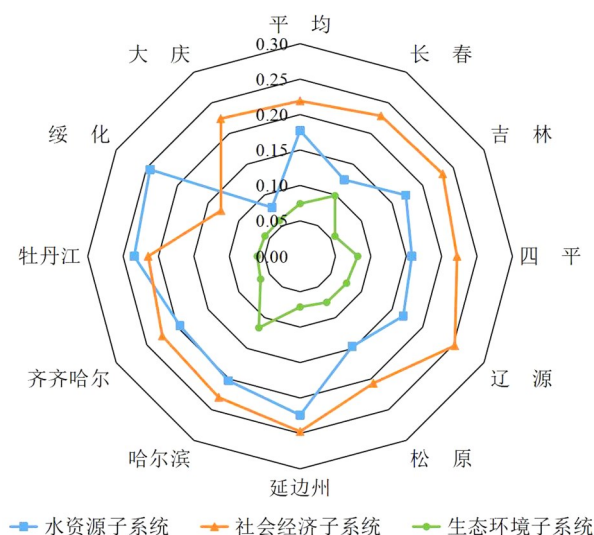


图5 2012—2019年各城市子系统承载力平均评分
Fig. 5 Average score of water resources carrying capacity subsystem of cities from 2012 to 2019

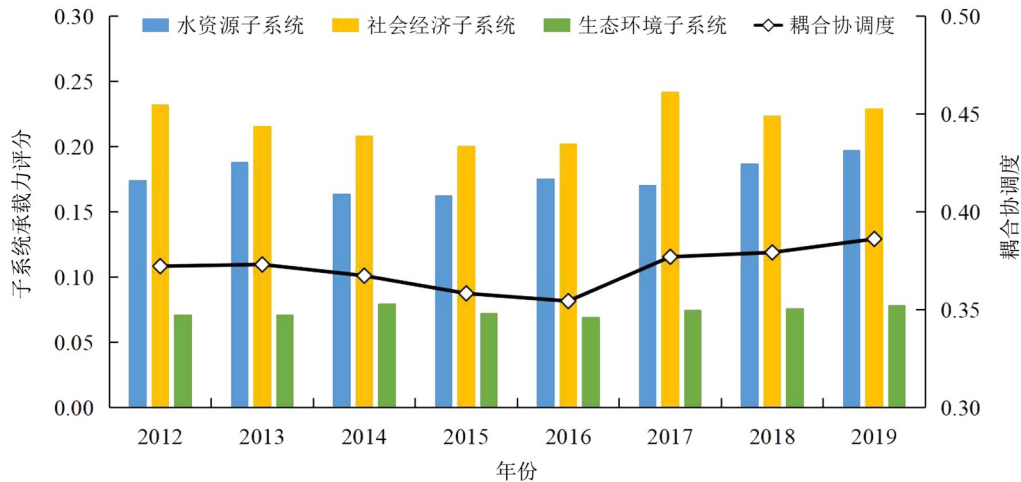


图6 2012—2019年哈长城市群水资源承载力子系统承载力评分及耦合协调度

Fig. 6 Scores of carrying capacity for each subsystem and coordination degree

of water resources carrying subsystem in Harbin-Changchun urban agglomeration from 2012 to 2019

调度达到最低值,主要是由于2016年牡丹江市人均污水排放量大幅度增加,导致牡丹江市2016年生态环境子系统承载力评分极低,使牡丹江市2016年耦合协调度仅为0.24,进而导致2016年哈长城市群耦合协调度达到最低值。

4 结论

本文构建哈长城市群水资源承载力评价指标体系,通过改进熵权法、TOPSIS模型、空间自相关分析以及耦合协调度模型,分析了2012—2017年期间城市群水资源承载力时空变化特征、水资源承载力各子系统差异性以及各子系统耦合协调度,得出如下主要结论:

1) 在城市群水资源承载力时间变化上,哈长城市群水资源承载力呈先降后升的变化趋势,整体处于水资源合理状态。2019年城市群水资源承载力提升到0.50,达到水资源协调状态,但整体水平仍有待提升。水资源禀赋是影响水资源承载力

提升的主要因素。

2) 在城市群水资源承载力空间变化上,除大庆市为水资源短缺状态,其余城市均处于水资源合理或协调状态。受水资源禀赋及空间分布的影响,黑龙江省水资源承载力水平优于吉林省城市,但其内部空间差异较吉林省明显。

3) 哈长城市群水资源承载力社会经济子系统评分(0.22)最高,其次是水资源子系统(0.18)。社会经济子系统吉林省城市平均评分(0.23)高于黑龙江省城市(0.20)。水资源子系统吉林省城市平均评分(0.17)低于黑龙江省城市(0.19),主要受人均水资源量、产水模数以及年降水量的影响。而生态环境子系统城市间差异较小。

4) 城市群水资源承载力与耦合协调度之间存在较强的正相关关系。城市群耦合协调度(0.37)总体较低,处于轻度失调。仅哈尔滨市平均耦合协调度处于濒危失调,其余城市均处于轻度失调。

参考文献:

程超,童绍玉,彭海英,等,2016.滇中城市群水资源生态承载力的平衡性研究[J].资源科学,38(8):1561-1571.
党丽娟,徐勇,2015.水资源承载力研究进展及启示[J].水土保持研究,22(3):341-348.
杜婉婷,李淑杰,曹竞文,等,2018.多尺度下的珲春市耕地质量空间自相关分析[J].东北师大学报:自然科学版,50(4):134-141.
高升,孙会荟,刘伟,2021.基于熵权TOPSIS模型的海洋经

济系统脆弱性评价与障碍度分析[J].生态经济,37(10):77-83.
国家统计局,2013-2020.中国城市统计年鉴[M].北京:中国统计出版社.
何刚,夏业领,秦勇,等,2019.长江经济带水资源承载力评价及时空动态变化[J].水土保持研究,26(1):287-292,300.
黑龙江省统计局,2013-2020.黑龙江统计年鉴[M].北京:中

- 国统计出版社.
- 吉林省水利厅,2012-2019.吉林省水资源公报[R].长春:吉林省水资源公报编辑部.
- 吉林省统计局,2013-2020.吉林统计年鉴[M].北京:中国统计出版社.
- 康艳,宋松柏,2014.水资源承载力综合评价的变权灰色关联模型[J].节水灌溉,(3):48-53.
- 李静,王飞东,李强雷,2021.中国中东部水资源承载力评价及障碍因子识别[J].人民长江,52(6):58-64.
- 李英海,周建中,2010.基于改进熵权和Vague集的多目标防洪调度决策方法[J].水电能源科学,28(6):32-35.
- 李雨欣,薛东前,宋永永,2021.中国水资源承载力时空变化与趋势预警[J].长江流域资源与环境,30(7):1574-1584.
- 林龙圳,李达,林震,2020.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),54(4):640-648.
- 刘定惠,杨永春,2011.区域经济-旅游-生态环境耦合协调度研究——以安徽省为例[J].长江流域资源与环境,20(7):892-896.
- 刘雁慧,李阳兵,梁鑫源,等,2019.中国水资源承载力评价及变化研究[J].长江流域资源与环境,28(5):1080-1091.
- 施雅风 曲耀光,1992.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.
- 石晓昕,袁重乐,钱会,等,2021.基于DPSIR-TOPSIS模型的河北省水资源承载力评价及障碍因素研究[J].水资源与水工程学报,32(5):92-99.
- 田培,王瑾钰,花威,等,2021.长江中游城市群水资源承载力时空格局及耦合协调性[J].湖泊科学,33(6):1871-1884.
- 田培,张志好,许新宜,等,2019.基于变权TOPSIS模型的长江经济带水资源承载力综合评价[J].华中师范大学学报:自然科学版,53(5):755-764.
- 王保乾,杨晖,竺运,2020.长江经济带水资源承载力综合评价研究[J].资源与产业,22(1):1-11.
- 徐富刚,曾琴,符素嘉,等,2021.基于Bayes-TOPSIS模型的赣州市水资源承载力综合评价[J].水电能源科学,39(6):29-32.
- 张毅,2020.基于改进的熵权法在合肥市水资源承载力综合评价中的应用[D].合肥:安徽建筑大学.
- DAVIJANI M H, BANIHABIB M E, ANVAR A N, et al, 2016. Multi-objective optimization model for the allocation of water resources in arid regions based on the maximization of socioeconomic efficiency[J]. Water Resources Management, 30(3): 927-946.
- LI J, WANG F D, LI Q L, 2021. Evaluation of water resources carrying capacity and diagnosis of obstacle factors in mid-eastern China[J]. Yangtze River, 52(6): 58-64.
- SAWUNYAMA T, SENZANJE A, MHIZHA A, 2006. Estimation of small reservoir storage capacities in Limpopo River Basin using geographical information systems (GIS) and remotely sensed surface areas: Case of Mzingwane Catchment [J]. Phys Chem Earth Parts A/B/C, 31 (15/16): 935-943.
- TRAMBLAY Y, JARLAN L, HANICH L, et al, 2018. Future scenarios of surface water resources availability in North African Dams [J]. Water Resources Management, 32(4): 1291-1306.
- WEI J, WEI Y, WESTERN A, 2017. Evolution of the societal value of water resources for economic development versus environmental sustainability in Australia from 1843 to 2011 [J]. Glob Environ Change, 42: 82-92.

(责任编辑 秦社彩)