

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.03.022

基于SDGs的广东省水资源可持续性评价

宋松^{1,2}, 吴志峰^{1,2}, 程利分¹, 谢玉凤¹

(1. 广州大学地理科学与遥感学院, 广东 广州 510006; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458)

摘要:围绕SDGs水资源相关目标,构建了本土化水资源综合可持续性评价指标体系,采用熵权法对广东省及其21个地级市水资源可持续发展水平进行了综合评价,并分析了广东省水资源可持续性的现状及历史演变。研究表明:2010—2019年广东省水资源综合可持续性缓慢提升,可持续性时空差异、目标差异均十分明显,珠三角核心区水资源综合可持续性较高,粤东及粤西地区较低;生态环境系统对可持续性支撑度最高,其次为水资源系统与效率系统,公平系统支撑度最低;供水、蓄水能力的改善及水资源利用效率的不断提升促进了水资源综合可持续性的提升,水生态退化、水环境恶化、水资源空间失衡等因素是水资源综合可持续发展的最主要限制因素;用水效率提升目标(SDGs6.4)可持续性最高,水质改善目标(SDGs6.3)、水生态恢复目标(SDGs6.6)及淡水生态系统保护目标(SDGs14.1)可持续性明显落后,水资源综合管理能力提升目标(SDGs6.5)及陆地生态环境修复目标(SDGs15.1)可持续性尚可,水资源综合可持续性呈现效率优势与“水质-污染-水生态”劣势并存的态势。

关键词:水资源系统;SDGs;可持续评价;时空变迁;广东省

中图分类号:TV213 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)03-0179-09

Water resources sustainability evaluation in Guangdong Province based on SDGs// SONG Song^{1,2}, WU Zhifeng^{1,2}, CHENG Lifan¹, XIE Yufeng¹ (1. School of Geography and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Guangzhou 511458, China)

Abstract: Focusing on water resources related sustainable development goals (SDGs), a localized water resources sustainability evaluation index system was constructed, and the entropy weight method was used to evaluate the sustainable development level of water resources in Guangdong Province and its 21 prefecture-level cities. Then, the current situation and historical evolution of water resources sustainability in Guangdong Province were analyzed. The results show that the water resources comprehensive sustainability in Guangdong Province increased slowly from 2010 to 2019, with obvious differences of sustainability in time, space, and goals, and the sustainability was high in the core region of the Pearl River Delta, but low in eastern and western Guangdong Province; the ecological environment system had the highest support for sustainability, followed by the water resources system and efficiency system, and the equity system had the weakest influence; the improvement of water supply and storage capacity, as well as the continuous improvement of water resources utilization efficiency, promoted the enhancement of water resources sustainability, while water ecological degradation, water environment deterioration, and spatial imbalance of water allocation tended to be the most important limiting factors of water resources sustainable development. In addition, the water-use efficiency goal (SDGs6.4) had the highest sustainability, the water quality improvement goal (SDGs6.3), water ecological restoration goal (SDGs6.6), and freshwater ecosystem protection goal (SDGs14.1) obviously lagged behind, and the goals of integrated water resources management improvement (SDGs6.5) and terrestrial ecological environment restoration (SDGs15.1) were at an intermediate level. In general, water resources comprehensive sustainability was characterized by the coexistence of efficiency advantage and integrated disadvantage of water quality, pollution, and ecology.

Key words: water resources system; SDGs; sustainability evaluation; spatial-temporal variation; Guangdong Province

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42271311);中国工程科技发展战略广东研究院重点咨询项目(2021-GD-04);广东省自然科学基金面上项目(2020A1515011065);广东省青年珠江学者资助项目(2019);国家自然科学基金委-广东联合基金重点项目(U1901219)

作者简介:宋松(1985—),女,副教授,博士,主要从事变化环境下的水文与水资源响应研究。E-mail:geosong@gzhu.edu.cn

通信作者:吴志峰(1969—),男,教授,博士,主要从事资源环境遥感研究。E-mail:zfwu@gzhu.edu.cn

水资源系统是一个多目标、多层次的非线性开放系统,反映了水资源-经济社会-生态环境复杂系统的交互过程与互馈机理^[1-3]。如何在气候变化等不利自然因素及强烈人类活动等人为因素的干扰下实现水资源可持续发展是全人类面临的重大问题^[4-6]。实现传统水资源利用模式向水资源可持续利用模式的转变,形成一种兼顾“人-水”关系、“生活-生产-生态用水”关系的良性利用模式成为水资源研究及实践的重要方向。水资源可持续利用研究涵盖了水资源数量^[7-9]、质量^[10]、效率^[11]、价值^[12]、承载力^[13-15]、生态安全^[16-18]等众多方面,研究方法从早期的聚类分析^[19]、因子分析^[20]、主成分分析^[21]等统计方法延伸到包含集对分析^[22]、物元分析^[23]、灰色模型^[24]等系统方法,又借鉴了新兴的神经网络^[25]、随机森林^[26]等人工智能评价方法;研究方向上,各级时空尺度下的水资源可持续利用水平、时空动态、差异对比及驱动力探究广泛开展,大量研究结果对水资源可持续利用的战略布局与对策探索发挥了引导作用^[11,27-29]。水资源评价指标体系的构建是拓展水资源系统可持续发展内涵的重要手段,针对水足迹、“压力-状态-响应”(pressure-state-response,PSR)或“驱动力-压力-状态-影响-响应”(driving force-pressure-state-impact-response,DPSIR)等逻辑框架建立的评价指标体系应用广泛^[30-31],但由于研究视角的多样、学科背景的差异及可持续发展理念的更新,水资源可持续性框架体系构建、子系统互动刻画及可持续状态评判方面仍有较大的不确定性。

2015 年联合国可持续发展峰会提出的《改变我们的世界——2030 年可持续发展议程》汇聚全球共识,提出 17 项可持续发展目标(sustainable development goals,SDGs),其中第 3、6、14 及 15 条目标聚焦不断恶化的淡水资源及水生态系统,倡导水资源管理方式的转变及用水效率的提升,推动水资源综合管理,促进区域水资源综合可持续性不断增强。由于水资源系统的时空复杂性及差异性,如何建立本土化、系统化的 SDGs 指标体系,开展水资源可持续发展的跟踪评估,为 SDGs 的实现提供有力保障,是目前面临的重要挑战之一。本文围绕 SDGs 水资源相关目标,构建水资源综合可持续性评价指标体系,采用熵权法对广东省及其 21 个地级市水资源可持续发展水平进行综合评价,明确各地区面临的水资源问题和改进方向,以期为地方政府制定切实可行的水资源可持续发展战略提供参考。

1 研究区概况

广东省地处中国东南沿海,经济规模与综合竞争力连续多年位居全国第一。广东省地势北高南低,平原、台地、丘陵、山地等地貌类型广布,星罗棋布的坑塘湖库与纵横交错的河涌水道造就了复杂的水系格局,由西江、东江、北江三江汇流而成的珠江水系为广东省最大水系(图 1)。广东省人均水资源量不足 1700 m³,低于全国平均水平近 20 个百分点。支撑全省半数人口及 80% 经济总量的珠三角地区,水资源仅占全省不足 1/3,水资源分布重心与社会经济重心偏离。近年来,珠三角核心城市迅速扩张,耕地、林地大规模萎缩,建设用地大幅增长(图 2),生态系统萎缩,环境自净能力下降,用水量及污染排放量逐年上升^[32]。用水量大、耗水量大、产污量大、利用率低成为长期以来困扰广东省水资源利用的突出问题,水资源管理落后、资源浪费、污水处理不当等现象广泛存在。在水资源时间分配不均、空间分布失衡与国家级战略不断推进、人口持续流入的多重背景下,广东省资源性缺水、水质性缺水、工程性缺水以及管理性缺水问题将长期并存,并进一步加剧,严重威胁广东省自然、经济与社会复合系统的可持续发展。

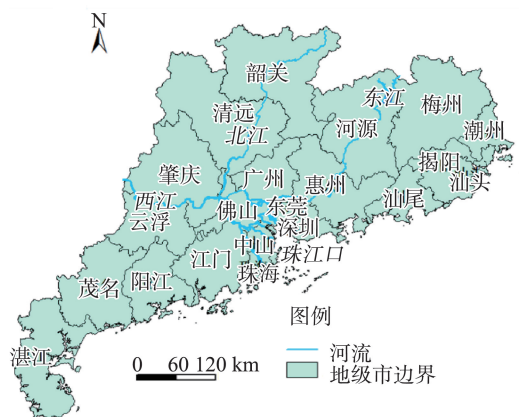


图 1 广东省行政区划

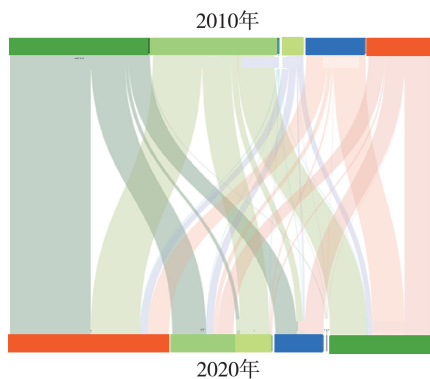
Fig. 1 Administrative districts in Guangdong Province

2 研究方法

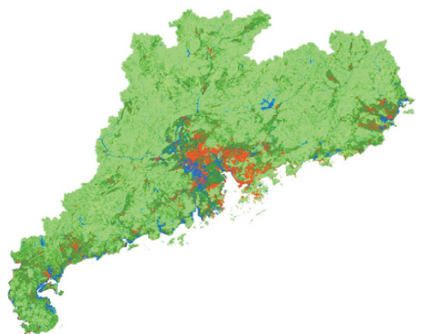
2.1 水资源综合可持续性评价指标体系构建

2.1.1 指标对接与本土化原则

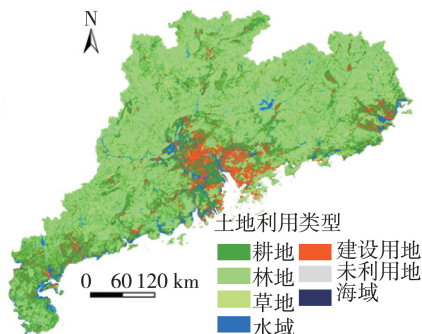
本研究框架如图 3 所示。本着数据可达、深度挖掘、代表性高、覆盖性广等原则,围绕 SDGs 第 3、6、14 及 15 条目标中的水资源相关导则,综合考虑广东省水资源开发利用基本情况,通过目标达成度及数据可获取性调查,对于部分提前实现 SDGs 的条目不再进行指标选取,对于尚未实现 SDGs 的条目,基于以上原则,开展指标筛选、配对、优化、改进



(a) 2010—2020 年土地利用转移



(b) 2010 年土地利用覆被



(c) 2020 年土地利用覆被

图 2 广东省土地利用变化

Fig. 2 Land use change in Guangdong Province

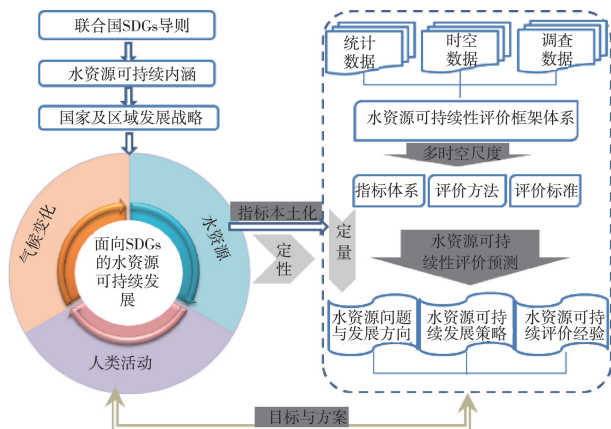


图 3 研究框架

Fig. 3 Research framework

及替代,最终实现广东省水资源可持续性评价本土化指标与联合国指导指标的对接,如表 1 所示。

2.1.2 指标体系

根据 SDGs 内涵及水资源可持续性评价指标的本土化细则(表 1),参照前人研究成果^[11-14],从自然、经济及社会 3 个方面,选取水资源、生态环境、经济发展、效率、社会发展、公平等 6 个系统,39 项指标构建了广东省水资源综合可持续性评价指标体系,如图 4 所示,括号中为各指标的权重。其中农业、工业及服务业用水均衡用万元 GDP 用水量与区

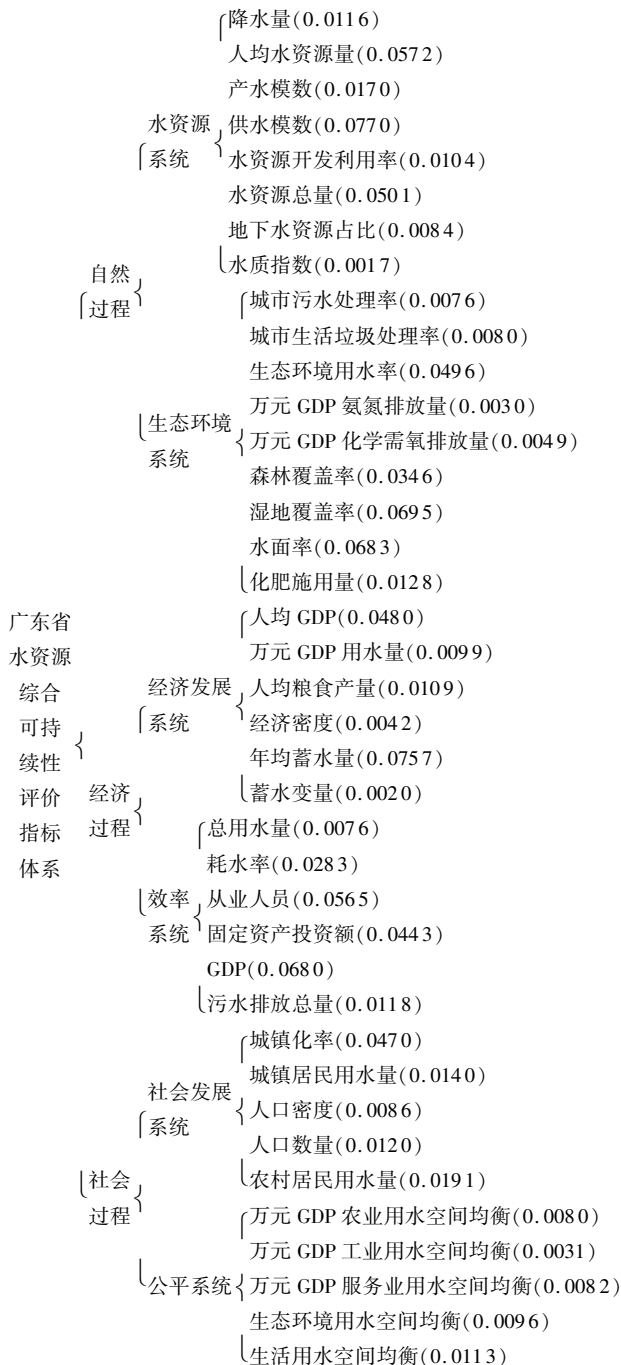


图 4 广东省水资源综合可持续性评价指标体系

Fig. 4 Water resources comprehensive sustainability evaluation index system of Guangdong Province

表 1 水资源综合可持续性评价指标本土化及其与联合国指导指标的对接

Table 1 Localization of water resources comprehensive sustainability evaluation indexes and their matching with guideline indexes of the United Nations

SDGs 目标	目标内容	联合国指导指标	达成度及可获取性	本土化指标
3. 良好健康与福祉	3.9 大幅减少危险化学品、空气、水和土壤污染造成的死亡和疾病数量	不安全饮用水、不安全卫生和缺乏卫生设施导致的死亡率	已达成	
6. 清洁用水与卫生设施	6.1 人人可公平获得安全和负担得起的饮用水	安全管理饮用水覆盖人口占比	已达成	
	6.2 人人享有适当和公平的环境卫生和个人卫生,杜绝露天排便,特别注意满足妇女、女童和弱势群体在此方面的需求	安全管理的卫生服务人口占比	已达成	
	6.3 通过以下方式改善水质:减少污染,消除倾倒废物现象,把危险化学品和材料的排放减少到最低限度,将未经处理废水比例减半,大幅增加全球废物回收和安全再利用	污水处理率	需改进直接数据	城市污水处理率、城市生活垃圾处理率
		水质优良率	需改进间接数据	水质指数(-)
	6.4 所有行业大幅提高用水效率,确保可持续取用和供应淡水,以解决缺水问题,大幅减少缺水人数	用水效率变化	需改进间接数据	耗水率(-)、总用水量(-)、从业人员、固定资产投资额、GDP;污水排放总量(-)
		用水紧张程度	需改进间接数据	人均水资源量、产水模数、供水模数、水资源开发利用(-)、万元 GDP 用水量(-)
	6.5 在各级进行水资源综合管理,包括酌情开展跨境合作	水资源综合管理实施程度	需改进间接数据	城镇居民用水量(-)、农村居民用水量(-)、水资源总量、人均 GDP、蓄水变量(-)
		有跨流域水合作计划的流域面积占比	需改进间接数据	万元 GDP 农业用水空间均衡(-)、万元 GDP 工业用水空间均衡(-)、万元 GDP 服务业用水空间均衡(-)、生态环境用水空间均衡(-)、生活用水空间均衡(-)
14. 水下生物	6.6 保护和恢复与水有关的生态系统,包括山地、森林、湿地、河流、地下含水层和湖泊	水生生态系统时间变迁	需改进间接数据	降水量、生态环境用水率、年均蓄水量、人口密度(-)、地下水资源占比(-)
		沿海富营养化指数与漂浮塑料垃圾密度	无数据	万元 GDP 氨氮排放量(-)、万元 GDP 化学需氧排放量(-)、化肥施用量(-)、人均粮食产量(-)、人口数量(-)、经济密度(-)
15. 陆地生物	15.1 根据国际协议规定的义务,保护、恢复和可持续利用陆地和内陆的淡水生态系统及其服务,特别是森林、湿地、山麓和旱地	林地占比	需改进部分年份直接数据	森林覆盖率
		重点生态用地占比	需改进部分年份直接数据	湿地占比、水面率、城镇化率(-)

注:(-)表示负向指标,即与可持续性得分成反比,该值越大,可持续性得分越低;其余均为正向指标。

域面积的比值表征,而生态环境及生活用水均衡则用生态环境用水量及生活用水量与区域面积的比值表征。数据来源于广东省统计年鉴、水资源公报、广东省多时期土地利用覆被数据集等资料。

2.2 水资源综合可持续性分值计算

本文基于熵权法对水资源综合可持续性分值进行计算。熵权法是一种客观赋权法,现已广泛应用于可持续发展评价及社会经济等研究领域。在由 n 个待评价方案、 m 个评价指标、 t 个待评价单元所构成的指标数据矩阵 $\mathbf{X} = (x_{ijd})_{n \times m \times t}$ 中,数据的离散程度越大,信息熵越小,其提供的信息量越大,指标对综合评价的影响越大,其权重也应越大,反之亦然^[33-34]。用熵权法确定指标权重,可有效解决多指标变量间信息的重叠问题。水资源综合可持续性分值计算过程如下:

a. 对数据进行标准化处理,处理结果介于 0 ~ 1 之间。为了消除 0 值对于后续计算的影响,对所有标准化的数据向右平移 0.1 个单位:

$$x'_{ijd} = \begin{cases} \frac{x_{ijd} - x_{j,\min}}{x_{j,\max} - x_{j,\min}} + 0.1 & \text{正向指标} \\ \frac{x_{j,\max} - x_{ijd}}{x_{j,\max} - x_{j,\min}} + 0.1 & \text{负向指标} \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_{ijd} 为第 i 年评价指标 j 的第 d 个评价单元的原始数据; x'_{ijd} 为标准化后的数据值; $x_{j,\max}$ 、 $x_{j,\min}$ 分别为评价指标 j 的最大值和最小值。

b. 计算第 d 个评价单元的评价指标 j 第 i 年所占比例:

$$P_{ijd} = \frac{x'_{ijd}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ijd}} \quad (2)$$

c. 计算第 d 个评价单元的评价指标 j 的熵权:

$$e_{jd} = k \sum_{i=1}^n p_{ijd} \ln p_{ijd} \quad (3)$$

式中 k 为常数, k 与样本数 n 有关, 一般令 $k = 1/\ln n$ 。

d. 计算第 d 个评价单元的评价指标 j 的权重:

$$w_{jd} = \frac{1 - e_{jd}}{\sum_{j=1}^m (1 - e_{jd})} \quad (4)$$

e. 计算第 i 年第 d 个评价单元水资源综合可持续性得分:

$$S_{id} = \sum_{j=1}^m w_{jd} p_{ijd} \quad (5)$$

3 结果与分析

3.1 水资源可持续发展现状分析

2019 年广东省水资源综合可持续性得分为 0.44, 属中等水平。其中, 自然过程对水资源综合可持续性贡献最高, 占比达 51%, 经济过程与社会过程分别贡献 30% 与 19%。从系统角度来看, 水资源系统对综合可持续性支撑度最高, 可持续性得分为 0.12; 其次为生态环境系统, 可持续性得分 0.10; 效率系统较经济发展与社会发展系统支撑度高, 三者可持续性得分分别为 0.07、0.06 与 0.05; 公平系统对水资源综合可持续性支撑度最低, 可持续性得分仅为 0.03。从各城市可持续性水平来看, 以广州、深圳为代表的珠三角核心城市, 水资源综合可持续性得分最高, 超过 0.6, 约为广东省平均水平的 1.25 倍; 佛山、东莞、珠海、中山等珠三角边缘城市水资源综合可持续性得分在 0.5~0.6 之间, 上述 6 市水资源可持续发展水平属于高等级; 汕尾、茂名、潮州、揭阳、梅州、湛江、云浮等 7 市水资源综合可持续性得分在 0.4 以下, 可持续发展水平较低; 其余城市水资源可持续发展水平中等, 水资源综合可持续性得分在 0.4~0.5 之间(表 2)。

表 2 2019 年各城市水资源综合可持续性得分

Table 2 Scoring of water resources comprehensive sustainability of each city in 2019

城市	得分	城市	得分	城市	得分
深圳	0.65	河源	0.47	汕尾	0.39
广州	0.64	惠州	0.46	茂名	0.39
佛山	0.58	清远	0.45	潮州	0.39
珠海	0.55	韶关	0.44	揭阳	0.38
东莞	0.54	汕头	0.43	梅州	0.38
中山	0.53	肇庆	0.42	湛江	0.36
江门	0.47	阳江	0.41	云浮	0.35

从空间分布来看, 2019 年广东省水资源综合可持续性及各子系统可持续性水平空间差异较大, 水

资源综合可持续性较高的区域集中在珠三角核心区, 粤北及珠三角外围区域水资源综合可持续性处于中等水平, 而粤西及粤东大部分区域水资源综合可持续性较低(图 5)。从各子系统来看, 水资源自然过程可持续性较高的区域主要位于珠江口西岸及北江中下游区域, 粤西地区水资源自然过程可持续性较低; 水资源经济过程可持续性以经济增长较快的广州、佛山、深圳 3 市最高, 除珠三角及汕头、河源、茂名市以外的区域, 水资源经济过程可持续性均较低; 水资源社会过程可持续性空间差异较小, 生态环境较好、人口较少的粤北地区水资源社会过程可持续性较高。

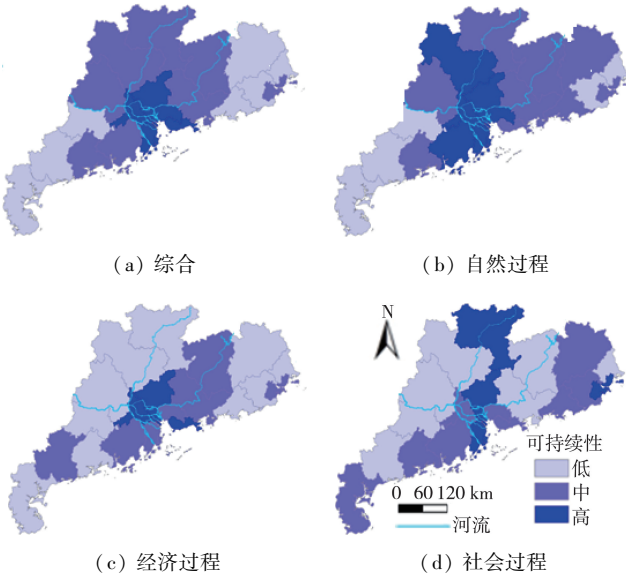


图 5 广东省水资源可持续性水平空间格局

Fig. 5 Spatial patterns of water resources sustainability in Guangdong Province

广东省是我国工业大省和经济第一大省, 也是人口大省。改革开放以来, 催生了大量人口密集、工业集中的珠三角超级都市群, 导致在本地污染排放极高的同时, 还需接纳上游向下输移的污染负荷, 区域水环境压力较大^[35-37]。因此, 珠三角核心城市的水资源综合可持续性虽然较高, 但水质及污染物排放是水资源可持续发展的潜在威胁。随着粤港澳大湾区战略的深入推进, 人口和经济规模迅速增长对水资源数量和质量的需求将进一步提升, 不断加剧的气候变化使区域来水量不确定性加大, 尤其在枯水季节及偏枯年份, 过境水减少, 咸潮上溯加剧, 水资源需求矛盾十分尖锐。鉴于此, 广东省要高度重视节水减排、污染防治、水资源配置等工作, 为水资源可持续发展提供有力保障^[38]。

3.2 水资源可持续性时间演变分析

2010—2019 年广东省水资源综合可持续发展水平呈现波动上升的趋势, 综合可持续性得分由

2010 年的 0.40 上升到 2019 年的 0.44, 上升幅度约为 8.81%; 水资源自然过程可持续性水资源综合可持续性发展趋势类似, 总体呈略增趋势, 波动性十分明显, 增长幅度较综合可持续性小; 水资源经济过程与社会过程可持续性稳步提升, 促进了水资源综合可持续性的增长, 尤其是水资源经济过程可持续性增长幅度高达 22%, 社会过程可持续性增长幅度约为 6% (图 6)。

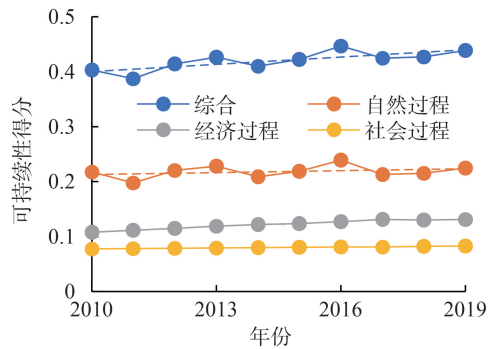


图 6 广东省水资源可持续性时间演变
Fig.6 Temporal variation of water resources sustainability in Guangdong Province

3.3 水资源可持续性空间演变分析

2010—2019 年广东省中部地区水资源综合可持续性增长较快 (图 7(a)), 东北及西南区域可持续性增长缓慢。研究时段内, 佛山、东莞、汕头、汕尾 4 市水资源自然过程萎缩严重, 其中佛山市主要受河湖水面萎缩等水资源系统的影响, 汕头、汕尾市则因森林面积下降导致水资源自然过程退化, 粤西地区则因气候变化导致降水及水资源总量偏少等原因使得水资源自然过程轻度退化 (图 7(b)); 经济发展势头强劲的珠江口东岸及潮汕地区水资源经济过程可持续性高度增长 (图 7(c)); 受人口增长及城市化驱动, 广州、深圳及佛山市水资源社会过程可持续性增长缓慢, 粤东及粤西大部分区域供水能力提升, 生活用水压力较小, 水资源社会过程可持续性增长明显提升 (图 7(d))。

3.4 SDGs 目标可持续性分析

2010—2019 年广东省水资源分目标可持续性平均得分 (图 8) 表明, 各目标的可持续性差异较大。以用水效率提升与改善为目标的 SDGs6.4 可持续性得分最高, 为 0.14, 体现出效率优势; 而围绕水质改善、水生态恢复、淡水生态系统保护等目标的 SDGs6.3、SDGs6.6 及 SDGs14.1 可持续性明显落后; 水资源综合管理能力提升 (SDGs6.5) 及陆地生态环境保护修复 (SDGs15.1) 成效尚可。水资源综合可持续性呈现效率优势与“水质-污染-水生态”劣势并存的态势, 水资源污染及水生态恶化严重制约

区域水资源可持续发展。在时间变迁上, 受气候波动及水资源可利用量的影响, 以提升水资源系统本身可靠性为目标的 SDGs6.4、SDGs6.5 及 SDGs6.6 可持续性呈波动上升趋势, 其余目标可持续性缓慢改善 (图 8)。

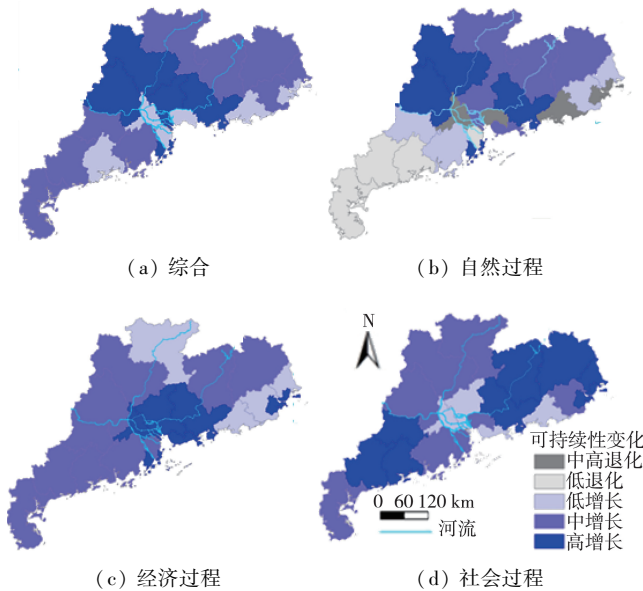


图 7 2010—2019 年广东省水资源可持续性空间演变
Fig.7 Spatial variation of water resources sustainability in Guangdong Province from 2010 to 2019

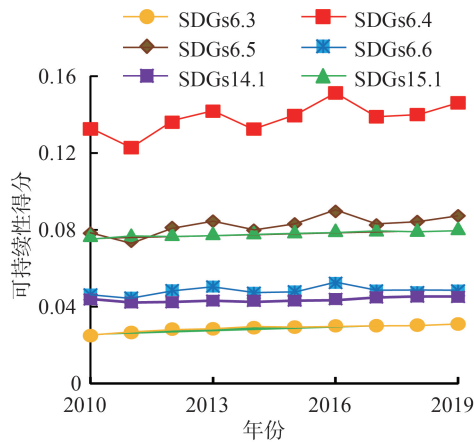


图 8 广东省水资源分目标可持续性时间演变
Fig.8 Temporal variation of water resources sustainability regarding different goals in Guangdong Province

3.5 主要驱动因素

从系统角度, 对水资源综合可持续性影响最大的 3 个系统依次为生态环境系统、水资源系统与效率系统, 权重系数分别为 0.26、0.24 与 0.22。经济发展系统、社会发展系统权重系数分别为 0.15 和 0.10; 公平系统权重系数 0.03, 对水资源可持续发展支撑能力最差。从目标角度来看, 以效率提升为核心的 SDGs6.4 权重最大, 达 0.39; 其次为陆地生态环境保护修复目标 SDGs15.1, 权重为 0.22; 围绕

水资源综合管理能力提升及水资源系统保护的SDGs6.5及SDGs6.6,权重均在0.15左右。SDGs14.1及SDGs6.3权重最小,分别为0.05及0.02,表明水质及污染管控严重制约水资源可持续发展。

从熵权法获得的指标权重来看(图4),权重最大的指标为供水模数,其次为年均蓄水量,二者权重均超过0.07,说明供水、蓄水能力的提升与稳定是广东省水资源综合可持续发展的最重要因素。包含湿地覆盖率、水面率、水资源总量在内的6个指标权重在0.05~0.07之间,表明生态系统与水资源系统的维护及水资源利用效率的提升对于促进水资源可持续发展具有重要意义。以上8个指标权重总和为0.52,为水资源综合可持续性的主导指标。生态环境用水率等6个重要指标权重在0.02~0.05之间,总权重为0.25。农村居民用水量、产水模数等权重在0.01~0.02之间的一般指标有10个。以水质指数、用水空间均衡等为代表的15个指标权重小于0.01,权重总和约为0.0946,为水资源综合可持续性的弱贡献指标。广东省经济社会高度发达,其工业用水量及污水排放量均为全国第一,各行业用水空间差异十分显著,农业、工业及服务业用水空间均衡性较差,因此,2010—2019年水质及空间均衡性等指标维持在较低水平,在水资源可持续发展中的权重较低,是水资源综合可持续性提升的主要限制因素。

4 结 论

a. 2010—2019年广东省水资源综合可持续性得分由0.40缓慢提升至0.44,空间异质性趋强,珠三角核心区可持续性较高,粤东及粤西地区可持续性较低,中部地区增长幅度较大,两翼增长缓慢。

b. 水资源可持续性主要受自然过程控制,经济过程较社会过程贡献率高。从系统角度来看,生态环境系统对水资源综合可持续性支撑作用最强,其次为水资源系统与效率系统,公平系统支撑性最弱。

c. 从可持续发展目标角度来看,用水效率提升目标(SDGs6.4)可持续性最高,水质改善目标(SDGs6.3)、水生态恢复目标(SDGs6.6)及淡水生态系统保护目标(SDGs14.1)可持续性明显落后,水资源综合管理能力提升目标(SDGs6.5)及陆地生态环境修复目标(SDGs15.1)可持续性尚可,水资源综合可持续性呈现效率优势与“水质-污染-水生态”劣势并存的态势。

d. 广东省水资源综合可持续性提升的最大驱动力为供水、蓄水能力的改善,其次为水资源利用效

率的不断提升,水质指数、用水空间失衡等因素为主要限制因素。

参考文献:

- [1] BROWN C M, LUND J R, CAI Ximing, et al. The future of water resources systems analysis: toward a scientific framework for sustainable water management[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(8): 6110-6124.
- [2] GREVE P, KAHIL T, MOCHIZUKI J, et al. Global assessment of water challenges under uncertainty in water scarcity projections[J]. *Nature Sustainability*, 2018, 1(9): 486-494.
- [3] 王浩, 刘家宏. 国家水资源与经济社会系统协同配置探讨[J]. *中国水利*, 2016(17): 7-9. (WANG Hao, LIU Jiahong. Collaboration of national water resources with eco-social system in China[J]. *China Water Resources*, 2016(17): 7-9. (in Chinese))
- [4] KOUTROULIS A G, PAPADIMITRIOU L V, GRILLAKIS M G, et al. Global water availability under high-end climate change: a vulnerability based assessment[J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 175: 52-63.
- [5] BARUA S, MUTTIL N, NG A W M, et al. Rainfall trend and its implications for water resource management within the Yarra River Catchment, Australia[J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(12): 1727-1738.
- [6] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. The United Nations world water development report 2019: leaving no one behind: facts and figures[R]. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2019.
- [7] 周玲玲, 王琳, 余静. 基于水足迹理论的水资源可持续利用评价体系: 以即墨市为例[J]. *资源科学*, 2014, 36(5): 913-921. (ZHOU Lingling, WANG Lin, YU Jing. Assessment system of water resource sustainable utilization based on water footprint theory: a case study of Jimo[J]. *Resources Science*, 2014, 36(5): 913-921. (in Chinese))
- [8] 李冰瑶, 陈星, 周志才, 等. 缺水地区水资源可持续利用评价与对策探讨[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(6): 104-108. (LI Bingyao, CHEN Xing, ZHOU Zhicai, et al. Evaluation on sustainable utilization of water resources in the water shortage region and countermeasure discussion[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2017, 28(6): 104-108. (in Chinese))
- [9] 韩宇平, 雷宏军, 潘红卫, 等. 基于虚拟水和广义水资源的区域水资源可持续利用评价[J]. *水利学报*, 2011, 42(6): 729-736. (HAN Yuping, LEI Hongjun, PAN Hongwei, et al. Evaluation on water resources sustainable utilization based on virtual water and generalized water resources theory[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(6): 729-736. (in Chinese))

- [10] 丁冉,肖伟华,于福亮,等. 水资源质量评价方法的比较与改进[J]. 中国环境监测,2011,27(3):63-68. (DING Ran,XIAO Weihua,YU Fuliang,et al. Evaluation method for water quality: a review and further investigation for improvement [J]. Environmental Monitoring in China, 2011,27(3):63-68. (in Chinese))
- [11] 刘毅,贾若祥,侯晓丽. 中国区域水资源可持续利用评价及类型划分[J]. 环境科学,2005,26(1):42-46. (LIU Yi, JIA Ruoxiang, HOU Xiaoli. Evaluation of China's regional sustainable utilization of water resources and its type classification [J]. Environmental Science, 2005, 26 (1):42-46. (in Chinese))
- [12] 李晓英,江崇秀,张琛. 基于云模型的城市资源水价研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):215-221. (LI Xiaoying, JIANG Chongxiu, ZHANG Chen. Study on city resource water price based on cloud model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020,48(3):215-221. (in Chinese))
- [13] 夏军,朱一中. 水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报,2002,17(3):262-269. (XIA Jun, ZHU Yizhong. The measurement of water resources security: a study and challenge on water resources carrying capacity [J]. Journal of Natural Resources,2002,17(3):262-269. (in Chinese))
- [14] 刘佳骏,董锁成,李泽红. 中国水资源承载力综合评价研究[J]. 自然资源学报,2011,26(2):258-269. (LIU Jiajun, DONG Suocheng, LI Zehong. Comprehensive evaluation of China's water resources carrying capacity [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26 (2): 258-269. (in Chinese))
- [15] 高玉琴,吴迪,刘海瑞,等. 城市化影响下区域水资源承载力评价[J]. 水利水电科技进展,2022,42(3):1-8. (GAO Yuqin, WU Di, LIU Hairui,et al. Evaluation of regional water resources carrying capacity under urbanization[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(3):1-8. (in Chinese))
- [16] 王慧亮,李卓成. 基于能值水生态足迹模型的黄河流域水资源利用评价[J]. 水资源保护,2022,38(1):147-152. (WANG Huiliang,LI Zhuocheng. Evaluation of water resources utilization in the Yellow River Basin based on energy water ecological footprint model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1): 147-152. (in Chinese))
- [17] 李玉平,朱琛,张璐璇,等. 基于改进层次分析法的水环境生态安全评价与对策:以邢台市为例[J]. 北京大学学报(自然科学版),2019,55(2):310-316. (LI Yuping, ZHU Chen, ZHANG Luxuan, et al. Ecological security assessment and countermeasures of water environment based on improved analytic hierarchy process:a case study of Xingtai City[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2019, 55 (2): 310-316. (in Chinese))
- [18] 戴文渊,陈年来,李金霞,等. 基于 SENCE 概念框架的区域水生态安全评价研究:以甘肃地区 17 流段为例[J]. 生态学报,2021,41(4):1332-1340. (DAI Wenyuan,CHEN Nianlai,LI Jinxia,et al. Regional water ecological security evaluation based on SENCE conceptual framework:taking 17 flow sections in Gansu Province as an example [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41 (4): 1332-1340. (in Chinese))
- [19] 王锦国,周志芳,金忠青. 我国北方水资源持续发展状况的灰色聚类评价[J]. 水电能源科学,2000,18(3):10-12. (WANG Jinguo, ZHOU Zhifang, JIN Zhongqing. Gray clustering appraisal of the sustainable development of water resources in North China[J]. Hydroelectric Energy, 2000,18(3):10-12. (in Chinese))
- [20] 张洋,李鹏,杨志,等. 基于 DPSIR 模型的甘肃省 2000—2018 年水安全评价[J]. 水土保持通报,2021,41(6):127-132. (ZHANG Yang, LI Peng, YANG Zhi, et al. Water security evaluation of Gansu Province during 2000-2018 based on DPSIR model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41 (6): 127-132. (in Chinese))
- [21] 杜阳,武鹏林. 基于 DPSIR-PCA 的山西省水资源可持续性评价[J]. 人民黄河,2019,41(4):42-45. (DU Yang, WU Penglin. Evaluation of water resources sustainability based on DPSIR-PCA model in Shanxi Province [J]. Yellow River, 2019, 41 (4): 42-45. (in Chinese))
- [22] 陈南祥,杨淇翔. 基于博弈论组合赋权的流域水资源承载力集对分析[J]. 灌溉排水学报,2013,32(2):81-85. (CHEN Nanxiang, YANG Qixiang. Set pair analysis of watershed water resources carrying capacity based on game theory combination weighting[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2013,32(2):81-85. (in Chinese))
- [23] 杨阳,方国华,黄显峰,等. 基于改进模糊物元分析法的区域最严格水资源管理评价[J]. 水资源保护,2014(6):19-24. (YANG Yang, FANG Guohua, HUANG Xianfeng, et al. Assessment of strictest regional water resources management system based on improved fuzzy matter-element analysis [J]. Water Resources Protection, 2014(6):19-24. (in Chinese))
- [24] 王先庆,李博,郑建. 基于灰色关联-网络层次分析模型的水资源安全综合评价[J]. 南水北调与水利科技,2019,17(4):87-93. (WANG Xianqing, LI Bo, ZHENG Jian. Comprehensive evaluation of water resources security based on GRA-ANP model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2019,17(4):87-93. (in Chinese))
- [25] 王慧亮,陈开放,李云飞,等. 中原城市群水资源综合调控方案与效果评价[J]. 人民黄河,2019,41(6):58-61.

- (WANG Huiliang, CHEN Kaifang, LI Yunfei, et al. Water regulation measures and effect evaluation of central Henan urban agglomeration based on artificial neural network [J]. Yellow River, 2019, 41(6): 58-61. (in Chinese))
- [26] 葛强. 基于随机森林的奎屯河水资源可持续利用评价[J]. 人民珠江, 2019, 40(1): 75-79. (GE Qiang. Evaluation of sustainable utilization of water resources in Kuitun River based on random forest [J]. Pearl River, 2019, 40(1): 75-79. (in Chinese))
- [27] 段巍巍, 史磊刚, 曾凡立, 等. 北京市农业水资源可持续性利用评价[J]. 贵州农业科学, 2017, 45(9): 143-146. (DUAN Weiwei, SHI Leigang, ZENG Fanli, et al. Evaluation on sustainability of agricultural water resources in Beijing [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2017, 45(9): 143-146. (in Chinese))
- [28] 崔莹, 谢世友, 柳芬, 等. 重庆市水资源可持续利用能力的模糊评价[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(4): 115-123. (CUI Ying, XIE Shiyu, LIU Fen, et al. Fuzzy evaluation of sustainable utilization of water resources in Chongqing [J]. Journal of Southwest University (Natural Science), 2017, 39(4): 115-123. (in Chinese))
- [29] 韩宇平, 苏潇雅, 曹润祥, 等. 基于熵-云模型的我国水利高质量发展评价[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 26-33. (HAN Yuping, SU Xiaoya, CAO Runxiang, et al. Evaluation of high-quality development of water conservancy in China based on entropy-cloud model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 26-33. (in Chinese))
- [30] 陈莎, 吕鹤, 李素梅, 等. 面向水资源可持续利用的综合水足迹评价方法[J]. 水资源保护, 2021, 37(4): 22-28. (CHEN Sha, LYU He, LI Sumei, et al. Methods of comprehensive water footprint assessment for sustainable utilization of water resources [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 22-28. (in Chinese))
- [31] 王红瑞, 李一阳, 杨亚锋, 等. 水资源集约安全利用评估模型构建及应用[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 18-25. (WANG Hongrui, LI Yiyang, YANG Yafeng, et al. Construction and application of evaluation model for intensive and safe utilization of water resources [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 18-25. (in Chinese))
- [32] 李深林, 洪昌红, 邱静, 等. 广东省不同区域污水资源化建设需求分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 43-47. (LI Shenlin, HONG Changhong, QIU Jing, et al. Demand analysis of sewage reclamation construction in different regions of Guangdong Province [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 43-47. (in Chinese))
- [33] 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. (ZHAO Junkai, LI Jiufa, DAI
- Zhijun, et al. Study on water resources carrying capacity of urbanized area based on entropy model: a case study in Kaifeng city [J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(11): 1944-1951. (in Chinese))
- [34] 黄楚珩, 蒋志云, 杨志广, 等. 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[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5): 140-147. (HUANG Chuheng, JIANG Zhiyun, YANG Zhiguang, et al. Evaluation and factors of water resource security of Guangdong Province using entropy value and analytic hierarchy process methods [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(5): 140-147. (in Chinese))
- [35] 赵玲玲, 夏军, 杨芳, 等. 粤港澳大湾区水生态修复及展望[J]. 生态学报, 2021, 41(12): 5054-5065. (ZHAO Lingling, XIA Jun, YANG Fang, et al. Current situation, framework, problems and prospect of water ecological restoration in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(12): 5054-5065. (in Chinese))
- [36] 张璞, 刘欢, 胡鹏, 等. 全国不同区域河流生态基流达标现状与不达标原因[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 176-182. (ZHANG Pu, LIU Huan, HU Peng, et al. Current situation of compliance of river ecological base flow and noncompliance reasons in different regions of China [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 176-182. (in Chinese))
- [37] 肖洋, 王艳, 徐辉荣, 等. 珠江三角洲洪水就近入海防洪治理方案[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 257-264. (XIAO Yang, WANG Yan, XU Huirong, et al. Analysis on flood control scheme for flood discharge from nearer route in the Pearl River delta [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(3): 257-264. (in Chinese))
- [38] 刘丙军, 黄睿, 于海霞, 等. 广东省社会经济-水资源复合系统协调度评价[J]. 人民珠江, 2020, 41(5): 38-42. (LIU Bingjun, HUANG Rui, YU Haixia, et al. Evaluation of the coordination degree between the socio-economic and water resources system in Guangdong Province [J]. Pearl River, 2020, 41(5): 38-42. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-03-18 编辑: 施业)

