

粤港澳大湾区背景下广东省9市人水和谐关系时空特性研究

王大洋, 王大刚

(中山大学 地理科学与规划学院, 广东 广州 510275)

摘要:以粤港澳大湾区规划涉及的广东省9个市为研究区域,利用人水和谐理论方法,对研究区2014–2018年共5 a的人水和谐关系进行了量化,并分析了人水和谐关系的时空分布特征。研究中综合考虑影响人水和谐关系的健康度、发展度和协调度3个要素,建立指标评价体系,采用主、客观权重和合作博弈论确定综合权重,分别计算3个要素,进而通过要素集成确定人水和谐度。结果表明:大湾区背景下的广东省9市,近5年的人水和谐关系处于“基本和谐”到“较和谐”等级,且有逐渐向“和谐”转变的态势;从空间分布看,大湾区周边的江门、肇庆和惠州3个市的人水和谐度较其他城市稍高,这在一定程度上可缓解和分担经济高度集中发展带给水资源系统的压力,从而为大湾区未来的综合发展提供优质的水资源条件。

关键词:人水和谐; 时空特性; 粤港澳大湾区; 广东省

中图分类号:TV211.1

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2020)05-0023-07

Spatiotemporal distribution characteristics of the human – water harmony in nine cities of Guangdong Province under the background of the Great Bay Area

WANG Dayang, WANG Dagang

(School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Taking the Guangdong – Hong Kong – Macao Great Bay Area as the study object, the harmonious relationship between human and water in nine cities of Guangdong from 2014 to 2018 was quantified based on human – water harmony theory, and its spatiotemporal distribution characteristics was analyzed. The three factors of health, development and coordination degree were taken into consideration in establishing an index evaluation system. The comprehensive weights were determined using subjective and objective weights and cooperative game theory, with which the values of these three factors were calculated and the human – water harmony degree was assessed. The results show that the human – water harmony of the nine cities ranked from “almost harmonious” to “quasi harmonious”, developing to “harmonious” level. The relationship between human and water in the three cities of Jiangmen, Zhaoqing and Huizhou around the Greater Bay Area was slightly higher than that in the others, which alleviated the pressure of highly concentrated development on the water resources system and provided high-quality water resources for the future development of the Great Bay Area.

Key words: human – water harmony; spatiotemporal distribution characteristics; Guangdong – Hong Kong – Macao Great Bay Area; Guangdong Province

1 研究背景

水资源作为城市建设和发展的重要战略资源,其与人类社会的关系一直都是需要重视和关注的研究课题。由于水资源地理空间分配的异质性特点,

不同地区的人水和谐关系也通常表现不同。建设粤港澳大湾区(Guangdong – Hong Kong – Macao Great Bay Area, GBA),以下简称大湾区,是新时期国家推动形成全面开放新格局、深化内地与港澳地区合作、打造世界级城市群的重要举措,其无论是经济还是

收稿日期:2020-05-15; 修回日期:2020-08-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51779278)

作者简介:王大洋(1991-),男,河南上蔡人,博士研究生,研究方向为水文计算和水资源分析、水库调度。

通讯作者:王大刚(1975-),男,河北张家口人,教授,博士生导师,研究方向为极端气候变化、陆面过程模拟。

战略地位,都具有不可替代的作用。近些年,针对大湾区水资源的研究逐渐增加,如张金松等^[1]对大湾区面临的水安全、黑臭水体整治和城市内涝等问题进行了梳理和分析;刘畅等^[2]探究了大湾区水环境和水生态现状,提出了相关的治理对策;李骏飞等^[3]则利用大数据和网络技术,分析了大湾区数字水务的发展潜力,对其未来的可发展性进行了展望。总体而言,针对水资源与人类社会发展关系方面的研究仍然有些欠缺^[4-5]。基于此,有必要对大湾区规划建设以来近些年的人水和谐关系进行量化研究,从而准确把握大湾区水资源和人类社会的和谐程度,为其未来更好地发展提供技术支持^[6-7]。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

大湾区是我国珠江三角洲地区由香港、澳门两个特别行政区和广东省下辖的9个城市组成的世界级城市群。选取大湾区涉及的广东省的9个城市(分别是广州、深圳、珠海、佛山、惠州、东莞、中山、肇庆和江门)为研究对象,探究城市的水资源和人类社会的和谐程度并进行量化分析。研究区的地理位置见图1。

2.2 数据来源

研究数据来源于2014-2018年的《广东省水资

源公报》《广东省统计年鉴》和相关综合规划。通过对水资源系统、社会经济发展系统及两者协调性的研究,同时结合人水和谐理论中关于健康度(health degree, *HED*)、发展度(development degree, *DED*)和协调度(harmony degree, *HAD*)的影响因素,选取15个指标建立评价体系。在等级和标准确定方面,依据《大湾区发展规划纲要》《珠江流域水利规划》等相关规划制定了评价标准。人水和谐度(human water harmony degree, *HWHD*)量化指标体系及等级划分标准见表1,表1的“类型”列中“+”为效益型,“-”为成本型。

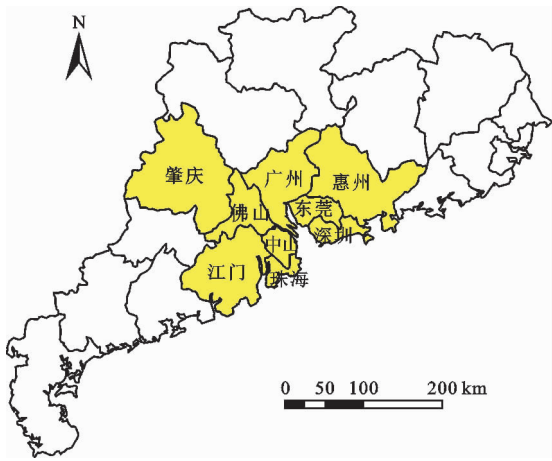


图1 大湾区背景下广东省9市位置示意图

表1 大湾区广东省9市人水和谐度量化评价指标体系及等级划分标准

要素层	编号	指标	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级	类型
健康度 (<i>HED</i>)	101	城市生活垃圾无害化处理率/%	100	95	85	75	50	+
	102	城市污水处理率/%	100	95	90	80	70	+
	103	人均公园绿地面积/m ²	24	20	16	12	0	-
	104	水生态环境指数	100	75	55	35	20	+
	105	生态环境用水率/%	5.00	3.00	2.00	1.00	0.00	+
发展度 (<i>DED</i>)	201	人口密度/(人·km ⁻²)	0	400	500	600	800	-
	202	人均GDP/10 ⁴ 元	7.74	2.5	0.66	0.3	0	+
	203	居民城镇生活用水量/(L·d ⁻¹)	250	200	150	100	0	+
	204	万元GDP用水量/m ³	0	24	140	610	1060	-
	205	万元工业增加值用水量/m ³	0	10	15	25	40	-
	206	耕地实际灌溉亩均用水量/m ³	0	300	450	600	750	-
协调度 (<i>HAD</i>)	301	水资源利用率/%	0.00	10.00	20.00	30.00	50.00	-
	302	人均水资源量/m ³	10000	1700	1000	500	0	+
	303	产水模数/10 ⁴ (m ³ ·km ⁻²)	150	120	100	80	0	+
	304	人均综合用水量/m ³	1200	1000	800	500	0	+

2.3 研究方法

研究以人水和谐理论为指导。首先,计算各指标的子和谐度;其次,利用二元模糊比较-熵权法-合作博弈理论计算指标的综合权重;之后,根据权重分别求得各个城市的健康度、发展度和协调度;最后,集成3个要素来推求最终的人水和谐度。

2.3.1 子和谐度计算 以线性隶属度函数计算指标子和谐度,即通过对各指标分级,以各分级边界值为基础,划分确定各指标的子和谐度。研究中参考人水和谐理论^[8-13],采用五点线分段,分段点为(a, 0), (b, 0.3), (c, 0.6), (d, 0.8), (e, 1.0), 分别对应V~I级。对于效益型和成本型两种类型指标采用不同的隶属度函数,两种类型指标的子和谐度隶属度曲线如图2所示。

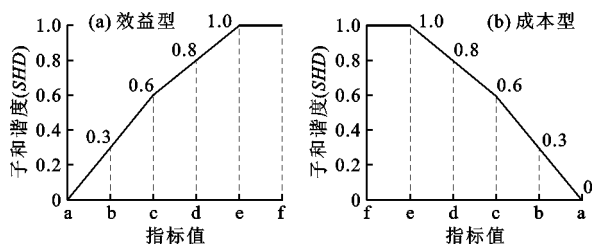


图2 两种类型指标的子和谐度隶属度曲线

表2 不同程度的语气算子对应的相对隶属度

语气算子	同样	稍稍	略微	较为	明显	显著	十分	非常	极其	极端	不可比拟
相对隶属度	1	0.818	0.667	0.538	0.429	0.333	0.250	0.176	0.111	0.053	0

(2) 熵权法。熵权法以评价矩阵数据为基础,以信息熵的形式表现指标对整个系统的影响程度,信息熵的大小表示权重的大小^[15]。若有矩阵 E , 形状为 $m \times n$, 其中 m 为指标个数, n 为城市个数。则可以通过指标矩阵归一化、计算熵、计算熵权3个步骤确定指标的客观权重。

① 指标矩阵归一化,得 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 。

② 计算熵。

$$f_{ij} = \frac{(1 + r_{ij})}{\sum_{i=1}^n (1 + r_{ij})} \quad (3)$$

$$H_i = \frac{-\sum_{j=1}^n (f_{ij} \ln f_{ij})}{\ln n} \quad (4)$$

式中: f_{ij} 为第 j 个城市中第 i 个指标的比重; r_{ij} 为第 j 个城市中第 i 个指标的归一化值; H_i 为各城市的第 i 个目标的信息熵。

③ 计算熵权。

2.3.2 综合权重分析

(1) 二元模糊比较法。主观权重采用二元模糊比较确定^[14]。若指标向量为 $P = (p_1, p_2, \dots, p_m, m$ 为指标个数), 对指标向量中的任何两个都进行对比, 可获得标度矩阵 E :

$$E = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \cdots & e_{1m} \\ e_{21} & e_{22} & \cdots & e_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ e_{m1} & e_{m2} & \cdots & e_{mm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

比较时遵循以下原则:①若 P_k 较 P_l 重要, 则 $e_{kl} = 1, e_{lk} = 0$; ②若 P_l 较 P_k 重要, 则 $e_{kl} = 0, e_{lk} = 1$; ③若 P_k 与 P_l 同样重要, 则 $e_{kl} = 0.5, e_{lk} = 0.5$ 。通过将 E 中各行向量求和, 可得每行的重要性标度, 其值大小反映该指标在指标向量中的重要性。之后, 按照指标向量的标度排序, 以第1个为基础, 对其余指标参考语气算子与基础指标作重要性比较分析, 结合两者关系表确定各指标相对隶属度 $\mu (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m)$, 通过公式(2) 归一化确定权重, 即主观权重。不同程度语气算子对应的相对隶属度见表2。

$$w_i = \mu_i / \sum_{i=1}^m \mu_i \quad (2)$$

$$\omega_i = \frac{(1 - H_i)}{\sum_{i=1}^m (1 - H_i)} \quad (5)$$

$$w = (\omega_{ij})_{1 \times m} \quad (6)$$

式中: ω_i 为第 i 个指标的客观权重; w 为指标的熵权向量, 即客观权重。

(3) 基于合作博弈的组合权重。如若采用 s 种方法分别计算出 m 个指标的权重, 可以组成关于权重的1个基本权重矩阵 $W_s = (w_{1m}, w_{2m}, \dots, w_{sm})$, 这 s 个基本向量可以组成线性组合:

$$W = \sum_{k=1}^s a_k W_s^T \quad (7)$$

式中: W 为综合权重向量; a_k 为权重组合系数。

确定综合权重的方法是寻找能使综合权重和各个基本权重偏差达到最小的组合系数^[16], 因此, 该问题实际可转化为寻求最优目标函数为

$$\min \left\| \sum_{k=1}^s a_k W_s^T - W_i \right\|_2 \quad (i = 1, 2, \dots, s) \quad (8)$$

的问题, 该最优的解集可采用遗传算法 (genetic al-

gorithm)^[17] 寻优找到。得到最优组合系数后,通过标准化并结合最优目标函数式(8)确定最终的综合权重。

2.3.3 人水和谐度的计算方法 人水和谐度是健康度(HED)、发展度(DED)和协调度(HAD)3个要素的集成,而此三者构建则通过子和谐度和权重为基本单元。因此,3个要素的计算公式如下:

$$HED(T) = \sum_{i=1}^{m_1} W_i SHD_1^i \quad (9)$$

$$DED(T) = \sum_{i=1}^{m_2} W_i SHD_2^i \quad (10)$$

$$HAD(T) = \sum_{i=1}^{m_3} W_i SHD_3^i \quad (11)$$

$$HWHD(T) = HED(T)^{\beta_1} \cdot DED(T)^{\beta_2} \cdot HAD(T)^{\beta_3} \quad (12)$$

式中: $HED(T)$ 、 $DED(T)$ 和 $HAD(T)$ 分别为评价中某个城市的健康度、发展度和协调度; $HWHD(T)$ 为人水和谐度; m_1 、 m_2 、 m_3 分别为3个要素含有的指标个数; SHD_1^i 、 SHD_2^i 、 SHD_3^i 分别为3个要素中各指标对应的子和谐度; W_i 为各指标的组合权重; β_1 、 β_2 和 β_3 分别为3个要素的指数权重,研究中全部取值为1/3,主要原因是将三者同等而视。

人水和谐度 $HWHD(T)$ 大小区间为 $[0,1]$,可分为严重不和谐($0 \leq HWHD(T) < 0.2$)、不和谐($0.2 \leq HWHD(T) < 0.4$)、基本和谐($0.4 \leq HWHD(T) < 0.6$)、较和谐($0.6 \leq HWHD(T) < 0.8$)与和谐

($0.8 \leq HWHD(T) \leq 1.0$)共5个等级。

3 结果与分析

3.1 子和谐度

根据第2节中的介绍,结合大湾区规划中涉及的广东省9个城市构建的人水和谐指标评价体系,依据等级划分标准,计算9个城市的每个指标连续5a的子和谐度,结果汇总于表3(因全部数据过多,文中仅以2018年为例)。

3.2 综合权重

采用二元模糊对比法确定主观权重,采用熵权法确定客观权重,再以合作博弈论将两者相连接,以遗传算法寻优,得到各个指标的综合权重。需要说明的是对于客观权重,因每年均有9个城市,因此对应的客观权重也应当有5个,为避免因不同年份之间指标权重差异太大造成的误差影响,在计算时,以5a各指标数据的均值作为基础来计算客观权重,从而保证权重的一致性,结果列于表4。

3.3 人水和谐关系的时空特性

根据指标综合权重和子和谐度,可以计算9个城市2014–2018年的健康度(HED)、发展度(DED)、协调度(HAD),再以这三者为基础来确定城市的人水和谐度($HWHD$)。根据计算结果,分别绘制 HED 、 DED 、 HAD 与 $HWHD$ 随时间变化曲线和空间变化分布图,用以分析9个城市的人水和谐关系,结果见图3和4。

表3 大湾区广东省9市人水和谐关系各指标子和谐度(2018年)

指标编号	广州	深圳	珠海	佛山	惠州	东莞	中山	江门	肇庆
101	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
102	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.871	1.000	0.993	1.000
103	0.952	0.561	0.799	0.646	0.698	1.000	0.591	0.728	0.790
104	0.870	0.950	0.959	0.860	1.000	0.859	0.878	1.000	1.000
105	0.444	1.000	0.372	0.722	0.150	0.644	0.126	0.141	0.147
201	0.296	0.283	0.299	0.296	0.948	0.292	0.297	0.832	1.000
202	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.946	0.908
203	0.800	0.656	1.000	0.940	0.660	0.856	0.660	0.800	0.728
204	0.993	1.000	1.000	0.988	0.957	1.000	0.974	0.878	0.897
205	0.620	1.000	0.960	1.000	0.720	0.740	0.720	0.640	0.480
206	0.300	0.424	0.603	0.540	0.318	0.667	0.376	0.300	0.498
301	0.080	0.173	0.640	0.099	0.883	0.114	0.231	0.853	0.951
302	0.304	0.137	0.630	0.283	0.822	0.171	0.422	0.843	0.846
303	0.629	0.834	0.987	0.546	0.724	0.552	0.917	1.000	0.604
304	0.263	0.098	0.186	0.236	0.248	0.139	0.260	0.405	0.269

表 4 人水和谐量化评价各指标权重

指标 编号	主观 权重	客观 权重	综合 权重	指标 编号	主观 权重	客观 权重	综合 权重	指标 编号	主观 权重	客观 权重	综合 权重
101	0.188	0.214	0.209	201	0.153	0.122	0.128	301	0.271	0.351	0.335
102	0.223	0.182	0.190	202	0.179	0.192	0.189	302	0.255	0.289	0.282
103	0.146	0.171	0.165	203	0.155	0.182	0.177	303	0.227	0.171	0.182
104	0.271	0.214	0.225	204	0.185	0.140	0.149	304	0.248	0.190	0.201
105	0.172	0.221	0.211	205	0.170	0.171	0.171				
				206	0.158	0.192	0.186				

注:表中的主权重、客观权重和综合权重分别由公式(2)、(6)和(7)计算得出。

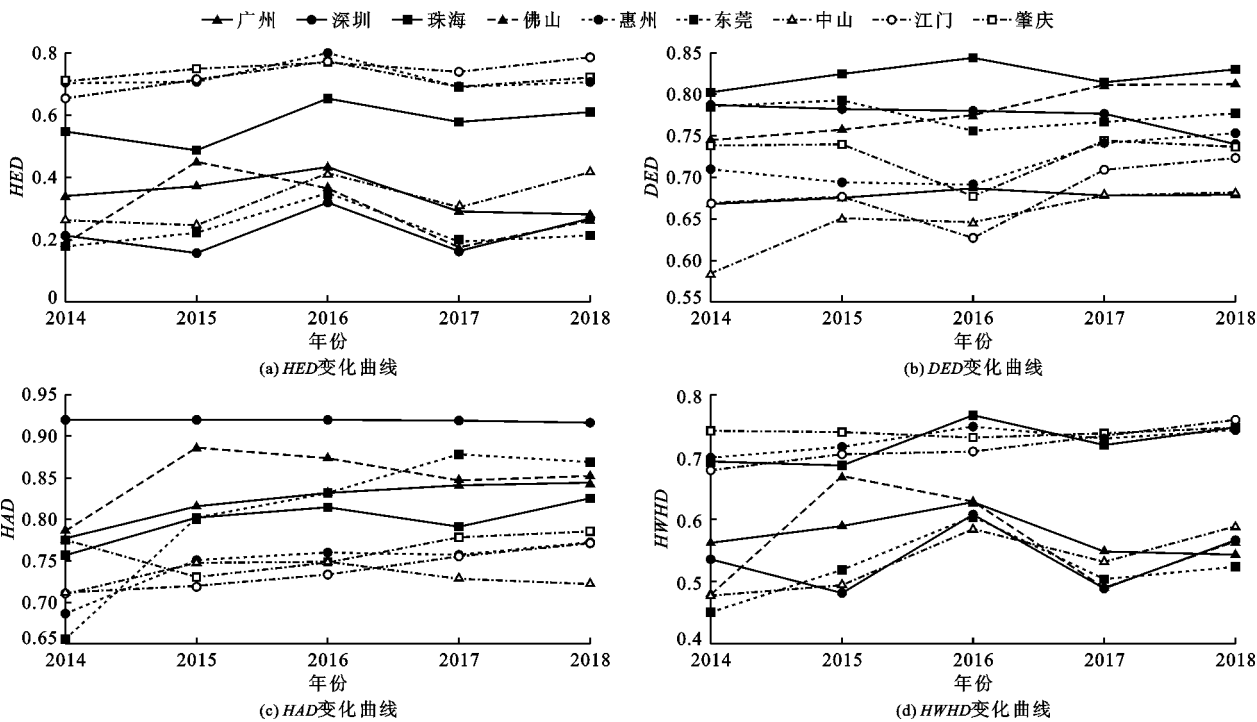


图 3 大湾区广东省 9 个城市 2014 – 2018 年 HED、DED、HAD 及 HWHD 的时间变化曲线

3.4 结果分析

对时间变化曲线分析,由图 3(a)健康度来看,2014 – 2018 年间 9 个城市健康度差异性比较大,范围跨度大约在 0.156 ~ 0.800 之间,9 个城市健康度的变化趋势基本一致,2014 – 2016 年整体基本均存在较小幅度的升高趋势,之后虽在 2017 年略微降低,但 2018 年又有所回升,基本表现出持平的状态。就整个健康度水平而言,惠州、江门和肇庆 3 市 2014 – 2018 年的健康度值均大于 0.6,均高于其余 6 个城市;珠海的健康度升高的趋势较为明显;广州、深圳、佛山、东莞和中山的水资源健康状况则表现为虽有波动起伏,但整体基本稳定的趋势。由图 3(b)发展度来看,9 个城市的发展度均较高,基本全部在 0.6 以上。其中,深圳、珠海、东莞和佛山的整

体水平均比较高,江门、肇庆和惠州 3 个市的发展度值位列其次。由图 3(c)协调度来看,9 个城市协调度均比较高,基本保持在 0.70 以上。其中,除佛山和东莞在 2014 – 2015 年有大幅度的提升之外,其余城市协调度水平都较为稳定;9 个城市中,深圳市表现最为突出,2014 – 2018 年协调度全部保持在 0.9 之上。由图 3(d)人水和谐度来看,除佛山表现波动较大之外,其余 8 个城市基本呈现缓慢上升的趋势。其中,肇庆、惠州、珠海和江门 4 个市的人水和谐度较高,2014 – 2018 年基本都保持在 0.7 ~ 0.8 之间,该阈值等级为“较和谐”,并且表现为逐渐上升的趋势。

从地理空间位置分析,除珠海距离澳门较近之外,肇庆、江门和惠州分别位于大湾区的最西北、最

西南和最东面(图1),且城市面积相对较大,良好的人水和谐关系可以为大湾区的发展提供良好的腹地环境和条件,避免出现发展方向上的不平衡,从而保证大湾区的发展辐射到全方位和各区域。广州、深

圳、东莞、中山的人水和谐度基本处于 0.45 ~ 0.65 之间,等级为“基本和谐”到“较和谐”之间,个别年份虽有波动,但总体呈现缓慢上升的趋势,人水和谐关系发展态势良好。

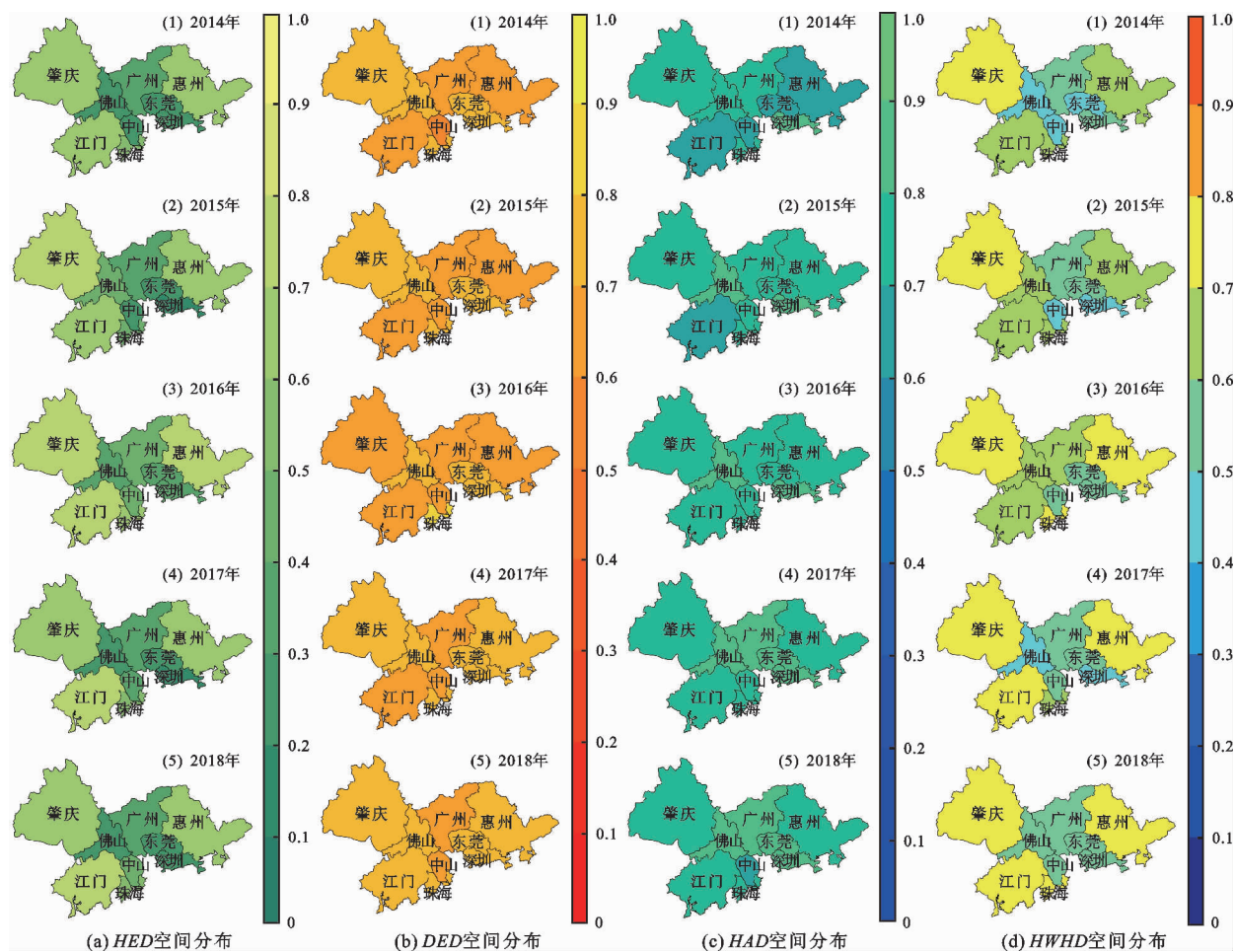


图4 大湾区广东省9个城市2014-2018年HED、DED、HAD及HWHD的空间变化分布图

4 讨论

通过研究分析,有两个现象值得进一步思考,现讨论如下:

广州作为首府,从该城市的发展度水平来看,其2014-2018年各年的发展度值(DED)分别为0.667、0.675、0.687、0.678和0.679,排名并非位于9个城市前列,但其发展趋势却比较稳定。出现这种现象的原因,一方面可能是由于广州市社会发展历史相对较长,较早的发展使得城市的经济体系结构和产业用水模式定型比较早,这些结构和模式整体更新需要相对较长的周期,因此针对发展度的指标而言,其对应的子和谐度并不是很高。另一方面,广州市庞大的经济体量需要足够的生产力,故而其接收容纳了大量来自外省(多为周边湖南、广西、江

西等省)的劳动力人口,而选取的发展度指标中人口密度和生活用水指标可能被平均化,这在一定程度上影响了广州市的发展度水平。

此外,另一个亮点是深圳市的协调度明显领跑其余8个城市。究其原因,可能是因为深圳市作为我国经济发展的先行示范区,设特区伊始本身已经形成了集创新、绿色、共享于一体的健康发展模式。因此深圳市能够在保证经济持续发展的同时,兼顾协调水资源开发和城区建设发展之间的关系,从而形成了较为合理的水生态格局和水环境条件,开拓出了新的、适合自己的一体化治水发展模式。这些管理举措使得深圳市的经济发展和水资源系统的关系朝着更加协调稳定的方向发展,城市水资源与人类社会的和谐程度不断提高。同时,这种发展模式也值得其他城市学习借鉴。

5 结 论

(1)大湾区背景下广东省的广州、深圳、珠海等9个珠江三角洲城市在2014–2018年期间的人水和谐度虽有波动,但整体表现出缓慢上升趋势。在影响人水和谐的3个要素中,不同城市间健康度差异最大,协调度次之,发展度差异最小。各个城市的水资源系统空间分布差异性较大,而发展度水平均较高,差异较小。9个城市的人水和谐度关系基本保持在“基本和谐”和“较和谐”水平。

(2)大湾区水资源健康度空间差异较大。距离港澳稍远的江门、惠州、肇庆3个城市的水资源健康状况较好。未来大湾区在进行水资源开发和管理时,建议参考区域分布特点,统筹开发、系统调度、科学分配,从而保证整个大湾区城市群的和谐发展。

参考文献:

- [1] 张金松,戴雄奇,林峰,等. 粤港澳大湾区数字水务的实践与展望[J]. 给水排水,2020,46(5):1–7.
- [2] 刘畅,林绅辉,焦学尧,等. 粤港澳大湾区水环境状况分析及治理对策初探[J]. 北京大学学报(自然科学版),2019,55(6):1085–1096.
- [3] 李骏飞,杨磊三,孟凡松. 粤港澳大湾区面临的水问题探析[J]. 中国给水排水,2019,35(18):10–14.
- [4] 单菁菁,张卓群. 粤港澳大湾区融合发展研究现状、问题与对策[J]. 北京工业大学学报(社会科学版),2020,20(2):1–8.
- [5] 石佑启,陈可翔. 粤港澳大湾区治理创新的法治进路[J]. 中国社会科学,2019(11):64–85+205–206.
- [6] 刘畅,林绅辉,焦学尧,等. 粤港澳大湾区水环境状况分析及治理对策初探[J]. 北京大学学报(自然科学版),2019,55(6):1085–1096.
- [7] 崔东亮,何 舸,赵 亮. 粤港澳大湾区水资源生态足迹及空间利用差异分析[C]//中国环境科学学会. 2019中国环境科学学会科学技术年论文集(第一卷). 西安,2019.
- [8] 左其亨. 人水和谐论及其应用研究总结与展望[J]. 水利学报,2019,50(1):135–144.
- [9] 刘 欢. 人水关系的和谐辨识方法及应用研究[D]. 郑州:郑州大学,2016.
- [10] ZUO Qiting, JIN Runfang, MA Junxia, et al. Description and application of a mathematical method for the analysis of harmony [J]. The Scientific World Journal, 2015, 2015:831396.
- [11] ZUO Qiting, MA Junxia, TAO Jie. Chinese water resource management and application of the harmony theory [J]. Journal of Resources and Ecology, 2013,4(2):165–171.
- [12] 宋一凡,郭中小,徐晓民,等. 二连浩特市水资源与经济社会和谐度评价[J]. 水文,2016,36(1):66–70.
- [13] 陆 赛,唐德善,孟令爽. 基于GRA–IECD协调发展模型的人水和谐评价[J]. 人民黄河,2019,41(3):84–88.
- [14] 苏永华,赵明华,刘晓明. 岩体分类的二元相对模糊评判法[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(5):1049–1055.
- [15] 邹志红,孙靖南,任广平. 模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用[J]. 环境科学学报,2005,25(4):552–556.
- [16] 顾巧论,高铁杠,石连栓. 基于博弈论的逆向供应链定价策略分析[J]. 系统工程理论与实践,2005(3):20–25.
- [17] 毛德华,邹 君,李 杰,等. 基于遗传算法的投影寻踪方法在洞庭湖区洪灾易损性评价中的应用[J]. 冰川冻土,2010,32(2):389–396.