

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.02.06

广东省水资源生态足迹的定量评价及其影响因素

陶倩君, 郭程轩

(华南师范大学地理科学学院, 广东 广州 510631)

摘要:运用时空分析和相关分析等方法对广东省2000—2014年的水资源生态足迹进行评价,并在此过程中充分考虑了水污染的影响,以便准确地呈现广东省实际的水资源生态足迹及其影响因素。研究表明:2000—2014年广东水资源生态足迹呈上升趋势,城镇生活污水、人均GDP、工业废水是其增长的最主要因素;水资源生态足迹呈现出以珠三角为核心的中间高、四周低的半环状分布;全省的水资源为生态盈余,但东莞、佛山、广州、深圳、中山、汕头、珠海7市已多年出现水资源生态赤字;近年来全省对水资源利用率不断提高,其中粤北、粤东北地区最低。要实现广东省水资源的可持续发展则需要严格控制各城市(尤其是发达城市)的水污染生态足迹,从多个方面防治水污染。

关键词:水资源;生态足迹;水污染;可持续发展

中图分类号:TV213.4 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2018)02-0028-06

Quantitative evaluation and influential factor of water resources ecological footprint in Guangdong Province

TAO Qianjun, GUO Chengxuan

(School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract: This paper evaluates the water resources ecological footprint in Guangdong Province from 2000 to 2014 by using spatio-temporal analysis and correlation analysis, and fully considers the influence of water pollution in the process, and presents the actual footprint of water resources in Guangdong and the influencing factors. The results reveal that the ecological footprint of Guangdong's water resources showed an upward trend from 2000 to 2014, Urban sewage, GDP per capita and industrial wastewater were the most important factors for the growth. The ecological footprint of water resources shows a semi-circular distribution which take the Pearl River Delta as the core and low in four weeks. The water resources of the province are ecological surplus, but the 7 cities of Dongguan, Foshan, Guangzhou, Shenzhen, Zhongshan, Shantou and Zhuhai have been in the ecological deficit of water resources for many years. In recent years, the utilization of water resources in the province has been increasing, among which the north and the northeast of Guangdong are the lowest. To achieve sustainable development of water resources in Guangdong Province, we must strictly control the water pollution ecological footprint of all cities, especially developed cities, and prevent water pollution from many aspects.

Key words: water resources; ecological footprint; water pollution; sustainable development

随着全球人口的急剧增长和工业的迅速发展, 益严重,消耗着宝贵的淡水资源。广东省位于热带、人类对水资源的需求急速增加,而水污染问题也日 亚热带季风区,境内河网稠密,水资源较丰富。然而

作者简介:陶倩君(1993—),女,硕士研究生,研究方向为湿地景观生态健康评价。E-mail:664871779@163.com
通信作者:郭程轩,副教授,博士,硕士生导师。E-mail:guochengxuan@126.com

季风气候也造就了当地水资源的时空分布不均,使旱涝、台风等气象灾害频发。城市化快速推进更使广东省水资源需求量和废水排放量不断增加,进一步加剧了水资源时空分布不均的状况,使其面临日益严峻的水资源问题^[1]。

2002 年 Hoekstra 等^[2]在加拿大生态经济学家 William Rees 的研究基础上提出了水资源生态足迹的概念,即用生产性土地面积来度量一个地区人口或经济规模的水资源消费污水吸收水平的账户工具,其改良了生态足迹模型中水资源账户的计算方法,为判断水资源的生态生产面积是否处于该区域生态承载能力范围内提供了定量依据。近年来,针对水资源生态足迹的研究也引起了我国学者的关注,黄林楠等^[3]在生态足迹模型的基础上提出了水资源模块,制定了均衡因子和产量因子的计算模型;谭秀娟等^[4]运用 ARIMA 模型对我国水资源生态足迹变化趋势进行深入研究;张义等^[5]修改了水资源生态足迹的已有模型,首次把污水生态足迹添加到水资源生态足迹的计算中。

国内在这个领域的研究主要集中在全国大尺度范围或水资源较紧缺的省份^[6-8],对我国南方地区,尤其是总体水资源较丰富的东南部地区的研究较少。同时,由于数据的局限,国内的研究大多忽视了水污染足迹的影响。本研究在计算 2000—2014 年广东省水资源生态足迹的过程中较充分地考虑了水污染的影响,并通过相关性分析,找出影响广东省水资源可持续利用的主要因素,以期为广东省水资源的可持续利用提供参考。

1 研究方法

1.1 数据来源与技术路线

数据主要来源于 2000—2014 年《广东省水资源公报》《广东省环境状况公报》以及 2001—2015 年《广东省统计年鉴》等相关统计数据。

本文通过数据可视化对水资源生态足迹、水资源生态盈亏和万元 GDP 水资源生态足迹进行历年动态变化分析,并借助地理信息系统软件 ArcGIS 对广东省 21 个地级市的计算结果进行空间分析;结合广东省经济、人口、各账户用水量等因素,对影响水资源生态足迹的因素进行相关分析,得出影响广东省水资源可持续利用的主要因素,据此提出广东省水资源实现可持续利用的建议。技术路线见图 1。

1.2 相关参数

区域水资源产量因子为该区域水资源平均生产能力(平均产水模数)除以世界水资源生产能力

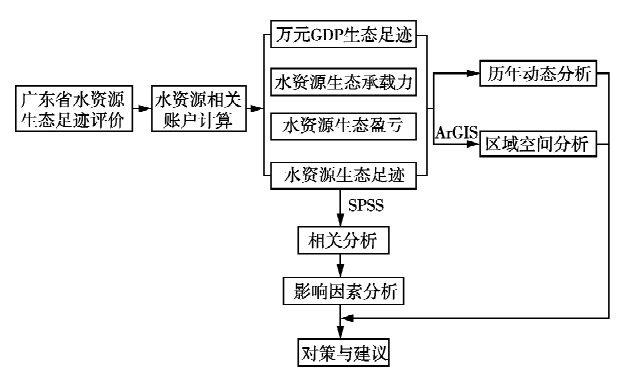


图 1 技术路线

(3 140 m³/hm²)^[3]。根据近 15 年广东各个地级市平均产水模数求得广东各个地级市的产量因子(表 1)。参考黄林楠等^[3]的研究选取渔业的均衡因子为 0.35,水资源的均衡因子为 5.19。

表 1 广东各地级市产量因子

地区	产量因子	地区	产量因子
广州	3.24	中山	3.39
深圳	3.5	江门	4.34
珠海	3.5	阳江	4.36
汕头	2.66	湛江	2.54
佛山	2.06	茂名	3.22
韶关	2.97	肇庆	2.92
河源	3.07	清远	3.44
梅州	2.83	潮州	3.46
惠州	3.62	揭阳	4.24
汕尾	4.30	云浮	2.69
东莞	3.30	全省	3.32

1.3 水资源生态足迹模型

根据水资源消费的不同,把水资源生态足迹分为以下账户:渔业生态足迹、淡水生态足迹和水污染生态足迹,其中,淡水生态足迹包括生活用水、生产用水和其他用水。本研究针对水污染足迹选取具数据较齐全且科学性较高的氨氮和有机物作为特征指标,并以其中的最大污染足迹作为最终的水污染生态足迹^[5]。水资源生态足迹计算公式为

$$E_{FW} = E_{F_{fiw}} + E_{F_{frw}} + E_{FWP} \quad (1)$$

$$E_{F_{fiw}} = \frac{a_w A_{fiw}}{P_{fiw}} \quad (2)$$

$$E_{F_{frw}} = \frac{a_w A_{frw}}{P_w} \quad (3)$$

$$E_{FWP} = \max(E_{FNP}, E_{FCODP}) \quad (4)$$

其中: $E_{FNP} = \frac{a_w C_N}{P_N}$, $E_{FCODP} = \frac{a_w C_{COD}}{P_{COD}}$

式中: E_{FW} 、 $E_{F_{fiw}}$ 、 $E_{F_{frw}}$ 、 E_{FWP} 、 E_{FNP} 和 E_{FCODP} 分别为水资源生态足迹、渔业生态足迹、淡水生态足迹、水污染生态足迹、氨氮污染足迹和有机物污染足迹, hm²; A_{fiw} 、 A_{frw} 、 C_N 和 C_{COD} 分别为水产品总消费量、淡水总

消费量、氨氮污染量和有机物污染量, t ; a_w 为均衡因子; P_{fw} 为全球水产品平均生产能力, t/hm^2 ; P_w 为全球水资源平均生产能力, m^3/hm^2 ; P_N 为全球消纳氨氮污染的平均能力, $hm^2/人$; P_{COD} 为全球消纳有机物污染的平均能力, $hm^2/人$ 。根据《中国主要农产品全球平均产量的更新计算》, 取 P_{fw} 为 $1.5 t/hm^2$, 参考文献[5]取 P_N 为 $0.003145 hm^2/人$, P_{COD} 为 $0.062893 hm^2/人$ 。

1.4 水资源生态盈余或赤字

将一个地区的水资源消耗产生的生态足迹和所拥有的水资源生态承载力相比较, 就会产生水资源生态赤字和水资源生态盈余。同时, 一个国家和地区的水资源承载力中至少扣除 60% 用于维持生态环境^[3], 可得水资源生态盈余的公式为

$$E_{rd} = E_{FW} - E_{CW} \tag{5}$$

其中:
$$E_{CW} = \frac{0.4\gamma\psi Q}{P_w}$$

式中: E_{rd} 和 E_{CW} 分别为水资源生态盈余和水资源生态承载力, hm^2 ; γ 为水资源均衡因子; ψ 为水资源产量因子; Q 为水资源总量, m^3 。当 E_{rd} 大于 0 时, 为水资源生态赤字; 当 E_{rd} 等于 0 时, 为水资源生态平衡; 当 E_{rd} 小于 0 时, 为水资源生态盈余。

1.5 万元 GDP 水资源生态足迹

万元 GDP 水资源生态足迹是指研究区域内水资源生态足迹与 GDP 的比值, 是用来衡量水资源的利用效率的指标, 数值越大说明水资源的利用率越低, 数值越小, 则说明水资源利用率越高。计算公式为

$$E_{FGDP} = \frac{E_{FW}}{W_{GDP}} \tag{6}$$

式中: E_{FGDP} 为万元 GDP 水资源生态足迹, $hm^2/万元$; W_{GDP} 为研究区域 GDP 值, 万元。

2 结果与分析

2.1 广东省历年水资源生态足迹的变化

图 2 为 2000—2014 年广东省人均水资源生态足迹变化情况, 从图 2 可知, 近 15 年间广东水资源生态足迹的总量呈现上升趋势, 在 2010—2011 年水资源生态足迹的增长尤为明显。从水资源生态足迹组成比例中可见, 渔业生态足迹和淡水生态足迹对总量的贡献率较小, 其中, 工业用水量和生活用水量在 2011—2014 年均持续下降(表 2), 可见 2011 以来广东省在生产和生活上的水资源利用率在不断提高, 节水意识也在不断增强。而水污染生态足迹对总量的贡献率较大, 水污染生态足迹的变化趋势和水资源生态足迹非常相似。在 2010—2011 年, 水污

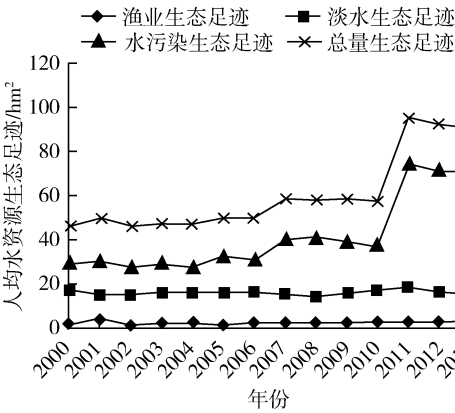


图 2 2000—2014 年广东省人均水资源生态足迹变化

表 2 2000—2014 年广东省人均淡水资源生态

年份	足迹组成				hm ²
	农业用水	工业用水	生活用水	其他用水	
2000	9.91	3.96	2.70	0.97	
2001	8.57	3.79	2.37	0.82	
2002	8.31	4.02	2.89	0.81	
2003	8.86	4.68	2.00	0.88	
2004	8.80	4.60	2.03	0.94	
2005	8.62	4.89	2.39	0.80	
2006	8.53	4.98	2.21	0.86	
2007	8.06	4.86	2.01	0.83	
2008	7.78	4.13	2.29	0.96	
2009	8.16	5.02	2.25	1.22	
2010	8.81	5.44	2.18	1.18	
2011	8.79	4.84	2.82	1.68	
2012	8.93	4.40	2.51	1.25	
2013	8.29	4.29	2.44	1.18	
2014	8.38	4.21	2.24	1.22	

染生态足迹出现爆炸式增长, 增长量为 $36.91 hm^2/人$, 增长率达到 97.9%。而在 2011 年后的 3 年中, 水污染足迹则出现了轻微的下降趋势, 这与广东省相关环境保护部门意识到缓解大量污染物排放量的需要提高废水的处理率有关, 但根据 2014 年的数据显示, 即便如此, 水污染足迹仍居较高水平。

在水资源的利用效率上, 2000—2014 年广东省万元 GDP 水资源生态足迹呈现明显的下降趋势(图 3), 这说明 15 年间广东省经济的发展并非以大规模消耗水资源和牺牲环境为代价的粗放型经济增长

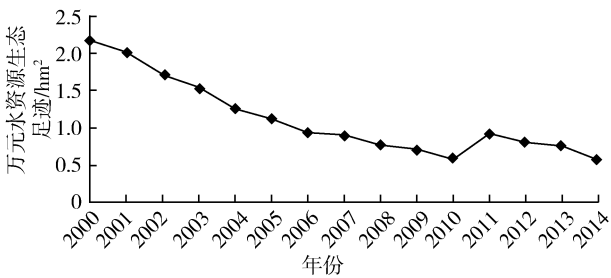


图 3 2000—2014 年广东省万元 GDP 水资源生态足迹变化

模式,相反,广东省水资源利用率、废水处理率都逐渐提高。可见,广东省产业结构的调整促进了经济发展之余,也带来了相应的环境效益。但面对日益增加的水资源生态足迹,节水意识和废水排放量的有效控制仍需不断增强。

2.2 广东省各市水资源生态足迹的空间差异

从水资源生态足迹的空间分布来看,近年来珠江三角洲的水资源生态足迹最大,其次是粤北和粤西地区,水资源生态足迹最小的是粤东地区。图4为广东省人均水资源生态足迹的空间分布。从图4可见,水资源生态足迹从珠三角地区分别向北、东、西3个方向逐级递减,呈现出以珠江三角洲为核心的中间高,四周低的半环状分布。可见,珠江三角洲地区在经济发展和城市化加速发展的过程中,工业用水、城镇用水、城镇公共用水和废水的排放量较大。除珠三角地区外,韶关的水资源生态足迹也较高,这是因为韶关作为广东的重工业城市,工业用水量和工业废水的排放量都较大。而粤西、粤东地区虽然农业用水量较高,但由于其在水资源生态足迹中所占的比例较小,因此人均水资源生态足迹仅处于全省的中低等水平。

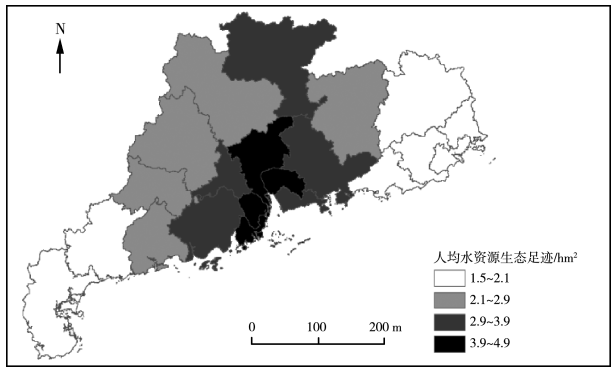


图4 广东省人均水资源生态足迹空间分布

图5为广东省人均水资源生态承载力的空间分布,粤北地区最大,其次是粤东地区,而粤西地区较小,珠三角地区最小。这是因为粤北地区人口较其他地区少,而年降水量较丰富,山区的植被覆盖量

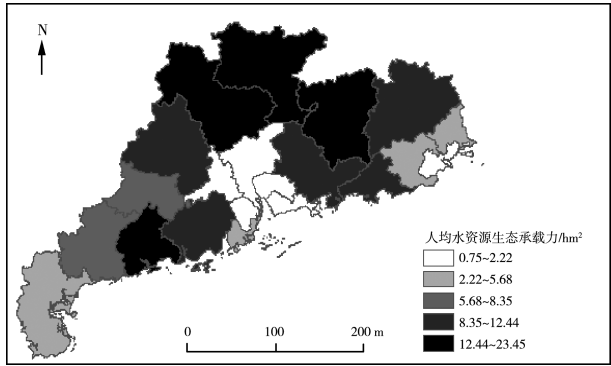


图5 广东省人均水资源生态承载力空间分布

高,且中小型水库较多,涵水、蓄水条件都较好。粤东、粤东北地区拥有东江、梅江、韩江等河流,且拥有新丰江水库和枫树坝水库,水资源总量较大,但由于粤东地区人口数量的限制,人均水资源生态承载力仅处于中等水平。粤西地区虽然年降水量较大,且地下水资源丰富,但其流域面积小,河流短浅,水源拦蓄条件较差,因此水资源生态承载力只处在中等偏下水平。珠三角地区的城市化建设导致下垫面渗水性能普遍降低,下垫面涵养水资源的能力明显低于其他植被覆盖率较高的中小城市,同时,珠三角地区的人口较其他地区多,造成人均水资源生态承载力最低。

在水资源生态盈亏方面,尽管近15年来广东水资源每年均处于生态盈余状态,但广东省各市水资源可持续利用状况并不乐观。水资源分布和需求不匹配,水资源利用状况存在很大空间差异(图6),呈现水资源生态赤字的城市包括:东莞市、佛山市、广州市、深圳市、中山市、汕头市,均属于珠三角地区,最大的生态赤字达到-3.1hm²/人,而粤北地区则出现显著的水资源生态盈余,最大值达22.1hm²/人。

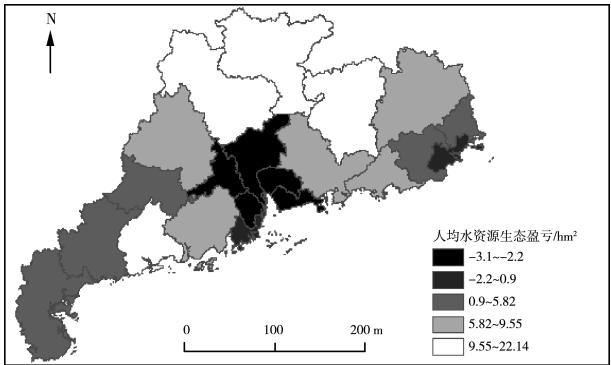


图6 广东省人均水资源生态盈余/赤字空间分布

表3为广东省部分地级市近年水资源生态盈余/赤字随时间变化情况。从表3可知,广州、深圳、佛山、东莞在近15年来水资源均处于生态赤字状

表3 广东省部分地级市近年水资源生态盈余或赤字变化情况

城市	赤字变化情况					
	hm²/人					
	水资源生态盈余或赤字					
	2000 年	2003 年	2005 年	2008 年	2011 年	2014 年
广州	-1.72	-3.13	-2.50	-3.05	-5.81	-4.03
深圳	-1.22	-1.82	-1.81	-1.78	-6.35	-6.30
珠海	2.05	1.54	1.76	2.13	-2.64	-1.72
汕头	-0.42	-0.22	0.02	-0.05	-1.90	-0.92
佛山	-1.64	-1.82	-2.03	-2.89	-5.19	-4.69
东莞	-1.30	-2.10	-2.06	-2.30	-6.51	-5.21
中山	0.09	-0.74	-0.88	-0.99	-6.88	-4.52

态,中山市和珠海市则分别从 2003 年和 2011 年开始,由水资源生态盈余转变为生态赤字,且赤字状况在 2011 年大幅度加深。中山市仅在 2008—2011 年,生态赤字则增加了接近 6 倍。可见,由于珠三角地区经济较发达,人口数量大,工农业用水和废水的排放量都较大,但其水资源生态承载力却不高,常常出现用水紧张。而可喜的是,2014 年以来,珠三角多市的生态赤字有所减小,这说明近两年人们逐渐意识到经济飞速发展对环境的负面影响,也加大了对水资源可持续发展的关注度。

图 7 为广东省万元 GDP 水资源生态足迹空间分布。由图 7 可见,珠三角对水资源的利用效率较高,而粤北、粤东北地区对水资源的利用效率较低。但恰恰粤北、粤东北地区的水资源生态承载力则较珠三角地区大得多。因此,两个地区应该进一步发挥各自的优势,实现区域之间资源和技术的互补。在合理开发的情况下,实现自北向南的水资源的空间调配,缓解珠三角地区的用水紧张,同时,借助珠三角的技术和资金的支持,完善粤北、粤东北地区的水利工程建设,提高水资源利用效率,从而更好地实现区域间水资源的可持续发展。

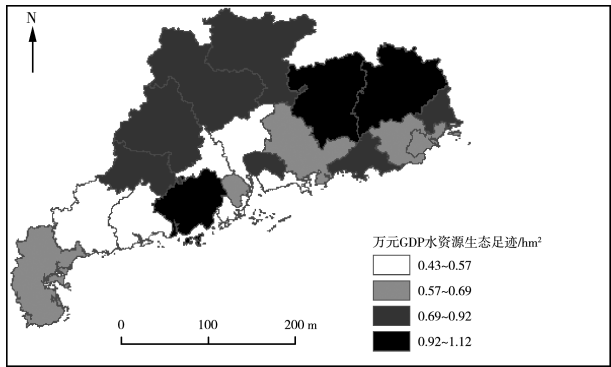


图 7 广东省万元 GDP 水资源生态足迹空间分布

2.3 广东省水资源生态足迹的影响因素

根据广东省水资源利用现状,参照水资源评价指标体系选取的相关原则及标准,依据《广东省水资源公报》《广东省统计年鉴》^[6-7]等相关资料,选取了 14 个指标,并与因变量广东省人均水资源生态足迹做相关分析,结果按照相关系数从大到小排列见表 4。

由表 4 可以看出,在 14 个指标中,城镇生活污水、人均 GDP、工业废水 3 个指标与人均水资源生态足迹的相关系数最高,是影响广东省人均水资源生态足迹的最主要因素。可见,随着广东省经济和城市化的快速发展,水污染问题已经成为影响广东省水资源可持续利用的关键因素。据统计,目前广州市郊依然存在很多小型造纸、印染、服装染料、制革、

农药等严重污染水环境的企业,其清洁化生产的意识较低,对水污染的贡献度较高。万元 GDP 用水量、万元农业增加值用水量、万元工业增加值用水量、农业用水量与人均水资源生态足迹的相关系数为负值,且数值接近 -1,这说明这 4 个指标与人均水资源生态足迹呈显著负相关。这 4 个指标的逐渐减少表明了广东经济的转型升级,一些高耗水、低产值企业在结构调整中遭淘汰,加上新技术的进步和节能技术的应用,致使各种工农业、企业的用水效率不断提高。然而,多年来水资源生态足迹的上升趋势说明,用水效率的提高依然跟不上需水量和污水排放量暴增的步伐。

表 4 广东省各指标与人均水资源生态足迹的相关系数

指标	指标名称	单位	相关系数
X1	城镇生活污水	10 ⁴ t	0.940 **
X2	人均 GDP	元	0.896 **
X3	工业废水	10 ⁴ t	0.890 **
X4	常住人口数	10 ⁴ 人	0.761 **
X5	农村用水	10 ⁸ m ³	0.750 **
X6	工业用水量	10 ⁸ m ³	0.750 *
X7	城镇居民用水	10 ⁸ m ³	0.710 *
X8	城镇公共用水	10 ⁸ m ³	0.700 **
X9	水产品产量	10 ⁴ t	0.318
X10	第三产业废污水排放量	10 ⁴ t	-0.200
X11	农业用水量	10 ⁸ m ³	-0.750 **
X12	万元农业增加值用水量	m ³	-0.780 **
X13	万元 GDP 用水量	m ³	-0.838 **
X14	万元工业增加值用水量	m ³	-0.860 **

注: ** 表示达到 0.01 显著性水平; * 表示达到 0.05 显著性水平。

3 结 论

a. 2000—2014 年随着经济和城市化的快速发展,广东省水资源生态足迹呈上升趋势;15 年来全省水资源都为生态盈余,但由于水资源的开发量和排污量的增加,水资源的盈余值也在近年波动下降。

b. 在空间上,水资源生态足迹从珠三角地区分别向北、东、西 3 个方向逐级递减,呈现出以珠江三角洲为核心的中间高,四周低的半环状分布。此外,从珠三角和粤北、粤东北地区的水资源承载力与水资源的利用效率不匹配的情况看来,珠三角和粤北、粤东地区应该进一步发挥各自的优势,实现区域之间资源和技术的互补。在水资源生态盈余/赤字方面,粤北地区生态盈余值最大,而珠三角地区已有

东莞、佛山、广州、深圳、中山、汕头、珠海 7 市多年出现水资源生态赤字,水资源利用呈现可持续发展状态。

c. 在结构上,水污染足迹占水资源生态足迹的比例最大,且增长速度最快。同时,相关性分析结果也显示,城镇生活污水、人均 GDP、工业废水是影响广东省水资源生态足迹的最主要因素。

参考文献:

[1] WACKERNAGEL M, REES W E, TESTEMALE P. Our ecological footprint: reducing human impact on the earth [M]. Gabriola Island: New Society Publisher, 1996.

[2] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Globalization of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade [J]. Global Environmental Change, 2005, 15 (1): 45-56.

[3] 黄林楠, 张伟新, 姜翠玲, 等. 水资源生态足迹计算方法 [J]. 生态学报, 2008, 28 (3): 1279-1286. (HUANG Linnan, ZHANG Weixin, JIANG Cuiling, et al. Ecological footprint method in water resources assessment [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28 (3): 1279-1286. (in Chinese))

[4] 谭秀娟, 郑钦玉. 我国水资源生态足迹分析与预测 [J]. 生态学报, 2009, 29 (7): 3559-3568 (TAN Xiujuan, ZHENG Qinyu. Dynamic analysis and forecast of water resources ecological footprint in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29 (7): 3559-3568. (in Chinese))

[5] 张义, 张合平. 基于生态系统服务的广西水生态足迹分析 [J]. 生态学报, 2013, 33 (13): 4111-4124. (ZHANG Yi, ZHANG Heping. Analysis of water ecological footprint in Guangxi based on ecosystem services [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (13): 4111-4124. (in Chinese))

[6] 王丹阳, 李景保, 叶亚亚, 等. 基于不同受纳水体的湖南省农业灰水足迹分析 [J]. 水资源保护, 2016, 32 (4): 49-54. (WANG Danyang, LI Jingbao, YE Yaya, et al. Analysis of agricultural grey water footprint in Hunan Province based on different receiving water bodies [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (4): 49-54. (in Chinese))

[7] 黄晶, 王学春, 陈阜. 水足迹研究进展及其对农业水资源利用的启示 [J]. 水资源保护, 2016, 32 (1): 135-141. (HUANG Jing, WANG Xuechun, CHEN Fu. Research progress of water footprint and its implication for utilization of agricultural water [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (1): 135-141. (in Chinese))

[8] 何开为, 张代青, 侯璠, 等. 云南省城乡居民膳食消费的水足迹计算及评价 [J]. 水资源保护, 2015, 31 (5): 114-118. (HE Kaiwei, ZHANG Daiqing, HOU Jin, et al. Calculation and evaluation of water footprint about dietary consumption of urban and rural residents in Yunnan Province [J]. Water Resources Protection, 2015, 31 (5): 114-118. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-05-21 编辑: 王 芳)

(上接第 27 页)

[14] 单纯宇, 王素芬. 海河流域作物水足迹研究 [J]. 灌溉排水学报, 2016, 35 (5): 50-55. (SHAN Chunyu, WANG Sufen. Study on the crop water footprint in the Haihe River Basin [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35 (5): 50-55. (in Chinese))

[15] 国家统计局, 环境保护部. 中国环境统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.

[16] FALKENMARK M, WIDSTRAND C. Population and water resources: a delicate balance [J]. Population Bulletin, 1992, 47 (3): 1-36.

[17] 刘瑜洁, 刘俊国, 赵旭, 等. 京津冀水资源脆弱性评价 [J]. 水土保持通报, 2016, 36 (3): 211-218. (LIU Yujie, LIU Junguo, ZHAO Xu, et al. Assessment of vulnerability of water resource in Beijing-Tianjing-Hebei Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36 (3): 211-218. (in Chinese))

[18] 刘宁. 基于水足迹的京津冀水资源合理配置研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2016.

[19] Food and Agriculture Organization of the United Nations

(FAO). CROPWAT 8.0 model [EB/OL]. [2017-02-11] http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html, 2010a. last access date: 1/3/2012.

[20] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56 [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1998.

[21] 程存旺, 石嫣, 温铁军. 氮肥的真实成本 [J]. 绿叶, 2013 (4): 77-88. (CHENG Cunwang, SHI Yan, WEN Tiejun. True cost of nitrogen fertilizer [J]. Green Leaf, 2013 (4): 77-88. (in Chinese))

[22] JU X T, XING G X, CHEN X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009, 106 (9): 3041-3046.

(收稿日期: 2017-05-21 编辑: 王 芳)