

粤港澳大湾区水生态状态演变及驱动机制研究*

黄洋漫¹, 陈晓宏^{1,2}

1. 中山大学土木工程学院, 广东 珠海 519082
2. 中山大学水资源与环境研究中心, 广东 广州 510275

摘要: 以粤港澳大湾区为研究区域, 考虑水生态与人类社会、内外环境变化之间的相互作用, 构建能较为全面地反映粤港澳大湾区水生态状态的指标体系, 量化 2010—2019 年粤港澳大湾区水生态状态及其演变趋势。根据大湾区面临的水生态风险, 选取西江和北江年径流量、下游潮位、大湾区城市化率等 7 个驱动因子。以代表主要环境影响的驱动因子作为输入, 以大湾区 4 个水生态状态指数作为输出, 构建粤港澳大湾区河网城市群水生态状态反应器并研究其驱动机制。结果表明: 粤港澳大湾区水生态状态近 10 年来不断向好; 水生物状态受西江年径流量和下游盐度影响较大; 生境指数在快速城市化影响下呈下降趋势, 但下降速度逐年变缓; 与此同时, 快速城市化表现出对城市污水处理率的提高和对咸潮上溯的有效控制, 为大湾区内主要河流水质改善做出贡献; 在西北江分流比变化和自然灾害等影响下, 大湾区水安全程度仍不断提高。

关键词: 粤港澳大湾区; 水生态状态; 驱动因子; 水生态状态反应器; 生态响应

中图分类号: X171 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2023)02-0093-11

The evolution of water ecological state and driving mechanism in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

HUANG Yangman¹, CHEN Xiaohong^{1,2}

1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
2. Center for Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: Taking the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GBA) as the research area, this study 1) considered the interaction between water ecology and human society, internal and external environmental changes, 2) constructed an index system that can reflect the water ecological state of the GBA more comprehensively, and 3) quantified the water ecological state of the GBA and its evolution trend from 2010 to 2019. Concerning the water ecology risks faced by the GBA, seven driving factors were selected, such as the annual runoff of the Xijiang River and the Beijiang River, the downstream tidal level, and the urbanization rate of the GBA. Taking the driving factors as the input and the four water ecological state indices as the output, the water ecological state reactor of the river network urban agglomeration in the GBA was constructed and its driving mechanism was studied. Results showed that 1) the water ecological state of the GBA has been improving in the past ten years; 2) the aquatic state was greatly affected by the annual runoff of the Xijiang River and downstream salinity; 3) the habitat index was under the rapid urbanization which shows a downward trend, but the rate of decline has slowed

* 收稿日期: 2022-02-08 录用日期: 2022-04-21 网络首发日期: 2022-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(51861125203, U1911204); 国家重点研发计划项目(2017YFC0405900);
广东省水利科技创新项目(2018, 2020)

作者简介: 黄洋漫(1999年生), 女; 研究方向: 水资源与水生态; E-mail: huangym68@mail2.sysu.edu.cn
通信作者: 陈晓宏(1963年生), 男; 研究方向: 水文水资源; E-mail: eescxh@mail.sysu.edu.cn

year by year; 4) meanwhile, rapid urbanization has shown an improvement of urban sewage treatment and effective control of the salt tidal upward, which has a positive impact on the improvement of the water quality in the GBA; 5) the water security of the GBA continues to improve despite the influence of changes in the diversion ratio and natural disasters.

Key words: GBA; water ecology status; driving factors; water ecology status reactor; ecology response

粤港澳大湾区(简称大湾区)水网密布,上游来水与河口咸潮上溯交互作用,其水生态状态受内外环境共同影响。大湾区特大城市群大量废水排入河道,以及上游污染输入,水质污染问题仍十分突出;快速城市化和大规模河道围垦与闸泵建设改变水网水流形态,导致水生态退化严重;前阶段河道无序采砂加上上游水库拦沙及河床清水冲刷,使得河道河床普遍下切,西北江分流比发生显著变化(陈晓宏等,2002),加重沿海城市咸潮和风暴潮灾害影响;海平面上升更加剧了咸潮上溯(孔兰等,2015),影响河口水生态和饮用水安全。大湾区水生态发生显著改变并面临巨大风险。近年来,针对粤港澳大湾区的生态状态,国内不少学者使用遥感数据进行了研究。比如, Yang et al.(2020)选取 VC、VHI 等遥感数据指标,构建能概化表示粤港澳大湾区生态质量的指数 CEEI,并探讨快速城市化和政策对大湾区生态质量的影响; Wang et al.(2021)选取 NDVI 指数代表大湾区生态系统服务功能,研究地形因素、气候因素、社会经济因素和土地利用因素对其影响大小的时空变化和异质性。

已有的国内外对水生态研究,大多是基于当地河流或其流域、区域的特点建构水生物水质指标,少有在水生态中考虑快速城市化和高密度产业人口对水安全的敏感性,在快速发展的密集城市群不完全适用。而目前对粤港澳大湾区的水生态研究大多使用遥感参数,虽然在针对较大尺度的时空研究上有明显优势,但其指标类别有限,不足以全面代表研究区域的水生态状态。因此,本文在前人对水生态研究的基础上,根据大湾区水生态现状与存在的风险,考虑自然因素和快速城市化的共同作用,综合构建水生物、生境、水质和水安全等 4 个指数,提出适用于以城市群为主的大湾区水生态状态指标体系,量化 2010—2019 年期间大湾区的水生态状态;充分考虑大湾区内外部剧烈变化环境,构建出以反映主要环境影响的 7 个驱动因子作为输入,以大湾区 4 个水生态状

态指数,作为输出的大湾区河网城市群水生态状态反应器,揭示并量化内外驱动因子对大湾区水生态状态的驱动机制,旨在为大湾区以水生态健康为目标的调控方案与管控对策提供理论参考。

1 研究区域及数据来源

1.1 研究区概况

粤港澳大湾区是包括广东省的广州、深圳、佛山、中山、珠海等 9 城市,以及香港和澳门两个特别行政区的世界级特大城市群(图 1),面积 5.6 万 km²,城市化率超过 90%;大湾区属亚热带气候,多年平均降水量在 1 400~2 500 mm 之间。区域内河网密布,主要水系有西江、北江、东江和珠江三角洲河网。

1.2 数据来源

本文使用 2 种数据集:一种是用于描述大湾区水生态状态的指标;另一种是影响大湾区水生态状态的驱动因子。数据来源于全国及各省市水资源公报、统计年鉴、中国环境统计数据、海洋环境质量公报和生态环境质量公报等,生境指数的相关指标数据来源于 Landsat8 OLI 陆地资源卫星。时间范围为 2010—2019 年,均为年平均数据。

2 研究方法

2.1 指标筛选与确定

随着人类对生态环境提出的要求越来越高,生态系统健康已不再仅限于用单方面反映,其定义演变为基于自然-社会-经济大生态系统的复合型概念(孔红梅等,2002)。同时,城市化进程不断加快,人类活动对河口地区城市水生态的影响日益重大。因此,结合前人研究成果和大湾区所面临的水生态风险,采用层次分析法,考虑指标简明性和易获得性,于准则层构建 4 个综合指数(水生物指数、生境指数、水质指数、水安全指数),初步选择 23 个指标反映 4 个综合指数,构建以粤港澳大湾区水生态状态为目标层的体系。由于所需数据过多,获取难度较大,故将一部分指

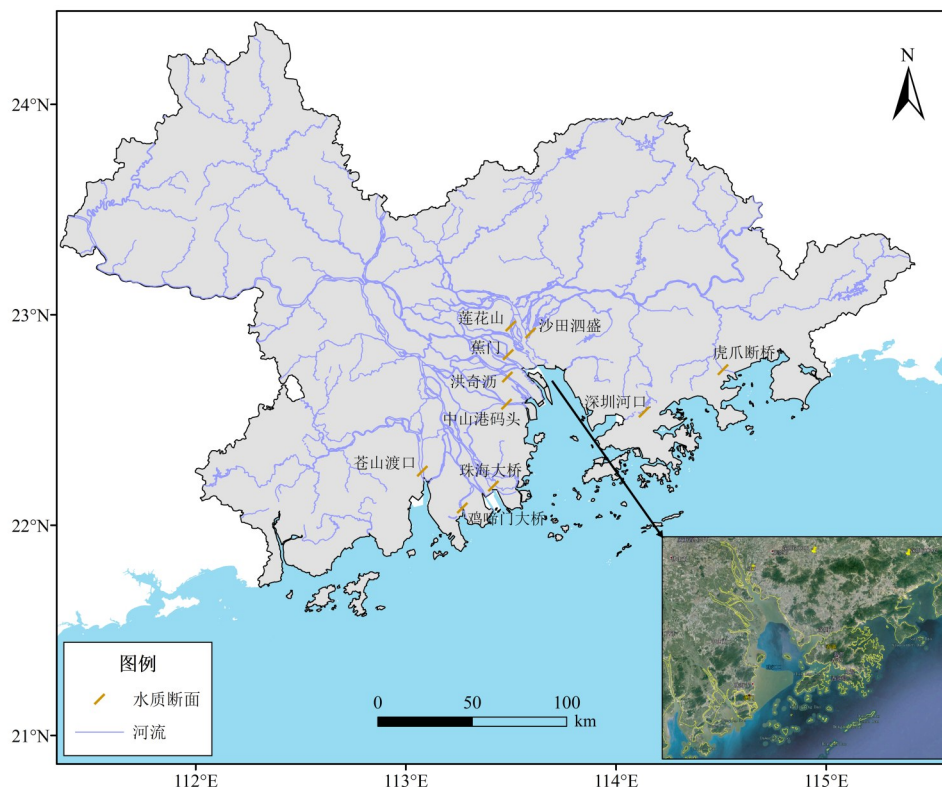


图1 粤港澳大湾区行政区划及主要河流断面概况图

Fig. 1 Overview of the cities and major river sections in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

标进行概化表示: 以珠江口生态状态近似代表大湾区近岸海域生态状况, 选取珠江口2010—2019年浮游植物密度、浮游植物多样性、浮游动物密度、浮游动物多样性、大型底栖动物密度、大型底栖动物多样性和大湾区初级生产力(NPP)构成水生生物指数; 由于水生生态数据难获取, 仅有溶解氧一个指标, 考虑到空间尺度统一性, 将其归类于水质指数。此处的生态指数仅代表陆生生境, 选用大湾区自然湿地面积变化率、城镇建设用地比例和植被覆盖度3个指标; 区域内主要河流断面水质情况反映了研究区域内河流污染状况。水质指数选取境内主要河流断面的监测数据(断面位置及名称见图1)综合反映, 具体包括溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(KMnO_4)、化学需氧量(COD_{Cr})、生化需氧量(BOD_5)、氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、总磷(TP)和总氮(TN); 城市水安全的内涵包括水资源与水环境两方面的安全, 可主要分为城市的供水安全、水质安全及城市防洪安全(柳喜军, 2007; 陈充, 2015)。本文设置的水安全指数包括大湾区人均水资源量、地级以上城市集中式饮用水水源水质达标率(此处指达到II类标准及以上的达标率)、城市污水处理率、城镇居民生活人均用水量、广昌含氯度超标

天数(用于反映咸潮上溯影响程度)和防洪安全。

使用主成分分析和 Spearman 相关性分析对指标进行两次筛选, 过程实现基于 R 语言(Feld et al., 2016)。由于生境指数仅包含3个指标, 变量较少, 只对其他3个指数进行主成分分析。筛选出特征值大于0.75的指标再进行相关性分析, 目的是排除共线性, 保证构建生态体系的变量相互独立。当两变量之间的相关性系数大于0.9时, 则需酌情去掉其中一个指标。

2.2 评价指标权重及标准划分

本文采用主客观赋权法。首先对指标层进行主成分分析, 根据得到的主成分特征值、方差贡献率和因子载荷值计算权重(惠秀娟等, 2011), 再与人为确定的准则层权重结合得到指标权重。所得结果在一定程度上减小了人为因素带来的偏差, 也保证了其客观性, 使指标权重更为理想。由于没有统一的健康评价标准, 故指标等级的划分以已有国家标准为依据, 未包括在里面的指标则结合现有文献中所得结论和国内主要城市现状作为参考进行划分(陈充, 2015; 郭秀锐等, 2002; 徐林春, 2014; 杨丰顺, 2011)。

2.3 水生态状态指数

对指标进行标准化处理, 采用综合指数法, 计算得到大湾区水生态状态指数

$$WESI = \sum_{i=1}^n (W_i I_i),$$

式中 W_i 为指标权重, I_i 为标准化处理后的指标值。WESI, W_i 和 I_i 的范围区间均为 $[0, 1]$ 。

参考已有研究成果, 根据河口生态系统等级划分标准将水生态状态指数(WESI)按 0~1 区间标准划分为很健康、健康、亚健康、不健康、病态共 5 个等级 (彭涛等, 2009)。划分情况如表 1。

表 1 水生态状态等级表

Table 1 Water ecological status grading table

分级	水生态状态得分	健康状况
I	0.8~1.0	很健康
II	0.6~0.8	健康
III	0.4~0.6	亚健康
IV	0.2~0.4	不健康
V	0.0~0.2	病态

2.4 水生态状态反应器构建与驱动因子识别

本文定义水生态状态反应器是指一种描述某区域在水生态环境驱动要素作为输入的作用下, 驱使区域水生态状态发生反应和变化的量化模拟系统, 该反应器利用输入因子与水生态状态的响

应关系, 输出受环境影响后该区域的水生态状态综合指数。本文以 2010—2019 年数据为例, 得到水生态状态各指标与内外环境驱动因子的数值关系, 据此构建粤港澳大湾区水生态状态反应器, 探讨大湾区水生态状态对内外环境变化的响应。

结合大湾区主要面临的内外部生态风险识别主要驱动因子。外部主要考虑上游来水的水量水质和下游海平面变化, 内部考虑快速城市化对水生态产生的影响(图 2)。有关上游西北江污染物入境的数据难以获取, 因珠江入海污染物总量包含上游污染物输入和大湾区内入海河流污染物, 且通过 8 大口门下泄的污染物占珠江口的八成以上, 故利用 8 大口门与珠江口的流量比近似代替污染物总量比, 以此概化大湾区污染物入海通量。海平面上升主要影响下游潮位和下游盐度, 分别选用灯笼山年最大潮位和广昌年最大含氯度反映。设置城市化综合指数作为内部驱动因子。本文主要探讨上游西、北江的输入, 湾区内西江干流覆盖肇庆、珠海、中山、江门、广州等 5 市, 北江覆盖佛山、广州两地。其中, 受影响较大的西北江三角城市群为广州、佛山、中山和珠海, 故选取这 4 市作为典型研究区, 包括 4 市的人口密度、人均 GDP、城市污水处理率、工业废水排放量、生活污水排放量、工业固体废物产生量和城市内河水

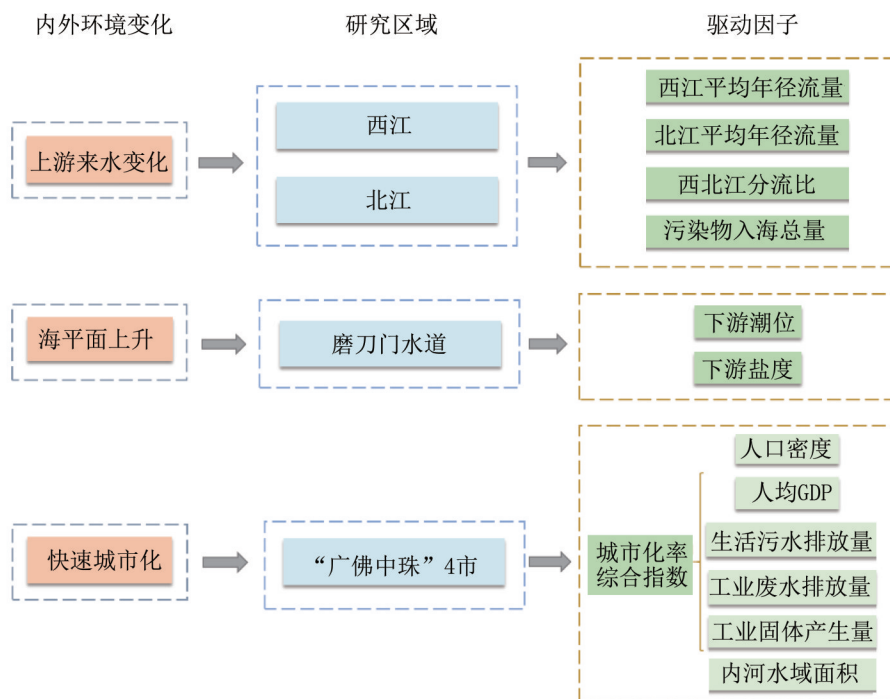


图 2 内外环境变化及驱动因子示意图

Fig. 2 Schematic diagram of internal and external environmental changes and driving factors

域面积。参考《生态环境状况评价技术规范(HJ 192-2015)》和已有文献(徐林春, 2014), 对指标权重进行分配, 归一化后计算得到城市化率综合指数。

3 粤港澳大湾区水生态状态及驱动因子响应

3.1 水生态状态体系构建

对选择的21个指标进行主成分分析和Spearman相关性分析, 其中生境指数只包含3个指标, 不参与主成分分析。对21个指标进行最大方差旋转, 得到因子载荷矩阵, 保留载荷值大于0.75的指标进行第2次筛选, 表中加粗数字代表各保留指

标的最大荷载值。在主成分分析结果(如表2)的基础上去除 A_4 、 A_5 、 A_7 、 D_5 。剩下指标的相关性系数见图3。仅水质指数中的 C_2 、 C_4 、 C_6 之间存在强相关性。由于 C_2 、 C_3 和 C_4 都是有关有机质含量的参数: C_2 是以 $KMnO_4$ 溶液为氧化剂测得的化学耗氧量, 且现有研究很少选择 C_2 作为水质影响因子; C_4 代表微生物消化有机质期间所需的氧量; 而 C_3 是监测所得废水中有机质的含量。考虑到指标重复性, 可舍去 C_2 和 C_4 。 C_6 和 C_7 均是反映水体富营养化的指标, 仅保留一个即可。总磷是富营养化的控制因子, 结合主成分分析结果, 优选 C_6 作为评价指标。综上所述, 排除 C_2 、 C_4 、 C_7 。根据筛选后的指标, 构建粤港澳大湾区水生态状态体系(图4)。

表2 候选指标主成分分析结果¹⁾

Table 2 Principal component analysis results of candidate indicators

准则层	指标层	主成分分析			筛选结果
		第一主成分	第二主成分	第三主成分	
水生物指数 A	浮游植物密度 A_1	0.699	-0.111	0.772	保留
	浮游植物多样性 A_2	-0.845	0.17	0.065	保留
	浮游动物密度 A_3	0.103	-0.925	0.207	保留
	浮游动物多样性 A_4	-0.419	0.623	0.624	不保留
	大型底栖动物密度 A_5	0.666	0.456	-0.341	不保留
	大型底栖动物多样性 A_6	0.857	308	0.09	保留
	初级生产力 A_7	0.532	0.046	0.613	不保留
水质指数 C	溶解氧 C_1	-0.944	0.025	0.076	保留
	$KMnO_4$ 指数 C_2	0.974	0.148	-0.122	保留
	化学需氧量 C_3	0.896	-0.04	0.44	保留
	生化需氧量 C_4	0.969	0.103	0.095	保留
	氨氮 C_5	0.013	0.996	0.019	保留
	总磷 C_6	0.925	0.268	-0.267	保留
	总氮 C_7	-0.528	0.844	0.09	保留
水安全指数 D	人均水资源量 D_1	0.893	-0.633	0.898	保留
	防洪安全 D_2	-0.108	0.402	0.855	保留
	地级以上城市集中式饮用水水源水质达标率 D_3	0.902	0.029	-0.266	保留
	城市污水处理率 D_4	0.026	0.897	-0.174	保留
	城镇居民生活人均用水量 D_5	-0.576	0.394	-0.466	不保留
	广昌含氯度超标天数 D_6	0.333 9	0.818	0.001	保留

1) 表中加粗数字代表各保留指标的最大荷载值。

3.2 大湾区水生态状态及演变

根据水生态状态体系中各指标权重及等级划分计算水生态状态指数。其中, D_2 健康分级标准

按照各水文站设计流量(10、20、50或100 a一遇)超过警戒流量的大小制定; 由上到下依次为三水站、马口站、高要站、石角站。根据当年数据的

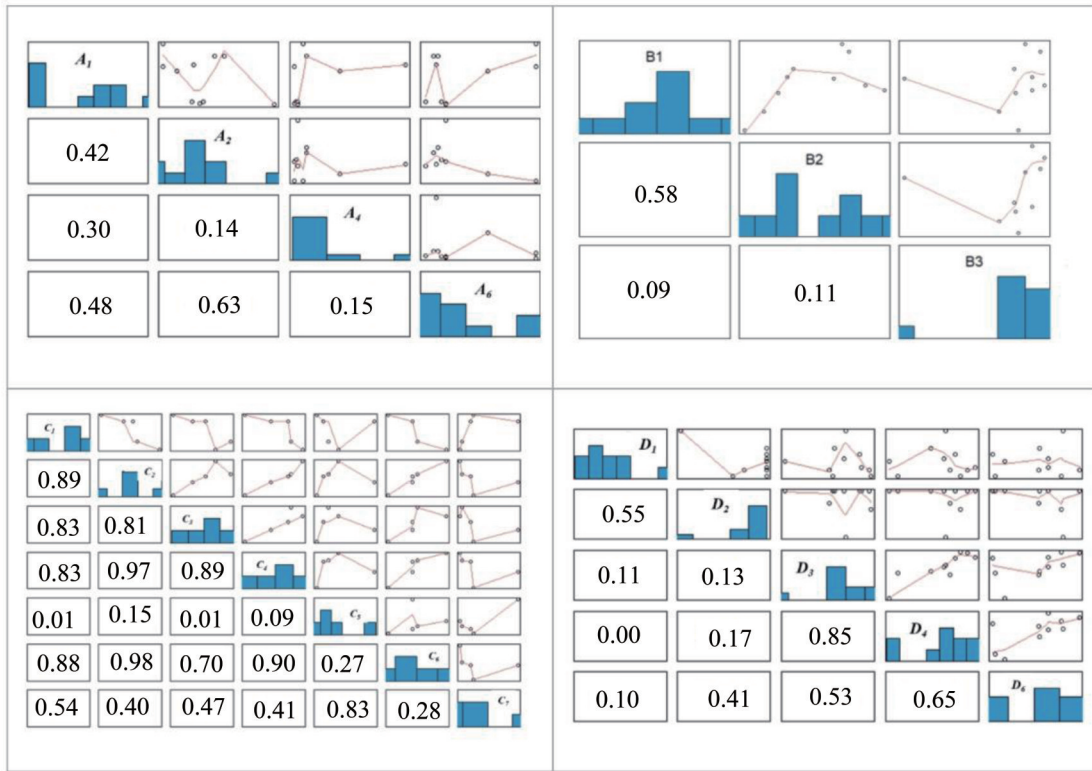


图3 指标间 Spearman 相关性分析结果

Fig. 3 Spearman correlation analysis results between indicators

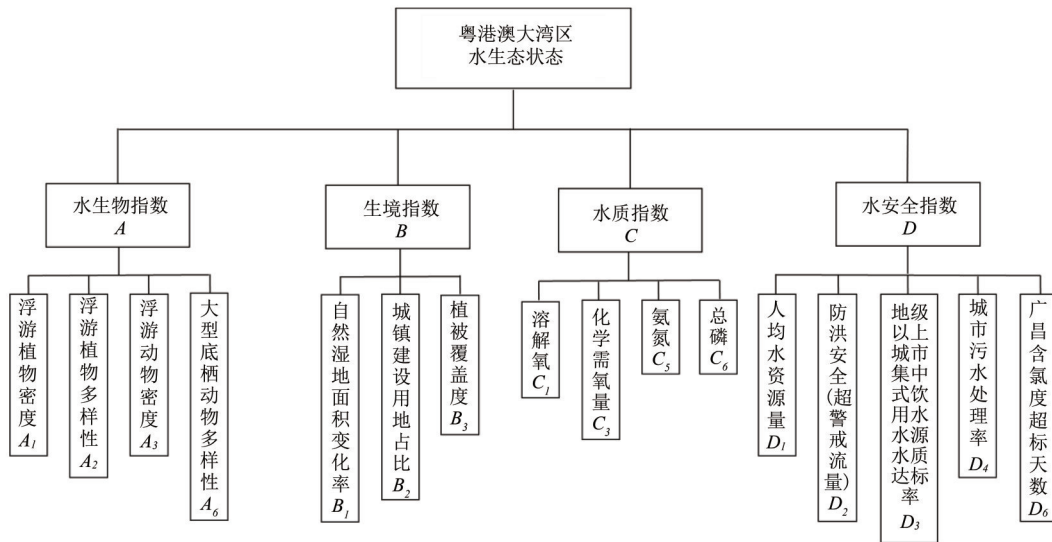


图4 粤港澳大湾区水生态状态体系

Fig. 4 Water ecological status system in GBA

获取情况选取西、北江代表站, 综合取相对不安全值代表当年情况; 根据 2006—2019 历年广昌含氯度超标天数及当年所受咸害程度划分 D_6 ; 等级划分和权重分配结果见表 3 和表 4。计算结果如图 5 所示。

近 10 a 水生态状态虽呈逐渐变好的趋势, 但整体上仍处于亚健康状态。2013 年、2015 年和 2018 年水生态状态健康劣于上一年, 其中 2015 年水生

态状态下降严重, 综合指数为 0.396, 为不健康等级, 主要归因于当年水质和生境状态不够理想, 与上一年相比明显变差; 2010 年和 2015 年水生态状态较差, 综合指数分别为 0.321 和 0.396, 属不健康状态, 主要是因为水安全指数较低。其中, 2010 年由于南方特大暴雨, 广东境内多个地区暴雨等级达 50 a 一遇, 发生严重的洪涝灾害, 三水站

表3 粤港澳大湾区水生态状态指标等级划分标准¹⁾

Table 3 Standards for the classification of indicators

目标层	准则层	指标层	很健康	健康	亚健康	不健康	病态
水生态状态	A	$A_1/(10^{-2}\text{个}\cdot\text{m}^{-3})$	15~25	10~30	5~10, 30~35	5~2, 35~40	<2, >70
		A_2	>3	3~2	2~1	1~0.5	<0.5
		$A_3/(10^{-3}\text{个}\cdot\text{m}^{-3})$	17~23	15~17, 23~25	10~15, 25~30	5~10, 30~35	5<, >35
		A_6	>3	3~2	2~1.5	1.5~1	<1
	B	$B_1/\%$	>0	-5~0	-15~-5	-25~-5	<-25
		$B_2/\%$	<0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	>0.4
		B_3	>75	75~55	55~35	35~20	<20
	C	$C_1/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	>6	6~5	5~3	3~2	<2
		$C_3/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	<15	15~20	20~30	30~40	>40
		$C_5/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	<0.15	0.15~1	1~1.5	1.5~2	>2
		$C_6/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	<0.02	0.02~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	>0.3
	D	$D_1/(10^3\text{m}^3\cdot\text{人}^{-1})$	>40	35~40	25~35	17~25	<17
		$D_2(\text{三水站})/10^2$	<0	0~100	100~120	120~155	155~179
		$D_2(\text{马口站})/10^2$	<0	0~19	19~35	35~50	50~70
		$D_2(\text{高要站})/10^2$	<0	0~18	18~25	25~40	40~50
		$D_2(\text{石角站})/10^2$	<0	0~18	18~33	33~66	66~89
		$D_3/\%$	>90	90~80	80~70	70~60	<60
		$D_4/\%$	>99	99~97	97~93	93~90	<90
D_6	<0	0~10	10~30	30~60	>60		

1) 本表分类依据: 郭秀锐等, 2002; 杨丰顺等, 2011; 生态环境状况评价技术规范: HJ 192—2015; 近岸海域环境监测规范: HJ 442—2008; 地表水环境质量标准: GB 3838—2002。

表4 粤港澳大湾区水生态状态指标权重分配结果

Table 4 Metric weight distribution results

目标层	准则层	指标层	指标层权重	
			相对于准则层(β)	相对于目标层(α)
水生态状态	A	A_1	0.293	0.073
		A_2	0.211	0.053
		A_3	0.338	0.084
		A_6	0.158	0.039
	B	B_1	0.357	0.089
		B_2	0.289	0.072
		B_3	0.355	0.089
	C	C_1	0.293	0.073
		C_3	0.196	0.049
		C_5	0.246	0.062
		C_6	0.265	0.066
	D	D_1	0.226	0.056
D_2		0.096	0.024	
D_3		0.243	0.061	
D_4		0.208	0.052	
D_6		0.227	0.057	

和马口站洪水流量均超过警戒流量，水安全指数为近 10 年最低，仅为 0.176；其次是 2011 年、2013 年和 2014 年，水生态状态接近不健康状态，综合

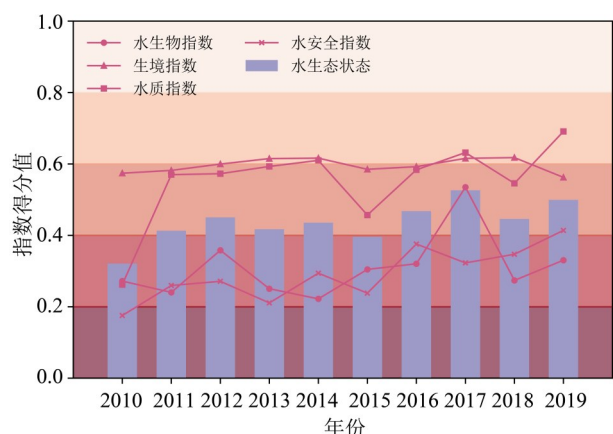


图 5 2010—2019 年粤港澳大湾区水生态状态变化

Fig. 5 Changes in the water ecology status of GBA from 2010 to 2019

指数分别为 0.413、0.417 和 0.436。这三年水生物状态均较差，尤其是浮游动物密度偏低；近 10 年水生态状态相对较好的为 2017 年和 2019 年，均体现在水质情况有较大改善。

将计算得出的粤港澳大湾区水生态状态综合指数与生态指数 EI 及国内外对大湾区的研究结果进行对比验证，两种方法所得到的大湾区生态环境质量变化呈相似态势，整体变化幅度较小，生态环境质量呈好转趋势，验证了本文结果的合理性。

3.3 粤港澳大湾区水生态状态反应器构建

构建粤港澳大湾区水生态状态反应器框架图如图 6 所示。其中，各水生态指数响应方程分别为

$$A = -0.049 + 1.42Y_1 - 0.554Y_2 + 0.43M_2 - 0.52N,$$

$$B = 0.23 - 0.44X - 0.53N,$$

$$C = -0.043 + 0.41X + 0.91M_2 - 0.63N,$$

$$D = -0.05 + 0.91X - 0.505Y_1 + 0.582Y_2 + 0.829M_1.$$

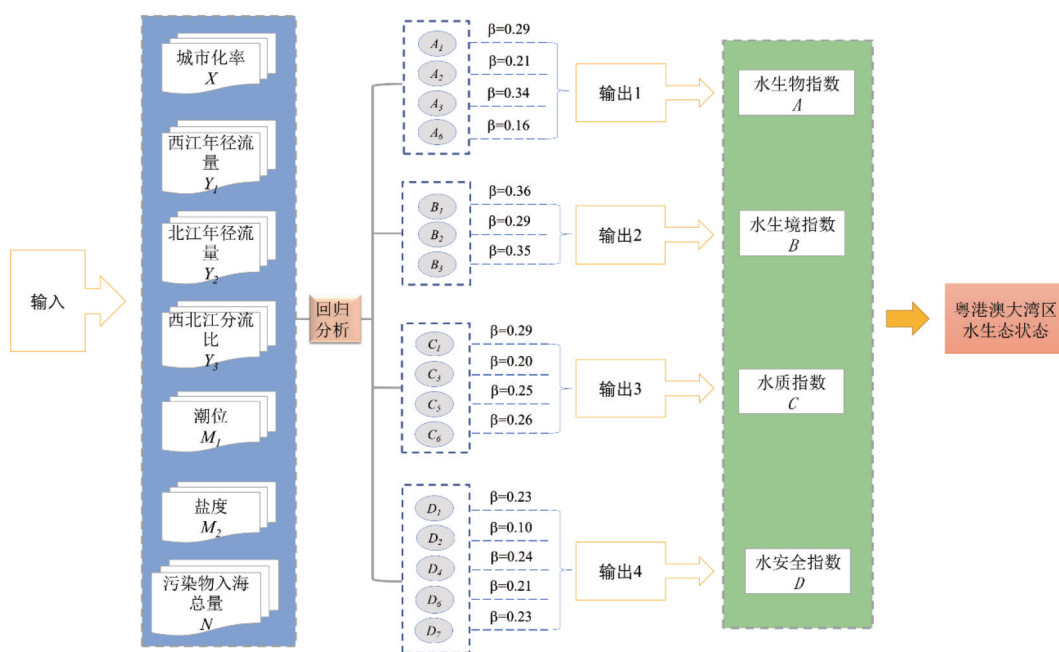


图 6 粤港澳大湾区水生态状态反应器框架图

Fig. 6 Framework diagram of water ecological state reactor in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area

3.4 水生态状态演变驱动机制分析

根据水生态反应器所得结果，选取这期间对各指数产生较大影响的驱动因子进行分析，结果如图 7 所示。

针对水生物指数 A 筛选后共存在 4 个驱动因子，影响强弱依次为西江年径流量 Y_1 、北江年径流量 Y_2 、污染物入海量 N 和下游盐度 M_2 。西江来水量和下游盐度对水生物状态产生积极影响，而北江年径流量和污染物入海量产生消极影响；对水

生境指数产生较大影响的驱动因子依次为污染物入海量和城市化率，城市化率指数和入海污染物总量直接和间接地反映城市化进程，对大湾区生境均产生负面影响；下游盐度对水质指数的影响最为显著，且为积极影响，其次是污染物入海量，对水质产生负面影响，最后是产生积极影响的城市化率；驱动因子影响差别不大，按强弱依次为城市化率、下游盐度、北江年径流量和西江年径流量。除西江年径流量外，其余驱动因子均对大

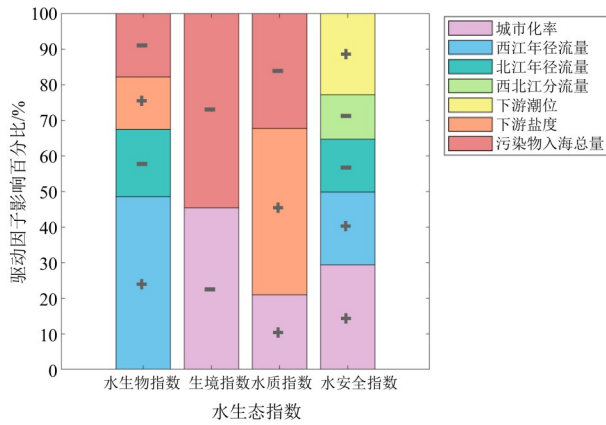


图 7 影响水生态各指数的主要驱动因子
Fig. 7 The main driving factors affecting the aquatic ecological indexes

湾区水安全产生积极影响。

反映粤港澳大湾区水生态状态的具体指标对驱动因子的响应如图 8, 以回归系数大小反映各指标对指数的影响程度, 以回归系数正负反映影响方式。以此为参考对内外环境变化的驱动机制进行分析。

3.4.1 水生物指数对驱动因子的响应 根据主成分分析确定的指标权重及图 7 结果显示, 浮游动物密度是影响水生物状态的关键因子。对浮游植物密度(A_1)产生明显影响的驱动因子按强弱顺序依次为下游潮位、西北江分流比和下游盐度, 回归系数分别为-0.953、0.55 和 0.323, 仅下游潮位对大湾区浮游植物密度产生负面影响; 对浮游植物多样性(A_2)产生明显影响的驱动因子有西北江分流比、污染物入海量和下游潮位, 回归系数分别为-1.458、1.151 和 0.614; 西江年径流量对浮游动物密度(A_3)和大型底栖动物多样性(A_6)都产生明显影

响, 回归系数分别为 1.133 和-0.482。除此之外, 浮游动物密度还受西北江分流比、污染物入海量和下游盐度较为明显的影响, 回归系数分别为 1.101、-0.9 和 0.602。

综上, 浮游植物密度、浮游动物密度受上游来水影响较大, 与西江年径流量呈正相关。由于河口的径流作用, 将使影响水生物的水文要素如水温、流速等生态因子发生变化(帅方敏等, 2017)。西江来水量远远超过北江, 相比之下会对下游相关生态因子产生较大影响, 进而影响到水生物种类组成和分布。而盐度变化与动物的形态、生长、发育有密切关系。生物对盐度的适应性不同, 表现也不同。河口地区的生物大多属于广盐性生物, 这也解释了近 10 年来, 大湾区下游盐度对水生物状态, 特别是对浮游动物产生积极影响, 其密度随着下游盐度上升而增大; 同时期的盐度范围有利于大部分水生物生长。

3.4.2 生境指数对驱动因子的响应 结合指标权重及图 7 结果可得, 自然湿地面积变化率是影响生境状态最大的指标。对自然湿地面积变化率(B_1)产生明显影响的驱动因子有两个, 按强弱顺序依次为城市化率和西北江分流比, 回归系数分别为 0.076 和 0.004, 均为积极影响; 城市化率对城镇建设用地占比(B_2)和植被覆盖度(B_3)也产生明显影响, 回归系数分别为-0.268、-0.52。

人口城市化导致大量森林和湿地转化为建设用地, 以佛山、惠州、广州和肇庆为主要变动区域。且主要由耕地、草地和水域转化而来, 植被覆盖度不断减少。在城市化占用湿地, 进而占用水域的同时, 经济发展和人口增加使用水需求迅速提高。而湾区内湖泊较少, 主要依靠水库解决

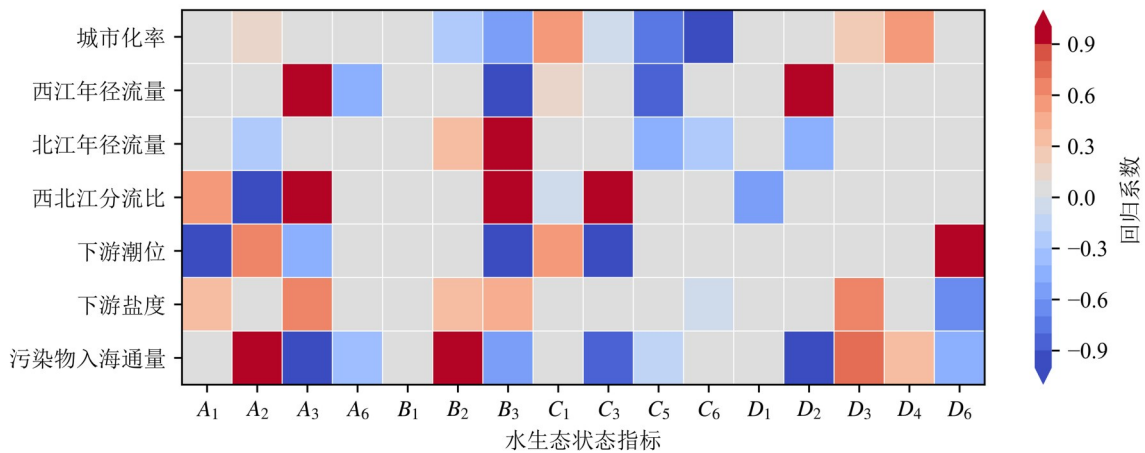


图 8 驱动因子对水生态各指标的影响

Fig. 8 The impact of driving factors on various water ecological indicators

供水问题。因此湿地面积的恢复除了兴建和保护湿地公园方面的影响之外,水库建设也一定程度上增加湿地面积。这也解释了粤港澳大湾区湿地面积除 2014 和 2018 年略有下降之外,其于年份都呈增加状态。表明在人为措施下,自然湿地面积正逐年恢复。

3.4.3 水质指数对驱动因子的响应 对溶解氧(C_1)产生明显影响的驱动因子为下游潮位和城市化率,回归系数分别为 0.575 和 0.569。此外,城市化率对其他水质指标均产生不同程度的负面影响。对化学需氧量(C_3)产生明显影响的驱动因子按强弱顺序依次为下游潮位、西北江分流比、污染物入海量,回归系数分别为-1.679、1.331 和-0.886;对氨氮(C_5)产生明显影响的驱动因子按强弱顺序依次为西江年径流量、城市化率和北江年径流量,回归系数分别为-0.87、-0.723 和-0.415,且均产生负面影响;影响总磷(C_6)较大的为城市化率,回归系数为-0.962。

快速城市化在带来巨大经济效益的同时,必然会产生一系列不可避免的水生态问题。但结果显示,城市化率对河流水质整体上起到积极作用。这是因为虽快速城市化导致排放大量生活污水和工业废水,增加了河流中有机污染物的含量(刘畅等, 2019)。但在人口密度对污水排放的负荷不断加重的同时,各市不断提高污水处理能力。至 2019 年,大湾区各市的城市污水处理率基本达到了 97% 及以上。河流水生态状况整体得到有效改善。而由权重结果得,溶解氧是决定河流水质的重要指标。由图 9 可知,人口密度虽与氨氮和总磷含量呈负相关,但对降低溶解氧含量起到了积极作用。这也解释了城市化率对河流水质整体上起到积极作用的潜在原因。



图 9 城市化与河流主要水质指标年际变化图

Fig. 9 Annual changes of urbanization and water quality indicators

3.4.4 水安全指数对驱动因子的响应 对人均水资源量(D_1)产生明显影响的驱动因子只有西北江分流比,近 10 年表现为负面影响,其回归系数为-0.541;对防洪安全(D_2)产生明显影响的驱动因子按强弱顺序依次为污染物入海量、西江年径流量和北江年径流量,回归系数分别为-1.212、1.02 和-0.45,除了西江年径流量外,其余驱动因子均带来负面影响;对地级以上城市集中式饮用水水源地水质达标率(D_3),污染物入海量对其产生负面影响,而下游盐度和城市化率则带来积极影响,回归系数分别为-0.7、0.613 和 0.272;而城市化率和污染物入海量对城市污水处理率(D_4)均产生明显的积极影响,回归系数分别为 0.561 和 0.346;仅下游潮位与广昌含氯度超标天数(D_6)呈较为明显的正相关,回归系数为 1.084。

粤港澳大湾区地处珠江三角洲下游,受径流和潮汐的共同影响,本就面临了严峻的咸潮危害。与此同时,人类不合理活动改变了西北江分流比,增强了上游西、北江来水量的不确定性,一定程度上加剧了大湾区城市洪涝灾害的发生频率。加剧了对供水安全影响的严重程度。但在人类因素的调控下,水文要素的改变和自然灾害未对大湾区水安全造成严重影响。大湾区水安全程度仍不断提高。

4 结论

大湾区建设作为国家重大战略,水生态健康保护成为区域高质量发展的重大问题。本文所得结论对明确生态调控对象,协同内外环境变化对水生态的作用,制定调控方案与管控对策提供思路 and 参考,对提高大湾区水生态管控水平、推进生态文明建设具有重要现实意义。结果表明:

1) 近 10 年来水生态状态虽呈逐渐变好的趋势,但整体上仍处于亚健康状态。2013 年、2015 年和 2018 年水生态状态健康劣于上一年,其中 2015 年水生态状态下降严重,主要归因于当年水质和水生境状态不够理想。2010 年和 2015 年水生态状态较差,主要归因于水安全状态较差。其次是 2011 年、2013 年和 2014 年,水生态状态接近不健康状态。近 10 年水生态状态相对较好的为 2017 年和 2019 年,均体现在水质情况有较大改善。

2) 从水生物指数方面看,近 10 年来的水生物状态不断向好;大湾区水生境近 10 年来一直保持稳定且较为良好的状态;从水质指数方面看,近 5

年来,大湾区主要河流水质情况除2018年变差之外,其他年份得分值均比上一年有所提高;水安全指数也呈波动式上升。

3) 粤港澳大湾区水生态状态反应器对水生态驱动机制进行分析结果表明,西江来水量和下游盐度对水生物状态影响较大;生境指数受城市化的负面影响,但负面影响程度正逐年降低;城市

化进程中不断提高城市污水处理率,同时对咸潮上溯的控制也取得显著成效,对大湾区内主要河流水质产生积极影响;通过治理与管控多措并举,由剧烈的人类活动所造成造成的水文特征演变所带来的负面影响在人为控制的作用下正逐步减轻,大湾区水安全程度不断提高。

参考文献:

- 陈充, 2015. 广东省城市供水安全评价[D]. 广州: 华南理工大学.
- 陈晓宏, 陈永勤, 2002. 珠江三角洲网河区水文与地貌特征变异及其成因[J]. 地理学报, 57(4): 429-436.
- 郭秀锐, 杨居荣, 毛显强, 2002. 城市生态系统健康评价初探[J]. 中国环境科学, 22(6): 525-529.
- 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局, 2002. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社.
- 中华人民共和国环境保护部. 近岸海域环境监测规范: HJ 442—2008[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- 中华人民共和国环境保护部, 2015. 生态环境状况评价技术规范: HJ 192—2015[S]. 北京: 中国环境科学出版社.
- 惠秀娟, 杨涛, 李法云, 等, 2011. 辽宁省辽河水生态系统健康评价[J]. 应用生态学报, 22(1): 181-188.
- 孔红梅, 赵景柱, 马克明, 等, 2002. 生态系统健康评价方法初探[J]. 应用生态学报, 13(4): 486-490.
- 孔兰, 陈晓宏, 2015. 珠江口咸潮影响因素分析[J]. 水资源保护, 31(6): 94-97+134.
- 刘畅, 林绅辉, 焦学尧, 等, 2019. 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), 55(6): 1085-1096.
- 柳喜军, 2007. 北江石角站水文特性分析[J]. 黑龙江科技信息, (22): 35.
- 彭涛, 陈晓宏, 2009. 海河流域典型河口生态系统健康评价[J]. 武汉大学学报(工学版), 42(5): 631-634+639.
- 帅方敏, 李新辉, 黄艳飞, 等, 2017. 珠江水系四大家鱼资源现状及空间分布特征研究[J]. 水生生物学报, 41(6): 1336-1344.
- 徐林春, 2014. 人类活动影响下的珠江三角洲水安全研究[D]. 武汉: 武汉大学.
- 杨丰顺, 邵东国, 肖淳, 等, 2011. 武汉城市圈水安全评价指标体系与标准[C]//河湖水生态水环境专题论坛论文集. 武汉: 99-105.
- FELD C K, SEGURADO P, GUTIÉRREZ-CÁNOVAS C, 2016. Analysing the impact of multiple stressors in aquatic biomonitoring data: A 'cookbook' with applications in R [J]. *Sci Total Environ*, 573: 1320-1339.
- WANG S, LIU Z, CHEN Y, et al, 2021. Factors influencing ecosystem services in the Pearl River Delta, China: Spatiotemporal differentiation and varying importance [J]. *Resour Conserv Recycl*, 168: 105477.
- YANG C, ZHANG C, LI Q, et al, 2020. Rapid urbanization and policy variation greatly drive ecological quality evolution in Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area of China: A remote sensing perspective [J]. *Ecol Indic*, 115: 106373.

(责任编辑 秦社彩)