

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.03.018

中国水资源空间均衡评价与空间关联性分析

何凡,路培艺,尹婧,何国华,欧志刚,顾冰

(中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038)

摘要:为科学认知中国水资源空间均衡现状和空间分布特征,在对水资源空间均衡内涵进行解析的基础上,构建了水资源空间均衡评价指标体系,以中国333个地级行政区和4个直辖市为研究对象,对全国各地区水资源空间均衡状态进行了评价和空间关联性分析。结果表明:各省级行政区空间均衡状态存在空间差异大的特点,全国31个省级行政区(不包括港澳台)有17个处于空间不均衡状态,主要分布于东三省、华北平原、河西走廊、华南部分地区和新疆南部;各研究单元空间均衡状态存在一定的聚集性,主要表现为高值聚集和低值聚集两种形态,也散布有小范围的低高聚集、高低聚集形态。

关键词:水资源;空间均衡;空间关联性;中国

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)03-0148-08

Spatial equilibrium evaluation and spatial correlation analysis of water resources in China//HE Fan, LU Peiyi, YIN Jing, HE Guohua, OU Zhigang, GU Bing(*State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*)

Abstract: To scientifically recognize the status of spatial equilibrium and spatial distribution characteristics of water resources in China, an evaluation system of water resources spatial equilibrium was constructed based on analysis on the connotation of water resources spatial equilibrium. Taking 333 prefectural districts and 4 municipalities directly under the central government in China as the study objects, the spatial equilibrium status of water resources in each region was measured and analyzed with spatial correlation. The results show that the spatial equilibrium status of each provincial district has the characteristic of large spatial differences. Among the 31 provincial administrative regions in China(excluding Hong Kong, Macao and Taiwan), a total of 17 provinces are in a state of spatial imbalance. The regions with poor spatial equilibrium are mainly located in the three Northeastern Provinces, the North China Plain, the Hexi Corridor, parts of South China and southern Xinjiang. There is a certain degree of aggregation in the spatial equilibrium of the study units, which are mainly in two patterns of high values aggregation or low values aggregation, with low-high aggregation and high-low aggregation patterns in scattered small regions coexisted.

Key words: water resources; spatial equilibrium; spatial correlation; China

随着中国经济社会快速发展,水资源供需矛盾日渐突出。2014年,为保障国家水安全,习近平总书记提出了“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水思路。此后,如何认识水资源空间均衡,如何遵循空间均衡原则对水资源进行合理开发利用,成为学界关注的热点问题,并展开了大量研究。在理论基础方面,王浩等^[1]提出通过协同配置来实现水资源空间均衡,即实现水资源承载力与经济社会发展规模相协调;金菊良等^[2]系统梳理了水资源空间均衡的发展历程,提出水资源空间均衡是

水资源与经济社会、生态环境两大系统的空间分布相匹配的供需平衡;郦建强等^[3]解析了水资源空间均衡的四大特征,提出水资源空间均衡是水资源与人口经济和资源环境的均衡发展;左其亭等^[4]认为水资源空间均衡是水资源开发、利用与保护在空间上相对稳定的平衡状态,进而构建了水资源空间均衡理论体系框架。在量化方法方面,夏帆等^[5]采用基尼系数与协调发展度的方法,计算了2017年全国水资源空间均衡系数;亢晓龙等^[6]采用不平衡指数方法对郑州、洛阳水资源空间均衡状况进行了分析;

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC3200204);国家自然科学基金(52061125101)

作者简介:何凡(1980—),男,正高级工程师,博士,主要从事水资源管理、规划与战略研究。E-mail: hefan@iwhr.com

通信作者:路培艺(1997—),女,硕士研究生,主要从事水文学及水资源研究。E-mail: lupeiyi1225@163.com

黄锋华等^[7]通过泰尔指数、基尼系数对粤港澳大湾区水资源空间均衡性进行了评价;郭旭宁等^[8]以水资源空间均衡度为评价指标,评价了京津冀地区水资源空间均衡状态。

总体来看,由于水资源空间均衡涉及水资源系统与经济社会、生态等多个系统间的相互关系,其作用机制和状态表征可以从不同角度进行分析^[9],因此对水资源空间均衡的内涵认知、度量方法以及对策措施等方面仍存在较大分歧。在此背景下,本文在对水资源空间均衡内涵解析的基础上,提出了水资源空间均衡评价方法,以2020年为基准年,以全国333个地级行政区和4个直辖市(由于数据限制,不包括港澳台地区)为研究单元,对全国水资源空间均衡状况进行评价,并分析各单元水资源空间均衡的主要制约因素。在此基础上,应用莫兰指数(Moran's I)^[10]对各单元空间均衡状态关联程度及空间集聚特征进行研究,以期科学认知中国各地区水资源空间均衡现状和空间分布特征,采取有效措施推进水资源空间均衡提供参考。

1 水资源空间均衡内涵解析

现阶段,对水资源空间均衡的理解存在较大差异,一定程度上是因为水资源空间均衡是一个目标导向的概念,代表了治水的发展目标和状态,本身具有较大的想象和解读空间。但实际上,水资源空间均衡更是一个问题导向的概念。2020年,习近平总书记在科学家座谈会上指出,我国“水资源空间分布失衡,带来不少问题。”^[11]因此,从当前面临的现实问题入手,理解什么是水资源空间分布失衡,以及空间分布失衡带来了哪些问题,是完整准确理解水资源空间均衡的一条有效路径。

在现实中,所谓“水资源空间不均衡”至少包括了3个层次的含义:一是在水资源本底条件层面,指水资源在空间上的数量分布不均,中国水资源的显著特点就是南多北少、东多西少;二是在与其他资源要素匹配性层面,水资源与土地、矿藏、能源等其他自然资源要素空间分布不相匹配^[12];三是在资源开发利用层面,人口、经济超过区域水资源承载能力,出现水资源荷载失衡的现象^[13]。其中,第一个层面是中国水资源本底空间特征,第二个层面反映了水资源相对其他资源的空间分布特征。这两个层面的问题是先天存在、难以人为改变的,加之水的开发利用会受到气候、社会、经济等多要素的影响,不同区域的水资源规模及开发强度不可能也不必要完全一致。第三个层面则真正反映了在多种因素作用下水资源被过度开发利用出现的一系列现实问题,这些问题是可以被人为调控和改变的,也正是需要被高

度关注的问题。

因此,水资源空间均衡主要针对的是第三个层面的问题,其核心是利用工程、技术、政策等多种手段,通过科学调控人口规模和分布、产业结构和布局以合理控制水资源系统所需承载的负荷强度,通过建设重大水资源配置工程等措施以提升水资源系统的承载能力,促进水资源负荷强度与承载能力相适配,实现水资源的可持续利用。这与地理学提出的空间均衡指空间的经济供应与需求平衡^[14]是基本一致的,也与部分学者提出的双重供需均衡^[2]、高质量供需均衡^[15]等概念是一致的,其目的就是水资源负荷强度与承载能力相适配。需强调的是,所谓“水资源负荷强度与承载能力相适配”并不是机械的要求负荷强度与承载能力在大小规模上等同,而是要将负荷强度控制在承载能力之内,重点是防止水资源被过度开发利用,而不是水资源开发利用不足的问题,这也是水资源空间均衡原则的出发点和落脚点。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 水资源空间均衡度评价指标体系

根据相关研究^[16-19],遵循科学性、系统性、适用性及可操作性原则^[20],从水资源负荷强度与承载能力两个方面选取指标构建如图1所示的评价指标体系。其中水资源负荷强度指数 B_1 可以从两方面进行刻画:一是水资源开发利用程度,二是需水驱动力大小,为此选取水资源开发利用率 C_1 、人口负荷 C_2 和经济用水效率 C_3 3项评价指标;水资源承载能力指数 B_2 取决于可供开发利用的水资源总量以及其他资源对承载能力的保障^[21],为此选取人均可用水量 C_4 和资源保障能力 C_5 两项评价指标。水资源开发利用率综合考虑了各区域外调水量和可利用过境水资源量^[22],为取用水量占可利用水资源量的比例;人口是水资源负荷的主要来源和关键影响因素之一,用单位用水量承载的人口来代表人口负荷;经济用水效率代表水资源利用效率水平,单位用水量利用效率越高,负荷强度越低;人均可用水量代表水资源禀赋条件;资源保障能力代表经济社会对水资源保障可投入的财力、物力和人力水平。

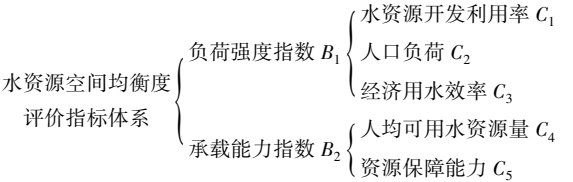


图1 水资源空间均衡度评价指标体系
Fig.1 Evaluation index system of spatial equilibrium of water resources

2.2 水资源空间均衡度计算方法

a. 数据标准化。为消除不同评价指标量纲不同造成的影响,选取极差法对数据进行标准化处理^[23],将原始数据转化为 [0,1] 区间内的无量纲值,并将逆向指标转化为正向指标^[24],便于负荷强度指数和承载力强度指数的计算。正向指标和逆向指标的标准化公式分别为

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{ij,\min}}{x_{ij,\max} - x_{ij,\min}} \quad (1)$$

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij,\max} - x_{ij}}{x_{ij,\max} - x_{ij,\min}} \quad (2)$$

式中: x'_{ij} 为研究单元 j 评价指标 i 标准化处理后的指标值; x_{ij} 为研究单元 j 评价指标 i 的原始数据值; $x_{ij,\min}$ 为研究单元 j 评价指标 i 原始数据的最小值; $x_{ij,\max}$ 为研究单元 j 评价指标 i 原始数据的最大值。

b. 指数计算。在评价指标数据量化的基础上,对负荷强度指数和承载力指数采用加乘混合法进行加权综合评价^[25]:

$$B_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{C_1 + C_2 + C_3}{3} + \sqrt[3]{C_1 C_2 C_3} \right) \quad (3)$$

$$B_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{C_4 + C_5}{2} + \sqrt{C_4 C_5} \right) \quad (4)$$

c. 水资源空间均衡度(I)计算。水资源空间均衡度越大,水资源空间均衡程度越高,计算公式为

$$I = \frac{1}{2} \left(\frac{B_1 + B_2}{2} + \sqrt{B_1 B_2} \right) \quad (5)$$

为进一步分析判断区域水资源空间均衡分布情况,将各研究单元水资源空间均衡度计算结果以已利用土地面积为权重进行加权平均,采用式(6)计算得到各省级行政区水资源空间均衡度。利用 ArcMap10.7 软件,采用自然断点分级法将水资源空间均衡度划分为良性均衡、中等均衡、勉强均衡、轻度失衡、一般失衡、重度失衡 6 个等级,并在此基础上,结合对各省级行政区的具体认知、专家经验等设置各均衡等级的阈值^[26],结果如表 1 所示。

表 1 水资源空间均衡等级划分

Table 1 Classification of spatial equilibrium of water resources

状态	水资源空间均衡度	均衡等级
均衡	0.7 ~ 1	良性均衡
	0.5 ~ <0.7	中等均衡
	0.3 ~ <0.5	勉强均衡
失衡	0.2 ~ <0.3	轻度失衡
	0.1 ~ <0.2	一般失衡
	0 ~ <0.1	重度失衡

$$I_i = \sum_{j=1}^n \frac{S_{ij} I_{ij}}{S_i} \quad (6)$$

式中: I_i 为省级行政区主水资源空间均衡度; S_{ij} 为

省级行政区 i 的第 j 个要素已利用土地面积(包括耕地、林地、园地、建设用地); S_i 为省级行政区 i 已利用土地面积; I_{ij} 为省级行政区 i 的第 j 个要素水资源空间均衡度。

2.3 基于空间自相关的空间关联性分析

空间自相关分析的目的是检验某一要素的属性值与其相邻空间点上的属性值是否存在显著关联性。采用莫兰指数来检验空间要素的相互关系^[27],其取值一般在 [-1,1] 之间,大于 0 表示全局空间自相关为正相关,小于 0 表示全局空间自相关为负相关,等于 0 表示不相关。全局空间自相关仅能判断整体聚集特征,为进一步分析水资源空间分布特征,实际研究中常采用局部空间自相关来分析不同研究单元与其临近单元属性的空间关联性^[28-31],本文采用 Geoda 以及 ArcMap10.7 计算及绘图。

2.4 数据来源

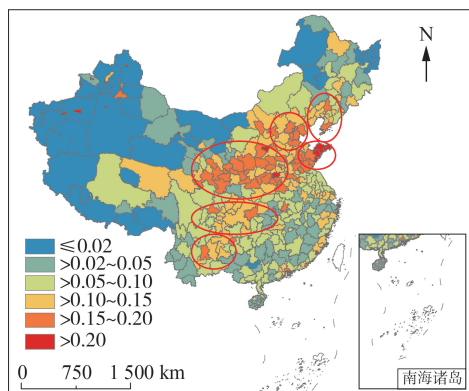
水资源数据来源于 2020 年 31 个省(自治区、直辖市)水资源公报及各流域水资源综合规划,社会经济数据来源于 2020 年 31 个省(自治区、直辖市)统计年鉴,已利用土地面积数据来源于 31 个省(自治区、直辖市)自然资源厅网站国土调查数据公报。

3 结果与分析

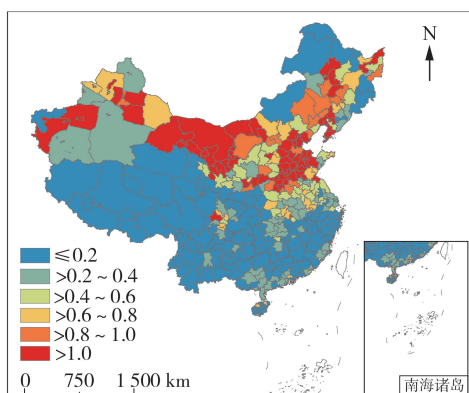
3.1 水资源负荷强度分析

图 2 为各研究单元水资源负荷强度指数及各评价指标空间分布情况(采用的底图审图号为 GS 京(2022)0770 号,下同)。

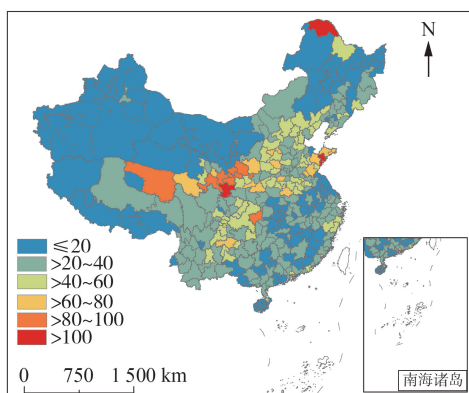
从图 2 可以看出,负荷强度指数大于 0.1 的地区占全国 44.9%,并形成了京津冀地区、辽东半岛、胶东半岛、黄河“几字弯”地区、四川盆地、滇东南地区等六大负荷强度中心(图 2(a)红圈所示)。其中,京津冀地区、辽东半岛主要是由于水资源开发利用这一指标过高;胶东半岛主要是水资源开发利用率较高,同时人口负荷也较高;黄河“几字弯”地区内部存在差别,部分地区是由于人口负荷较高,部分地区则是由于水资源开发利用率较高,还有部分地区是由于经济用水效率较低;四川盆地、滇东南地区则是由于人口负荷较高。此外,与相邻内陆地区相比,东南沿海地带水资源负荷强度也较高。需要说明的是,人口对水资源负荷带来的影响是多方面的,文中的人口负荷较高并不能简单等同于人口密度过大或者人口过多,仅指该地区单位用水量承载的人口较多,在一定程度上反映出水资源负荷强度较大。



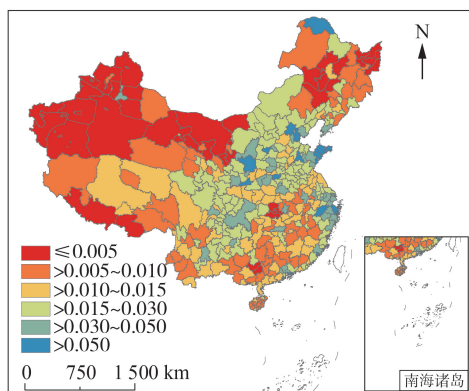
(a) 负荷强度指数



(b) 水资源开发利用(单位:%)



(c) 人口负荷(单位:人/万 m^3)



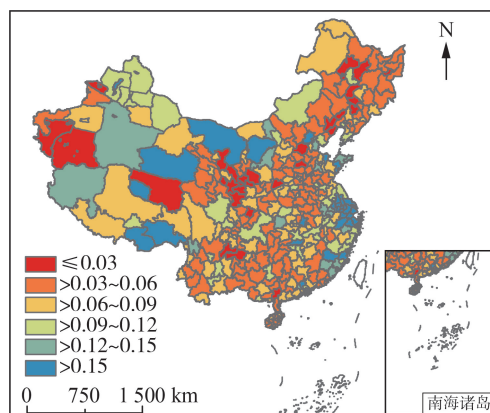
(d) 经济用水效率(单位:万元/ m^3)

图2 2020年中国水资源负荷强度指数及各评价指标空间分布

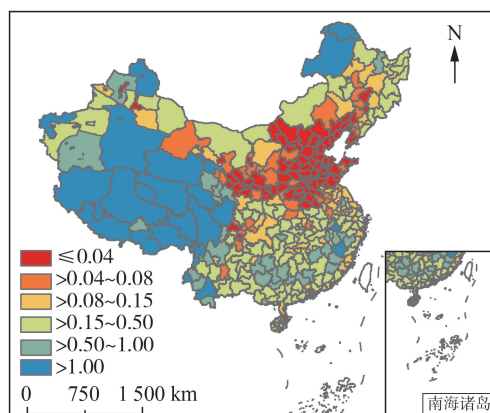
Fig.2 Spatial distribution of water resources load intensity index and evaluation indices in China in 2020

3.2 水资源承载力分析

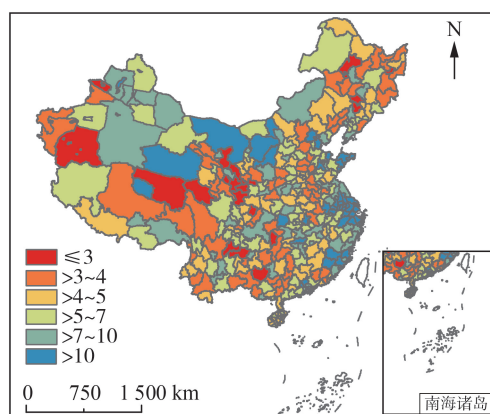
图3 为各研究单元水资源承载力指数及各评价指标空间分布情况。从图3 可以看出,承载力指数小于0.03 的地区主要分布于新疆南部、青海南部、甘肃、宁夏以及东北和华南部分地区,这些地区共同特点是人均可用水量不高,且资源保障能力较低。承载力指数为0.09 ~ 0.15 的地区占21%,主要分布于新疆、江西、四川、重庆等地,这些地区的共同特点是人均可用水量 and 资源保障能力都处于中等水平。承载力指数大于0.15 的区



(a) 承载力指数



(b) 人均可用水量(单位:万 m^3)



(c) 资源保障能力(单位:万元/人)

图3 2020年中国水资源承载力指数及各评价指标空间分布
Fig.3 Spatial distribution of water carrying capacity index and evaluation indices in China in 2020

域占 9.3%, 主要分布在内蒙古、青海、西藏、江苏、浙江、福建、上海、北京等地, 其中, 内蒙古、青海、西藏这些地区的特点是人均可用水量较高, 而江苏、浙江、福建、上海、北京等地则是由于经济发展水平高, 资源保障能力较强。

3.3 水资源空间均衡度评价

图 4(a) 为各研究单元空间均衡度分布情况。可以看出各地区空间均衡状态存在很大的差异性, 即使同一地区也往往存在较大差异。总体来看, 呈现出南方好于北方、东部优于中西部的态势。空间均衡度较差的地区主要分布于东三省、华北平原、河西走廊、华南部分地区和新疆南部。而东南沿海、西南地区、青海北部空间均衡度相对较好。

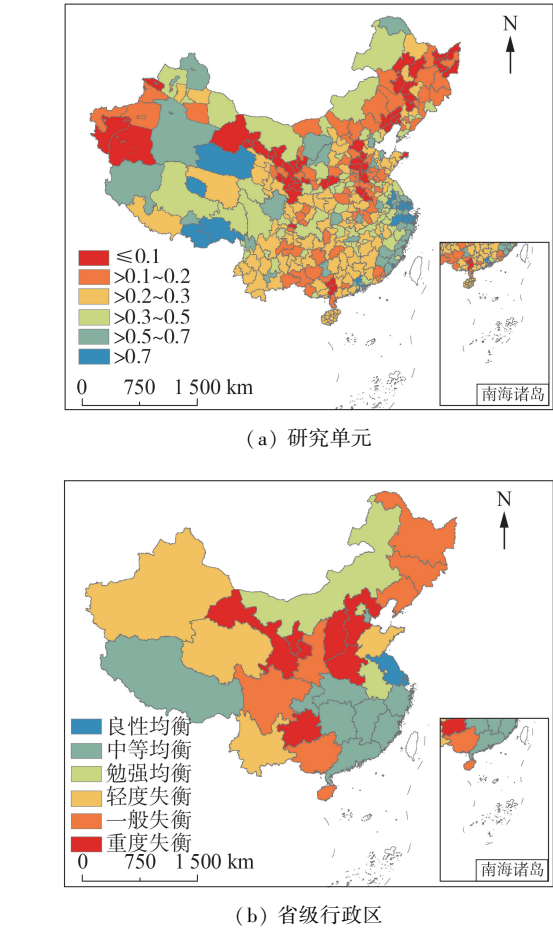


图 4 2020 年中国水资源空间均衡度

Fig.4 Spatial equilibrium of water resources in China in 2020

基于研究单元水资源空间均衡度数据, 利用 ArcMap10.7 软件, 采用自然断点分级法绘制中国省级行政区水资源空间均衡度分布图如图 4(b) 所示。在研究范围内的 31 个省(自治区、直辖市)中, 共计 14 个处于均衡状态, 占 45.2%。其中上海、江苏属于良性均衡, 浙江、福建、江西、广东、天津、重庆、西藏、湖北、湖南属于中等均衡, 安徽、内蒙古、北京属于勉强均衡。其余 54.8% 的地区处于失衡状态, 其

中新疆、青海、云南、山东属于轻度失衡, 黑龙江、吉林、陕西、四川、广西、辽宁、海南属于一般失衡, 甘肃、宁夏、山西、河南、河北、贵州属于重度失衡。

热图是一种较为常见的可视化统计方法, 可以用二维视图对多维数据进行直观展现, 并以渐变色带的形式通过颜色深浅对数据大小进行呈现^[32]。为了进一步明晰区域水资源空间均衡影响因素, 通过水资源开发利用率、人口负荷、经济用水效率、人均可用水量资源和资源保障能力这 5 个评价指标, 利用热图分析探讨各省(自治区、直辖市)水资源空间均衡制约因素^[33]。将 30 个省(自治区、直辖市)的 5 个评价指标数据分别进行归一化处理, 通过图例色系对各个省级行政区的制约因素进行分析(由于西藏人均可用水量远高于其他省(自治区、直辖市), 影响归一效果, 将其排除统计), 结果如图 5 所示(图中颜色越浅代表该项指标越不利于研究单元的水资源空间均衡状态)。例如北京市属于勉强均衡, 从图 5 可以看出其资源保障能力和经济用水效率都居于全国首位, 但人均可用水量则在全国处于较差水平, 因此北京市水资源空间均衡度的主要制约因素是人均可用水量。

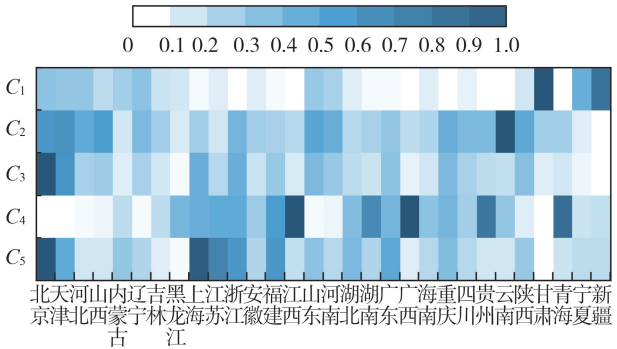


图 5 2020 年中国水资源空间均衡热图分析

Fig.5 Thermal map analysis of spatial equilibrium of water resources in China in 2020

3.4 基于空间自相关的均衡度空间关联性分析

通过 Geoda 软件相关公式计算得出 2020 年中国水资源空间均衡度莫兰指数为 0.405 6, 为正值, $Z = 3.992 5$, 大于检验临界值 1.96, 通过了显著性水平为 0.05 的假设检验, 说明中国水资源空间均衡度空间聚集特征明显, 水资源空间均衡度相似的区域在空间上呈现集聚分布特征。即水资源空间均衡度高的地区, 其周边临近地区水资源空间均衡度也高; 反之, 水资源空间均衡度低的地区, 其周边临近地区水资源空间均衡度也低。

为了更好地展示水资源空间均衡度空间分布情况, 利用 ArcMap10.7 绘制空间聚集 LISA 图来反映其聚集模式, 结果如图 6 所示。图 6 中高值聚集表

示某一研究单元属性值高,且其周围临近地区属性值也高;低值聚集表示某一研究单元的属性值低,且周围临近地区属性值也低;低高聚集表示某一研究单元的属性值低于周边单元,且周围临近地区属性值较高;高低聚集代表某一研究单元的属性值高于周边单元,周围临近地区属性值较低。

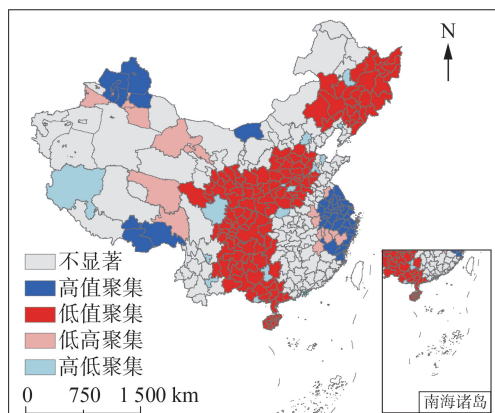


图6 2020年中国水资源空间均衡度的空间聚集 LISA 图

Fig. 6 LISA diagram of spatial aggregation of spatial equilibrium of water resources in China in 2020

a. 高值聚集区域主要是江苏、浙江、上海、福建、安徽的部分地区,以及新疆北部、西藏南部和内蒙古的巴彦淖尔市。位于长三角地区的上海、江苏、浙江是中国经济发达地区,同时水资源禀赋相对较优,与其邻接的福建北部以及安徽东部,水资源空间均衡状态也相对较好,说明该区域对其临近区域具有正向的空间辐射效应,从而形成了东部沿海高水平空间均衡聚集区。此外,位于北疆的伊犁和阿勒泰地区,藏南的拉萨、山南和林芝市,以及内蒙古的巴彦淖尔市水资源丰沛,各自形成了高值聚集区,具备向外部正向带动的潜力。

b. 低值聚集区域占比较大,呈现显著的连片分布特点。该区域可以分为两大板块,一是东三省,二是西北地区东部、华北地区南部以及西南地区东部。其中,东北地区水资源承载能力较低,相邻区域承载能力也较低,加之该区域产业结构以重工业为主,由此造成水资源过度开发利用;而西北地区东部、华北地区南部以及西南地区东部,水资源短缺较为严重,经济发展水平较低,相邻省份的水资源空间均衡状态也较差,形成了低水平空间均衡聚集区。这部分地区很难通过对周边水资源调配来改变自身空间均衡状态,更多需要采取优化自身发展方式、提高水资源利用效率或者长距离跨区域调水等措施。

c. 低高聚集区域主要散布在安徽、江西、新疆、甘肃、青海、西藏,处于在高水平空间均衡聚集区和低水平空间均衡聚集区周围。其中新疆、西藏地区

水资源空间分异较大,低高聚集区水资源状态良好的是北疆南部以及西藏东部的昌都市,而南疆水资源短缺较为严重,同时新疆各地州经济发展水平也有较大差异,导致新疆内部空间均衡状态差异较大。安徽、江西水资源总量较为丰富,经济发展处于中国中等水平,但由于周边分布着浙江、江苏等经济强省,这些省份水资源条件也处于中国前列,因此其水资源空间均衡状态略弱于邻近省份,形成了中部过渡区,这部分地区可以通过寻求适合区域发展的差异化发展道路,对水资源进行合理开发利用,来优化区域水资源空间均衡状况,是未来发展成高值聚集区域最具潜力的地区。

d. 高低聚集区域散布在北京、西藏阿里地区、云南玉溪市、四川阿坝自治州以及黑龙江、河南、湖北、山东、广西的部分地市。其中北京经济发展水平远高于与其邻接的河北,而郑州、济南是省会城市,经济发展水平也高于其邻近地市,对于水资源空间均衡状态有着直接的影响,这些地区需要通过拉动周边地区经济发展来缩小差距,从而产生良好的“空间扩散”效应;而西藏阿里地区、云南玉溪市等则由于当地水资源条件优于周边地市,产生小范围的高低聚集现象。从图6也可以看出,该区域并未形成多地市聚集现象,这也说明中国局部地区的两极分化差异并不是普遍存在的。

4 结 论

a. 应以现实问题为导向认识水资源空间均衡。现阶段水资源空间均衡主要是针对人口、经济超过区域水资源承载能力,水资源被过度开发利用出现的一系列现实问题提出的。因此,衡量水资源空间均衡状态的核心还是看水资源负荷强度是否被控制在承载能力之内,从而防止水资源被过度开发利用。

b. 从空间均衡状态评价结果看,中国目前形成了京津冀地区、辽东半岛等六大负荷强度中心;新疆南部、青海南部等地区水资源承载能力较低。综合来看,有超过半数的省级行政区处于空间不均衡状态,空间均衡度较差的地区主要分布于东三省、华北平原、河西走廊、华南部分地区和新疆南部。同时,各地区空间均衡状态存在空间差异大的特点。

c. 中国各地区空间均衡状态存在一定的聚集性,主要表现为高值和低值两种聚集形态,也有小范围的低高和高低聚集形态。对不同类型的聚集区需要采取不同的内部或外部措施来提升水资源空间均衡状态。例如,对高值聚集区域可充分发挥其向外部正向带动的潜力,对低值聚集区域则更多需要采取优化自身发展方式、提高水资源利用效率或者长

距离跨流域调水等措施。

需要指出的是,导致水资源空间不均衡的实际原因是多方面的,本文所构建的评价指标体系旨在从宏观尺度反应不同地区水资源负荷强度与其承载能力的匹配关系,并不能精确刻画各地区水资源负荷强度及承载能力大小,也不能分析导致空间不均衡的原因。节水不到位、工程不完善、人口规模过大、经济结构不合理,均可能对水资源空间均衡带来负面影响。各地如何采取有效措施,破解水资源空间不均衡问题,还需要进一步具体分析。

参考文献:

- [1] 王浩,刘家宏. 国家水资源与经济社会系统协同配置探讨[J]. 中国水利, 2016(17): 7-9. (WANG Hao, LIU Jiahong. Collaboration of national water resources with ecosocial system in China[J]. China Water Resources, 2016(17): 7-9. (in Chinese))
- [2] 金菊良, 郦建强, 吴成国, 等. 水资源空间均衡研究进展[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(6): 47-60. (JIN Juliang, LI Jianqiang, WU Chengguo, et al. Research progress on spatial equilibrium of water resources[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2019, 40(6): 47-60. (in Chinese))
- [3] 郦建强, 王平, 何君, 等. 水资源空间均衡理论方法与对策措施研究[J]. 中国水利, 2019(23): 23-25. (LI Jianqiang, WANG Ping, HE Jun, et al. Study on theory methodology and countermeasures about water resources spatial equilibrium[J]. China Water Resources, 2019(23): 23-25. (in Chinese))
- [4] 左其亭, 韩春辉, 马军霞, 等. 水资源空间均衡理论方法及应用研究框架[J]. 人民黄河, 2019, 41(10): 113-118. (ZUO Qiting, HAN Chunhui, MA Junxia, et al. Theoretical method and applied research framework of water resources spatial equilibrium[J]. Yellow River, 2019, 41(10): 113-118. (in Chinese))
- [5] 夏帆, 陈莹, 窦明, 等. 水资源空间均衡系数计算方法及其应用[J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 52-57. (XIA Fan, CHEN Ying, DOU Ming, et al. Calculation method and application of spatial equilibrium coefficient of water resources[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 52-57. (in Chinese))
- [6] 亢晓龙, 尹鹏博. 基于不平衡指数的郑州、洛阳水资源空间均衡分析[J]. 河南水利与南水北调, 2019, 48(4): 33-35. (KANG Xiaolong, YIN Pengbo. Spatial equilibrium analysis on water resources in Zhengzhou and Luoyang based on unbalance index[J]. Henan Water Resources & South-to-North Water Diversion, 2019, 48(4): 33-35. (in Chinese))
- [7] 黄锋华, 黄本胜, 洪昌红, 等. 粤港澳大湾区水资源空间均衡性分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 65-71.

- (HUANG Fenghua, HUANG Bensheng, HONG Changhong, et al. Analysis of water resources spatial equilibrium in Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 65-71. (in Chinese))
- [8] 郭旭宁, 郦建强, 李云玲, 等. 京津冀地区水资源空间均衡评价及调控措施[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 62-66. (GUO Xuning, LI Jianqiang, LI Yunling, et al. Water resources spatial equilibrium evaluation and regulation measures in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 62-66. (in Chinese))
- [9] 郑德凤, 张雨, 魏秋蕊, 等. 基于可持续能力和协调状态的水资源系统评价方法探讨[J]. 水资源保护, 2016, 32(3): 24-32. (ZHENG Defeng, ZHANG Yu, WEI Qiurui, et al. Study of method for evaluation of water resources system based on sustainability and coordinated condition[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3): 24-32. (in Chinese))
- [10] 孙才志, 郝帅, 赵良仕. 中国水资源-能源-粮食纽带系统效率时空分异特征[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 61-68. (SUN Caizhi, HAO Shuai, ZHAO Liangshi. Spatial-temporal differentiation characteristics of water resources-energy-food nexus system efficiency in China[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 61-68. (in Chinese))
- [11] 习近平. 在科学家座谈会上的讲话[N]. 人民日报, 2020-09-12(002).
- [12] 王建华, 何凡, 何国华. 关于水资源承载力需要厘清的几点认识[J]. 中国水利, 2020(11): 1-5. (WANG Jianhua, HE Fan, HE Guohua. Some understandings about the clarification of water resources carrying capacity[J]. China Water Resources, 2020(11): 1-5. (in Chinese))
- [13] 何凡, 顾冰, 何国华, 等. 中国用水量变化的驱动效应[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(3): 417-428. (HE Fan, GU Bing, HE Guohua, et al. Driving effect evolution and spatial differentiation of water use change in China[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(3): 417-428. (in Chinese))
- [14] 陈雯. 空间均衡的经济学分析[M]. 北京: 商务印书馆, 2008: 49.
- [15] 郦建强, 王平, 郭旭宁, 等. 水资源空间均衡要义及基本特征研究[J]. 水利规划与设计, 2019(10): 1-5. (LI Jianqiang, WANG Ping, GUO Xuning, et al. Research on the essentials of spatial equilibrium of water resources and its basic feature[J]. Water Resources Planning and Design, 2019(10): 1-5. (in Chinese))
- [16] 金菊良, 陈鹏飞, 陈梦璐, 等. 基于知识图谱的水资源承载力研究的文献计量分析[J]. 水资源保护, 2019, 35(6): 14-24. (JIN Juliang, CHEN Pengfei, CHEN Menglu, et al. Bibliometric analysis of research progress on water resources carrying capacity based on knowledge map[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 14-24. (in Chinese))

- [17] 金菊良,徐新光,崔毅,等. 基于联系数和洛伦兹曲线的水资源空间均衡评价方法[J]. 水科学进展,2021,32(3):387-395. (JIN Juliang, XU Xinguang, CUI Yi, et al. Water resources spatial equilibrium evaluation method based on connection number and Lorenz curve [J]. Advances in Water Science,2021,32(3):387-395. (in Chinese))
- [18] 杨亚锋,巩书鑫,王红瑞,等. 水资源空间均衡评估模型构建及应用[J]. 水科学进展,2021,32(1):33-44. (YANG Yafeng, GONG Shuxin, WANG Hongrui, et al. New model for water resources spatial equilibrium evaluation and its application [J]. Advances in Water Science,2021,32(1):33-44. (in Chinese))
- [19] 高玉琴,吴迪,刘海瑞,等. 城市化影响下区域水资源承载力评价[J]. 水利水电科技进展,2022,42(3):1-8. (GAO Yuqin, WU Di, LIU Hairui, et al. Evaluation of regional water resources carrying capacity under urbanization[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022,42(3):1-8. (in Chinese))
- [20] 崔晨韵,朱永华,吕海深,等. 长兴县与水相关的生态环境承载力评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(5):406-412. (CUI Chenyun, ZHU Yonghua, LYU Haishen, et al. Water-related eco-environmental carrying capacity evaluation index system in Changxing County [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(5):406-412. (in Chinese))
- [21] 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))
- [22] 何国华. 我国北方地区水土资源空间优化及其生态效应系统评价[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2019.
- [23] 李少朋,赵衡,王富强,等. 基于 AHP-TOPSIS 模型的江苏省水资源承载力评价[J]. 水资源保护,2021,37(3):20-25. (LI Shaopeng, ZHAO Heng, WANG Fuqiang, et al. Evaluation of water resources carrying capacity of Jiangsu Province based on AHP-TOPSIS model[J]. Water Resources Protection,2021,37(3):20-25. (in Chinese))
- [24] 叶宗裕. 关于多指标综合评价中指标正向化和无量纲化方法的选择[J]. 浙江统计,2003(4):24-25. (YE Zongyu. Choice in indicators of positive and dimensionless method about multivariate indexes' comprehensive evaluation[J]. Zhejiang Statistics,2003(4):24-25. (in Chinese))
- [25] 陈逸,黄贤金,陈志刚,等. 中国各省域建设用地开发空间均衡度评价研究[J]. 地理科学,2012,32(12):1424-1429. (CHEN Yi, HUANG Xianjin, CHEN Zhigang, et al. The spatial balance degree evaluation of construction land in China[J]. Scientia Geographica Sinica,2012,32(12):1424-1429. (in Chinese))
- [26] 张乐勤,方宇媛. 基于空间自相关分析的安徽省水资源生态压力空间格局探析[J]. 水资源保护,2017,33(1):24-29. (ZHANG Leqin, FANG Yuyuan. Study of spatial pattern of water resources ecological pressure in Anhui Province based on spatial autocorrelation analysis [J]. Water Resources Protection,2017,33(1):24-29. (in Chinese))
- [27] ANSELIN L. Local indicators of spatial association; LISA [J]. Geographical Analysis,1995,27(2):93-115.
- [28] 孟钰,杜琼英,管新建,等. 黄河流域水资源利用效率评估及空间分异研究[J]. 中国农村水利水电,2020(10):12-16. (MENG Yu, DU Qiongying, GUAN Xinjian, et al. Research on the water use efficiency and spatial difference in the Yellow River Basin [J]. China Rural Water and Hydropower,2020(10):12-16. (in Chinese))
- [29] 孙才志,阎晓东. 中国水资源-能源-粮食耦合系统安全评价及空间关联分析[J]. 水资源保护,2018,34(5):1-8. (SUN Caizhi, YAN Xiaodong. Security evaluation and spatial correlation pattern analysis of water resources-energy-food nexus coupling system in China [J]. Water Resources Protection,2018,34(5):1-8. (in Chinese))
- [30] 赵雪雁,高志玉,马艳艳,等. 2005—2014 年中国农村水贫困与农业现代化的时空耦合研究[J]. 地理科学,2018,38(5):717-726. (ZHAO Xueyan, GAO Zhiyu, MA Yanyan, et al. Spatio-temporal coupling between rural water poverty and agricultural modernization in China from 2005 to 2014 [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(5):717-726. (in Chinese))
- [31] 庞庆华,朱泽原,张丽娜. 黄河流域水资源利用效率与产业结构升级的空间协调发展研究[J]. 水利经济,2022,40(1):13-20. (PANG Qinghua, ZHU Zeyuan, ZHANG Lina. Spatially coordinated development of water resource utilization efficiency and industrial structure upgrading in Yellow River Basin [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2022,40(1):13-20. (in Chinese))
- [32] 孙斌,刘静玲,孟博,等. 北京市凉水河物理栖息地完整性评价[J]. 水资源保护,2017,33(6):20-26. (SUN Bin, LIU Jingling, MENG Bo, et al. Evaluation of physical habitat integrity of Liangshui River in Beijing [J]. Water Resources Protection,2017,33(6):20-26. (in Chinese))
- [33] 王广博,徐翠兰,黄蕊,等. 江苏沿海地区围垦动态与土地利用变化驱动力研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):163-170. (WANG Guangbo, XU Cuilan, HUANG Rui, et al. Research on driving forces of reclamation dynamics and land use change in coastal areas of Jiangsu Province [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(2):163-170. (in Chinese))

(收稿日期:2022-08-06 编辑:熊水斌)