

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201607069

基于正交极差分析的青龙河流域 HSPF 模型参数寻优模式

刘兴坡^{1,2}, 陈 翔^{1,2}, 胡小婷^{1,2}, 王天宇^{1,2}, 张 倩^{1,2}, 周亦昀^{1,2}, 李永战³

(1.上海海事大学 海洋科学与工程学院,上海 201306;2.上海海事大学 海洋环境与生态模拟研究中心,上海 201306;3.河北省桃林口水库管理局,河北 秦皇岛 066400)

摘 要: 为评价桃林口水库水文水质状况,建立其上游青龙河流域的 BASINs/HSPF 水文水质模拟模型.以 Nash-Sutcliffe 效率系数作为评价标准,联合正交设计和极差分析法进行参数寻优研究和可靠性分析.结果表明: BASINs/HSPF 模型参数寻优的正交极差联合分析模式可大幅减小参数的寻优次数和寻优区间,是获得模型灵敏度参数和参数满意解的高效模式,可为模型参数寻优算法开发提供借鉴;应用正交极差分析的参数率定结果,以青龙河流域下游桃林口水库监测点 2011 年实测径流数据对模型进行验证,验证期(2011 年)的 Nash-Sutcliffe 效率系数为 0.79,稍低于率定期(2012 年)的 Nash-Sutcliffe 效率系数(0.81)以及 PEST 自动校准的 Nash-Sutcliffe 效率系数(0.84),水质模拟结果也基本吻合;针对青龙河流域 BASINs/HSPF 模型,应用正交极差分析方法识别出 6 个高灵敏的 BASINs/HSPF 模型参数(IRC、INFILT、AGWRC、DEEPFR、AGWETP 和 LZSN);应用正交极差分析方法获得的 BASINs/HSPF 模型参数满意解取值区间依次为: LZSN[2.0, 6.3], INFILT[0.084, 0.167], AGWRC[0.90, 0.95], DEEPFR[0.209, 0.333], BASETP[0.067, 0.199], AGWETP[0.067, 0.199], CEPSC[0.14, 0.27], UZSN[1.35, 2.00], IRC[0.392, 0.483].

关键词: 青龙河流域; BASINs/HSPF 模型; 参数寻优; 正交设计; 极差分析; 可靠性分析

中图分类号: X522 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2018)02-0131-08

Orthogonal range analysis-based HSPF parameter optimization pattern for Qinglong River watershed

LIU Xingpo^{1,2}, CHEN Xiang^{1,2}, HU Xiaoting^{1,2}, WANG Tianyu^{1,2}, ZHANG Qian^{1,2}, ZHOU Yiyun^{1,2}, LI Yongzhan³

(1.College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;2.Center for Marine Environmental and Ecological Modelling, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 3.Taolinkou Reservoir Administration, Hebei Province, Qinhuangdao 066400, Hebei, China)

Abstract: In order to evaluate hydrological and water quality situation of Taolinkou reservoir, BASINs/HSPF model of the upstream Qinglong River watershed is developed to conduct the hydrological and water quality simulation. The efficacy, efficiency and reliability of the orthogonal range analysis pattern for parameter optimization is assessed by Nash-Sutcliffe efficiency coefficient and different comparisons, and the following conclusions are obtained: the orthogonal range analysis pattern can decrease optimization efficiency and narrow parameter range for BASINs/HSPF, and can be used as a high-efficiency tool to obtain the high sensitive parameters and the satisfied parameter set. It is also useful for developing the relative parameter optimization algorithms; the measured runoff time series of the Taolinkou reservoir in 2012 and 2011 were used for calibration and verification, respectively. Based on the orthogonal range analysis, Nash-Sutcliffe efficiency coefficient is up to 0.79 for verification, lower than that of calibration (0.81) and PEST automatic calibration (0.84); six relatively sensitive parameters (IRC, INFILT, AGWRC, DEEPFR, AGWETP and LZSN) are identified based on range analysis for BASINs/HSPF of Qinglong river watershed; ranges of the satisfied BASINs/HSPF parameter set by orthogonal range analysis method are as follows: [2.0, 6.3] (LZSN), [0.084, 0.167] (INFILT), [0.90, 0.95] (AGWRC), [0.209, 0.333] (DEEPFR); [0.067, 0.199] (BASETP), [0.067, 0.199] (AGWETP), [0.14, 0.27] (CEPSC), [1.35, 2.00] (UZSN), [0.392, 0.483] (IRC).

Keywords: Qinglong River watershed; BASINs/HSPF model; parameter optimization; orthogonal design; range analysis; reliability analysis

近年来,流域水文水质模型应用越来越广泛,如

WASP^[1]、SWAT^[2]、新安江模型^[3]和 HSPF^[4-15]等.作为半分布式流域模型优秀代表, HSPF 模型在流域水文水质及污染物扩散迁移过程模拟方面得到了广泛应用.然而由于 HSPF 模型涉及参数多,参数间交互影响复杂,分析模型参数敏感度、寻找最优参数集(或满意参数集)成为 HSPF 模型应用的关键问题

收稿日期: 2016-07-12

基金项目: 城市水资源与水环境国家重点实验室开放课题 (ES201104); 国家自然科学基金(51008191)

作者简介: 刘兴坡(1977—),男,副教授,硕士生导师

通信作者: 刘兴坡, stormmodel@163.com

之一^[5].在 HSPF 参数敏感度和不确定性分析方面, Liu Z 等^[6]分析了滨岸带土地利用变化条件下,7 个对径流影响显著的 HSPF 模型参数对水文水质过程的影响;Chung 等^[7]以 Anyangcheon 流域为研究对象建立 HSPF 模型,发现了影响该流域径流量的 6 个敏感参数;程晓光等^[8]还应用 GLUE 方法对 HSPF 水文模块参数进行不确定性分析,发现了 2 个模型敏感参数、1 个区域敏感参数以及 7 个不敏感参数;李燕等^[9]以中田河流域为研究区域建立 HSPF 模型进行水文模拟,采用扰动分析法分析了水文模块参数的敏感性,发现 5 个影响该流域水文模拟精度的参数;罗川等^[10]以中田河流域为研究区域建立 HSPF 模型进行水文模拟,采用扰动分析法对水文模块参数进行了敏感性分析,发现 7 个影响 HSPF 水文模拟的敏感参数,并对参数敏感性进行了分级.Kazem Javan 等^[11]分析了气候变化对 HSPF 模型的影响,从 HSPF 的边界条件方面开展模型敏感度分析,成为 HSPF 模型研究的重要方向.在 HSPF 模型参数校准方面,文献[13–14]采用人工率定与 PEST 自动率定相结合的方法,分别以北京妨水流域和中和流域为研究区域,对 HSPF 参数进行了优化.Sunghee Kim 等则从数据同化的角度应用极大似然集成滤波器来提高模型精度,反映了提高 HSPF 建模精度的新途径^[15].

鉴于当前 HSPF 模型参数取值经验不足以及模型参数在 HSPF 水文水质模型构建中的重要性,本文以河北省青龙河流域 BASINs/HSPF 模型为研究对象,采用该流域下游桃林口水库 1999 年—2012 年的水文和水质实测数据作为模型率定和验证依据,应用正交极差分析法开展模型参数寻优分析实验研究,以期提出一种 HSPF 模型满意参数集获取的新模式.

1 研究流域数据与方法

1.1 研究流域概况

青龙河流域属于海河流域,如图 1 所示.该流域面积 6 340 km²,年平均降雨量为 500~700 mm,降雨集中在 7—8 月,流域内土壤类型主要为棕壤和褐土^[13];流域下游桃林口水库水质监测项目基本满足《地表水环境质量标准》中 II 类标准,平水期水质优于丰水期,对水库水质影响较大的是上游面源污染.

1.2 研究数据

1) 地形数据.数据源为美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)的 SRTM3 数据(分辨率为 90 m).经 ArcGIS10.2 分析处理后获得青龙河流域数字高程模型(DEM).

2) 土地利用数据.数据源是 2009 年 ENVISAT 卫星 MERIS 传感器的 GlobCover(Global Land Cover Map)2009,分辨率为 300 m;遥感图像分类采用美国食品和农业组织的地表覆盖分类系统(UN Food and Agriculture Organization's Land Cover Classification system).

3) 气象数据.数据源为中国气象科学数据共享中心,采用其中河北省青龙气象站 1957—2012 年逐日气压(PRS)、气温(TEM)、相对湿度(RHU)、降水(PRE)、蒸发(EVP)、风向风速(WIN)、日照(SSD)、0cm 地温(GST)等数据.

4) 水文和水质数据.采用桃林口水库 1999 年—2012 年月径流和水质(TN、TP、氨氮和 BOD)数据.

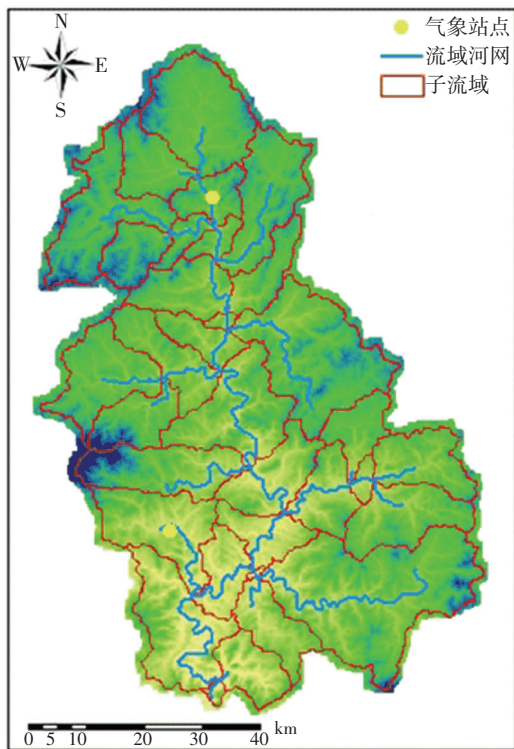


图 1 研究流域子流域、河网及气象站分布

Fig.1 Subbasins, streams and weather station of the study area

1.3 研究方法

1.3.1 研究参数遴选

借鉴文献[5–8]初步确定需要重点研究的 HSPF 模型参数,然后根据 BASINs/HSPF 的 PEST 程序确定上述模型参数的灵敏度,从而最终遴选 9 个模型参数作为研究对象,分别为 LZSN(土壤下层额定存储量)、UZSN(土壤上层额定存储量)、INFILT(土壤下渗系数)、IRC(壤中流消退系数)、BASETP(基流蒸发系数)、AGWETP(潜水蒸发系数)、AGWRC(地下水消退系数)、CEPSC(植被截留系数)、DEEPFR(水分下渗到承压层的比率).

1.3.2 正交极差分析方法

应用正交设计方法实现上述参数集的优化组合

设计.该方法将正交试验选择的各种水平组合列成表格(正交表),通过正交表的设计和选取来安排试验方案.正交表通常用 $L_n(t^q)$ 表示,其中, L 为正交表的代号, n 为试验次数, t 为水平数, q 为列数(即可能安排最多的因素个数).极差分析法包括计算和判断两个步骤.计算部分包括 K_{jm} 、 k_{jm} 和 R_j 计算,判断部分主要包括因素主次判断、优水平判断和最优组合判断.其中, K_{jm} 为第 j 列因素 m 水平所对应的试验指标之和, k_{jm} 为 K_{jm} 的平均值.由 k_{jm} 大小可判断 j 因素的优水平和各因素的优水平组合(即最优组合). R_j 为第 j 列因素的极差(即 j 列因素各水平下指标的

最大值与最小值之差),反映了第 j 列因素的水平变动时,试验指标的变动幅度. R_j 越大,表明该因素对试验指标的影响越大,也就越重要.故依据极差 R_j 大小就可判断各试验因素的主次.正交实验助手是一款针对正交表设计与结果分析的专业软件,应用其来设计 $L_{32}(4^9)$ 正交表,即根据所选 9 个参数的取值范围($j=9$),每个参数设 4 个取值($m=4$),各参数取值在上述范围内服从均匀分布,共获得正交参数集 32 组(若不采用正交性设计,全面实验参数集数应为 $4^9=262\ 144$ 组).如表 1 所示.

表 1 HSPF 模型参数范围及取值
Tab.1 HSPF parameter ranges and values

参数名称	参数意义	取值范围	参数取值			
			1	2	3	4
LZSN	土壤下层额定存储量	2~15	2.00	6.30	10.30	14.30
INFILT	土壤下渗系数	0.001~0.500	0.001	0.167	0.333	0.499
AGWRC	地下水消退系数	0.85~10	0.85	0.90	0.95	0.99
DEEPFR	水分下渗到承压层的比率	0.001~0.500	0.001	0.167	0.333	0.499
BASETP	基流蒸发系数	0.001~0.200	0.001	0.067	0.133	0.199
AGWETP	潜水蒸发系数	0.001~0.200	0.001	0.067	0.133	0.199
CEPSC	植被截留系数	0.01~0.40	0.01	0.14	0.27	0.40
UZSN	土壤上层额定存储量	0.05~2.00	0.05	0.70	1.35	2.00
IRC	壤中流消退系数	0.30~0.85	0.30	0.483	0.666	0.849

2 正交极差分析结果

2.1 评价标准

采用 Nash-Sutcliffe 效率系数(简称 NSE, E_{NS}) 作为模型精度的评价指标,即

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{mi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{si} - \bar{Q}_{si})^2}.$$

式中: Q_{mi} 为模拟流量, Q_{si} 为实测流量, $\bar{Q}_{si}$ 为实测流量的平均值, n 为模拟时段长度. E_{NS} 反映模拟结果与实测值的拟合程度,其值越接近 1,拟合度越高,模拟结果越理想.

2.2 正交极差分析结果

将各参数取值在 $L_{32}(4^9)$ 正交表中进行排列,获得的各组参数集值输入 HSPF 模型进行水文水质模拟,可计算出各组参数集对应的 E_{NS} 值、各因素各水平的实验指标之和 K_{jm} 以及单因素各水平的实验指标之和 k_{jm} ,如表 2 所示.

根据表 2 结果,可以计算出每一列因素各个水平数对应实验指标之和 K 的平均值 k ,将所得平均值

的最大者与最小者做差值,即为该因素的极差 R_j .由表 2 可以获知各个因素(参数)的各个水平数对应实验指标之和的最大平均值 k_1 、最优取值和极差,通过各个因素的极差比较排序,可以获得该参数对实验结果影响的敏感度排序.譬如,对于 LZSN,各个水平数对应实验指标之和的最大平均值 $k_1=0.372\ 9$,最优取值为 2.0,极差 $R=0.098\ 3$,相比其他因素的极差,该参数对实验结果影响的敏感度排序为 5.由极差分析法得到各个参数的当前最优值,如表 3 所示.

应用表 2 每个因素各个水平实验指标之和的平均值和所对应的因素水平绘制实验指标和因素的趋势图,可更为直观地分析指标随因素水平的变化趋势,结果如图 2 所示.

由图 2 可知, k 值随参数 LZSN 水平数的增大呈现先减后增的趋势,对参数 LZSN 的取值区间可控制在 $[2.0, 6.3]$.同理,根据各个因素的指标趋势图,可以获得该参数的取值区间,如表 3 所示.由此可见,与表 1 中参数的最初取值范围相比,各个参数的寻优区间缩小.通过初步寻优可得各个参数的最优取值以及各参数的敏感度排序,可为后续的参数寻优分析提供依据.

表 2 正交极差分析结果
Tab.2 Results of orthogonal range analysis

参数集序号	参数集									E_{NS}
	LZSN	INFILT	AGWRC	DEEPFR	BASETP	AGWETP	CEPSC	UZSN	IRC	
1	2.0	0.001	0.85	0.001	0.001	0.001	0.01	0.05	0.300	0.396 2
2	2.0	0.167	0.90	0.167	0.067	0.067	0.14	0.70	0.483	0.426 3
3	2.0	0.333	0.95	0.333	0.133	0.133	0.27	1.35	0.666	0.478 5
4	2.0	0.499	0.99	0.499	0.199	0.199	0.40	2.00	0.849	0
5	6.3	0.001	0.85	0.167	0.067	0.133	0.27	2.00	0.849	0.390 2
6	6.3	0.167	0.90	0.001	0.001	0.199	0.40	1.35	0.666	0.379 4
7	6.3	0.333	0.95	0.499	0.199	0.001	0.01	0.70	0.483	0.412 2
8	6.3	0.499	0.99	0.333	0.133	0.067	0.14	0.05	0.300	0.422 6
9	10.3	0.001	0.90	0.333	0.199	0.001	0.14	1.35	0.849	0.367 2
10	10.3	0.167	0.85	0.499	0.133	0.067	0.01	2.00	0.666	0.404 9
11	10.3	0.333	0.99	0.001	0.067	0.133	0.40	0.05	0.483	0
12	10.3	0.499	0.95	0.167	0.001	0.199	0.27	0.70	0.300	0.373 7
13	14.3	0.001	0.90	0.499	0.133	0.133	0.40	0.70	0.300	0.355 5
14	14.3	0.167	0.85	0.333	0.199	0.199	0.27	0.05	0.483	0.385 3
15	14.3	0.333	0.99	0.167	0.001	0.001	0.14	2.00	0.666	0.373 2
16	14.3	0.499	0.95	0.001	0.067	0.067	0.01	1.35	0.849	0
17	2.0	0.001	0.99	0.001	0.199	0.067	0.27	0.70	0.666	0.402 0
18	2.0	0.167	0.95	0.167	0.133	0.001	0.40	0.05	0.849	0.412 4
19	2.0	0.333	0.90	0.333	0.067	0.199	0.01	2.00	0.300	0.446 8
20	2.0	0.499	0.85	0.499	0.001	0.133	0.14	1.35	0.483	0.420 7
21	6.3	0.001	0.99	0.167	0.133	0.199	0.01	1.35	0.483	0.391 0
22	6.3	0.167	0.95	0.001	0.199	0.133	0.14	2.00	0.300	0.427 6
23	6.3	0.333	0.90	0.499	0.001	0.067	0.27	0.05	0.849	0
24	6.3	0.499	0.85	0.333	0.067	0.001	0.40	0.70	0.666	0.367 5
25	10.3	0.001	0.95	0.333	0.001	0.067	0.40	2.00	0.483	0.336 9
26	10.3	0.167	0.99	0.499	0.067	0.001	0.27	1.35	0.300	0.384 5
27	10.3	0.333	0.85	0.001	0.133	0.199	0.14	0.7	0.849	0
28	10.3	0.499	0.90	0.167	0.199	0.133	0.01	0.05	0.666	0.329 7
29	14.3	0.001	0.95	0.499	0.067	0.199	0.14	0.05	0.666	0.361 5
30	14.3	0.167	0.99	0.333	0.001	0.133	0.01	0.70	0.849	0
31	14.3	0.333	0.85	0.167	0.199	0.067	0.40	1.35	0.300	0.349 2
32	14.3	0.499	0.90	0.001	0.133	0.001	0.27	2.00	0.483	0.379 1
K_1	2.982 9	3.001 0	2.309 1	1.984 3	2.280 1	3.092 3	2.380 8	2.226 7	3.156 1	
K_2	2.790 5	2.820 4	2.684 0	3.045 7	2.385 8	2.341 9	2.799 1	2.337 2	2.751 5	
K_3	2.196 9	2.059 9	2.802 8	2.804 8	2.844 0	2.402 2	2.793 3	2.770 5	3.096 7	
K_4	2.203 8	2.229 3	1.600 1	2.339 3	2.324 0	2.337 7	2.200 9	2.758 7	1.169 8	
$k_1(=K_1/8)$	0.372 9	0.375 1	0.288 6	0.248 0	0.285 0	0.386 5	0.297 6	0.282 8	0.394 5	
$k_2(=K_2/8)$	0.348 8	0.352 6	0.335 5	0.380 7	0.298 2	0.292 7	0.349 2	0.292 2	0.343 9	
$k_3(=K_3/8)$	0.274 6	0.257 5	0.350 4	0.350 6	0.355 5	0.300 3	0.349 9	0.346 3	0.387 1	
$k_4(=K_4/8)$	0.275 4	0.286 7	0.200 0	0.292 4	0.290 5	0.292 2	0.275 1	0.344 8	0.146 2	
极差值 R	0.098 3	0.117 6	0.150 4	0.132 7	0.070 5	0.094 3	0.074 8	0.063 5	0.248 3	
优水平	1	1	3	2	3	1	3	3	1	
敏感度排序	5	4	2	3	8	6	7	9	1	

表 3 各个参数的当前最优取值

Tab.3 Optimal values for the selected parameters		
参数名称	当前最优取值	取值区间
LZSN	2.0	[2.0, 6.3]
INFILT	0.001	[0.001, 0.499]
AGWRC	0.95	[0.9, 0.95]
DEEPFR	0.167	[0.001, 0.333]
BASETP	0.133	[0.067, 0.199]
AGWETP	0.001	[0.001, 0.199]
CEPSC	0.27	[0.14, 0.27]
UZSN	1.35	[1.35, 2.00]
IRC	0.30	[0.300, 0.666]

2.3 正交极差分析模式评述

将各个参数的当前最优取值输入 HSPF 模型进行模拟,所得 E_{NS} 值为 0.467 6,该值仅劣表 1 中参数集 3 的 E_{NS} 值(0.478 5),在所有参数集的模拟结果中排序为 2.这表明正交极差分析方法获得的优化参数集可能非当前最优,但收敛效率很高,可作为获得满意解的一种高效率方法.此外,比较正交参数集 3 和各个参数的最优取值(见表 3)发现,INFILT、DEEPFR、AGWETP、IRC 4 个参数取值发生改变,而

LZSN、AGWRC、BASETP、CEPSC、UZSN 5 个参数取值则相同.同时根据极差分析结果,INFILT、AGWRC、DEEPFR、IRC 4 个参数灵敏度排序最高.综合上述两

个结论可以发现,正交极差分析方法具有高效识别高灵敏度参数以及优化参数取值区间的能力,可资作为一种 HSPF 模型参数满意解的新模式.

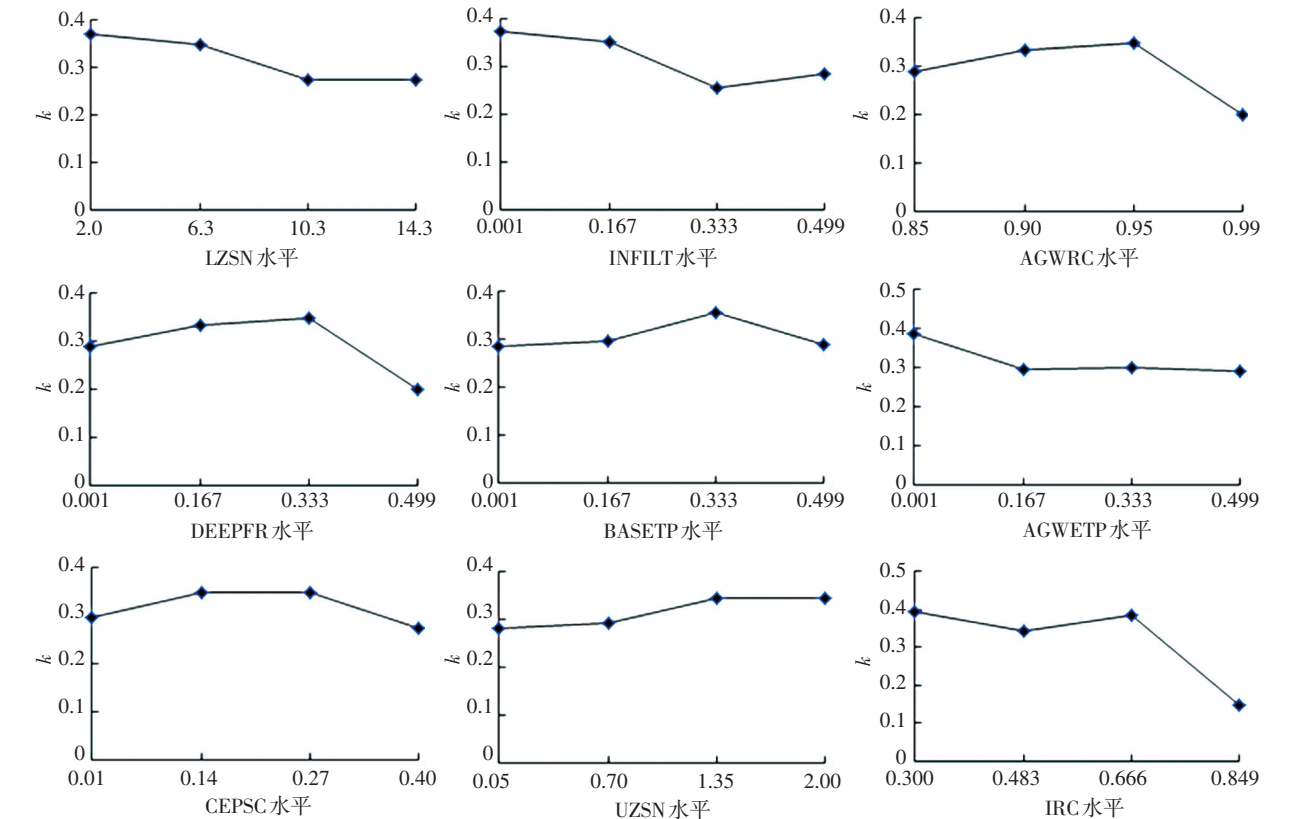


图 2 因素指标趋势图

Fig.2 Factor index trend

3 正交极差分析模式的可靠性分析

3.1 与正交极差分析深度寻优结果的比较分析

为了论证正交极差分析方法的有效性,在上述分析结果的基础上进行深度寻优.首先,在正交参数集 3 的参数取值(见表 1)和表 4 各参数最优取值(见表 3)的基础上取 INFILT、DEEPFR、AGWETP、IRC 4 个参数的算术平均值作为相应参数深度寻优的基准,其他 5 个参数取值维持不变.应用 $L_9(3^4)$ 正交表进行正交设计,参数取值及 $L_9(3^4)$ 正交表如表 4 所示.

表 4 深度寻优参数取值

参数	取值		
	1	2	3
INFILT	0.084	0.167	0.250
DEEPFR	0.209	0.250	0.292
AGWETP	0.034	0.067	0.100
IRC	0.392	0.483	0.575

将各参数取值在 $L_9(3^4)$ 正交表中进行排列,得到的各组参数值输入 HSPF 模型进行水文模拟,计

算出各组参数对应的 E_{NS} 值.然后将实验结果与正交表 $L_9(3^4)$ 组合成新的分析表进行极差分析.结果见表 5.

表 5 正交极差分析

Tab.5 Orthogonal range analysis

实验 序号	参数				
	INFILT	DEEPFR	AGWETP	IRC	NSE
1	0.084	0.209	0.034	0.392	0.470 3
2	0.084	0.250	0.067	0.483	0.483 4
3	0.084	0.292	0.100	0.575	0.491 2
4	0.167	0.209	0.067	0.575	0.473 8
5	0.167	0.250	0.100	0.392	0.493 9
6	0.167	0.292	0.034	0.483	0.513 7
7	0.250	0.209	0.100	0.483	0.533 8
8	0.250	0.250	0.034	0.575	0.433 4
9	0.250	0.292	0.067	0.392	0.446 8
K_1	1.444 9	1.477 9	1.417 4	1.411 0	
K_2	1.481 4	1.410 7	1.404 0	1.530 9	
K_3	1.414 0	1.451 7	1.518 9	1.398 4	
$k_1(=K_1/3)$	0.481 6	0.492 6	0.472 5	0.470 3	
$k_2(=K_2/3)$	0.493 8	0.470 2	0.468 0	0.510 3	
$k_3(=K_3/3)$	0.471 3	0.483 9	0.506 3	0.466 1	
极差值 R	0.022 5	0.022 4	0.033 8	0.044 2	
优水平	2	1	3	2	
敏感度排序	3	4	2	1	

同理,由表 5 可以获得不同参数的各个水平数对应实验指标之和的最大平均值、最优取值和极差.上述 4 个参数的最优取值见表 6.

应用表 5 中的每个因素各个水平实验指标和的平均值和所对应的因素水平绘制指标和因素的趋势图,如图 3 所示.

表 6 第二阶段寻优参数值

Tab.6 Phase 2 optimal parameter values	
参数名称	第二阶段寻优值
INFILT	0.167
DEEPFR	0.209
AGWETP	0.10
IRC	0.483

同理,由图 3 可以获得 INFILT、DEEPFR、AGWETP 以及 IRC 4 个参数的取值区间.将两次寻优结果进行总结,作为最优参数集,如表 7 所示.

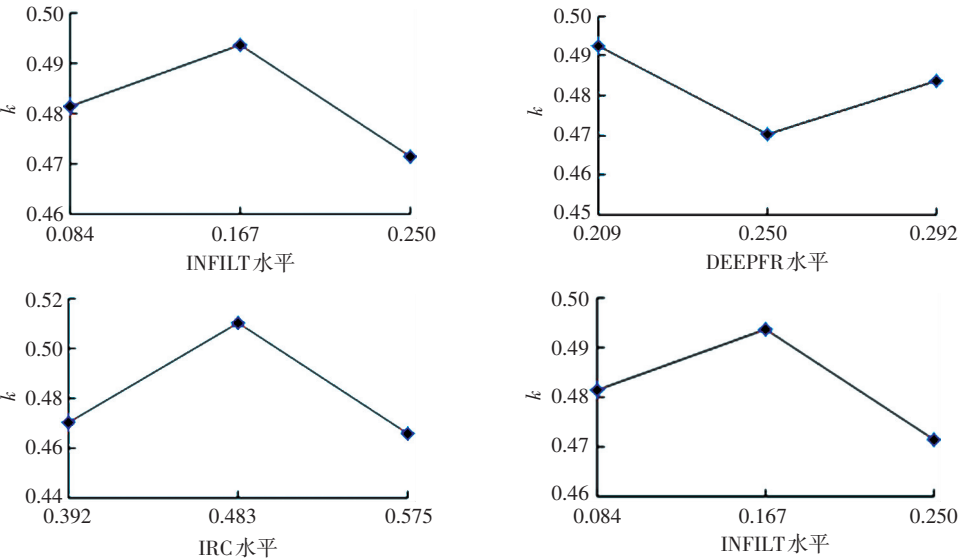


图 3 因素指标趋势图

Fig.3 Factor index trend

表 7 两阶段寻优后的参数集取值

Tab.7 Parameter set value after 2 phases' optimization		
参数名称	两阶段参数寻优值	取值区间
LZSN	2.000	—
INFILT	0.167	[0.084, 0.167]
AGWRC	0.950	—
DEEPFR	0.209	[0.209, 0.292]
BASETP	0.133	—
AGWETP	0.100	[0.067, 0.100]
CEPSC	0.270	—
UZSN	1.350	—
IRC	0.483	[0.392, 0.483]

3.2 与文献对比分析

将正交极差分析的 BASINs/HSPF 模型参数寻优结果与文献[8,12]的研究结果进行比较,初步判断研究结果的可靠性.文献[8]发现 AGWRC、UZSN、INFILT、LZSN、DEEPFR 5 个参数是影响水文过程模拟精度的关键参数,并发现 AGWRC 为最敏感参数,

将各个参数的最优取值输入 HSPF 模型进行模拟,所得 E_{NS} 值为 0.543 5,优于正交参数集的最优模拟结果(表 5 中参数集 7 的 E_{NS} 值为 0.533 8).这进一步表明,正交极差分析方法可作为获得满意解的一种高效率方法.

此外,比较表 5 中参数集和表 6 中各个参数的最优取值发现,参数 INFILT 取值发生改变,DEEPFR、AGWETP、IRC 3 个参数取值相同.根据上述极差分析结果,INFILT、AGWRC、DEEPFR、IRC 4 个参数灵敏度排序最高.此次极差分析方法识别出高灵敏参数 INFILT,识别出的另外 3 个参数取值在优化中并未出现改变,原因在于:DEEPFR、AGWETP、IRC 3 个参数的取值改变甚微,取值并未发生较大幅度显现;趋势分析所基于的数据点少于(或等于)3 个,可能会造成趋势研判的误差.

UZSN、INFILT 为敏感参数,LZSN、DEEPFR 为一般敏感;文献[12]从水文模块 17 个参数中遴选出 7 个敏感参数;UZSN、INFILT、AGWRC 对径流的敏感级别为Ⅲ类,LZSN、DEEPFR、INTFW、IRC 敏感级别为Ⅱ类.而本文应用正交极差分析方法识别出 6 个高灵敏的 BASINs/HSPF 模型参数:IRC、INFILT、AGWRC、DEEPFR、AGWETP 和 LZSN,其中 INFILT、AGWRC、DEEPFR、IRC 4 个参数灵敏度排序更高.与文献[8]相比,有 4 个相同的灵敏参数:AGWRC、INFILT、LZSN、DEEPFR;与文献[12]相比,本文提出的 6 个灵敏参数同样出现在文献[12]的敏感参数中,有 2 个相同的高灵敏参数(INFILT、AGWRC).

3.3 与 PEST 自动校准算法的比较分析

将正交极差分析的 BASINs/HSPF 模型参数寻优结果与 PEST 自动校准算法的参数寻优结果进行

比较,前者模拟的 Nash-Sutcliffe 效率系数为 0.79,略低于 PEST 自动校准算法的 Nash-Sutcliffe 效率系数(0.84).这表明,正交极差分析方法的参数寻优效率和效果与计算机自动校准的效率和效果相差不大,是一种较为高效的参数寻优模式.

3.4 水文和水质实际模拟效果分析

应用上述两次 BASINS/HSPF 模型寻优参数集,考查其水文和水质的实际模拟效果,以评估该模式的可靠性.以 2012 年全年作为率定期,2011 年和 2015 年作为验证期,率定期的 Nash-Sutcliffe 效率系数为 0.81,验证期的 Nash-Sutcliffe 效率系数可达 0.79(2011 年)和 0.68(2015 年),表明正交极差分析模式寻优可满足水文模拟的要求,如图 4 所示.

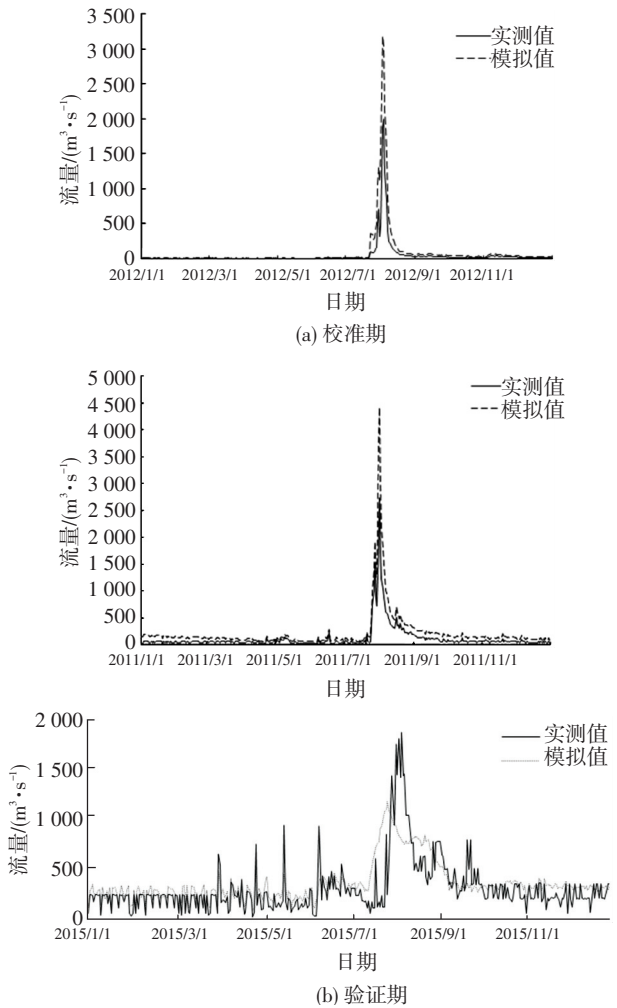


图 4 桃林口水库流量监测值与模拟值比较

在水质模拟方面,对 BOD、氨氮、TN、TP 等水质因子进行模拟,如图 5 所示.由于当前桃林口水库水质监测断面采样频率为每月监测一次,数据量偏少,本文暂未计算其 Nash-Sutcliffe 效率系数.通过监测值与模拟值的比较发现,上述 4 个指标的模拟与观测值较为吻合,其中 TN、TP 的拟合效果最好,氨氮次之,BOD 模拟效果稍差.囿于数据量限制,本文主

要针对水文模型参数开展寻优研究,并未对水质模型参数开展相关研究.但上述水质模拟效果也一定程度反映了该寻优模式的可靠性.

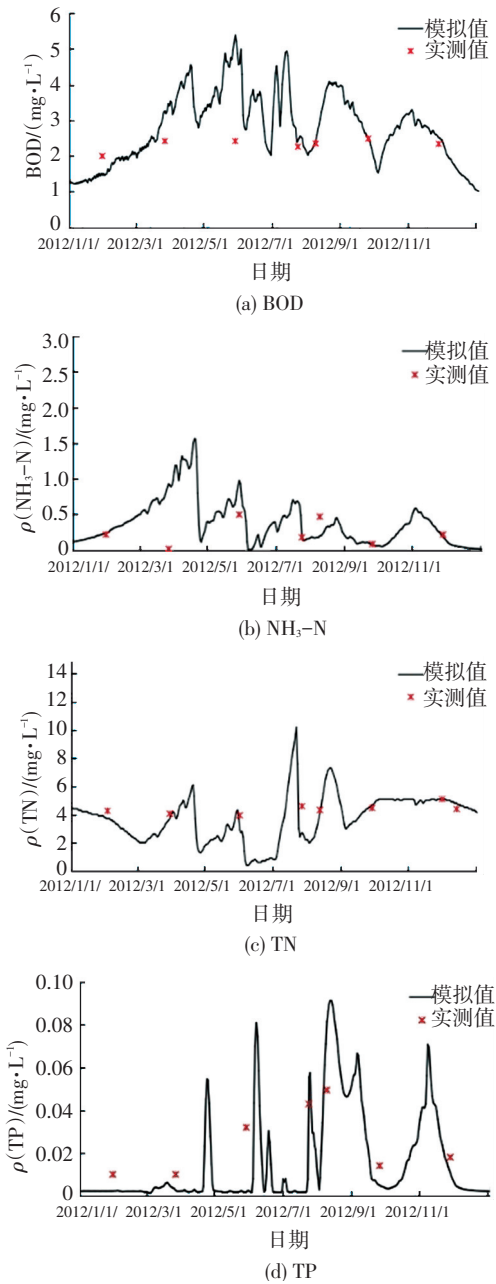


图 5 桃林口水库各水质指标模拟值与实测值比较

要针对水文模型参数开展寻优研究,并未对水质模型参数开展相关研究.但上述水质模拟效果也一定程度反映了该寻优模式的可靠性.

Figure 5 Comparison of the simulated values and the measured values of water quality indicators in Taolinkou reservoir

根据率定期、验证期水文模拟以及水质模拟结果,发现当前模型模拟值普遍大于实测值,其原因在于:模型参数初值取值的误差;HSPF 模型基础数据的精度及其一致性.需要指出,为了着重检验正交极差分析方法的有效性,本次参数寻优应用在青龙河流域 HSPF 模型创建初期,所有参数取值仅仅参照相关文献,并未应用任何个性化的当地先验信息,故正交极差分析法用于模型创建初期的模型参数预处理,有助于避免后续的参数率定算法陷入局部最优的困境.同时获得更多的流域先验知识数据并应用

数据同化方法也是解决模型参数率定的重要途径。

4 结 论

1) BASINs/HSPF 模型参数寻优的正交极差联合分析法可大幅减小参数的寻优次数和寻优区间, 是一种获得模型灵敏度参数和参数满意解的高效模式, 可为模型参数寻优算法开发提供借鉴。

2) 应用正交极差分析的参数率定结果, 以青龙河流域下游桃林口水库监测点 2011 年实测径流数据对模型进行验证, 验证期 (2011 年) 的 Nash-Sutcliffe 效率系数为 0.79, 稍低于率定期 (2012 年) 的 Nash-Sutcliffe 效率系数 (0.81) 以及 PEST 自动校准的 Nash-Sutcliffe 效率系数 (0.84), 水质模拟结果也基本吻合。

3) 针对青龙河流域 BASINs/HSPF 模型, 应用正交极差分析方法识别出 6 个高灵敏的 BASINs/HSPF 模型参数 (IRC、INFILT、AGWRC、DEEPFR、AGWETP 和 LZSN), 与文献 [8, 12] 的研究结果较为吻合。

4) 应用正交极差分析方法获得的 BASINs/HSPF 模型参数满意解取值区间依次为: LZSN [2.0, 6.3]; INFILT [0.084, 0.167]; AGWRC [0.90, 0.95]; DEEPFR [0.209, 0.333]; BASETP [0.067, 0.199]; AGWETP [0.067, 0.199]; CEPSC [0.14, 0.27]; UZSN [1.35, 2.00]; IRC [0.392, 0.483]。

参考文献

- [1] 朱文博, 王洪秀, 柳翠, 等. 河道曝气提升河流水质的 WASP 模型研究[J]. 环境科学, 2015, 36(4): 1326-1331.
ZHU Wenbo, WANG Hongxiu, LIU Cui, et al. Improvement of river water quality by aeration: WASP model study [J]. Environmental Science, 2015, 36(4): 1326-1331.
- [2] 马放, 姜晓峰, 王立, 等. 基于 SWAT 模型的阿什河流域径流模拟适用性研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(17): 96-99.
MA Fang, JIANG Xiaofeng, WANG Li, et al. Applicability of runoff simulation in Ashihe Basin based on SWAT model [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(17): 96-99.
- [3] 李致家, 黄鹏年, 张建中, 等. 新安江-海河模型的构建与应用[J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2013, 41(3): 189-195.
LI Zhijia, HUANG Pengnian, ZHANG Jianzhong, et al. Construction and application of Xin' anjiang-Haihe model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41(3): 189-195.
- [4] FARZBOD A, FARIDHOSSINI A, JAVAN K, et al. A Comparison of ANN and HSPF models for runoff simulation in Balkhichai River Watershed, Iran [J]. American Journal of Climate Change, 2015, 4(3): 203-216.
- [5] 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 Zhaofu, LIU Hongyu, LI Yan. Review on HSPF model for simulation of hydrology and water quality processes [J]. Environmental Science, 2012, 33(7): 2217-2223.
- [6] LIU Z, TONG S T Y. Using HSPF to model the hydrologic and water quality impacts of riparian landuse change in a small watershed [J]. Journal of Environmental Informatics, 2011, 17(1): 1-14.
- [7] CHUNG L 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.
- [8] 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 Xiaoguang, ZHANG Jing, GONG Huili. HSPF hydrologic simulation and parameter uncertainty in a semi-arid and semi-humid area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(12): 3179-3187.
- [9] 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 Yan, LI Zhaofu, XI Qing. Parameter sensitivity analysis of runoff simulation and model adaptability research based on HSPF [J]. Environmental Science, 2013, 34(6): 2139-2145.
- [10] 罗川, 李兆富, 席庆, 等. HSPF 模型水文水质参数敏感性分析 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 10: 1995-2002.
LUO Chuan, LI Zhaofu, XI Qing, et al. Sensitivity analysis of hydrological and water quality parameters of HSPF model [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 10: 1995-2002.
- [11] JAVAN K, SALEH F N, SHAHRAINYI H T. The influences of climate change on the runoff of Gharehsoo River Watershed [J]. American Journal of Climate Change, 2013(2): 296-305.
- [12] 胡小婷. 基于 BASINs 的青龙河流域水文水质模型应用研究 [D]. 上海: 上海海事大学, 2015.
HU Xiaoting. BASINs-based hydrological and water quality model and its application at Qinglong River Watershed [D]. Shanghai: Shanghai Maritime University, 2015.
- [13] 程晓光, 张静, 宫辉力. 基于 PEST 自动校正的 HSPF 水文模拟研究 [J]. 人民黄河, 2013, 35(12): 33-36.
CHENG Xiaoguang, ZHANG Jing, GONG Huili. Research on the HSPF hydrologic simulation based the PEST automatic calibration [J]. Yellow River, 2013, 35(12): 33-36.
- [14] 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 Wei, ZHOU Feng, DONG Yanjun, et al. PEST-based multi-objective automatic calibration of hydrologic parameters for HSPF model [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(5): 855-867.
- [15] KIM S, SEO D J, RIAZI H, et al. Improving water quality forecasting via data assimilation-Application of maximum likelihood ensemble filter to HSPF [J]. Journal of Hydrology, 2014, 519(4): 2797-2809.

(编辑 刘 彤)