

DOI: 10.5846/stxb202101120115

陈金月, 陈水森, 付晓, 尹小玲, 王重洋, 李丹, 彭咏石. 广东省水质现状及驱动因素. 生态学报, 2022, 42(19): 7921-7931.

Chen J Y, Chen S S, Fu R, Yin X L, Wang C Y, Li D, Peng Y S. Analysis of water quality status and driving factors in Guangdong Province. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 7921-7931.

广东省水质现状及驱动因素

陈金月^{1,2,3}, 陈水森^{1,3,*}, 付 晓¹, 尹小玲¹, 王重洋¹, 李 丹¹, 彭咏石¹

1 广东省科学院广州地理研究所, 广东省遥感大数据应用工程技术研究中心, 广东省遥感与地理信息系统重点实验室, 广东省地理空间信息技术与应用公共实验室, 广州 510070

2 山东大学环境研究院, 青岛 266237

3 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

摘要: 水质现状评估及其驱动因素分析是实现水生态保护、水资源利用和水污染治理的关键, 对于水生态系统的可持续发展具有重要意义。以广东省七大流域为研究区, 基于 2019—2020 年间的溶解氧 (DO)、透明度 (SDD)、悬浮物 (SPM)、叶绿素 a (Chla)、氨氮 (NH₃N)、总氮 (TN)、总磷 (TP) 7 个指标的水质监测数据, 综合运用单因子指数法 (SI) 和综合水质指数 (WQI) 评价方法, 分丰水期 ($N=66$) 和枯水期 ($N=54$) 评估研究区的水质现状, 并探讨水质参数与地形、气象、社会经济和土地覆被类型等驱动因素之间的相关关系。SI 评估结果显示广东七大流域主要以工业污水、农业面源等造成的 Chla 和 TN 浓度超标、部分水体富营养化严重为主, 同时伴有溶解氧浓度偏低的问题; WQI 评估结果显示研究区有 57% 以上的采样点属于中等以下水质。Chla、SPM、NH₃N 和 TP 浓度具有显著的季节和驱动因素差异: 丰水期的 Chla 和 TP 浓度低于枯水期, 但 SPM 和 NH₃N 浓度高于枯水期。枯水期 DO、TN 和 WQI 的显著性影响因子为丰水期的 1/3 左右; 这种季节差异可能是流域内降雨、营养盐负荷和土地覆被类型导致的复杂地表径流及面源污染所致。珠江三角洲河网区、粤西诸河、韩江下游以及粤东诸河练江流域的水质问题突出。未来水生态系统的可持续发展研究可以借助长时间序列、多频次、高分辨率的遥感监测手段和多种数值模拟方法以及常规水质评估模型, 探讨气候变化、河岸带产业结构和流域土地利用方式对面源污染的影响, 以进一步厘清降雨强度、三产结构和土地利用方式转变对区域水质变化的影响。

关键词: 水生态系统, 水质评价, 驱动机制, 面源污染, 土地覆被

Analysis of water quality status and driving factors in Guangdong Province

CHEN Jinyue^{1,2,3}, CHEN Shuisen^{1,3,*}, FU Rao¹, YIN Xiaoling¹, WANG Chongyang¹, LI Dan¹, PENG Yongshi¹

1 Research Center of Guangdong Province for Engineering Technology Application of Remote Sensing Big Data, Guangdong Provincial Key Laboratory of Remote Sensing and Geographical Information System, Guangdong Open Laboratory of Geospatial Information Technology and Application, Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China

2 Environment Research Institute, Shandong University, Qingdao 266237, China

3 Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

Abstract: Water quality evaluation and driving forces analysis, two key factors to achieve ecological protection, resource utilization, and pollution control of water, are pivotal to the sustainable development of aquatic ecosystem. We utilized the *in-situ* experiment data of seven water quality parameters-dissolved oxygen (DO), transparency (Secchi disk depth, SDD), suspended particulate matters (SPM), chlorophyll a (Chla), ammonia nitrogen (NH₃N), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP)-which were collected from seven major basins in Guangdong Province during 2019—2020. This

基金项目: 广东省科技计划项目 (2018B030320002, 2019A050506001); 广东省自然科学基金项目 (2018B030311059, 2021A1515012579)

收稿日期: 2021-01-12; **网络出版日期:** 2022-05-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: css@gdas.ac.cn

paper evaluates the water quality status of Guangdong Province in the high-flow season (HFS, $N=66$) and low-flow season (LFS, $N=54$) using the single factor index method (SI) and the comprehensive water quality index (WQI). The correlation between water quality parameters and driving factors, such as topography, meteorology, socio-economic and land cover types, were analyzed using Pearson correlation coefficient. The SI-based evaluation results show that the seven basins in Guangdong province are mainly faced with problems such as exceeding standard of Chla and TN concentration, and low DO concentration, which were caused by industrial sewage and agricultural non-point sources. The WQI evaluation results show that 57% of the sampling points in the study area are below the moderate level. The concentrations of Chla, SPM, NH_3N and TP have significant differences in water period and driving factors; the concentrations of Chla and TP in HFS are lower than that in LFS, but the concentrations of SPM and NH_3N are opposite in the two periods. The number of significant factors affecting the evaluation results of DO, TN, and WQI in LFS is about 1/3 of those in HFS. The seasonal difference is caused by the changes of complicated surface runoff and non-point source pollution, such as precipitation, nutrient load and land cover types in the basins. Water quality problems are prominent in the river network area of the Pearl River Delta, the lower reaches of the Hanjiang River, the rivers in western Guangdong, and the Lianjiang Basin of the eastern Guangdong. The water quality problems in the Pearl River Delta and the West River are mainly exceeded concentrations of TN and SPM. The main water quality problem of North River and East River is high TN concentration. The rivers in western Guangdong have insufficient DO, low SDD, and high concentrations of Chla and NH_3N . The conditions of TN and DO for some sampling points in the rivers of eastern Guangdong and the Hanjiang River are not optimistic. In the future, the integrated methods combining remote sensing monitoring, numerical simulation, and regular water quality evaluation models should be enhanced to explore the effects of non-point source pollution from climate change, riparian industrial structure, and adjustment of watershed land cover patterns. These integrated methods can help to further clarify the water quality impact of changes in rainfall intensity, production structure, and land cover patterns, which greatly promote the sustainable development of aquatic ecosystems.

Key Words: aquatic ecosystem; water quality evaluation; driving mechanism; non-point source pollution; land cover

水是生态系统的中心,是生命之源、生产之要、生态之基^[1]。据统计,过去一个世纪,全球用水量增长了6倍,并且以每年约1%的速度增长^[2]。然而,随着社会经济快速发展和全球气候变化加剧,水资源短缺、水环境污染、水生态退化、水灾害频发和水管理滞后等5个问题复杂交叉,严重限制了水资源的可持续发展,人类与水资源的冲突愈演愈烈^[3-4]。大量工、农业废水和生活污水随地表径流持续不断地进入到河流中,致使水质急剧恶化^[5-7];气候变化引起的全球水循环加剧、气温升高,也通过改变水体的温度、蒸发量和水生态系统的初级生产力等加剧了水体富营养化等水污染现象^[8-9]。亚洲、非洲和拉丁美洲几乎所有河流的水环境均在恶化,预计未来几十年水质仍将进一步恶化^[2],亟需通过评估河流所在流域的水质现状及其主要驱动因素来厘清水质变化对社会经济、土地覆被和气候变化之间的响应机制^[5-9]。

流域水质评估得到了联合国^[2]、美国^[10]、欧盟^[11,12]和中国^[13-15]等世界主要组织和国家的重视^[16-22]。当前,流域水质评估通过对河流理化、营养盐和生物等指标按一定的评价标准,对实测数据进行计算,进而对河流水质进行定性或定量的评估^[6,23-25]。单因子指数法(SI)^[24]和综合水质指数(WQI)^[26]等方法被广泛应用。SI方法根据国家环境保护总局颁布的标准计算不同水质指标相对标准值的比值,计算简单,但不同水质参数计算公式不一致,可能造成评估结果片面^[6]。WQI方法结合以往研究的先验知识来确定水质参数的评估标准,其评价结果更为客观,且评估结果的层次划分丰富、层间差异清晰,拥有较强的实用性^[26]。虽然两种方法的评价标准不同,评估结果也不尽相同,但两者结合可以从新的高度评估研究区水质状况及其时空特征。因此,很多时候需要综合使用两种方法对水质状况进行多粒度的评估。

广东省淡水资源总量较多,但人口众多、水质污染严重,人均可用淡水资源严重不足^[15,21,26]。粤港澳大

湾区蓬勃发展的形势下,广东省的淡水资源面临巨大压力,水质状况尤为严峻;但关于淡水资源的质量评估及驱动力分析的研究仍然不足,亟待加强。因此,本研究基于 2019—2020 年广东省七个流域的现场采样数据,分丰水期和枯水期,通过 SI 和 WQI 方法对广东省的主要河流及其污染现状进行全面评估,并就主要影响因素和驱动机制进行分析,为广东省珠江三角洲、粤东西北的水生态健康发展提供科学支撑。

1 研究区概况

本文研究区为广东省的七大流域(位于 $20^{\circ}13'12''$ — $25^{\circ}30'12''$ N, $109^{\circ}39'26''$ — $117^{\circ}10'53''$ E, 如图 1 所示), 包括北江流域、东江流域、西江流域、珠江三角洲河网区、粤西诸河, 以及韩江流域和粤东诸河。行政区划上, 主要包括广州、深圳、佛山、东莞等 21 个地级市, 面积 179700 km^2 。

研究区地貌类型复杂、北高南低, 海拔在 0 和 1888 m 之间变化, 以丘陵、平原和台地为主, 粤北和粤东山区地形起伏大。研究区属于亚热带季风气候, 水文季节和地区差异显著^[26]: 一般情况下, 丰水期约占全年降水量的 70%—85%; 同时, 降雨的年际差异也较大, 最大年降水量是最小年的 1.84 倍, 个别地区甚至达到 3 倍。多年平均降雨量和平均气温分别为 1777 mm 和 22°C , 折合年均降水量为 3145 亿 m^3 。

研究区人口密度和城市化率高。据统计, 2017 年, 广东省在 1.80% 的国土面积上养育了 8.90% 的人口 (1.17 亿人), 创造了 93436.29 亿元 GDP (占中国 GDP 的 $1/8$)^[27]。但由于研究区人水矛盾突出, 其水生态系统异常脆弱和敏感^[28]。当前, 广东省淡水资源正面临着水资源可持续利用能力不足的巨大威胁^[15, 21, 26]。例如, 以香港、澳门和珠江三角洲的政治、生活和经济用水而闻名的珠江水质退化明显, 并经常面临诸多的水污染问题, 已得到国家各个层面的水利、环保和农业部门的重视。

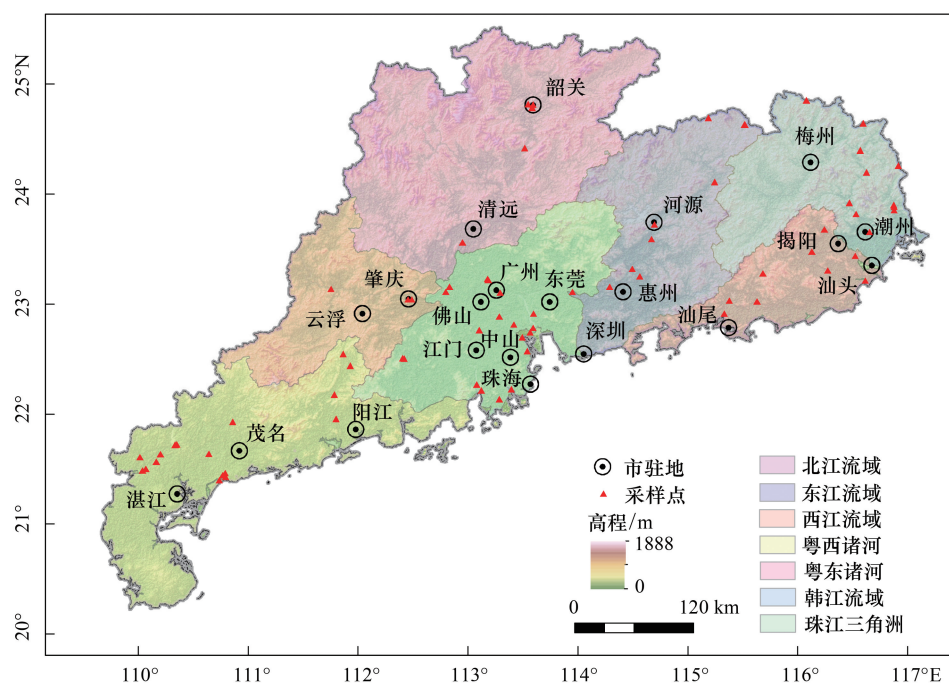


图 1 研究区概况及采样点位置

Fig.1 The location map of the study area and sampling points

2 研究方法与材料

2.1 数据来源及处理

主要数据及其来源如下: (1) 水质数据来源于 2019—2020 年间的现场采样和室内分析, 主要包括溶解氧 (DO)、叶绿素 a (Chla)、氨氮 (NH_3N)、总氮 (TN)、总磷 (TP)、透明度、悬浮物 (SPM); (2) 气象数据来源于中

国气象数据中心 (<http://data.cma.cn/>) 和广东省各地国家气象观测站点 2014—2017 年间的统计数据; (3) 高程数据为 30 m×30 m 空间分辨率的 DEM 数据, 下载自地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>); (4) 土地覆被数据来源于清华大学地球系统科学系发布的 FROM-GLC10 产品 (<http://data.ess.tsinghua.edu.cn/>)^[29], 空间分辨率为 10 m×10 m; (5) 社会经济数据来源于广东省各城市的统计年鉴以及国民经济和社会发展统计公报。

本研究中, 依据分层采样原则^[6], 分丰水期和枯水期对广东省主要河流进行采样, 样点较均匀地分布在广东省七大流域的上、中、下游, 基本涵盖了研究区内不同水质现状和水文特征的主要水系, 保证了水质采样点的代表性, 为客观评估广东省水质现状提供了基本保证, 各个流域采样点及其采样时间见图 1 和表 1。受新冠疫情影响, 西江流域和部分珠江三角洲河网区枯水期的水样未采集。水样采集参照《地表水环境质量标准》(GB3838—2002) 规范进行。DO 使用便携式水质检测分析仪 (YSI) 对水面下 25 cm 处的水体进行现场测量。透明度使用塞氏盘法 (Secchi depth disk, SDD) 进行现场测量。Chla、NH₃N、TN、TP 和 SPM 等水质参数在实验室内测量, 样品均在避光、低温的环境下存储。Chla、NH₃N、TN 和 TP 的测定方法分别为《水质 叶绿素 a 的测定 分光光度法》(HJ897—2017)《水质 氨氮的测定 水杨酸分光光度法》(HJ536—2009)《水质 总氮的测定 流动注射-盐酸萘乙二胺分光光度法》(HJ 668—2013) 和《水质 磷酸盐和总磷的测定 连续流动-钼酸铵分光光度法》(HJ670—2013), 它们均属于分光光度法, 主要区别在于预处理程序、加入的显色液种类和含量、用于测量水体吸光度的波段和对照液等四个方面。SPM 采用《水质 悬浮物的测定重量法》(GB11901-89) 来测定。

表 1 各流域采样点数量及其采集时间统计

Table 1 Statistics of sampling points and their collection time in the basins

流域 Basin	丰水期采样点 Samples in high flow season (HFS)		枯水期采样点 Samples in low flow season (LFS)	
	数量 Number	采样时间 Sampling time	数量 Number	采样时间 Sampling time
北江流域 North River Basin	4	2019 年 7 月 24 日—25 日	7	2020 年 1 月 3 日—4 日
东江流域 East River Basin	7	2019 年 7 月 23 日—24 日	10	2020 年 1 月 8 日—10 日
西江流域 West River Basin	2	2019 年 8 月 27 日—28 日	/	/
粤西诸河 Rivers in western Guangdong	19	2019 年 6 月 13 日—20 日	18	2019 年 10 月 13 日—20 日
粤东诸河 Rivers in eastern Guangdong	9	2019 年 8 月 19 日—21 日	12	2020 年 04 月 29 日—30 日
韩江流域 Han River Basin	8	2019 年 8 月 22 日—23 日	5	2020 年 4 月 30 日—5 月 1 日
珠江三角洲 The Pearl River Delta	17	2019 年 8 月 28 日—30 日	2	2020 年 1 月 3 日
总计 Total	66	/	54	/

2.2 评估方法

2.2.1 SI 评估方法

单因子指数法 (SI)^[23,24] 根据水质参数相对标准值的比值进行评估, 可以分为两类: (1) 水质随参数值增加而下降的因子, 水质参数主要包括 Chla、NH₃N、TN、TP 和 SPM, 其计算公式如式 (1) 所示; (2) 水质随参数值增加而改善的因子, 主要包括 DO 和 SDD, 其计算公式如式 (2) 所示。

$$P_i = \frac{h_i}{S_i} \quad (1)$$

$$P_i = \frac{h_{\max} - h_i}{h_{\max} - S_i} \quad (2)$$

式中, P_i 是水质参数 i 的污染指数, h_i 是水质参数 i 的实测值, $h_{\max}$ 是该评价因子饱和浓度, S_i 是评价标准最高限值, 等于地表水质标准 (GB3838—2002) 中的 II 类水标准; DO 的饱和浓度为 $\frac{468}{31.6 + T}$, T 为温度, 单位为℃^[23]。

2.2.2 WQI 评估方法

综合水质指数(WQI)是一种知识驱动型的评价方法,各个水质参数的划分及其权重根据先验知识来确定^[6,23,30—33]。其计算如式(3)所示。

$$WQI = \frac{\sum_{i=1}^n H_i \times P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

(3)

式中,WQI 为综合水质指数, H_i 为第 i 个水质参数标准化值, P_i 是第 i 个水质参数的权重, n 为参与评价的水质参数个数。WQI 的阈值在 $[0,100]$ 之间,WQI 越大,水质质量越好;采用等分法将河流水质划分为优、良、中、差、极差五个等级(表 2)。

表 2 综合水质指数方法各水质参数等级划分及其权重

Table 2 Classification and weights of water quality parameters in WQI method

指标 Indicators	权重 Weight	等级划分 Classification										
		100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
溶解氧 Dissolved oxygen(DO)/(mg/L)	4	≥7.5	>7.0	>6.5	>6.0	>5.0	>4.0	>3.5	>3.0	>2.0	≥1.0	<1.0
塞氏盘法(Secchi disk depth,SDD) 测得的透明度/cm	3	>300.0	>200.0	>150.0	>125.0	>100.0	>75.0	>50.0	>22.0	≥15.0	≥8.0	<8.0
悬浮物 Suspended particulate matters (SPM)/(mg/L)	3	<10.0	<15.0	<20.0	<25.0	<30.0	<40.0	<50.0	<60.0	<70.0	≤100.0	>100.0
叶绿素 a Chlorophyll a(Chla)/(μg/L)	3	<1.0	<4.0	<7.0	<10.0	<15.0	<20.0	<30.0	<40.0	<50.0	≤65.0	>65.0
氨氮 Ammonia nitrogen(NH ₃ N)/(mg/L)	3	<0.01	<0.05	<0.10	<0.20	<0.30	<0.40	<0.50	<0.75	<1.00	≤1.25	>1.25
总氮 Total nitrogen(TN)/(mg/L)	3	<0.10	<0.20	<0.35	<0.50	<0.75	<1.00	<1.25	<1.50	<1.75	≤2.00	>2.00
总磷 Total phosphorus(TP)/(mg/L)	3	<0.01	<0.02	<0.05	<0.10	<0.15	<0.20	<0.25	<0.30	<0.35	≤0.40	>0.40

2.3 驱动力分析

驱动力分析是深化水质时空分布规律的核心工作之一,是河流治理和保护的理论基础。本着可操作性、科学性和可度量性的原则,结合广东省河流污染现状,选择地形、气象、社会经济和土地覆被类型四大要素对广东省主要河流的水质分布规律进行探讨,各要素的度量因子选取如下:

(1)地形:高程、坡度、坡向等通过影响流域的水热分布和植被生长状况来影响降雨和地表径流,从而进一步影响流域非点源污染的产生和输移^[21,34,35]。广东省河道纵横交错,各流域地形地貌差异大;因此,本文选择高程、坡度和坡向因子探讨地形对水质分布规律的影响。

(2)气象:广东省降雨、蒸发和温度的年际和地区差异大,水文季节明显。温度制约着流域的气候和水生环境等自然条件,通过初级生产力进一步影响水生生态系统,是影响河流水质的重要因素;降雨和蒸发量是影响流域水资源承载力的最直接因素,是决定河流水质状况的关键因素^[4,8,9]。因此,本文选择温度、多年平均降雨量和年蒸发量因子来探讨气象对水质分布规律的影响。

(3)社会经济:工农污水排放量大、产业结构不合理是流域水质恶化的直接原因;将人口密度、产业结构等社会经济指标作为水质现状的驱动因素已成为学术界的普遍共识^[22,36]。因此,本文选择人口密度,人均GDP,总污水排放量,猪肉出栏量、禽类产量、水产品产量,一、二、三产业占比,化肥和农药使用量因子来探讨社会经济对水质分布规律的影响。

(4)土地覆被类型:河流是土地覆被类型的重要组成部分,其水质受到流域土地覆被类型占比的重要影响^[37]。当前,点源污染得到有效控制,非点源污染成为了影响河流水质的重要原因。几乎所有的非点源污染都与土地覆被类型等下垫面的变化紧密相关^[38,39],土地覆被通过影响流域的生态功能和入河污染物的排放而影响河流的水质状况^[21]。经过采样点水质参数与不同距离缓冲区内土地覆被类型占比的相关性分析,选择与水质参数浓度相关性较高的 12 km 缓冲区作为土地覆被类型占比的统计单元,并探讨其对水质分布规律的影响。

3 广东省水质现状

3.1 SI 单因子方法评估结果分析

丰水期和枯水期各水质参数的描述性统计结果(表3)显示:丰水期和枯水期的水质参数均呈现出显著差异,水质变化幅度较大。SPM、Chla 和 TP 的季节差异较大,丰水期 SPM 的平均浓度(80.55 mg/L)是枯水期(26.01 mg/L)的 3.10 倍,但丰水期 Chla 和 TP 的平均浓度为枯水期的 1/2 左右。NH₃N 和 TN 的浓度变化也具有较为明显的季节差异,丰水期两个水质参数的浓度要显著高于枯水期。丰水期各采样点的 SDD 变化幅度较枯水期大,标准差(31.78 cm vs. 27.39 cm)和变异系数(0.48 vs. 0.32)均大于枯水期。

表 3 水质参数描述性统计
Table 3 Descriptive statistics of water quality parameters

指标 Indicators	丰水期 HFS			枯水期 LFS			<i>t</i>
	均值(标准差) Mean (Std.)	范围 Range	变异系数 CV	均值(标准差) Mean (Std.)	范围 Range	变异系数 CV	
DO/(mg/L)	5.09 (1.72)	1.62—9.10	0.31	4.98 (1.77)	2.59—8.56	0.35	0.94
SDD/cm	55.00 (31.78)	36.00—180.00	0.48	85.17 (27.39)	50.00—164.00	0.32	-4.48 **
SPM/(mg/L)	80.55 (66.57)	1.30—321.80	0.83	26.01 (39.46)	1.20—243.00	1.52	5.74 ***
Chla/(μg/L)	3.44 (4.77)	0.35—20.11	1.39	8.66 (13.94)	0.52—50.34	1.61	-8.88 ***
NH ₃ N/(mg/L)	0.59 (0.65)	0.01—9.10	1.11	0.45 (1.00)	0.03—6.83	2.24	-20.65 ***
TN/(mg/L)	1.94 (0.94)	0.66—4.86	0.48	1.89 (1.45)	0.58—10.53	0.77	9.12 ***
TP/(mg/L)	0.05 (0.04)	0.01—0.20	0.79	0.10 (0.11)	0.01—0.55	1.07	-11.55 ***

对丰水期(*N*=66)和枯水期(*N*=54)的样本进行独立样本 *t* 检验, **P* < 0.1, ***P* < 0.05, ****P* < 0.01

SI 单因子评估结果显示(图2):除 DO 和 SDD 外,研究区 SPM、Chla、NH₃N、TN 和 TP 等 5 个污染指标具有明显的水文季节差异,Chla 的季节变化最大,SPM 次之,TP 随后。其中,Chla 和 TP 污染指数呈现丰水期小于枯水期的分布趋势;SPM、NH₃N 和 TN 等 3 个指标相反,丰水期的污染指数大于枯水期。在丰水期,主要的污染指标为 TN、Chla、SPM 和 DO,污染指数分别为 3.88、2.15、1.61 和 1.58。相应地,枯水期的主要污染指标为 Chla、TN、DO 和 SDD,污染指数分别为 5.42、3.77、1.58 和 1.30。因此,选择丰水期和枯水期污染程度均较为严峻的 Chla、TN 和 DO 等三个水质参数展开宏观尺度上的水质综合评估及影响因素分析。

3.2 WQI 方法评估结果分析

WQI 方法评估结果(图3和图4)表明:广东省丰水期和枯水期的 WQI 指数分别为 45 和 53,各个流域的水质状况不容乐观;除韩江流域外,丰水期的水质污染较枯水期更为严峻,韩江下游、粤东诸河和粤西诸河三个流域的季节差异最为明显。丰水期,全省 71% 采样点的 WQI 指数在 60 以下,属于中等以下水质;同时有 21% 采样点的 WQI 指数在 40 以下,属于较差水质。枯水期,全省有 57% 采样点 WQI 指数在 60 以下,属于中等以下水质;同时有 24% 采样点的 WQI 指数在 40 以下,属于较差水质。

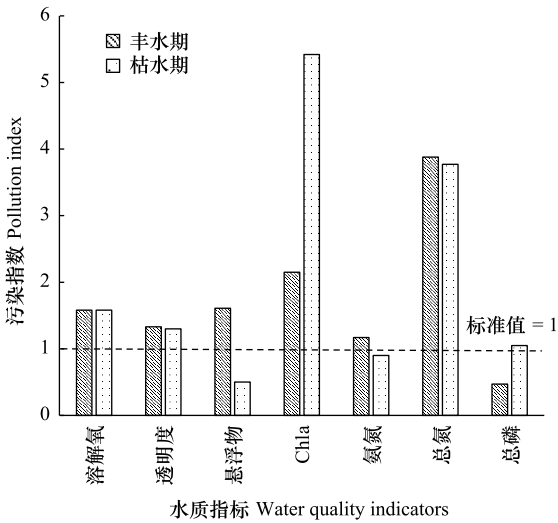


图 2 单因子污染指数(丰水期 *N*=66, 枯水期 *N*=54)
Fig.2 Single factor pollution index (High flow season: *N*=66; Low flow season: *N*=54)

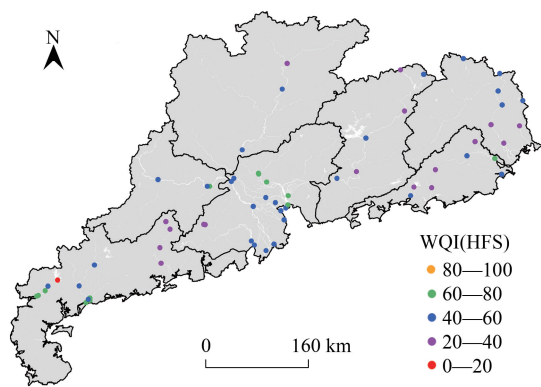


图3 丰水期采样点及其综合水质指数评估结果的空间分布
Fig.3 Spatial distribution of sampling points and their WQI evaluation degrade in high flow season

HFS: 丰水期 High flow season;LFS:枯水期 Low flow season

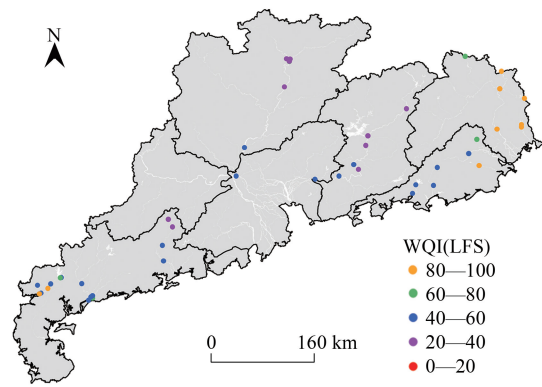


图4 枯水期采样点及其综合水质指数评估结果的空间分布
Fig.4 Spatial distribution of sampling points and their WQI evaluation degrade in low flow season

4 驱动因素分析

WQI 的评估结果显示:研究区的水质状况不容乐观,有 57%以上的采样点属于中等以下水质,尤其是粤西诸河、粤东诸河、珠江三角洲河网区以及韩江下游的水质亟需治理和保护。选择丰水期和枯水期水质问题均较突出的 DO、Chla 和 TN 等三种常用水质参数的浓度,以及 WQI 综合水质评价指数与地形、气象、社会经济和土地覆被类型等四类驱动因素进行 Pearson 相关性分析^[23],结果如表 4 所示。

表 4 水质参数与驱动因素的 Pearson 相关性分析结果

Table 4 Pearson correlation analysis of water quality parameters and driving factors

驱动因子 Driving factors	DO		Chla		TN		WQI	
	HFS	LFS	HFS	LFS	HFS	LFS	HFS	LFS
Elevation	0.08	-0.09	-0.18	-0.18	-0.04	0.10	0.28 **	-0.32 *
Aspect	-0.03	0.05	-0.03	-0.19	0.02	-0.06	0.12	0.18
Slope	0.03	0.28	-0.14	-0.11	-0.18	-0.21	0.26 **	0.17
Pre_LFS	-0.11	0.36 **	-0.50 ***	-0.56 ***	-0.05	-0.08	0.16	0.41 **
Pre_HFS	-0.31 **	0.04	-0.16	-0.15	0.07	-0.23	-0.22 *	0.47 ***
Ave_Ann_Pre	-0.33 ***	0.19	-0.40 ***	-0.50 ***	0.04	-0.21	-0.12	0.62 ***
Tem_LFS	0.13	-0.13	0.52 ***	0.62 ***	0.16	-0.12	-0.29 **	-0.10
Tem_HFS	0.07	0.05	0.47 ***	0.65 ***	0.23 *	-0.17	-0.36 ***	0.03
Ave_Ann_Tem	0.11	-0.06	0.51 ***	0.64 ***	0.19	-0.14	-0.32 **	-0.05
Eva_LFS	-0.13	-0.19	0.16	0.07	0.22 *	/	-0.31 **	0.07
Eva_HFS	-0.26 *	-0.02	-0.35 ***	-0.41 **	0.11	0.22	-0.13	-0.05
Ave_Ann_Eva	-0.07	0.06	-0.17	-0.38 **	-0.01	0.19	-0.04	-0.01
Pop_Den	-0.43 ***	-0.26	-0.10	0.11	0.38 ***	-0.05	-0.35 ***	0.04
GDP	-0.39 ***	0.27	-0.12	-0.19	0.23 *	-0.08	-0.32 **	-0.33 *
GDP_per_Cap	-0.24 *	0.08	-0.25 *	0.06	0.15	-0.07	-0.25 *	-0.34 **
Tot_Sew_Dis	-0.38 ***	0.29 *	-0.09	0.24	0.18	-0.06	-0.28 **	0.27
Ind_Sew_Dis	-0.32 **	0.24	-0.08	-0.20	0.14	0.36 **	-0.25 *	0.16
Urb_Sew_Tre	-0.34 **	0.36 **	-0.31 **	0.65 ***	0.18	-0.12	-0.18	0.42 **
Pork_Pro	0.38 ***	0.38 **	0.60 ***	0.20	-0.15	0.01	-0.01	0.09
Pou_Pro	0.20	-0.02	0.32 **	0.54 ***	-0.10	0.13	-0.01	0.20
Aqua_Pro	0.19	-0.03	0.27 **	0.30 *	/	0.13	-0.08	-0.13

续表

驱动因子 Driving factors	DO		Chla		TN		WQI	
	HFS	LFS	HFS	LFS	HFS	LFS	HFS	LFS
Pri_Ind_Pro	0.33 **	0.15	0.25 *	0.18	-0.18	-0.07	0.26 **	-0.36 **
Sec_Ind_Pro	0.01	-0.14	0.16	-0.50 ***	-0.10	-0.01	-0.08	0.12
Ter_Ind_Pro	-0.23 *	0.26	-0.31 **	0.75 ***	0.21	-0.03	-0.08	0.15
Fert_Use	0.31 **	0.19	0.62 ***	0.68 ***	-0.14	0.13	-0.06	-0.06
Pest_Use	0.35 ***	0.23	0.67 ***	0.65 ***	-0.15	-0.08	-0.04	-0.14
Crop_Pro	0.07	0.06	0.63 ***	-0.39 **	0.20	-0.12	-0.34 ***	0.11
Forest_Pro	0.44 ***	-0.32 **	-0.22 *	0.31 *	-0.43 ***	0.08	0.62 ***	-0.01
Grass_Pro	-0.12	-0.27	0.48 ***	-0.12	0.36 ***	-0.07	-0.41 ***	-0.41 **
Shrub_Pro	0.15	0.04	0.03	0.15	-0.24 *	-0.36 **	0.31 **	-0.22
Wet_Pro	-0.34 **	-0.13	-0.24 *	0.01	0.19	0.24	0.31 **	-0.13
Water_Pro	-0.33 **	-0.18	-0.09	-0.06	0.19	0.09	0.31 **	-0.04
Imp_Sur_Pro	-0.51 ***	-0.11	-0.23 *	-0.13	0.35 ***	0.64 ***	-0.43 ***	0.03
Bare_Pro	-0.34 **	-0.34	-0.11	-0.11	0.15	0.15	-0.29 **	-0.16

* $P < 0.10$, ** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$; HFS: 丰水期 High flow season; LFS: 枯水期 Low flow season; Elevation: 高程; Slope: 坡度; Aspect: 坡向;

Pre_LFS: 枯水期降雨量 Precipitation in LFS; Pre_HFS: 丰水期降雨量 Precipitation in HFS; Ave_Ann_Pre: 年均降雨量 Average annual precipitation; Tem_LFS: 枯水期温度 Temperature in LFS; Tem_HFS: 丰水期温度 Temperature in HFS; Ave_Ann_Tem: 年均温度 Average annual temperature; Eva_LFS: 枯水期蒸散发量 Evapotranspiration in LFS; Eva_HFS: 丰水期蒸散发量 Evapotranspiration in HFS; Ave_Ann_Eva: 年均蒸散发量 Average annual evapotranspiration; Pop_Den: 人口密度 The population density; GDP: 国内生产总值 Gross domestic product; GDP_per_Cap: 人均 GDP; Tot_Sew_Dis: 总污水排放量 Total sewage discharge; Ind_Sew_Dis: 工业污水排放量 Industrial sewage discharge; Urb_Sew_Tre: 城市污水处理率 Urban sewage treatment rate; Pork_Pro: 猪肉产量 Pork production; Pou_Pro: 禽类产量 Poultry production; Aqua_Pro: 水生产品产量 Production of aquatic products; Pri_Ind_Pro: 第一产业占比 Proportion of primary industry; Sec_Ind_Pro: 第二产业占比 Proportion of secondary industry; Ter_Ind_Pro: 第三产业占比 Proportion of tertiary industry; Fert_Use: 化肥使用量 Fertilizer usage; Pest_Use: 农药使用量 Pesticide usage; Crop_Pro: 耕地面积占比 Proportion of cropland area; Forest_Pro: 林地面积占比 Proportion of forest area; Grass_Pro: 草地面积占比 Proportion of grassland area; Shrub_Pro: 灌木地面积占比 Proportion of shrubland area; Wet_Pro: 湿地面积占比 Proportion of wetland area; Water_Pro: 水域面积占比 Proportion of water area; Imp_Sur_Pro: 不透水面面积占比 Proportion of impervious surface area; Bare_Pro: 裸地面积占比 Proportion of bare land area

4.1 DO 驱动因素分析

丰水期 DO 浓度与不透水面面积占比 ($r = -0.51, P < 0.01$)、人口密度 ($r = -0.43, P < 0.01$) 和丰水期蒸散发量 ($r = -0.26, P < 0.10$) 等 14 个指标呈显著负相关; 同时, 与林地面积占比 ($r = 0.44, P < 0.01$) 和第一产业比重 ($r = 0.33, P < 0.05$) 等 5 个指标呈显著正相关。枯水期 DO 浓度的驱动因子相对简单, 与林地面积占比 ($r = -0.32, P < 0.05$) 呈显著负相关; 与枯水期降雨量 ($r = 0.36, P < 0.05$)、城市污水处理率 ($r = 0.36, P < 0.05$) 等 4 个指标呈显著正相关。

土地覆被类型、人口密度、GDP、污水排放量、降雨量、猪肉产量等指标是影响水体 DO 浓度的关键因素。相对枯水期, 丰水期 DO 浓度变化的机理更为复杂, 影响因子众多, 与其相关的指标高达 19 个; 而枯水期的影响因子有 5 个, 不足丰水期的 1/3。另外, 需要注意的是, 降雨量具有显著的季节差异, 在丰水期, 降雨量对 DO 浓度无显著的提升作用; 然而, 在枯水期, 降雨量对 DO 浓度的提升却较为显著, 这可能与流域内降雨强度带来的水体自净能力变化以及复杂地表径流导致的面源污染程度不同有关。未来, 应完善水质远程在线监控系统, 提高水质和相关驱动因子的监测频度和范围, 结合无人机、卫星遥感大数据挖掘不同时期、不同情景下的水环境主要影响因素, 提高水污染追溯和应急管理水平和保障饮用水安全, 不断减轻人类活动对水生态环境的影响。

4.2 Chla 驱动因素分析

丰水期 Chla 浓度与年均降雨量 ($r = -0.40, P < 0.01$)、城市污水处理率 ($r = -0.31, P < 0.05$)、第三产业比重 ($r = -0.31, P < 0.05$) 和湿地面积占比 ($r = -0.24, P < 0.10$) 等 9 个指标呈显著负相关; 同时, 与化肥使用量 ($r =$

0.62, $P < 0.01$)、耕地面积占比($r = 0.63, P < 0.01$)、丰水期温度($r = 0.47, P < 0.01$)和禽类产量($r = 0.32, P < 0.05$)等 11 个指标呈显著正相关。枯水期 Chla 浓度的主要驱动因子与丰水期无明显差异,但影响幅度更大。这种 Chla 的水文季节差异可能是由于枯水期降雨量较低,河流稀释能力下降,但工农业污水排放的丰富营养盐导致浮游植物大量繁殖产生。

温度、降雨量以及农药化肥的使用量等指标是影响水体 Chla 浓度的关键因素。Chla 浓度与温度存在较高的正相关性,这是由于浮游植物生长、体内酶活性和代谢速率受到温度较大影响有关,主要表现为光合作用增强、生物量升高^[40]。同时,随着点源污染逐步得到控制,以农业生产、禽畜养殖带来的农业面源污染已成为了 Chla 浓度增高和水体富营养化的重要因素,这与前人的研究结果一致^[17,18,21]。这表明广东省的农业生产集约化程度以及绿色发展能力仍然不足,仍需要大量的农药、化肥使用。可以尝试借助物质循环和能量平衡,依靠水生植物的光合作用,将大量营养盐转化为水生植物的初级生产力加以利用,促进以改善水质、优化水环境为主要目标的“环保资源化产业”^[17]。

4.3 TN 驱动因素分析

丰水期 TN 浓度与林地面积占比($r = -0.43, P < 0.01$)和灌木面积占比($r = -0.24, P < 0.10$)等 2 个指标呈显著的负相关;同时,与人口密度($r = 0.38, P < 0.01$)、草地面积占比($r = 0.36, P < 0.01$)、丰水期温度($r = 0.23, P < 0.10$)等 6 个指标呈显著正相关。枯水期 TN 浓度的驱动机制较为简单:与灌木面积占比($r = -0.36, P < 0.05$)呈显著负相关;与不透水面面积占比($r = 0.64, P < 0.01$)和工业污水排放量($r = 0.36, P < 0.05$)等 2 个指标呈显著正相关。

居民生活和工业发展的氮营养盐排放以及不透水面增多加剧的面源污染是 TN 浓度过高的主要原因。居民生活排放的大量污水和工农业生产使用的化肥、农药、石油等造成水体富营养化;据统计,广东省 2017 年折纯后的化肥使用总量为 258 万吨。大量的化肥被施用到农田里,其中约有 55%—75%的氮和磷没有被作物吸收,其中一部分最终还会进入水体,加剧了河流和湖泊的富营养化^[36,41]。同时,建设用地硬化了下垫面,减弱了其对污染物的截留和吸收作用^[18]。Peterjohn 等^[42]的研究表明河岸带可滞留 89%的氮和 80 %的磷;不同自然植被间的氮素纳污能力差异显著,林地和灌木对氮素的吸纳能力较强,而草地对氮素的吸收能力有待进一步验证,整体呈现林地>灌木>草地的变化趋势^[43-44]。因此,有针对性地河岸带缓冲区的土地覆被结构进行调整,是减轻面源污染、改善水质的重要方向,建议在该区域加快推广绿色与无公害农业种植技术,以及精准施肥等控制农业面源污染的措施^[36]。距离河道 2 km 的河岸带为水体富营养化的关键控制范围,需要优化农田施肥管理、加强牲畜粪便处理、建设林地过滤带和河岸缓冲带等措施来削减面源污染负荷^[19]。同时,建议通过立法对沿河、沿湖 2 km 以内的工业和生活用地进行严格管理或清退,加强生活污水处理,科学合理布局工业、养殖品种,推广使用生物有机肥料和低毒、低残留高效农药^[36]。此外,全球气候变暖以及水体蒸发量带来的水体自身净化能力变化也可能是水体氮污染的重要因素^[8-9]。

4.4 WQI 驱动因素分析

丰水期 WQI 指数与不透水面面积占比($r = -0.43, P < 0.01$)、丰水期温度($r = -0.36, P < 0.01$)、人口密度($r = -0.35, P < 0.01$)等 14 个指标呈显著的负相关;同时,与林地面积占比($r = 0.62, P < 0.01$)、高程($r = 0.28, P < 0.05$)、第一产业比重($r = 0.26, P < 0.05$)等 7 个指标呈显著正相关。枯水期 WQI 与草地面积占比($r = -0.41, P < 0.05$)、第一产业比重($r = -0.36, P < 0.05$)、高程($r = -0.32, P < 0.10$)等 5 个指标呈显著负相关;同时,枯水期 WQI 指数与年均降雨量($r = 0.62, P < 0.01$)、城市污水处理率($r = 0.42, P < 0.05$)等 4 个指标呈显著正相关。

人口激增和社会经济发展导致的自然景观属性下垫面减少、土地利用强度增加,以及污水排放量增多是 WQI 指数不高的主要原因。丰水期,高温促进浮游植物大量繁殖、蒸发量变大,强降雨地表径流携带的大量营养源和污染物,以及工农业生产的大量污水排放是 WQI 指数下降、水质恶化的直接因素;而林地、灌木和湿地等对降低面源污染较为有益的自然景观对于 WQI 指数的提高具有积极意义。枯水期 WQI 指数随着草地面积和第一产业比重的增加而下降,这可能是由于草地的纳污机制较为复杂,其对水质的影响仍存在争

议^[18]。不同河岸带截留转化效率差异较大,主要取决于河岸带的水文过程、河岸带土壤特性与植被群落结构、人类活动性质及季节变化等因素^[45],河岸带土地覆被类型和产业结构调整成为水污染治理和水环境保护的重要途径^[19,21]。未来,有针对性地改善土地利用类型和产业结构,完善产业结构和城市规划^[36],控制人口密度,将水资源保护与治理有机结合,加大污水处理力度和标准,是有效控制水污染、保护水资源、增强水资源承载力的重要途径。可以结合高分辨率遥感和地理信息技术对水资源现状进行长时序大范围的监测和模拟^[46],对重点区域水环境进行持续监测,对重污染区域进行综合整治。

5 结论

本文综合使用 SI 和 WQI 水质评估方法,从宏观尺度上展开了广东省水质状况评估、主要污染类型识别和水污染驱动因素分析,可为广东新一轮创新驱动发展提供水生态保护参考,主要结论如下:

(1)整体来看,广东七大流域的水污染主要以 Chla(6.05 $\mu\text{g/L}$)和 TN(1.92 mg/L)浓度超标为主,同时伴有 DO 浓度(5.04 mg/L)偏低问题。Chla、SPM、 NH_3N 和 TP 浓度具有显著的水文季节和驱动因素差异;丰水期的 Chla 和 TP 浓度低于枯水期,但 SPM 和 NH_3N 浓度高于枯水期;丰水期水质问题的驱动因素较枯水期更为复杂。

(2)从流域来看,珠江三角洲河网区、粤西诸河、韩江下游以及粤东诸河的练江流域水质形势严峻,有较多采样点属于中等以下水质(WQI<60)。珠江三角洲河网区和西江的水质问题主要表现为 TN 和 SPM 浓度较高。东江和北江水质主要表现为 TN 浓度较高,分别为 1.56 mg/L 和 1.66 mg/L 。粤西诸河面临 TN 浓度过高(1.78 mg/L)、SDD(78 cm)偏小等水质问题。粤东诸河和韩江流域很多采样点面临 TN 超标(1.94 mg/L vs. 1.99 mg/L)问题。

(3)生产生活大量排放的氮磷营养盐以及不透水面等人为景观增多加剧的面源污染是 TN 和 Chla 浓度超标、水质下降的重要原因;降雨、气温等自然因素通过影响地表径流、水体自净能力、以及浮游植物的生长繁殖进一步影响水质及其季节差异。在水生系统的保护与治理过程中,亟需通过土地覆被类型和产业结构的协同优化来消减营养盐和污染物的排放。

参考文献(References):

- [1] 国务院. 中共中央 国务院关于加快水利改革发展的决定. (2010-12-31). http://www.gov.cn/govweb/gongbao/content/2011/content_1803158.htm.
- [2] WWAP (United Nations World Water Assessment Programme)/UN-Water. The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based Solutions for Water. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 2018: 3-20.
- [3] 夏军, 翟金良, 占车生. 我国水资源研究与发展的若干思考. 地球科学进展, 2011, 26(9): 905-915.
- [4] 郝秀平, 夏军, 王蕊. 气候变化对地表水环境的影响研究与展望. 水文, 2010, 30(1): 67-72.
- [5] Vörösmarty C J, McIntyre P B, Gessner M O, Dudgeon D, Prusevich A, Green P, Glidden S, Bunn S E, Sullivan C A, Reidy Liermann C, Davies P M. Global threats to human water security and river biodiversity. Nature, 2010, 467(7315): 555-561.
- [6] 刘琦, 田雨露, 刘洋, 许丁雪, 李洁敏, 江源. 两类水质综合评价方法的特点及其在河流环境管理中的作用. 生态学报, 2019, 39(20): 7538-7546.
- [7] Cao J X, Sun Q, Zhao D H, Xu M Y, Shen Q S, Wang D, Wang Y, Ding S M. A critical review of the appearance of black-odorous waterbodies in China and treatment methods. Journal of Hazardous Materials, 2020, 385: 121511.
- [8] 洪思, 夏军, 陈俊旭, 万龙, 宁理科, 石卫. 气候变化下水资源适应性管理的多目标方法应用(英文). 地理学报, 2017, 27(3): 259-274.
- [9] 匡洋, 李浩, 夏军, 杨泽川. 气候变化对跨境水资源影响的适应性评估与管理框架. 气候变化研究进展, 2018, 14(1): 67-76.
- [10] 翁立达, 彭彪, 彭盛华. 美国水资源保护考察报告. 水资源保护, 2004, 20(6): 64-68.
- [11] Bergeron P, 温慧娜, 夏朋. 中国水生态安全战略分析——欧洲视角. 人民黄河, 2012, 34(10): 14-15.
- [12] 刘登伟. 欧盟最新保护水资源政策浅析及对我国的启示. 水利发展研究, 2014, 14(12): 96-100, 105-105.
- [13] 齐跃明, 杨雅琪, 李鑫, 裴毅峰, 游京, 刘博. 中美水资源研究现状与发展展望. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2019, 44(5): 95-102.
- [14] 王瑗, 盛连喜, 李科, 孙弘颜. 中国水资源现状分析与可持续发展对策研究. 水资源与水工程学报, 2008, 19(3): 10-14.
- [15] 黄楚珩, 蒋志云, 杨志广, 黄文惠, 陈晓滢, 杨肖. 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. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5): 140-147.

- [16] 郝璐, 孙阁. 城市化对流域生态水文过程的影响研究综述. 生态学报, 2021, 41(1): 13-26.
- [17] 濮培民, 李正魁, 成小英, 濮江平. 优化湖泊流域水环境的对策与关键技术——从物质循环及平衡观点看. 生态学报, 2009, 29(9): 5088-5097.
- [18] 杨强强, 徐光来, 杨先成, 李爱娟, 陈晨. 青弋江流域土地利用/景观格局对水质的影响. 生态学报, 2020, 40(24): 9048-9058.
- [19] 许尔琪, 张红旗. 密云水库上游流域土地利用与地表径流营养物的关系. 应用生态学报, 2018, 29(9): 2869-2878.
- [20] 朱瑶, 梁志伟, 李伟, 杨伟, 杨木易, 毛巍, 徐寒莉, 吴伟祥. 流域水环境污染模型及其应用研究综述. 应用生态学报, 2013, 24(10): 3012-3018.
- [21] 吉冬青, 文雅, 魏建兵, 吴志峰, 刘庆, 程炯. 流溪河流域景观空间特征与河流水质的关联分析. 生态学报, 2015, 35(2): 246-253.
- [22] 杜鑫, 许东, 付晓, 吴钢. 辽河流域辽宁段水环境演变与流域经济发展的关系. 生态学报, 2015, 35(6): 1955-1960.
- [23] 汪晓妍, 周婷, 应紫敏, 吴静, 杨武. 宁德水产养殖区水质状况及驱动力分析. 生态学报, 2020, 40(5): 1766-1778.
- [24] 国家环境保护总局科技标准司. GB 3838—2002 地表水环境质量标准. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [25] Cheng X, Chen L D, Sun R H, Kong P R. Land use changes and socio-economic development strongly deteriorate river ecosystem health in one of the largest basins in China. *Science of the Total Environment*, 2018, 616: 376-385.
- [26] Sun W, Xia C Y, Xu M Y, Guo J, Sun G P. Application of modified water quality indices as indicators to assess the spatial and temporal trends of water quality in the Dongjiang River. *Ecological Indicators*, 2016, 66: 306-312.
- [27] 广东省统计局. 广东统计年鉴 2019. 北京: 中国统计出版社有限公司, 2019.
- [28] Wu M L, Wang Y S, Wang Y T, Sun F L, Sun C C, Cheng H, Dong J D. Seasonal and spatial variations of water quality and trophic status in Daya Bay, South China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 112(1/2): 341-348.
- [29] Gong P, Liu H, Zhang M N, Li C C, Wang J, Huang H B, Clinton N, Ji L Y, Li W Y, Bai Y Q, Chen B, Xu B, Zhu Z L, Yuan C, Suen H P, Guo J, Xu N, Li W J, Zhao Y Y, Yang J, Yu C Q, Wang X, Fu H H, Yu L, Dronova I, Hui F M, Cheng X, Shi X L, Xiao F J, Liu Q F, Song L C. Stable classification with limited sample: Transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017. *Science Bulletin*, 2019, 64(6): 370-373.
- [30] 江源, 廖剑宇, 刘全儒, 康慕谊. 东江河流生态健康评价研究. 北京: 科学出版社, 2015.
- [31] Kocer M A T, Sevgili H. Parameters selection for water quality index in the assessment of the environmental impacts of land-based trout farms. *Ecological Indicators*, 2014, 36: 672-681.
- [32] Pesce S F, Wunderlin D A. Use of water quality indices to verify the impact of Córdoba city (Argentina) on Suquia River. *Water Research*, 2000, 34(11): 2915-2926.
- [33] 王志强, 田娜, 缪建群, 王海伦, 王海, 黄国勤. 基于组合可拓综合分析法的鄱阳湖流域水质富营养化评价. 生态学报, 2017, 37(12): 4227-4235.
- [34] 赵军, 杨凯, 邵俊, 单福征. 区域景观格局与地表水环境质量关系研究进展. 生态学报, 2011, 31(11): 3180-3189.
- [35] 康文华, 蔡宏, 林国敏, 吴愈锋, 王跃跃. 不同地貌条件下景观对河流水质的影响差异. 生态学报, 2020, 40(3): 1031-1043.
- [36] 王磊, 张磊, 段学军, 董雅文, 秦贤宏. 江苏省太湖流域产业结构的水环境污染效应. 生态学报, 2011, 31(22): 6832-6844.
- [37] Lee S W, Hwang S J, Lee S B, Hwang H S, Sung H C. Landscape ecological approach to the relationships of land use patterns in watersheds to water quality characteristics. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 92(2): 80-89.
- [38] Shen Z Y, Hou X S, Li W, Aini G, Chen L, Gong Y W. Impact of landscape pattern at multiple spatial scales on water quality: a case study in a typical urbanised watershed in China. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 417-427.
- [39] Ding J, Jiang Y, Liu Q, Hou Z J, Liao J Y, Fu L, Peng Q Z. Influences of the land use pattern on water quality in low-order streams of the Dongjiang River basin, China: a multi-scale analysis. *Science of the Total Environment*, 2016, 551-552: 205-216.
- [40] 山鹰, 张玮, 李典宝, 王丽卿. 上海市不同区县中小河道氮磷污染特征. 生态学报, 2015, 35(15): 5239-5247.
- [41] Fang C, Song K S, Li L, Wen Z D, Liu G, Du J, Shang Y X, Zhao Y. Spatial variability and temporal dynamics of HABs in northeast China. *Ecological Indicators*, 2018, 90: 280-294.
- [42] Peterjohn W T, Correll D L. Nutrient dynamics in an agricultural watershed: observations on the role of a riparian forest. *Ecology*, 1984, 65(5): 1466-1475.
- [43] 李明涛, 王晓燕, 刘文竹. 潮河流域景观格局与非点源污染负荷关系研究. 环境科学学报, 2013, 3(8): 2296-2306.
- [44] 欧洋, 王晓燕, 耿润哲. 密云水库上游流域不同尺度景观特征对水质的影响. 环境科学学报, 2012, 32(5): 1219-1226.
- [45] 杨丽蓉, 陈利顶, 孙然好. 河道生态系统特征及其自净化能力研究现状与发展. 生态学报, 2009, 29(9): 5066-5075.
- [46] Chen J Y, Chen S S, Fu R, Wang C Y, Li D, Peng Y S, Wang L, Jiang H, Zheng Q. Remote Sensing estimation of chlorophyll-a in case-II waters of coastal areas: three-band model versus genetic algorithm-artificial neural networks model. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 3640-3658.