

基于信息熵的河北省用水结构时空演变分析

董森¹, 卢华², 白惠婷², 庞婷婷¹, 张殷钦¹, 高昊悦¹

(1. 河北工程大学 河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038; 2. 河北思禹水利工程有限公司, 河北 石家庄 050051)

摘要: 为了揭示河北省用水结构在时间和空间上的演变规律,采用信息熵理论分析河北省及各地市 2001–2018 年的用水结构时空变化规律。结果表明:2001–2018 年河北省各地市用水结构信息熵值由 0.68 上升至 1.00,反映出各地市用水系统的稳定性和均衡性在不断增强;时间尺度上,各地市信息熵值分为“高、中、低”3 个梯队,梯队之间的差异呈现逐渐扩大的演变趋势,2018 年各梯队信息熵值的差异均在 0.12 以上;空间尺度上,全省信息熵值由环渤海地区向内陆、环京津地区向冀南地区均呈现逐渐减小的渐变型分布规律。上述时空演变特征反映了河北省的经济社会发展历程对用水结构变化的映射作用。研究成果可为河北省各地市未来产业优化布局和用水管理提供科学决策依据。

关键词: 用水结构; 信息熵; 时空演变; 对比分析; 空间特征

中图分类号:TV213.4 文献标识码:A 文章编号:1672-643X(2022)01-0079-07

Spatio-temporal evolution of water use structure in Hebei Province based on information entropy

DONG Sen¹, LU Hua², BAI Huiting², PANG Tingting¹, ZHANG Yinquin¹, GAO Haoyue¹

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Hebei Siyu Water Engineering Co., Ltd., Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: In order to reveal the temporal and spatial evolution of water use structure in Hebei Province, information entropy theory was employed to analyze the spatio-temporal characteristics of water use structure in cities of Hebei Province from 2001 to 2018. The results showed that the information entropy of water use structure in various cities of the province increased from 0.68 to 1.00, which reflected an increase of stability and balance in the water use system. On the temporal scale, cities within the province were categorized as “high-level”, “medium-level” and “low-level” according to the information entropy values, and the discrepancies of different levels were gradually enlarging, and the difference of the information entropy between any two levels was larger than 0.12 in 2018. The spatial distribution of information entropy in Hebei Province illustrated a gradual variation, which decreased from the Bohai Rim to the inland and from the Beijing–Tianjin Rim to the southern Hebei. The above spatio-temporal evolution characteristics of information entropy reflected the influence of economic and social development on the variation of water use structure. The findings could provide some technical support for the effective decision-making of industrial optimization and local water resources management in Hebei Province.

Key words: water use structure; information entropy; spatio-temporal evolution; comparative analysis; spatial characteristics

1 研究背景

我国水资源情势严峻,不少地区面临着水资源短缺、水生态污染等风险^[1],水资源已成为制约区

域绿色高质量发展的重要因素。在此背景下,中央提出了“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的新时代治水方针^[2]。其中,科学规划区域用水结构是贯彻新时代治水方略的重要举措,而掌握用水

收稿日期:2021-09-12; 修回日期:2021-12-13

基金项目:河北省水利科研与推广计划项目(2017–57);河北省高等学校科学技术研究项目(QN2019151)

作者简介:董森(1996–),男,河北临漳人,硕士研究生,主要从事水文学及水资源研究。

通讯作者:张殷钦(1985–),女,甘肃会宁人,博士,讲师,主要从事水文学及水资源研究。

结构的演变过程和空间分布特征则是科学调整区域用水结构的关键基础。目前,关于用水结构的分析方法主要有洛伦兹法、生态位理论、量化水足迹法和信息熵理论等。如陈良等^[3]将洛伦兹曲线法应用于甘肃省的用水结构分析,得出了甘肃省2008-2018年用水结构具有较大差异性的结论;焦士兴等^[4]采用生态位理论对安阳市2008-2017年用水结构和产业结构的耦合度进行了分析,结果表明二者耦合度不断优化;侯林秀等^[5]运用量化水足迹法对内蒙古1998-2018年间的用水结构进行了分析,结果得出研究区水足迹整体呈上升态势;综上,尽管专家学者们采用不同的研究方法分析了不同区域的用水结构并取得了一定的成果,但同时也反映出上述方法的不足之处:如洛伦兹法无法量化各产业用水的差异程度,需由其它系数进行补充;生态位理论无法系统反映地区用水结构稳定性;量化水足迹法在描述区域用水结构均衡性时不够直观等。与上述方法相比,信息熵理论可以客观反映用水结构平衡度,且计算简便、结果直观,因此其被广泛用于分析用水结构的演变规律。在区域尺度上,何艳虎等^[6]运用信息熵理论对我国不同区域典型省份1999-2014年用水结构的演变进行了分析,得出我国东部地区用水结构相对稳定的结论;在省域尺度上,甘丰余等^[7]和雷欢等^[8]运用信息熵理论分别探究了2000-2016年海南省以及2001-2010年陕西省用水结构的时间演变规律;在市域尺度上,崔婧等^[9]运用信息熵理论分析了忻州市用水结构的特点;吴旭等^[10]运用信息熵理论探究了邯郸市2008-2017年用水结构的演变规律。上述研究层面多在区域、省域、市域的单一尺度上,而基于省、市域不同空间尺度进行用水结构分析的尚不多见。

近年来华北地区各省份产业用水结构调整频繁^[11]且涉水政策变化较大^[12-15],其用水结构在时间和不同空间演变规律如何,需要开展相关研究。基于上述背景,本文采用信息熵分析了2001-2018年河北省用水结构的时间演变规律,并解析了其下辖的11个地级市用水结构的分布特征,以期为区域各市未来产业优化布局和“以水而定”背景下的用水管理提供决策参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

河北省位于华北平原腹地,下辖11个地级市。河北省水资源匮乏,2018年全省人均水资源量仅为

217.09 m³,不足同年全国人均水平的1/10。河北省行政区划图见图1。

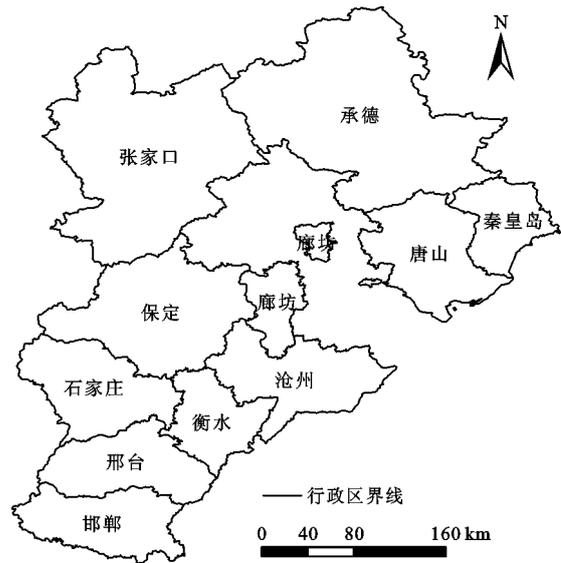


图1 河北省行政区划

2001-2018年河北省各行业逐年用水量见图2。由图2可看出,自2001年以来,河北省用水总量呈现波动减少态势,用水总量由2001年的 $211.24 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减少至2018年的 $182.42 \times 10^8 \text{ m}^3$,年均减少0.80%。各用水行业中,农业灌溉用水为第一用水大户,由2001年的 $164.84 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减少至2018年的 $121.08 \times 10^8 \text{ m}^3$;工业用水量同样呈减少态势,2018年较2001年减少了 $8.19 \times 10^8 \text{ m}^3$;生活用水量呈稳步增大趋势,2018年较2001年增加了 $8.78 \times 10^8 \text{ m}^3$,也印证了2001年来河北省城镇化范围在不断扩大。生态环境用水量则呈现大幅增长的趋势,由2001年的 $0.2952 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加至2018年的 $14.51 \times 10^8 \text{ m}^3$,与当下社会日益重视生态环境的背景相符。

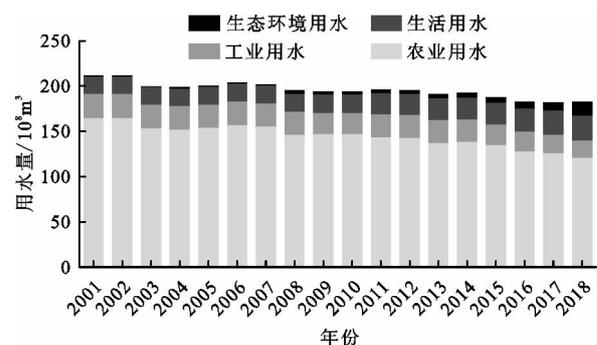


图2 2001-2018年河北省各行业逐年用水量

以2018年为典型年,将河北省当年用水效率与全国平均水平以及水资源本底条件相似的同区位的

京、津两市进行比较分析,具体比较指标见表 1。由表 1 可知,河北省各用水效率指标优于全国平均水平,但均低于京津地区。其中,万元 GDP 用水量为 50.65 m^3 ,优于全国平均水平 67.07 m^3 ,但分别与 12.96 m^3 和 15.10 m^3 的京津地区相比,落后幅度显著,说明河北省的用水效益远落后于同区位的两个经济高地,也间接反映河北省产业结构进一步深入调整优化的空间较大;河北省万元工业增加值用水量为 16.3 m^3 ,优于全国平均水平,略低于天津(12.5 m^3)但远落后于北京(7.8 m^3),说明河北省工业的布局优化和节水均有一定潜力可挖;就农业用水效率而言,河北省灌溉水利用系数为 0.674,高于全国平均水平,略低于京津地区;生态环境用水占比为 7.95%,高于全国平均水平,大幅落后于京津地区。

表 1 2018 年京津冀及全国的用水效率及生态用水占比

区域	万元 GDP 用水量/ m^3	万元工业增加值用水量/ m^3	灌溉水有效利用系数	生态环境用水量占比/%
北京	12.96	7.8	0.747	34.10
天津	15.10	12.5	0.714	19.72
河北	50.65	16.3	0.674	7.95
全国	67.07	38.4	0.559	3.34

2.2 数据来源

本文涉及数据主要来源于官方水资源公报和统计年鉴。其中信息熵值计算所用数据资料源自 2001—2018 年《河北省水资源公报》及河北省下辖的 11 个地级市水资源公报;用水效率指标数据来源于 2018 年《中国水资源公报》;涉及分析论证的相关经济指标数据来源于国家经济统计年报。

2.3 研究方法

信息熵理论最早由刘燕等^[16]引入到水资源系统研究之中,由于该理论能够客观描述系统的混乱度和无序度,因而被广泛用于评价用水资源系统的演化规律。信息熵公式表达如下:

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i \cdot \ln P_i \quad (1)$$

式中: H 为信息熵值; i 为用水类型; n 为区域用水类型的总个数; P_i 为各类用水比重。在此, H 值反向表征了用水量在各类用水部门间的分配差异性,即其值越大表明各类用水差异性越少,用水系统越稳定。

按照水资源公报统计,用水分为农业灌溉用水、工业用水、城镇居民生活用水、农村居民生活用水、生态环境用水、农林渔牧用水和城镇公共用水共 7

类,参考以往用水结构分析经验,将水资源利用类型分为农业用水、工业用水、生活用水和生态环境用水 4 大类,因而利用公式(1)进行信息熵值计算时, n 取值为 4。

3 结果与分析

3.1 全省用水结构信息熵时间演变分析

根据公式(1)可计算得出河北省用水结构信息熵值,计算结果见图 3。由图 3 可以看出,2001—2018 年河北省信息熵值呈明显上升趋势,说明用水系统的稳定性逐年增强。结合图 2,农业、工业、生活和生态的用水量比例由 2001 年的 78.0:12.9:10.2:0.1 变化为 2018 年的 66.4:10.4:15.2:7.9,说明图 3 所示的信息熵逐年演变过程较好地反映了区域用水结构不断优化、持续均衡的特性。河北省信息熵值的增长趋势在 2008 和 2014 年前后分别呈现出增长突变性和小阶段增长的平稳性,结合区域经济发展因素分析,主要是因为 2008 年北京奥运会的举办以及 2014 年京津冀协同发展战略的提出为河北省分别带来了内需激增的经济刺激和全域经济发展再次突破瓶颈的机遇。因此,本文将河北省用水序列分为第 1 阶段(2001—2007 年)、第 2 阶段(2008—2013 年)和第 3 阶段(2014—2018 年)进行分析,并结合图 2 对熵值演变的驱动因素进行具体剖析。

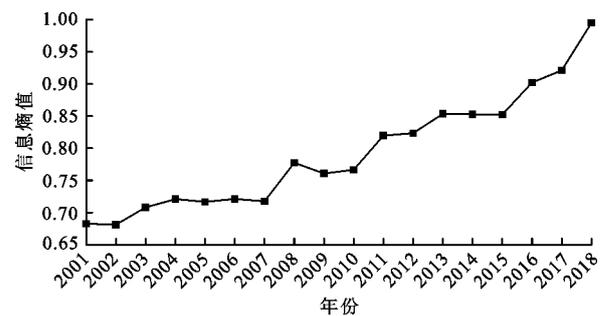


图 3 2001—2018 年河北省用水结构信息熵值变化曲线

(1)第 1 阶段。该阶段河北省信息熵曲线呈现缓慢上升的趋势,数值由 0.86 上升到 0.94。由 2001—2007 年河北省统计年鉴数据可知,耕地农作物灌溉用水占农业用水的 90% 以上,而农业耕种面积由 2001 年的 $686.7 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 降至 2007 年的 $586.7 \times 10^4 \text{ hm}^2$,降幅达 14.6%。农业耕地面积的减少使得农业用水占比下降。此外,生态环境用水占比由 2001 年的 0.14% 缓慢上升至 2007 年的 0.60%。这一阶段的信息熵演变规律展示出河北省用水均衡性的提升,与上述农业用水不断下降、生态

环境用水缓慢增加的特征相符合,也间接映射出河北省产业逐渐优化调整的情势。

(2)第2阶段。该阶段河北省信息熵值呈现先小幅下降后逐渐上升的趋势,受益于2008年北京奥运会,国际贸易环境大幅改善,外向型经济为河北省的发展注入新的活力,因此,该年份的信息熵值较前一年呈现出较大的跳跃式增长,随后,2009年有所回落后,2010年小幅上升。这3年信息熵值变化趋势也体现了北京对河北省经济发展的协同带动作用。2011年之后,河北省信息熵值呈稳步上升态势,很好地反映了最严格水管理制度的颁布等相关政策的实施在河北省用水结构优化和均衡化的作用。

(3)第3阶段。该阶段河北省信息熵值呈现先平缓再于2016年后快速增长的趋势,这一变化间接反映了河北省实施地下水超采系统综合治理和生态文明建设的效果。具体分析可知,一方面自2014年起,河北省逐步推行喷灌、滴灌、高标准管灌等不同类型的节水灌溉方式,并开展轮耕、休耕试点,使得农业用水量持续下降(图2);另一方面,随着河北省绿色高质量发展的客观需求,全省生态环境水量逐步增加,特别是2018年南水北调中线生态补水的效果显著,使2018年河北省信息熵值显著升高。

综上所述,全省信息熵值的上升间接反映了各阶段相关政策的实施促使用水结构的变化。结合表1,河北省的万元GDP用水量和生态用水占比指标较同区位京津地区还有较大差距,故未来河北省信息熵值的上升潜力主要在于全省经济结构的调整和生态环境用水占比的提高。

3.2 各市用水结构时间演变分析

同理,由公式(1)可计算得出河北省各市信息熵值逐年演变过程,计算结果见图4。由图4可以看出,2001-2018年河北省各市信息熵值均呈上升态势,进一步解析各地市信息熵值,全省信息熵值可分为“高、中、低”水平,进而按各地市信息熵值水平划分成3个梯队:(1)第1梯队,由信息熵处于全省较高水平的廊坊、唐山、秦皇岛、石家庄市组成,其中2018年石家庄市的信息熵值最高达1.14,其余信息熵值在1.08以上;(2)第2梯队,承德、邯郸、沧州、保定、邢台和张家口市信息熵值在全省处于中游水平,2018年信息熵值处在0.78~0.95范围内;(3)第3梯队,衡水市信息熵值一直在全省处于较低水平,2018年信息熵值为0.62。各梯队的信息熵值变化代表其用水结构均衡性的演变,而梯队的分层则印证了河北省用水结构均衡性在时间演变下逐渐有

区域性的差异存在。

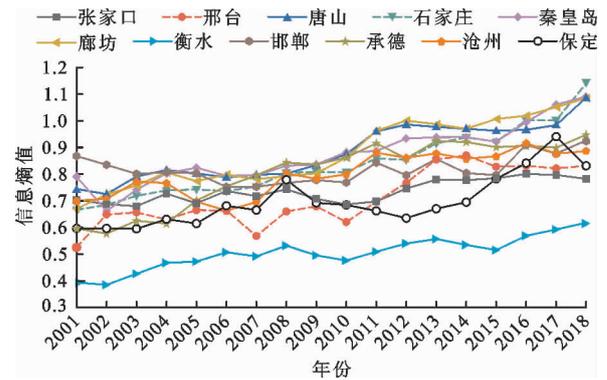


图4 2001-2018年河北省各市信息熵值演变

采用上文所述3个时间段,分阶段绘制了3个梯队信息熵值演变过程,分别见图5~7。

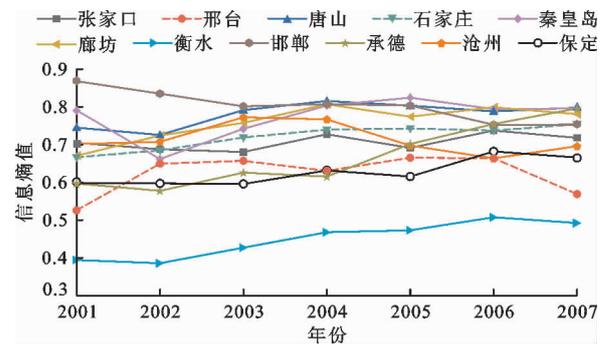


图5 2001-2007年(第1阶段)各市信息熵值演变

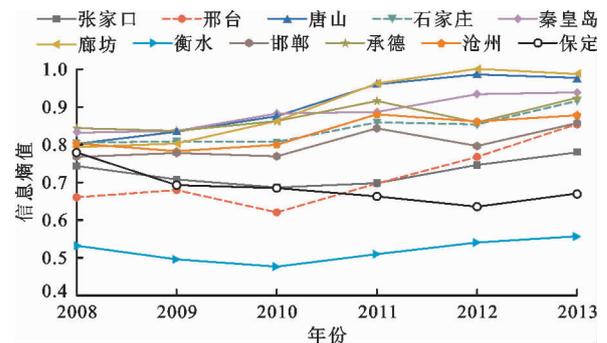


图6 2008-2013年(第2阶段)各市信息熵值演变

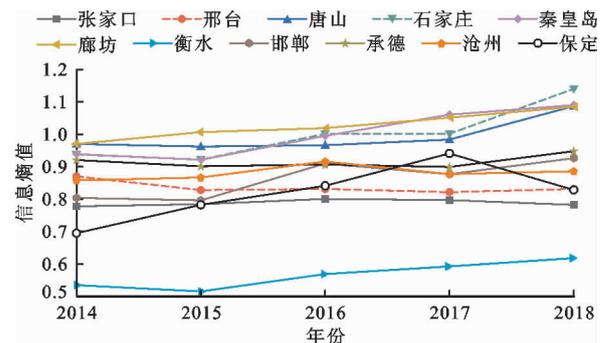


图7 2014-2018年(第3阶段)各市信息熵值演变

对图 5~7 所示的 3 个阶段各市信息熵值具体演变特征分析如下:

(1)第 1 阶段(图 5)。总体来看,第 1 梯队的信息熵值比第 2 梯队稍高,但并无明显分界,第 3 梯队则明显落后。就各梯队信息熵值的演变趋势来看,第 1 梯队除廊坊市和石家庄市外其余地市在 2002 年出现明显的下降趋势,其中秦皇岛市信息熵值出现极小值 0.66,2002 年之后第 1 梯队各市均呈较为稳定的上升趋势;第 2 梯队邯郸市信息熵值呈现缓慢下降态势,而沧州市呈现先上升后下降的趋势,该梯队内其他地市则呈波动缓慢上升状,且波动的时间点不尽相同;第 3 梯队衡水市信息熵值在 2002、2007 年相较前一年略有下降外,整体呈缓慢上升趋势。

就各梯队信息熵值在本阶段起讫点的整体变化幅度来看,第 1 梯队都有不同幅度的增加,其中廊坊市的上升变幅最大,由 2001 年的 0.67 上升至 2007 年的 0.78,上升了近 17%;第 2 梯队中,邯郸市由 2001 年的 0.87 下降至 2007 年 0.75,下降幅度达 13%,沧州市从 2001 至 2007 年信息熵值下降了 1%,变化幅度不大。其余各市中承德市信息熵值上升幅度最大,由 2001 年的 0.60 上升至 2007 年的 0.80,上升幅度达 33%;第 3 梯队衡水市尽管其信息熵值在整个阶段均较小,但其上升变幅相对较高,由 2001 年的 0.39 上升至 2007 年的 0.49,上升幅度为 25%。

(2)第 2 阶段(图 6)。总体来看,第 1 梯队和第 2 梯队在第 2 阶段前期无明显分界,第 2 阶段中后段逐渐分层,第 3 梯队则明显落后。以各梯队的信息熵值演变情况看,第 1 梯队均呈稳定上升趋势。第 2 梯队中承德、邯郸、沧州市的信息熵值均在 2012 年有向下波动的现象,其余时间都在上升,张家口市信息熵值为先平稳后上升趋势,保定和邢台信息熵值则为先降后升。第 3 梯队衡水市信息熵值的趋势为先下降后上升,在 2010 年为最低值 0.48。

就各梯队信息熵值在本阶段起讫点的整体变化

幅度来看,第 1 梯队各市信息熵值均有不同幅度的增加,其中廊坊市信息熵值上升幅度最大,由 2008 年的 0.79 上升至 2013 年的 0.99,上升幅度达 24%。第 2 梯队中除保定市外其余各市均上升,其中邢台市上升幅度相对较大,信息熵值由 2008 年的 0.66 上升至 2013 年的 0.85,上升幅度为 29%,保定市信息熵值由 2008 年的 0.78 下降至 2013 年的 0.67,下降幅度达 14%。第 3 梯队的衡水市信息熵值由 2008 年的 0.53 上升至 2013 年的 0.56,上升幅度为 5%,变化幅度不大。

(3)第 3 阶段(图 7)。总体来看,第 1、第 2 和第 3 梯队在第 3 阶段区间呈明显“高、中、低”层次,不同梯队之间的信息熵值在 2018 年的差别均在 0.12 以上。以各梯队的信息熵值演变情况看,第 1 梯队中廊坊的信息熵值处于稳定上升状态,唐山、秦皇岛和石家庄市信息熵值有略微波动现象。第 2 梯队均有小幅度的波动现象。第 3 梯队衡水市信息熵值略微上升。

就各梯队信息熵值在本阶段起讫点的整体变化幅度来看,第 1 梯队各市信息熵值都有不同幅度的增加,其中石家庄市信息熵值上升幅度最大,由 2014 年的 0.94 上升至 2018 年的 1.14,上升幅度达 22%。第 2 梯队中除邢台市外各市信息熵值均有增加,其中保定市上升幅度相对较大,信息熵值由 2014 年的 0.70 上升至 2018 年的 0.83,上升幅度为 19%,邢台市由 2014 年的 0.87 下降到 2018 年的 0.83,下降幅度为 4%。第 3 梯队的衡水市信息熵值由 2014 年的 0.53 上升至 2018 年的 0.62,上升幅度为 16%。

3.3 各市用水结构空间演变分布

基于上述时间演变数据序列的分析,选取 2001、2008、2014 和 2018 年这 4 个节点年份 11 个地级市的信息熵值,借助 ArcGIS 软件采用反距离加权平均法进行空间插值,并绘制各节点年份信息熵值空间分布如图 8 所示。

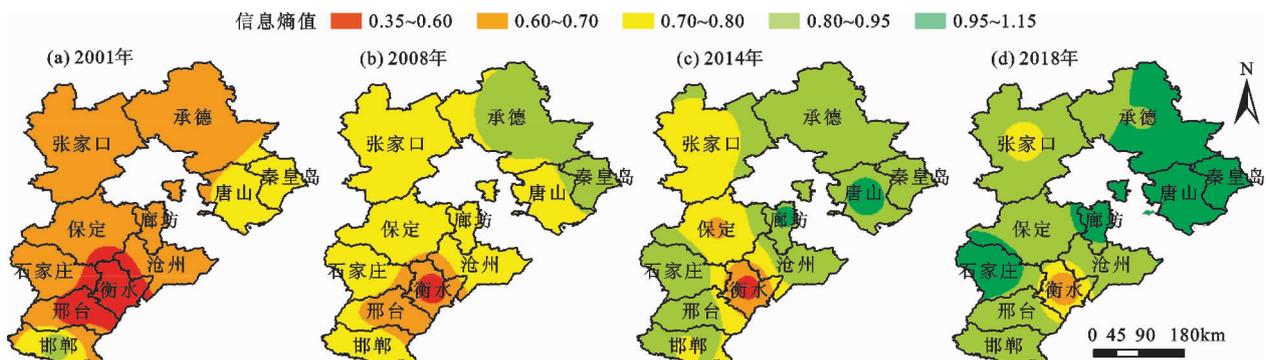


图 8 河北省 4 个节点年份各市信息熵值空间分布

结合河北省各地市地理位置分布及社会经济发展特点,将河北省划分为环渤海地区(秦皇岛、唐山和沧州市)、环京津地区(承德、张家口、保定和廊坊市)、冀中南部地区(石家庄、衡水、邢台和邯郸市)3个片区开展用水结构空间演变特征的分析。

(1)环渤海城市。环渤海城市经济带是河北省重要的经济中心,沿海港口经济也是构建河北全域开放型经济、提升外向型经济的战略重点之一。由图8可知,4个节点年份里,环渤海城市的信息熵值在河北省均处上游水平。其中,2008和2014年环渤海城市与其他城市差距最为明显,说明奥运会所带动的外向型经济率先带动沿海城市群。截至2018年,秦皇岛和唐山市信息熵值达到1.09,在河北省位属前列,沧州市达到0.89,在河北省属中游水平。总体来说,环渤海地区城市较河北省其他内陆城市的信息熵值更高,用水结构更加合理化,用水系统更加稳定。

(2)环京津地区。在2001、2008和2014年,环京津城市与冀中南部城市差距尚不明显;而自2014年国家提出“京津冀协同发展战略”后,环京津城市发展势头强劲,其中,廊坊市2018年信息熵值达到1.08,仅次于省会石家庄市,其余各市自2014年后增长显著。就环京津城市群中各地市对比分析而言,南部城市增长幅度大于北方,反映了保定和廊坊市在产业结构优化上对京津地区协同辐射的响应相对快速且显著,因此各业用水的均衡性快速提高;而偏北方的张家口和承德市因地形气候及其发展定位等综述因素影响,用水结构调整进程相对缓慢。总体来说,环京津城市信息熵值稍落后环渤海城市,领先于冀中南部城市,其信息熵值增长在2014年(图8(c))至2018年(图8(d))区间最为明显。

(3)冀中南部地区。除省会石家庄和邯郸市外,衡水和邢台市信息熵值均处于全省偏低水平。石家庄市作为全省经济文化中心,中心城市的核心作用明显,2018年信息熵值达到1.14,居全省首位,用水结构较全省处于高级阶段。邯郸市作为内陆工业城市,4个节点年份里信息熵值变化不大,究其原因:是因为该市第一、第二产业用水占比过大,同时调整速度不及沿京津地区;邢台和衡水市在4个节点年份里信息熵值均属全省较低水平,且用水结构变化相对缓慢,信息熵值增长幅度小,分析是由于区域经济结构差,支柱型产业少,且京津冀一体化战略在冀中南部地区影响力暂时较小造成的。总体来说,冀中南部城市用水结构信息熵值存在一定的差异,石家庄市处领

先水平,邯郸市处平均水平,其余城市用水结构信息熵值处在较低水平。另外除省会石家庄市外,其余各市在4个节点年份的时间区间内相应的信息熵值上升幅度普遍不如河北省其余城市。

综上可知,河北省的信息熵值空间分布呈现沿海城市优于内陆城市、环京津城市优于南部城市的特征。未来,随着京津冀一体化的深入发展及雄安新区的建设,其影响力向冀中南部地区将持续扩散,衡水、邢台和邯郸市等市用水结构信息熵值有充足的上升空间。

4 讨论

本次研究选用信息熵来反映区域用水结构稳定性,结果表明,河北省2001-2018年间信息熵值不断上升、用水结构稳定性不断提高。这与李腾等^[17]对河北省各产业用水变化情况评估结果对比一致,验证了河北省产业用水差异性日趋减少的结论。河北省下辖11个地市用水结构演变规律各有异同,部分地市的分析结果与已有的研究成果^[18-21]一致,各地市的信息熵值差异不断扩大,代表各市的用水结构演变速率各不相同,体现出这些年河北省各地市综合发展的不均衡,各市的信息熵值与王金营等^[22]对河北省各市新型城镇化评价结果相比排名基本相同,反映出地区的信息熵水平和城镇化水平的关联性。其中,张家口和承德市作为冀西北生态涵养区,生态用水比例较高,因而信息熵水平达河北省中游水平,但其新型城镇化水平在河北省处于低位^[22],说明城镇的功能定位也对信息熵水平有一定影响。

河北省信息熵值的空间分布特征呈现沿海地市优于内陆地市、环京津地市优于中南部地市的规律,也一定程度上体现出沿海驱动经济发展和环京津城市定位对信息熵值的带动作用,未来冀中南部的信息熵值具有较大的上升潜力,应充分利用京津冀一体化和雄安新区建设的发展契机,进一步调整产业用水结构^[23],提高生态用水比例、建设节水型社会。

综合分析时间演变规律和空间分布特征,得出河北省信息熵值变化主要依靠政策引导,沿海经济带动和京津辐射作用。由于资料的有限性,本文仅分析了2001-2018年河北省用水结构的时空演变规律及特征,今后在计算供水等其他数据信息熵的基础上,可开展供水-用水结构演变的互馈关联综合分析。

5 结论

本文运用信息熵理论研究了河北省及其各市

2001—2018 年用水结构的时空演变特征,得出以下主要结论:

(1)河北省信息熵值时间演变上总体呈上升趋势,各市信息熵值平均增长 43%,其中,石家庄市增长幅度最大,达 71%;邯郸市增长幅度最小,仅 7%。全省及各地市信息熵值的上升反映了 2008 年北京奥运会和 2014 年京津冀协同一体化战略接连为河北省产业结构优化进程注入强大驱动力而带来的用水结构变化。

(2)河北省用水结构空间变化呈现渐变型差异分布,并与环渤海和京津的区位差异相关,呈现环渤海地带向内陆逐渐减小、环京津地区向冀南逐渐减小的空间分布特征。

参考文献:

- [1] 赵钟楠,田英,张越,等.水资源风险内涵辨析与中国水资源风险现状[J].人民黄河,2019,41(1):46-50.
- [2] 姜文来,冯欣,栗欣如,等.习近平治水理念研究[J].中国农业资源与区划,2020,41(4):1-10.
- [3] 陈良,杨银科,刘宇,等.基于洛伦兹曲线的甘肃省用水结构分析[J].长江科学院院报,2021,38(5):25-33.
- [4] 焦士兴,李青云,王安周,等.基于生态位的安阳市用水结构与产业结构动态演化分析[J].水资源保护,2021,37(1):79-85+109.
- [5] 侯林秀,温璐,张雪峰,等.内蒙古地区水足迹量化及水资源评价分析[J].中国农业大学学报,2021,26(8):182-195.
- [6] 何艳虎,李深林,杨洁,等.我国不同区域用水结构变化及其驱动因素分析[J].水资源与水工程学报,2016,27(4):1-6.
- [7] 甘丰余,邢侨芬,林振豪,等.海南近期用水结构变化规律分析[J].中国农村水利水电,2021(3):153-157.
- [8] 雷欢,张鑫.陕西省近 10 年用水结构演变及驱动力分析[J].水资源与水工程学报,2012,23(4):125-128.
- [9] 崔媪,赵鹏宇,步秀芹,等.基于信息熵的忻州市用水结

构演变及其驱动力的因子分析[J].节水灌溉,2015,(6):58-61.

- [10] 吴旭,陶涛,吴润泽,等.华北地区用水结构时空动态演变特征分析——以邯郸市为例[J].科学技术与工程,2021,21(27):11768-11775.
- [11] 冯娇娇.河北省 2010—2016 年用水结构变化情况研究[J].地下水,2020,42(4):86-87+159.
- [12] 刘淼,左其亨,吴滨滨,等.水资源税改革“河北模式”的形成及内涵[J].中国水利,2019(20):54-57.
- [13] 张丽晶.浅论河北省地下水资源的立法保护[J].河北水利,2015(7):21+47.
- [14] 李聪,程伍群,商东波,等.引黄入冀补淀工程白洋淀补水方案研究[J].河北农业大学学报,2020,43(4):97-103.
- [15] 刘宪亮.南水北调中线工程在华北地下水超采综合治理中的作用及建议[J].中国水利,2020(13):31-32.
- [16] 刘燕,胡安焱,邓亚芝.基于信息熵的用水系统结构化研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2006,34(6):141-144.
- [17] 李腾,刘晴,隋鹏.河北省水资源变化及可持续性评估[J].中国农业大学学报,2021,26(6):11-20.
- [18] 邓欧,李亦秋,鲁春霞,等.张家口市供用水结构时空演变及驱动力分析[J].草业科学,2020,37(7):1354-1361.
- [19] 王红彦.用水结构变化特征与社会经济发展关系分析[J].水利科技与经济,2014,20(11):91-95.
- [20] 韩燕,李海涛.衡水市用水结构与变化趋势分析[J].水科学与工程学报,2015(5):25-27.
- [21] 朱丽娜,肖伟华,侯保灯,等.社会水循环通量演变及驱动力分析——以保定市为例[J].水利水电技术,2019,50(10):10-17.
- [22] 王金营,李佳黛.京津冀各市新型城镇化发展评价——基于京津冀协同发展的考察[J].人口与经济,2017(6):58-70.
- [23] 栗清亚,裴亮,孙莉英,等.京津冀区域产业用水时空变化规律及影响因素研究[J].生态经济,2020,36(10):141-145+159.

(上接第 53 页)

- [29] 潘扎荣,郭东阳,唐世南.淮河流域径流时空变化特征分析[J].水资源与水工程学报,2017,28(5):8-14.
- [30] 石红,张博,李媛,等.基于生态网络分析的流域水资源可持续性评价方法研究[J].水电能源科学,2015,33(4):38-42.
- [31] 杨静雯,何刚,周庆婷,等.淮河生态经济带水资源利用效率的空间溢出效应研究[J].水力发电,2020,46(11):29-33.
- [32] 黄涛珍,宋胜帮.淮河流域经济增长与水环境污染的关系[J].湖北农业科学,2013,52(20):5088-5091.
- [33] 颜子明,杜德斌,刘承良,等.全球跨境水资源合作时空

演变及生成机制[J].自然资源学报,2021,36(7):1825-1843.

- [34] 秦腾,佟金萍,章恒全.环境约束下中国省际水资源效率空间关联网络构建及演化因素[J].中国人口·资源与环境,2020,30(12):84-94.
- [35] 刘华军,孙亚男,陈明华.雾霾污染的城市间动态关联及其成因研究[J].中国人口·资源与环境,2017,27(3):74-81.
- [36] 冯颖,侯孟阳,姚顺波.中国粮食生产空间关联网络的结构特征及其形成机制[J].地理学报,2020,75(11):2380-2395.