

# 基于“四水四定”的京津冀地区水资源空间均衡及其分布动态演进分析

杨亚锋<sup>1,2</sup>, 李欣瑞<sup>1</sup>, 王红瑞<sup>2</sup>, 周晓晓<sup>1</sup>, 刘祎萌<sup>1</sup>

(1. 华北理工大学理学院, 河北 唐山 063210; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

**摘要:**为深入探究京津冀地区水资源空间均衡及其分布动态演进特征,将京津冀地区划分为4个子区域:中部核心功能区、东部滨海发展区、南部功能拓展区和西北部生态涵养区。基于“四水四定”方针,从水资源与建设用地、耕地、人口和第二产业增加值之间的4组匹配关系出发,采用Dagum基尼系数和Kernel密度估计方法,探讨了京津冀地区水资源空间均衡及其分布动态演进过程。结果表明:2007—2022年京津冀地区水资源基本处在临界均衡状态,主要差异来自子区域间,多年平均贡献率达67.4%;京津冀地区的水资源匹配关系有所优化,但地区差距仍然存在并有持续扩大的趋势。

**关键词:**水资源空间均衡;Dagum基尼系数;Kernel密度估计;“四水四定”;京津冀地区

**中图分类号:**TV213.4

**文献标志码:**A

**文章编号:**1004-6933(2025)01-0107-07

**Analysis of water resources spatial equilibrium and dynamic evolution of water resources distribution in the Beijing-Tianjin-Hebei Region based on “Basing Four Aspects on Water Resources”**//YANG Yafeng<sup>1,2</sup>, LI Xinrui<sup>1</sup>, WANG Hongrui<sup>2</sup>, ZHOU Xiaoxiao<sup>1</sup>, LIU Yimeng<sup>1</sup> (1. College of Sciences, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** To further explore the water resources spatial equilibrium and its distribution dynamic evolution characteristics in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, the Beijing-Tianjin-Hebei Region was divided into four sub-regions: the central core functional area, the eastern coastal development area, the southern functional expansion area, and the northwestern ecological conservation area. Based on the “Basing Four Aspects on Water Resources” policy, starting from the four matching relationships between water resources and construction land, arable land, population, and added value of the secondary industry, the Dagum Gini coefficient and Kernel density estimation methods were used to explore the water resources spatial equilibrium and its distribution dynamic evolution process in the Beijing-Tianjin-Hebei Region. The results show that from 2007 to 2022, water resources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region were basically in a critical equilibrium state, with the main differences coming from sub-regions, and the average annual contribution rate reached 67.4%. The water resource matching relationship in the Beijing-Tianjin-Hebei Region has been optimized, but regional disparities still exist and continue to widen.

**Key words:** water resources spatial equilibrium; Dagum Gini coefficient; Kernel density estimation; “Basing Four Aspects on Water Resources”; the Beijing-Tianjin-Hebei Region

水资源是人类生存和经济社会发展的重要基础资源之一,目前水资源空间失衡等问题制约着区域经济社会的可持续发展,对生态环境保护造成了一定的压力<sup>[1-2]</sup>。因此,科学合理地管理水资源和优化水资源分配,成为实现区域可持续发展的重要任务之一。2014年,习近平总书记提出“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”治水思路,为应对该挑

战提供了指南<sup>[3]</sup>。在此背景下,水资源空间均衡逐渐成为水科学领域研究的热点和难点问题之一<sup>[4-6]</sup>。金菊良等<sup>[7]</sup>从水资源总量与耕地面积、人口数量、第二产业GDP的匹配关系角度对区域水资源空间均衡进行了定量评价。汪梦植等<sup>[8]</sup>从水资源需求端和供给侧两个角度出发开展了水资源空间均衡分析。杨亚锋等<sup>[9]</sup>利用耦合可变集原理和偏联系数

**基金项目:**北京市自然科学基金项目(8222057);国家自然科学基金项目(52279005)

**作者简介:**杨亚锋(1985—),男,副教授,博士,主要从事水资源系统分析研究。E-mail:hblgyyf@ncst.edu.cn

**通信作者:**王红瑞(1963—),男,教授,博士,主要从事水资源管理研究。E-mail:henrywang@bnu.edu.cn

方法构建了水资源的空间均衡评估模型。向征等<sup>[10]</sup>从水资源-人口、水资源-GDP、水资源-耕地3组匹配关系出发,借助基尼系数方法刻画了水资源空间分布均衡性。Zhao等<sup>[11]</sup>通过引入模糊指数和动态信息,分析了水资源空间均衡的时空特征及其未来演变趋势。相关研究中,水资源与人口、GDP、耕地的匹配关系被广泛关注,然而对城市建设发展考虑不足,而这正是“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”(简称“四水四定”)方针的内在要求之一。基于此,本文聚焦水资源供需矛盾突出的京津冀地区,以“四水四定”方针为指导,构建水资源空间均衡评价指标体系,采用Dagum基尼系数和Kernel密度估计方法,探究京津冀协同发展战略下水资源空间均衡状态及其分布动态演进,以期为该区域水资源管理及优化配置提供支撑。

## 1 研究区概况与数据来源

京津冀地区作为我国的首都经济圈,人口众多,经济繁荣,但也是水资源匮乏、水质污染严重、水生态退化明显、资源和环境与发展之间矛盾尖锐的区域之一<sup>[12-13]</sup>。京津冀地区面积约21.8万km<sup>2</sup>,占全国的2.3%,人口约1.1亿人,占全国的7.8%,GDP约占全国的9%。本文研究期设置为2007—2022年。2015年发布的《京津冀协同发展规划纲要》确定了京津冀协同发展战略布局<sup>[14]</sup>,即一核、双城、三轴、四区、多节点空间布局。其中,四区指中部核心功能区(北京、天津、保定和廊坊)、东部滨海发展区(秦皇岛、唐山和沧州)、南部功能拓展区(石家庄、邯郸、邢台和衡水)、西北部生态涵养区(张家口和承德)。将四区作为本文的子区域,具体情况如图1所示。

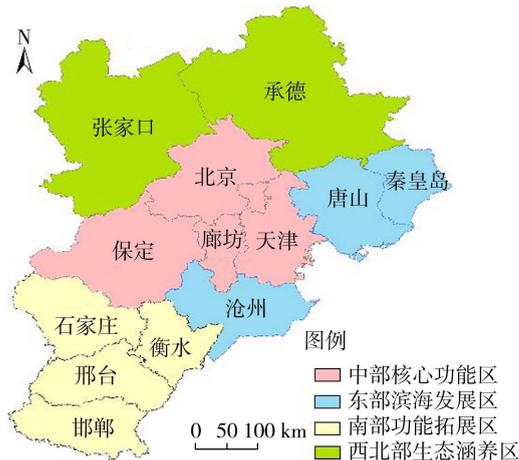


图1 研究区的子区域划分

Fig. 1 Sub-region division of study area

研究所使用的土地面积数据基于中国科学院资

源与环境科学数据中心提供的1 km分辨率的土地数据(<http://www.resdc.cn>)。水资源总量、人口、第二产业增加值等数据来源于中国统计年鉴、北京、天津和河北统计年鉴和水资源公报。考虑到遥感产品的可获取性及土地的相对稳定性,部分年份缺失数据利用相近年份替代。

## 2 研究方法

### 2.1 水资源子系统划分

水资源是人类各种经济社会活动的必要物质基础。在水资源的消耗过程中,水与经济社会各子系统之间形成了复杂的纽带关系,并且与城市、土地、人口、产业之间存在着重要的约束机制。结合姜宁等<sup>[15-16]</sup>的研究,依照“四水四定”方针,将水资源复杂系统划分为城-水、地-水、人-水、产-水4个子系统。

### 2.2 水资源空间均衡指标选择

水资源空间均衡指的是水资源在不同区域、不同子系统之间的合理分配,旨在确保各区域的水资源供需平衡。本文中水资源发展水平指区域保持水资源供需平衡的能力,水平高意味着能够有效管理和优化水资源分配,实现空间均衡;水平较低可能会导致水资源分布不均,某些区域水资源过度开发或不足,从而影响整体的空间均衡。选取单位建设用地面积水资源量、单位耕地面积水资源量、人均水资源量、单位第二产业增加值水资源量分别作为城-水、地-水、人-水、产-水子系统的指标来刻画水资源空间均衡情况,从水资源与建设用地、耕地、人口、第二产业增加值4个方面构建水资源空间均衡判别指标体系。为量化每个子系统在水资源空间均衡方面的发展水平,首先对指标进行标准化<sup>[17]</sup>,进而计算系统整体的发展水平:

$$E^* = \sum_{i=1}^4 w_i E_i \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

其中  $E_i = 0.001 + 0.998 [X_i - \min(X_i)] / [\max(X_i) - \min(X_i)]$

式中: $E^*$ 为系统整体的发展水平; $w_i$ 为各子系统的权重; $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ 、 $E_4$ 分别为城-水、地-水、人-水、产-水4个子系统的发展水平; $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 分别为单位建设用地面积水资源量、单位耕地面积水资源量、人均水资源量、单位第二产业增加值水资源量的指标值。

### 2.3 Dagum 基尼系数

基尼系数被广泛应用于评估国家或地区居民之间的收入差异,也经常被用来进行水资源的空间均衡分析<sup>[18-19]</sup>。在研究区包括多个子区域,每个子区

域中包括多个城市的情况下,总基尼系数的计算公式为

$$G = \left( \sum_{j=1}^k \sum_{h=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |E_{ji} - E_{hr}| \right) / (2n^2\bar{E}) \quad (j \neq h) \quad (2)$$

式中: $G$ 为总基尼系数; $k$ 为子区域数量; $n$ 为研究区城市的总数; $n_j$ 为第 $j$ 个子区域中的城市数量; $n_h$ 为第 $h$ 个子区域中的城市数量; $E_{ji}$ 为第 $j$ 个子区域中第 $i$ 个城市的指标值; $E_{hr}$ 为第 $h$ 个子区域中第 $r$ 个城市的指标值; $\bar{E}$ 为指标平均值。

第 $j$ 个子区域内部的基尼系数和第 $j$ 个子区域与第 $h$ 个子区域之间的基尼系数的计算公式为

$$G_{jj} = \left( \frac{1}{2\bar{E}_j} \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_j} |E_{ji} - E_{jr}| \right) / n_j^2 \quad (i \neq r) \quad (3)$$

$$G_{jh} = \left( \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |E_{ji} - E_{hr}| \right) / [n_j n_h (\bar{E}_j + \bar{E}_h)] \quad (4)$$

式中: $G_{jj}$ 为第 $j$ 个子区域内部的基尼系数; $G_{jh}$ 为第 $j$ 个子区域与第 $h$ 个子区域之间的基尼系数; $E_{jr}$ 为第 $j$ 个子区域中第 $r$ 个城市的指标值; $\bar{E}_j$ 为第 $j$ 个子区域的指标平均值; $\bar{E}_h$ 为第 $h$ 个子区域的指标平均值。

Dagum 等<sup>[20-21]</sup>提出将总体基尼系数分解为子区域内差异、子区域间差异和超变密度3部分,其中超变密度是因组间重叠而产生的基尼系数,反映了不同城市之间的互动对整体差异的影响。三者之间的关系为

$$G = G_R + G_B + G_H \quad (5)$$

其中

$$G_R = \sum_{j=1}^k G_{jj} P_j S_j$$

$$G_B = \sum_{j=2}^k \sum_{h=1}^{j-1} G_{jh} (P_j S_h + P_h S_j) D_{jh}$$

$$G_H = \sum_{j=2}^k \sum_{h=1}^{j-1} G_{jh} (P_j S_h + P_h S_j) (1 - D_{jh})$$

$$P_j = n_j/n \quad P_h = n_h/n$$

$$S_j = (n_j \bar{E}_j) / (n \bar{E}) \quad S_h = (n_h \bar{E}_h) / (n \bar{E})$$

式中: $G_R$ 为子区域内差异; $G_B$ 为子区域间差异; $G_H$ 为超变密度; $D_{jh}$ 为第 $j$ 个子区域与第 $h$ 个子区域之间的相对影响,计算公式为

$$D_{jh} = (d_{jh} - p_{jh}) / (d_{jh} + p_{jh}) \quad (6)$$

式中: $d_{jh}$ 为第 $j$ 个子区域与第 $h$ 个子区域之间的差异; $p_{jh}$ 为第 $j$ 个子区域与第 $h$ 个子区域的超变一阶矩。

## 2.4 Kernel 密度估计

Kernel 密度估计相比于对数据分布进行假设的方法,更具灵活性和稳健性,现已成为研究不平衡分布的常规方法。鉴于非参数估计缺乏明确的函数形

式,可以通过观察 Kernel 密度估计的图形数据,以确定变量分布的确切位置、形态及其延展特性等关键信息<sup>[22]</sup>。Kernel 密度提供水资源分布的连续性视图,可以更好地分析水资源分布的空间均衡特征和变化趋势。Kernel 密度估计的表达式为

$$f(x) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{X_i - x}{h}\right) \quad (7)$$

式中: $X_i$ 为来自总体 $X$ 的观测值; $N$ 为观测值的个数; $h$ 为带宽; $x$ 为均值, $h$ 越大, $x$ 附近的邻域越大; $K(\cdot)$ 为核函数,本文采用高斯 Kernel 函数对京津冀地区水资源空间均衡的分布进行估计,表达式为

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad (8)$$

基尼系数提供了对均衡程度的量化评价,而 Kernel 密度估计则提供了对水资源空间分布的连续性视图。在“四水四定”方针指导下,将这两种方法进行结合,可以更好地对水资源分配的空间分布特征进行综合评估,优化水资源在不同地区的分配,平衡空间上的水资源,以实现水资源高效和可持续利用。

## 3 结果与分析

### 3.1 京津冀地区水资源空间均衡状态

图2为2007—2022年京津冀地区水资源空间均衡状态。根据基尼系数划分水资源空间均衡状态,基尼系数为0~0.2为优质均衡,>0.2~0.3为中级均衡,>0.3~0.4为临界均衡,>0.4~0.5为中级失衡,>0.5为高度失衡。由图2可见,京津冀地区水资源空间均衡基本处在临界均衡状态,主要差异来自子区域间,多年平均贡献率高达67.4%,其次是子区域内差异的贡献率为14.9%,超变密度贡献率为17.7%。这一现象说明4个子区域发展水平差异较大,且子区域之间存在重叠现象,即发展水平高的区域内也存在发展水平较低的城市,反之亦然。

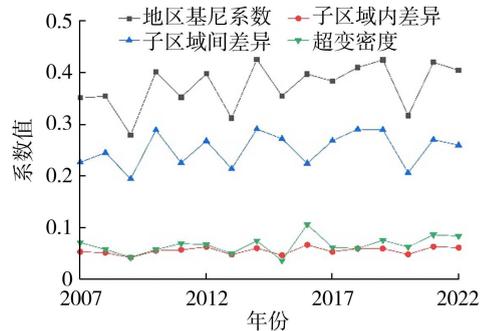


图2 2007—2022年京津冀地区水资源空间均衡状态  
Fig.2 Spatial equilibrium status of water resources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2007 to 2022

### 3.1.1 子区域间差异

表1为2007年、2012年、2018年、2022年的京津冀地区子区域间的基尼系数。由表1可见,京津冀地区各子区域间的差异主要存在于西北部生态涵养区与其他子区域之间。主要是因为西北部生态涵养区因水资源稀缺、经济发展滞后、生态保护政策以及较低的人口密度与用水需求等因素共同导致了该区域的水资源空间不均衡,使其与经济相对发达区域之间的差距显著。河北其他地市与京津之间差异在逐渐缩小,例如,中部核心功能区与南部功能拓展区的基尼系数在2012年为0.304,至2018年降至0.285。但中部核心功能区与其他子区域之间的差异相对较大,尤其是在2022年,中部核心功能区与西北部生态涵养区之间的基尼系数达到0.630。中部核心功能区经济发展水平、城市建设、人口密度都远高于西北部生态涵养区,这导致中部核心功能区与西部生态涵养区差异相对较大。中部核心功能区处于经济活动高度集中的区域,人口密度大,水资源需求高,供需矛盾突出,这些因素导致其与其他子区域之间呈显著差异。

表1 京津冀地区子区域间的基尼系数

Table 1 Gini coefficients between sub-regions in the Beijing-Tianjin-Hebei Region

年份	中部-东部	中部-南部	中部-西北	东部-南部	东部-西北	南部-西北
2007	0.317	0.271	0.481	0.330	0.422	0.488
2012	0.442	0.304	0.400	0.577	0.441	0.469
2018	0.365	0.285	0.568	0.400	0.448	0.592
2022	0.392	0.436	0.630	0.385	0.495	0.407

### 3.1.2 子区域内差异

图3为2007—2022年京津冀地区各子区域内的基尼系数。由图3可见,东部滨海发展区内的基尼系数最大,基本处于临界均衡状态,其他3个区域则均在中级均衡和优质均衡。秦皇岛、唐山和沧州虽都属于滨海城市,但在产业、城市、人口和耕地方面差异较大。秦皇岛作为著名旅游城市,第三产业较为发达,第二产业产值相对较低,同时耕地面积和建设用地面积均处于较低水平;相反,唐山作为老牌工业城市,在河北GDP中处于领先地位,水资源量相对秦皇岛和沧州稍多,城市建设规模相对较大;沧州拥有11461 km<sup>2</sup>的耕地面积,几乎是秦皇岛的4倍,人口比唐山略少,是秦皇岛的2倍多,但其第二产业增加值仅为唐山的50%左右。

### 3.1.3 超变密度

若子区域之间存在交叉或重叠的现象,即在低发展水平的子区域内,有些城市的发展水平已经超越了高发展水平子区域内的一些城市,就存在超变

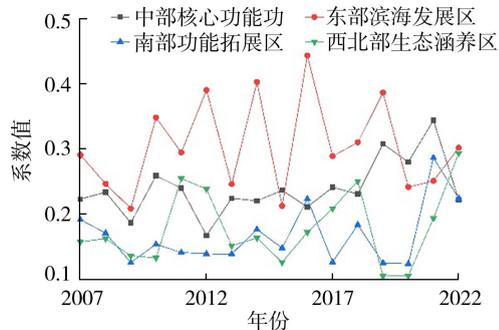


图3 2007—2022年京津冀地区各子区域内的基尼系数  
Fig. 3 Gini coefficients within sub-regions in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2007 to 2022

密度;如果子区域之间不存在交叉重叠现象,那么超变密度为0。为了缩小两个子区域间的差异,在提高低发展水平子区域的低发展水平城市水平的同时也需要降低高发展水平子区域的高发展水平城市。这样的做法可能会导致区域内差异加大、区域间差异缩小以及区域间重叠部分不平等程度的加剧,最终可能导致总体基尼系数上升<sup>[21]</sup>。图4为2007—2022年京津冀地区不同子系统的超变密度对总基尼系数的贡献率。由图4可见,地-水子系统的子区域间超变密度贡献率相对较大,说明4个子区域之间存在一定的重叠。总体来看,超变密度贡献率均在50%以下,可见从城市建设、产业发展、耕地面积和人口分布等方面分析,4个子区域的划分合理。

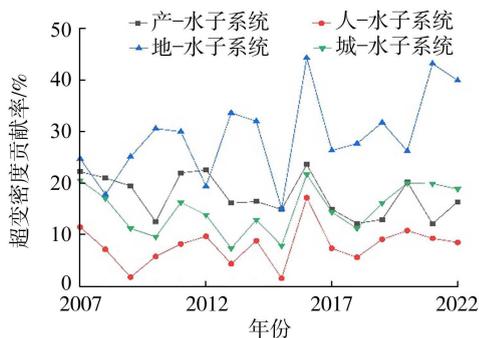


图4 2007—2022年京津冀地区不同子系统的超变密度对总基尼系数的贡献率  
Fig. 4 Contribution rate of super variable density of different subsystems to total Gini coefficient in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2007 to 2022

Fig. 4 Contribution rate of super variable density of different subsystems to total Gini coefficient in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2007 to 2022

## 3.2 水资源均衡分布动态演进

### 3.2.1 子区域分布动态演进

选取2007年、2010年、2013年、2016年、2019年、2022年作为样本,绘制4个子区域的Kernel密度估计二维图,反映4个子区域水资源均衡分布的动态演进过程,如图5所示。

由图5(a)可见,对于中部核心功能区,与2007年相比,2010年Kernel密度函数峰值升高,函

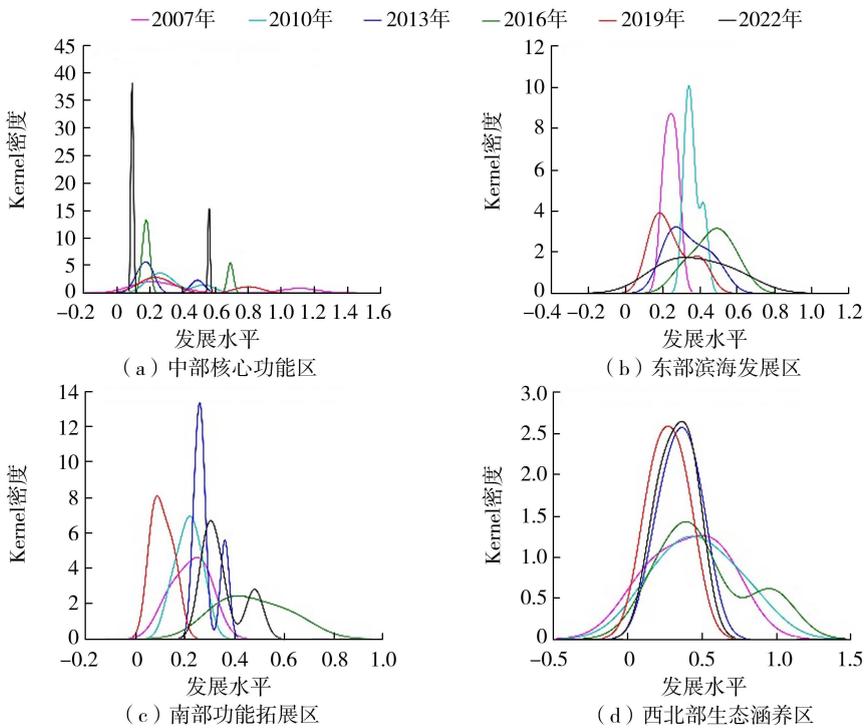


图 5 4 个子区域的 Kernel 密度估计二维图

Fig. 5 2D graph of kernel density estimation for four sub-regions

数区间缩小,说明 2010 年该地区水资源发展水平差距增大。2013 年 Kernel 密度函数的中心位置左移,函数区间继续缩小,峰值升高,这表明 2013 年该地区水资源发展水平的差距逐渐缩小。2016 年 Kernel 密度函数中心向右移动,峰值升高,波峰数量保持不变,说明 2016 年该地区极化现象没有消失。2019 年 Kernel 密度函数中心右移,函数区间范围变大,峰值变小,但是波峰数量仍然保持不变,说明随着水资源发展水平的提升,地区差距增大,极化现象仍未消失。2022 年 Kernel 密度函数中心位置左移,函数区间范围变小,峰值变大,波峰数量不变,表明 2007—2022 年该地区内水资源发展水平整体不断提高,子区域内各城市之间差距逐渐缩小,但两极化现象较为严重。

由图 5 (b) 可见,对于东部滨海发展区,与 2007 年相比,2010 年的 Kernel 密度函数峰值有所上升,波峰的数量从单峰变为双峰,函数区间变大,表明该地区的水资源发展水平两极化现象开始出现。2013 年 Kernel 密度函数的中心位置向左偏移,函数区间扩大,峰值有所下降,波峰数量由双峰变为单峰,意味着在 2013 年极化现象消失。2016 年 Kernel 密度函数的中心位置向右偏移,其峰值基本不变,函数区间略有扩大,波峰数量保持不变,表明该地区的水资源已经达到了一个临界均衡状态。2019 年 Kernel 密度函数的中心位置左移,峰值增加,波峰的数量从单峰变为双峰,表明 2019 年该地区的水资源

发展状况是不平衡的。2022 年 Kernel 密度函数的中心位置向右偏移,函数区间变大,峰值降低,并且波峰的数量也从双峰变为了单峰,表明 2007—2022 年该地区内水资源整体发展水平持续提升,同时极化现象也消失了,各个城市之间的差异正在逐渐扩大,呈现出失衡的状态。

由图 5 (c) 可见,对于南部功能拓展区,与 2007 年相比,2010 年 Kernel 密度函数峰值有所上升,函数区间缩小,表明 2010 年该地区内的水资源发展水平差异已经减小。2013 年 Kernel 密度函数的曲线变得更为陡峭,函数中心向右偏移,函数区间缩小,峰值上升,而波峰的数量也从单峰值变为多个峰值,意味着 2013 年该地区的水资源发展状况并不平衡,出现了两极分化的情况。与 2013 年相比,2016 年 Kernel 密度函数中心开始向右偏移,峰值降低,函数区间也逐渐扩大,波峰的数量从多峰变为单峰,意味着 2016 年该地区内的差异在不断扩大,随着水资源发展水平的进步,极化现象开始逐步消失。2019 年 Kernel 密度函数的中心位置左移,函数区间范围缩小,峰值增大,而波峰的数量保持不变,表明随着水资源发展水平的持续进步,各地区之间差异也在逐步减少,整体的均衡状况得到了改善。2022 年 Kernel 密度函数的中心位置开始向右偏移,函数区间逐渐扩大,峰值逐步降低,而波峰数量也从单峰值转变为多峰,意味着两极分化和各地区之间的差距再次浮现。

由图 5(d) 可见,对于西北部生态涵养区,与 2007 年相比,2010 年 Kernel 密度函数峰值和波峰数量基本保持不变,函数区间略有扩大,表明 2010 年的地区差异有所扩大,两极化现象没有发生变化。2013 年 Kernel 密度函数区间逐步缩小,峰值逐步上升,波峰的数量保持不变,表明 2013 年该地区的水资源发展水平的城市间差异逐步减小,没有出现两极分化的情况。2016 年 Kernel 密度函数的中心位置向右偏移,峰值开始下降,函数区间范围扩大,波峰的数量从单峰变到多峰,表明随着地区水资源的发展水平的提升,地区差异加大,极化现象逐步显现。2019 年 Kernel 密度函数的中心位置左移,函数区间缩小,峰值显著增大,从多峰转变为单峰,这一变化表明随着 2019 年整体水资源发展水平下降,极化现象逐步消失,同时城市间的差异也在逐步减小。2022 年 Kernel 密度函数的中心位置向右偏移,峰值略有增加,而波峰数量保持稳定,这表明随着水资源整体发展水平的下降,2022 年的极化现象已经消失,城市间的差异也在逐步减小。

### 3.2.2 总体分布动态演进

图 6 为京津冀地区的 Kernel 密度估计二维图。由图 6 可见,与 2007 年相比,2010 年 Kernel 密度函数最高峰值降低,由单峰变为多峰,函数区间增大,说明 2010 年子区域间差距逐渐变大,两极化现象逐渐出现。2013 年 Kernel 密度函数的中心位置向右移动,函数区间逐步缩小,峰值持续上升,但波峰的数量保持不变,表明随着京津冀地区水资源的逐渐完善,子区域间的差异逐步减少,但仍然存在两极分化的情况。2016 年 Kernel 密度函数的中心开始向右偏移,峰值逐渐减少,函数的曲线变得更为平稳,函数区间扩大,波峰的数量从多峰变为单峰,表明 2016 年子区域间的差异正在扩大,但随着水资源发展水平的提高,极化现象消失。2019 年 Kernel 密度函数中心位置向左偏移,函数区间缩小,峰值增加,波峰也从单峰变为多峰,这一现象表明随着 2019 年

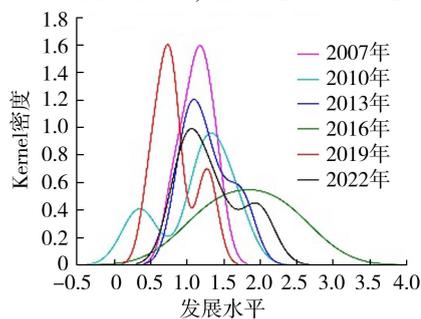


图 6 京津冀地区的 Kernel 密度估计二维图

Fig. 6 2D graph of kernel density estimation for the Beijing-Tianjin-Hebei Region

水资源发展水平变化,子区域间的差异逐渐减小,极化现象再次显现。与 2019 年相比,2022 年 Kernel 密度函数中心位置向右偏移,函数区间扩大,最高峰值降低,波峰数量不变,表明随着水资源发展水平的提高,子区域间的差距随之变大,两极化现象仍未消失。

## 4 结 语

2007—2022 年,京津冀地区的水资源基本处在临界均衡状态,主要差异来自子区域间,多年平均贡献率高达 67.4%。这些差异的驱动因素包括区域经济发展、土地利用、政策调控以及自然环境差异。西北部生态涵养区与其他子区域的差异主要源于该区域的生态保护政策,限制了其经济和建设用地的的发展,导致其与其他子区域的水资源状况存在较大差距。中部核心功能区的差异则主要受经济发展速度和资源消耗水平的影响,该区域由于经济活动密集和用水需求高,导致其与西北部生态涵养区之间呈显著差异。东部滨海发展区虽然水资源处于临界均衡状态,但随着经济的发展,与其他子区域之间的差距逐渐扩大。南部功能拓展区和西北部生态涵养区的差异化变化则是由于其发展水平和经济结构的调整,水资源空间分布状态趋向均衡。对于处于临界均衡状态的区域,如东部滨海发展区,需重点关注与其他子区域间差距的扩大,采取措施缓解地区间的水资源不均衡问题。针对西北部生态涵养区,需要继续加强生态保护,合理安排经济活动,避免过度开发和资源的过度消耗。中部核心功能区的两极化现象则需要优化资源配置,促进区域内的均衡发展。对于南部功能拓展区的情况则需要关注如何合理分配资源,防止水资源发展水平差距进一步扩大。

### 参考文献:

[ 1 ] 石常峰,俞越,吴凤平,等. 近远程耦合视角下黄河流域产业虚拟水流动与水资源短缺风险传递[J]. 自然资源学报, 2024, 39(1): 228-244. (SHI Changfeng, YU Yue, WU Fengping, et al. Exploring virtual water flows and water resources risk transfer in the Yellow River Basin based on local-distant perspective[J]. Journal of Natural Resources, 2024, 39(1): 228-244. (in Chinese))

[ 2 ] WANG Yanqiu, HUANG Xiaorong, GAO Linyun, et al. Preliminary research on quantitative methods of water resources carrying capacity based on water resources balance sheet[J]. Proceedings of IAHS, 2018, 379: 269-277.

[ 3 ] 黄建水. 新时期治水的内涵和任务: 习近平同志重要治

- 水思想学习体会[J]. 水利发展研究, 2014, 14(9): 17-18. (HUANG Jianshui. The connotation and tasks of water control in the new era-learning and understanding of important water control thoughts of Xi Jinping[J]. Water Resources Development Research, 2014, 14(9): 17-18. (in Chinese))
- [4] 何凡, 路培艺, 尹婧, 等. 中国水资源空间均衡评价与空间关联性分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 148-155. (HE Fan, LU Peiyi, YIN Jing, et al. Spatial equilibrium evaluation and spatial correlation analysis of water resources in China[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 148-155. (in Chinese))
- [5] 郭旭宁, 酆建强, 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))
- [6] 魏豪杉, 王红瑞, 郝鹏鑫, 等. 基于水资源空间均衡的“四水四定”调控模型构建[J]. 水资源保护, 2024, 40(3): 71-77. (WEI Haoshan, WANG Hongrui, JIA Pengxin, et al. Construction of “defining city, land, population, and industry based on water” regulation and control model based on spatial equilibrium of water resources[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 71-77. (in Chinese))
- [7] 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))
- [8] 汪梦植, 吴成国, 王晓宇, 等. 基于空间均衡指数的水资源空间均衡评价模型[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2023, 44(6): 58-65. (WANG Mengzhi, WU Chengguo, WANG Xiaoyu, et al. Evaluation model of spatial equilibrium of water resources based on spatial equilibrium index[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2023, 44(6): 58-65. (in Chinese))
- [9] 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))
- [10] 向征, 高海丽. 黔中城市群水资源空间均衡状态分析[J]. 人民长江, 2023, 54(9): 106-113. (XIANG Zheng, GAO Haili. Spatial equilibrium of water resources in central Guizhou urban agglomeration [J]. Yangtze River, 2023, 54(9): 106-113. (in Chinese))
- [11] ZHAO Ziyang, CAI Yihui, YANG Yafeng. Construction and application of a water resources spatial equilibrium model: a case study in the Yangtze river economic belt [J]. Water, 2023, 15(16): 2984.
- [12] 赵勇, 王庆明, 王浩, 等. 京津冀地区水安全挑战与应对战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(5): 8-18. (ZHAO Yong, WANG Qingming, WANG Hao, et al. Water security in Beijing-Tianjin-Hebei region: challenges and strategies [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(5): 8-18. (in Chinese))
- [13] 曹晓峰, 胡承志, 齐维晓, 等. 京津冀区域水资源及水环境调控与安全保障策略[J]. 中国工程科学, 2019, 21(5): 130-136. (CAO Xiaofeng, HU Chengzhi, QI Weixiao, et al. Strategies for water resources regulation and water environment protection in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(5): 130-136. (in Chinese))
- [14] 冀丰渊. 京津冀协同发展规划纲要[C]//对接京津: 解构京津冀一体化与推动区域协同发展(对接京津与环首都沿渤海第13次论坛[二])论文集. 廊坊: 廊坊市应用经济学会, 2016: 10.
- [15] 姜宁, 付强. 基于基尼系数的黑龙江省水资源空间匹配分析[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(5): 56-60. (JIANG Ning, FU Qiang. Spatial matching analysis of Heilongjiang Province's water resource based in Gini coefficient [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(5): 56-60. (in Chinese))
- [16] 党云刚. 陕西省水资源空间均衡状态分析与协调研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 36-42. (DANG Yungang. Analysis and coordination research on spatial equilibrium of water resources in Shaanxi Province [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2022, 43(3): 36-42. (in Chinese))
- [17] 李晖煜, 赵涛. 复杂系统协调度评价模型研究[J]. 中国农机化, 2008(6): 44-46. (LI Xuanyu, ZHAO Tao. Study of coordinating evaluation model for composite system [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2008(6): 44-46. (in Chinese))
- [18] 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))

- et al. Model and application of optimal allocation of water resources in water-deficient areas for high-quality development[J]. Yellow River, 2024, 46(2): 73-79. (in Chinese))
- [15] 安莉娜, 范国福, 吴迪, 等. 基于水资源承载力与城市经济社会发展水平耦合协调度模型的遵义市发展评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 35-41. (AN Lina, FAN Guofu, WU Di, et al. Development evaluation of Zunyi City based on coupling coordination degree model of water resources carrying capacity and urban economic and social development level[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 35-41. (in Chinese))
- [16] 徐晋轩, 李一阳, 潘兴瑶, 等. 多时空尺度协同的场次降雨水资源量评价方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 19-25. (XU Jinxuan, LI Yiyang, PAN Xingyao, et al. Evaluation method of precipitation water resources based on multiple temporal and spatial scale coordination[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(1): 19-25. (in Chinese))
- [17] 石碧清, 刘湘, 全玉莲, 等. 需求侧管理技术在秦皇岛市水资源管理中的应用[J]. 水资源保护, 2008, 24(5): 73-75. (SHI Biqing, LIU Xiang, QUAN Yulian, et al. Application of demand-side management technology in water resources management in Qinhuangdao City[J]. Water Resources Protection, 2008, 24(5): 73-75. (in Chinese))
- [18] 王顺久, 侯玉, 张欣莉, 等. 中国水资源优化配置研究的进展与展望[J]. 水利发展研究, 2002, 2(9): 9-11. (WANG Shunjiu, HOU Yu, ZHANG Xinli, et al. Progress and prospect for study on water resources optimal
- allocation in China[J]. Water Resources Development Research, 2002, 2(9): 9-11. (in Chinese))
- [19] 游进军, 甘泓, 王浩. 水资源配置模型研究现状与展望[J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(3): 1-5. (YOU Jinjun, GAN Hong, WANG Hao. Advance in water allocation model and prospect[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2005, 16(3): 1-5. (in Chinese))
- [20] 常奂宇. WAS 模型研发改进与京津冀水资源配置应用[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
- [21] 桑学锋, 王浩, 王建华, 等. 水资源综合模拟与调配模型 WAS( I ): 模型原理与构建[J]. 水利学报, 2018, 49(12): 1451-1459. (SANG Xuefeng, WANG Hao, WANG Jianhua, et al. Water resources comprehensive allocation and simulation model ( WAS ), part I : theory and development[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(12): 1451-1459. (in Chinese))
- [22] 桑学锋, 赵勇, 翟正丽, 等. 水资源综合模拟与调配模型 WAS( II ): 应用[J]. 水利学报, 2019, 50(2): 201-208. (SANG Xuefeng, ZHAO Yong, ZHAI Zhengli, et al. Water resources comprehensive allocation and simulation model ( WAS ), part II : application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(2): 201-208. (in Chinese))
- [23] 栾清华, 高昊悦, 刘红亮, 等. 基于 GWAS 模型的武安市水资源优化配置[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 32-42. (LUAN Qinghua, GAO Haoyue, LIU Hongliang, et al. Optimal allocation of water resources in Wu'an City based on GWAS model[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 32-42. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-04-12 编辑: 王芳)

(上接第 113 页)

- [19] 杨明海, 卢晓杨, 孙亚男. 三大经济支撑带创新能力地区差距及分布动态演进: 利用 Dagum 基尼系数和非参数估计方法的实证研究[J]. 科技进步与对策, 2017, 34(7): 34-42. (YANG Minghai, LU Xiaoyang, SUN Yanan. Regional disparity and distribution dynamics evolution of innovation capability in three major economic support zone: an empirical study based on the Dagum's Gini coefficient and non-parameter estimation method[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2017, 34(7): 34-42. (in Chinese))
- [20] DAGUM C. A new approach to the decomposition of the Gini income inequality ratio[J]. Empirical Economics, 1997, 22(4): 515-531.
- [21] 刘华军, 鲍振, 杨骞. 中国农业碳排放的地区差距及其分布动态演进: 基于 Dagum 基尼系数分解与非参数估计方法的实证研究[J]. 农业技术经济, 2013(3): 72-81. (LIU Huajun, BAO Zhen, YANG Qian. Regional disparities and dynamic evolution of carbon emissions from agriculture in China: an empirical study based on Dagum Gini coefficient decomposition and non-parametric estimation methods[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2013(3): 72-81. (in Chinese))
- [22] 郝铭, 段琳琼, 陈常优, 等. 黄河流域与长江经济带农业水资源利用效率与影响因素的差异性研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 267-277. (HAO Ming, DUAN Linqiong, CHEN Changyou, et al. Differences in agricultural water use efficiency and its influencing factors between Yellow River basin and Yangtze River economic belt[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 267-277. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-06-24 编辑: 王芳)