

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201806067

基于响应面优化的青龙河流域 HSPF 模型参数校准方法

刘兴坡^{1,2},程星铁^{1,2},胡小婷^{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: Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF) 模型参数多且交互作用复杂,传统参数寻优面临着优化参数不灵敏、优化算法易陷入局部陷阱等问题,影响了优化精度和效率.本文集成青龙河流域、参数抽样、灵敏度分析和参数优化探索新的寻优途径.应用响应面优化软件 Design Expert,针对 9 个 HSPF 模型参数进行抽样,获得 130 组参数集,采用多元二次回归模型,建立参数集与纳什效率系数(NSE)的非线性关系,通过等高线和响应面识别最优参数及其密集取值区间.响应面优化参数的 NSE 平均值、最大值、最小值以及寻优区间缩减率均优于正交极差分析方法;LZSN、INFILT、AGWRC 为极灵敏参数,DEEPFR 为灵敏参数;LZSN 和 INFILT、INFILT 和 AGWRC、INFILT 和 UZSN、INFILT 和 IRC 的交互作用对结果有显著影响;优化参数的密集取值区间:LZSN[2.00,2.65];INFILT[0.400,0.475];AGWRC[0.870,0.885];DEEPFR[0.101,0.176];BASETP[0.001,0.120];AGWETP[0.083,0.120];CEPSC[0.166,0.244];UZSN[0.83,1.22];IRC[0.53,0.63].响应面方法综合了参数抽样、参数灵敏度分析以及参数优化等 3 个方面,考虑了参数非线性关系和参数的交互作用,兼顾了优化精度和效率,为青龙河流域 HSPF 模型参数优化开拓了新途径.

关键词: 青龙河流域;HSPF 模型;参数抽样;参数优化;响应面优化法
中图分类号: X522 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)05-0163-08

Parameter calibration method of HSPF model for Qinglong River watershed based on response surface optimization

LIU Xingpo^{1,2},CHENG Xingtie^{1,2},HU Xiaoting^{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, Qinhuangdao, 066400 Hebei, China)

Abstract: Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF) model has many parameters and complex interactions. The traditional parameter optimization is insensitive to the optimization parameters and the optimization algorithm is easy to trap into local problems, which affects the precision and efficiency of optimization. In this paper, a new optimization approach is explored by integrating Qinglong River watershed, parameter sampling, sensitivity analysis, and parameter optimization. Response surface optimization software Design Expert was applied to sample the parameters of 9 HSPF models, and 130 sets of parameter sets were obtained. Multiple quadratic regression models were used to establish the nonlinear relationship between the parameter sets and the efficiency coefficient of nash-sutcliffe (NSE), and the optimal parameters and their dense value ranges were identified by contour lines and response surface. The NSE mean value, maximum value, and minimum value of the response surface optimization parameters as well as the optimized interval reduction rate were all superior to the orthogonal range analysis method. LZSN, INFILT, and AGWRC were extremely sensitive parameters, while DEEPFR was sensitive parameters. The interactions between LZSN and INFILT, INFILT and AGWRC, INFILT and UZSN, and INFILT and IRC had significant impacts on the results. The dense value range of parameters were optimized as follows: LZSN[2.00, 2.65], INFILT[0.400, 0.475], AGWRC[0.870, 0.885], DEEPFR[0.101, 0.176], BASETP[0.001, 0.120], AGWETP[0.083, 0.120], CEPSC[0.166, 0.244], UZSN[0.83, 1.22], IRC[0.53, 0.63]. The response surface method synthesized three aspects, i. e., parameter sampling, parameter sensitivity analysis, and parameter optimization, which considers the nonlinear relationship of parameters, the interaction of parameters, and the optimization accuracy and efficiency, thus opening up a new way for parameter optimization of HSPF model in Qinglong River watershed.

Keywords: Qinglong River watershed; HSPF model; parameters sampling; parameter optimization; response surface optimization method

收稿日期: 2018-06-10
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,籍贯河北,副教授,硕士生导师
通信作者: 刘兴坡,stormmodel@163.com

目前,HSPF 模型在流域水文水质模拟方面得到了较为广泛的应用.然而由于 HSPF 模型参数多,参数间交互作用机制复杂,如何获得模型优化或满

意的参数集成为模型成功应用的关键问题^[1-4]. 由于 HSPF 模型参数较多,识别模型参数的灵敏度成为模型参数校准的前提. 首先,一些学者对 HSPF 模型灵敏参数识别开展了研究^[5-11],为后续 HSPF 模型参数灵敏度分析提供了重要参考. 其次,在 HSPF 模型参数优化校准方面,程晓光和高伟等采用人工率定与 PEST 自动率定相结合的方法,分别对北京妨水河流域和中和流域 HSPF 参数进行了优化^[12-13]. 杨博等采用多目标率定方法,且将日径流偏差划分为丰、枯水期,提高了晋江山美水库流域 HSPF 模型的径流模拟效果^[14]. 李金城等采用 PEST 校准程序,以日流量偏差、月流量偏差和超流量天数为三个目标函数,将它们与实测值的加权误差作为自动校准的总目标函数,提高了牛栏江上游流域 HSPF 模型的径流模拟效果^[15]. 在上述研究的基础上,刘兴坡等应用可同时进行灵敏度分析和参数校准的实验设计方法-正交极差分析方法对青龙河流域 HSPF 模型进行了灵敏度分析和参数优化^[16]. 由于将正交实验设计方法和 PEST 优化有效结合,很好地协调了全局优化,避免陷入局部最优和局部优化改善优化效率的关系,合理地平衡了计算简便性以及模拟结果的精确性,该方法取得了较好的模拟效率和效果. 有鉴于实验设计方法与 PEST 优化耦合思路的有效性,本文针对另外一种实验设计方法,即响应面优化法开展模型参数校准的实验研究,以期进一步改善青龙河流域 HSPF 模型参数校准效率和效果. 响应面优化方法具有如下特点:1)考虑了参数随机性以及模型随机误差;2)响应面优化法将复杂未知的函数关系在小区域内采用一次或二次多项式模型来拟合,计算简便有效;3)响应面优化法可获得连续型回归模型,在参数寻优过程中,可以连续地对参数的各个水平进行分析,为此本文研究将其与正交极差分析法进行比较,评估其效率、效果和适用性,为 HSPF 模型参数校准提供新途径.

1 研究流域、模型、数据与方法

1.1 研究流域概况

青龙河流域主体位于河北省秦皇岛市境内,流域面积 6 340 km²,其下游桃林口水库为北戴河供水水源地,水质安全保障要求高. 上游农业污染和农村生活污染等面源污染是流域水环境的主要风险源,点源污染影响相对较小. 流域位置见图 1 所示.

1.2 研究模型及数据

HSPF 模型是当前应用广泛的半分布式流域水文水质模型,源于美国环保署 1980 年开发的斯坦福模

型(SWM). HSPF 模型包括透水地段水文水质模块 PERLND、不透水地段水文水质模拟模块 IMPLND 以及地表水体水文水质模拟模块 RCHRES 等 3 个主要模块,适用于综合模拟流域的径流、土壤流失、河道水力和污染物迁移转化等过程,以及气候变化与土地利用变化影响下的流域水文、水环境效应模拟. 其主要边界条件包括逐日降雨、气压、气温、相对湿度、蒸发、日照等数据. 地形数据、土地利用数据、气象数据和水文水质数据与文献[16]相同,不再赘述.

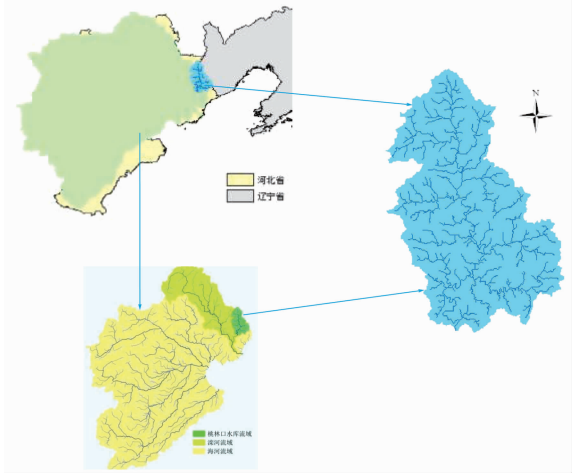


图 1 青龙河流域地理位置

Fig. 1 Location of Qinglong River watershed

1.3 研究方法

1.3.1 研究参数遴选

借鉴参考文献[16-17]初步确定需要重点研究的 HSPF 模型参数,然后根据 BASINS/HSPF 的 PEST 参数自动校准程序初步计算上述模型参数的灵敏度,最终遴选 9 个模型参数作为研究对象. 遴选参数的物理意义及取值范围参见表 1.

表 1 HSPF 模型参数范围

Tab. 1 Parameter ranges of HSPF model

参数名称	参数意义	单位	取值范围
LZSN	土壤下层额定存储量	inch	2.0 ~ 15.0
INFILT	土壤下渗系数	inch/h	0.001 ~ 0.500
AGWRC	地下水消退系数	1/day	0.85 ~ 1.00
DEEPPFR	水分下渗到承压层的比率	—	0.001 ~ 0.500
BASETP	基流蒸发系数	—	0.001 ~ 0.200
AGWETP	潜水蒸发系数	—	0.001 ~ 0.200
CEPSC	植被截留系数	—	0.01 ~ 0.40
UZSN	土壤上层额定存储量	inch	0.05 ~ 2.00
IRC	壤中流消退系数	1/day	0.30 ~ 0.85

1.3.2 参数优化方法及评价指标

1.3.2.1 响应面优化法概述

本文应用响应面优化方法来实现 HSPF 模型灵敏参数的识别及其优化. 响应面优化又称为响应曲面法 Response Surface Optimization,是应用合理的实验设计方法和多元二次回归模型来拟合待优化参数因变量及其响应值应变量之间的函数关系,通过对回归方程的方差分析以及响应面和等高线的绘制来获得最优参数,是解决多变量优化问题的重要方法. 在响应面回归分析中,响应值和待优化参数之间的数量关系 $y=f(x_1,x_2,\cdots,x_n)+\varepsilon$. 式中, y 表示响应值, x 表示待优化参数, f 表示代表函数关系, ε 表示是误差项. 响应面优化首先要获得回归方程,然后通过合理的参数设计,获得最佳响应值. 本文应用响应面实验设计软件 Design Expert10 来实现响应面优化,包括参数设计 Design、回归分析 Analysis 和参数优化 Optimization 等 3 个步骤. 其中,响应面设计选用 Box-Behnken Design (BBD) 设计^[18]. 以 9 个待优化参数作为因变量,每组参数集在 HSPF 模型中模拟获得的 NSE 值作为应变量,然后通过构建应变量和因变量之间的响应面,获得参数优化区间和优化取值.

1.3.2.2 正交极差分析法

本文将响应面优化法的参数优化结果与正交极差分析法的研究结果进行比较,以论证结果合理性和可靠性. 正交极差分析法将正交试验选择的各种水平组合列成正交表,通过正交表的设计和选取来安排试验方案. 首先,根据参数数量和每个参数取值个数选择正交表,获得正交参数集,并输入 HSPF 模型进行模拟,获得 NSE 值、各参数各水平的实验指标之和以及单参数各水平的实验指标之和. 然后,应用极差分析法进行参数灵敏度计算、优化水平评价以及确定最优参数组合.

1.3.2.3 HSPF 模型参数优化效果的评价指标

目前,HSPF 模型参数优化效果的主要评价指标包括均方误差 RMSE、平均相对误差 MRE、相关系数 Correlation coefficient、一致性指数 d 和 NSE 模型有效性系数等. 由于 NSE 模型有效性系数较其他指标更为严格,故此处择其作为 HSPF 模型参数优化效果的评价指标.

2 HSPF 模型参数响应面优化技术路线

按照 HSPF 模型参数范围参见表 1,将各待优化参数的名称、取值范围以及参数初始值输入到 Design Expert10,作为响应面分析的因变量. 将上述参数集输入到 HSPF 模型,可获得模拟曲线结果,计算模拟径

流时间序列和实测径流时间序列的 NSE 值.

将各组参数集运行获得的 NSE 值输入到 Design Expert10 的 Response 列,作为响应面分析的应变量;运行 Design Expert10 软件,可获得 N 组参数集和 N 个 NSE 值,构成响应面分析的 N 组应变量-因变量组合(本文为 130 组). 在 Design Expert10 软件的 Analysis 功能 Model 选项中选取 2FI 考虑两个参数的交互影响,可获得回归方差分析表以及各个待优化参数的 p 值(p 值代表了各参数的显著性水平). 若参数的 $p < 0.05$,则判定该参数为灵敏参数. 应用响应面设计软件 Design Expert10 中的等高线和 3D-Surface 功能获得等高线和响应面,从而分析各参数对响应值的影响、影响的显著区域以及各因素的交互作用,从而获得各待优化参数在 NSE 最大取值时的取值范围. 应用响应面设计软件 Design Expert10,将获得的参数取值范围再次输入到 Design Expert10 软件中 Optimization 功能的 Numerical 命令中,可以获得上述待优化参数的最优取值.

为了保证上述方法可靠性,针对回归方差分析表中获得的高灵敏参数进行再次的深度寻优,重复上述步骤,获得进一步结论,并与正交极差分析、PEST 自动校准等结果进行比较分析.

3 响应面优化分析结果

3.1 响应面分析结果

应用 Design-Expert10 软件对上述遴选的 9 个参数进行回归方差分析和灵敏度检验,发现构建的响应面优化模型 p 值小于 0.000 1 远远小于 0.050 0,这表明该模型极灵敏且该模型在被研究的回归区域拟合性能很好,模型残差满足正态分布,见图 2 所示. 参见表 2,可以发现 HSPF 模型参数 LZSN、INFILT 和 AGWRC 是极灵敏参数,DEEPFR 是灵敏参数,其他 5 个参数则不灵敏. 同时,发现 AB (LZSN 和 INFILT)、BC (INFILT 和 AGWRC)、BH (INFILT 和 UZSN) 和 BJ (INFILT 和 IRC) 等参数的两两交互作用对模拟结果的影响灵敏.

见图 3 所示的等高线二维图和三维图,可直观分析 NSE 值最大时各参数之间交互作用对模拟结果的灵敏程度和各参数的满意取值范围. 通过响应面设计 Design Expert10 软件的 Optimization > Numerical > Solutions 功能可获得参数优化的取值方案. 表 3 列出了各参数的优化取值:LZSN = 2.088, INFILT = 0.499, AGWRC = 0.871, DEEPFR = 0.113, BASETP = 0.101, AGWETP = 0.088, CEPSC = 0.199, UZSN = 1.020, IRC = 0.551.

表 2 表 2 响应面回归模型方差分析结果

Tab. 2 Variance analysis results of response surface regression analysis

参数及参数组合	平方和	统计自由度	回归均方差	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值	灵敏度
回归模型	2.31	45	0.062	4.87	<0.000 1	极灵敏
A(LZSN)	0.75	1	0.75	58.99	<0.000 1	极灵敏
B(INFILT)	0.29	1	0.29	22.81	<0.000 1	极灵敏
C(AGWRC)	1.07	1	1.07	84.04	<0.000 1	极灵敏
D(DEEPFR)	0.18	1	0.18	13.79	0.000 4	灵敏
E(BASETP)	1.960×10^{-3}	1	1.960×10^{-3}	0.15	0.695 7	不灵敏
F(AGWETP)	4.225×10^{-6}	1	4.225×10^{-6}	3.320×10^{-4}	0.985 5	不灵敏
G(CEPSC)	4.422×10^{-4}	1	4.422×10^{-4}	0.035	0.852 6	不灵敏
H(UZSN)	0.018	1	0.018	1.41	0.239 1	不灵敏
J(IRC)	2.970×10^{-4}	1	2.970×10^{-4}	0.023	0.878 9	不灵敏
AB	0.17	1	0.17	13.06	0.0005	灵敏
AC	5.512×10^{-5}	1	5.512×10^{-5}	4.331×10^{-3}	0.947 7	不灵敏
AD	1.369×10^{-3}	1	1.369×10^{-3}	0.11	0.743 8	不灵敏
AE	2.205×10^{-4}	1	2.205×10^{-4}	0.017	0.895 6	不灵敏
AF	6.125×10^{-6}	1	6.125×10^{-6}	4.812×10^{-4}	0.982 5	不灵敏
AG	4.441×10^{-16}	1	4.441×10^{-16}	3.489×10^{-14}	1.000 0	不灵敏
AH	3.486×10^{-3}	1	3.486×10^{-3}	0.27	0.602 1	不灵敏
AJ	3.125×10^{-4}	1	3.125×10^{-4}	0.025	0.875 9	不灵敏
BC	0.060	1	0.060	4.72	0.032 7	灵敏
BD	0.019	1	0.019	1.50	0.223 9	不灵敏
BE	1.891×10^{-4}	1	1.891×10^{-4}	0.015	0.903 3	不灵敏
BF	4.513×10^{-5}	1	4.513×10^{-5}	3.546×10^{-3}	0.952 7	不灵敏
BG	1.513×10^{-5}	1	1.513×10^{-5}	1.188×10^{-3}	0.972 6	不灵敏
BH	0.15	1	0.15	11.69	0.001 0	灵敏
BJ	0.051	1	0.051	3.99	0.049 1	灵敏
CD	0.016	1	0.016	1.26	0.265 1	不灵敏
CE	7.200×10^{-5}	1	7.200×10^{-5}	5.657×10^{-3}	0.940 2	不灵敏
CF	0.000	1	0.000	0.000	1.000 0	不灵敏
CG	4.441×10^{-16}	1	4.441×10^{-16}	3.489×10^{-14}	1.000 0	不灵敏
CH	4.050×10^{-3}	1	4.050×10^{-3}	0.32	0.574 2	不灵敏
CJ	3.610×10^{-4}	1	3.610×10^{-4}	0.028	0.866 7	不灵敏
DE	5.281×10^{-4}	1	5.281×10^{-4}	0.041	0.839 1	不灵敏
DF	9.112×10^{-5}	1	9.112×10^{-5}	7.160×10^{-3}	0.932 8	不灵敏
DG	4.441×10^{-16}	1	4.441×10^{-16}	3.489×10^{-14}	1.000 0	不灵敏
DH	9.680×10^{-4}	1	9.680×10^{-4}	0.076	0.783 4	不灵敏
DJ	6.125×10^{-6}	1	6.125×10^{-6}	4.812×10^{-4}	0.982 5	不灵敏
EF	1.361×10^{-4}	1	1.361×10^{-4}	0.011	0.917 9	不灵敏
EG	8.882×10^{-16}	1	8.882×10^{-16}	6.979×10^{-14}	1.000 0	不灵敏
EH	5.062×10^{-6}	1	5.062×10^{-6}	3.978×10^{-4}	0.984 1	不灵敏
EJ	5.000×10^{-7}	1	5.000×10^{-7}	3.929×10^{-5}	0.995 0	不灵敏
FG	1.512×10^{-5}	1	1.512×10^{-5}	1.188×10^{-3}	0.972 6	不灵敏
FH	3.125×10^{-6}	1	3.125×10^{-6}	2.455×10^{-4}	0.987 5	不灵敏
FJ	1.000×10^{-6}	1	1.000×10^{-6}	7.857×10^{-5}	0.992 9	不灵敏
GH	2.592×10^{-3}	1	2.592×10^{-3}	0.20	0.652 9	不灵敏
GJ	2.592×10^{-3}	1	2.592×10^{-3}	0.20	0.652 9	不灵敏
HJ	3.042×10^{-3}	1	3.042×10^{-3}	0.24	0.626 2	不灵敏

注:(1)表中 AB 代表参数 LZSN(A)与参数 INFILT(B)的交互作用,其他类似;(2)*F* 值检验设为 95% 置信,小于 0.05 的 *p* 值即判定为置信。

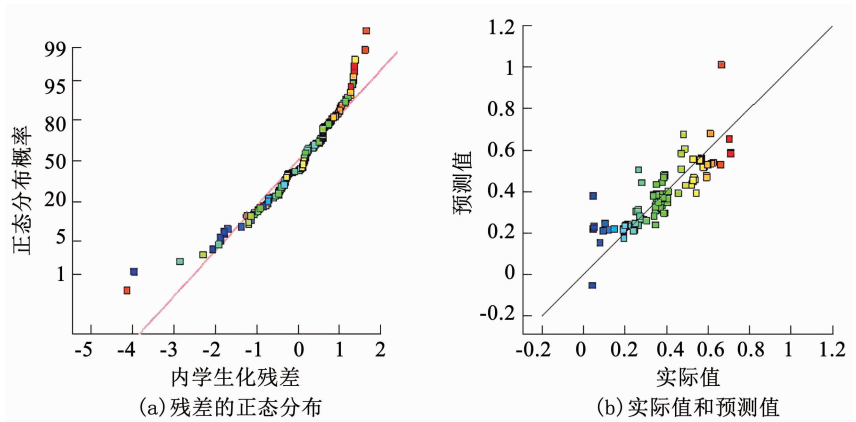


图 2 回归模型残差正态分布以及预测值和实际值关系

Fig. 2 Normal distribution of residual error and comparison between the predicted value and the actual value of regression model

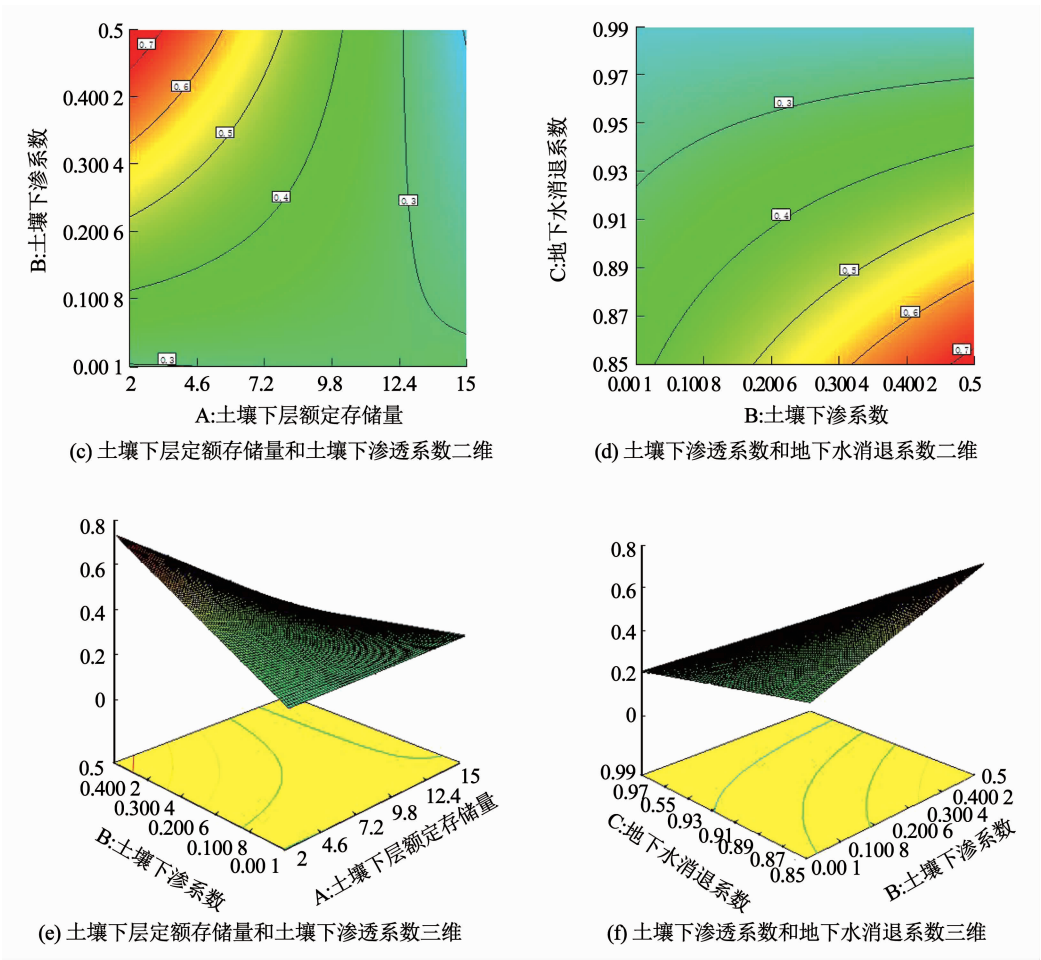


图 3 HSPF 参数及其交互作用响应面

Fig. 3 Response surface of HSPF parameters and their interactions

表 3 响应面优化法一次寻优参数取值

Tab. 3 One-stage optimization parameters of the response surface optimization method

参数名称	最小取值	最大取值	最优参数
LZSN	2	4.6	2.088
INFILT	0.400 2	0.5	0.499
AGWRC	0.87	0.89	0.871
DEEPFR	0.100 8	0.200 6	0.113
BASETP	0.080 6	0.120 4	0.101
AGWETP	0.080 6	0.120 4	0.088
CEPSC	0.166	0.244	0.199
UZSN	0.83	1.22	1.020
IRC	0.52	0.63	0.551

3.2 响应面优化法的二次寻优分析

为验证响应面优化方法的有效性,将响应面一次寻优获得的 4 个灵敏参数再次寻优,其余 5 个参数保持不变.将一次寻优获得的参数取值范围再次输入到 Design Expert10 软件,获得 29 组参数集,模拟方法和一次寻优相似,此处不再考虑参数之间的交互影响,即将 2FI 改变为 Linear,从而获得 4 个灵敏参数的二次寻优值,见表 4 所示.综合响应面优化法的一次寻优和二次寻优结果,可以获得 9 个 HSPF 模型参数的密集区间和最优推荐值,见表 5.

表 4 响应面一次寻优和二次寻优参数取值范围比较

Tab. 4 Comparison of one-stage and two-stage parameter intervals of the response surface optimization method

参数名称	一次寻优取值区间	二次寻优取值区间	二次寻优值
LZSN	[2.0, 4.6]	[2.00, 2.65]	2.000
INFILT	[0.400 2, 0.5]	[0.400, 0.475]	0.400
AGWRC	[0.87, 0.89]	[0.870, 0.885]	0.870
DEEPFR	[0.100 8, 0.200 6]	[0.101, 0.176]	0.101

表 7 响应面优化法与正交极差分析法的 HSPF 参数密集区间比较

Tab. 7 Comparison of HSPF parameter dense intervals between response surface optimization method and orthogonal range analysis method

参数名称	正交极差分析法		响应面优化法		原始取值区间
	密集区间	区间缩减率%	密集区间	区间缩减率%	
LZSN	[2.0, 6.3]	66.92	[2.00, 2.65]	95.00	[2,15]
INFILT	[0.084, 0.167]	83.37	[0.400, 0.475]	84.97	[0.001,0.500]
AGWRC	[0.90, 0.95]	66.67	[0.870, 0.885]	90.00	[0.85,1.00]
DEEPFR	[0.209, 0.333]	75.15	[0.101, 0.176]	84.97	[0.001,0.500]
BASETP	[0.067, 0.199]	33.67	[0.001, 0.120]	40.20	[0.001,0.200]
AGWETP	[0.067, 0.199]	33.67	[0.083, 0.120]	81.41	[0.001,0.200]
CEPSC	[0.14, 0.27]	66.67	[0.166, 0.244]	80.00	[0.01,0.40]
UZSN	[1.35, 2.00]	66.67	[0.83, 1.22]	80.00	[0.05,2.00]
IRC	[0.392, 0.483]	83.45	[0.53, 0.63]	81.82	[0.30,0.85]

表 5 响应面优化法二次寻优参数取值和密集取值区间

Tab. 5 Optimal parameter values and dense intervals of the response surface optimization method after two-stage optimization

参数名称	当前最优取值	密集取值区间
LZSN	2.000	[2.00, 2.65]
INFILT	0.400	[0.400, 0.475]
AGWRC	0.870	[0.870, 0.885]
DEEPFR	0.101	[0.101, 0.176]
BASETP	0.101	[0.001, 0.120]
AGWETP	0.088	[0.083, 0.120]
CEPSC	0.199	[0.166, 0.244]
UZSN	1.020	[0.830, 1.220]
IRC	0.551	[0.530, 0.630]

3.3 响应面优化法与正交极差分析比较

为验证响应面优化法的可靠性,与正交极差分析方法进行比较分析.参见表 6 可知,响应面设计的 130 组所得到的 NSE 系数的平均值、最大值、最小值均高于文献[16]所应用的正交极差分析法.

表 6 表 6 响应面优化与正交极差分析的优化结果比较

Tab. 6 Comparison of optimization results between orthogonal range analysis and response surface

—	正交极差二次寻优	响应面二次寻优
NSE 平均值	0.52	0.59
NSE 最大值	0.79	0.86
NSE 最小值	0.01	0.10

为比较响应面优化法与正交极差分析法的效率,比较两种方法获得的参数密集区间与原始参数取值区间的不同.参见表 7 可知,响应面优化法的寻优区间缩减率平均值为 79.82%,而正交极差分析方法的效率平均值为 64.03%,由此可见,响应面优化法在参数寻优区间方面的总体效率比正交极差分析法为高.

3.4 水文模拟效果比较

将两次响应面优化方法获得的参数集输入 HSPF 模型检验其水文模块的实际模拟效果. 以 2012 年为率定期,2011 年为验证期,率定期 2011 到 2012 年 NSE 值为 0.86,验证期 2011 年 NSE 值为 0.87,这表明响应面优化方法获得的参数集可较好满足水文模拟要求,见图 4 所示. 而 PEST 自动校准获得参数集的 NSE 值为 0.84 以及正交极差分析获得的参数集的 NSE 值为 0.79^[16],这表明响应面优化法获得的参数优于上述两种方法.

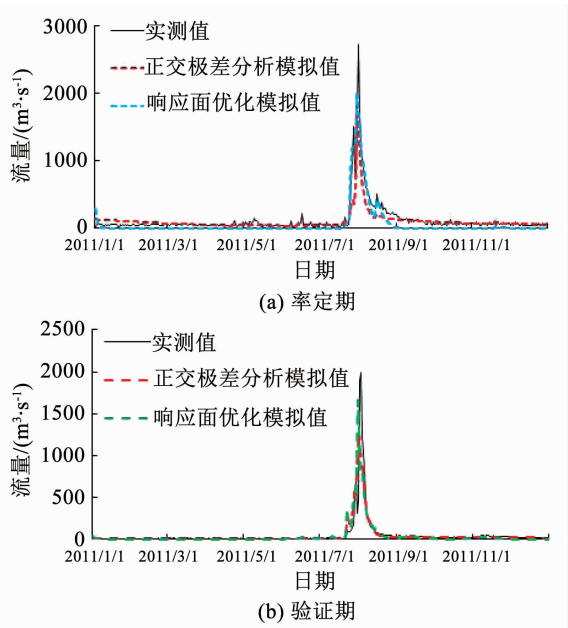


图 4 桃林口水库流量监测值与模拟值比较
Fig. 4 Comparison of the measured flow in Taolinkou Reservoir and the simulated flow

3.5 水质模拟效果分析

在径流参数校准的基础上,初步对 BOD、NH₃-N、TN、TP 等四个水质指标进行了模拟,模拟结果见图 5 所示. 根据模拟值与实测值的比较,TP 和 TN 指标的模拟值与监测值吻合度较好,而 BOD 和 NH₃-N 尚存一定不确定性. 由于水质模拟是在水文径流模拟、泥沙模拟和水温模拟的基础上进行的,因此泥沙模拟、水温模拟和水质过程参数获取是提高水质模拟效果的关键.

4 结 论

本文针对青龙河流域 HSPF 模型,遴选 9 个模型参数 LZSN、UZSN、INFILT、IRC、BASETP、AGWETP、AGWRC、CEPSC、DEEPFR,应用响应面优化法进行参数寻优和可靠性分析,获得以下结论:

1) BASINs/HSPF 模型参数的响应面优化方法在优化效果和效率方面均优于 PEST 参数自动校准

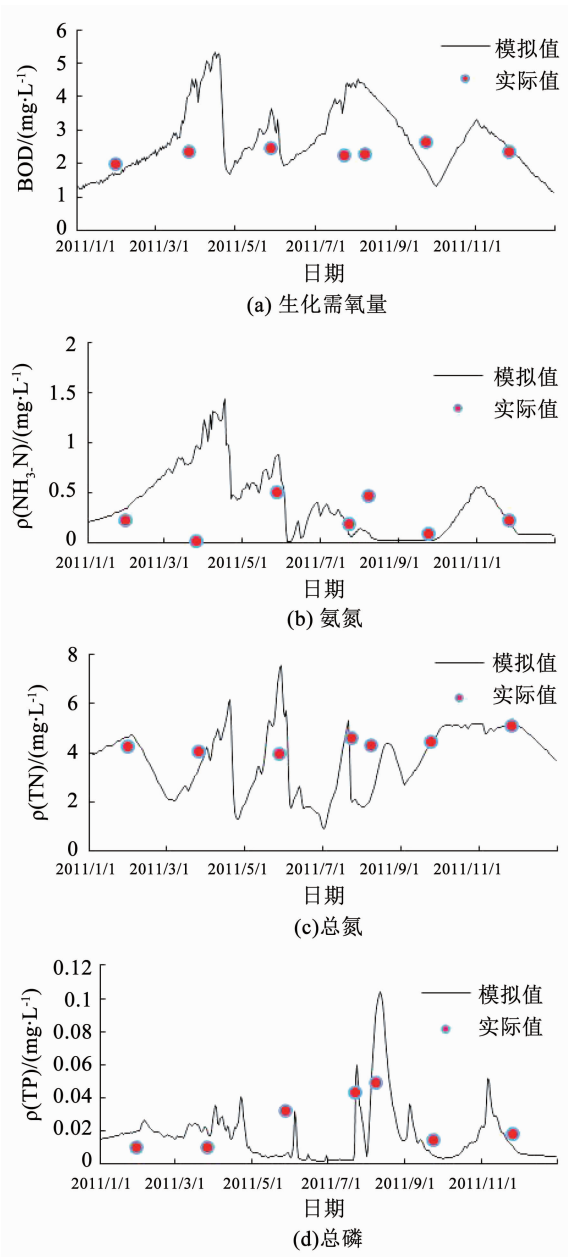


图 5 桃林口水库各水质指标模拟值与实测值比较
Fig. 5 Comparison of the simulated values and the measured values of water quality indicators in Taolinkou reservoir

以及正交极差联合分析法,比正交极差联合分析方法更为高效;

2) 响应面优化方法可以分析 HSPF 模型参数的交互作用. 本文研究表明, LZSN 和 INFILT、INFILT 和 AGWRC、INFILT 和 IRC、INFILT 和 UZSN 等参数的交互作用对模型模拟结果的影响较为显著.

3) 针对青龙河流域 HSPF 模型,应用响应面优化方法识别出 4 个高灵敏的 HSPF 模型参数 LZSN、INFILT、AGWRC、DEEPFR,与正交极差分析方法的研究结果一致;

4) 应用响应面优化方法获得 HSPF 模型参数优化取值区间依次为: LZSN [2. 00, 2. 65]; INFILT [0. 400, 0. 475]; AGWRC [0. 870, 0. 885]; DEEPFR

[0.101,0.176];BASETP[0.001,0.120];AGWETP
[0,0.083,0.120];CEPSC[0.166,0.244];UZSN
[0.83,1.22];IRC[0.53,0.63]。

参考文献

- [1] BERNDT M E, RUTELONIS W, REGAN C P. A comparison of results from a hydrologic transport model (HSPF) with distributions of sulfate and mercury in a mine-impacted watershed in northeastern Minnesota [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, (181): 74. DOI:10.1016/J.JENVMAN.2016.05.067
- [2] JEON J H, PARK C G, CHOI D, et al. Characteristics of suspended sediment loadings under Asian summer monsoon climate using the Hydrological Simulation Program-FORTRAN [J]. *Sustainability*, 2017, 9(1): 1. DOI:10.3390/su9010044
- [3] FARZBOD A, FARIDHOSSIENI 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. DOI:10.4236/ajcc.2015.43016
- [4] 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. DOI:10.13227/j. hjkx.2012.07.022
LI ZhaoFu, LIU Hongyu, LI Yan. Review on HSPF model for simulation of hydrology and water quality processes [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2012, 33(7): 2217. DOI:10.13227/j. hjkx.2012.07.022
- [5] LIU Z, TONG S T Y. Using HSPF to model the hydrologic and water quality impacts of riparian land-use change in a small watershed[J]. *Journal of Environmental Informatics*, 2011, 17(1): 1
- [6] 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. DOI:10.1002/hyp.7781
- [7] 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): DOI: 10.13671/j. hjkxxb.2014.0783
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. DOI:10.13671/j. hjkxxb.2014.0783
- [8] 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. DOI:10.13227/j. hjkx.2013.06.008
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. DOI:10.13227/j. hjkx.2013.06.008
- [9] 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, 33(10): 1995. DOI:10.11654/jaes.2014.10.017
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, 33(10): 1995. DOI: 10.11654/jaes.2014.10.017
- [10] JAVAN K, SALEH F N, SHAHRAINY H T. The influences of climate change on the runoff of Gharehsoo River watershed [J]. *American Journal of Climate Change*, 2013, (2): 296. DOI:10.4236/ajcc.2013.24030
- [11] 庞树江, 王晓燕, 马文静. 多时间尺度 HSPF 模型参数不确定性研究[J]. *环境科学*, 2018, 39(5): 2030. DOI:10.13227/j. hjkx.2017.10.070
PANG Shuijiang, WANG Xiaoyan, MA Wenjing. Research of parameter uncertainty for the HSPF model under different temporal scales [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(5): 2030. DOI:10.13227/j. hjkx.2017.10.070
- [12] 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. DOI:10.3969/j. issn.1000-1379.2013.12.012
CHENG Xiaoguang, ZHANG Jing, GONG Huili. Research on the HSPF hydrologic simulation based the PEST automatic calibration [J]. *Yellow River*, 2013, 35(12): 33. DOI:10.3969/j. issn.1000-1379.2013.12.012
- [13] 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): 885. DOI: 10.11849/zrzyxb.2014.05.013
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): 885. DOI:10.11849/zrzyxb.2014.05.013
- [14] 杨博, 陈莹, 陈兴伟, 等. 基于 PEST 的 HSPF 模型径流模拟优化[J]. *中国水土保持科学*, 2018, 16(2): 9. DOI:10.16843/j. sswc.2018.02.002
YANG Bo, CHEN Ying, CHEN Xingwei, et al. HSPF runoff simulation and optimization based on PEST automatic calibration [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2018, 16(2): 9. DOI:10.16843/j. sswc.2018.02.002
- [15] 李金城, 常学秀, 高伟. 目标函数权重对 PEST-HSPF 水文率定的影响研究[J]. *水文*, 2017, 37(6): 9
LI Jincheng, CHANG Xuexiu, GAO Wei. Impact of objective function weight on hydrological calibration of PEST-HSPF [J]. *Journal of China Hydrology*, 2017, 37(6): 9
- [16] 刘兴坡, 陈翔, 胡小婷, 等. 基于正交极差分析的青龙河流域 HSPF 模型参数寻优模式[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2018, 50(2): 131. DOI:10.11918/j. issn.0367-6234.2016.07.069
LIU Xingpo, CHEN Xiang, HU Xiaoting, et al. Orthogonal range analysis-based HSPF parameter optimization pattern for Qinglong River watershed [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2018, 50(2): 131. DOI: 10.11918/j. issn.0367-6234.201607069
- [17] 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: 上海海事大学硕士学位论文, 2015
HU Xiaoting. BASINs-based hydrological and water quality model and its application at Qinglong River Watershed [D]. Shanghai: Shanghai Maritime University, 2015
- [18] 刘文斌, 张海涛, 杨海君, 等. 辛基酚聚氧乙烯醚混合菌的构建及响应面优化[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(8): 2444
LIU Wenbin, ZHANG Haitao, YANG Haijun, et al. Construction of mixed flora effective degrading octylphenyl polyethoxylates (OPnEO) and optimization of degrading conditions using response surface method [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(8): 2444