

城市化水平与水资源利用效率的关系研究 ——以珠江三角洲城市群为例

曾惠 鄢春华[†] 黄婉彬 林倩云 余雷雨 邱国玉

北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 深圳 518055; [†] 通信作者, E-mail: yanch@pku.edu.cn

摘要 以珠江三角洲城市群为研究对象, 基于该区域 2005—2017年人口变化、经济优化、社会发展以及水资源利用等数据, 通过构建城市化综合评价体系, 对该区域城市综合发展水平进行评价。在此基础上, 利用改进的水足迹计算方法, 对水资源利用效率进行分析, 量化及验证城市化水平与水资源利用效率之间的关系。结果表明: 1) 从城市化发展水平来看, 可将珠三角城市群划分为4个等级, 其中广州市和深圳市处于高水平城市化等级; 2) 通过水足迹计算方法, 得出2016年珠江三角洲城市群水足迹总量为580.58亿 m^3 , 显著大于根据《2016年广东省水资源公报》中数据计算得到的结果(289.90亿 m^3); 3) 在城市化发展的不同阶段, 水足迹总量变化趋势不同, 阶段性特征明显; 4) 随着城市化的不断发展, 水资源利用效率将会提高。

关键词 城市化; 水资源利用效率; 熵值法; 水足迹; 珠江三角洲城市群

A Case Study on the Relationship Between Urbanization Level and Water Use Efficiency in the Pearl River Delta Urban Agglomeration

ZENG Hui, YAN Chunhua[†], HUANG Wanbin, LIN Qianyun, YU Leiyu, QIU Guoyu

School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055;

[†] Corresponding author, E-mail: yanch@pku.edu.cn

Abstract This study evaluates comprehensive urban development level based on the data of population change, economic optimization, social development, and water use between 2005 and 2017 in the Pearl River Delta Urban. Then an improved water footprint calculation method is used to analyze water use efficiency and urbanization level, whose relationship is quantified and verified. The study found that: 1) regarding urbanization level, the Pearl River Delta Urban Agglomeration can be divided into four grades, of which Guangzhou and Shenzhen are at a high level; 2) using water footprint calculation method, the total of the agglomeration in 2016 is 58.58 billion m^3 , which is significantly higher than the claimed 28.99 billion m^3 in <2016 Guangdong Water Resources Bulletin>; 3) at different urbanization stages, the trend of the total water footprint varies, each showing a unique characteristics; 4) with a continuous urbanization, water use efficiency will continue to increase.

Key words urbanization; water use efficiency; entropy method; water footprint; Pearl River Delta urban agglomeration

目前中国处于城市化发展的重要时期, 对中国城市化质量综合评价的研究也成为学术界的热点。何仁伟等^[1]通过构建城市化发展质量评价指标体系, 划分京津冀城市群城市化综合质量类型。王富喜等^[2]

使用熵值法, 对山东省城镇化质量进行测度, 对各等级的发展方向进行探讨。方创琳等^[3]通过对新中国成立以来城市化发展历程的深入研究, 提出符合我国发展规律的城市化发展“四阶段理论”。

由于能够更真实地反映地区用水状况,水足迹理论常用于水资源利用效率的评价。Aldaya 等^[4]将水足迹相关分析方法运用到水资源利用效率的管理中,为地区水资源的管理利用提供依据。潘文俊等^[5]基于水足迹理论,评价九龙江流域的水资源利用状况,认为人均水足迹值能更好地反映真实的水资源利用效率水平。余惠等^[6]将牡丹江市 2017 年水足迹总值与水资源可利用量进行比较,并在农业、工业和生活等方面提出建议,以期实现水资源的高效利用。目前,大多数研究都照搬水足迹计算方法,没有结合区域的实际情况进行修正。

城市化与水资源利用效率之间的关系也受到学术界的广泛关注。余灏哲等^[7]对京津冀地区城市发展进程中的水资源利用效率进行研究,指出随着经济的发展与技术的进步,该地区用水效率普遍快速提升。陈威等^[8]对武汉城市群 2005—2015 年水资源利用效率的研究表明,随着城市的不断发展,水资源利用效率呈现先下降再上升的趋势。目前,城市发展与水资源利用的相关研究集中于城市化进程对水资源的胁迫作用^[9],或是水资源对城市发展的约束作用^[10],而定量地、按城市发展水平段直接分析城市化对水资源利用效率影响的研究较少。准确地测算水资源利用效率,定量地分析城市化水平与水资源利用效率之间的关系以及运用此关系来缓解城

市发展与水资源压力之间的矛盾,是本文的研究重点。

珠江三角洲城市群具有综合发展水平高、发展速度较快和发展水平差异较大的特点,将其作为研究对象,可以为其他区域的水资源管理提供典型案例。目前,以珠三角整体为对象的研究居多,而分析区域内单个城市的研究较少,因此本研究重点关注单个地区。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域

珠江三角洲(简称“珠三角”)位于广东省的东南部,海陆交通便捷。狭义上的珠三角地区包括广州、深圳、佛山、东莞、惠州、中山、珠海、江门和肇庆 9 个城市,新规划之后,将汕尾、阳江、清远、云浮和河源 5 个城市纳入其中,由此构成由 14 个城市组成的城市发展群(图 1)。从地理位置来看,珠三角地区大部分位于北回归线以南,属于亚热带范畴,降水充沛,年均降水量大于 1500 mm,集中在台风盛行的夏季。从水系层面来看,珠三角地区河道纵横交错,集水面积约为 2.68 万 km²,年均产流量为 280.7 亿 m³。从城市发展层面来看,珠三角地区的城市化率大约为 83%,其中深圳市达到 100%^[11]。

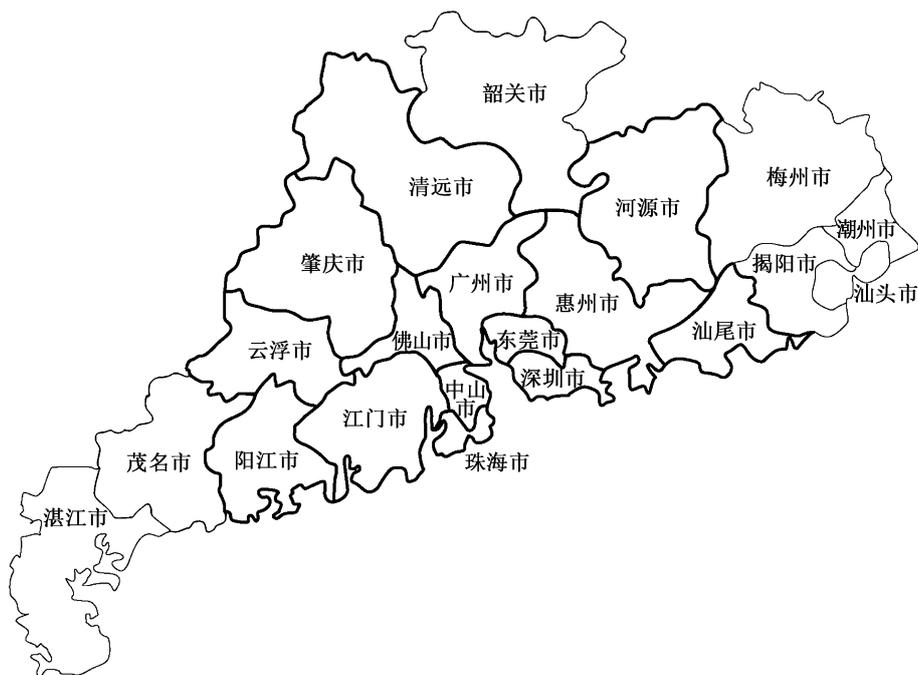


图 1 珠江三角洲城市群
Fig. 1 Urban agglomerations in the Pearl River Delta

随着对外开放和交流程度的不断加深,珠三角地区即将进入开发和建设的新时期,对区域的水资源提出更高的要求。近年来,珠三角地区人口总量增加、工业规模扩大以及水质性缺水等因素都直接或间接地加剧水资源、能源等与城市发展之间的矛盾。《2016年广东省水资源公报》显示,珠江三角洲城市群人均水资源量为 544 m^3 ,远低于广东省人均水平(2251 m^3)^[12]。

1.2 数据来源与研究方法

本研究中城市发展相关数据主要来自14个城市各年度统计年鉴及国民经济和社会发展统计公报,水资源相关数据主要来自环境状况公报以及各地区相关年份水资源公报,研究中使用的各类产品虚拟含水量参考值主要来自国际虚拟水研究成果中有关中国的部分^[13-14]。

首先依据熵值法,将14个目标城市进行城市化质量评价及分级,同时运用水足迹方法,测算目标城市水足迹总值、人均水足迹和水足迹强度等指标,并进行相关性分析。为了更深层次地说明城市化与水资源利用效率之间关系的变化特征,本研究分别从四级不同的城市化发展水平中选取一个代表城市进行重点研究。考虑到数据的可获得性,研究时间跨度定为2005—2017年。

2 城市化质量综合评价方法

2.1 城市化质量水平综合评价指标选取

综合地看,城市化并不是由某一种因素导致的,而是多个指标逐步演变的过程,反映整个区域人口、经济、社会、土地和环境等多个系统的变化。为了获取更准确、适当的评价指标,本研究通过统

计近年来城市化发展水平的研究成果^[15-17],并结合研究区域的发展特点,最终选取人口城市化水平、经济城市化水平和社会城市化水平三大类指标以及十小类指标构成城市化质量评价指标体系,如表1所示。

从人口规模来说,在城市化进程中,人口不断地向城市集聚,引起城市人口数量的增加。本研究参考杨浩等^[15]的评价指标,选取区域年末人口总数作为人口城市化水平的一个衡量指标。从人口城镇化来说,人口城市化也是农村人口不断向城市迁移的过程,因此选取城镇人口比例来表征人口结构的变化。经济城市化水平是在国民经济的产业结构中第二、三产业占比不断增加,第一产业占比不断减少的过程。区域生产总值的增长、投资结构的升级以及第三产业的发展带来的产业结构优化都会对城市化进程及质量产生正向影响。社会城市化指城市化水平提高后生活水平的改变,生活质量有了明显改善。在本研究中,选取城镇居民年人均可支配收入、社会消费品零售总额、民用汽车拥有量和每万人拥有医生数4个指标来体现社会的发展以及居民生活质量的提升。

2.2 利用熵值法计算综合城市化水平指数

熵值法是一种客观赋值法,根据各项指标包含的信息量来确定每个指标所占权重,能够有效地避免人为因素带来的偏差^[18]。本文利用熵值法来确定指标权重,为多指标的城市化质量评价系统提供依据。

1) 本文选取珠江三角洲地区14个城市,评价的具体指标共10项。令 X_{ij} 表示第 i 个城市第 j 个指标的值, $i=1, 2, 3, \dots, n(n \leq 14)$; $j=1, 2, 3, \dots, m$

表1 珠江三角洲城市群城市化综合评价体系

Table 1 Comprehensive evaluation system of urbanization of urban agglomerations in the Pearl River Delta

目标层	准则层	指标层	权重	方向
城市化综合评价体系	人口城市化水平 (人口规模、人口结构)	年末常住总人口数(万人)	0.0620	正
		城镇人口比例(%)	0.0158	正
	经济城市化水平 (经济规模、经济结构)	地区生产总值(亿元)	0.1943	正
		人均地区生产总值(元/人)	0.0561	正
		固定资产投资额(亿元)	0.1009	正
		第三产业增加值(亿元)	0.2554	正
	社会城市化水平 (社会发展、生活质量)	城镇居民年人均可支配收入(元)	0.0157	正
		社会消费品零售总额(亿元)	0.1720	正
		民用汽车拥有量(万辆)	0.1174	正
		每万人拥有医生数(人/万人)	0.0106	正

($m \leq 10$), 建立原始矩阵:

$$X = (X_{ij})_{n \times m} \quad (1)$$

2) 异质指标同质化处理。由于各项指标的计量单位不统一, 在计算综合评价指标之前, 需要对异质指标进行标准化处理, 使其同质化。本研究包含的指标方向均为正向, 所以只介绍正项指标的标准化处理方法:

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \min_{i \neq 0} \{X_{ij}, \dots, X_{nj}\}}{\max_{i \neq 0} \{X_{ij}, \dots, X_{nj}\} - \min_{i \neq 0} \{X_{ij}, \dots, X_{nj}\}} \quad (2)$$

3) 将标准化后的 X_{ij} 记为 X'_{ij} , 则标准化的矩阵记为

$$X' = (X'_{ij})_{n \times m} \quad (3)$$

4) 计算第 j 项指标下, 第 i 个城市占该指标的比重:

$$W_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^n X'_{ij}}, (i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m) \quad (4)$$

5) 计算第 j 项指标的熵值:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n W_{ij} \ln(w_{ij}), k = 1 / \ln(n), \text{ 满足 } e_j \geq 0. \quad (5)$$

6) 计算信息熵冗余度:

$$d_j = 1 - e_j \quad (6)$$

7) 计算各项指标的权重, 并在表 1 给出:

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad (7)$$

8) 计算城市 i 指标 j 的得分 S_{ij} 以及城市 i 的综合城市化水平指数 Q_{ui} :

$$S_{ij} = W_{ij} \times X'_{ij}, \quad (8)$$

$$Q_{ui} = \sum_{j=1}^m S_{ij} \quad (9)$$

3 水足迹计算方法

水足迹指一个国家、一个地区或一个人在某个特定的时段内消耗的所有产品和服务所需的水资源数量, 可以准确地反映地区利用水资源的情况^[19]。对 14 个城市进行层级划分后, 本研究采用水足迹的计算方法来测算各地区研究年度的水足迹总量、人均水足迹值(水足迹总量/年末常住人口数)和水足迹强度(水足迹总量/地区生产总值)等指标。

某地区水足迹总量通常包括日常生活用水足迹、生态环境用水足迹、农业用水足迹及工业用水足迹 4 个部分^[19]。根据珠三角地区城市公共用水需求较大的特性, 本研究提出用城市公共用水足迹(UPWC)来改进水足迹计算公式(式(10)), 使之能够更准确地反映研究区域水资源利用的实际情况。

$$WFP = HWC + EWC + AWC + IWC + UPWC, \quad (10)$$

其中, WFP 表示水足迹总量, HWC 代表居民生活用水足迹, EWC 代表生态环境用水足迹, AWC 代表农业用水足迹, IWC 代表工业用水足迹。

在水足迹的测算中, 农业用水足迹(含农作物及动物产品)为虚拟水, 为单位产品虚拟水含量与其产量之乘积。其中, 单位产品虚拟水含量主要依据 Chapagain 等^[13]和 Hoekstra^[14]的研究结果中有关中国的部分, 并且参照姜诗慧等^[20]和孙才志等^[21]关于近期我国农业虚拟水足迹的研究成果进行实际修正(表 2)。工业用水足迹与农业用水足迹计算方法相同, 但因缺乏国际认可的单位产品的虚拟水足迹参考数值而无法计算, 故本文使用工业实际用水数据予以替代。日常生活用水足迹、生态环境用水足迹和城市公共用水足迹 3 个实体的水部分均来自 14 个城市各年度水资源公报。

4 研究结果与讨论

4.1 珠江三角洲城市群城市化水平

根据熵值法, 计算得到 2016 年珠三角城市群的综合城市化水平(表 3), 再参考方创琳等^[3]修正的

表 2 主要农作物及动物产品虚拟含水量
Table 2 Virtual water content of major crops and animal products

农作物/动物	虚拟含水量/($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	
农作物	粮食	1.014
	糖料	0.13
	油料	1.89
	水果	0.87
	蔬菜	0.10
	烟叶	2.91
	茶叶	11.11
动物	猪肉	2.211
	牛肉	12.56
	羊肉	3.994
	禽肉	3.652
	禽蛋	3.55
水产品	5.00	

说明: 本文中的水产品均已扣除海水养殖部分。

表 3 珠江三角洲城市群城市化水平
Table 3 Urbanization level of urban agglomerations in the Pearl River Delta

城市	人口城市化水平	经济城市化水平	社会城市化水平	综合城市化水平	城市化水平等级
广州市	0.0774	0.2373	0.3010	0.6157	高
深圳市	0.0807	0.2140	0.3090	0.6037	高
珠海市	0.1281	0.1680	0.1520	0.4481	较高
佛山市	0.0617	0.1199	0.1416	0.3232	较高
东莞市	0.1138	0.0771	0.1219	0.3128	较高
中山市	0.0413	0.0716	0.0746	0.1875	中等
惠州市	0.0347	0.0573	0.0712	0.1632	中等
江门市	0.0294	0.0380	0.0498	0.1172	中等
肇庆市	0.0137	0.0392	0.0222	0.0751	较低
阳江市	0.0195	0.0325	0.0256	0.0776	较低
清远市	0.0144	0.0215	0.0283	0.0642	较低
河源市	0.0083	0.0138	0.0129	0.0350	较低
汕尾市	0.0171	0.0056	0.0096	0.0323	较低
云浮市	0.0049	0.0091	0.0065	0.0205	较低

“S”曲线和周一星^[22]对城市化发展水平等级的划分方法, 本文将珠三角城市群划分为4类: 高城市化水平城市(广州市和深圳市)、较高城市化水平城市(珠海市、佛山市和东莞市)、中等城市化水平城市(惠州市、中山市和江门市)以及较低城市化水平城市(云浮市、肇庆市、清远市、阳江市、汕尾市和河源市)。珠三角城市群的综合城市化水平平均值为0.2197, 处于较低质量的城市化发展水平。

根据2016年的计算结果, 广州市和深圳市属于高城市化水平城市, 其他区域与这两个城市存在一定的差距。近年来, 由于人口结构及质量的优化、

产业体系的调整、区域间协作能力的增强和社会创新能力的提高, 广州和深圳两地城市化进程愈发加快, 但对于珠三角整体, 城市化水平由中部地区向四周发散, 呈现下降趋势, 河源、汕尾和云浮等地区城市化发展水平仍较低。

4.2 珠江三角洲城市群水足迹

1) 表4为珠江三角洲城市群水足迹总量及人均水足迹。从用水足迹构成来看, 在城市化发展初期, 农业用水占比较大; 在城市化水平越高的阶段, 日常生活用水所占比例越大。以深圳市为例, 其第二、三产业发展迅速, 第一产业占比较小, 故农业

表 4 珠江三角洲城市群水足迹总量及人均水足迹
Table 4 Total water footprint and per capita water footprint of urban agglomerations in the Pearl River Delta

城市	日常生活用水量/亿 m ³	生态环境用水量/亿 m ³	城市公共用水量/亿 m ³	工业用水量/亿 m ³	农业虚拟水足迹/亿 m ³	水足迹总量/亿 m ³	人均水足迹/(m ³ ·人 ⁻¹)
广州市	10.31	0.90	6.31	36.46	45.58	99.56	708.94
深圳市	7.20	1.12	5.80	5.01	2.46	21.59	181.30
珠海市	1.54	0.06	1.36	1.34	18.83	23.13	1380.65
佛山市	4.25	1.02	1.53	9.26	40.87	56.93	762.86
东莞市	6.31	0.29	3.11	7.65	4.09	21.45	259.64
中山市	1.79	0.06	1.14	6.73	21.71	31.43	973.07
惠州市	2.66	0.07	1.01	4.88	33.24	41.86	876.65
江门市	2.88	0.08	1.16	4.00	45.87	53.99	1188.16
肇庆市	2.24	0.09	0.62	3.34	45.69	51.98	1272.59
阳江市	1.40	0.05	0.50	0.83	29.80	32.58	716.99
清远市	2.28	0.05	0.70	1.28	32.97	37.28	969.32
汕尾市	1.83	0.05	0.57	0.79	14.87	18.11	596.39
河源市	1.66	0.10	0.25	3.69	26.93	32.63	1059.07
云浮市	1.25	0.37	0.43	1.74	37.15	40.94	1650.27

用水占比较低;由于城市化水平不断提高,人们对生活水平和居住环境要求更高,使得日常用水、城市公共用水和生态用水占比上升。

2) 如图 2(a)所示,广州市用水总量最大,这与其发展模式相关。与《2016 年广东省水资源公报》数据相比,珠三角大部分地区水足迹总量显著偏高。从整个区域来看,珠三角城市群水足迹总量为 580.58 亿 m^3 , 显著大于水资源公报的 289.90 亿 m^3 [12]。

3) 如图 2(b)所示,云浮市的人均水足迹在整个珠三角地区居于首位,主要是因为其农林牧渔业比较发达,用水总量较大而人口较少导致。深圳市人均水足迹仅为 181.30 m^3 /人,远低于珠三角地区平均值(889.71 m^3 /人)。

人均水足迹和水足迹强度是常用的评价水资源利用效率的指标。在城市化发展水平相当的城市之间,水资源利用效率可能会存在差距。如图 2(c)中广州市和深圳市,两者都处于城市化发展的高水平阶段,但深圳市水资源利用效率远高于广州市,这是由于广州市还属于主要依靠劳动力和能源等要素的消耗来拉动经济增长的传统发展模式,深圳市主要依靠技术、资金等要素的投入来发展经济。将不同城市化等级的水资源利用效率进行比较,发现城市的不断发展会带来水资源利用效率的提高。

4.3 城市化水平与水资源总量之间的关系

4.3.1 珠江三角洲城市群城市化水平与水足迹总量

通过 SPSS 软件分析,得到 2016 年珠三角城市群城市化水平与水足迹总量之间的关系(图 3), $R^2 = 0.247$,说明两者之间存在相关性。

1) 在城市化发展初期,第一产业占比较大,第二产业中造纸和火电等高耗水行业开始发展,第三产业还处于萌芽阶段,作物种植和动物养殖需要耗用大量的水资源,因此现阶段农业用水量呈上升态势。人口逐渐向城市集中带来的日常生活用水增加,会使得城市水足迹总量增加。

2) 随着城市化进入快速发展时期,第二、三产业占比逐渐增加。此时第一产业逐渐规模化和集约化,并且随着节水设备和技术在农业领域中应用,使得农业水足迹总量减少。科学地调整产业结构与用水结构,可以提高该阶段水资源利用效率。

3) 随着城市化进程的不断加深,第二、三产业依旧是带动经济发展的主要因素,同时也会耗用较多的水资源。饮食习惯和生活方式的改变会使水足迹总量持续增加。同时,人们对生活环境的要求也

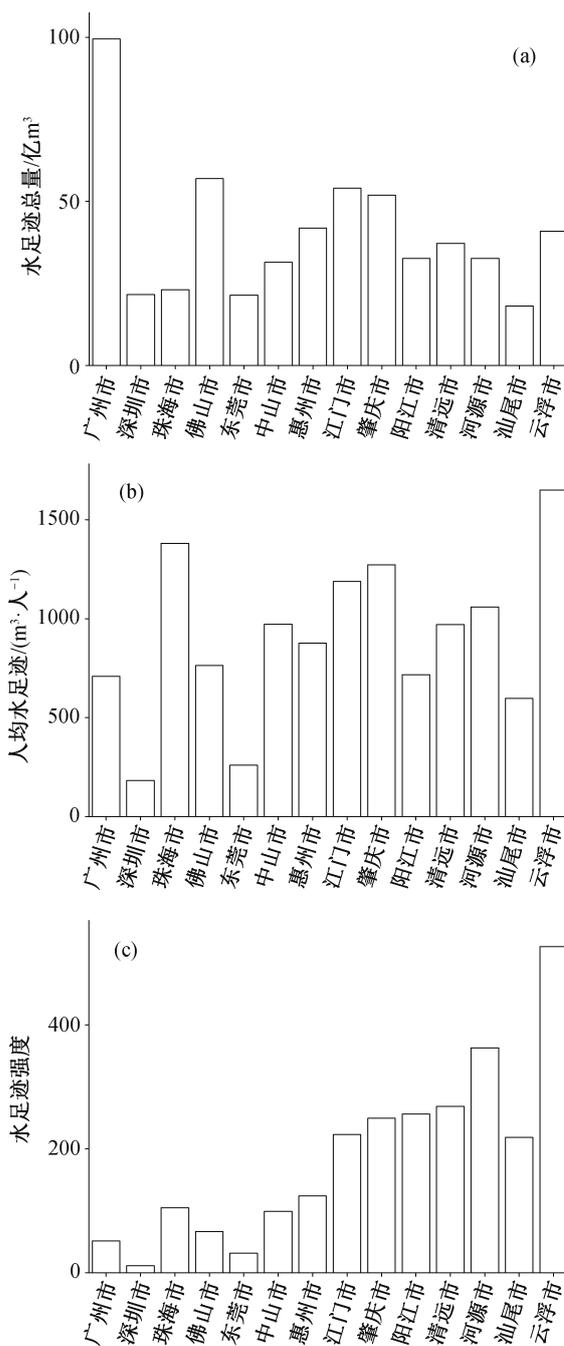


图 2 珠江三角洲城市群水足迹总量、人均水足迹及水足迹强度

Fig. 2 Total water footprint, per capita water footprint and water footprint intensity of urban agglomerations in the Pearl River Delta

会越来越高,城市生态用水量 and 城市公共用水量会逐渐增加,也使得水足迹总量增加。因此,提高居民的日常节水意识、推广生活节水技术以及中水重复利用,在较高城市化发展阶段显得尤为重要。

从图 3 还可以看出,珠三角城市群中大部分城

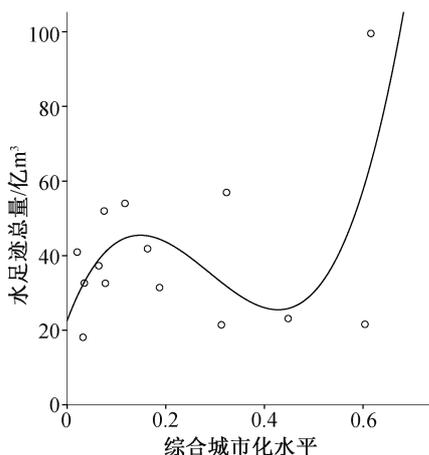


图3 珠江三角洲城市群城市化和水足迹总量的关系
Fig. 3 Correlation between urbanization and total water footprint of urban agglomerations in the Pearl River Delta

市仍处于曲线初期的上升阶段，说明随着城市化发展水平的提高，城市化与水资源之间的矛盾会进一步加深，政府应做好充足的准备，以便应对更高城市化水平对水资源产生的需求。

4.3.2 代表城市城市化水平与水足迹总量

图4展示4个代表城市的城市化水平与水资源总量的关系，可以看出，水足迹总量与城市化发展水平的关系曲线基本上呈“U”型($R^2=0.844$)。当城市化水平发展到一定阶段时，由于产业结构优化、节水技术推广和节水意识增强等因素的影响，用水总量会呈现短暂的下降趋势(如中山市和东莞市)；但随着城市的发展，用水总量最终还是会上升(如深圳市)。

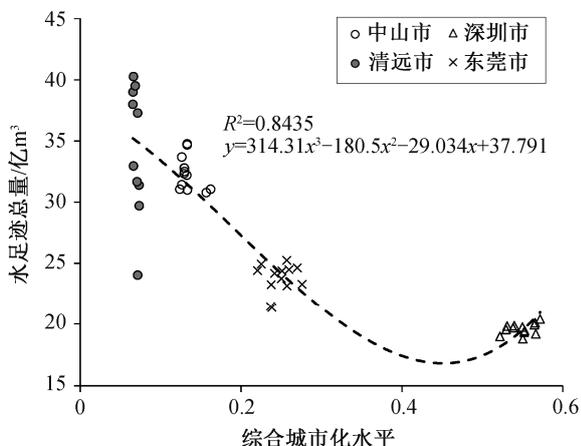


图4 代表城市的城市化水平与水足迹总量的关系
Fig. 4 Correlation between urbanization level and total water footprint of representative cities

4.4 城市化水平与人均水足迹的关系

4.4.1 珠江三角洲城市群城市化水平与人均水足迹

人均水足迹可以比较直观地刻画水资源利用效率。通过对2016年珠三角地区14个城市的综合城市化水平以及各地区人均足迹值进行分析，得出 $R^2=0.276$ ，说明两者之间具有相关性。从图5可以看出，随着城市化水平的提高，人均水足迹呈下降趋势，说明水资源利用效率得到提高。与何刚等^[23]关于长江经济带水资源利用效率的研究结果类似，由于产业结构、水资源利用技术和环保意识差距等因素的影响，城市化水平较低的中、西部城市的水资源利用效率低于城市化水平较高的东部城市。

4.4.2 代表城市的城市化水平与人均水足迹

1) 较低城市化水平。图6(a)以清远市为代表，表示处于较低城市化水平时，城市化水平与人均水足迹之间存在反向关系。在这个阶段，第二产业占比较大，用水量逐渐上升，而此时人口还未出现暴增情况，故人均用水量还处于较高水平。并且，受整个经济周期的影响，清远市近年来发展水平稍有波动，人均用水量也随之波动。这反映初级发展水平城市受外围因素影响较大，更应该在水资源和能源等方面做好准备。

2) 中等城市化水平。图6(b)表示以中山市为代表的中等城市化水平城市群，其城市化水平与人均水足迹之间存在反向关系。在这个阶段，城市化带来的社会红利已被广泛知晓，便捷交通、优质教育和高端医疗等因素会吸引更多人口进入；工业规模处于扩大状态，集约型生产方式还未完全形成，故用水效率较低，人均水足迹的绝对值较高。

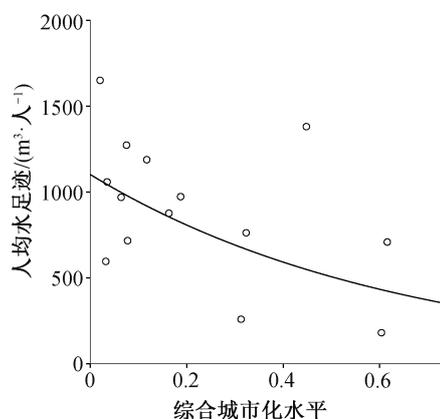


图5 珠江三角洲城市群城市化水平与人均水足迹的关系
Fig. 5 Correlation between urbanization level and per capita water footprint of urban agglomerations in the Pearl River Delta

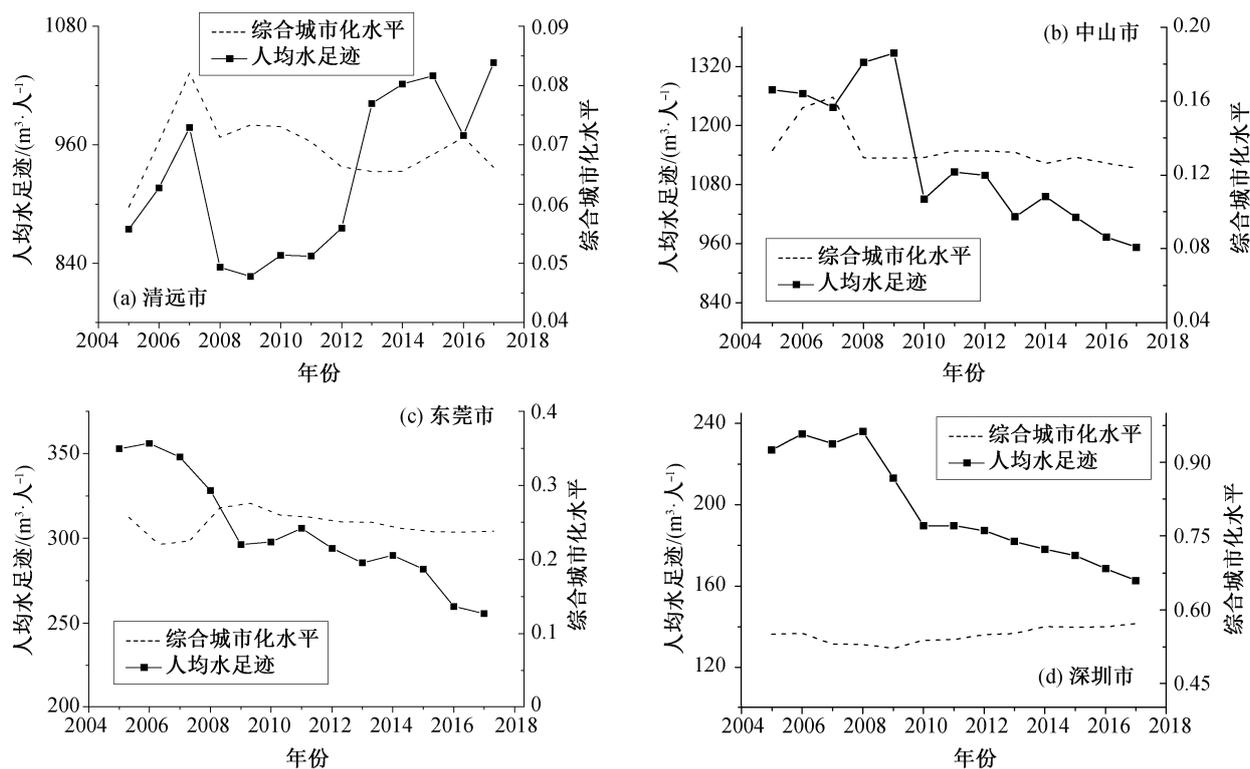


图 6 2005—2017 年珠江三角洲城市群代表城市的城市化水平与人均水足迹的关系
 Fig. 6 Changes in the correlation between urbanization level and per capita water footprint of representative cities of urban agglomerations in the Pearl River Delta from 2005 to 2017

3) 较高城市化水平。图 6(c)表示以东莞市为代表的较高城市化水平城市群,当城市化水平上升时,人均水足迹下降。该阶段城市人口增速逐渐放缓,产业结构趋于合理,节水技术被逐步采用,人们的节水意识也逐渐增强,相比前两个阶段,人均用水量有较明显的下降。

4) 高城市化水平。图 6(d)是以深圳市为代表的高城市化水平城市群,其城市化水平与人均水足迹之间存在较为显著的负相关关系。随着城市化水平的不断上升,人口密度逐渐达到饱和状态,同时节水意识的深入也使得居民人均生活用水量降低;在工业用水方面,节水技术的广泛应用使得用水效率提高,污水处理技术也增加了水资源的重复利用效率。综合看来,此阶段人均水足迹绝对值处于较低水平,水资源利用效率提高。

4.5 城市化水平与水足迹强度的关系

4.5.1 珠江三角洲城市群城市化水平与水足迹强度

水足迹强度同样可以反映水资源利用效率。在人口、经济、社会等因素的综合作用下,区域的城市化水平不断上升,单位国内生产总值所消耗的水

资源越来越少,则意味着水资源利用效率的提高。从图 7 可知,水足迹强度与综合城市化水平之间存在反向关系($R^2=0.752$)。游珍等^[24]通过与京津冀城市群、长三角经济带的比较,认为珠三角地区的发展受水资源限制程度最低,但仍然面临较大的水资源压力。因此,珠三角各地方政府也应重视水资源利用效率的提高,加强对水资源系统的管理。

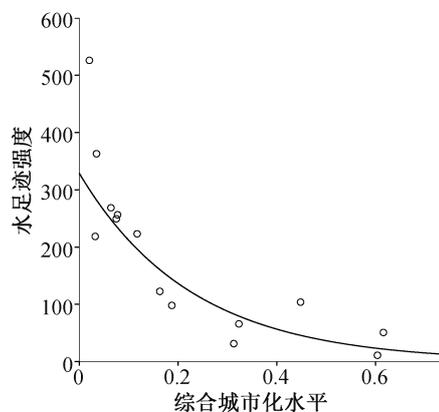


图 7 珠江三角洲城市群城市化水平与水足迹强度的关系
 Fig. 7 Correlation between urbanization level and water footprint intensity of urban agglomerations in the Pearl River Delta

4.5.2 代表城市的城市化水平与水足迹强度

通过对4个代表城市的数据分析,得出水足迹强度与城市化水平之间呈现较为明显的负相关关系(R^2 为0.827,如图8)。在高城市化水平的城市,第三产业占较大比重,单位国民生产总值用水量减少;在城市化水平较低的时期,由于主要依靠第一、二产业,水资源利用效率较低。根据《2017年深圳市水资源公报》,2017年深圳市万元GDP用水量比2000年减少47.08 m^3 ,也说明深圳市用水效率的提高^[25]。

5 结论

本研究以珠江三角洲城市群为研究对象,基于该地区2005—2017年人口变化、经济优化、社会发展和水资源利用等数据,通过构建城市化综合评价体系以及熵值法,对该地区综合城市化发展水平进行评价。在此基础上,利用改进的水足迹计算方法对水资源利用效率进行分析,量化并验证城市化水平与水资源利用效率之间的关系,得到如下主要结论。

1) 从城市化水平来看,可将珠三角城市群划分为4个等级,其中广州市和深圳市处于高水平城市化等级,其余地区城市化水平较低。应充分利用广州和深圳两地中心城市地位,为区域发展提供带动和辐射作用,籍此改善珠三角地区城市发展两极分化的状况,将有利于区域的可持续发展。

2) 通过水足迹计算方法,得出2016年珠江三角

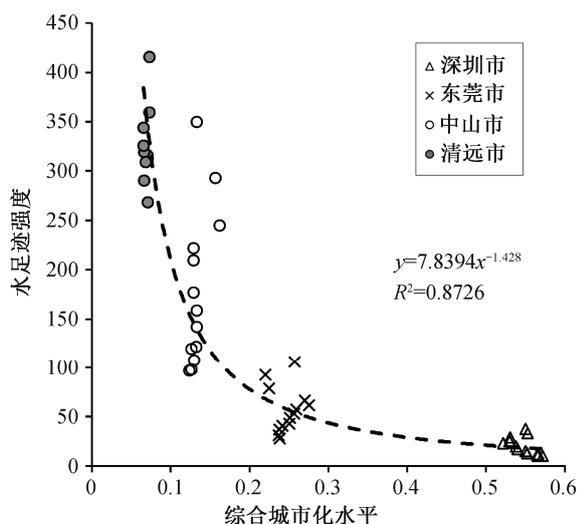


图8 代表城市城市化水平与水足迹强度的关系
Fig. 8 Correlation between urbanization level and water footprint intensity of representative cities

洲城市群水足迹总量为580.58 m^3 ,显著大于根据《2016年广东省水资源公报》中数据计算得到的结果(289.90 m^3),这一结果可为珠江三角洲地区在快速城市化发展过程中水资源的科学管理与调控提供指导,说明稍为宽松的水资源储备将减轻水资源压力,更有利于城市化的发展。

3) 在城市化发展的不同阶段,水足迹总量呈现不同的变化趋势,具有阶段性特征。在城市化发展的初期,由于人口骤增与工业发展,水足迹总量呈上升趋势;在城市化迅速发展时期,随着产业结构的优化以及节水技术的改进,用水总量的增速会下降;在城市化水平高度发达的阶段,工业及生活用水需求是导致用水量上升的重要因素。在不同的城市化发展阶段,各地区面临不同的水资源供需状况,珠三角各地区政府应根据实际情况进行水资源管理。对于中等城市化水平或者较低城市化水平的城市(如中山市和云浮市等),未来城市化的发展还需要更多水资源的投入,政府需提前做好准备。

4) 随着城市化的不断发展,人均水足迹将会减少,意味着水资源利用效率的提高,说明城市化水平与水资源利用效率之间存在正向关系。尽管高水平城市化发展阶段人口密度较高,但由于产业结构转型、节水技术及设备的应用以及环保节约意识增强等因素的共同作用,使得总用水量上升趋势得到缓解,从而人均水足迹呈现下降趋势。对于珠三角城市群来说,在促进经济和产业不断发展的同时,应把提高水资源的利用效率作为水资源管理的要点,籍此缓解城市发展与水资源缺乏之间的压力。

城市的不断发展必然带来资源需求的增加,但城市发展同时也会为资源利用效率的提高提供技术支持和社会条件,使得资源利用效用最大化。在资源总量一定的情况下,提高资源的开发利用效率,“资源有限”将不会成为限制城市可持续发展的主要因素。

参考文献

[1] 何仁伟, 谢磊, 孙威. 京津冀城市群城市化质量综合评价研究. 地域研究与开发, 2016, 35(6): 42-47
[2] 王富喜, 毛爱华, 李赫龙, 等. 基于熵值法的山东省城镇化质量测度及空间差异分析. 地理科学, 2013, 33(11): 1323-1329
[3] 方创琳, 刘晓丽, 蔺雪芹. 中国城市化发展阶段的修正及规律性分析. 干旱区地理, 2008, 31(4): 512-

523

- [4] Aldaya M M, Martinez-Santos P, Llamas M R. Incorporating the water footprint and virtual water into policy: reflections from the Mancha Occidental Region, Spain. *Water Resources Management*, 2010, 24(5): 941-958
- [5] 潘文俊, 曹文志, 王飞飞, 等. 基于水足迹理论的九龙江流域水资源评价. *资源科学*, 2012, 34(10): 1905-1912
- [6] 余惠, 王立权. 基于水足迹理论的牡丹江市水资源评价. *科学技术创新*, 2018(18): 87-88
- [7] 余灏哲, 李丽娟, 李九一. 一体化进程中京津冀水资源利用与城市经济发展关系时空分析. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(2): 29-39
- [8] 陈威, 杜娟, 常建军. 武汉城市群水资源利用效率测度研究. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(6): 1251-1258
- [9] 尹默雪, 赵先贵. 基于水足迹理论的内蒙古 1990—2016 年水资源评价. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(6): 120-125
- [10] 海霞, 李伟峰, 王朝, 等. 京津冀城市群用水效率及其与城市化水平的关系. *生态学报*, 2018, 38(12): 4245-4256
- [11] 韩靓. 珠三角城市群人口城市化的问题及对策. *城市观察*, 2019(1): 74-81
- [12] 广东省水利厅. 广东省 2016 年水资源公报[EB/OL]. (2017-09-04)[2019-05-21]. <http://www.gdwater.gov.cn/zwgk/tjsj/szygb/szygb2016/>
- [13] Chapagain A K, Hoekstra A Y. Water footprints of nations // Value of Water Research Report Series: No. 16. Delft: UNESCO-IHE, 2004
- [14] Hoekstra A Y, Chapagain A K. The water footprints of Morocco and the Netherlands: global water use as a result of domestic consumption of agricultural commodities. *Ecological Economics*, 2007, 64(1): 143-151
- [15] 杨浩, 蒲海霞. 京津冀地区产业结构变化与城市化协调发展研究. *城市发展研究*, 2018, 25(6): 23-239
- [16] 高明, 郭峰. 城市化对空气质量的影响研究——以京津冀城市群为例. *环境经济研究*, 2018, 3(3): 88-105
- [17] 孙平军, 丁四保, 修春亮, 等. 东北地区“人口-经济-空间”城市化协调性研究. *地理科学*, 2012, 32(4): 450-457
- [18] 欧向军, 甄峰, 秦永东, 等. 区域城市化水平综合测度及其理想动力分析——以江苏省为例. *地理研究*, 2008, 27(5): 993-1002
- [19] 代稳, 张美竹, 秦趣, 等. 六盘水市水资源安全的水足迹分析. *水生态学杂志*, 2013, 34(5): 38-42
- [20] 姜诗慧, 彭剑峰, 宋永会, 等. 沈阳市 2005—2012 年水足迹与水资源承载力分析. *环境工程技术学报*, 2017, 7(1): 15-23
- [21] 孙才志, 张蕾. 中国农产品虚拟水-耕地资源区域时空差异演变. *资源科学*, 2009, 31(1): 84-93
- [22] 周一星. 关于中国城镇化速度的思考. *城市规划*, 2006(增刊1): 32-35
- [23] 何刚, 夏业领, 秦勇, 等. 长江经济带水资源承载力评价及时空动态变化. *水土保持研究*, 2019, 26(1): 287-292
- [24] 游珍, 杨艳昭. 中国主要城市群水土资源条件与限制研究——以京津冀、长三角、珠三角为例. *地域研究与开发*, 2018, 37(4): 138-143
- [25] 深圳市水务局. 2017 年深圳市水资源公报[EB/OL]. (2018-08-10) [2019-05-21]. <http://www.szwr.gov.cn/xxgk/zfxxgkml/szswgk/tjsj/szygb/201808/P020180925634551447544.pdf>