

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2019.05.21

基于熵值法和层次分析法的广东省水资源安全评价及影响因素分析

黄楚珩, 蒋志云, 杨志广, 黄文惠, 陈晓滢, 杨肖

(华南师范大学地理科学学院, 广东广州 510631)

摘要: 水资源安全综合评价对水资源管理与规划具有重要意义。通过熵值法和层次分析法构建了广东省水资源安全评价体系, 综合分析了2007-2016年广东省水资源安全状况。结果表明:2007-2016年, 广东省水资源安全指数始终介于0.4~0.6之间, 属于一般安全等级, 水资源和社会经济安全指数稳步提升, 但水生态安全指数呈现下降趋势; 广东省水资源安全空间分异明显, 珠三角核心区、粤东的潮汕地区及粤西的湛江市水资源安全等级较低, 珠三角核心区水生态指数较低, 社会经济安全指数由珠三角核心区向外围逐步递减; 广东省水资源安全影响因素存在区域差异, 珠三角地区水资源安全的优势因素为社会经济, 劣势因素为水生态环境, 而粤东、粤西及粤北地区的优势因素为水资源量与水生态环境, 劣势因素为社会经济。整体来看, 广东省水资源安全状况与区域经济发展程度不匹配, 经济相对发达的珠三角核心区、粤东和粤西沿海地区的水资源安全形势较为严峻。研究结果以期对广东省及其各地市水资源规划和管理提供参考。

关键词: 水资源; 安全评价; 熵值法; 层次分析法; 广东省

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)05-0140-08

Evaluation and factors of water resource security of Guangdong Province using entropy value and analytic hierarchy process methods

HUANG Chuheng, JIANG Zhiyun, YANG Zhiguang, HUANG Wenhui, CHEN Xiaoying, YANG Xiao

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

Abstract: Evaluation of water resource security is important for the management and planning of water resource. This study established integrative assessment system using the entropy value method and analytic hierarchy process method, and analyzed status of water resource security for Guangdong Province during 2007 and 2016. Results showed that security index of water resource ranged between 0.4 and 0.6 for Guangdong Province in the studied 10 years, which belonged to general security level. The security index for water resource and community economy increased, whereas the security index of water ecology decreased. Moreover, the spatial pattern of security index of water resource displayed significant heterogeneity, with the lower security class of water resource distributing in the Pearl River Delta region, eastern (Chaoshan) and western (Zhanjiang) part of Guangdong Province. The security index of community economy decreased from the Pearl River Delta region to outside. Furthermore, the effects on security of water resource showed obviously spatial differences. The advantage of water resource security in the Pearl River Delta region was community economy, while the disadvantage was water ecology. For the eastern, western and northern parts of Guangdong Province, the advantages were water resource volume and water ecology, while the disadvantage was community economy. In conclusion, the spatial pattern of water resource security and economic development did not well correspond, and the status of water resource secu-

收稿日期:2019-03-22; 修回日期:2019-06-11

基金项目:广东省科技创新战略专项资金博士启动项目(2018A030310517); 中国博士后科学基金项目(2018M643110)

作者简介:黄楚珩(1999-),女,广东佛山人,本科生,研究方向为水资源管理。

通讯作者:蒋志云(1989-),男,湖南耒阳人,博士,特聘副研究员,研究方向为水文学与水资源。

urity was relatively worse in the Pearl River Delta, eastern and western parts of Guangdong Province. The results will be beneficial for the management and planning of water resource in Guangdong Province.

Key words: water resource; security assessment; entropy value method; analytic hierarchy process; Guangdong Province

1 研究背景

水资源是保障人类生存、经济发展和社会稳定不可替代的重要资源^[1]。近几十年来,随着人口增长和经济社会发展,世界范围内水资源紧张局势日益严峻,据估计,全球约有80%的人口面临水安全问题^[2],水资源已经成为制约人类生存与全球发展的关键因素。因此,近年来关于水资源安全研究,特别是区域水资源安全评价,已成为国内外水资源科学研究的热点问题^[3-4]。Olli等^[5]通过全球范围内水资源四个维度的定量分析,发现水资源对粮食安全具有重要影响。Dong等^[6]利用集对分析(SPA)原理,对2006-2016年洛阳市的水资源安全进行评价,结果表明洛阳市水资源压力主要来源于社会经济发展。石卫等^[7]利用水资源敏感性和抗压性分析方法,从流域尺度分析了山东省的水资源安全现状。现有研究大多从水资源量和社会经济发展现状等单一维度对区域水资源安全状况进行评价,难以全面反映区域水资源安全的实际情况。

水资源安全是一个综合性概念,受自身条件(水资源量压力)及外界条件(社会经济发展和生态环境质量)等多重因素制约^[8]。选取少量指标对水资源安全进行评价存在片面性,因此需要建立水资源综合安全评价指标体系,以评价水资源安全状况和影响因素^[9]。建立水资源安全评价指标体系需确定各指标赋值权重,目前指标权重的确定一般采用层次分析法(AHP)^[10]、集对分析法(SPA)^[6,11]、物元分析法^[12]等,这些方法识别问题系统性强,但在赋值的过程中容易丢失部分信息,存在一定的主观性。为减少主观性,已有研究采用熵值法^[13]或BP神经网络法^[14]等构建水资源安全评价模型,但由于缺乏先验知识而使得计算较为复杂。通过结合熵值法与层次分析法构建水资源安全评价体系,能够更加客观和便捷地对水资源安全进行综合评价。

广东省处于我国低纬度沿海地区,水资源总量较为充沛,但人均水资源量却低于全国和世界人均水资源量^[15]。作为我国改革开放的排头兵,广东省在经济高速发展的形势下,仍面临十分严峻的水资源问题,如许多地区仍受水质性缺水、工程性缺水、

资源性缺水以及管理性缺水问题的困扰^[16]。水资源安全问题已成为制约广东省经济社会可持续发展的重要因素之一,引起社会广泛关注与研究。向红梅^[17]研究发现广东省水旱灾害对区域水安全存在较大影响。陈充^[18]利用供水安全管理评价体系对广东省各市的供水安全管理能力进行评价,指出广东省水资源量地区分布不均,水质与经济发展密切相关。陶倩君等^[19]研究发现2000-2014年广东省水资源生态足迹呈上升趋势,水污染问题已成为影响广东省水资源可持续利用的关键因素。虽然近年来关于广东省水资源的研究不断增多,但主要集中在水资源量或生态环境等单一领域,并未考虑到广东省各区域间经济发展水平和生态环境状况存在较大差异的实际情况^[20-21],综合考虑水资源量、水生态环境及社会经济等对广东省水资源安全进行评价的研究较为欠缺。

本文基于广东省水资源安全现状,通过熵值法和层次分析法确定指标权重,构建水资源安全评价体系,对广东省水资源安全的影响因素进行综合评价与分析,以期丰富广东省水资源安全的研究内容,为广东省水资源的合理高效利用与可持续发展提供参考。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

广东省位于我国东南沿海地区(109°15'~117°20'E,20°09'~25°31'N),主要分为珠三角、粤东、粤西和粤北4个区域,下辖21个地级市。全省地势北高南低,北部以山地和丘陵为主,南部以平原和台地为主。气候类型为热带和亚热带季风气候,温暖湿润,降水量丰富,全省多年平均降水量1789.3 mm,降水时空分配不均,降水量年内与年际变幅较大,旱涝灾害频繁且严重^[20]。广东省水资源丰富并且水系发达,全省多年平均水资源总量 $1830 \times 10^8 \text{ m}^3$,主要河系有珠江的西江、东江、北江和三角洲水系、韩江水系以及粤东、粤西沿海诸河^[21]。

2.2 数据来源

本文收集了广东省2007-2016年的水资源数据和经济统计数据。数据主要来源于《全国城市建设统计年鉴》《广东省水资源公报》《广东省统计年

鉴》以及广东省各市的统计年鉴和公报。

在数据处理的过程中,由于某些地区与年份的数据有少量缺失,采用邻近年份的平均值进行填补。由于顺德区在2009年后才恢复地级市的管理权限,为保持数据一致性,仍将其划归为佛山市。

2.3 水资源安全评价指标选取

目前对水资源安全评价的研究角度主要集中在供需关系、与社会经济的关系及可持续发展与水生态安全等方面。本文主要参考刘斌涛等^[9]关于水资源安全评价体系的指标选取原则和考虑因素,选取水资源量、社会经济和水生态环境作为水资源安全评价指标。其中水资源量指数包括人均水资源量、产水模数、供水模数、人均蓄水量和水资源开发利用5个指数;社会经济指数包括人均用水量、万元GDP用水量、农村居民人均纯收入、耕地单产量和人均GDP5个指标。水生态环境指标包括森林覆盖率、废水排放总量、城市污水处理率、工业废水排放达标率及入河污水量5个指标。

2.4 水资源综合评价方法

采用多因子综合评价模型,综合评价广东省水资源安全状况,其表达式如公式(1)。

$$I = \sum_{i=1}^n (W_i I_i) / \sum_{i=1}^n W_i \quad (1)$$

式中: I 为水资源安全指数,指数愈大则水资源安全程度愈高; W_i 为评价因子的权重; I_i 为评价因子归一化指标值。

评价指标归一化的方法见公式(2)~(3)。

正向指标计算公式:

$$I_i = \frac{F_i - I_{\max}}{I_{\max} - I_{\min}} \quad (2)$$

负向指标计算公式:

$$I_i = \frac{I_{\max} - F_i}{I_{\max} - I_{\min}} \quad (3)$$

式中: F_i 为评价因子原始数值; I_{\max} 为评价因子的最大值; I_{\min} 为评价因子的最小值。

按照安全等级划分标准进行水资源安全评价,由于目前还没有统一的安全等级的划分方法,本研究以0.2为极差,将水资源安全综合指数划分为安全、较安全、一般安全、临界安全和不安全5个等级^[22],根据广东省水资源的分布特点,参考国内外有关文献^[14, 22-23],最终确定的15个指标对应的的水资源安全综合指数分级标准阈值见表1。

2.5 水资源安全评价权重确定

采用层次分析法(AHP)计算出各因子的权重,再采用熵值法对权重系数进行修正,修正方法如公式(4)^[22]。

$$r_j = v_j p_j / \sum_{j=1}^n (v_j p_j) \quad (4)$$

式中: p_j 为第 j 项的指标层权重; v_j 为第 j 项的信息权重; r_j 为修正后的权重系数。

广东省水资源安全评价指标体系及各指标权重见表2。

表1 水资源安全综合指数各指标分级标准阈值

指标层	安全等级				
	不安全	临界安全	一般安全	较安全	安全
废水年排放总量/ 10^4 t	50000 ~ 40000	40000 ~ 30000	30000 ~ 25000	25000 ~ 20000	20000 ~ 8000
工业废水排放达标率/%	0 ~ 60	60 ~ 70	70 ~ 80	80 ~ 90	90 ~ 100
城镇污水处理率/%	0 ~ 60	60 ~ 70	70 ~ 80	80 ~ 90	90 ~ 100
森林覆盖率/%	0 ~ 60	30 ~ 35	35 ~ 40	40 ~ 45	45 ~ 80
年入河污水量/ 10^8 t	25 ~ 20	20 ~ 15	15 ~ 10	10 ~ 5	5 ~ 0
人均水资源量/ m^3	0 ~ 500	500 ~ 1000	1000 ~ 1700	1700 ~ 2200	2200 ~ 3000
产水模数/ $10^4 (m^3 \cdot km^{-2})$	30 ~ 60	60 ~ 70	70 ~ 80	80 ~ 90	90 ~ 200
人均蓄水量/ m^3	0 ~ 50	50 ~ 100	100 ~ 200	200 ~ 400	400 ~ 600
水资源开发利用率/%	0 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 70	70 ~ 100	100 ~ 150
供水模数/ $10^4 (m^3 \cdot km^{-2})$	0 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 100
人均GDP/ 10^4 元	0.1 ~ 1	1 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 4	4 ~ 15
耕地单产/ $(kg \cdot hm^{-2})$	1 ~ 800	800 ~ 1500	1500 ~ 2000	2000 ~ 3000	3000 ~ 5000
农村居民人均年纯收入/元	0 ~ 5000	5000 ~ 10000	10000 ~ 15000	15000 ~ 20000	20000 ~ 30000
人均年用水量/ m^3	0 ~ 50	50 ~ 100	100 ~ 200	200 ~ 500	500 ~ 1000
万元GDP用水量/ m^3	0 ~ 24	24 ~ 140	140 ~ 610	610 ~ 1060	1060 ~ 2000

表 2 广东省水资源安全评价指标体系及各指标权重

目标层	准则层及权重	指标层	权重	指标影响
广东省 水资源 综合安 全指数	水生态安全环境指数 0.3264	废水年排放强度/ $10^4(t \cdot km^{-2})$	0.9491	负向
		工业废水排放达标率/%	0.0040	正向
		城镇污水处理率/%	0.0051	正向
		森林覆盖率/%	0.0111	正向
		年入河污水量/ $10^8 t$	0.0307	负向
	水资源量安全指数 0.3413	人均水资源量/ m^3	0.4770	正向
		产水模数/ $10^4(m^3 \cdot km^{-2})$	0.0087	正向
		人均蓄水量/ m^3	0.1010	正向
		水资源开发利用/%	0.0953	正向
		供水模数/ $10^4(m^3 \cdot km^{-2})$	0.3180	正向
	社会经济安全指数 0.3323	人均 GDP/ 10^4 元	0.7422	正向
		耕地单产量/ $(kg \cdot hm^{-2})$	0.0208	正向
		农村居民人均年纯收入/元	0.1537	正向
		人均年用水量/ m^3	0.0365	正向
		万元 GDP 用水量/ m^3	0.0468	正向

2.6 影响因素模型的建立

通过建立因素强度系数模型来定量分析各要素对水资源安全的影响程度,因素强度系数 D 的计算公式为:

$$D = \frac{\text{各影响因素归一化值}}{\text{水资源安全指数归一化值}} \quad (5)$$

若 $D \geq 1.30$, 则该因素为优势因素;若 $D \leq 0.70$, 则该因素为劣势因素;若 $0.70 < D < 1.30$, 则该因素为中等因素^[9]。在判断优势或劣势因素时,该因素在省内的排名情况能够体现出其影响强度,同时建立另外一个影响因素值 F , F 为归一化后的因素值。若 $F \geq 0.70$, 则该因素为优势因素;若 $0.30 < F < 0.70$, 则为中等因素;若 $F \leq 0.30$, 则该因素为劣势因素。综合考虑上述两方面,确定优劣因素判定准则如表 3 所示。

表 3 优、劣势因素判断准则

判断准则	类型
$D \geq 1.30$ 或 $F \geq 0.70$	优势因素
$0.70 < D < 1.30$ 或 $0.30 < F < 0.70$	中等因素
$D \leq 0.70$ 或 $F \leq 0.30$	劣势因素

3 结果分析

3.1 广东省水资源安全时间变化特征

2007 - 2016 年广东省水资源安全指数随时间

变化情况见图 1。图 1 表明,2007 - 2016 年广东省水资源安全指数始终介于 0.4 ~ 0.6 之间,变化趋势不显著,属一般安全等级;水生态安全指数由 2007 年的 0.642 波动下降至 2016 年的 0.546,从较安全下降为一般安全等级,水生态环境趋于恶化;社会经济安全指数除 2009 年有所下降外,由 2007 年的 0.441 上升至 2016 年的 0.716,从一般安全上升为较安全等级;水资源综合安全指数平均值为 0.56,总体呈波动上升趋势,属一般安全等级。

3.2 广东省水资源安全空间格局

人均水资源量可以作为水资源压力指数以度量区域水资源稀缺程度。根据 Falkenmark 等^[24]对人均水资源安全等级的划分标准计算出广东省各市人均水资源量等级,见图 2。由图 2 发现,广东省人均水资源量地区分布不均,珠三角核心区人均水资源量较为紧缺,特别是深圳市与东莞市已处于不安全等级。粤东的潮汕地区(汕头、潮州和揭阳 3 市)与粤西的湛江市人均水资源量存在短缺风险,其中汕头市属于不安全等级。

另外,广东省各市水资源安全综合评价结果见图 3。由图 3 可看出,2007 - 2016 年广东省 21 个地级市水资源综合安全指数均介于一般安全至较安全等级之间,属一般安全等级的共有 11 个市,属较安全等级的共有 10 个市。其中阳江市水资源安全指数最高,为 0.739,深圳市水资源安全指数最低,仅

为0.408,最高值约为最低值的1.8倍,广东省水资源安全状况地区差异显著。

除珠海市外,珠三角核心区的水资源均属一般安全等级,粤东的潮汕地区以及粤西的湛江市水资源属于一般安全等级,其余地区属较安全等级。广东省水资源安全指数分布格局与人均水资源量分布格局基本一致。在水资源量安全方面,珠海市、粤东的汕头市、潮州和揭阳3市以及粤西的湛江市水资源

量较为紧张,汕头市水资源量安全指数仅为0.324,排名倒数第1;而韶关、河源、梅州、阳江、云浮和江门市水资源量较为丰富。在水生态安全方面,除珠海市外,珠三角核心区的水生态环境均处于不安全至临界安全等级,其中广州市与佛山市水生态安全指数分别为0.023和0.031,位列全省倒数第1和第2。珠三角核心区社会经济安全指数最高,而粤东地区的汕尾市和梅州市社会经济安全指数最低。

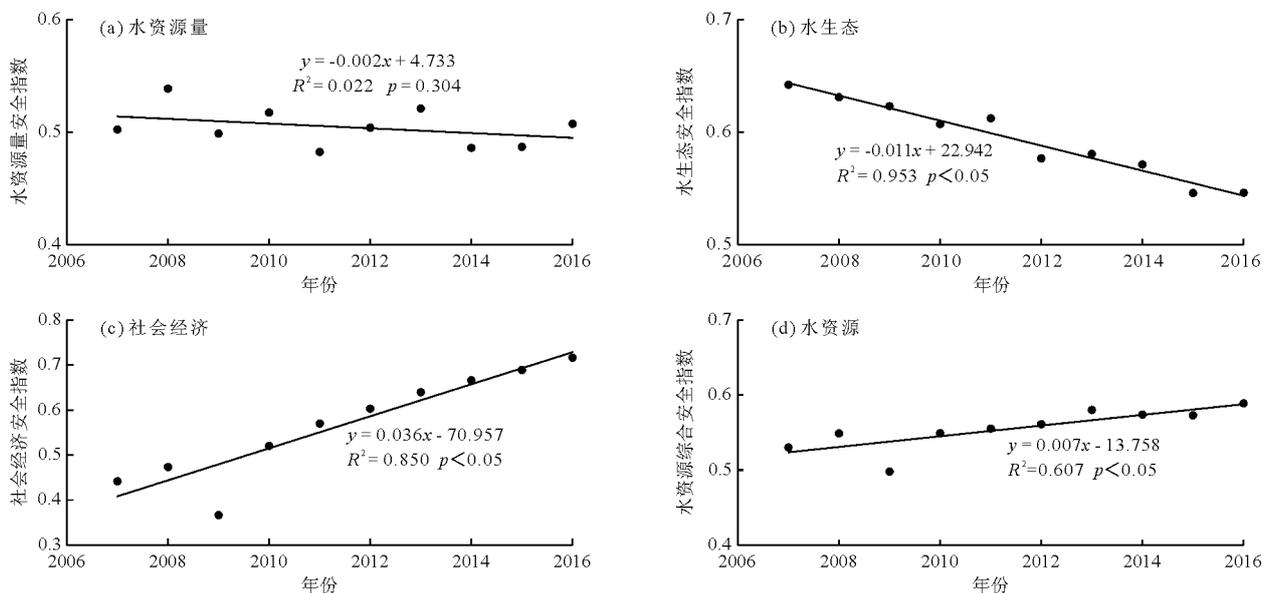


图1 2007-2016年广东省水资源安全指数时间变化

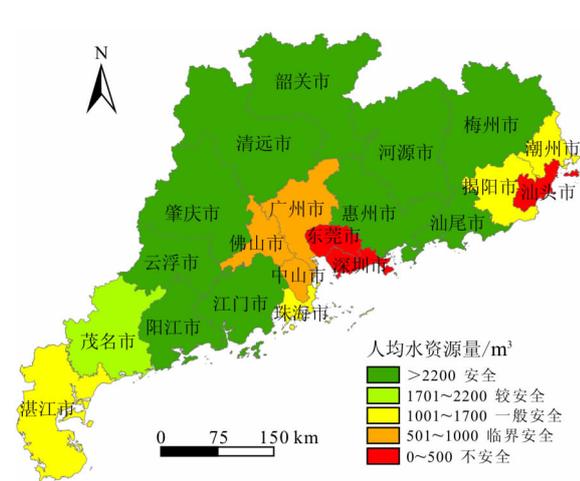


图2 2007-2016年广东省各市人均水资源量分布

采用最小二乘法拟合广东省各市水资源安全指数的斜率,用以综合反映水资源安全的时空变化特征,结果见图4。图4表明,2007-2016年广东省各地市水资源量安全指数整体变化趋势不明显,梅州市水资源量安全指数有所上升,而江门市、东莞市、汕尾市和中山市则有所下降;在水生态安全指数上,

珠三角核心区的广州市、东莞市和深圳市水生态环境有所改善,但仍有10个市的水生态安全指数呈现下降态势;除江门市和东莞市外,2007-2016年广东省各地市社会经济安全指数不断提高,社会经济不断向前发展;在水资源安全指数上,韶关市和阳江市上升最快,水资源安全状况持续改善,但茂名市的水资源安全指数却呈现下降趋势。

3.3 水资源安全影响因素

广东省水资源安全优、劣势影响因素分析结果见表4。结果表明,珠三角核心区水资源安全的优势因素为社会经济,而劣势因素为水生态,粤东、粤西、粤北以及珠三角外围区的优势因素为水资源量和水生态,劣势因素为社会经济。整体而言,广东省水资源安全影响因素呈现明显的地区差异。

4 讨论

本文研究结果(图1)表明,2007-2016年广东省水资源量基本保持平稳,社会经济快速发展,水资源安全指数不断提高,但水生态安全指数呈显著下

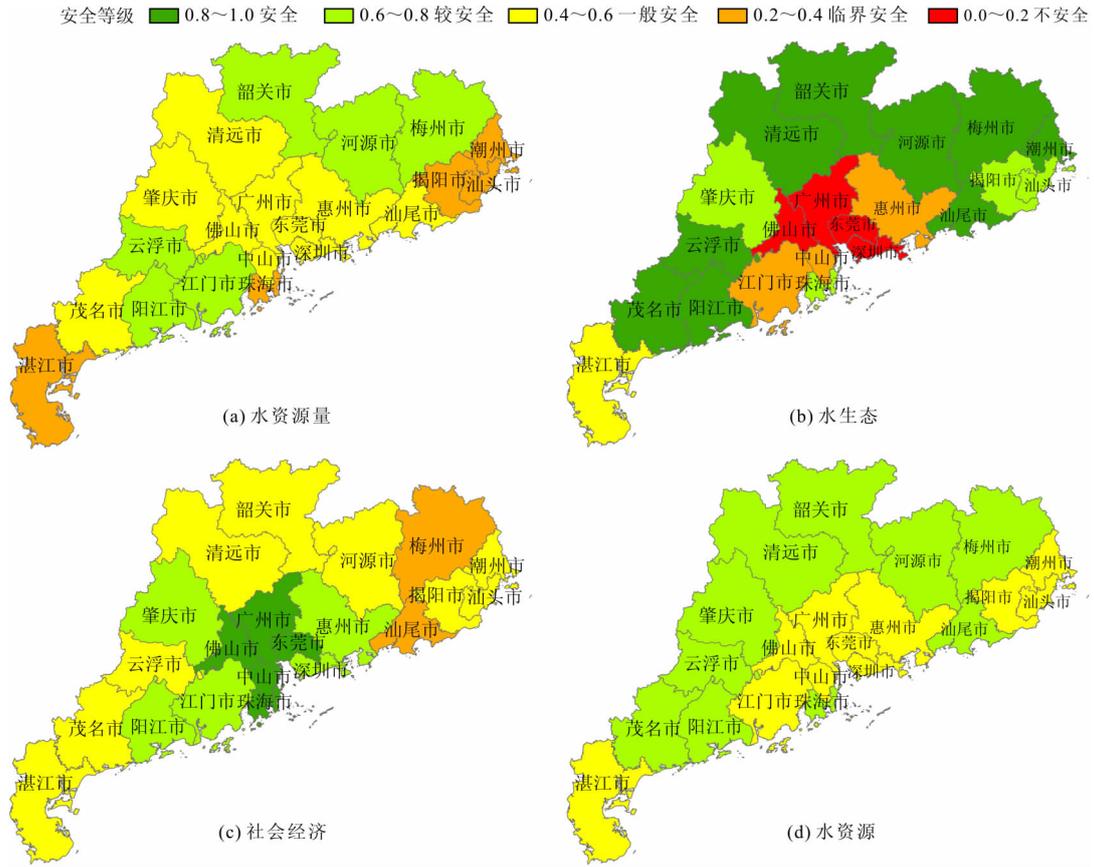


图 3 2007 - 2016 年广东省各市水资源安全评价

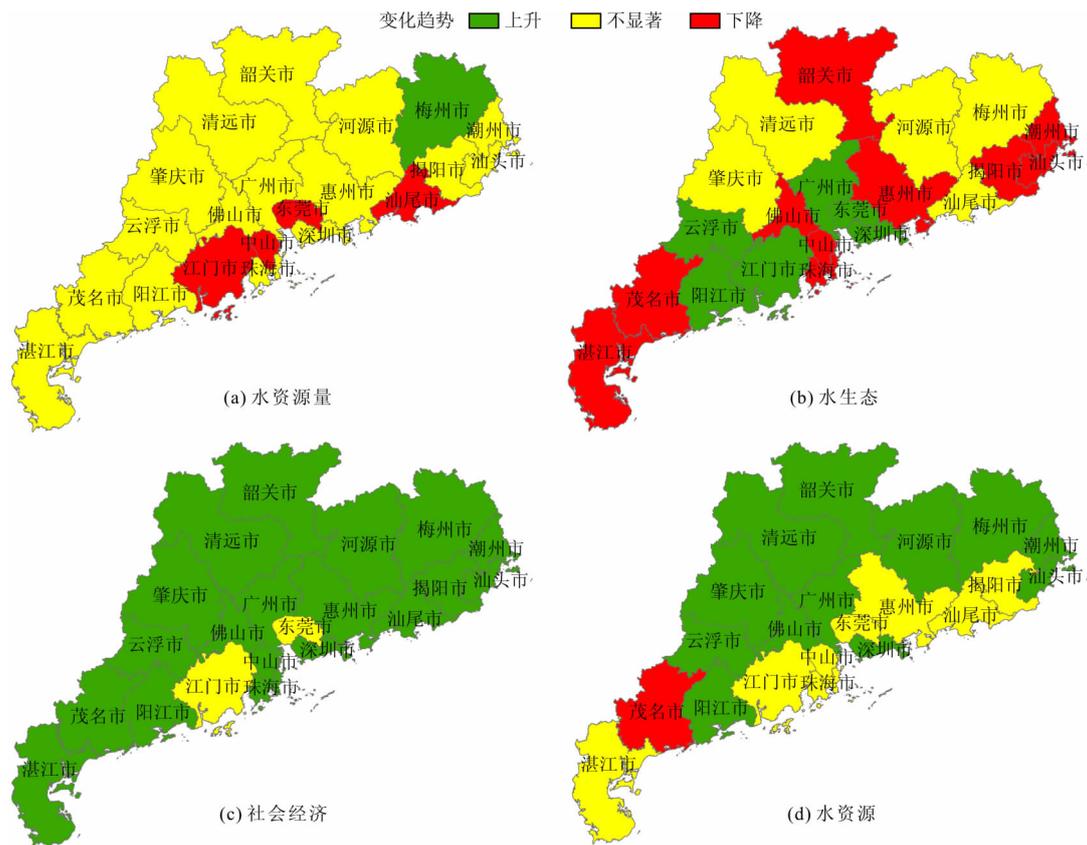


图 4 2007 - 2016 年广东省水资源安全指数空间变化 ($p < 0.05$)

表4 广东省水资源安全优、劣势影响因素分析

分区	市	劣势因素	优势因素
珠三角核心区	广州市	水生态	水资源量, 社会经济
	深圳市	水生态	社会经济
	珠海市	水资源量	水生态, 社会经济
	佛山市	水生态	水资源量, 社会经济
	东莞市	水资源量, 水生态	社会经济
	中山市	水生态	水资源量, 社会经济
粤东	汕头市	水资源量, 社会经济	水生态
	梅州市	社会经济	水资源量, 水生态
	汕尾市	社会经济	水生态
	潮州市	水生态	水资源量, 社会经济
	揭阳市	水资源量, 社会经济	水生态
粤西	阳江市	社会经济	水生态, 水资源量
	湛江市	水资源量, 社会经济	水生态
	茂名市	社会经济	水生态
珠三角外围及粤北地区	云浮市	社会经济	水资源量, 水生态
	韶关市	社会经济	水资源量, 水生态
	河源市	社会经济	水资源量, 水生态
	惠州市	水资源量, 社会经济	水生态
	江门市	水生态	水资源量
	肇庆市	社会经济	水资源量, 水生态
	清远市	社会经济	水资源量, 水生态

降态势。对比2007-2016年广东省社会经济安全和水资源安全指数的变化趋势可看出, 社会经济发展水平是促进广东省水资源安全提高的基础。社会经济发展提高了水资源的利用率, 改善了广东省在水量或水质层面的供水能力^[18], 水资源安全指数持续上升, 但与此同时, 广东省需水量和排污量随之增加, 水生态环境趋向恶化, 水资源压力增大^[19]。

另外, 研究结果还发现广东省水资源安全形势空间差异显著(图3), 尤其是珠三角核心区的水资源安全形势不容乐观, 其中深圳市和东莞市的水资源安全指数最低。虽然珠三角地区社会经济发达, 但水资源量和水生态环境是影响其水资源安全的劣势因素。已有研究指出珠三角核心区水资源承载力较低, 城市现有的社会经济指标与水资源利用匹配性较差, 容易出现水资源短缺的现象^[25]。此外, 粤东的潮汕地区和粤西的湛江市水资源安全指数也较低, 造成该区域水资源安全问题的主要原因有两个: 一是水资源量稀缺。汕头市与湛江市水资源量安全

指数在广东省分列倒数第1与倒数第3。虽然粤东地区水资源总量较大, 但人口高度集中, 经济社会发展需求超过水资源的承载能力^[19], 而粤西的湛江市过境径流多, 地表水资源废弃量大, 且干旱出现频率高, 持续时间长, 水资源较为脆弱^[26]; 二是社会经济水平较低, 经济发展模式较为粗放。该区域的社会经济发展水平排名大都处于全省的中下水平, 尤其是粤东地区高耗能污染企业多, 基础设施建设滞后, 综合治理能力弱^[27], 湛江市所处的雷州半岛水资源调节性能很差, 供水状况不平衡, 水资源开发利用程度不高^[28]。

整体来看, 广东省水资源安全状况与区域社会经济发展水平不协调, 经济相对发达的珠三角核心区、粤东和粤西沿海地区水资源安全形势更为严峻。根据《广东省生态环境监测“十三五”规划》^[29]中对广东省主体功能区的划分, 珠三角地区为国家优先开发区, 粤西与粤东的沿海地区为国家重点开发区, 而粤北地区为国家和省级的生态功能区, 未来社会经济发展将带来更大的水资源压力。因此, 珠三角、粤东及粤西两翼未来的发展应该更加注重对水资源的合理利用, 提高水资源利用效率、减少水污染、保护当地的水生态环境, 避免因水资源短缺而制约经济社会发展, 粤北地区应继续加强对水源地的保护, 发展绿色产业, 促进生态与经济效益双丰收。

5 结 论

本文采用熵值法和层次分析法构建了广东省水资源安全评价体系, 并综合分析了2007-2016年全省水资源安全状况, 结果表明:

(1) 2007-2016年广东省水资源综合安全指数平均值为0.56, 始终介于0.4~0.6之间, 属于一般安全等级。水资源量变化趋势不显著, 水资源和社会经济安全指数稳步提升, 但水生态安全指数呈现下降趋势。

(2) 广东省水资源安全指数空间分异明显, 珠三角核心区、粤东的潮汕地区及粤西的湛江市水资源安全等级较低, 水资源量安全指数较高的区域集中在珠三角外围及粤北地区, 珠三角核心区的水生态指数较低, 社会经济安全指数由珠三角核心区向外围逐步递减。

(3) 广东省水资源安全影响因素存在区域差异, 珠三角地区水资源安全的优势因素为社会经济, 劣势因素为水生态环境, 而粤东、粤西及粤北地区的优势因素为水资源量与水生态环境, 劣势因素为社

会经济。

综合来看,广东省水资源安全状况与区域经济发展程度不匹配,经济相对发达的珠三角核心区、粤东和粤西沿海地区水资源安全形势较为严峻,广东省在发展社会经济的同时要加强对水资源管理和保护,在提高水资源利用效率的同时改善水生态环境,避免使水资源成为制约社会经济发展的阻碍因素。

参考文献:

- [1] 李原园,曹建廷,黄火键,等. 国际上水资源综合管理进展[J]. 水科学进展,2018,29(1):127-137.
- [2] HUANG Yajing, XU Linyu, HAO Yin. Dual-level material and psychological assessment of urban water security in a water-stressed coastal city [J]. Sustainability, 2015,7(4):3900-3918.
- [3] LI Bo, WU Qiang, CHEN Lixia. An analytical method of regional water resources carrying capacity in karst area - a case study in Guizhou Province, China [J]. Water Practice and Technology, 2016,11(4):796-805.
- [4] 郑炜. 基于三角模型的城市水资源安全动态评价——以广州市为例[J]. 水资源与水工程学报, 2018,29(5):68-73+80.
- [5] OLLI V, MARKO K, MATTI K. Four dimensions of water security with a case of the indirect role of water in global food security [J]. Water Security, 2017,1:36-45.
- [6] DONG G, SHEN J, JIA Y, et al. Comprehensive evaluation of water resource security: a case study from Luoyang City, China [J]. Water, 2018,10(8):1106.
- [7] 石卫,夏军,李福林,等. 山东省流域水资源安全分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2016,49(6):801-805+817.
- [8] 贾绍凤,张军岩,张士锋. 区域水资源压力指数与水资源安全评价指标体系[J]. 地理科学进展, 2002,21(6):538-545.
- [9] 刘斌涛,陶和平,孔博,等. 云南省水资源时空分布格局及综合评价[J]. 自然资源学报,2014,29(3):454-465.
- [10] 张自英,潘万贵,黄涛,等. 水资源安全综合评价与预测——基于浙江省台州市实证分析[J]. 水资源与水工程学报, 2017,28(4):70-74.
- [11] 彭涛,秦振雄. 基于集对分析与可变模糊集的城市水资源安全评价[J]. 人民长江, 2019,50(5):88-93+112.
- [12] 曾佩,傅琼华,皮家骏. 基于物元法的江西省水资源安全评价[J]. 水电能源科学, 2019,37(4):21-24.
- [13] 赵军凯,李九发,戴志军,等. 基于熵模型的城市水资源承载力研究——以开封市为例[J]. 自然资源学报, 2009,24(11):1944-1951.
- [14] 龚巧灵,官冬杰. 基于BP神经网络的三峡库区重庆段水资源安全评价[J]. 水土保持研究,2017,24(6):292-299.
- [15] 黄爱华,裴伟. 广东水资源管理问题的思考与对策[J]. 特区经济,2011(1):242-243.
- [16] 朱一中,吴克昌. 广东省水资源可持续利用与管理研究[J]. 华南理工大学学报(社会科学版),2006,8(5):39-43.
- [17] 向红梅. 区域水安全评价指标体系的构建与应用研究[D]. 广州:暨南大学,2011.
- [18] 陈充. 广东省城市供水安全评价[D]. 广州:华南理工大学,2015.
- [19] 陶倩君,郭程轩. 广东省水资源生态足迹的定量评价及其影响因素[J]. 水资源保护,2018,34(2):28-33.
- [20] 陈子燊,黄强,刘曾美. 1962-2007年广东干湿时空变化特征分析[J]. 水科学进展,2013,24(4):469-476.
- [21] 广东省水利厅. 水资源概况[EB/OL]. (2015-07-30)[2019-01-11]. http://www.gdwater.gov.cn/yszx/ysgk/sxyszy/szy/201804/t20180412_303660.shtml.
- [22] 鲍超,邹建军. 基于人水关系的京津冀城市群水资源安全格局评价[J]. 生态学报,2018,38(12):4180-4191.
- [23] LIU L, GUAN D, YANG Q. Evaluation of water resource security based on an MIV-BP model in a karst area [J]. Water, 2018, 10(6):786-803.
- [24] FALKENMARK M, LUNDQVIST J, WIDSTR AND C. Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches [J]. Natural Resources Forum, 1989,13(4):258-267.
- [25] 谢小康,陈俊合,刘树锋. 广东省水资源承载力力量化研究[J]. 热带地理,2006,26(2):108-113.
- [26] 何春林. 雷州半岛农业水资源脆弱性研究[J]. 国土与自然资源研究,2015(2):48-51.
- [27] 李兴荣,刘志敏,冯景泽,等. 对粤东地区水资源保护的调查与思考[J]. 水利发展研究,2015,15(2):46-49.
- [28] 张国桃. 湛江水资源可持续发展存在的问题及对策[J]. 广东水利水电,2011(S1):42-44.
- [29] 广东省环境保护厅. 广东省生态环境监测“十三五”规划[EB/OL]. (2017-03-08)[2019-01-11]. http://www.gdep.gov.cn/hbgh/ghjh/201703/t20170308_220867.html.