

连续极端降雨对东江流域水质影响分析

车蕊^{1,2}, 林澍², 范中亚², 李文静², 曾凡棠², 毛本健¹, 石雷^{1*}, 黄志伟^{2*}

(1. 暨南大学环境学院, 广州 510632; 2. 生态环境部华南环境科学研究所, 国家水环境模拟与污染控制重点实验室, 广东省水与大气污染防治重点实验室, 广州 510535)

摘要: 为研究连续极端降雨对饮用水源型河流东江水质的影响, 分析流域近 38 年极端降雨事件发生特征, 并结合水文水质数据初步分析其对水质的影响. 基于 SWAT2012 建立东江流域高精度模型, 研究极端降雨过程中主要污染物通量变化过程及其对水质的影响. 结果表明, 东江流域近 38 年极端降雨事件共发生 173 次, 丰水年频次要高于其他年份, 年内受气候影响主要集中在 3~9 月(80%), 峰值主要出现在降雨量最高的 6 月; 在空间上增城-博罗-惠州-龙门一带极端事件发生频率最高. 降雨量与浊度、TP、氰化物、Pb、Fe 和 Mn 的浓度值均呈显著正相关, 其中与浊度、TP 的相关系数相对较高, 与 pH、电导率和 Zn 的浓度值等呈极显著负相关, 水质在一定程度上受到降雨的影响. 浊度、TN、NH₄⁺-N 及 TP 浓度值均在暴雨径流期出现不同程度的上升趋势, 其中浊度和 TP 浓度值变化趋势与流量呈显著一致, 其峰值出现要早于流量峰值(约 1 d), 存在显著初期冲刷效应; pH 变化过程则与流量相反, 成“V”字形, 可能是受上游山区降雨、土壤酸碱度及产汇流条件影响; NH₄⁺-N 受初期冲刷及洁净雨水稀释则呈现前期高, 中后期低的特征. 污染物负荷与径流量变化趋势较为一致, TN、NH₄⁺-N 及 TP 污染通量峰值要晚于(约 1d) 流量峰值的出现, 这与污染物浓度峰值出现规律不同; 污染物负荷主要在暴雨径流期呈现明显增加趋势, 以 59.48% 的径流量输送污染物占比达到了: COD 68.42%、NH₄⁺-N 54.68% 和 TP 70.20%, 呈现时间短、污染物负荷冲击强等特点, 对东江饮用水源水质造成较大的影响, 建议通过强化初期雨水治理减少暴雨径流期对水质风险的影响.

关键词: 降雨; 极端事件; 时空分布特征; 水质; 污染物通量

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)10-4440-10 DOI: 10.13227/j.hjxk.201902042

Effects of Continuous Extreme Rainfall on Water Quality of the Dongjiang River Basin

CHE Rui^{1,2}, LIN Shu², FAN Zhong-ya², LI Wen-jing², ZENG Fan-tang², MAO Ben-jian¹, SHI Lei^{1*}, HUANG Zhi-wei^{2*}

(1. School of Environment, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. National Key Laboratory of Water Environment Simulation and Pollution Control, Guangdong Key Laboratory of Water and Air Pollution Control, South China Institute of Environmental Science, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510535, China)

Abstract: In order to research the impact of continuous extreme rainfall on the water quality of the Dongjiang River, which is a drinking water source, the characteristics of extreme rainfall events in the basin were analyzed for last 38 years. The impacts of these events on water quality are discussed by considering both hydrological data and water quality data. Using SWAT2012 software, a high-precision basin model was established for the flux of major pollutants during extreme rainfall and water quality. The results indicate that there were 173 extreme rainfall events in the Dongjiang River basin over the past 38 years. The annual frequency of extreme rainfall events in high-flow years was higher than in other years. During the year, rainfall was mainly affected by climate, particularly from March to September (80%), with the peak rainfall usually occurring in June. Spatially, the Zengcheng-Bolo-Huizhou-Longmen area had the highest frequency of extreme events. During the study period, rainfall was significantly positively correlated with the concentrations of cyanide, Pb, Fe, Mn, TP, and with turbidity, and the correlation coefficients for the concentrations of TP and turbidity with rainfall were relatively high. Rainfall was significantly negatively correlated with pH, conductivity, the concentration of Zn, as well as some other indicators. These observations show that water quality is affected by rainfall to some extent. Turbidity, TN, ammonia nitrogen, and TP concentrations all showed increasing trends, to different degrees, during rainstorm runoff periods. Turbidity and TP concentrations showed a significant and consistent relationship with flow rate, peaking earlier than the flow rate peak (by approximately 1 d), showing a significant initial flushing effect. The pH curve showed an opposite trend to the flow rate, forming a “V” shape, which may be affected by the rainfall, soil acidity, and confluence conditions in the upstream mountains. Ammonia nitrogen was subject to initial flushing in the early stages of extreme rainfall but was diluted by the clean rainwater; initially, ammonia nitrogen showed high values that declined during the middle and late stages. The variations in pollutant loads were consistent with that of runoff flux, and the peaks in TN, ammonia nitrogen, and TP flux appeared later than the flow peak (by approximately 1 d), thus differing from the pollutant concentration peak. The pollutant load mainly showed a significant increase during storm runoff periods. The proportion of pollutant COD, ammonia nitrogen, and TP transported by 59.48% of the runoff reached 68.42%, 54.68%, and

收稿日期: 2019-02-15; 修订日期: 2019-04-16

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07206005, 2017ZX07301006004)

作者简介: 车蕊(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染处理理论与技术, E-mail: 584344722@qq.com

* 通信作者, E-mail: shilei9899@163.com; huangzhiwei@scies.org

70.20%, respectively, demonstrating the characteristics of rapid and high-impact pollutant loads. These characteristics have a great influence on the quality of Dongjiang River drinking water and it is suggested that initial rainwater treatment should be strengthened to reduce the negative impact of rainstorm runoff periods on water quality.

Key words: rainfall; extreme events; spatial and temporal distribution characteristics; water quality; pollutant flux

近些年,全球气候持续变暖,极端高温天气、暴雨和干旱等情况逐渐得到人们的关注^[1-2]。有研究表明,加拿大、印度中部及加勒比海、美国和欧洲等地区的极端降水事件发生频次呈上升趋势^[3-6],我国的极端降水变化态势与全球的态势基本一致,其中华南及华北南部,大城市极端降水频数和强度增加的趋势较为明显^[7]。学者们从产汇流与洪水形成、土壤侵蚀与泥沙输移等角度开展大量研究^[8-10],实际中极端降雨事件对河流水质风险也会造成巨大影响,特别是受非点源污染影响较为显著的区域,但目前针对这方面的研究相对较少。李彤等^[11]的研究发现暴雨径流期间,北江水质重金属质量浓度变化与流量过程基本一致,呈“大流量、高浓度”的特征,溶解态重金属质量浓度与流量及浊度间呈显著正相关,暴雨期间对北江水质造成较大影响。张恒等^[12]在连续降雨对淡水河流域非点源污染的影响研究中指出,淡水河流域出口的SS和各类营养盐的输出通量在降雨过程中呈现显著增长。

东江是粤港地区重要的水源河流,被誉为“政治水”、“经济水”及“生命水”,同时东江流域也是我国经济最发达的地区之一,其大部分流域面积属于高速发展的珠三角地区与粤港澳大湾区。伴随着城市化进程的不断推进,东江流域土地利用演变剧烈,一方面城市、公路等不透水地面迅速扩张,城市水面率持续缩减,水文效应明显,在显著增加地表径流量的同时加速汇流过程,暴雨径流量的明显增加已严重威胁到城市的安全运行^[13,14];另一方面农作物日趋强调市场性,农药和化肥施用强度大,在连续和强度大的降水过程中大量污染物的流失对水质带来极大风险^[15]。因此研究极端降雨事件对东江流域的水质风险具有重要的理论与现实意义。本文以东江流域为例,研究近30年流域降雨特征及极端降雨事件发生频率,结合连续水文水质自动站监测数据,初步分析极端降雨对流域水质风险的影响,并通过构建东江全流域水环境模型,探讨极端降雨过程中主要污染物通量变化过程及水环境变化特征,以期有限资料及变化环境下的流域水资源规划与评价、水污染控制与治理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

东江是珠江流域主要支流之一,总流域面积

35 636 km²,多年平均径流量 326.6 亿 m³,气候湿润,高温多雨,年均降雨量达到 1 600 ~ 2 500 mm,降雨多集中在 6 ~ 9 月,年内分配不均,汛期雨量约占年雨量的 80%。流域内以林地、草地、农田、园地、城市、农村和水体的土地利用类型为主,自上世纪 90 年代以来流域内社会经济快速发展,流域状况受到人类活动强烈干扰,土地利用情况变化明显,在降雨发生时易带来严重的非点源污染负荷^[16]。

1.2 研究材料

为研究东江流域降雨特征,本文收集了流域内共 8 个国家气象站近 30 年逐日降水资料,同时收集干流 4 个水文站日均流量及 4 个水质自动站逐日水质数据(见图 1),用以初步分析降雨对东江水质的影响。由于水文站与水质站在空间上存在一定的差异性,无法直接计算污染物通量,为进一步研究极端降雨过程中主要污染物通量变化过程及水环境变化特征,基于 SWAT2012 建立了东江高精度分布式流域模型,需收集地形、土壤、土地利用、源、农业耕作管理等数据用以建模。所收集资料详见表 1。

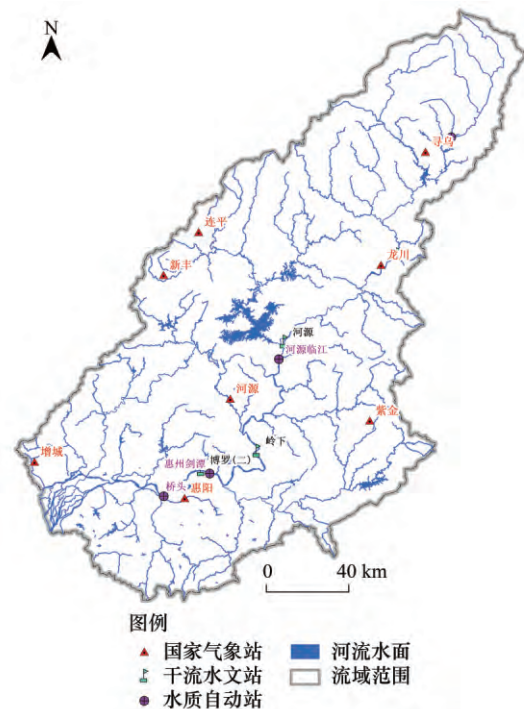


图 1 东江流域气象站、水文站及水质自动站分布示意

Fig. 1 Distribution of meteorological stations, hydrological stations, and water quality automatic stations in the Dongjiang River basin

表 1 研究及建模所需数据信息

Table 1 Summary of dates covered by the research and included in the SWAT model

序号	资料类型	说明	数据来源
1	气象数据	寻邬、龙川、连平、新丰、河源、紫金、惠阳、增城这 8 个国家气象站 1980 ~ 2017 年逐日气象数据	中国气象数据网
2	水文数据	龙川、河源、岭下、博罗这 4 个水文站 2009 ~ 2016 年逐日流量	水文局
3	水质数据	寻邬、临江、剑潭、桥头这 4 个水质自动站 2014 ~ 2016 年逐日数据	广东省环境监测中心
4	地形 (DEM)	地理空间数据云 30 m 分辨率 GDTM 数据	地理空间数据中心
5	土地利用图	1:50 000 土地利用图 (2015 年)	资源环境数据云平台
7	土壤类型图	1:1 000 000 土壤类型图	资源环境数据云平台
8	农业管理数据	农作物种类、化肥种类、施用方式及施用量	地方统计资料、年鉴
9	点源污染数据	污染负荷、排污口位置	环境保护局、污染源普查
10	水库管理数据	新丰江、白盆珠、枫树坝水库 2009 ~ 2016 年逐日下泄流量	东江流域管理局

1.3 研究方法

1.3.1 泰森多边形法

泰森多边形法是一种根据离散分布气象站来计算平均降雨量的方法,即将所有相邻气象站连成三角形,作三角形各边垂直平分线交点,连接形成一个多边形,用该多边形内所包含的一个唯一气象站的降雨强度来表示这个多边形区域内的降雨强度,并称这个多边形为泰森多边形^[17].本研究采用泰森多边形法来计算流域降雨量.

1.3.2 百分位阈值法

百分位阈值法是采用某个百分位值作为极端值的阈值,超过这个阈值的值被认为是极值,并称为极端事件.由于不同气候区降雨特征差异明显,不同区域极端强降水事件是不能一概采用全国统一固定的日降水量简单定义.翟盘茂等^[18]在对国内北方地区近 50 年的温度和极端降水事件的变化研究中,将每年第 99 个百分位值的 30 年平均值定义为极端降水事件的阈值.刘鑫等^[19]在近 30 年太湖流域极端降水特征分析中将第 95 个百分位的日降雨量定义为极端降水阈值.而在华南地区,王文静等^[20]和马雨露等^[21]的研究均将第 95 个百分位值定义为极端降水事件的阈值.参照气候变化检测与极端气候事件指数专家组 (ETCCDI) 确定的表征极端气候事件的核心气候指数,本文将 1980 ~ 2017 年所有站点日降水量按照升序排列,将第 95 个百分位的平均值 (P95pTOT) 定义为整个流域极端降水事件的阈值,计算得出东江流域极端阈值为 58.68 mm,当某监测站某日降水量超过了 58.68 mm 时,则称该日出现极端降水事件.

1.3.3 SWAT 模型

污染物通量是流域水环境管理与污染治理中重要的支撑数据,而国内大部分流域严重缺乏同步水文水质数据^[22],模型法是缺测数据资料流域较为常用的研究方法. SWAT (soil and water assessment

tool) 模型是美国农业部开发的连续性分布式流域机理模型,该模型功能模块齐全、模拟效果良好、适用范围广^[23,24],近年来在水资源和环境等领域中得到广泛应用^[25,26],可模拟多种不同的水文物理化学过程、单次或连续降雨对径流量、土壤侵蚀量 (水、泥沙流失量)、营养元素负荷和农业污染物的影响^[27].本文根据表 1 所收集资料数据,结合东江流域的特点和研究目的,建立了东江流域模型.

2 结果与讨论

2.1 东江流域降雨特征

采用泰森多边形法计算东江流域 1980 ~ 2017 年逐日降雨量,并分析东江流域降雨特征,近 38 年极端降水事件发生趋势可见图 2,年内分布特征结果可见图 3.由图 2 可知,近 38 年极端降水事件总体呈现不显著变化规律,每年发生频率范围为 1 ~ 8 次,其中丰水年发生频次要高于其他年份.由图 3 可知,极端降水事件累计发生频次与月平均降雨量年内分布规律基本一致,峰值均出现在 6 月,该月多年平均降雨量 257.34 mm,极端事件频次为 40 次,在最低值出现月份则略有不同,极端事件的发生主要集中在 3 ~ 9 月,占比达到约 80% 以上.由于月均降雨

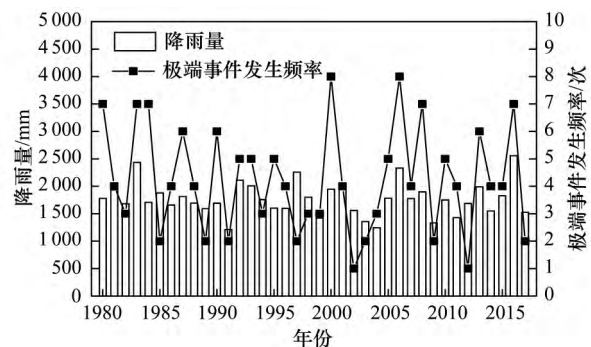


图 2 东江流域 1980 ~ 2017 年极端事件发生频次

Fig. 2 Frequency of extreme events in the Dongjiang River basin from 1980 to 2017

量的分布主要受当地气候影响,因此也可认为极端降雨事件发生频次相当程度上受气候影响,这也与其他研究成果相似^[28-30]。

流域内各站点及流域降雨量数值统计结果可见

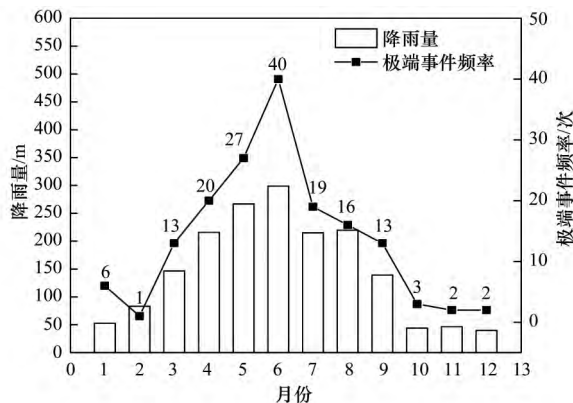


图3 东江流域多年月平均降雨量分布

Fig. 3 Distribution of mean monthly rainfall over many years in the Dongjiang River basin

表2 东江流域及各气象站降雨值统计

Table 2 Summary of rainfall values in the Dongjiang River basin for all the meteorological station

站点	99%分位值/mm	95%分位值/mm	最大值/mm	极端事件频率/次	大于100 mm暴雨频率/次	降雨量/mm
连平	75.99	55.80	205.60	166	27	1771.72
新丰	88.00	61.70	227.90	219	44	1916.86
寻邬	76.10	50.31	186.50	129	26	1632.41
龙川	80.79	56.49	345.60	160	28	1684.07
河源	97.58	68.01	263.40	244	59	1966.81
增城	105.21	71.31	253.50	283	71	2016.96
惠阳	105.43	66.20	292.00	215	70	1777.08
紫金	81.25	57.87	219.20	175	30	1728.89
流域	58.88	40.45	162.53	173	8	1768.56

2.2 降雨与污染物相关性分析

为研究东江流域降雨量对水质的影响,本文利用 SPSS 选取人为干扰因素较小的上游龙川气象站与寻邬水质自动站数据,进行自然降雨与污染物浓度值的 Pearson 相关性分析,结果可见表3。分析结果表明,部分污染物受降雨影响较大,降雨量与浊度、TP、氰化物、Pb、Fe 和 Mn 呈极显著正相关,与 pH 值、电导率和 Zn 等指标呈极显著负相关,其中浊度和 TP 相关系数相对较高。DO 与高锰酸盐指数、氰化物、Zn、Cu 和 Cd 均呈极显著负相关,高锰酸盐指数与 Fe、Mn 和 As 呈极显著正相关,表明部分重金属类污染物可能受人类行为影响较大。浊度与各污染物指标均有极显著相关性,与电导率、 NH_4^+-N 、Zn 和 Cu 呈现极显著负相关,其余指标与浊度均为极显著正相关,这可能是流域上游山区受非点源污染影响较大,其中与电导率、TP、氰化物、Pb 和 Mn 的相关系数较高,总体上重金属指标相关系数略高于 NH_4^+-N 和高锰酸盐指数等指标。综上分

析,可初步判断东江流域水质在一定程度上受到降雨的影响,特别是浊度及磷、重金属等污染物,相关文献也表明,降雨是水质的主要影响因素之一,特别是在降雨初期大量污染物受冲刷、侵蚀作用随地表径流汇入河流,对水质造成较大的影响,亟需得到重视及治理^[11]。

表2. 从中可知,流域内降雨存在较为明显的空间分布特征,不同气象站的99%和95%分位值及最大值均有不同程度差异性,38年平均降雨量排序前三的站点为:增城、河源和新丰,大于100 mm暴雨频次较高的有:增城、惠阳和河源,而极端降雨事件发生频次与年降雨量呈现较为相似规律。总体上,流域内增城-博罗-惠州-龙门一带极端事件发生频率最高,该区域为广东省暴雨中心之一,经常会出现持续时间长、降雨强度大的雷暴雨或者台风雨等,由于暴雨中心位置的不同,流域内降水高度不均匀^[31-32]。此外,对比发现通过克里金法计算的流域降雨量,在数理统计、极端降雨事件发生频次及大于100 mm暴雨频次方面均低于流域内大部分气象站,主要是因为采用克里金法对降雨量进行插值处理,忽略了暴雨中心的造峰作用,会把部分降雨峰值“坦化”,若只以流域降雨量来进行极端降雨的相关研究则会存在较大问题。

2.3 连续降雨事件中水质变化规律分析

据报道2015年发生“极强厄尔尼诺事件”,其中5月12日至6月18日台风、暴雨等极端天气频发^[33],据此笔者选取该时间段作为连续极端降雨典型期,进行暴雨过程划分,分析降雨过程中水质变化趋势。典型时段内流域内各站点累积降水量在388.20~707.40 mm,局部最大降雨量(河源)为175 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$; 博罗水文站流量在669~3103 $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 之间,平均值为1374 $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。从水文水质变化过程和降雨强度看,结合洪水过程阶段性特点,“5.19”暴雨过程可分为4个典型阶段^[11](见表4):第I阶段(5月12~19日)为局部产流期,历时

表 3 龙川寻邬站降雨量与水质参数相关性分析¹⁾

Table 3 Correlation analysis for rainfall values and water quality parameters at Xunwu Station in Longchuan

	降雨量	pH	DO	电导率	浊度	高锰酸盐指数	NH ₄ ⁺ -N	TP	氰化物	Pb	Zn	Cu	Cd	Fe	Mn	As
降雨量	1															
pH	-0.102**	1														
DO	-0.002	0.380**	1													
电导率	-0.273**	0.124**	0.102**	1												
浊度	0.417**	0.105**	0.155**	-0.477**	1											
高锰酸盐指数	0.017	-0.133**	-0.570**	-0.242**	0.176**	1										
NH ₄ ⁺ -N	-0.033	-0.253**	0.213**	0.656**	-0.187**	-0.132**	1									
TP	0.380**	-0.044	0.203**	-0.056	0.369**	0.069	0.093**	1								
氰化物	0.073*	0.168**	-0.152**	-0.290**	0.319**	-0.003	-0.114**	0.081**	1							
Pb	0.073*	0.180**	0.111**	-0.484**	0.395**	0.103**	-0.129**	0.193**	0.462**	1						
Zn	-0.195**	-0.078*	-0.154**	0.573**	-0.207**	-0.123**	0.276**	-0.162**	-0.101**	-0.192**	1					
Cu	0.001	-0.371**	-0.275**	0.079**	-0.220**	-0.073	-0.034	-0.090**	-0.213**	-0.315**	0.045	1				
Cd	0.016	0.160**	-0.080**	-0.213**	0.291**	0.042	-0.014	0.087**	0.657**	0.509**	-0.123**	-0.281**	1			
Fe	0.066*	-0.039	0.015	-0.009	0.267**	0.123**	-0.020	0.192**	-0.156**	-0.246**	0.033	0.326**	-0.169**	1		
Mn	0.181**	0.082**	0.156**	-0.295**	0.384**	0.234**	-0.080**	0.246**	0.064*	0.524**	-0.155**	-0.261**	0.164**	-0.171**	1	
As	0.050	0.052	0.071*	-0.245**	0.242**	0.188**	0.053	0.101**	0.479**	0.513**	-0.150**	-0.350**	0.471**	-0.219**	0.262**	1

1) **表示在 0.01 水平上显著相关; * 表示在 0.05 水平上显著相关

表 4 典型时段“5.19”暴雨期间各阶段及全过程水文水质结果统计¹⁾

Table 4 Hydrological and water quality data for each stage, and overall, for the “5.19” rainstorm in typical time period

产流期	时间/d	统计量	降雨量/mm	流量/ $m^3 \cdot s^{-1}$	pH	浊度/NTU	DO/ $mg \cdot L^{-1}$	TP/ $mg \cdot L^{-1}$	NH ₄ ⁺ -N/ $mg \cdot L^{-1}$	TN/ $mg \cdot L^{-1}$
阶段 I: 局部产流期	8	最大值	15.38	593	6.93	73	6.04	0.14	1.14	4.27
		最小值	0	343	6.79	11	4.8	0.13	0.73	2.95
		平均值	6.21	426.25	6.86	29.13	5.46	0.13	0.62	2.74
		标准差	6.8	94.16	0.05	23.06	0.44	0	0.13	0.52
阶段 II: 地表径流为主的全流域产流期	12	最大值	60.93	2 260	6.77	132	5.95	0.23	1.2	3.32
		最小值	2.08	924	6.51	37	4.97	0.13	0.21	2.15
		平均值	28.12	1 712.67	6.61	103.67	5.5	0.2	0.96	3.57
		标准差	21.04	458.34	0.09	30.2	0.3	0.03	0.32	0.38
阶段 III: 浅层地下水径流为主的全流域产流期	10	最大值	28.53	1150	6.61	110	6.83	0.17	0.31	2.72
		最小值	0.44	726	6.52	33	5.38	0.11	0.18	2.21
		平均值	11.05	976.56	6.57	64.22	6.05	0.13	0.24	2.41
		标准差	8.61	153.01	0.03	26.65	0.65	0.02	0.05	0.14
阶段 IV: 深层地下水产流期	8	最大值	11.16	694	6.93	30	8.06	0.11	0.26	2.61
		最小值	0.65	497	6.51	23	6.66	0.11	0.17	2.15
		平均值	3.94	584.25	6.66	26.5	7.25	0.11	0.21	2.32
		标准差	4.91	98.59	0.04	2.89	0.59	0	0.04	0.21
全过程	38	最大值	60.93	2260	6.93	132	8.06	0.23	1.2	4.27
		最小值	0	343	6.51	11	4.8	0.11	0.17	2.15
		平均值	13.93	998.33	6.67	61.67	5.89	0.15	0.54	2.8
		标准差	15.86	583.09	0.13	39.86	0.77	0.04	0.36	0.6

1) 降雨量数据采用克里金插值计算所得, 流量数据采用博罗站, 水质数据采用博罗站下游约 3 km 的剑潭水质自动站数据

8 d, 该阶段为洪水前期, 虽也陆续有降雨(最大值约 36.6 mm·d⁻¹; 累积降水量约 49.67 mm), 未完全形成明显的地表径流, 河道流量 [(426 ± 94) m³·s⁻¹]波动很小, 各污染物的质量浓度也处于相对较低水平. 第 II 阶段(5 月 20 ~ 31 日) 为以地表径流为主的全流域产流期, 历时 12 d, 该阶段为暴雨径流期, 雨量大且集中, 连续 5 d 雨量超过 35 mm, 属于连续暴雨, 局部最大日降水量达 172.1 mm, 累积降水量达到 28 mm, 这一阶段导致东江流

域流量 [(1 713 ± 458) m³·s⁻¹]骤然上升, 并在 5 月 27 日达到峰值(2 260 m³·s⁻¹); 同时, 各污染物质量浓度也相应升高, 平均值分别为第 I 阶段的 1.3 ~ 3.6 倍. 第 III 阶段(6 月 1 ~ 10 日) 为以浅层地下水径流为主的全流域产流期, 历时 10 d, 该阶段虽然强降雨过程已经结束, 但洪水仍未散去, 流域流量 [(977 ± 153) m³·s⁻¹]较峰值明显下降, 属于洪水消退期; 除浊度高于第 I 阶段外, NH₄⁺-N、TN 均有所下降. 第 IV 阶段(6 月 11 ~ 18 日) 为深层地下

水产流期, 历时 8 d, 该阶段为流域恢复期, 流量 $[(584 \pm 96) \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ 逐步降至洪水期前水平. 整个过程中, 流量平均值为 $998 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 洪峰与降雨峰值出现时间不同步, 洪峰较降雨滞后.

受降雨及污染源排放影响, 暴雨过程不同阶段水体理化参数变化趋势差异性明显. 结合表 3, 选取与降雨量相关性较高的指标, 进行暴雨过程变化趋势分析. 图 4 可知, 径流量峰值的出现与降雨量峰值存在一定滞后性(约 3 d), 流量峰值出现在 5 月 26 日, $3103 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 主要是受地表径流汇流时间影响; 浊度和 TP 浓度值总体与流量呈正相关性, 在暴雨径流期出现明显增大趋势, 其中浊度和 TP

浓度峰值主要出现在 5 月 22 日, 要早于流量峰值的出现, 表明存在较为显著的初期冲刷效应. 图 5 可知, pH 值总体变化幅度较小, 但变化过程与流量相反, 成“V”字形, 可能是受上游山区降雨、土壤酸碱度及产汇流条件影响, 这也与易雯等^[34]的研究结论一致; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 指标则呈现前期浓度值高, 中后期浓度值低的特征, 局部产流阶段主要是受点源排放影响, 在暴雨径流期初期阶段则受初期雨水冲刷影响, 呈现小幅度上升达到 $1.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在中后期由于洁净雨水径流稀释, 呈现明显下降趋势, 洪水消退期及流域恢复期基本上维持在 $0.17 \sim 0.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

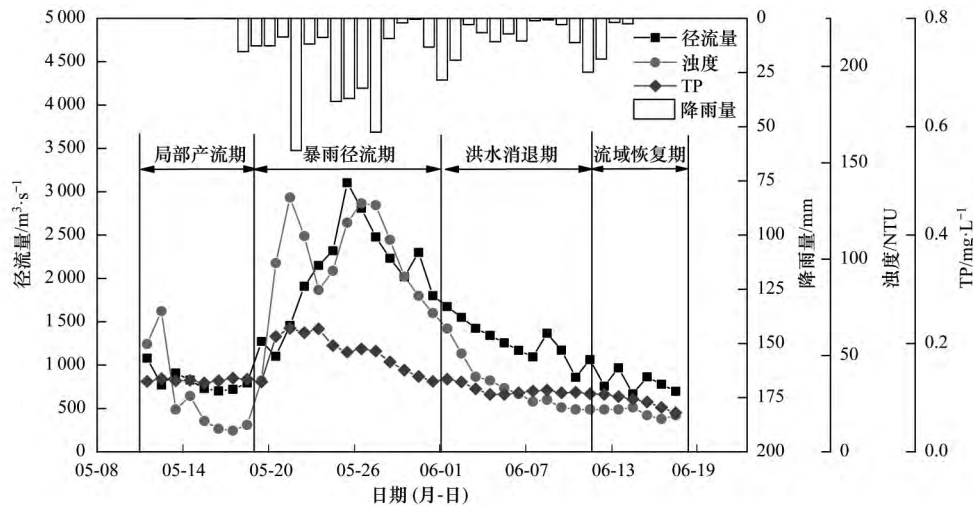


图 4 2015 年典型时段降雨量、流量、浊度和 TP 浓度值变化趋势

Fig. 4 Variations in rainfall, flow rate, turbidity, and total phosphorus concentrations during a typical period in 2015

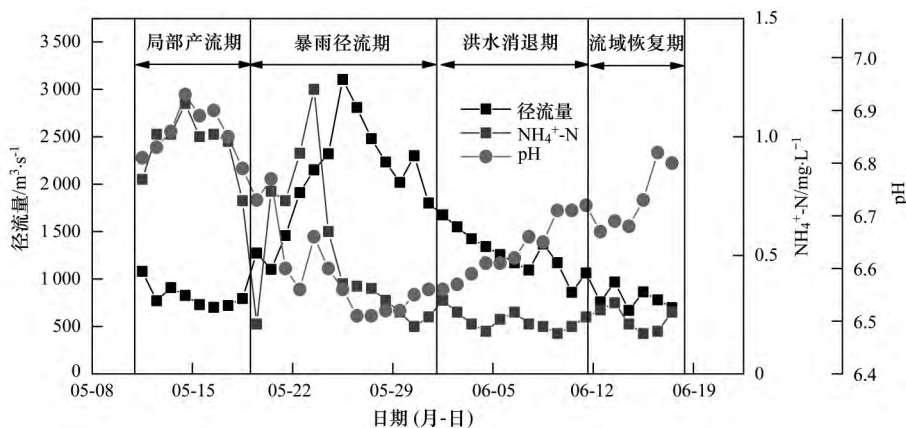


图 5 2015 年典型时期 pH 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度值随流量的变化趋势

Fig. 5 Variations in pH and ammonia nitrogen concentrations with flow during a typical period in 2015

2.4 东江流域分布式模型的建立与验证

流域内缺乏连续同步水文水质数据, 为进一步研究降雨过程中污染物通量的变化过程, 基于所收集资料(表 1) 利用 ArcSWAT 建立了东江流域模型, 模型将东江流域划分为 106 个子流域, 5573 个水文响应单元, 农业管理操作考虑了脐橙、龙眼、荔枝、水稻和生菜等作物种植, 水库及闸坝调度则考虑了

新丰江、白盆珠及枫树坝水库, 点源输入则主要采用环境统计及污染源普查等相关数据, 构建了较为精细化的模型数据库, 建立了基本能反映流域实际情况的模型.

模型选取 2009 ~ 2014 年作为率定期(其中水质数据为 2014 年), 验证期为 2015 ~ 2016 年, 其中率定期主要针对 30 个常见敏感水文水质参数, 按照

空间上先上游再下游、先支流再干流,参数上先流量再水质的顺序,于SWAT-CUP软件中进行多次迭代计算,最终实现参数本地化.水文水质模拟结果可见图6,流量及污染负荷主要在小高峰模拟方面表现较差,与实测值相比,模拟值趋势性表现更为平滑,一方面是因为模型中点源以日平均值作为输入,而现实中点源排放波动变化极大,另一方面则是由于流域内存在大量水库(合计约7562个蓄水工程,总库容达到192.3亿 m^3),但模型仅考虑了新丰江、枫树坝和白盆珠三大水库,其中大部分中小型水库,只在暴雨期间进行排洪作业,没有具体的运作方式.

采用确定系数、纳什系数及相对误差对模型模

拟进行定量评价,结果表明(表5)干流最下游博罗站日尺度流量模拟效果较好,率定期(2009~2015年)及验证期(2015~2016年)均达到 $R^2 > 0.85$, $NS > 0.82$, $RE < 20\%$.基于率定好的流量,东莞桥头站污染负荷模拟效果也较好,日尺度 NH_4^+-N 及TP负荷率定期(2014~2015年)及验证期(2016年)均达到 $R^2 > 0.83$, $NS > 0.80$, $RE < 22\%$;TN模拟效果与其他参数相比模拟效果较差,其率定验证期也基本达到 $R^2 > 0.74$, $NS > 0.72$, $RE < 30\%$.总体而言,基于精细化模型基础数据库的构建,已建立的分布式模型在产汇流及污染物冲刷模拟方面,基本上抓住了随降雨变化而变化的特征,模拟趋势性及误差均控制在较为理想范围,模拟结果较为可靠.

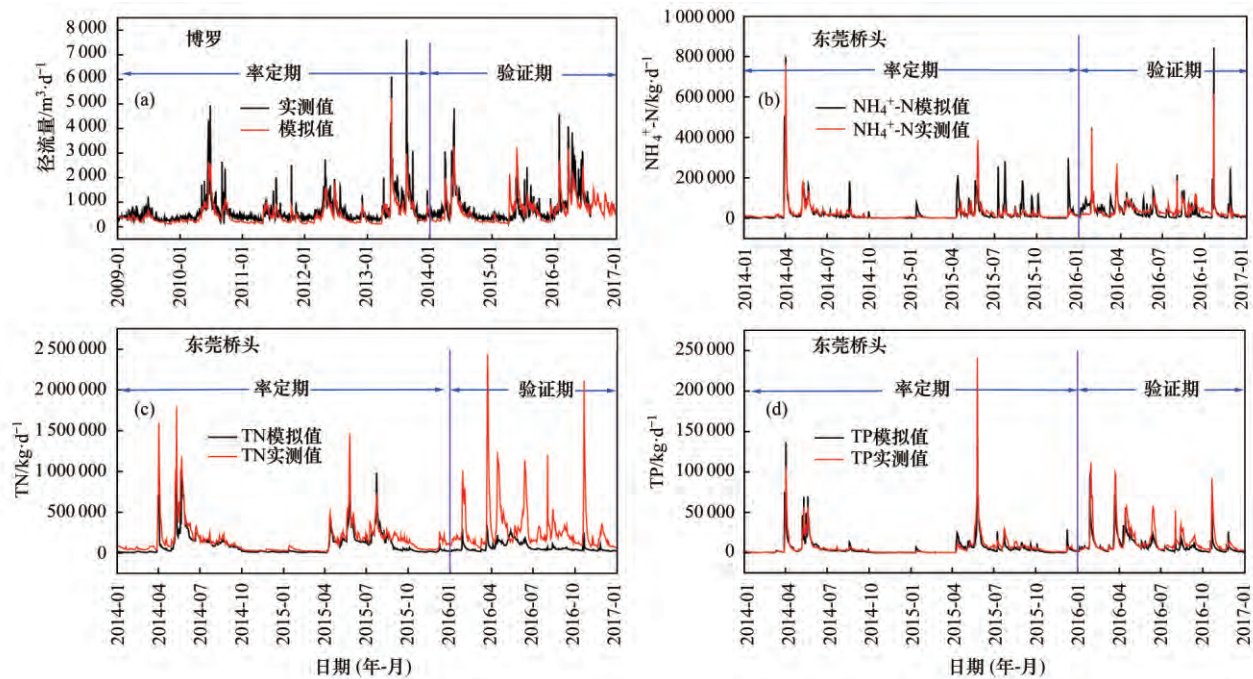


图6 东莞桥头站流量、 NH_4^+-N 、TN及TP率定与验证结果

Fig. 6 Calibration and verification results for flow rate, ammonia nitrogen, total nitrogen and total phosphorus at Dongguan Qiaotou station

表5 东江流域分布式模型模拟效果评估

Table 5 Evaluation of simulation effects of the distributed model for the Dongjiang River basin

站点	参数	率定期			验证期		
		R^2	NS	RE/%	R^2	NS	RE/%
博罗	流量	0.88	0.85	16.54	0.86	0.82	18.25
	NH_4^+-N	0.83	0.81	19.25	0.81	0.80	21.79
东莞桥头	TN	0.78	0.75	24.61	0.74	0.72	28.55
	TP	0.85	0.83	18.25	0.84	0.82	20.12

2.5 污染物通量的时间变化特征

基于已建立的东江流域分布式模型,以下游东莞桥头断面为例,进行极端降雨期间主要污染物通量及支流入河负荷分析.由图7可知,受降雨及汇流的影响,污染物负荷与径流量具有较为一致的变化趋势,其中TN、 NH_4^+-N 及TP污染通量峰值均要

晚于(约1d)流量峰值的出现,这与2.3节中污染物浓度峰值出现要早于流量峰值不同,表明污染物通量主要受产汇流的影响,存在相对滞后的初期冲刷现象.暴雨径流期污染物负荷高于其他3个时期,以59.48%的径流量输送污染物占比分别达到了:COD 68.42%、 NH_4^+-N 54.68%和TP 70.20%,

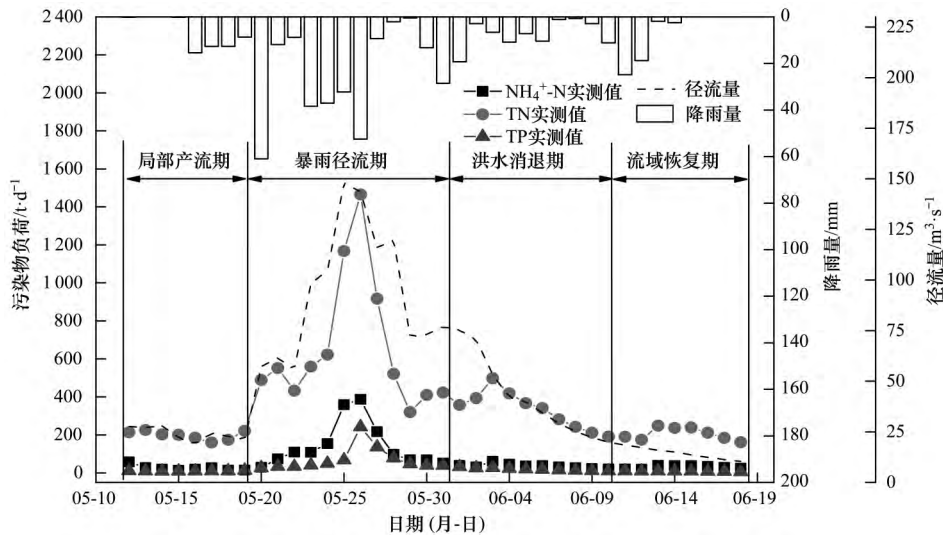


图7 2015年典型时期污染物负荷随降雨量、流量的变化趋势

Fig. 7 Variation in pollutant loads with rainfall and flow during a typical period in 2015

呈现时间短、污染物负荷冲击强等特点,是极端降雨事件最主要的重污染负荷期,该时间段污染物负荷对东江饮用水源供水水质造成较大的影响,建议可通过强化初期雨水治理等减少暴雨径流期对水质风险的影响。

3 结论

(1) 东江流域近 38 年极端降雨事件累计发生 173 次,其中丰水年频次要高于其他年份;受当地气候影响,极端降雨事件主要集中在 3~9 月,占比达到 80% 以上,峰值主要出现在月降雨量最高的 6 月;降雨存在较为明显的空间分布差异性,增城-博罗-惠州-龙门一带极端事件发生频率最高。采用克里金法进行流域降雨量分析时,容易忽略暴雨中心的造峰作用,会把部分降雨峰值“坦化”。

(2) 降雨量与浊度、TP、氟化物、Pb、Fe 和 Mn 呈极显著正相关,与 pH 值、电导率和 Zn 等指标呈极显著负相关,其中浊度和 TP 相关系数相对较高。浊度与各污染物指标均有极显著相关性,表明东江水质状况在一定程度上受到降雨的影响,特别是浊度及磷、重金属等污染物,在降雨初期易受雨水冲刷、侵蚀而入河流。

(3) 典型极端降雨事件过程中浊度、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 TP 指标浓度值均在暴雨径流期出现不同程度的上升趋势,其中浊度、TP 浓度值变化趋势与流量显著一致; pH 值变化过程则与流量相反,成“V”字形,可能是受上游山区降雨、土壤酸碱度及产汇流条件影响; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度值呈现前期高,中后期低的趋势,主要在暴雨径流初期阶段受初期雨水影响上升至 $1.14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在中后期由于洁净雨水径流稀释呈现明显下降趋势,洪水消退期及流域恢

复期基本上维持在 $0.17 \sim 0.31 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

(4) 典型极端降雨事件过程中污染物负荷与径流量具有较为一致的变化趋势,TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 TP 污染通量峰值要晚于(约 1 d)流量峰值的出现,这与污染物浓度峰值出现要早于流量峰值不同。暴雨径流期污染物负荷高于其他 3 个时期,以 59.48% 的径流量输送污染物占比分别达到了: COD 68.42%、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 54.68% 和 TP 70.20%,呈现时间短、污染物负荷冲击强等特点,是极端降雨事件最主要的重污染负荷期,该时间段污染物负荷对东江饮用水源供水水质造成较大的影响,建议通过强化初期雨水治理等减少暴雨径流期对水质风险的影响。

参考文献:

- [1] Zhai P M, Zhou B Q, Chen Y. A review of climate change attribution studies [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2018, **32**(5): 671-692.
- [2] Groisman P Y, Knight R W, Easterling D R, *et al.* Trends in intense precipitation in the climate record [J]. *Journal of Climate*, 2005, **18**(9): 1326-1350.
- [3] Goswami B N, Venugopal V, Sengupta D, *et al.* Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment [J]. *Science*, 2006, **314**(5804): 1442-1445.
- [4] Kunkel K E, Easterling D R, Redmond K, *et al.* Temporal variations of extreme precipitation events in the United States: 1895-2000 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30**(17): 1900.
- [5] Peterson T C, Taylor M A, Demeritte R, *et al.* Recent changes in climate extremes in the Caribbean region [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, **107**(D21): 4601.
- [6] Klein Tank A M G, Können G P. Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-99 [J]. *Journal of Climate*, 2003, **16**(22): 3665-3680.
- [7] 王萃萃, 翟盘茂. 中国大城市极端强降水事件变化的初步分析 [J]. *气候与环境研究*, 2009, **14**(5): 553-560.
Wang C C, Zhai P M. Changes of precipitation extremes in

- China's large cities [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2009, **14**(5): 553-560.
- [8] 钟科元, 郑粉莉, 吴红艳, 等. 松花江流域极端降雨变化对流域输沙量的影响[J]. *农业机械学报*, 2017, **48**(8): 245-252, 321.
Zhong K Y, Zheng F L, Wu H Y, *et al.* Effects of precipitation extremes change on sediment load in Songhua River Basin [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, **48**(8): 245-252, 321.
- [9] 花东文. 极端次降雨事件下的土壤侵蚀调查研究[J]. *农业与技术*, 2017, **37**(19): 50-52.
- [10] Xie S Q, Du Y, Zeng Y, *et al.* Classification of yearly extreme precipitation events and associated flood risk in the Yangtze-Huaihe River valley [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, **61**(9): 1341-1356.
- [11] 李彤, 易雯, 付青, 等. 极端暴雨条件下北江重金属非点源污染负荷估算[J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(9): 990-997.
Li T, Yi W, Fu Q, *et al.* Load estimation of non-point heavy metal pollution in Beijiang River during extreme storm runoff event [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(9): 990-997.
- [12] 张恒, 曾凡棠, 房怀阳, 等. 连续降雨对淡水河流域非点源污染的影响[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(5): 927-934.
Zhang H, Zeng F T, Fang H Y, *et al.* Impact of consecutive rainfall on non-point source pollution in the Danshui River catchment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(5): 927-934.
- [13] 黄沛然. 快速城市化地区土地利用变化的水文效应研究——以浙江省义乌市为例[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2017. 1-83.
Huang P R. Research of hydrologic responses to LUCC in rapid urbanization area——A case study at Yiwu Zhejiang [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2017. 1-83.
- [14] 马朝. 城市化进程对水文效应影响分析及水文环境改善策略研究[J]. *国土与自然资源研究*, 2015, (2): 31-33.
Ma Z. Analysis of the influence of city urbanization on hydrological effect and strategy research on hydrological environment improvement [J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2015, (2): 31-33.
- [15] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. *中国农业科学*, 2004, **37**(7): 1008-1017.
Zhang W L, Wu S X, Ji H J, *et al.* Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies I. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, **37**(7): 1008-1017.
- [16] 黄志伟, 曾凡棠, 石雷, 等. 东江流域不同地类非点源污染排放特征[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(5): 940-946.
Huang Z W, Zeng F T, Shi L, *et al.* Characteristics of non-point source pollutant discharges from different types of land use in Dongjiang River Basin [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(5): 940-946.
- [17] 颜真梅, 母国宏. 基于泰森多边形法的流域面平均雨量计算[J]. *水利科技与经济*, 2017, **23**(1): 19-22.
Yan Z M, Mu G H. Surface precipitation calculation of river basin based on Thiessen polygons method [J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2017, **23**(1): 19-22.
- [18] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化[J]. *地理学报*, 2003, **58**(S1): 1-10.
Zhai P M, Pan X H. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, **58**(S1): 1-10.
- [19] 刘鑫, 顾乐雨, 王屏, 等. 近 30 年太湖流域极端降水特征分析[J]. *水电能源科学*, 2015, **33**(9): 1-4.
Liu X, Gu Y L, Wang P, *et al.* Characteristics analysis of extreme precipitation in Taihu lake basin in the last 30 years [J]. *Water Resources and Power*, 2015, **33**(9): 1-4.
- [20] 王文静, 延军平, 刘永林. 广东省极端降水事件的变化特征[J]. *水土保持通报*, 2016, **36**(2): 293-299.
Wang W J, Yan J P, Liu Y L. Variation characteristics of extreme precipitation events in Guangdong province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, **36**(2): 293-299.
- [21] 马雨露, 赖成光, 习树峰, 等. 南方高度城市化地区极端降雨特征分析及阈值确定——以深圳市为例[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, **28**(2): 76-81.
Ma Y L, Lai C G, Xi S F, *et al.* Analysis and determination of extreme precipitation threshold in highly urbanized areas of southern China: a case from Shenzhen [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2017, **28**(2): 76-81.
- [22] 黄志伟, 曾凡棠, 范中亚, 等. 北港河流域水质特征及主要污染物通量估算研究[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(10): 4063-4072.
Huang Z W, Zeng F T, Fan Z Y, *et al.* Study of pollution characteristics and fluxes of the main contaminants in Beigang River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(10): 4063-4072.
- [23] Bannwarth M A, Sangchan W, Hugenschmidt C, *et al.* Pesticide transport simulation in a tropical catchment by SWAT [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **191**: 70-79.
- [24] Gassman P W, Reyes M R, Green C H, *et al.* The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions [J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, **50**(4): 1211-1250.
- [25] Faramarzi M, Abbaspour K C, Schulin R, *et al.* Modelling blue and green water resources availability in Iran [M]. *Hydrological Processes*, 2009, **23**(3): 486-501.
- [26] Ullrich A, Volk M. Application of the soil and water assessment Tool (SWAT) to predict the impact of alternative management practices on water quality and quantity [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, **96**(8): 1207-1217.
- [27] Ba W L, Du P F, Liu T, *et al.* Simulating hydrological responses to climate change using dynamic and statistical downscaling methods: a case study in the Kaidu River Basin, Xinjiang, China [J]. *Journal of Arid Land*, 2018, **10**(6): 905-920.
- [28] 谢毅文, 陈晓宏, 王兆礼, 等. 东江流域最大半小时降雨时空分布与年际变化特征分析[J]. *水文*, 2009, **29**(3): 32-36.
Xie Y W, Chen X H, Wang Z L, *et al.* Spatio-temporal distribution and change characteristics of maximum half-hour rainfall in Dongjiang River Basin [J]. *Journal of China Hydrology*, 2009, **29**(3): 32-36.
- [29] 王兆礼, 陈晓宏, 黄国如, 等. 东江流域汛期降雨序列的小波分析[J]. *人民长江*, 2010, **41**(2): 52-55.
Wang Z L, Chen X H, Huang G R, *et al.* Wavelet analysis of rainfall series during flood season in Dongjiang River Basin [J]. *Yangtze River*, 2010, **41**(2): 52-55.
- [30] 石教智, 陈晓宏, 吴甜. 东江流域降雨径流变化趋势及其原因分析[J]. *水电能源科学*, 2005, **23**(5): 8-10.
Shi J Z, Chen X H, Wu T. Study on rainfall and runoff change

- tendency and its causes in East River Valley [J]. *Water Resources and Power*, 2005, **23**(5): 8-10.
- [31] Chen Y D, Zhang Q, Lu X X, *et al.* Precipitation variability (1956-2002) in the Dongjiang River (Zhujiang River basin, China) and associated large-scale circulation [J]. *Quaternary International*, 2011, **244**(2): 130-137.
- [32] Chen Y D, Yang T, Xu C Y, *et al.* Hydrologic alteration along the middle and upper East River (Dongjiang) basin, South China: a visually enhanced mining on the results of RVA method [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2010, **24**(1): 9-18.
- [33] 伍红雨, 吴遥. 不同类型和强度的厄尔尼诺事件对次年华南前汛期降水的可能影响[J]. *大气科学*, 2018, **42**(5): 1081-1095.
- Wu H Y, Wu Y. Possible impacts of El Niño events of different types and intensity on precipitation in the subsequent first rainy season in South China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, **42**(5): 1081-1095.
- [34] 易雯, 李彤, 付青, 等. 极端暴雨条件下广东北江重金属污染特征[J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(12): 1458-1464.
- Yi W, Li T, Fu J, *et al.* Characteristics of heavy metal pollution in Beijiang River during extreme storm runoff event [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(12): 1458-1464.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性, 论点明确, 文字精炼, 数据可靠. 全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjcx.ac.cn)进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为: 题目; 作者姓名; 作者工作单位、地址、邮政编码; 中文摘要; 关键词; 中图分类号; 英文题目; 作者姓名及单位的英译名; 英文摘要; 关键词; 正文; 致谢; 参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容, 一般不超过 20 字, 少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字, 以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论, 重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应, 注意人称、时态和语言习惯, 以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简, 同一内容不得用图表重复表达. 要有中英文对照题目. 图应大小一致, 曲线粗于图框, 图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示, 如 mg(毫克), m(米), h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法, 作者译的新名词术语, 文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式, 左起顶格书写, 3 级以下标题可用 (1), (2) …… 表示, 后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写, 正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称, 括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献, 可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:

期刊: 作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名, 年, 卷(期): 起页-止页.

图书: 作者. 书名[M]. 出版地: 出版社, 年. 起页-止页.

会议文集: 作者. 论文名[A]. 见(In): 编者. 文集名[C]. 出版地: 出版社(单位), 年. 起页-止页.

学位论文: 作者. 论文名[D]. 保存地: 保存单位, 年份.

报告: 作者. 论文名[R]. 出版地: 出版单位, 出版年.

专利: 专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别: 专利号, 出版日期.

11. 来稿文责自负, 切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知, 可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址, 邮编, 电话号码, 电子邮箱等. 编辑部邮政地址: 北京市 2871 信箱; 邮编: 100085; 电话: 010-62941102, 010-62849343; 传真: 010-62849343; E-mail: hjcx@reces.ac.cn; 网址: www.hjcx.ac.cn