

目次

河北南部城市臭氧和 VOCs 的污染特征及传输贡献	赵江伟, 聂赛赛, 于玉洁, 王帅, 崔建升, 王玮, 任晓伟, 朱烁 (4775)
基于卫星和地面监测的河西走廊 O ₃ 浓度时空分布及潜在源区分析	李锦超, 曹春, 方锋, 唐千惠, 梁朕月 (4785)
海南岛臭氧污染时空变化及敏感性特征	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (4799)
华东地区对流层 O ₃ 和前体物 HCHO 及 NO ₂ 的时空特征	王晓雯, 刘旻霞, 王扬, 宋宜凯 (4809)
2006~2020 年广东省大气甲醛排放演变特征	明桂英, 朱曼妮, 沙青娥, 张雪驰, 饶思杰, 陈诚, 刘慧琳, 郑君瑜 (4819)
淄博市涂装行业 VOCs 排放水平及减排潜力	黄玥润, 杨文, 王秀艳, 王雨燕, 程颖, 王帅 (4832)
西安市城市降尘和土壤尘 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 中碳组分特征	沈利娟, 王红磊, 孙杰娟, 刘诗云, 刘焕武, 赵天良 (4843)
长江流域径流模拟及其对极端降雨的响应	高爽, 凌超普, 汤水荣, 王心亮, 王慧勇, 孟磊, 颜晓元 (4853)
黄河流域内蒙古段水化学同位素特征及水体转化关系	裴森森, 段利民, 苗平, 潘浩, 崔彩琪, 张波, 籍健勋, 罗艳云, 刘廷玺 (4863)
古堆泉域岩溶地下水水化学特征及成因	唐春雷, 申豪勇, 赵春红, 王志恒, 谢浩, 赵一, 梁永平 (4874)
华北平原典型城市(石家庄)地下水重金属污染源解析与健康风险评价	陈慧, 赵鑫宇, 常帅, 宋圆梦, 卢梦淇, 赵波, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4884)
湖南东江湖表层沉积物重金属的空间分布、形态及生态风险	张同亮, 衣丽霞, 黎常成, 袁首枢, 豆奕轩, 田胜艳, 林尚璇 (4896)
太湖水华前表层水 CDOM 的光谱特征与来源解析	王永强, 卢少勇, 黄蔚, 韩镇阳, 国晓春 (4906)
白洋淀典型水域 COD 的组成及各组分贡献	李琦, 张超, 张文强, 温胜芳, 单保庆, 季恺悦 (4915)
白洋淀典型抗生素的源解析及其特定源风险评估	宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 赵鑫宇, 陈慧, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4927)
雅鲁藏布江中游河流生态系统健康状态对水环境因子的响应	李晓东, 杨清, 刘惠秋, 巢欣, 杨胜烟, 巴桑 (4941)
鄱阳湖典型河湖交汇区浮游植物现状分析	于新平, 陈宇炜, 刘金福, 王俊颖, 徐光锋, 邹浩月, 陈楠, 夏雨 (4954)
不同黑臭程度下城市河道浮游植物群落结构、多样性和功能群	张琪琪, 曾劼, 尹卓, 冯杰, 刘静, 修宇鑫, 刘国, 许春阳 (4965)
反硝化脱氮对太湖蓝藻水华态势的影响	李昌杰, 许海, 詹旭, 张铮惠, 朱梦圆, 邹伟, 肖曼, 倪子怡, 朱慧 (4977)
密云水库入库河流微生物群落演替对氮素形态转化的影响	辛苑, 张耀方, 李添雨, 叶芝茜, 申佩弘, 魏源送, 高超龙, 舒舒兴, 张俊亚 (4985)
城市尾水氮代谢过程中芽孢杆菌对微藻作用机制	赵志瑞, 马超, 颜嘉晨, 李书缘, 李晴, 胡紫如, 呼庆, 刘硕, 万敬敏 (4996)
高效异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Glutamicibacter</i> sp. WS1 低温下对多种氮源的脱氮特性及氮代谢机制	魏淑惠, 罗晓, 吕鹏翼, 马文凯, 苏金卫, 李伟, 崔建升 (5006)
大环内酯类抗生素在饮用水处理过程中的污染特征及其氯化反应机制	岑霞, 程思宇, 石宗民, 谢卓鸿, 张凌菱, 杨滨, 应光国 (5017)
不同堆肥工艺处理的城市污水污泥对滨海湿地土壤中养分释放特征和潜力的影响	贾培寅, 王馨, 花玉婷, 姜志翔 (5025)
淮河流域安徽段水体和沉积物微塑料赋存特征及风险评估	张海强, 高良敏, 葛娟, 赵兴兰, 张振, 慕明, 邱宇辉 (5036)
黄河三角洲湿地表层沉积物中微塑料的分布、来源和风险评估	耿娜, 赵广明, 张大海, 袁红明, 李先国 (5046)
固原市农田土壤微塑料的分布特征及风险评估	马贵, 丁家富, 周悦, 周炎炎, 廖彩云, 海金涛, 王欢 (5055)
鄱阳湖湿地淹水与非淹水状态下微塑料表面细菌群落分布特征	赵俊凯, 陈旭, 胡婷婷, 廖轶颖, 邹龙, 简敏菲, 刘淑丽 (5063)
聚苯乙烯微塑料对铜绿假单胞菌生物膜形成和结构变化的影响	陶辉, 于多, 杨兰, 陈泽扬, 周灵沁, 罗雲鑫 (5071)
聚苯乙烯微塑料对小白菜生长、生理生化及冠层温度特性的影响	郭冰林, 丰晨晨, 陈悦, 林迪, 李岚涛 (5080)
聚乙烯与磺胺二甲嘧啶复合胁迫对大豆种子萌发及幼苗生长生理特征的影响	赵肖琼, 张恒慧, 赵润枝, 张新梅 (5092)
离子类型、强度和铁氧化物影响下微塑料的迁移行为及模型计算	张然, 于可飞, 黄磊, 陈雅丽, 马杰, 翁莉萍, 李永涛 (5102)
土地利用和气候变化对农牧交错带生态系统服务的影响	徐文彬, 饶良懿 (5114)
有机碳流失对土壤侵蚀的响应及其驱动因素: 基于 Meta 分析	刘小岚, 黄金权, 齐瑜洁, 李威闻, 刘纪根, 陈燕飞, 高绣纺 (5125)
平衡施肥与秸秆覆盖对紫色土坡耕地养分及其化学计量的影响	张高宁, 徐绮雯, 何丙辉, 李天阳, 冯梦蝶, 梁珂 (5135)
稀土-重金属共污染土壤中真菌群落结构特征及主导影响因素	罗颖, 李敬伟, 袁浩, 包智华 (5145)
周年轮作休耕对土壤 AMF 群落和团聚体稳定性的影响	鲁泽让, 夏梓泰, 芦美, 赵吉霞, 李永梅, 王自林, 范茂攀 (5154)
华北平原典型城市土壤微生物群落时空变化规律及其驱动因子	赵鑫宇, 陈慧, 常帅, 宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐 (5164)
高量秸秆还田配施芽孢杆菌对沙化土壤细菌群落及肥力的影响	聂扬眉, 步连燕, 陈文峰, 安德荣, 韦革宏, 王红雷 (5176)
基于大田试验的铅镉复合污染土壤中甜糯玉米低积累特性	唐乐斌, 李龙, 宋波, 董心月, 韦美溜 (5186)
不同阻控措施对生菜中镉铅累积及品质的影响	周洪印, 李嘉琦, 包立, 夏运生, 王晟, 吴龙华, 张乃明 (5196)
纳米氧化铜对镉胁迫下小油菜生理生化和重金属累积的影响	王诗琪, 孙约兵, 黄青青, 徐应明, 董如苗, 孟庆尧 (5204)
不同污染区巨菌草生物炭内源污染物分布及其生物毒性	刘莉雅, 崔红标, 刘笑生, 张雪, 董婷婷, 章腾, 周静 (5214)
CuFeO ₂ 改性生物炭对四环素的吸附特性	刘国成, 张新旺, 信帅帅, 王倩文, 阎清华, 周成智, 辛言君 (5222)
基于 Meta 分析的全氟化合物对鱼类生态毒性效应	陆宏, 周锦阳, 杨帆, 王蓓莉, 程治文, 申哲民, 袁涛 (5231)
基于 PMF 模型的县域尺度土壤重金属来源分析及风险评估	郑永立, 温汉辉, 蔡立梅, 罗杰, 汤端阳, 武妙, 李慧, 李鼎 (5242)
基于 PMF-PCA/APCS 与 PERI 的菏泽油田牡丹种植区表层土壤重金属潜在来源识别及生态风险评估	赵庆令, 李清彩, 安茂国, 于林松, 万鑫, 曹付恒, 韩文撑, 陈娟, 王天鸽 (5253)
重庆市煤矸山周边农产品镉健康风险评估及土壤环境基准值推导	马杰, 余泽蕾, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 刘萍, 徐敏 (5264)
安徽典型硫铁矿集中开采区土壤重金属污染特征及来源解析	贾晗, 刘军省, 王晓光, 鞠林雪, 何鑫, 周建伟, 张羲 (5275)
湘东北典型河源区土壤重金属分布特征、来源解析及潜在生态风险评估	杨振宇, 廖超林, 邹炎, 谢伍晋, 陈晓威, 张驭飞 (5288)
不同含量外源镉在红壤中的变化特征	周子阳, 庞瑞, 宋波 (5299)
CO ₂ 泡沫混凝土碳封存潜力分析	张源, 他旭鹏, 覃述兵, 郝佑民 (5308)
综合环境社会经济指标的优先污染物筛选方法研究: 以电子废物拆解为例	陈源, 蔡震, 李金惠 (5316)
《环境科学》征订启事(4808) 《环境科学》征稿简则(4831) 信息(4842, 5124, 5153)	

长江流域径流模拟及其对极端降雨的响应

高爽^{1,2}, 遆超普^{2,3*}, 汤水荣^{1*}, 王心亮², 王慧勇², 孟磊¹, 颜晓元^{2,3}

(1. 海南大学热带作物学院, 海口 570228; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 研究流域径流量变化可为水资源科学调配、利用开发、水旱灾害防治、水环境污染整治和国民经济可持续发展等提供重要依据。但近年来受全球变暖影响, 极端气候事件, 尤其是极端降雨的发生频率和强度出现了变化, 直接或间接影响径流量变化。运用 SWAT 模型模拟 1965~2019 年间长江流域径流时空变化规律, 分析了不同极端降雨条件下径流对降雨的响应。结果表明, 1965~2019 年间长江流域径流变化并不显著, 流域总径流和中下游径流均经历了“枯-丰-枯-丰”4 个阶段。极端降雨情景模拟发现, 50 a 一遇极端降雨下, 长江上、中和下游代表性子流域日均径流变化率分别为 6 200%、21% 和 15%, 月均径流变化率为 355%、5% 和 1.3%, 年均变化率为 78%、1% 和 0.24%。而 100 a 一遇极端降雨下, 3 个子流域日均径流变化率分别为 8 000%、25% 和 17%, 月均径流变化率为 437%、7% 和 1.5%, 年均变化率为 96%、1.2% 和 0.28%。研究结果可为流域水资源管理和利用及洪涝灾害预测与防控等提供理论依据。

关键词: 长江流域; 径流; 极端降雨; 时空变化; 水资源管理

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)09-4853-10 DOI: 10.13227/j.hjks.202210150

Runoff Simulation and Its Response to Extreme Precipitation in the Yangtze River Basin

GAO Shuang^{1,2}, TI Chao-pu^{2,3*}, TANG Shui-rong^{1*}, WANG Xin-liang², WANG Hui-yong², MENG Lei¹, YAN Xiao-yuan^{2,3}

(1. College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou 570228, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Studies on runoff are crucial for the scientific allocation, utilization, and development of water resources and can provide an important basis for the prevention and control of flood and drought disaster, as well as water environmental pollution management. Affected by global warming, the frequency and intensity of extreme climate events, particularly extreme precipitation, have significantly changed in recent years, which can directly or indirectly impact runoff changes. In this study, we used the SWAT model to simulate the spatiotemporal variations in runoff in the Yangtze River Basin from 1965 to 2019 and analyzed the response of runoff to precipitation under extreme conditions. The results showed that the changes in total runoff in the Yangtze River Basin were not significantly different from 1965 to 2019. The total runoff and the mid-lower runoff in the basin experienced four stages of “dry-wet-dry-wet.” Simulations revealed that under the 50-year extreme precipitation event, the increase in daily average runoff was 6 200%, 21%, and 15% for the typical sub-basins of the upper, middle, and lower reaches of the Yangtze River, respectively. Additionally, the increase in monthly and annual average runoff was 355%, 5%, and 1.3% and 78%, 1%, and 0.24%, for upper, middle, and lower reaches of the Yangtze River, respectively. Moreover, under the 100-year extreme precipitation, the average daily runoff increasing rates were 8 000%, 25%, and 17% for upper, middle, and lower reaches of the Yangtze River, respectively, compared to the monthly increase of 437%, 7%, and 1.5% and annual increase of 96%, 1.2%, and 0.28%, respectively. Our findings may improve the understanding of hydrological responses to climate change and provide valuable inferences to decision-makers and water managers for better allocation and management of water resources.

Key words: Yangtze River Basin; runoff; extreme precipitation; spatial and temporal variations; water resource management

河流径流不仅事关社会经济的发展, 也影响海洋生态环境^[1]。研究流域径流量变化规律及其影响因素, 是流域综合管理的重要依据, 对流域水资源配置、利用开发和区域资源可持续发展至关重要, 也对维持河流生命健康和社会经济可持续发展具有重要参考价值。然而近百年来随着人为活动的加剧和全球温度的上升, 导致地表辐射、大气环流和水文循环发生了改变^[2], 极端高温、干旱和降水等气候事件发生的频率、强度及其持续时间显著增加^[3]。在人类活动和气候变化的双重影响下, 流域径流量发生了明显变化并伴随着极端径流产生。

其中降雨是径流产生的主要因素, 降雨的时空分配决定了径流的季节性变化和区域性特征^[4], 降

雨量大小直接影响径流量的丰枯变化^[5], 进而影响水资源调度和管理并与洪水或干旱事件密切相关^[6]。强度大且持续时间长的极端降雨事件往往会致径流增加, 从而引发洪水、泥石流等自然灾害, 不仅会造成粮食歉收、城市内涝和交通瘫痪, 还会引起人员伤亡和水污染等问题, 严重损害人民生命和财产安全^[7~9]。

长江流域是我国第一大流域, 丰富的水资源保

收稿日期: 2022-10-15; 修订日期: 2022-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41961124004, 42061124001); 海南省自然科学基金项目(2019RC064); 国家重点研发计划项目(2021YFD1700800)

作者简介: 高爽(1997~), 女, 硕士, 主要研究方向为水文过程与水污染控制, E-mail: 1738348984@qq.com

* 通信作者, E-mail: cpti@issas.ac.cn; tangshuirong@163.com

证了流域内经济发展,使其在我国经济发展中占据突出地位^[10].但近年来,长江流域极端降水事件频率和强度呈显著增加趋势^[11,12],导致洪涝灾害十分严重,在影响流域经济发展的同时也造成了严重的生态环境问题^[13,14].而目前关于长江流域径流变化的研究大多关注某些子流域^[15,16],鲜少对长江流域进行整体性研究,且研究方法单一,主要以经验模型和长期观测为主^[17,18].此外,长江流域极端降雨研究主要集中于极端降雨频率、降雨指数、时空变化规律和驱动因素等方面^[19,20],缺乏考虑极端降雨对径流变化影响的研究.

因此,本研究采用 SWAT 模型在模拟长江流域径流时空变化规律的同时,通过改变降水参数,分别在其上、中、下游代表性子流域设置极端降水情景,揭示极端降水对流域径流的影响,以期能为明确全球变暖背景下流域径流变化特征、极端降水变化引起的水文效应和流域水资源管理和利用提供理论依据与数据支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长江全长 6 387 km,流域面积 180 万 km²,西高东低,高程总落差 5 800 m 左右.长江发源于唐古拉山脉,干流自西向东横贯中国中部,经青、藏、川、滇、鄂、湘、赣、皖、苏这 9 个省,沪、渝这 2 个直辖市,数百条支流延伸至贵、甘、陕、桂、豫、浙、粤、闽这 8 个省的部分地区,总计 19 个省级行政区,于崇明岛以东汇入东海.研究区横跨中国地貌三级阶梯,地形复杂多样,其中山地丘陵占 67.2%,其次为平原,占 28.1%,水域占 4.7%.流域气候类型主要以亚热带季风性气候为主,年平均气温呈东高西低、南高北低的分布趋势,年均气温在 12.6 ~ 28℃.地形和季风性气候等因素导致长江流域年降水量时空分布不均.流域内降水期主要集中在 4 ~ 10 月,大部分地区属于湿润带,降水量在 800 ~ 1 600 mm,空间分布呈西北到东南递增的趋势.研究区内汛期与降水趋势一致,主要集中在 5 ~ 10 月,多年平均径流量约 9 616 亿 m³,其中 7 月和 8 月干流径流量最大也是洪涝灾害多发期^[21].

1.2 研究方法和数据库构建

SWAT 模型是由美国农业部 (USDA) 农业研究中心于 1994 年研发的分布式水文模型,目前已广泛应用于众多国家和地区^[22].模型主要由水文子模型、侵蚀子模型和污染子模型这 3 个部分构成,在不同的气象、土壤、土地利用和管理措施下,对水文循环、土壤侵蚀和营养物质的迁移转化进行模

拟^[23].SWAT 模型可与 ArcGIS 软件结合,作为 ArcGIS 的拓展模块运行,所需数据主要由地理空间数据和属性数据两部分构成,本研究中空间数据统一采用投影坐标系 WGS_1984_Albers.

1.2.1 地理空间数据

数字高程图 (DEM) 是用于计算河流流向、提取河流坡长、河网校正和子流域划分的基础数据^[24],本研究将分辨率为 30 m 的全国各省的 DEM (<http://www.gscloud.cn/>) 进行拼接,重采样为 1 km × 1 km.依据长江流域边界,运用 ArcGIS 的掩膜提取工具得到长江流域的 DEM,最后投影转换成研究区所需的 DEM.土地利用数据为 1980、1990、2000 和 2010 年的 1 km 栅格数据 (<https://www.resdc.cn/>).使用 SWAT-LUT (SWAT Landuse Update) 软件实现多年土地利用连续变化^[25].土地利用栅格数据经过投影转换后,根据 SWAT 模型土地利用分类体系进行重分类处理,共得到 6 种符合 SWAT 模型土地利用类型分类标准的土地利用类型,分别是:耕地 (AGRL)、林地 (FRST)、草地 (PAST)、水域 (WATR)、居民区 (URBN) 和荒地 (BARR).

河网划分是进行子流域划分的基础,本研究通过 SWAT 加载 DEM、设置集水面积和出口自动生成河网.土壤类型图采用中国科学院南京土壤研究所的 1:100 万土壤栅格数据,投影转换为 WGS_1984_Albers 坐标系.运用联合国农粮组织 (FAO) 的土壤分类系统进行重分类,得到长江流域的土壤类型 67 种.

1.2.2 属性数据

土壤物理属性对土壤剖面的水、气运动情况起决定性作用^[26],影响水文响应单元的水文循环.本研究中长江流域的土壤物理属性基础数据来源于中国科学院南京土壤研究所,并通过 SPAW 等软件进行估算处理.气象数据由实测数据和天气发生器两部分构成.实测气象数据来源中国气象网 (<http://www.cma.gov.cn/>),主要包括流域内 189 个气象站点 (见图 1).将收集到的 1961 ~ 2019 年逐日序列的实测气象数据,通过 SwatWeather 软件计算出 SWAT 模型运行所需要的逐日降水量、日最高最低气温、日相对湿度、太阳辐射和平均风速.天气发生器的作用则用来弥补实测数据里的缺失值,数据由 SwatWeather 软件运算得出的月均值构成.长江流域内存在大量大型水库,结合实际情况模型模拟时需要考虑水库蓄水对子流域出口径流量的影响.本研究主要考虑了研究区内的 30 个大型水库,模型运行所需的水库数据主要有水库开始运行的日期、水库

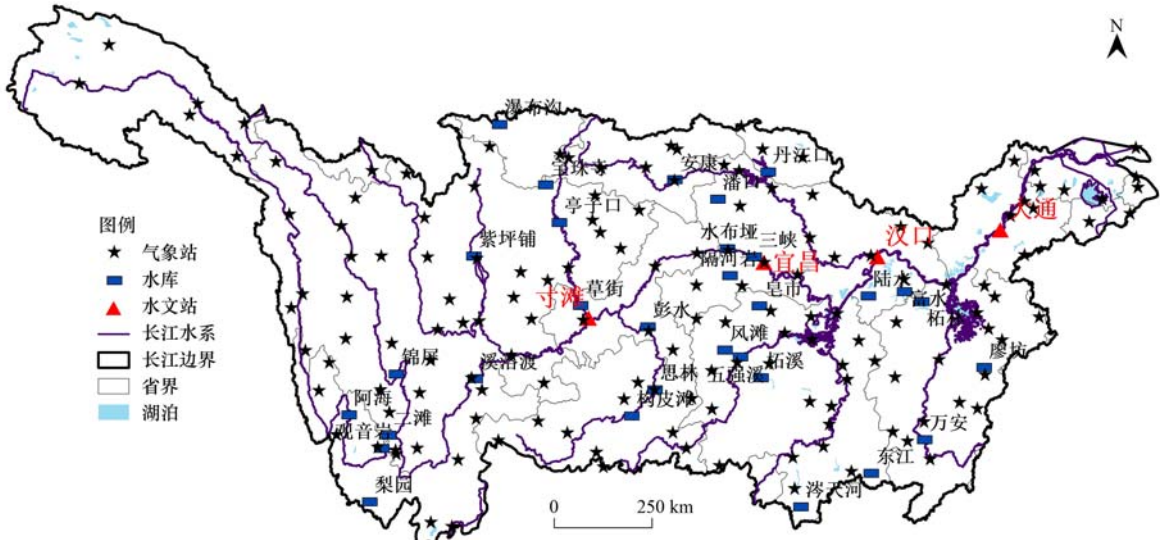


图 1 长江流域水库、水文站点和气象站分布示意

Fig. 1 Distribution of reservoirs, hydrological stations, and meteorological stations in the Yangtze River Basin

初始蓄水量、非常溢洪道水位时的水库水面面积及蓄水量、正常溢洪道水位时的水库水面面积及蓄水量和水面蒸发系数等数据. 实测径流数据主要用于径流模拟结果的率定与验证, 长江流域内大通、宜昌、汉口、寸滩 4 个水文站点 1965 ~ 2019 年的逐月实测径流数据由长江水利网提供 (<http://www.cjw.gov.cn/zwzc/bmgb/>).

1.2.3 SWAT 模型构建与运行

(1) 子流域及水文响应单元的划分 子流域的正确划分可减少径流模拟的不确定性, 为水文模拟和营养物质模拟奠定基础. 有学者研究表明子流域划分存在一个阈值, 当超过这个值时子流域的数量对流域产流几乎无影响^[27]. 本研究中, 当子流域个

数大于 218, 即集水面积阈值小于 450 000 km^2 时, 径流量对子流域划分数量的响应趋于稳定. 基于 DEM 和修正的河网, 结合水库位置, 选取长江口为流域出口, 最终将长江流域划分成 416 个子流域 (图 2).

水文响应单元是指子流域中相同土地利用类型, 相同坡度和土壤类型的区域. 本研究在子流域的基础上, 通过加载土地利用类型图和土壤类型图并将坡度重分类为 5 类: $<15^\circ$ 、 $16^\circ \sim 25^\circ$ 、 $26^\circ \sim 35^\circ$ 、 $36^\circ \sim 45^\circ$ 和 $>45^\circ$, 设置坡度阈值、土地利用阈值和土壤阈值均为 20%, 最终确定水文响应单元 (HRU) 1 795 个.

(2) 模型运行 在水文响应单元的基础上导入气象数据和水库数据实现模型运行. 模型运行时以

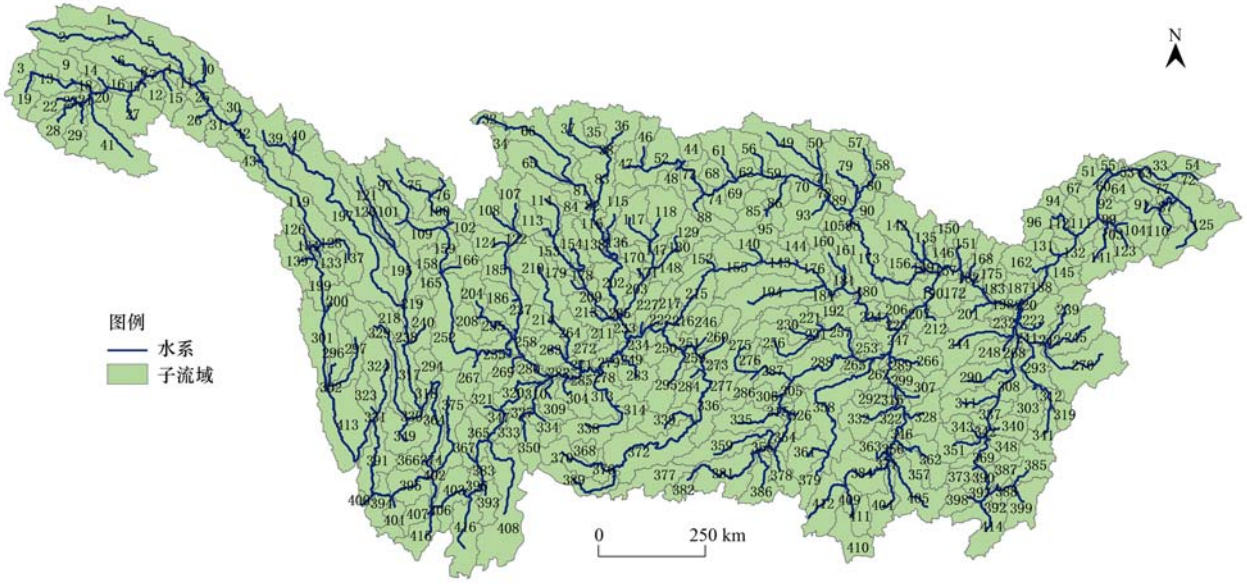


图 2 长江流域子流域划分

Fig. 2 Sub-basins of the Yangtze River Basin

月为尺度,设置 4a 为预热期对长江流域 1961 ~ 2019 年的径流进行模拟.

1.2.4 径流率定与验证

通过 SWAT-CUP2012 选择对径流影响较大的参数对长江流域径流进行率定和验证. 对参数初始范围不断迭代调整其范围后,通过对比以往研究参数^[21],确定适合研究区的最优参数及其范围;分别选取上中下游大通、汉口、宜昌和寸滩这 4 个站点 1961 ~ 2019 年的逐月实测径流数据进行率定验证. 模拟期为 1961 ~ 2019 年,其中前 4 a 为预热期,1965 ~ 1994 年为率定期,1995 ~ 2019 年为验证期. 采用相关系数 R^2 ($0 < R^2 < 1$) 和 Nash-Sutcliffe 系数 NSE ($-\infty < E < 1$) 作为模型的评价指标. R^2 和 NSE 越趋近于 1,实测数据与模拟数据的相关性越大,模拟数据越可靠. 一般情况下, $R^2 > 0.6$, $NSE > 0.5$ 认为模型模拟结果可以接受^[28].

1.2.5 极端降雨情景设置

IPCC 第五次评估报告指出,全球变暖趋势会一直持续,极端降雨强度和发生频率将显著增加,引起极端水文变化^[29]. 本研究采取任意情景设置法,根据极端降水常用的统计方法气候极值再现期,选择了不同重现期降雨极值研究中时间尺度最长,最极端的两类^[30-32]设置了两种情景:情景一为分别在上中下游代表性子流域设置 50 a 一遇极端降雨;情

景二为在所述 3 个子流域设置 100 a 一遇极端降雨(表 1);连续极端降雨模拟期为 7 月 1 ~ 3 日,以 2019 年为基准年. 其中上、中、下游的代表性子流域分别选取上游位于玉树县的 43 号子流域、中游位于武汉市的 164 号子流域、下游位于南京市的 60 号子流域进行径流模拟,分别从日、月、年尺度上对 3 个子流域径流变化进行分析.

表 1 不同重现期各地降雨极值^{[30,33]/mm}

类型	玉树县	武汉市	南京市
50 a 一遇降雨极值	43.62	299	206
100 a 一遇降雨极值	49.13	355	234

2 结果与分析

2.1 模型径流率定验证

模型率定验证参数如表 2 所示,评价指标结果表明率定期大通、汉口、宜昌和寸滩这 4 个站点 R^2 和 NSE 均在 0.9 以上,其中宜昌 R^2 高达 0.96,汉口 NSE 最高可达 0.93,整体拟合效果较好(表 3). 验证期各站点的 R^2 和 NSE 整体略低于率定期,但全部在 0.82 以上,均能满足精度要求. 验证期的实测径流与模拟值拟合情况如图 3 所示,实测值和模拟值整体变化趋势一致,表明 SWAT 模型在长江流域拟合程度较好,可以用来进行长江流域的径流模拟.

表 2 径流率定验证参数¹⁾

Table 2 Major sensitive parameters in runoff calibration

参数名称	描述	敏感值范围	敏感值
r_CN2	初始 SCS 径流曲线值	-0.01 ~ 0.37	0.25
v_ALPHA_BF	基流 α 因子	-0.08 ~ 0.64	0.635
v_GW_DELAY	地下水延迟时间/d	221.67 ~ 665.83	422.65
r_GWQMN	浅层含水层产生基流的水位阈值	0.73 ~ 2.18	0.99
r_SOL_AWC	土壤有效可利用水量	-0.79 ~ 0.07	-0.31
v_CH_K2	主河道河床有效水力传导度	-154.58 ~ 282.07	263.50
v_CH_N2	主河道曼宁系数	-0.00 ~ 0.01	0
v_REVAPMN	浅含水层到深含水层阈值深度	199.18 ~ 598.32	531.46
r_GW_REVAP	地下水再蒸发系数	-0.03 ~ 0.90	0.28
r_SLSUBBSN	平均坡长	-0.77 ~ 0.07	-0.33
v_ESCO	土壤蒸发补偿因子	0.47 ~ 1.40	1.08
v_EPCO	植物吸收补偿因子	0.00 ~ 0.56	0
r_SOL_BD	表层土壤湿容重	0.84 ~ 1.55	0.85
r_SOL_K	饱和水力传导系数	-0.17 ~ 0.50	-0.05
r_SURLAG	地表径流滞后系数	-0.31 ~ 0.23	-0.03
v_SFTMP	降雪气温	-1.64 ~ 5.09	3.49
r_CANMX	林冠最大截流量	-0.15 ~ 0.56	-0.04

1) r_表示乘以(1+率定值),v_表示替换原有值

2.2 长江流域径流变化规律

长江流域降雨-径流年际变化趋势(图 4)显示

径流变化规律与降雨一致,其中 1965 ~ 1987 年和 1997 ~ 2019 年波动较大,1988 ~ 1996 年波动较小.

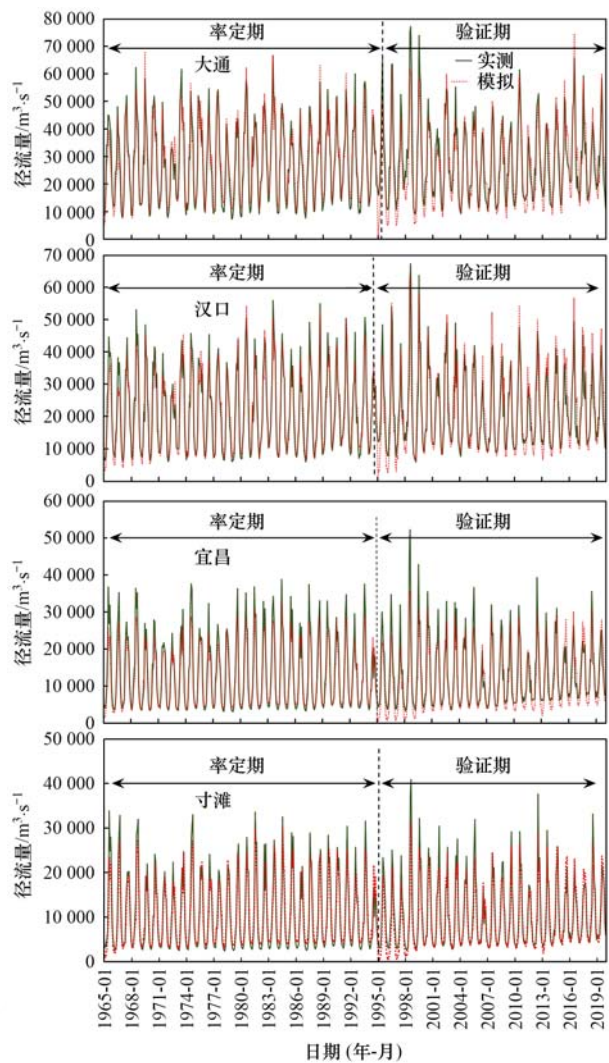


图3 长江流域水文站(大通、宜昌、汉口和寸滩)径流实测值和模拟值对比

Fig. 3 Comparisons of measured and simulated runoffs at different hydrological stations (Datong, Yichang, Hankou, and Cuntan) in the Yangtze River Basin

长江流域 1965 ~ 2019 年的年平均降雨-径流变化趋势主要表现为, 1965 ~ 1980 年降雨量低于多年均值, 径流模拟结果显示, 同时期长江流域总出口径流量偏枯, 1981 ~ 2000 年降雨量和径流量偏丰, 2001 ~ 2010 年降雨量和径流量偏枯, 2011 ~ 2019 年后又转为降雨和径流偏丰阶段(图 5), 整体丰水年略大于枯水年. 流域径流量在 $27\,800 \sim 42\,790\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 之间, 极大值出现在 1998 年, 多年平均值为 $34\,797\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. 汉口和大通站径流变幅较大, 趋势与流域出口大致相同. 而中上游由于降雨量小和降雨频次少, 寸滩和宜昌径流量仅有微小波动, 变化程度明显低于中下游.

表 3 模型适应性评价结果

Table 3 Adaptability evaluation results of the SWAT model				
水文站点	率定期		验证期	
	R^2	NSE	R^2	NSE
大通	0.91	0.91	0.84	0.82
汉口	0.93	0.93	0.85	0.83
宜昌	0.96	0.91	0.87	0.86
寸滩	0.95	0.90	0.93	0.92

2.3 极端降雨情景下径流量变化规律

极端降雨下各子流域年月日尺度径流变化和年内变化趋势显示, 上游代表性子流域(43 号子流域)在两种极端降雨影响下径流量有所提高(图 6), 并都于 7 月 3 日达到全年径流峰值, 分别为 $560\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $708\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 两天后同时下降到 $45\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 并于两个月后降到基准年径流水平(图 7). 在情景一降雨条件下, 极端降雨期日平均径流增加量为 $513\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 与基准年相比变化率为 6 200%. 情景二条件下, 日平均径流增加量达到 $655\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 比情景一增加 $142\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 与基准年相比变化率为

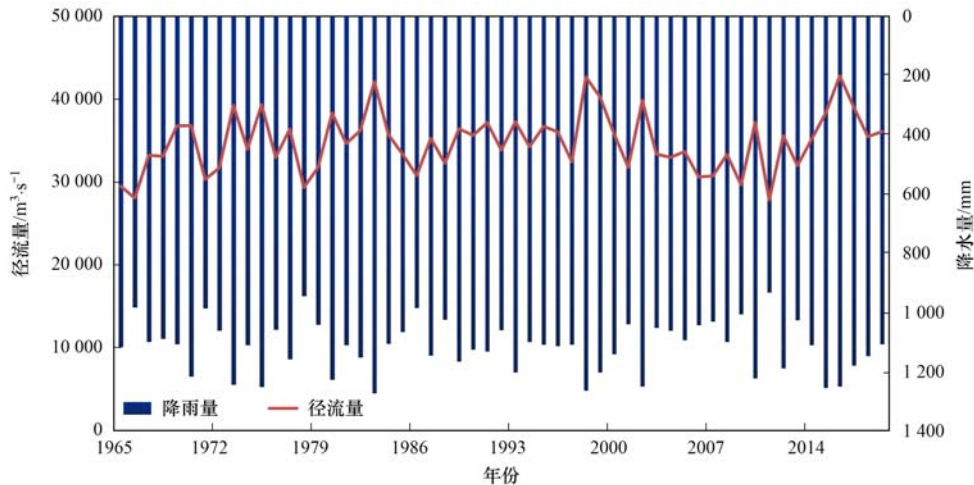


图 4 长江流域降雨-径流年际变化趋势

Fig. 4 Annual variations in runoff in Yangtze River Basin

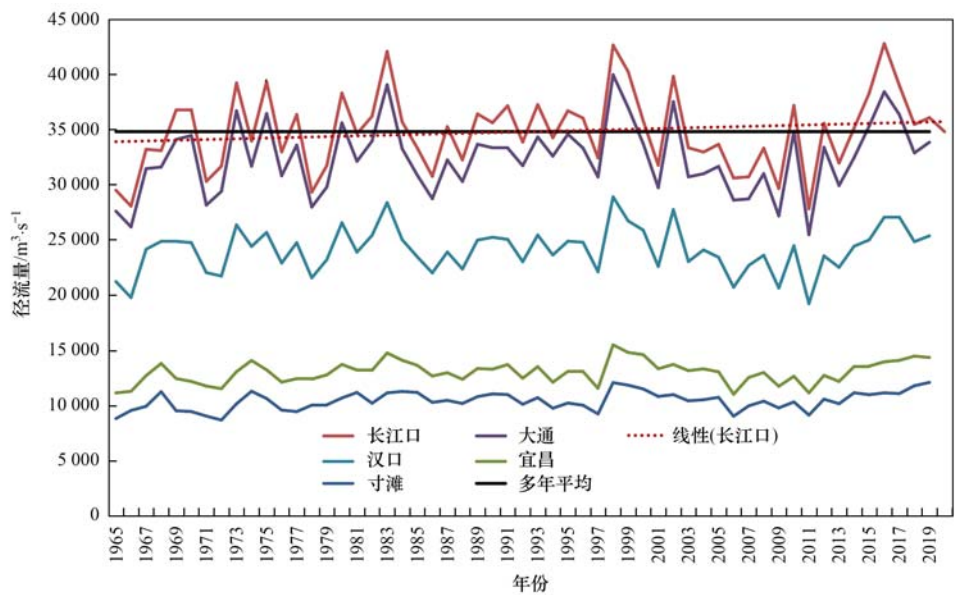


图 5 流域总出口及水文站点径流年际变化

Fig. 5 Annual variations in runoff at the basin outlet and main hydrological station

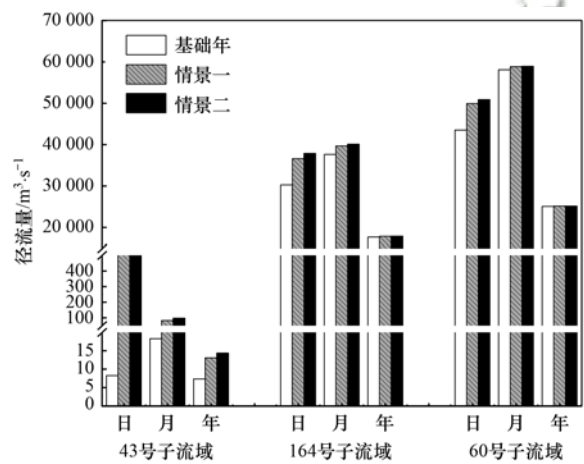


图 6 情景模拟条件下径流量

Fig. 6 Runoff under extreme precipitation conditions in the Yangtze River Basin

8 000%; 而中游代表性子流域(164 号子流域)极端降雨并未使流域产生径流峰值,径流在极端降雨 48 d 后基本回到基准年状态. 情景一极端降雨期日均径流增量 $6\,360\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,与基准年相比变化率为 21%, 情景二日均径流比基准年增加 $7\,623\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,比情景一增加 $1\,263\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,与基准年相比变化率为 25%; 下游代表性子流域(60 号子流域)在极端降雨条件下径流变化情况与中游基本相同,也未在极端降雨期产生径流峰值,并于降雨 16 d 后与基准年径流情况持平. 情景一极端降雨期日均径流增量 $6\,397\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,变化率为 15%, 情景二日均径流增量 $7\,357\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,比情景一增加 $960\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,与基准年相比变化率 17%. 上游情景一和情景二月均径流变化率分别为 35% 和 43%, 其中情景二比情景一径流量增加 $15\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; 中游情景一和情景二月均径

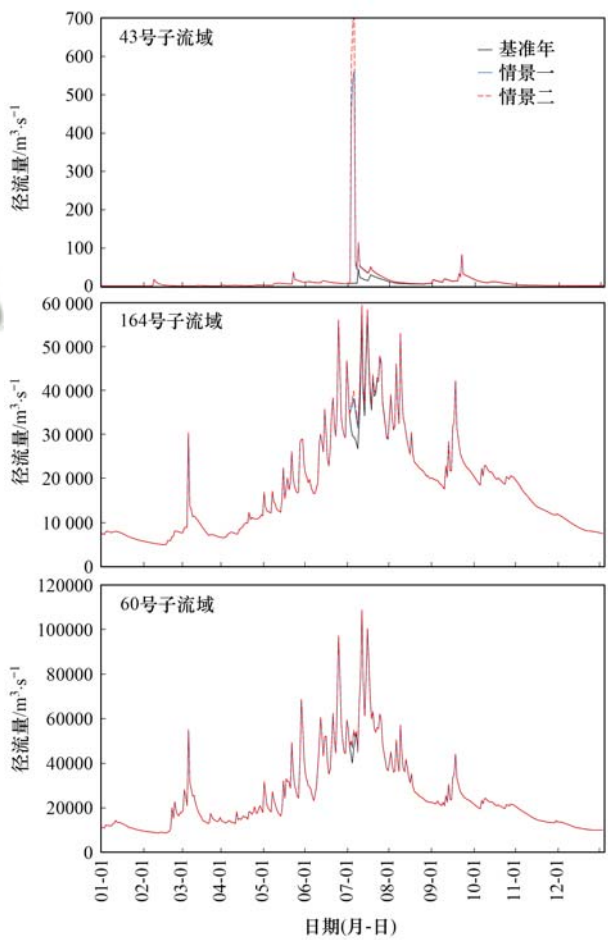


图 7 2019 年情景模拟条件下各子流域径流量年内变化趋势

Fig. 7 Annual variations in runoff in each sub-watershed under different scenarios in 2019

流变化率分别为 5% 和 7%; 情景二比情景一径流量增加 $410\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; 下游情景一和情景二月均径流变化率分别为 1.3% 和 1.5%; 情景二比情景一径流量

增加 $110 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; 上游情景一、情景二年均径流变化率分别为 78% 和 96%; 中游情景一和情景二年均径流变化率分别为 1% 和 1.2%; 下游情景一和情景二年均径流变化率分别为 0.24% 和 0.28%。

3 讨论

3.1 模型率定与验证

SWAT 模型在径流模拟上具有较好的适用性^[34], 通过敏感性分析发现 ALPHA_BF、ESCO、SURLAG、CH_K2 和 CN2 等参数对径流有显著影响, 其中 ALPHA_BF、ESCO 和 CN2 这 3 个主要参数, 与沈胤胤^[21] 研究的结果一致。将率定验证的参数最优值代入模型得到的模型参数符合长江流域参数取值范围。通过与 4 个水文站点评价结果对比发现, 各水文站点率定期 R^2 和 NSE 均高于验证期, Wen 等用模型进行径流模拟时也得出过相似结论, 认为此现象主要由模型参数的不确定性引起^[2]。但率定验证结果显示 4 个站点的 R^2 和 NSE 均在 0.82 以上, 说明 SWAT 模型在长江流域具有较好的适用性。

另外, 土地利用是径流模拟的重要参数, 可以通过影响下渗量和蒸发量, 地下水和地表水补给等影响研究区径流量^[35]。本研究模拟期较长, 流域内土地利用类型不断变化, 以往运用 SWAT 模型进行长时序模拟时, 主要运用分段式模拟和土地利用转移矩阵两种方法来实现更新土地利用的效果, 但分段式模拟无法保证数据的连续性, 会忽略上一阶段数据对下一阶段数据作为背景值的影响, 且在数据率定验证时 also 需进行分段式处理。土地利用转移矩阵需用 ArcGIS 把土地利用变化数据整理出来再人为输入到 ArcSWAT 端口, 对于流域面积大、土地利用类型多且研究周期长和变化频繁的区域, 工作量过大。因此本研究使用 2019 年美国农业部研发的 SWAT-LUT 工具对长江流域土地利用数据进行更新。SWAT-LUT 一方面可以实现模拟数据的连续性, 使模拟效果更接近真实情况, 结果更加科学^[25,36], 同时也实现了土地利用数据自动程序化更新, 提高了工作效率和准确度。

3.2 不同降雨情景下径流的响应特征

径流变化与气候、下垫面和人类活动等密切相关^[37]。气候因素是河川径流变化最基本的影响因素, 其中降雨和蒸发可直接影响地表径流的产生和变化^[15]。吴安琪等^[38] 在淮河上游研究表明在控制单一变量的情况下降雨量每增加 10%, 年径流量平均增加 $290.75 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; 气温每增加 1°C , 年均径流量平均减少 $19.4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。本研究中, 极端降雨的设

置同样使典型研究区的径流量发生显著变化, 特别是上游代表性子流域在两种极端降雨条件下年均径流量提高了 78% 和 96%, 中下游代表性子流域年均径流量也有所提高。经过极端降雨与基准年年内径流变化趋势对比发现, 上游代表性子流域在极端降雨后两个月与基准年持平, 而下游代表性子流域仅需 16 d, 表明在同一重现期降雨条件下, 上游流域受降雨影响时间更长。究其原因, 长江上游处于内陆干旱区, 常年降水较少, 对降雨变化更敏感^[39], 而下游区域, 基流较大, 降雨径流对流域的贡献与影响会被逐渐稀释^[40]。极端降雨条件下流域月尺度, 年尺度径流变化率较小, 日均径流量变化率相对明显, 主要在于极端降雨设置主要集中在某几天, 因此极端值对日径流量影响较大, 在月或年尺度上极端值的影响被削弱^[41]。

地形坡度、土壤类型和植被类型等下垫面因素的差异与人为活动对土地利用类型的改变对径流汇流和下渗影响显著^[42]。情景模拟研究中, 在同一重现期极端降雨下, 上游代表性子流域(43 号子流域)变化率最高, 其原因可能是该流域位于干旱半干旱区域, 常年降雨量较少, 基础径流少。流域内土壤土层薄, 保水性能差, 降水快速渗透土壤, 产流速度快且土壤质地以沙砾和粉砾为主, 黏化率低, 在强降雨的冲刷下土壤易随径流流失土壤厚度降低, 进一步增加产流^[43,44]。与此同时, 流域位于山区, 坡度使汇流速度增加^[45]。中游和下游代表性子流域位于湿润地区, 土壤粘土含量较高, 通气透水性低, 下渗较慢, 虽然城市建设使不透水路面积增加, 改变了自然植被覆盖增加产流^[46], 但该流域常年降水量大且位于干流, 基础径流大, 变化率相对较低^[47]。

3.3 径流变化的影响及应对策略

径流变化不仅会影响流域生态环境, 还将对河流水资源和水灾害产生重要影响, 并严重威胁人类生命财产安全和可持续发展^[8]。极端降水是形成极端洪水的主要原因, 对社会的危害远大于水灾本身^[48~50]。如 1998 年长江流域遭遇连续性特大暴雨, 造成全流域性洪水, 受灾省份高达 30 个, 受灾人口 1.86 亿, 直接经济损失达 2550.9 亿元^[51]。《中国水旱灾害防御公报 2021》中指出, 2021 年我国因洪涝灾害导致 5901.01 万人受灾, 其中 590 人失踪死亡, 87.235 万 hm^2 农作物绝收, 经济损失高达 2458.92 亿元^[7]。尤其是 2021 年郑州出现“千年一遇”特大暴雨, 造成严重洪灾, 380 人死亡失踪, 直接经济损失 409 亿^[52]。此外, 极端径流可能会引发或加重水体污染。Parker 等^[53] 通过对美国北卡罗来纳海岸水质研究发现, 在特定的极端降雨期, 雨水径流中存在

人类粪便污染. 车蕊等^[54]也指出典型极端降雨条件下径流中氮磷污染物浓度有所上升. Chang 等^[48]通过室内模拟实验发现极端降雨开始时水质恶化严重并逐渐达到峰值. 而极端降水事件也会导致水体中微生物密度升高, 并增加水媒疾病的风险^[55].

径流变化对人类社会和自然系统影响巨大, 因此, 未来一方面需要进一步深入研究径流变化及其影响因素; 另一方面, 水文研究亟需结合最新观测与模拟技术, 提高观测与模拟能力, 深入认识径流变化的复杂性, 为径流变化的影响评估及其应对提供科技支撑. 此外, 提前制定合理的防洪规划、及时发布预警信息、积极宣传防洪意识、完善城市排水系统和周边水库建设等也有助于提前防范因径流变化导致的水资源安全风险.

4 结论

(1) SWAT 模型对长江流域径流模拟具有较好的适用性. 长江上中下游 4 个水文站点率定期 R^2 和 NSE 均高于 0.9, 验证期评价结果均在 0.8 以上, 表明 SWAT 模型适用于长江流域径流模拟、预测及情景分析.

(2) 长江流域径流 1965 ~ 2019 年经历了“枯-丰-枯-丰”这 4 个阶段, 丰水年略大于枯水年, 径流总体呈上升趋势; 上游降雨量较小, 径流波动微小, 水情稳定, 中下游径流年际变化波动较大, 丰水年大于枯水年, 易出现洪涝灾害.

(3) 极端降雨下不同区域径流变化率存在明显区别, 上游干旱地区径流量变化率较高, 对流域径流影响时间较长, 中下游区域基础流量大, 极端降雨引起的径流量变化率较小且影响时间较短; 极端降雨对日均径流影响较大, 对月尺度或年尺度的径流影响相对较小.

参考文献:

- [1] Li E H, Mu X M, Zhao G J, Gao P, *et al.* Variation of runoff and precipitation in the Hekou-Longmen region of the Yellow River based on elasticity analysis [J]. *The Scientific World Journal*, 2014, **2014**, doi: 10.1155/2014/929858.
- [2] Wen S S, Su B D, Wang Y J, *et al.* Comprehensive evaluation of hydrological models for climate change impact assessment in the Upper Yangtze River Basin, China [J]. *Climatic Change*, 2020, **163**(3): 1207-1226.
- [3] Beaulieu E, Godd ris Y, Donnadieu Y, *et al.* High sensitivity of the continental-weathering carbon dioxide sink to future climate change [J]. *Nature Climate Change*, 2012, **2**(5): 346-349.
- [4] 何艳虎, 陈晓宏, 林凯荣, 等. 东江流域近 50 年径流系数时空变化特征 [J]. *地理研究*, 2014, **33**(6): 1049-1058.
- [5] He Y H, Chen X H, Lin K R, *et al.* Temporal and spatial characteristics of runoff coefficient variations in the Dongjiang basin during 1964-2012 [J]. *Geographical Research*, 2014, **33**(6): 1049-1058.
- [5] 李凯, 王永强, 许继军, 等. 基于 SWAT 模型的巴勒更河流域降雨-径流关系 [J]. *长江科学院院报*, 2022, **39**(4): 41-48.
- [6] Li K, Wang Y Q, Xu J J, *et al.* Rainfall-runoff relation in Balegen River basin based on SWAT model [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2022, **39**(4): 41-48.
- [6] Chen Y D, Zhang Q, Xiao M Z, *et al.* Precipitation extremes in the Yangtze River Basin, China: regional frequency and spatial-temporal patterns [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, **116**(3): 447-461.
- [7] 《中国水旱灾害防御公报》编写组. 《中国水旱灾害防御公报 2021》概要 [J]. *中国防汛抗旱*, 2022, **32**(9): 38-45.
- [7] Compilation Group of China Flood and Drought Disaster Prevention Bulletin. Summary of China flood and drought disaster prevention bulletin 2021 [J]. *China Flood & Drought Management*, 2022, **32**(9): 38-45.
- [8] Carpenter S R, Booth E G, Kucharik C J. Extreme precipitation and phosphorus loads from two agricultural watersheds [J]. *Limnology and Oceanography*, 2018, **63**(3): 1221-1233.
- [9] 包鑫, 江燕, 胡羽聪. 潮河流域降雨径流事件污染物输出特征 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3316-3327.
- [9] Bao X, Jiang Y, Hu Y C. Characteristics of pollutant dynamics under rainfall-runoff events in the Chaohe River Watershed [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3316-3327.
- [10] Zhu M H, Shao L G. An analysis on the economic cooperation and the industrial synergy of the main river region: from the perspective of the Yangtze river economic zone [J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2020, **11**(3): 1055-1064.
- [11] Guan Y H, Zheng F L, Zhang X C, *et al.* Trends and variability of daily precipitation and extremes during 1960-2012 in the Yangtze River Basin, China [J]. *International Journal of Climatology*, 2017, **37**(3): 1282-1298.
- [12] Yuan J, Xu Y P, Wu L, *et al.* Variability of precipitation extremes over the Yangtze River Delta, eastern China, during 1960-2016 [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, **138**(1): 305-319.
- [13] Wang C S, Zhang R, Zhang S. A 2000-year spatiotemporal pattern and relationship between cities and floods in the Yangtze River Basin, China [J]. *River Research and Applications*, 2021, doi: 10.1002/rra.3893.
- [14] 秦年秀, 姜彤. 基于 GIS 的长江中下游地区洪灾风险分区及评价 [J]. *自然灾害学报*, 2005, **14**(5): 1-7.
- [14] Qin N X, Jiang T. GIS based risk zoning and assessment of flood disaster in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2005, **14**(5): 1-7.
- [15] Zhang X Q, Zheng Z W, Wang K. Prediction of runoff in the upper Yangtze River based on CEEMDAN-NAR model [J]. *Water Supply*, 2021, **21**(7): 3307-3318.
- [16] 周建军, 张曼. 近年长江中下游径流节律变化、效应与修复对策 [J]. *湖泊科学*, 2018, **30**(6): 1471-1488.
- [16] Zhou J J, Zhang M. Effect of dams on the regime of the mid-lower Yangtze River runoff and countermeasures [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(6): 1471-1488.
- [17] Zhang Q, Xu C Y, Becker S, *et al.* Sediment and runoff changes in the Yangtze River basin during past 50 years [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, **331**(3-4): 511-523.
- [18] 徐苏, 张永勇, 窦明, 等. 长江流域土地利用时空变化特征及其径流效应 [J]. *地理科学进展*, 2017, **36**(4): 426-436.
- [18] Xu S, Zhang Y Y, Dou M, *et al.* Spatial distribution of land use

- change in the Yangtze River basin and the impact on runoff[J]. *Progress in Geography*, 2017, **36**(4): 426-436.
- [19] Guo J L, Guo S L, Li Y, *et al.* Spatial and temporal variation of extreme precipitation indices in the Yangtze River basin, China [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2013, **27**(2): 459-475.
- [20] Li X, Zhang K, Gu P R, *et al.* Changes in precipitation extremes in the Yangtze River Basin during 1960-2019 and the association with global warming, ENSO, and local effects[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **760**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144244.
- [21] 沈胤胤. 基于 SWAT 模型的长江流域泥沙与 POC 入海通量研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2018.
- [22] Wang Y, Bian J M, Zhao Y S, *et al.* Assessment of future climate change impacts on nonpoint source pollution in snowmelt period for a cold area using SWAT [J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**(1), doi: 10.1038/s41598-018-20818-y.
- [23] 张银辉. SWAT 模型及其应用研究进展[J]. *地理科学进展*, 2005, **24**(5): 121-130.
- Zhang Y H. Development of study on model-SWAT and its application[J]. *Progress in Geography*, 2005, **24**(5): 121-130.
- [24] 王启源, 宋宇洋. 基于 DEM 的湟水流域河网阈值分析[J]. *水电能源科学*, 2022, **40**(6): 6-9.
- Wang Q Y, Song Y Y. River network threshold analysis of Huangshui basin based on DEM [J]. *Water Resources and Power*, 2022, **40**(6): 6-9.
- [25] Moriasi D N, Pai N, Steiner J L, *et al.* SWAT-LUT: a desktop graphical user interface for updating land use in SWAT [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2019, **55**(5): 1102-1115.
- [26] 张小咏, 李佳, 杨艳昭, 等. 基于 SWAT 模型的长江源区径流模拟[J]. *西北林学院学报*, 2012, **27**(5): 38-44, 234.
- Zhang X Y, Li J, Yang Y Z, *et al.* Runoff simulation of the catchment of the headwaters of the Yangtze River based on SWAT model[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2012, **27**(5): 38-44, 234.
- [27] 马放, 姜晓峰, 王立, 等. 基于 SWAT 模型的亚流域划分方法研究[J]. *中国给水排水*, 2015, **31**(7): 53-57.
- Ma F, Jiang X F, Wang L, *et al.* Study on Subwatershed delineation based on SWAT model [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, **31**(7): 53-57.
- [28] Kang H, Moon J, Shin Y, *et al.* Modification of SWAT auto-calibration for accurate flow estimation at all flow regimes[J]. *Paddy and Water Environment*, 2016, **14**(4): 499-508.
- [29] IPCC. Climate Change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [30] 王萃萃. 中国大城市极端强降水事件变化的研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2008.
- Wang C C. Changes of precipitation extremes in China's large cities [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2008.
- [31] 左璇, 朱业玉, 郭鹏, 等. 郑州市短历时强降水变化特征及重现期研究[J]. *气象与环境科学*, 2021, **44**(2): 25-32.
- Zuo X, Zhu Y Y, Guo P, *et al.* Research on Variation characteristics and return periods of short-time heavy precipitation in Zhengzhou [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2021, **44**(2): 25-32.
- [32] 殷水清, 薛筱婵, 岳天雨, 等. 中国降雨侵蚀力的时空分布及重现期研究[J]. *农业工程学报*, 2019, **35**(9): 105-113.
- Yin S Q, Que X C, Yue T Y, *et al.* Spatiotemporal distribution and Return period of rainfall erosivity in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, **35**(9): 105-113.
- [33] 蔡文香. 中国极端气候事件的趋势特征与极值分布[D]. 北京: 对外经济贸易大学, 2016.
- Cai W X. Temporal trends features and spatial distributions of extreme climate events in China [D]. Beijing: University of International Business and Economics, 2016.
- [34] 喻晓, 马孝义, 蔡朵朵. 基于 SWAT 模型的合理亚流域划分和径流模拟[J]. *中国农村水利水电*, 2017, (11): 20-25.
- Yu X, Ma X Y, Cai D D. The reasonable sub-watershed delineation and runoff simulation based on SWAT model [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017, (11): 20-25.
- [35] He J, Wan Y R, Chen H T, *et al.* Study on the impact of land-use change on runoff variation trend in Luojiang River Basin, China [J]. *Water*, 2021, **13**(22), doi: 10.3390/w13223282.
- [36] 金鑫, 金彦香, 杨登兴. 基于 LU-SWAT 模型的土地利用/覆被变化对水文过程的影响研究——以黑河上游为例[J]. *灌溉排水学报*, 2019, **38**(5): 114-121.
- Jin X, Jin Y X, Yang D X. Using LU-SWAT Model to analyze the response of hydrological processes to land use/coverage with application to an upper watershed in Heihe basin [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, **38**(5): 114-121.
- [37] 陈新华, 郭巧玲, 陈志辉. 近 50 年来牦牛川径流变化及影响因素分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, **29**(5): 186-191.
- Chen X H, Guo Q L, Chen Z H. The runoff variation characteristics and influencing factors in Beiniuchuan river [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, **29**(5): 186-191.
- [38] 吴安琪, 石朋, 陆美霞, 等. 气候变化对淮河径流及洪峰流量的影响[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2021, **43**(1): 13-17.
- Wu A Q, Shi P, Lu M X, *et al.* Impacts of climate change on runoff and peak flow of Huai River [J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2021, **43**(1): 13-17.
- [39] Baskan O. Analysis of spatial and temporal changes of RUSLE-K soil erodibility factor in semi-arid areas in two different periods by conditional simulation [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2022, **68**(12): 1698-1710.
- [40] 张泳华, 刘祖发, 赵钢铁, 等. 东江流域基流变化特征及影响因素[J]. *水资源保护*, 2020, **36**(4): 75-81.
- Zhang Y H, Liu Z F, Zhao T T G, *et al.* Variation characteristics and influencing factors of base flow in Dongjiang river basin [J]. *Water Resources Protection*, 2020, **36**(4): 75-81.
- [41] 王慧勇, 逆超普, 王良杰, 等. 基于 SWAT 模型的典型农业小流域氮污染时空分布特征及关键源解析[J]. *湖泊科学*, 2022, **34**(2): 517-527.
- Wang H Y, Ti C P, Wang L J, *et al.* Spatiotemporal distribution characteristics and key sources of nitrogen pollution in a typical agricultural watershed based on SWAT model [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, **34**(2): 517-527.
- [42] 刘金平, 任艳群, 张万昌, 等. 雅鲁藏布江流域气候和下垫面变化对径流的影响研究[J]. *冰川冻土*, 2022, **44**(1): 275-287.
- Liu J P, Ren Y Q, Zhang W C, *et al.* Study on the influence of climate and underlying surface change on runoff in the Yarlung Zangbo River basin [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, **44**(1): 275-287.

- [43] 张军红, 吴波. 干旱、半干旱地区土壤水分研究进展[J]. 中国水土保持, 2012, (2): 40-43.
Zhang J H, Wu B. Research progress of soil moisture of arid and semi-arid regions [J]. Soil and Water Conservation in China, 2012, (2): 40-43.
- [44] Liu S Y, Huang S Z, Xie Y Y, *et al.* Spatial-temporal changes of rainfall erosivity in the loess plateau, China: changing patterns, causes and implications [J]. CATENA, 2018, **166**: 279-289.
- [45] 张小娜, 冯杰, 高永波, 等. 不同雨强条件下坡度对坡地产汇流及溶质运移的影响[J]. 水土保持通报, 2010, **30**(2): 119-123.
Zhang X N, Feng J, Gao Y B, *et al.* Influences of slope on runoff and concentration and solute transport under different rainfall intensities [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, **30**(2): 119-123.
- [46] Zhou F, Xu Y P, Chen Y, *et al.* Hydrological response to urbanization at different spatio-temporal scales simulated by coupling of CLUE-S and the SWAT model in the Yangtze River Delta region [J]. Journal of Hydrology, 2013, **485**: 113-125.
- [47] Yang L, Zhao G J, Tian P, *et al.* Runoff changes in the major river basins of China and their responses to potential driving forces [J]. Journal of Hydrology, 2022, **607**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.127536.
- [48] Chang C J, Huang C P, Chen C Y, *et al.* Assessing the potential effect of extreme weather on water quality and disinfection by-product formation using laboratory simulation [J]. Water Research, 2020, **170**, doi: 10.1016/j.watres.2019.115296.
- [49] 张金平. 洪涝灾害带来的危害[J]. 生命与灾害, 2018, (5): 17-19.
- [50] 王小杰, 夏军强, 李启杰, 等. 长江中下游各省市洪涝灾情时空变化及影响因素[J]. 水资源保护, 2023, **39**(2): 78-86.
Wang X J, Xia J Q, Li Q J, *et al.* Spatio-temporal distribution of flood disasters and influencing factors in the middle and lower Yangtze river zone [J]. Water Resources Protection, 2023, **39**(2): 78-86.
- [51] 冯铁忱, 吴群英. 1998 年长江流域洪水灾情[J]. 人民长江, 1999, **30**(2): 27-28.
Feng T C, Wu Q Y. Flood disaster in Yangtze valley in 1998 [J]. Yangtze River, 1999, **30**(2): 27-28.
- [52] 姚远, 曲伟, 柴福鑫, 等. 2021 年郑州“7·20”特大暴雨洪水模拟与分析[J]. 中国防汛抗旱, 2022, **32**(5): 1-4, 20.
Yao Y, Qu W, Chai F X, *et al.* Simulation and analysis of “7·20” extreme rainstorm flood in Zhengzhou City [J]. China Flood & Drought Management, 2021, **32**(5): 1-4, 20.
- [53] Parker J K, McIntyre D, Noble R T. Characterizing fecal contamination in stormwater runoff in coastal North Carolina, USA [J]. Water Research, 2010, **44**(14): 4186-4194.
- [54] 车蕊, 林海, 范中亚, 等. 连续极端降雨对东江流域水质影响分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4440-4449.
Che R, Lin S, Fan Z Y, *et al.* Effects of continuous extreme rainfall on water quality of the Dongjiang river Basin [J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4440-4449.
- [55] Herrador B G, de Blasio B F, Carlander A, *et al.* Association between heavy precipitation events and waterborne outbreaks in four Nordic countries, 1992-2012 [J]. Journal of Water and Health, 2016, **14**(6): 1019-1027.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Transport contributions of Ambient Ozone and Volatile Organic Compounds in Southern Hebei Cities	ZHAO Jiang-wei, NIE Sai-sai, YU Yu-jie, <i>et al.</i> (4775)
Temporal and Spatial Distributions of O ₃ Concentration and Potential Source Area Analysis of Hexi Corridor Based on Satellite and Ground Monitoring	LI Jin-chao, CAO Chun, FANG Feng, <i>et al.</i> (4785)
Spatial and Temporal Variations in Ozone Pollution and Sensitivity Characteristics in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (4799)
Temporal and Spatial Characteristics of Troposphere O ₃ and Precursors HCHO and NO ₂ in East China	WANG Xiao-wen, LIU Min-xia, WANG Yang, <i>et al.</i> (4809)
Evolution Characteristics of Atmospheric Formaldehyde Emissions in Guangdong Province from 2006 to 2020	MING Gui-ying, ZHU Man-ni, SHA Qing-e, <i>et al.</i> (4819)
VOCs Emission Level and Emission Reduction Potential of Coating Industry in Zibo	HUANG Yue-run, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (4832)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Components in PM ₁₀ and PM _{2.5} of Road Dust Fall and Soil Dust in Xi'an	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (4843)
Runoff Simulation and Its Response to Extreme Precipitation in the Yangtze River Basin	GAO Shuang, TI Chao-pu, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (4853)
Water Chemical Isotope Characteristics and Water Transformation Relationship in Mongolian Section of the Yellow River Basin	PEI Sen-sen, DUAN Li-min, MIAO Ping, <i>et al.</i> (4863)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in Gudui Spring Catchment	TANG Chun-lei, SHEN Hao-yong, ZHAO Chun-hong, <i>et al.</i> (4874)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Groundwater of Shijiazhuang, a Typical City in North China Plain	CHEN Hui, ZHAO Xin-yu, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (4884)
Spatial Distribution, Speciation, and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Dongjiang Lake, Hunan Province	ZHANG Tong-liang, YI Li-xia, LI Chang-cheng, <i>et al.</i> (4896)
Spectral Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Surface Water of Taihu Lake Before Cyanobacterial Blooming	WANG Yong-qiang, LU Shao-yong, HUANG Wei, <i>et al.</i> (4906)
Chemical Oxygen Demand(COD) Composition and Contribution in Typical Waters of Baiyangdian Lake	LI Qi, ZHANG Chao, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (4915)
Source Apportionment and Source-specific Risk of Typical Antibiotics in Baiyangdian Lake	SONG Yuan-meng, ZHAO Bo, LU Meng-qi, <i>et al.</i> (4927)
Response of River Ecosystem Health Status to Water Environmental Factors in the Middle Reaches of Yarlung Zangbo River	LI Xiao-dong, YANG Qing, LIU Hui-jiu, <i>et al.</i> (4941)
Analysis on the Current Situation of Phytoplankton in the Typical River- Lake Ecotone of Lake Poyang	YU Xin-ping, CHEN Yu-wei, LIU Jin-fu, <i>et al.</i> (4954)
Phytoplankton Community Structure, Diversity, and Functional Groups in Urban River Under Different Black and Odorous Levels	ZHANG Qi-qi, ZENG Jie, YIN Zhuo, <i>et al.</i> (4965)
Influence of Denitrification on Cyanobacterial Blooms Trends in Lake Taihu, China	LI Chang-jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4977)
Effects of Nitrogen Speciation Transformation on Microbial Community Succession in Input Rivers of Miyun Reservoir	XIN Yuan, ZHANG Yao-fang, LI Tian-yu, <i>et al.</i> (4985)
Action Mechanism of <i>Bacillus</i> on Microalgae During Nitrogen Metabolism in Urban Tailwater	ZHAO Zhi-ni, MA Chao, YAN Jia-chen, <i>et al.</i> (4996)
Nitrogen Removal Characteristics and Metabolism Mechanism of High-Efficiency Cold-Tolerant Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium <i>Glutamicibacter</i> sp. WSI for Various Nitrogen Sources at Low Temperature	WEI Bo-hui, LUO Xiao, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (5006)
Pollution Characteristics of Macrolide Antibiotics During Drinking Water Treatment and Their Chlorination Reaction Mechanism	CEN Xia, CHENG Si-yu, SHI Zong-min, <i>et al.</i> (5017)
Effects of Different Biochar and Effective Microorganism Agent Improvement Approaches on the Nutrient Release Characteristics and Potential of Compost	JIA Pei-yin, WANG Xin, HUA Yu-ting, <i>et al.</i> (5025)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water and Sediments of Anhui Section of Huaihe River Basin	ZHANG Hai-qiang, GAO Liang-min, GE Juan, <i>et al.</i> (5036)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Microplastics in Surface Sediments of Yellow River Delta Wetland	GENG Na, ZHAO Guang-ming, ZHANG Da-hai, <i>et al.</i> (5046)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Farmland Soil in Guyuan	MA Gui, DING Jia-fu, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (5055)
Distribution Characteristics of Microplastic Surface Bacterial Communities Under Flooded and Non-flooded Conditions in Nanjishan Wetland of Poyang Lake	ZHAO Jun-kai, CHEN Xu, HU Ting-ting, <i>et al.</i> (5063)
Influence of Polystyrene Microplastics on the Formation and Structural Change of <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Biofilm	TAO Hui, YU Duo, YANG Lan, <i>et al.</i> (5071)
Effects of Polystyrene Microplastics on Growth, Physiology, Biochemistry, and Canopy Temperature Characteristics of Chinese Cabbage Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	GUO Bing-lin, FENG Chen-chen, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5080)
Effects of Combined Stress of Polyethylene and Sulfamethazine on Seed Germination, Seedling Growth, and Physiological Characteristics of Soybean	ZHAO Xiao-qiong, ZHANG Heng-hui, ZHAO Run-zhu, <i>et al.</i> (5092)
Transport and Model Calculation of Microplastics Under the Influence of Ionic Type, Strength, and Iron Oxide	ZHANG Ran, YU Ke-fei, HUANG Lei, <i>et al.</i> (5102)
Impacts of Land Use and Climate Change on Ecosystem Services in Agro-pastoral Ecotone	XU Wen-bin, RAO Liang-yi (5114)
Response of Organic Carbon Loss to Soil Erosion and Its Drivers: A Meta-analysis	LIU Xiao-lan, HUANG Jin-quan, QI Yu-jie, <i>et al.</i> (5125)
Effects of Balanced Fertilization and Straw Mulching on Soil Nutrients and Stoichiometry in Purple Soil Slope	ZHANG Gao-ming, XU Qi-wen, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5135)
Characteristics and Dominant Influencing Factors of the Fungal Community Structure in Soils Co-contaminated with Rare Earth Elements and Heavy Metals	LUO Ying, LI Jing-wei, YUAN Hao, <i>et al.</i> (5145)
Effects of Annual Crop Rotation and Fallow on Soil AMF Community and Aggregate Stability	LU Ze-rang, XIA Zi-tai, LU Mei, <i>et al.</i> (5154)
Spatial-temporal Changes and Driving Factors of Soil Microbial Communities in a Typical City of North China Plain	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (5164)
Effect of High-volume Straw Returning and Applying <i>Bacillus</i> on Bacterial Community and Fertility of Desertification Soil	NIE Yang-mei, BU Lian-yan, CHEN Wen-feng, <i>et al.</i> (5176)
Low Accumulation Characteristics of Sweet-waxy Maize in Pb and Cd Complex Contaminated Soils Based on Field Trials	TANG Le-bin, LI Long, SONG Bo, <i>et al.</i> (5186)
Effects of Different Control Measures on Cadmium and Lead Accumulation and Quality in Lettuce	ZHOU Hong-yin, LI Jia-qi, BAO Li, <i>et al.</i> (5196)
Effects of Nano-copper Oxide on Physiobiochemical Properties of <i>Brassica chinensis</i> L. and Its Heavy Metal Accumulation Under Cadmium Stress	WANG Shi-qi, SUN Yue-bing, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (5204)
Distribution and Biototoxicity of Endogenous Pollutants in <i>Pennisetum</i> sp. Biochar from Different Polluted Areas	LIU Li-ya, CUI Hong-biao, LIU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (5214)
Adsorption Characteristics of Tetracycline by CuFeO ₂ -modified Biochar	LIU Guo-cheng, ZHANG Xin-wang, XIN Shuai-shuai, <i>et al.</i> (5222)
Ecological Toxic Effect of Perfluorinated Compounds on Fish Based on Meta-analysis	LU Hong, ZHOU Jin-yang, YANG Fan, <i>et al.</i> (5231)
Source Analysis and Risk Assessment of Heavy Metals in Soil of County Scale Based on PMF Model	ZHENG Yong-li, WEN Han-hui, CAI Li-mei, <i>et al.</i> (5242)
Potential Source Identification and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Soil of Heze Oil Peony Planting Area Based on PMF-PCA/APCS and PERI	ZHAO Qing-ling, LI Qing-cai, AN Mao-guo, <i>et al.</i> (5253)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Cadmium in Farmland Soils around the Gangue Heap of Coal Mine, Chongqing	MA Jie, SHE Ze-lei, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (5264)
Pollution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Pyrite Concentrated Mining Area in Anhui Province	JIA Han, LIU Jun-xing, WANG Xiao-guang, <i>et al.</i> (5275)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical River Source Areas of Northeastern Hunan Province	YANG Zhen-yu, LIAO Chao-lin, ZOU Yan, <i>et al.</i> (5288)
Variation Characteristics of Exogenous Cadmium with Different Contents in Red Soil	ZHOU Zi-yang, PANG Rui, SONG Bo (5299)
Analysis of Carbon Storage Potential of CO ₂ Foamed Concrete	ZHANG Yuan, TA Xu-peng, QIN Shu-bing, <i>et al.</i> (5308)
Research on the Screening Method of Priority Pollutants with Integrated Environmental Socio-economic Indicators: Example of E-waste Dismantling	CHEN Yuan, CAI Zhen, LI Jin-hui (5316)