

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第5期

Vol.39 No.5

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

餐饮行业细颗粒物(PM _{2.5})排放测算方法:以上海市为例	王红丽, 景盛翱, 楼晟荣, 陶士康, 乔利平, 李莉, 黄成, 林立, 陈长虹 (1971)
上海夏季PM _{2.5} 中有机物的组分特征、空间分布和来源	高雅琴, 王红丽, 景盛翱, 乔利平, 李莉, 朱书慧, 楼晟荣, 陶士康, 冯加良, 李想, 陈长虹 (1978)
北京南郊区PM _{2.5} 中水溶性无机盐季节变化及来源分析	高韩钰, 魏静, 王跃思 (1987)
基于样方法的天津市春季道路扬尘PM ₁₀ 中水溶性离子特征及来源解析	赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 王士宝, 李越洋 (1994)
广州秋季HONO污染特征及夜间来源分析	田智林, 杨闻达, 虞小芳, 张曼曼, 张贺伟, 程丁, 程鹏, 王伯光 (2000)
基于硫氧同位素研究南京北郊夏季大气中硫酸盐来源及氧化途径	韩珣, 任杰, 陈善莉, 王瑾瑾, 沈潇雨, 魏英, 郭照冰, 朱彬 (2010)
区县尺度机动车高分辨率排放清单建立方法及应用	樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (2015)
典型工业生物质锅炉多环芳烃排放特征	林玉君, 白莉, 王焕香, 肖文, 刘军, 向运荣, 张春林 (2023)
多时间尺度HSPF模型参数不确定性研究	庞树江, 王晓燕, 马文静 (2030)
氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源	金赞芳, 张文辽, 郑奇, 朱晨阳, 李非里 (2039)
白洋淀水体挥发性有机物污染特征与风险评价	高秋生, 赵永辉, 焦立新, 田自强, 杨柳, 杨苏文, 崔志丹, 郝子峰 (2048)
太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 刘延龙, 李元鹏 (2056)
长江口滩涂表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点	朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 程金平 (2067)
桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征	卢晓漩, 李强, 靳振江, 彭文杰, 房君佳, 黄炳惠, 宋昂 (2075)
青藏高原多年冻土区典型植被下河流溶解性有机碳的生物可利用性	马小亮, 刘桂民, 吴晓东, 徐海燕, 叶琳琳, 张晓兰, 白炜 (2086)
城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性	梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 纵亚男, 唐剑锋 (2095)
溶解性有机质在岩溶水系统中的迁移转化及影响因素分析	张连凯, 刘朋雨, 覃小群, 单晓静, 刘文, 赵振华, 姚昕, 邵明玉 (2104)
三峡库区澎溪河回水区溶解态金属离子来源和时空分布特征分析	赵晓松, 蔚建军, 付莉, 姜伟, 周川, 李波, Douglas Haffner, Christopher Weisener, 张磊 (2117)
澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析	望雪, 程豹, 杨正健, 刘德富, 徐雅倩 (2126)
蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征	苏青青, 刘德富, 纪道斌, 宋林旭, 崔玉洁, 李欣, 陈秀秀, 刘心愿 (2135)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中各形态磷的影响	杨文斌, 高顺峰, 万锐, 孙祥, 王赢 (2145)
于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量	文帅龙, 龚琬晴, 吴涛, 郑小兰, 江雪, 李鑫, 钟继承 (2154)
岷江干流表层沉积物中磷形态空间分布特征	杨耿, 秦延文, 韩超南, 马迎群, 刘志超, 杨晨晨 (2165)
农业排水沟渠硝态氮吸收动力学特征及相关性分析	李如忠, 殷齐贺, 高苏蒂, 陈广洲 (2174)
不同合成条件对ZnAl-LDHs覆膜改性生物陶粒除磷效果的影响	向洋, 张翔凌, 雷雨, 方晨佳, 袁野, 姜应和, 徐舟影 (2184)
真空紫外/过二硫酸盐去除饮用水中嗅味物质	孙昕, 史路肖, 张燧, 杨煜, 唐晓 (2195)
石墨烯负载铁锰氧化物活化过一硫酸盐降解金橙G	夏文君, 刘峰, 郝尚斌, 黄天寅, 王忠明, 陈家斌 (2202)
载铜或铈生物炭吸附水体中As(V)的作用机制	李锦, 祖艳群, 李刚, 孙国新 (2211)
DOM不同相对分子质量组分在无机矿物上的吸附及其对卡马西平吸附的影响实验	梁雨, 何江涛, 张思 (2219)
污水处理厂中有机磷阻燃剂的污染特征	孙佳薇, 丁炜楠, 张占恩, 王俊霞, 顾海东 (2230)
低温污水前置强化混凝	刘海龙, 任宇霞, 张忠民 (2239)
印染废水反渗透脱盐系统运行性能及膜污堵特性	谭玉琨, 张泽田, 吴乾元, 姚颖, 胡洪营, 丘培文 (2249)
生物膜CANON反应器性能的优化:从FBBR到MBBR	付昆明, 李慧, 周厚田, 仇付国 (2256)
两次污泥颗粒化过程中微生物群落的动态变化	高景峰, 张丽芳, 张树军, 高永青, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲 (2265)
铝、铁、钛3种金属盐基混凝剂调理污泥的性能比较	王晓萌, 王鑫, 杨明辉, 张淑娟 (2274)
热、热碱处理对污泥溶胞和溶解性有机物的影响	代勤, 张文哲, 于潘芬, 易皓, 刘俊新, 肖本益 (2283)
曝气时间比对亚硝化颗粒污泥形成的影响	李冬, 郭跃洲, 曹美忠, 劳会妹, 李帅, 张杰 (2289)
中国城市污泥中汞含量的时空分布特征	王宁, 刘清伟, 职音, 程柳, 麻冰涓, 毛宇翔 (2296)
夏季太湖湖/藻型湖区N ₂ O生成与迁移特征及其影响因素	郑小兰, 文帅龙, 李鑫, 龚琬晴, 刘德鸿, 钟继承 (2306)
太湖藻型湖区CH ₄ 、CO ₂ 排放特征及其影响因素分析	贾磊, 蒲旖旎, 杨诗俊, 苏荣明珠, 秦志昊, 张弥 (2316)
内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面CO ₂ 、N ₂ O特征	李晋波, 姚楠, 李秀, 赵英, 张阿凤, 兰志龙, 范庭 (2330)
黄土高原成龄苹果园生态系统CO ₂ 通量特征	杨剑锋, 杨小妮, 王俊花, 段宇敏, 祁香宁, 张林森 (2339)
生物炭施用对紫色水稻土温室气体排放的影响	祁乐, 高明, 郭晓敏, 牛海东, 李婷, 孙涛, 曹群岭, 汤铭豪 (2351)
不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响	李平, 郎漫, 李森, 魏玮, 李凯凯 (2360)
ITS高通量测序研究黄海微型真核浮游生物多样性及分布特征	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 张晓娇 (2368)
不同排海方式城市尾水微生物扩散规律	郎秀璐, 宋志文, 徐爱玲, 牛成洁, 郭明月 (2380)
旅游活动对岩溶洞穴地下水中细菌群落的影响:以重庆丰都两个洞穴为例	吕现福, 贺秋芳, 王凤康, 赵瑞一, 张弘 (2389)
不同沼灌年限稻田土壤微生物群落分析	朱金山, 张慧, 马连杰, 廖敦秀, 杨星勇, 王龙昌, 王定勇 (2400)
生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响	阎海涛, 殷金玉, 丁松爽, 任天宝, 许家来, 宗浩, 高强, 刘国顺 (2412)
铅锌尾矿砂污染下的岩溶土壤微生物群落碳源代谢特征	房君佳, 李强, 刘畅, 靳振江, 梁月明, 黄炳惠, 卢晓漩, 彭文杰 (2420)
湖库沉积物好氧反硝化菌群脱氮特性及种群结构	康鹏亮, 张海涵, 黄廷林, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾亮宇 (2431)
反硝化菌群的氮代谢与反硝化偶联机制	张泽宇, 王明霞, 程永毅, 周志峰 (2438)
广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价	张云霞, 宋波, 陈同斌, 伏凤艳, 黄飞, 庞瑞, 潘惠妹 (2446)
三峡库区消落带农业活动对土壤汞变化的影响	陈秋禹, 孙松, 尹德良, 王永敏, 张成, 王定勇 (2456)
水稻不同生长时期不同组织中抗肿内生菌的筛选与鉴定	王伯勋, 王学东, 段桂兰 (2464)
汞在酸性紫色水稻土的转化与水稻汞富集特征	李雨岑, 孙涛, 邓晗, 张成, 王永敏, 王定勇 (2472)
华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价	徐强, 胡克林, 李季, 韩卉, 杨合法 (2480)
基于细菌毒性测试与小鼠肺基因转录分析的PM _{2.5} 健康效应	宋鹏程, 陆书玉, 魏永杰, 陈倩倩, 罗丽娟 (2489)
中国PM _{2.5} 污染空间分布的社会经济影响因素分析	段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 陈波 (2498)

多时间尺度 HSPF 模型参数不确定性研究

庞树江¹, 王晓燕^{1,2*}, 马文静³

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 首都师范大学首都圈水环境研究中心, 北京 100048; 3. 南京智水环境科技有限公司, 南京 210012)

摘要: 模型参数的不确定性是水文模型应用研究领域的重点与难点. 本研究以密云水库东北部的潮河流域为例, 构建了潮河流域 HSPF 水文模型, 并采用 1998~2010 年逐月地表径流量数据对模型参数进行校准与验证, 并结合 GLUE 算法分析了模型参数的敏感性和不确定性. 结果表明: ① 经过参数调整, HSPF 模型径流模拟取得了较好的效果, 率定期和验证期的纳什系数分别为 0.84 和 0.55; ② 可将影响 HSPF 模型的参数分为 3 类, 即全局敏感性参数(LZSN、INFILT、IRC 和 AGWRC)、局部敏感性参数(UZSN)和不敏感参数(DEEPPFR、BASETP、AGWEPT、INTFW 和 CEPSC); ③ 不同敏感性参数间存在复杂的相关关系, 参数组合(LZSN 与 INFILT)、(INFILT 与 UZSN)和(UZSN 与 AGWRC)间均呈极显著负相关关系; (LZSN 与 UZSN)和(UZSN 与 AGWRC)呈极显著正相关; ④ HSPF 模型参数存在大量复杂的“异参同效”现象, 证实影响模拟结果优劣的是参数组合而非某一参数值; ⑤ 模型不确定性发现, 模型预测的不确定性范围与降雨量密切相关, 即降雨量越大, 模型预报的不确定性就越大, 反之亦然; ⑥ 不同时间尺度下 HSPF 模型的模拟效果总体较好, 但是也存在一定差异性, 年尺度、季节尺度和月尺度下不确定性范围分别包含了 81.80%、78.70% 和 80.56% 的观测值, 即年尺度效果略优于月尺度和季节尺度; 该研究结果可为 HSPF 模型在相似区域应用与参数本土化提供科学参考和借鉴.

关键词: HSPF 模型; 水文模拟; 不确定性; 多时间尺度; 潮河流域

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-2030-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201710070

Research of Parameter Uncertainty for the HSPF Model Under Different Temporal Scales

PANG Shu-jiang¹, WANG Xiao-yan^{1,2*}, MA Wen-jing³

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. Research Center of Aquatic Environment in the Capital Region, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 3. Nanjing Smartwater Environmental Technology Co., Ltd., Nanjing 210012, China)

Abstract: Various hydrological models have been applied to the management of water resources and water quality. However, parameter uncertainty is of perpetual interest in the application of hydrological models. In this context, the HSPF model was constructed and calibrated using monthly observed stream data from 1998 to 2010 in the Chaohe River watershed, northeast of Beijing. Specifically, the sensitivity and uncertainty of the model parameters were investigated by the GLUE algorithm with the PEST platform. The major results were illustrated as follows: ① the hydrological simulation shows good performance with Nash-Sutcliffe efficiency of 0.84 and 0.55 in the period of calibration and validation, respectively; ② the parameters were divided into three categories: global sensitive parameters (LZSN, INFILT, IRC, and AGWRC), regional sensitive parameters (UZSN), and non-sensitive parameters (DEEPPFR, BASETP, AGWEPT, INTFW, and CEPSC); ③ strong correlations were detected within the sensitive parameters, which further involved significant negative correlations (LZSN ~ INFILT, INFILT ~ UZSN, and UZSN ~ AGWRC) and a positive correlation (LZSN ~ UZSN) and (UZSN ~ AGWRC); ④ the equifinality for different parameters was found in the HSPF model, indicating that parameter sets determine the simulation performance rather than individual parameters; ⑤ among various external factors, precipitation was identified as the most important condition for simulation uncertainty; and ⑥ the temporal difference in simulation performance was considered using annual, seasonal, and monthly scales with simulation precisions of 81.80%, 78.70%, and 80.56%, implying that the annual scale might be the optimal simulation period with higher accuracy. This research result is useful for the application and localization of the HSPF model.

Key words: HSPF model; hydrological simulation; uncertainty; multiple temporal scales; Chaohe River watershed

近年来, 受剧烈的区域土地利用变化和全球气候变异的综合影响, 地表水环境系统受到人为活动的影响越来越深刻^[1,2]. 由于自然和社会经济等诸多因素的作用, 水资源分布及变化特征的准确量化成为水文水资源领域研究的热点和难点之一. 因

收稿日期: 2017-10-12; 修订日期: 2017-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271495); 英国生物技术与生物科学基金会 BBSRC 项目(BB/N031484/1)

作者简介: 庞树江(1988~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为流域非点源污染, E-mail: 1083284324@qq.com

* 通信作者, E-mail: wangxy@cnu.edu.cn

此,为实现区域水资源可持续发展,合理评价水资源的时空特征对于提高区域水资源利用效率具有重要而深刻的现实意义和价值。

数值模拟是进行水文分析、洪水预报和水资源评价与管理的最重要和有效的手段之一^[3]。水文模型能够定量描述地表复杂水文循环过程,是模拟水文现象特征与变化过程的最有效的工具。常见的水文模型有 SWAT(soil water assessment tool)模型^[4]、HSPF(hydrological simulation program-Fortran)模型^[5]、TOPMODEL 模型^[6]、SWMM(storm water management model)模型^[7]、SLURP(semi-land use runoff program)模型^[8]、MIKE-SHE 模型^[9]和新安江模型^[10]等。其中,HSPF 模型以 Stanford 水文模型为基础,能够综合模拟地表径流、土壤流失、污染物传输、河道水力等过程,并广泛应用于下垫面差异及气候变化对流域地表水环境影响研究^[11],诸如土地利用变化和气候变异对区域水文过程的影响^[12],工业点源污染评价和农业非点源污染模拟等^[13,14]。但是,受限于模型结构简化、输入观测数据和模型参数等因素的不确定性影响,流域模型模拟结果存在较大的不确定性^[15,16]。国内外学者对 HSPF 模型的不确定性问题进行了深入研究。例如,Xie 等^[17]采用多准则和 GLUE 算法研究了 SWAT 和 HSPF 模型的不确定性,结果表明参数校准过程对 HSPF 模型模拟精度的影响更明显,而 SWAT 模型则更适合于数据缺乏区域;Fonseca 等^[18]采用 GLUE 算法研究了 HSPF 模型参数敏感性和不确定性,结果表明径流模拟结果对土壤、土地利用和气象因素变化较为敏感,敏感参数 INFILT 和 LZSN 与土壤和土地利用密切相关;程晓光等^[19]以永定河水系的妫水河流域为例,采用 GLUE 算法探究了半干旱地区 HSPF 模型的敏感性和不确定性,结果表明 HSPF 模型参数间存在复杂的“异参同效”和相关性现象,另外降雨量是影响月尺度模型不确定性的最重要的因素。但是,上述研究主要从单一时间尺度(例如月尺度)的视角研究模型的不确定性,关于多时间尺度变化对 HSPF 模型水文模拟的不确定性的影响研究却鲜见报道,使得选择何种时间尺度能够有效地降低水环境管理决策过程中存在的不确定性,是一个学术界和管理部门不可回避的科学问题。基于此,本研究通过构建潮河流域 HSPF 模型,采用 GLUE 算法研究了模型主要参数的敏感性、不确定性以及参数间的相关性,并重点分析了年尺度、季节尺度和月尺度下地表径流预测的不确

定性。

密云水库是北京市最重要的地表饮用水源地。自 1999 年以来,受气候变化和人为活动的综合作用,密云水库流域地表径流量减少趋势极为显著,因而水资源缺乏已经成为影响本地区经济发展的主要限制条件之一^[20]。本文以国内外广泛使用的流域水文模型 HSPF 模型为研究对象,探究模型参数的敏感性和复杂的“异参同效”现象,以及不同时间尺度下地表径流预测的不确定性,以期为流域水资源综合调控和生态建设提供技术支持。

1 研究区概况

潮河流域位于北京市东北部,地理位置介于 E 116°27'~117°34',N 40°20'~41°27',河流长度 239.50 km,流域面积 4 888 km²,河网密度 0.05 km·km⁻²(图 1),辖 3 县 24 乡镇,其中北京市密云区北部共计 3 个乡镇。气候为典型的中温带向暖温带过渡,半干旱向半湿润过渡的大陆性季风气候,年平均降水量 494 mm,主要集中在 6~10 月。棕壤和褐土广布,约占全流域面积的 80%;植被类型多样,以针阔混交林为主;流域总人口 37 万人,人口密度约为 75.70 人·hm⁻²,以农业人口为主,约占 77%;产业结构以畜牧业和种植业为主,主要畜牧类型有大牲畜、猪、羊和家禽;主要农作物类型为玉米和小麦,农田管理方式和化肥管理粗放,平均

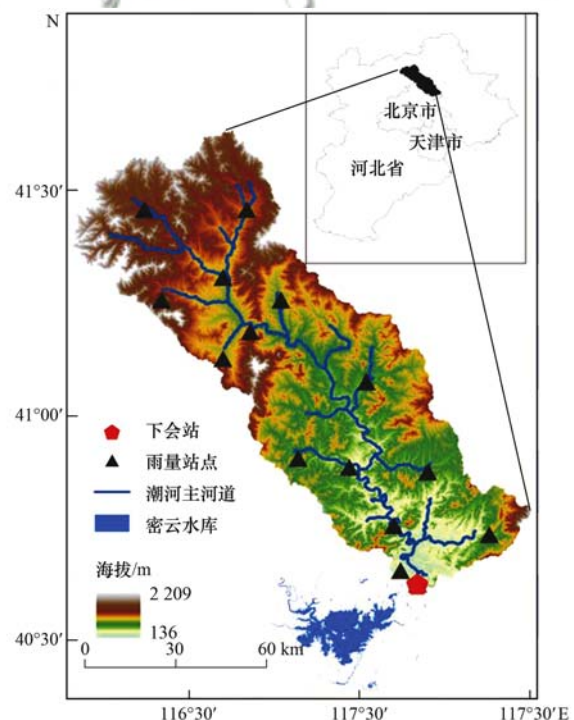


图1 研究区位置示意

Fig. 1 Location of study area

化肥施肥量 225 ~ 300 kg·hm⁻². 近 50 年来, 受流域生态恢复、水利设施建设和跨流域调水等的影响, 潮河流域地表径流量总体呈现减少趋势, 且自 1999 年以后减少趋势愈来愈显著^[21].

2 材料与方法

2.1 研究数据

本研究所需的数据包括数字高程模型 (digital elevation model, DEM)、土地利用数据、气象数据、水文观测数据等, 详细数据信息参见表 1. 其中空间数据均采用 Albers 等积圆锥投影对数据进行预处理, 以统一各类空间数据的投影和地理坐标, 所有操作均由 ArcGIS 10.1 完成.

表 1 研究所需数据及来源

Table 1 Content of data and sources

年份	类型	内容	尺度	格式	来源
1980	数字高程模型	高程、坡度和坡向	30 m	栅格	中科院资源环境科学数据中心
2012	土地利用	土地利用及空间分布	1: 10 万	矢量	中科院资源环境科学数据中心和 21 世纪空间技术有限公司
2005	土壤类型	土种类型及理化性质	1: 100 万	矢量	中科院资源环境科学数据中心
1998 ~ 2010	降雨量	降雨量	逐日	txt	中国气象科学数据共享服务网
1998 ~ 2010	气象数据	气温、风速、太阳辐射和露点温度	逐日	txt	中国气象科学数据共享服务网
1998 ~ 2010	水文数据	月均径流总量	逐月	xls	密云水库管理处下会水文站

带的流域划分模块, 将潮河流域分为 21 个子流域. 基于此, 对潮河流域多年径流过程的不确定性进行量化研究.

2.3 GLUE 算法

GLUE 算法 (generalized likelihood uncertainty estimation), 即普适似然不确定分析方法, 该算法由 Beven 等于 1992 年首次提出^[23], 并广泛应用于模型参数敏感性和不确定性分析研究^[24, 25]. 其基本思想是决定模型模拟效果优劣的并不是模型单个参数, 而是模型的参数组合. GLUE 算法的主要步骤: ①选择特定的似然函数及似然值阈值, 以此判断参数组的优劣; ②随机生成若干参数组合代入模型中, 对于低于该似然值阈值的似然值赋值为 0, 高于似然值阈值的似然值作归一化处理; ③将符合条件的参数模拟结果按照从大到小顺序排列, 计算得到不同置信水平下 (诸如 90% 或 95% 水平) 模型预报的不确定性范围. 本研究以纳什系数为似然函数, 选择 0.2 作为判别模型参数有效性的阈值标准, 采用拉丁超立方技术取样方法随机选择 3 万组参数, 代入 HSPF 模型进行参数敏感性和不确定性分析.

本研究采用纳什系数 (Nash-Sutcliffe efficiency, NSE) 和相对误差 (relative error, RE) 作为模型校准

2.2 HSPF 模型

HSPF 模型是由美国环保署于 20 世纪 80 年代开发的一款优秀的半分布式流域水文水质模型, 能够适用于不同气候情景和土地利用影响下的透水地面、不透水地面、混合型河湖水库等水体水文水质过程模拟^[22]. 目前, HSPF 模型已经集成于 BASINS 系统中, 可以对地形数据、土地利用和土壤类型数据进行预处理和实现子流域单元的刻画; 利用 WDMUtil 工具将建模所需的气象和水文数据整合生成 WDM 文件, 其中不同子流域气象数据的分配方法采用泰森多边形法, 再导入重分类的土地利用数据, 生成潮河流域 HSPF 模型所需数据库, 进而构建 WinHSPF 工程. 本研究采用 BASINS 4.0 系统自

和不确定分析的评价指标, 以表征模型模拟值与实际观测值间的匹配程度.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{avg})^2} \quad (1)$$

$$RE = \frac{P_i - O_i}{O_i} \times 100\% \quad (2)$$

式中, P_i 为模拟值, O_i 为观测值, O_{avg} 为观测值的均值, n 为模拟时段长度. 其中 $NSE \in (-\infty, 1]$, 其值越接近于 1 表示模拟结果越好; RE 值越趋近于 0, 表明模拟值与监测值越接近, 误差越小. 一般地, 纳什系数 NSE 大于 0.5, 相对误差 RE 小于 15%, 则认为模型模拟结果较好.

3 结果与讨论

3.1 模型校准与验证

由于模型结构复杂参数众多, 为提高 HSPF 模型率定的时效性, 本文采用参数敏感性和估计软件 PEST 筛选出 HSPF 模型中影响径流的主要敏感性参数 (见表 2). 以潮河流域下会水文站径流量为基础, 对 HSPF 模型进行参数校准与验证. 其中,

1998 ~ 1999 年为模型的预热期, 2000 ~ 2005 年为模型的校准期, 2006 ~ 2010 年为验证期. 参考相关研究结果, 通过手动调整影响径流量的主要参数, 使径流的模拟值与实测值相接近. 如图 2 可知, 校准期和验证期的纳什系数 (NSE) 分别为 0.84 和 0.53, 相对误差 (RE) 分别为 4.40% 和 2.80%, 参考相关模型评价标准, 表明率定后的 HSPF 模型能够较好地反映潮河流域径流量变化规律^[26].

表 2 HSPF 模型敏感参数及取值范围

Table 2 Sensitive parameters and value range for the HSPF model					
参数名称	中文释义	单位	率定值	取值范围	物理意义
LZSN	下层土壤含水量	In	5.25	2 ~ 15	LZSN 参数值越大, 土壤蓄水能力越大, 潜在蒸发量越大, 引起产流下降
UZSN	上层土壤含水量	In	1.14	0.05 ~ 2	UZSN 参数值增加, 上层蓄水容量和蒸发能力提高, 坡面流减少
INFILT	入渗能力	In·h ⁻¹	0.11	0.001 ~ 0.5	INFILT 参数控制着降雨在地表径流、地下径流及土壤含水量之间的分配比例, 参数值增加, 地表径流减小, 基流增加, 反之, 壤中流和坡面流增加
IRC	壤中流消退系数	d ⁻¹	0.52	0.30 ~ 0.85	IRC 参数是当前日壤中流流出与 24 h 前壤中流流出的比率, 影响峰值到基流的落水阶段, 影响单次暴雨时间
BASETP	基流蒸散发参数	—	0.12	0.001 ~ 0.2	BASETP 参数增加, 径流减少
AGWETP	地下水蒸散发参数	—	0.13	0.001 ~ 0.2	AGWETP 参数增加, 径流减少
AGWRC	地下水退水率	d ⁻¹	0.89	0.85 ~ 0.999	AGWRC 参数控制着地下水退水过程, 是地下水出流速率与 1 天前速率之比, 该值越高, 产流越小
CEPSC	截留量	In	0.25	0.01 ~ 0.4	—
INTFW	壤中流入流参数	—	5.00	1 ~ 10	INTFW 参数是决定截留水进入地下成为壤中流的系数, 该参数增加, 壤中流增加, 坡面流减少, 影响暴雨峰值, 不影响基流
DEEPFR	地下水出流进入深层地下水的比例	—	0.085	0.001 ~ 0.5	DEEPFR 参数值越大, 产流越小

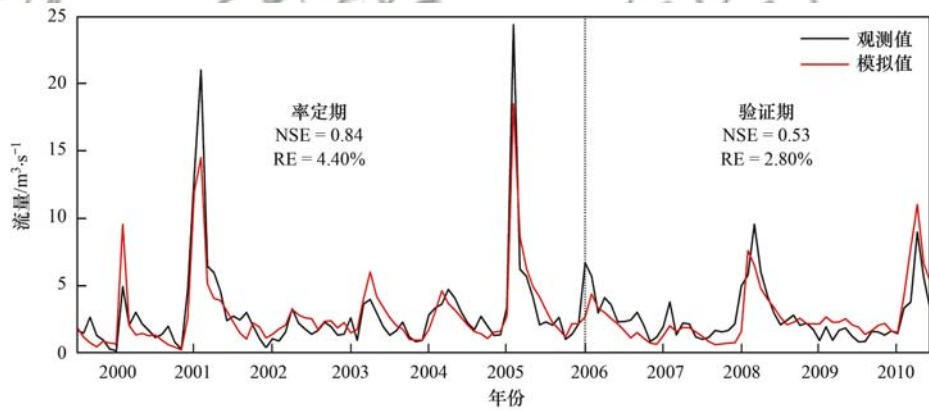


图 2 HSPF 模型径流率定与验证过程线

Fig. 2 Runoff hydrograph for calibration and validation of the HSPF model

3.2 参数敏感性及相关性分析

以纳什系数为似然目标函数, 采用拉丁超立方抽样方法随机抽取 3 万组样本, 对 HSPF 模型进行参数敏感性和不确定性分析. 本研究选取似然函数临界值为 0.2, 低于该值的参数似然值赋值为 0, 高于该值的似然值重新归一化并以似然值大小进行排序. 后续的参数间相关性和模型预测的不确定性也是基于该临界值展开分析. 为直观展示参数取值与似然函数关系, 二者散点图中似然函数临界值设定

为 0 (图 3). 根据模型参数取值区间内似然函数值散点分布差异性, 本文将模型参数分为全局敏感性参数、局部敏感性参数和不敏感参数.

全局敏感性参数: 由图 3 可知, 参数 LZSN、INFILT、IRC 和 AGWRC 的似然值在整个区间内变化幅度较大, 说明径流模拟结果对上述 4 个参数变化的响应较为敏感, 其中 LZSN 在 2 ~ 15 间随着参数值增大似然值呈减小趋势; INFILT 在 0.001 ~ 0.07 间似然值随着参数的增大而增大, 从 0.07 ~

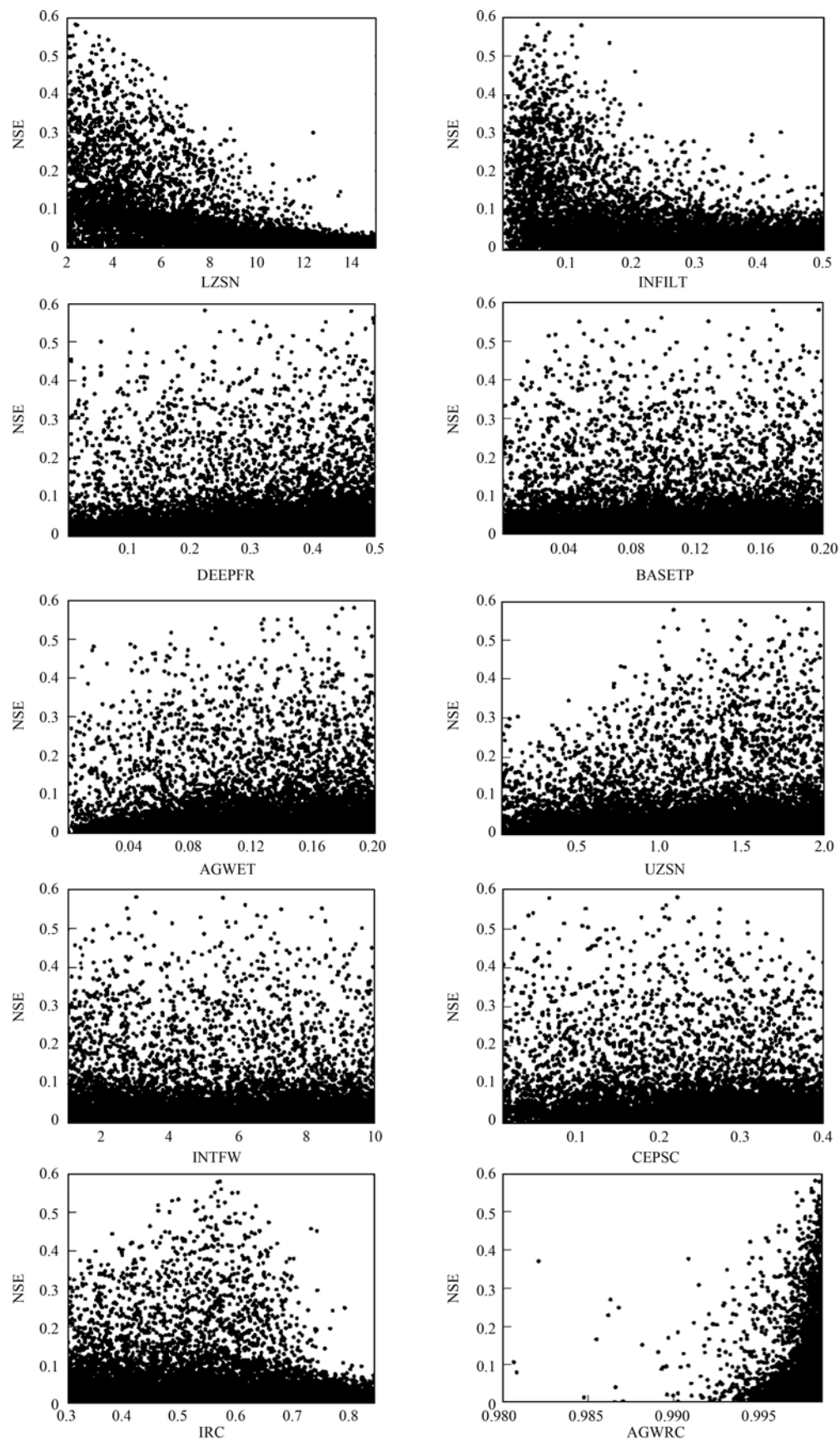


图3 模型参数与似然值散点图
Fig. 3 Scatter plot of model parameters and likelihood value

0.5 间似然值随着参数的增大而减小; AGWRC 在 0.995~0.999 间似然值随着参数的增大而迅速增大,在 0.98~0.995 间散点较为稀疏,究其原因参数值在这个区间内的似然值以负值为主。

局部敏感性参数:参数 UZSN 的敏感性具有一定的区间特征,即在 0.05~1.2 间似然值随着参数的增大而增大,在 1.2~2 间似然值相对稳定。

不敏感性参数:参数 DEEPFR、BASETP、AGWEPT、INTFW 和 CEPSC 无明显的变化规律,表明上述参数对潮河流域径流模拟影响并不显著,对 HSPF 模型径流模拟预测的不确定性影响较小。因而,可以将上述参数视为不敏感参数。综上可知,LZSN、INFILT、IRC 和 AGWRC 这 4 个参数是对潮河流域水文过程和水平衡影响最大的参数,这些参数与其他学者研究结果相类似^[27]。但是,DEEPFR、

BASETP、AGWEPT、INTFW 和 CEPSC 等参数对该流域水文过程影响并不显著,究其原因可能是流域植被覆盖度是影响参数敏感性的重要因子之一,覆盖度通过控制植被截留量和基流蒸发量,进而影响流域地表径流过程。另外,流域地表特征及地形起伏也会导致影响参数敏感性差异(如 UZSN)^[28]。

目前,模型不确定性分析研究大多假定参数间是相互独立的,研究表明参数间复杂的相关性可能导致参数冗余,是参数不确定性的来源之一^[19]。基于此,本研究对所识别出的 5 个敏感参数进行相关性分析(表 3)。结果表明,LZSN 与 INFILT 呈极显著负相关;与 UZSN 呈极显著正相关;INFILT 与 UZSN 呈极显著负相关,与 AGWRC 呈显著正相关关系;UZSN 和 AGWRC 呈极显著负相关关系。由此可见,忽略不同参数间相关性差异也可能会对模型不确定性产生较大影响。

表 3 HSPF 模型敏感性参数相关系数矩阵¹⁾
Table 3 Correlation matrix of sensitive parameters in the HSPF model

	LZSN	INFILT	UZSN	IRC	AGWRC
LZSN	1.000				
INFILT	-0.458 **	1.000			
UZSN	0.290 **	-0.696 **	1.000		
IRC	0.041	0.055	-0.007	1.000	
AGWRC	-0.071	0.155 **	-0.109 **	-0.061	1.000

1) * * 代表在 0.01 水平显著相关,其他代表不相关

3.3 模型参数“异参同效”现象

由于模型结构的不完备性和监测资料误差,因此通过参数调整得到的最优参数并不能代表模型的“真实”参数值,它只是在特定的目标函数下的似然估计的优化参数值。有研究表明,无论是人工调试还是计算机自动优选都不可避免“异参同效”现象,即不同组参数组合得到相同模拟效果^[29]。由于模型“异参同效”参数组众多,在综合考虑参数空间长度和跨度的基础上,本文中等效参数组的选取尽量兼顾每个参数的最大取值空间,同时限于篇幅原因,在此给出了潮河流域 5 组具有代表性的等效参数组(表 4)。这 5 组参数组合均可使日径流纳什系数达到 0.55,说明率定产生的“最优”参数往往不是唯一的,即具有很强的不确定性。其中,空间长度是参数最初取值范围长度,跨度是参数似然值为 0.55 时参数取值的最大值与最小值之差,百分比是跨度与空间长度的比值。以参数 LZSN 为例,其参数空间为[2,15],即空间长为 13;当似然值为 0.55 时,最大值为 3.73,最小值为 2.11,其跨度为最大值与最小值之差(1.62);百分比就是跨度与空

间长度的百分比(12.46%)。百分比小说明散点图中高似然值区间参数取值较为集中,参数敏感性程度较高。LZSN、INFILT、IRC 和 AGWRC 的百分比均低于 15%,而参数 UZSN 的百分比相对偏大,但是其值小于 25%。其他不敏感参数的百分比均大于 25%。结合 4.2 结果来看,参数 LZSN、INFILT、IRC 和 AGWRC 属于全局敏感性参数,参数 UZSN 是局部敏感性参数,其余为不敏感参数,二者结论基本一致。

3.4 多尺度模型不确定性分析

采用 GLUE 方法研究模型模拟的不确定性,需要确定似然函数(纳什系数)的临界值,对高于该值的似然值作归一化处理,将模拟值从大到下排序,进而估算模型模拟的不确定性时间序列。本文采用 90% 置信水平的模拟值代表其预测的不确定性的界限,得到模型在 90% 置信水平下的年径流、季径流和月径流的不确定性预测结果(图 4)。由图 4 可知,不同时间尺度下径流模拟的不确定性具有一定的相似性,即不确定性与降雨量和径流量大小密切相关。从年尺度来看,2001、2005、2008 及 2010 年

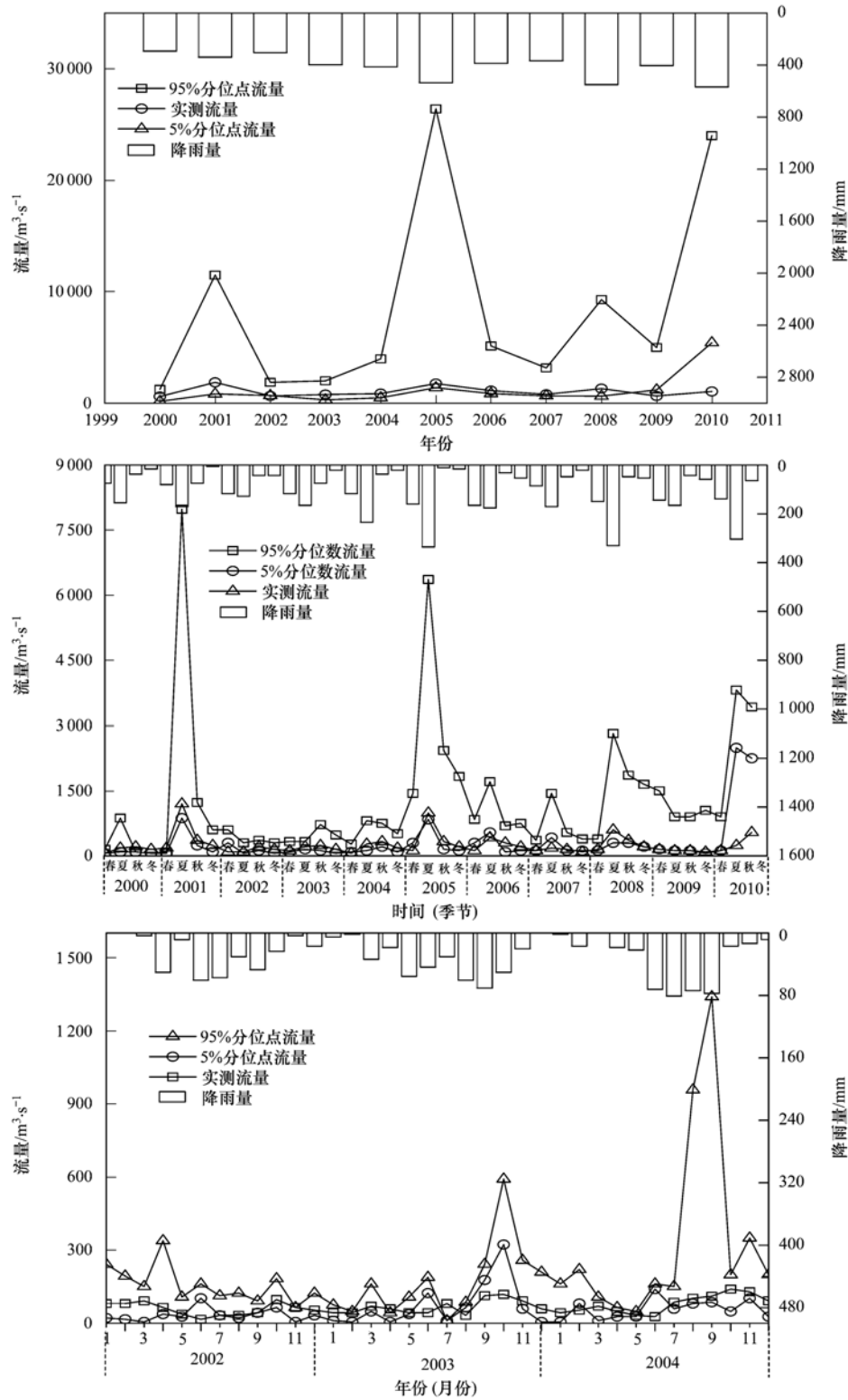


图 4 不同时间尺度径流预报不确定性范围

Fig. 4 Uncertainty range of runoff simulation at various temporal scales

降雨充沛径流量大, 模拟的不确定范围也较大; 从季节尺度来看, 夏季降雨集中径流量偏高, 导致模拟的不确定性范围大于其它季节; 从月尺度来看, 每年的 6~8 月是潮河流域的雨季, 降雨量径流量均较大, 使得不确定性预测的范围也较大; 由此可

见, 模型的不确定性预测范围随降雨量变化而变化, 与降雨量呈明显的正相关关系, 即丰水期径流量偏高, 相应的模型预报的不确定性偏大; 反之, 枯水期径流量偏低, 模型预报的不确定性偏小. 其它水文模型研究结果也证实了降雨量变异是影响水

表 4 异参同效参数组及统计信息

Table 4 Statistical information for the equifinality parameter sets

组别	LZSN	INFILT	DEEPFR	BASETP	AGWETP	UZSN	INTFW	CEPSC	IRC	AGWRC	NSE
1	2.78	0.07	0.49	0.09	0.17	1.71	6.21	0.20	0.57	0.99	0.55
2	2.23	0.06	0.30	0.07	0.14	1.27	2.75	0.20	0.56	0.99	0.55
3	2.11	0.10	0.41	0.12	0.12	1.49	8.46	0.11	0.60	0.99	0.55
4	3.36	0.03	0.49	0.04	0.13	1.75	7.27	0.27	0.59	0.99	0.55
5	3.73	0.06	0.32	0.17	0.12	1.52	3.58	0.04	0.55	0.99	0.55
空间长	13.0	0.49	0.49	0.19	0.15	1.95	9.00	0.39	0.55	0.15	—
跨度	1.62	0.07	0.19	0.12	0.04	0.48	5.70	0.22	0.04	0.0013	—
百分比/%	12.46	14.12	39.09	61.38	26.50	24.95	63.37	58.13	8.77	0.87	—

文模拟不确定性的的重要因素之一^[30, 31]，与本研究结果基本一致。

从模型不确定性可接受范围来看，年尺度下不确定性范围包含了 81.80% 的观测值，季节尺度下不确定性范围包含了 78.70% 的观测值，月尺度下不确定范围包含了 80.56% 的观测值，属于可接受范围。另外，尚有部分径流实测值未落于不确定性范围内，说明模型模拟并不能完全还原流域水文过程，究其原因可能是一方面 HSPF 模型结构与假设条件与复杂的流域水文地质特征存在一定差异，另一方面似然值的临界值选取具有较大的主观性，不同的临界值会产生不同的不确定性范围^[19]。

4 结论

(1) 对潮河流域而言，所构建的 HSPF 模型径流模拟取得了较好的效果，率定期和验证期的纳什系数分别为 0.84 和 0.55，相对误差分别为 4.40% 和 2.80%，表明 HSPF 模型能够真实再现潮河流域历史水文过程。

(2) 影响 HSPF 模型的主要参数可以分为 3 类，即全局敏感性参数 (LZSN、INFILT、IRC 和 AGWRC)、局部敏感性参数 (UZSN) 和不敏感参数 (DEEPFR、BASETP、AGWEPT、INTFW 和 CEPSC)。

(3) 不同敏感性参数存在复杂的相关关系，参数组 (LZSN 与 INFILT)、(INFILT 与 UZSN) 和 (UZSN 与 AGWRC) 间均呈极显著负相关关系；(LZSN 与 UZSN) 和 (UZSN 与 AGWRC) 呈极显著正相关。

(4) HSPF 模型参数间存在大量复杂的“异参同效”现象，进一步证实了影响模拟结果优劣的是各参数组合而非某一单个参数值。

(5) 模型预测的不确定性范围与降雨量紧密相关，降雨量越大不确定性就越大，反之亦然，由此

说明降雨季节差异是引起模型预报不确定性偏大的主要因素。

(6) 不同时间尺度下 HSPF 模型的径流模拟效果总体较好，但也存在一定差异(年尺度、季节尺度和月尺度下不确定性范围分别包含了 81.80%、78.70% 和 80.56% 的观测值)，即年尺度效果略优于月尺度和季节尺度。

参考文献：

[1] Kirby J M, Mainuddin M, Mpelasoka F, *et al.* The impact of climate change on regional water balances in Bangladesh[J]. Climatic Change, 2016, **135**(3-4): 481-491.

[2] Worku T, Khare D, Tripathi S K. Modeling runoff-sediment response to land use/land cover changes using integrated GIS and SWAT model in the Beressa watershed[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, **76**(16): 550.

[3] 罗定贵, 张巍, 郑一, 等. 基于 WARMF 模型的杭埠-丰乐河流域水文模拟研究[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(8): 1391-1401.

Luo D G, Zhang W, Zheng Y, *et al.* Evaluation of the WARMF model for hydrologic simulation in the Hangbu-Fengle river watershed[J]. Acta Scientiae Circumstantia, 2007, **27**(8): 1391-1401.

[4] Easton Z M, Fuka D R, Walter M T, *et al.* Re-conceptualizing the soil and water assessment tool (SWAT) model to predict runoff from variable source areas[J]. Journal of Hydrology, 2008, **348**(3-4): 279-291.

[5] 高伟, 周丰, 董延军, 等. 基于 PEST 的 HSPF 水文模型多目标自动校准研究[J]. 自然资源学报, 2014, **29**(5): 855-867.

Gao W, Zhou F, Dong Y J, *et al.* PEST-based multi-objective automatic calibration of hydrologic parameters for HSPF model[J]. Journal of Natural Resources, 2014, **29**(5): 855-867.

[6] Wen X, Hu D, Cao B, *et al.* Dynamics change of honghu lake's water surface area and its driving force analysis based on remote sensing technique and TOPMODEL model[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2014, **17**(1): 012130.

[7] Sun N, Hong B, Hall M. Assessment of the SWMM model uncertainties within the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) framework for a high-resolution urban sewershed[J]. Hydrological Processes, 2014, **28**(6): 3018-3034.

- [8] Han J C, Huang G H, Zhang H, *et al.* Effects of watershed subdivision level on semi-distributed hydrological simulations: case study of the SLURP model applied to the Xiangxi River watershed, China[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2014, **59** (1): 108-125.
- [9] Zhang D H, Madsen H, Ridler M E, *et al.* Impact of uncertainty description on assimilating hydraulic head in the MIKE SHE distributed hydrological model [J]. *Advances in Water Resources*, 2015, **86**: 400-413.
- [10] 黄小祥, 姚成, 李致家, 等. 栅格新安江模型在天津于桥水库流域上游的应用[J]. *湖泊科学*, 2016, **28** (5): 1134-1140.
- Huang X X, Yao C, Li Z J, *et al.* Application of grid-Xinjiang model in the upstream of Yuqiao Basin, Tianjin[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, **28** (5): 1134-1140.
- [11] 李兆富, 刘红玉, 李燕. HSPF 水文水质模型应用研究综述[J]. *环境科学*, 2012, **33** (7): 2217-2223.
- Li Z F, Liu H Y, Li Y. Review on HSPF model for simulation of hydrology and water quality processes [J]. *Environmental Science*, 2012, **33** (7): 2217-2223.
- [12] Gizaw M S, Biftu G F, Gan T Y, *et al.* Potential impact of climate change on streamflow of major Ethiopian rivers [J]. *Climatic Change*, 2017, **143** (3-4): 371-383.
- [13] Wu Y P, Chen J. Investigating the effects of point source and nonpoint source pollution on the water quality of the East River (Dongjiang) in South China[J]. *Ecological Indicators*, 2013, **32**: 294-304.
- [14] 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[J]. *环境科学学报*, 2013, **33** (8): 2296-2306.
- Li M T, Wang X Y, Liu W Z. Relationship between landscape pattern and non-point source pollution loads in the Chaohe River Watershed[J]. *Acta Scientiae Circumstantia*, 2013, **33** (8): 2296-2306.
- [15] Muleta M K, Nicklow J W. Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, **306** (1-4): 127-145.
- [16] Chen L, Gong Y W, Shen Z Y. Structural uncertainty in watershed phosphorus modeling: toward a stochastic framework [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, **537**: 36-44.
- [17] Xie H, Lian Y Q. Uncertainty-based evaluation and comparison of SWAT and HSPF applications to the Illinois River Basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, **481**: 119-131.
- [18] Fonseca A, Ames D P, Yang P, *et al.* Watershed model parameter estimation and uncertainty in data-limited environments [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2014, **51**: 84-93.
- [19] 程晓光, 张静, 宫辉力. 半干旱半湿润地区 HSPF 模型水文模拟及参数不确定性研究[J]. *环境科学学报*, 2014, **34** (12): 3179-3187.
- Cheng X G, Zhang J, Gong H L. HSPF hydrologic simulation and parameter uncertainty in a semi-arid and semi-humid area [J]. *Acta Scientiae Circumstantia*, 2014, **34** (12): 3179-3187.
- [20] 庞树江, 王晓燕. 密云水库流域入库径流量变化特征及归因研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, **30** (9): 144-148.
- Pang S J, Wang X Y. The characteristics and attribution of runoff change in the Miyun reservoir watershed [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, **30** (9): 144-148.
- [21] Zheng J K, Sun G, Li W H, *et al.* Impacts of land use change and climate variations on annual inflow into Miyun Reservoir, Beijing, China [J]. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 2016, **12** (8): 7785-7819.
- [22] 李燕, 李兆富, 席庆. HSPF 径流模拟参数敏感性分析与模型适用性研究[J]. *环境科学*, 2013, **34** (6): 2139-2145.
- Li Y, Li Z F, Xi Q. Parameter sensitivity analysis of runoff simulation and model adaptability research based on HSPF [J]. *Environmental Science*, 2013, **34** (6): 2139-2145.
- [23] Beven K, Binley A. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction [J]. *Hydrological Processes*, 1992, **6** (3): 279-298.
- [24] McMichael C E, Hope A S, Loaiciga H A. Distributed hydrological modelling in California semi-arid shrublands: MIKE SHE model calibration and uncertainty estimation[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, **317** (3-4): 307-324.
- [25] Chang J X, Zhang H X, Wang Y M, *et al.* Impact of climate change on runoff and uncertainty analysis[J]. *Natural Hazards*, 2017, **88** (2): 1113-1131.
- [26] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, **50** (3): 885-900.
- [27] Chung E S, Park K, Lee K S. The relative impacts of climate change and urbanization on the hydrological response of a Korean urban watershed [J]. *Hydrological Processes*, 2011, **25** (4): 544-560.
- [28] 董延军, 李杰, 郑江丽, 等. 流域水文水质模拟软件(HSPF)应用指南[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2009. 65-69.
- [29] 舒畅, 刘苏峡, 莫兴国, 等. 新安江模型参数的不确定性分析[J]. *地理研究*, 2008, **27** (2): 343-352.
- Shu C, Liu S X, Mo X G, *et al.* Uncertainty analysis of Xinjiang model parameter[J]. *Geographical Research*, 2008, **27** (2): 343-352.
- [30] 杨伟. SWAT 模型径流模拟的不确定性研究——以东苕溪上游小流域为例[D]. 杭州: 浙江大学, 2014. 54-57.
- Yang Y. The uncertainty in runoff simulation modeled by SWAT-A case study in the upstream catchment of Tiaoxi River watershed [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. 54-57.
- [31] Shen Z Y, Hong Q, Yu H, *et al.* Parameter uncertainty analysis of the non-point source pollution in the Daning River watershed of the Three Gorges Reservoir Region, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **405** (1-3): 195-205.

CONTENTS

Estimation of Fine Particle ($PM_{2.5}$) Emission Inventory from Cooking: Case Study for Shanghai	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1971)
Chemical Characterization, Spatial Distribution, and Source Identification of Organic Matter in $PM_{2.5}$ in summertime Shanghai, China	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (1978)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Salts in $PM_{2.5}$ in the Southern Suburbs of Beijing	GAO Han-yu, WEI Jing, WANG Yue-si (1987)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust $PM_{2.5}$ During Spring in Tianjin Using the Quadrat Sampling Method	ZHAO Jing-qi, JI Ya-qin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (1994)
HONO Pollution Characteristics and Nighttime Sources During Autumn in Guangzhou, China	TIAN Zhi-lin, YANG Wen-da, YU Xiao-fang, <i>et al.</i> (2000)
Sulfur Sources and Oxidation Pathways in Summer Aerosols from Nanjing Northern Suburbs Using S and O Isotopes	HAN Xun, REN Jie, CHEN Shan-li, <i>et al.</i> (2010)
Methods for Determining and Applications of High-Resolution Vehicle Emission Inventory at County Scale	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (2015)
Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Typical Industrial Biomass Boilers	LIN Yu-jun, BAI Li, WANG Huan-xiang, <i>et al.</i> (2023)
Research of Parameter Uncertainty for the HSPF Model Under Different Temporal Scales	PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, MA Wen-jing (2030)
Contribution of Nitrogen Sources in Water Sources by Combining Nitrogen and Oxygen Isotopes and SIAR	JIN Zan-fang, ZHANG Wen-liao, ZHENG Qi, <i>et al.</i> (2039)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, ZHAO Yong-hui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2048)
Fluorescent Characteristics and Environmental Significance of Particulate Organic Matter in Lake Taihu, China	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (2056)
Distribution and Settlement of Microplastics in the Surface Sediment of Yangtze Estuary	ZHU Xiao-tong, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (2067)
Water Chemistry and Characteristics of Dissolved Organic Carbon During the Wet Season in Wulixia Reservoir, SW China	LU Xiao-xuan, LI Qiang, JIN Zhen-jiang, <i>et al.</i> (2075)
Bioavailability of Dissolved Organic Carbon in Rivers for Typical Vegetation Types in the Permafrost Regions on the Qinghai-Tibet Plateau	MA Xiao-liang, LIU Gui-min, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2086)
Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) and Relationship with Dissolved Heavy Metals in a Peri-urban and an Urban River	LIANG Meng-qi, SHAO Mei-ling, CAO Chang-li, <i>et al.</i> (2095)
Migration and Transformation of Dissolved Organic Matter in Karst Water Systems and an Analysis of Their Influencing Factors	ZHANG Lian-kai, LIU Peng-yu, QIN Xiao-qun, <i>et al.</i> (2104)
Source and Distribution of Dissolved Metal Ions in the Backwater Area of Pengxi River in Three Gorges Reservoir	ZHAO Xiao-song, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2117)
Differences in Diffusive Fluxes of Nutrients from Sediment Between the Natural River Areas and Reservoirs in the Lancang River Basin	WANG Xue, CHENG Bao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (2126)
Nutrient Distribution Characteristics of the Sediment-water System in the Xiangxi River During the Impoundment of TGR	SU Qing-qing, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2135)
Effects of Submerged Macrophytes on Different Phosphorus Fractions in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, GAO Shun-feng, WAN Rui, <i>et al.</i> (2145)
Distribution Characteristics and Fluxes of Nitrogen and Phosphorus at the Sediment-water Interface of Yuqiao Reservoir	WEN Shuai-long, GONG Wan-qing, WU Tao, <i>et al.</i> (2154)
Distribution of Phosphorus Fractions in Surface Sediments of Minjiang Mainstreams	YANG Geng, QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, <i>et al.</i> (2165)
Nitrate Uptake Kinetics and Correlation Analysis in an Agricultural Drainage Ditch	LI Ru-zhong, YIN Qi-he, GAO Su-di, <i>et al.</i> (2174)
Influencing Factors for Phosphorus Removal by Modified Bio-ceramic Substrates Coated with ZnAl-LDHs Synthesized by Different Modification Conditions	XIANG Yang, ZHANG Xiang-ling, LEI Yu, <i>et al.</i> (2184)
Removal of Odorants in Drinking Water Using VUV/Persulfate	SUN Xin, SHI Lu-xiao, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (2195)
Degradation of OG with Peroxymonosulfate Activated by a $MnFe_2O_4$ -graphene Hybrid	XIA Wen-jun, LIU Feng, HAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism of As(V) Removal from Water by Lanthanum and Cerium Modified Biochars	LI Jin, ZU Yan-qun, LI Gang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption of Dissolved Organic Matter with Different Relative Molecular Masses on Inorganic Minerals and Its Influence on Carbamazepine Adsorption Behavior	LIANG Yu, HE Jiang-tao, ZHANG Si (2219)
Pollution Characteristics of Organophosphorus Flame Retardants in a Wastewater Treatment Plant	SUN Jia-wei, DING Wei-nan, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (2230)
Enhanced Coagulation as a Pretreatment for Low Temperature Wastewater	LIU Hai-long, REN Yu-xia, ZHANG Zhong-min (2239)
Operating Characteristics and Fouling Characteristics of a RO Membrane System for Desalination of Dyeing Wastewater	TAN Yu-jun, ZHANG Ze-tian, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (2249)
Optimization of the Nitrogen Removal Performance on the CANON Process in a Biofilm Reactor: From FBBR to MBBR	FU Kun-ming, LI Hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i> (2256)
Microbial Community Dynamics During Two Sludge Granulation Processes	GAO Jing-feng, ZHANG Li-fang, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2265)
Sludge Conditioning Performance of Polyaluminum, Polyferric, and Titanium Xerogel Coagulants	WANG Xiao-meng, WANG Xin, YANG Ming-hui, <i>et al.</i> (2274)
Effects of Heat and Heat-alkaline Treatments on Disintegration and Dissolved Organic Matter in Sludge	DAI Qin, ZHANG Wen-zhe, YU Pan-fen, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Formation of Partial Nitrification Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (2289)
Spatial and Temporal Variation of Mercury in Municipal Sewage Sludge in China	WANG Ning, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (2296)
Characteristics of N_2O Release and Influencing Factors in Grass-type and Algae-type Zones of Taihu Lake During Summer	ZHENG Xiao-lan, WEN Shuai-long, LI Xin, <i>et al.</i> (2306)
Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Their Influencing Factors in the Algae Zone of Lake Taihu	JIA Lei, PU Yi-ni, YANG Shi-jun, <i>et al.</i> (2316)
Dynamics of CO_2 and N_2O in Seasonal Frozen Soil Profiles for a Typical Steppe in Inner Mongolia	LI Jin-bo, YAO Nan, LI Xiu, <i>et al.</i> (2330)
Characteristics of CO_2 Flux in a Mature Apple (<i>Malus domestica</i>) Orchard Ecosystem on the Loess Plateau	YANG Jian-feng, YANG Xiao-ni, WANG Jun-hua, <i>et al.</i> (2339)
Effects of Biochar Application Rates on Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, GUO Xiao-min, <i>et al.</i> (2351)
Short-Term Effects of Different Fertilization Treatments on Greenhouse Gas Emissions from Northeast Black Soil	LI Ping, LANG Man, LI Miao, <i>et al.</i> (2360)
Eukaryotic Micro-plankton Community Diversity and Characteristics of Regional Distribution in the Yellow Sea by ITS High-throughput Sequencing	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2368)
Influence of Different Patterns of Discharge on Microbial Diffusion in Municipal Treated Wastewater	LANG Xiu-lu, SONG Zhi-wen, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (2380)
Impact of Tourism on Bacterial Communities of Karst Underground River: A Case Study from Two Caves in Fengdu, Chongqing	LÜ Xian-fu, HE Qiu-fang, WANG Feng-kang, <i>et al.</i> (2389)
Diversity of the Microbial Community in Rice Paddy Soil with Biogas Slurry Irrigation Analyzed by Illumina Sequencing Technology	ZHU Jin-shan, ZHANG Hui, MA Lian-jie, <i>et al.</i> (2400)
Effect of Biochar Amendment on Physicochemical Properties and Fungal Community Structures of Cinnamon Soil	YAN Hai-tao, YIN Quan-yu, DING Song-shuang, <i>et al.</i> (2412)
Carbon Metabolism Characteristics of the Karst Soil Microbial Community for Pb-Zn Mine Tailings	FANG Jun-jia, LI Qiang, LIU Chang, <i>et al.</i> (2420)
Denitrification Characteristics and Community Structure of Aerobic Denitrifiers from Lake and Reservoir Sediments	KANG Peng-liang, ZHANG Hai-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2431)
Investigation of the Coupling Mechanism between Naphthalene Degradation and Denitrification of a Naphthalene Degraded Bacterial Consortium Under Denitrification	ZHANG Ze-yu, WANG Ming-xia, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2438)
Spatial Distribution Study and Pollution Assessment of Pb in Soils in the Xijiang River Drainage of Guangxi	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2446)
Effects of Agricultural Activities on Soil Mercury Changes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	CHEN Qiu-yu, SUN Song, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2456)
Screening and Identification of Arsenic-resistant Endophytic Bacteria from Different Rice Tissues (<i>Oryza sativa</i> L.) in Different Growth Stages	WANG Bo-xun, WANG Xue-dong, DUAN Gui-lan (2464)
Characteristics of Mercury Transformation in Soil and Accumulation in Rice Plants in an Acidic Purple Paddy Soil Area	LI Yu-qin, SUN Tao, DENG Han, <i>et al.</i> (2472)
Life Cycle Environmental Impact Assessment on Different Modes of Greenhouse Vegetable Production in the North China Plain	XU Qiang, HU Ke-lin, LI Ji, <i>et al.</i> (2480)
Health Effects of $PM_{2.5}$ Based on Bacterial Toxicity Test and Transcriptional Analysis in Lungs of Mice	SONG Peng-cheng, LU Shu-yu, WEI Yong-jie, <i>et al.</i> (2489)
Socio-economic Factors Influencing the Spatial Distribution of $PM_{2.5}$ Concentrations in China: An Exploratory Analysis	DUAN Jie-xiong, ZHAI Wei-xin, CHENG Cheng-qi, <i>et al.</i> (2498)