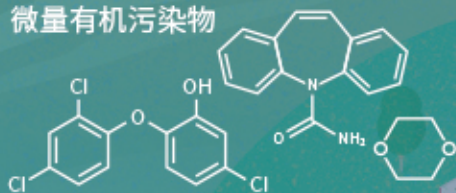


城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路

王文龙, 吴乾元, 杜烨, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪营

微量有机污染物



深度处理

- 污染物非靶向筛查
- 新型处理技术开发
- 处理效率替代性指标
- 工艺运行指南与排放标准

污水处理厂

深度处理

污水再生利用

湖泊湿地等

景观娱乐用水

下游城市河湖

污水达标排放

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年6月

第42卷 第6期
Vol.42 No.6

目次

综述与专论

- 城市环境生物安全研究的进展与挑战 苏建强, 安新丽, 胡安谊, 朱永官 (2565)
城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路 王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪莹 (2573)
污泥 EPS 作为阻燃剂的机制归纳与潜力分析 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 时琛, 吴远远 (2583)

研究报告

- 北京大气 PM_{2.5} 载带金属浓度、来源及健康风险的城郊差异 周安琪, 刘建伟, 周旭, 毕思琪, 张博哈, 高越, 曹红斌 (2595)
京津冀及周边 MAIAC AOD 和 PM_{2.5} 质量浓度特征及相关性分析 金国因, 杨兴川, 晏星, 赵文吉 (2604)
天津市 PM_{2.5} 中二次硝酸盐形成及防控 肖致美, 武婷, 卫昱婷, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 陈魁, 邓小文 (2616)
南京市大气细颗粒物(PM_{2.5})中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 傅银银, 文浩哲, 王向华, 于南洋, 李冰, 韦斯 (2626)
汾渭平原吸收性气溶胶时空演化及潜在源区分析 刘旻霞, 李亮, 于瑞新, 宋佳颖, 张国娟, 穆若兰, 徐璐 (2634)
西南典型区域夏季大气含氧挥发性有机化合物来源解析
... 陈木兰, 王赛男, 陈天舒, 朱波, 彭超, 周佳维, 车汉雄, 黄汝辉, 杨复沐, 刘合凡, 谭钦文, 韩丽, 陈军辉, 陆克定, 陈阳 (2648)
气溶胶中溶解性有机质(DOM)液相氧化 陶冶, 陈彦彤, 李楠旺, 张敬宇, 叶招莲, 盖鑫磊 (2659)
基于 MERRA-2 再分析资料的上海市近 40 年大气黑碳浓度变化及潜在来源解析
曹闪闪, 段玉森, 高婵婵, 苏玲, 杨怡萱, 张洋, 蔡超琳, 刘敏 (2668)
石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 崔建升, 陈静, 刘大喜, 石文雅 (2679)
基于光化学指标法的邯郸市臭氧生成敏感性 牛元, 程水源, 欧盛菊, 姚诗音, 沈泽亚, 关攀博 (2691)
基于 Landsat 数据的关中盆地腹地 AOD 时空格局及城市化对其影响 郑玉蓉, 王旭红, 张秀, 胡贵贵, 梁秀娟, 牛林芝, 韩海青 (2699)
基于卫星遥感和地面观测的人为源 VOCs 区域清单多维校验 王玥, 魏巍, 任云婷, 王晓琦, 陈赛赛, 程水源 (2713)
中原城市群国家干线公路 SOA 生成潜势估算 王娜萍, 李海萍, 张帆 (2721)
北京市“大气十条”实施的空气质量改善效益 卢亚灵, 范朝阳, 蒋洪强, 牛传真, 李勃 (2730)
工业大气污染源排放绩效定量评价及应用 李廷昆, 冯银厂, 吴建会, 毕晓辉, 张裕芬 (2740)
基于生态风险的我国水环境高风险抗生素筛选排序 周力, 刘珊, 郭家骅, 李琦 (2748)
基于 RDA-REM 模型的我国再生水开发利用潜力 郑锦涛, 马涛, 刘九夫, 彭安帮, 邓晰元, 郑皓 (2758)
基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析 荣易, 秦成新, 杜鹏飞, 孙博 (2769)
大型浅水湖泊水质模型边界负荷敏感性分析 王亚宁, 李一平, 程月, 唐春燕, 陈刚 (2778)
不同流域水陆过渡带氮磷有效态的特征对比及环境意义 朱海, 袁旭音, 叶宏萌, 成瑾, 毛志强, 韩年, 周慧华 (2787)
基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析
李华林, 张建军, 张耀方, 常国梁, 时迪迪, 徐文静, 宋卓远, 于佩丹, 张守红 (2796)
长期施肥和耕作下紫色土坡耕地径流 TN 和 TP 流失特征 吴小雨, 李天阳, 何丙辉 (2810)
渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素 刘鑫, 向伟, 司炳成 (2817)
太湖流域上游南苕溪水系夏秋季水体溶存二氧化碳和甲烷浓度特征及影响因素
梁佳辉, 田琳琳, 周钟昱, 张海阔, 张方方, 何圣嘉, 蔡延江 (2826)
低温期浅水湖泊氮的分布及无机氮扩散通量:以白洋淀为例 文艳, 单保庆, 张文强 (2839)
覆盖条件下底泥微环境对内源磷释放的影响 陈姝彤, 李大鹏, 徐楚天, 张帅, 丁玉琴, 孙培荣, 黄勇 (2848)
圩区河道底泥腐殖酸对重金属和抗生素的共吸附 薛向东, 杨宸豪, 于荐麟, 庄海峰, 方程冉 (2856)
两种 PPCPs 对雅鲁藏布江沉积物硝化作用的影响 凌欣, 徐慧平, 陆光华 (2868)
铁碳微电解及沸石组合人工湿地的废水处理效果 赵仲婧, 郝庆菊, 张尧钰, 熊维霞, 曾唯, 陈俊江, 江长胜 (2875)
CDs-BOC 复合催化剂可见光下活化过硫酸盐降解典型 PPCPs 雷倩, 许路, 艾伟, 李志敏, 杨磊 (2885)
pg-C₃N₄/BiOBr/Ag 复合材料的制备及其光催化降解磺胺甲噁唑 杨利伟, 刘丽君, 夏训峰, 朱建超, 高生旺, 王洪良, 王书平 (2896)
海藻酸钠负载硫化零价铁对水体中 Cr(VI)的还原去除 王旭, 杨欣楠, 黄币娟, 刘壮, 李诗萌, 程敏, 谢燕华 (2908)
超顺磁性纳米 Fe₃O₄@SiO₂ 功能化材料对镉的吸附机制 张立志, 易平, 方丹丹, 王强 (2917)
典型药物在医院废水和城市污水处理厂中的污染特征及去除情况 叶璞, 游文丹, 杨滨, 陈阳, 汪立高, 赵建亮, 应光国 (2928)
印染废水循环利用抗生素抗性基因丰度变化特性 徐瑶瑶, 王锐, 金鑫, 石炬, 王岩, 金鹏康 (2937)
短程硝化反硝化除磷颗粒污泥的同步驯化 王文琪, 李冬, 高鑫, 刘博, 张杰 (2946)
厌氧氨氧化颗粒污泥的长期保藏及快速活性恢复 李冬, 刘名扬, 张杰, 曾辉平 (2957)
市政污泥热解过程中重金属迁移特性及环境效应评估 姜媛媛, 王彦, 段文焱, 左宁, 陈芳媛 (2966)
不同作物农田土壤抗生素抗性基因多样性 黄福义, 周曙屹, 王佳妮, 苏建强, 李虎 (2975)
宁夏养牛场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征 张俊华, 陈睿华, 刘吉利, 尚天浩, 沈聪 (2981)
温度和搅拌对牛粪厌氧消化系统抗生素抗性基因变化和微生物群落的影响
许继飞, 张秋萍, 朱天骄, 秦帅, 朱文博, 庞小可, 赵吉 (2992)
小麦秸秆生物质炭施用对不同耕作措施土壤碳含量变化的影响 刘振杰, 李鹏飞, 黄世威, 金相乐, 张阿凤 (3000)
农牧交错带典型区土壤氮磷空间分布特征及其影响因素 张燕江, 王俊鹏, 王瑜, 张兴昌, 甄庆, 李鹏飞 (3010)
汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价 王锐, 邓海, 贾中民, 王佳彬, 余飞, 曾琴琴 (3018)
调理剂对磷富集土壤中两种元素交互作用的影响 黄洋, 胡学玉, 曹坤坤, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (3028)
S-烯丙基-L-半胱氨酸缓解水稻种子幼根和幼芽镉胁迫机制 程六龙, 黄永春, 王常荣, 刘仲齐, 黄益宗, 张长波, 王晓丽 (3037)
连续 4 个生长季大气 CO₂ 升高与土壤铅(Pb)污染耦合下刺槐幼苗根际土壤微生物特征
贾夏, Lkhagvajargal Khadkhurel, 赵永华, 张春燕, 张宁静, 高云峰, 王子威 (3046)
嗜热脂肪地芽孢杆菌对聚苯乙烯的降解性能 邢睿智, 赵子强, 赵文琪, 陈志, 陈金凤, 周顺桂 (3056)
冬青和女贞叶表面颗粒物微形态及叶际细菌群落结构 李慧娟, 徐爱玲, 乔凤禄, 蒋敏, 宋琪 (3063)
罗红霉素对大型溞生殖生长及抗氧化系统的影响 张凌玉, 刘建超, 冷阳, 陆光华 (3074)
中国粮食作物产量和木本植物生物量与地表臭氧污染的响应关系 冯兆忠, 彭金龙 (3084)
《环境科学》征订启事(2698) 《环境科学》征稿简则(2712) 信息(3027, 3055, 3073)

基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析

荣易, 秦成新, 杜鹏飞, 孙傅*

(清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: SWAT 模型是目前我国应用最为广泛的流域水环境模型之一。由于该模型拥有分布式参数并且基于美国环境特征建立, 确定合理的和符合我国流域环境特征的参数取值是模型应用中的关键工作。有研究通过总结现有报告的参数取值, 为模型本地化应用提供参数取值参考, 但这些研究忽略了其中 SWAT 模型研究质量之间的差异, 也未考虑参数取值的非均匀性以及极端值的影响, 因而研究结果的实用性不佳。建立了综合考虑模型建立、参数率定和验证、模拟效果的 SWAT 模型研究质量评价指标体系, 对中国知网收录的 2015 ~ 2017 年发表的 428 篇 SWAT 模型研究文献开展定量评价并筛选高可信度文献。基于高可信度文献报告的 SWAT 模型参数取值, 分析了 15 个涉及水文、泥沙和水质过程模拟的参数取值特征, 包括参数取值分布特征及其在不同地理区域间的差异, 以及参数率定值与默认值的偏差等。研究表明, 在筛选得到的 129 篇高可信度文献中, SWAT 模型应用整体上更加规范, 且具有较好的区域代表性; 15 个模型参数在我国流域的取值分布具有正偏态、负偏态等不同特征, 其中 4 个参数在我国不同地理区域的取值分布存在显著差异, 12 个参数在我国流域的取值明显偏离默认值。基于模型参数取值特征, 以置信区间的形式给出了 SWAT 模型在我国本地化应用的参数取值建议, 并针对不同数据条件下的模型应用提出了参数取值建议。

关键词: SWAT 模型; 指标体系; 高可信度文献; 参数取值; 地理区域; 置信区间

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)06-2769-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202010216

Characteristic Analysis of SWAT Model Parameter Values Based on Assessment of Model Research Quality

RONG Yi, QIN Cheng-xin, DU Peng-fei, SUN Fu*

(School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The soil and water assessment tool (SWAT) model is currently one of the most widely used watershed models in China. Since the model has been developed with distributed parameters and is customized to satisfy the environmental characteristics of the U. S. A., determining appropriate parameter values that reflect local features for model application in China is crucial. Some studies have proposed parameter values for the SWAT model by summarizing reported values in the literature; however, these studies neither differentiate the literature with respect to its quality nor consider non-uniformity in parameter values and the impact of extreme values. To address this, an indicator system for assessing the quality of SWAT model research was established, taking into account the process of model development, parameter calibration, and model validation as well as model performance. This screening approach was applied to a total of 428 journal articles on SWAT model research published between 2015 and 2017 were retrieved from the China National Knowledge Infrastructure database. The reported values of 15 model parameters involved in hydrology and sediment and nutrient simulation were extracted from highly credible articles and analysed in terms of statistical distributions, differences among geographic regions, and discrepancies between calibrated and default values. Results showed that the 129 highly credible journal articles screened generally followed good modelling practice and consisted of case studies from different regions across China. The statistical distributions of the 15 model parameters derived from the SWAT model studies exhibited a range of features including positive and negative skewness, and those of 4 parameters showed significant differences among regions where the watersheds are located. Furthermore, the calibrated values of 12 out of 15 parameters were significantly different from their default values. Considering the statistical characteristics of these model parameters, recommended parameter values for SWAT model application in China are proposed in the form of confidence intervals, and specific suggestions are also provided based on data availability.

Key words: SWAT model; indicator system; highly credible literature; parameter value; geographic region; confidence interval

SWAT(soil and water assessment tool)模型是目前我国应用最为广泛的流域水环境模型之一, 并且近年来相关应用研究的数量不断增加^[1]。作为分布式流域水环境模型, SWAT 模型拥有大量参数, 其中大部分参数具有明确的物理意义和特定的取值范围。同时, 由于 SWAT 模型由美国农业部开发, 很多模型参数的默认取值源自美国实际观测或经

验, 直接移用到我国可能导致偏差, 例如文献[2]发现 SWAT 模型中使用的径流曲线数经验对照表

收稿日期: 2020-10-28; 修订日期: 2020-11-25

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07301006002); 国家自然科学基金项目(51878372)

作者简介: 荣易(1995 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为环境系统分析建模, E-mail: y-rong17@mails.tsinghua.edu.cn

* 通信作者, E-mail: sunfu@tsinghua.edu.cn

在我国并不适用. 因此, 在 SWAT 模型的应用研究中, 应确保模型参数取值符合物理规律及应用流域特征^[3].

针对 SWAT 模型参数取值合理性与本地化的要求, 同时考虑到模型参数众多的实际情况, 目前多数研究采用了先识别灵敏参数、而后仅率定灵敏参数的方法^[4~6]. 然而, 现有的参数灵敏度分析方法多是基于大规模参数采样和模型计算的, 仍然需要耗费大量时间, 一定程度上影响了模型应用实践. 为解决这一问题, 有研究通过总结已有文献的参数取值特征^[7~11], 为模型本地化应用提供参数取值参考, 提高模型参数率定效率. 例如, 文献^[7]基于我国七大水系流域的 600 个应用案例, 总结提出了 ESCO 和 ALPHA_BF 等 5 个模型参数的取值建议. 但是, 这些参数的本地化取值建议在实际应用中还存在一定局限. 一方面, 这些取值建议所依据的部分案例存在观测数据时间序列较短和参数取值超出理论范围等问题^[12], 由此得到的参数取值值得存疑, 如果不加甄别地用于分析参数取值特征, 则可能出现偏差. 另一方面, 现有研究提供的模型参数本地化取值建议仅以上下界表征参数取值范围, 无法体现参数在此区间内的概率分布情况, 且受极端值影响较大, 降低了参数取值建议的实用性.

本文针对 SWAT 模型参数取值特征研究中存在的上述问题, 建立了 SWAT 模型研究质量评价指标体系, 对 2015~2017 年公开发表的 SWAT 模型在我国流域应用的文献进行评价, 并利用筛选得到的高可信度文献开展模型参数取值特征分析, 基于分析结果提出 SWAT 模型在我国本地化应用的参数取值建议.

1 材料与方法

1.1 SWAT 模型研究质量评价

本文依据文献^[12]提出的 SWAT 模型评估验证过程评价方法, 同时考虑到公开发表文献中信息的可获得性, 建立了如图 1 所示的由模型建立质量、率定验证质量和模型模拟质量这 3 个准则及其相应的 6 个指标构成的 SWAT 模型研究质量评价指标体系. 利用该指标体系, 对文献^[12]收集的 2015~2017 年公开发表的 428 篇 SWAT 模型研究文献的研究质量开展定量评价, 并由此筛选高可信度文献.

SWAT 模型需要流域数字高程模型 (DEM)、土地利用分布、土壤分布、气象和水文水质等基础数据, 数据来源可信度 (I_1) 指标要求这些数据可溯源, 即文献应明确描述数据来源. 该指标赋值规则如式

(1) 所示:

$$I_1 = \begin{cases} 1 & (\text{所有数据来源均明确描述}), \\ 0 & (\text{存在没有描述来源的数据}). \end{cases} \quad (1)$$

应用 SWAT 模型时, 子流域划分数量会影响模型模拟效果^[13], 因此空间划分精细度 (I_2) 指标要求文献对研究流域的空间划分水平合理. 总结文献^[14~17]并考虑到较小流域无需划分过多数量的子流域, 该指标赋值规则如式 (2) 所示:

$$I_2 = \begin{cases} 1, & S \leq 300 \text{ km}^2 \text{ 或 } N_{\text{sub}} \geq 30 \\ & \text{且 } S > 300 \text{ km}^2 \\ \frac{N_{\text{sub}} - 10}{20}, & 10 \leq N_{\text{sub}} \leq 30 \text{ 且 } S > 300 \text{ km}^2 \\ 0, & N_{\text{sub}} < 10 \text{ 且 } S > 300 \text{ km}^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中, S 为文献中研究流域的面积, N_{sub} 为子流域划分数量. 若文献未报告子流域划分数量, 则 I_2 为 0.

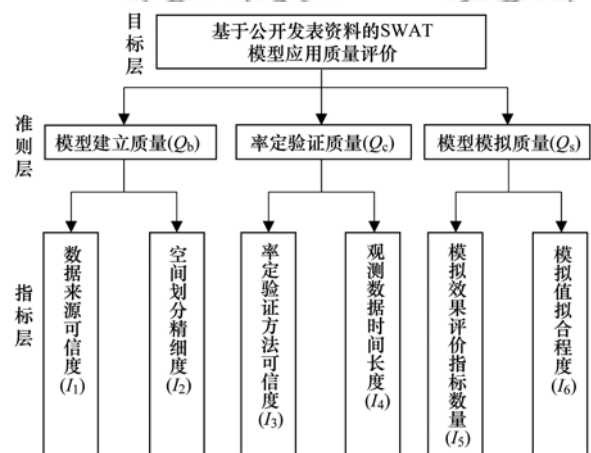


图 1 SWAT 模型研究质量评价指标体系

Fig. 1 Quality assessment indicators for SWAT model studies

模型参数率定和验证是提高模型可靠性的关键步骤, 因此率定验证方法可信度 (I_3) 指标要求文献明确报告所使用的率定和验证方法. 该指标赋值规则如式 (3) 所示:

$$I_3 = \begin{cases} 1 & (\text{明确报告参数灵敏度分析} \\ & \text{以及率定验证方法}), \\ 0.5 & (\text{仅报告两项内容中的一项}), \\ 0 & (\text{两项内容均未报告}). \end{cases} \quad (3)$$

SWAT 模型通常用于较长时间尺度的流域水文水质模拟, 为保证模型在不同水文条件下均有良好的模拟表现, 应尽可能使用长时间序列的观测数据开展模型率定和验证. 基于已有研究总结^[18~20], 观测数据时间长度 (I_4) 指标要求文献中用于 SWAT 模型率定和验证的观测数据时间长度合计不少于 8 a. 该指标赋值规则如式 (4) 所示:

$$I_4 = \begin{cases} 1 & (L_{\text{obs}} \geq 8 \text{ a}), \\ \frac{L_{\text{obs}}}{8} & (L_{\text{obs}} < 8 \text{ a}). \end{cases} \quad (4)$$

式中, L_{obs} 为观测数据时间长度。

现有文献通常从趋势拟合效果(如决定系数)、均值拟合效果(如百分比偏差)和峰值拟合效果(如纳什效率系数)等 3 方面对 SWAT 模型模拟效果进行评价。由于单一种类指标无法全面表征拟合程度^[21], 因此模拟效果评价指标数量(I_5)指标要求文献应至少使用上述 3 类指标评价 SWAT 模型的模拟能力。该指标赋值规则如式(5)所示:

$$I_5 = \begin{cases} 1 & (N_{\text{obj}} \geq 3), \\ \frac{N_{\text{obj}}}{3} & (N_{\text{obj}} < 3). \end{cases} \quad (5)$$

式中, N_{obj} 为模拟效果评价指标类型的数量。

模拟值拟合程度(I_6)指标要求采用不同的模拟效果评价指标时, SWAT 模型的模拟值和观测值均能够较好地吻合。基于 Moriasi 等^[22] 总结的常用评价指标取值与模型模拟能力的评价标准, 该指标赋值规则如式(6)所示:

$$I_6 = \min(S_{\text{NSE}}, S_{R^2}, S_{\text{PBIAS}})$$

$$S_{\text{NSE}} = \begin{cases} 1 & (\text{NSE} > 0.8), \\ 0.8 & (0.7 < \text{NSE} \leq 0.8), \\ 0.6 & (0.5 < \text{NSE} \leq 0.7), \\ 0 & (\text{NSE} < 0.5). \end{cases}$$

$$S_{R^2} = \begin{cases} 1 & (R^2 > 0.85), \\ 0.8 & (0.75 < R^2 \leq 0.85), \\ 0.6 & (0.6 < R^2 \leq 0.75), \\ 0 & (R^2 < 0.6). \end{cases}$$

$$S_{\text{PBIAS}} = \begin{cases} 1 & (|\text{PBIAS}| < 5\%), \\ 0.8 & (5\% < |\text{PBIAS}| \leq 10\%), \\ 0.6 & (10\% < |\text{PBIAS}| \leq 15\%), \\ 0 & (|\text{PBIAS}| > 15\%). \end{cases} \quad (6)$$

式中, NSE 为变量拟合纳什效率系数值, R^2 为变量拟合决定系数值, PBIAS 为变量拟合百分比误差值。

由于不同研究的目标不同, 其关注的模拟变量也不同, 此外不同流域的监测点位数量也存在差异, 这些难以形成统一标准, 因此本研究不将模拟变量数量和观测点位数量纳入评价。当文献中报告多模拟变量和多点位模拟结果时, 本研究选择水文观测数据(通常为流量)模拟效果最差的结果作为评价依据。

根据上述规则计算得到全部 428 篇文献的 6 个指标值后, 使用熵权法^[23] 确定各个指标的权重, 以

避免主观赋权可能造成的经验性偏差。各文献研究质量的最终得分如式(7)所示:

$$I = 100 \times \sum_{i=1}^6 w_i I_i \quad (7)$$

式中, I 为最终得分, w_i 为第 i 项指标权重, I_i 为第 i 项指标值。将各文献研究质量的最终得分从高到低排序, 选取其中排名前 30% 的文献认定为高可信度文献, 基于高可信度文献中 SWAT 模型参数取值开展后续研究。

1.2 SWAT 模型参数取值特征分析

将筛选出的高可信度文献按照其研究流域在我国所处的地理区域(即西北地区、北方地区、南方地区和青藏地区)分类, 整理得到 SWAT 模型在各地理区域应用时的参数典型取值, 分析不同区域之间参数取值分布的差异、各区域内部参数取值分布的特征及其与参数默认值的偏差程度, 在此基础上提出 SWAT 模型本地化应用的参数取值建议。

1.2.1 区域间参数取值分布差异

由于不同地理区域气候和地理条件不同, SWAT 模型参数取值分布可能存在整体差异。本研究使用两样本 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验评价不同区域之间的模型参数取值分布是否存在显著差异, 统计量 $D_{\text{K-S}}$ 代表两经验分布间距离的最大值, 可由式(8)计算:

$$D_{\text{K-S}} = \max |F_1(x) - F_2(x)| \times \frac{n_1 n_2}{\max(n_1, n_2)} \quad (8)$$

式中, $F_1(x)$ 和 $F_2(x)$ 分别为两个区域参数取值样本的经验分布, n_1 和 n_2 为两个样本的样本数量。通过查表可知 $D_{\text{K-S}}$ 在自由度 f 下的显著度水平 P , 通常认为 $P < 0.05$ 时两样本的经验分布存在显著差异。

1.2.2 区域内参数取值分布特征

为了避免简单地以取值范围表示 SWAT 模型参数取值特征、忽视参数在取值范围内分布不均匀的特点, 本研究计算各区域内模型参数取值分布的偏度 S 和峰度 K , 由此分析参数取值分布特征。两个指标的计算方法如式(9)和(10)所示:

$$S = \frac{\sqrt{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{3/2}} \quad (9)$$

$$K = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^2} - 3 \quad (10)$$

式中, n 为参数取值样本数量, $\bar{x}$ 为样本平均数, x_i 为第 i 个样本值。

1.2.3 参数率定值与默认值的偏差程度

为了分析 SWAT 模型参数默认值是否可能直接移用至我国流域,本研究使用箱式图定性比较模型参数取值与默认值的偏差程度,观察是否存在整体高于或低于默认值的情况以及参数取值在默认值附近的密集程度.

2 结果与讨论

2.1 高可信度文献筛选

由熵权法计算得到的 SWAT 模型研究质量评价各指标的权重取值如表 1 所示,其中空间划分精细度和率定验证方法可信度两项指标的权重较大,说明现有文献在这两个指标上的得分较为分散,是

体现研究质量差别的主要指标.数据来源可信度和模拟值拟合程度两项指标的权重相对较低,这是由于现有文献中数据的可溯源性以及模型的模拟效果总体较好^[12],例如纳什效率系数通常高于 0.5.

428 篇文献最终得分的最高值、最低值、平均值和中位数分别为 100、0、67.32 和 71.21,而按得分排名前 30% 筛选得到的 129 篇高可信度文献的得分均超过 90,说明高可信度文献的 SWAT 模型研究整体上更加规范.图 2 给出了全部文献和高可信度文献研究流域位置的分布,从中可以看出,虽然 4 个地理区域的文献数量存在差异,但高可信度文献与全部文献的空间分布较为相似,因此筛选得到的高可信度文献具有较好的区域代表性.

表 1 SWAT 模型研究质量评价指标权重

Table 1 Weighting of quality assessment indicators for SWAT model studies						
指标名称	数据来源可信度	空间划分精细度	率定验证方法可信度	观测数据时间长度	模拟效果评价指标数量	模拟值拟合程度
权重	0.079	0.308	0.276	0.145	0.101	0.091

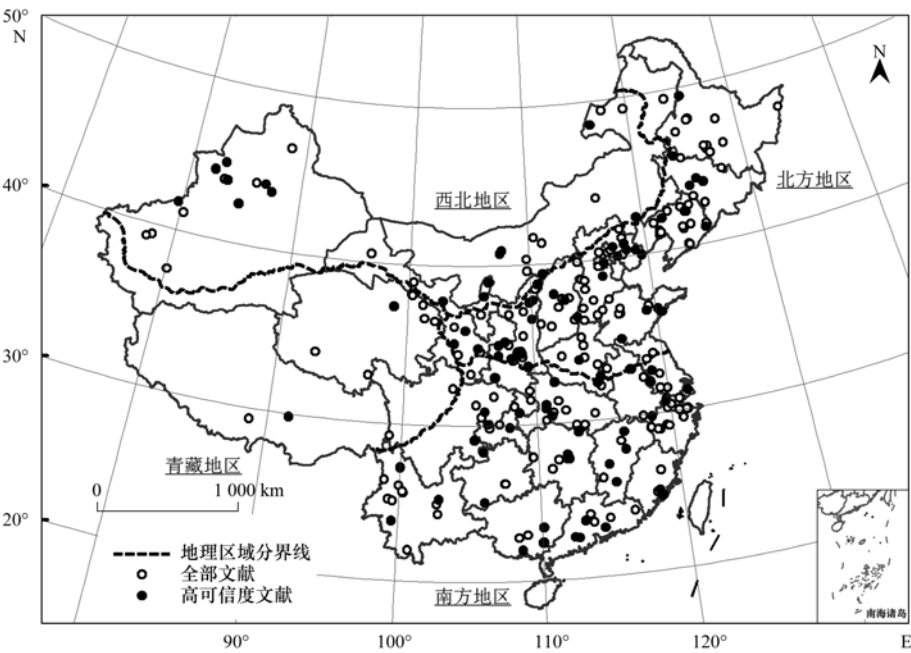


图 2 被评价文献中研究流域的位置分布示意

Fig. 2 Distribution of the studied watersheds in the reviewed journal articles

2.2 SWAT 模型参数取值特征分析

整理高可信度文献中报告的 SWAT 模型参数取值,选定控制流域不同水文水质过程且参数取值报告较多的 15 个参数进行分析,包括:ALPHA_BF、CN2、CH_K2、CH_N2、CANMX、ESCO、EPCO、GW_REVAP、GW_DELAY、SURLAG、SOL_AWC、SOL_K、SPCON、SPEXP 和 NPERCO.这些参数控制了产流(CN2)、汇流(SURLAG)、蒸散发(CANMX、ESCO、EPCO)、土壤水(SOL_AWC、SOL_K)、地下

水(ALPHA_BF、GW_REVAP、GW_DELAY)、河道(CH_K2、CH_N2)等水文过程以及泥沙(SPCON、SPEXP)和水质(NPERCO)过程的模拟.由于青藏地区高可信度文献数量较少,不足以开展统计分析,因此下文只对西北、北方和南方这 3 个地区的参数取值特征进行分析.

2.2.1 不同区域参数取值分布差异分析

图 3 所示为不同地理区域间 SWAT 模型参数取值两样本 K-S 检验 P 值结果,由于控制泥沙和水质

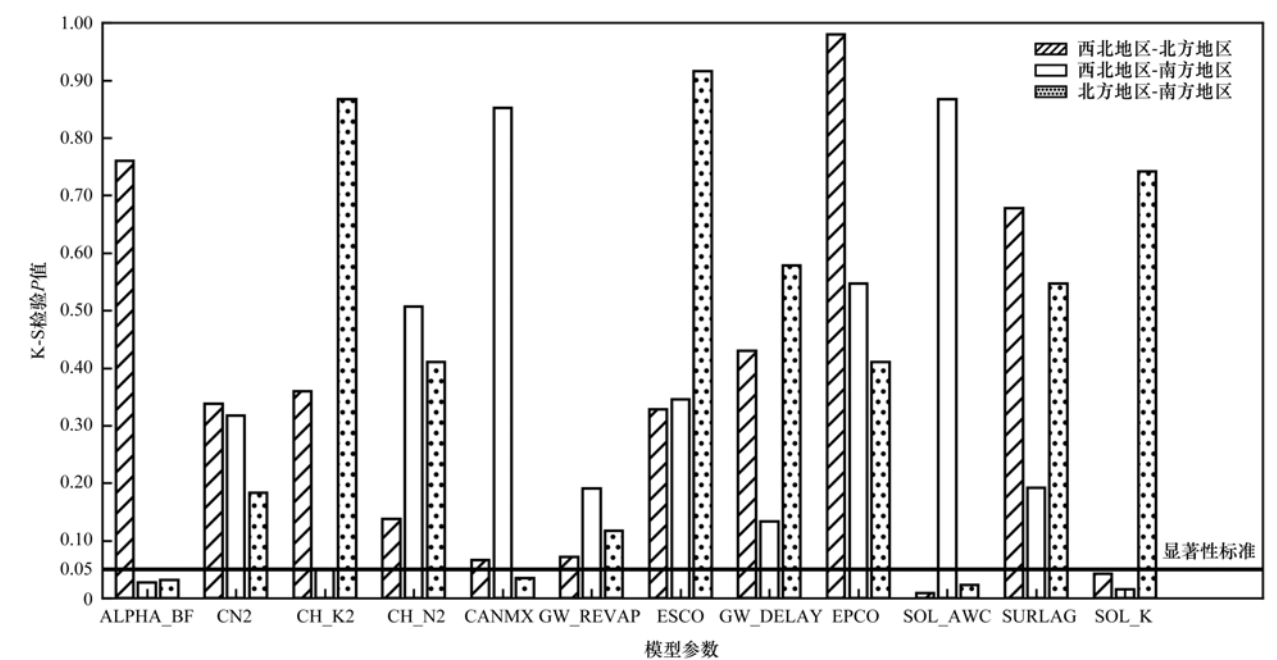


图3 不同地理区域间 SWAT 模型参数取值分布的两样本 K-S 检验 P 值

Fig. 3 Two-sample K-S test P values for SWAT model parameters between different regions

过程的参数取值报告总数较少,故不做区域间差异分析.从中可以看出,ALPHA_BF、CANMX、SOL_AWC 和 SOL_K 等 4 个参数的取值分布在部分区域间存在显著差异.

从图 4 所示的参数取值分布可以看出,南方地区 ALPHA_BF 取值的平均数和中位数均明显高于西北和北方地区,而北方地区的 CANMX 明显高于西北和南方地区. ALPHA_BF 为基流衰退系数,控制地下水进入河道的速率; ALPHA_BF 越大,基流越平稳. 由于南方地区属于湿润区,降雨相对较多,土壤长期处于高含水量状态,地下水径流相对降雨量较少的北方和西北地区更为稳定^[9],因而 ALPHA_BF 取值较高. CANMX 为植物冠层最大持水量,控制植物对降雨的截流过程; CANMX 越大,降落到地表

的水分越少,径流量越小. 由于北方地区以阔叶林为主,树冠截流能力较强,而且部分研究流域处在水库附近^[24, 25],多为流域上游,植被覆盖较好,两者共同导致 CANMX 参数取值较高.

参数 SOL_AWC 和 SOL_K 随土壤种类而变化,调整参数取值时通常设置为与调整前参数取值的相对变化率,文献报告值也均为相对变化率. SOL_AWC 为土壤持水度,控制土壤水与河道及地下水的交互; SOL_AWC 越大,土壤可容纳水分越多,径流量越小. SOL_K 为土壤饱和水力传导率,控制地表水渗入土壤的速率; SOL_K 越大,土壤渗透性越强. 图 5 为不同地理区域 SOL_AWC 和 SOL_K 取值分布,从中可以看出,西北地区率定后的 SOL_K 取值明显高于初始值,平均约为初始值的 1.5 倍,而北方

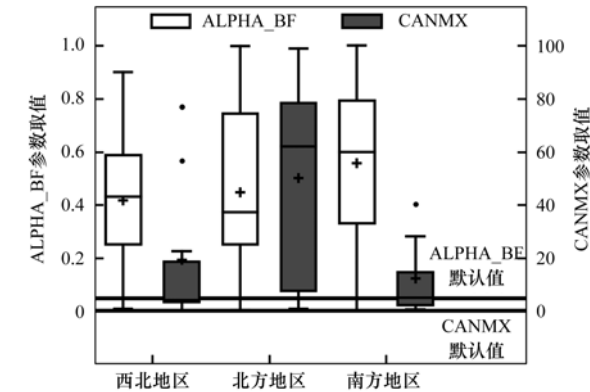


图4 参数 ALPHA_BF 和 CANMX 的默认值及其在不同地理区域的取值分布

Fig. 4 Default values of ALPHA_BF and CANMX and their statistical distributions among different regions

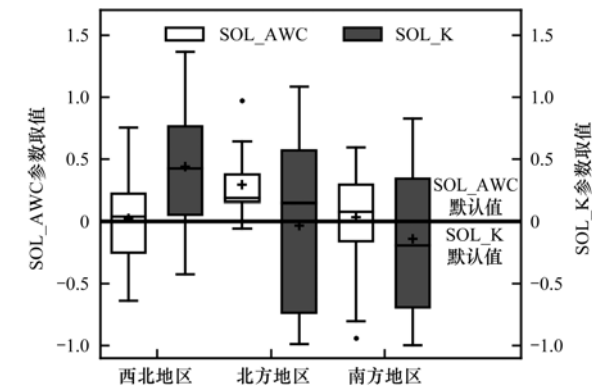


图5 参数 SOL_AWC 和 SOL_K 的默认值及其在不同地理区域的取值分布

Fig. 5 Default values of SOL_AWC and SOL_K and their statistical distributions among different regions

地区率定后的 SOL_AWC 取值也高于初始值约 30%. 在 SWAT 模型应用中, SOL_AWC 和 SOL_K 的初始值通常基于土壤数据库中的粒径数据进行计算, 而 SWAT 模型默认的粒径数据为美国标准, 与国内不同, 需进行转换^[26]. 这一转换过程可能导致用于计算的土壤粒径组成与实际情况不符, 从而造成参数初始值与率定值之间的偏差.

2.2.2 区域内参数取值分布特征分析

图 6 为不同地理区域 SWAT 模型参数取值分布的偏度和峰度计算结果, 作为比较, 标准均匀分布的偏度和峰度也列在其中. 根据图中各个参数与均匀分布的相对位置, 可将所有参数分为 3 类. 第一类参数取值分布的峰度和偏度均远大于均匀分布, 包括北方地区的 SOL_AWC、西北和南方地区的 CANMX 以及全国范围内的 CN2、SPEXP、CH_K2、GW_REVAP 和 GW_DELAY 等参数. 第二类参数的峰度远大于均匀分布, 但偏度远小于均匀分布, 仅有南方地区 SOL_AWC 一个参数. 第三类参数的峰度和偏度均接近均匀分布, 包括第一和第二类参数之外的其他参数.

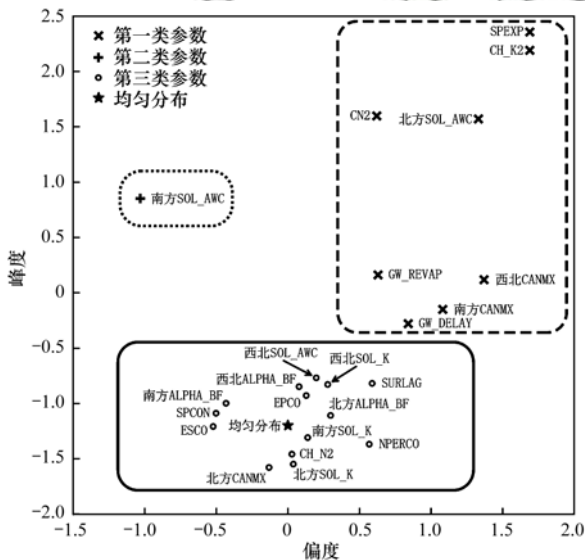
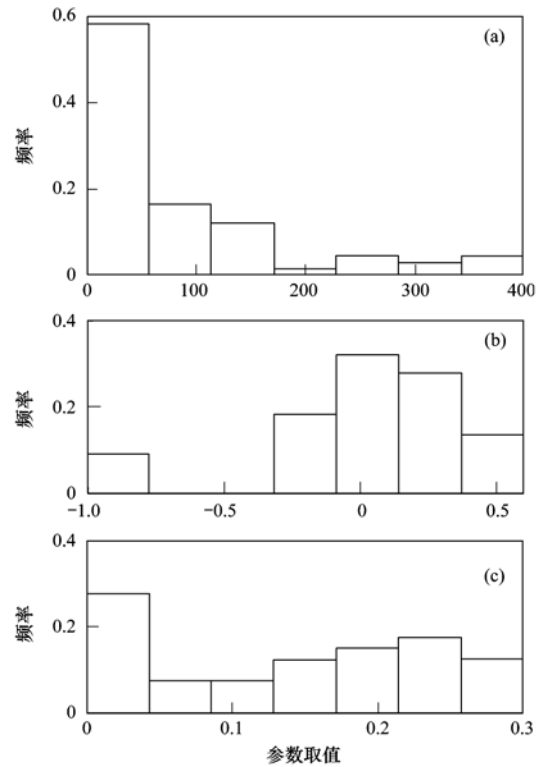


图 6 不同地理区域 SWAT 模型参数取值分布及均匀分布的偏度和峰度

Fig. 6 Skewness and kurtosis of SWAT model parameters in different regions in comparison with the uniform distribution

图 7 以上述 3 类参数中的典型参数为例, 给出了其取值分布. 从中可以看出, 第一类参数的取值分布呈现明显的正偏态, 大部分取值集中在最小值附近; 第二类参数呈现明显的负偏态, 大部分取值趋向于较大值; 第三类参数则呈现双峰或均匀分布, 没有明显的集中趋势. 由于参数取值分布存在偏态, 在以最小值和最大值构成的取值范围内, 参数在某个区间内取值的概率较低. 例如, 参数 CH_K2 的取值范围为 [1.5, 394.9], 但落在 [300, 394.9] 区间

的概率仅为 4.5%, 而这个区间相当于取值范围的 24.1%. 如果采用置信区间的概念, 在参数率定时排除这一低概率区间, 则可以在保证一定置信水平的同时大幅缩小采样空间, 提高计算效率.



(a) 第一类参数(全国 CH_K2); (b) 第二类参数(南方 SOL_AWC); (c) 第三类参数(全国 CH_N2)

图 7 SWAT 模型 3 类参数的取值分布

Fig. 7 Histograms of SWAT model parameters in three types

2.2.3 参数率定值与默认值的偏差程度

从图 4 可以看出, SWAT 模型在我国西北、北方和南方地区应用时, 率定得到的参数 ALPHA_BF 取值分布的第一四分位数均高于其默认值, 而参数 CANMX 的取值分布则明显偏离其默认值. 类似地, 如图 5 所示, 北方地区参数 SOL_AWC 和西北地区参数 SOL_K 取值分布的第一四分位数也均高于相应的默认值, 而其他地区这两个参数的取值分布则围绕其默认值, 高于默认值和低于默认值的概率相当.

图 8 所示为其它 11 个取值分布在我国不同地理区域间无显著差异的 SWAT 模型参数的取值分布及其相应的默认值. 从中可以看出, EPCO、CH_K2、CH_N2 和 SPCON 等 4 个参数的取值分布明显偏离默认值, GW_REVAP、GW_DELAY、ESCO 和 SPEXP 等 4 个参数的默认值或是低于率定值分布的第一四分位数、或是高于率定值分布的第三四分位数, SURLAG 和 NPERCO 的率定值分布也有较高的概率高于其默认值, 而 CN2 取值分布则围绕默认值近似呈对称分布.

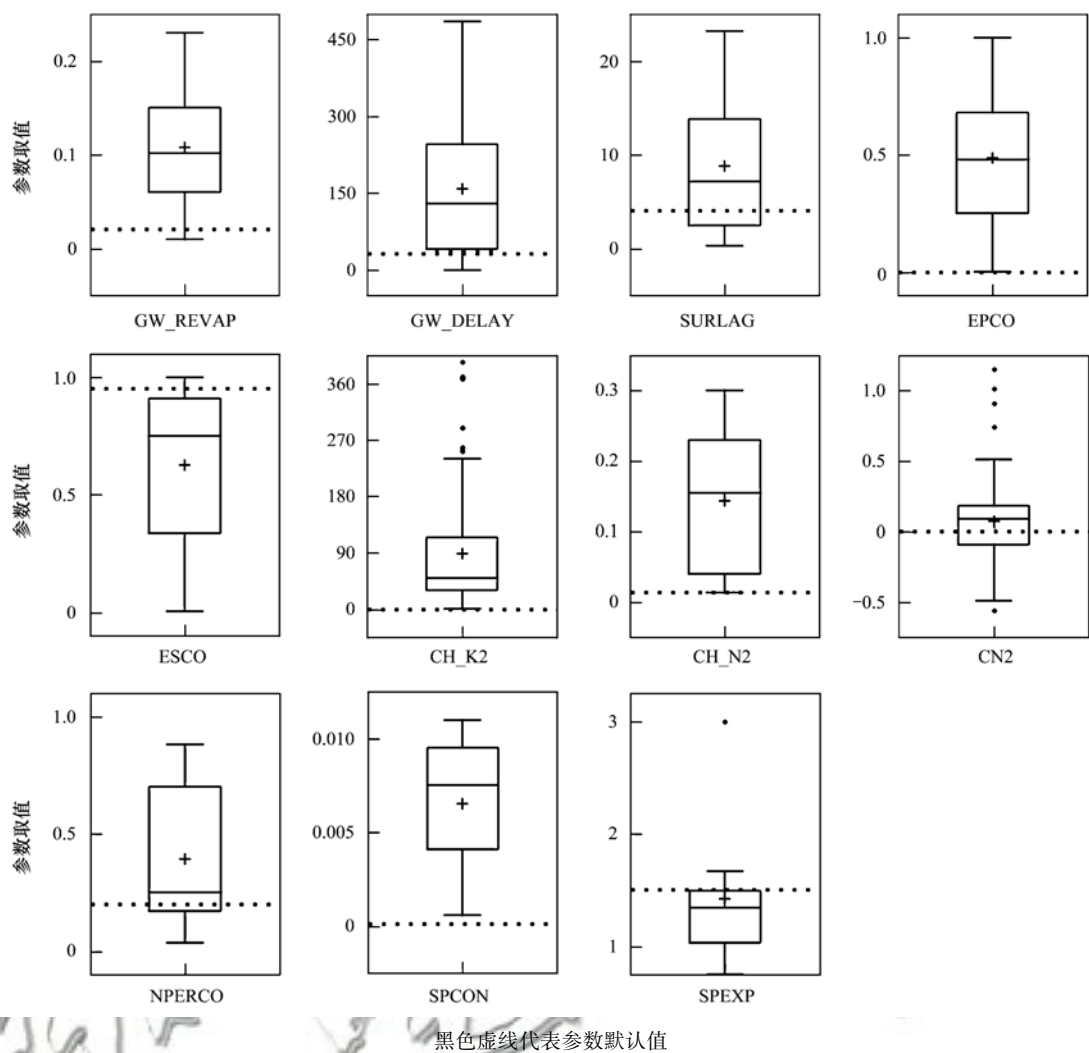


图 8 SWAT 模型其它 11 个参数的取值分布及其默认值

Fig. 8 Default values and statistical distributions of the other 11 SWAT model parameters

综上,在本研究的 15 个 SWAT 模型参数中,12 个参数在我国流域的率定值以较大概率偏离默认值,因此默认值的适用性较差.而 CN2、SOL_AWC 和 SOL_K 在我国或其部分区域的取值分布与默认值相比不存在系统性偏差,参数率定值高于或低于

默认值的概率相当.但由于这 3 个参数在我国流域多属于灵敏参数^[12],因此也不宜直接使用默认值.

3 SWAT 模型本地化应用的参数取值建议

如表 2 所示,基于上述分析,本研究针对 SWAT

表 2 SWAT 模型在中国应用的参数取值建议¹⁾

Table 2 Recommended parameter values for SWAT model application in China

参数区域	CN2 * 全国	SURLAG 全国	CANMX 西北	CANMX 北方	CANMX 南方	ESCO 全国
90% 置信区间	-0.56 ~ 0.42	0.36 ~ 21.5	0.09 ~ 68.9	0.41 ~ 96.4	0.5 ~ 29.2	0.08 ~ 0.99
75% 置信区间	-0.56 ~ 0.18	1.19 ~ 17.7	0.09 ~ 14.6	2.34 ~ 93.27	0.5 ~ 14.4	0.15 ~ 0.95
参数区域	EPCO 全国	SOL_AWC * 西北	SOL_AWC * 北方	SOL_AWC * 南方	SOL_K * 西北	SOL_K * 北方
90% 置信区间	0.02 ~ 0.91	-0.60 ~ 0.60	-0.06 ~ 0.56	-0.70 ~ 0.59	-0.43 ~ 1.19	-0.99 ~ 0.80
75% 置信区间	0.13 ~ 0.85	-0.42 ~ 0.46	-0.06 ~ 0.36	-0.22 ~ 0.59	-0.05 ~ 1.00	-0.84 ~ 0.73
参数区域	SOL_K * 南方	GW_REVAP 全国	GW_DELAY 全国	ALPHA_BF 西北	ALPHA_BF 北方	ALPHA_BF 南方
90% 置信区间	-0.99 ~ 0.80	0.01 ~ 0.20	7.95 ~ 301.4	0.01 ~ 0.85	0.03 ~ 0.92	0.03 ~ 0.99
75% 置信区间	-0.96 ~ 0.67	0.01 ~ 0.15	7.95 ~ 217.6	0.04 ~ 0.75	0.05 ~ 0.79	0.06 ~ 0.89
参数区域	CH_K2 全国	CH_N2 全国	SPEXP 全国	SPCON 全国	NPERCO 全国	
90% 置信区间	1.50 ~ 243.1	0.01 ~ 0.30	1 ~ 1.67	0.0003 ~ 0.011	0.02 ~ 0.88	
75% 置信区间	1.50 ~ 114.5	0.02 ~ 0.25	1 ~ 1.49	0.0007 ~ 0.01	0.13 ~ 0.85	

1) * 表示其参数取值均为相对调整值

模型的 15 个参数提出本地化应用的取值建议. 与文献[7]相比,本研究基于参数取值特征分别以 90% 和 75% 置信区间的形式给出参数取值范围建议,并根据三类不同的参数取值分布特点,选择不同的方法计算置信区间:第一类参数为右侧单侧置信区间,第二类参数为左侧单侧置信区间,而第三类参数为双侧置信区间. 同时,对于在不同地理区域间存在取值差异的参数,分别给出不同区域的取值范围建议.

在应用 SWAT 模型开展流域水环境模拟时,如果研究流域的数据资料较为齐全,有条件开展模型参数率定和验证,那么表 2 可为研究者提供参数先验分布取值范围的参考. 如果研究流域数据资料缺乏,特别是缺乏观测数据,本研究亦可提供模型参数初始化的取值参考. 例如,对于 CN2、研究流域位于西北和南方地区时的 SOL_AWC 等参数,其默认值在表 2 建议的取值范围内,因此其初始化取值可选用默认值;而对于 ALPHA_BF、CANMX 和 SPCON 等参数,由于其默认值偏离表 2 建议的取值范围,其初始化取值可选用研究流域所在区域取值分布的中位数等.

4 结论

(1) SWAT 模型研究质量评价结果表明,从 428 篇文献中筛选得到的 129 篇高可信度文献的得分均超过 90. 高可信度文献的 SWAT 模型应用整体上更加规范,且高可信度文献与全部文献的空间分布较为相似,具有较好的区域代表性.

(2) 考察的 15 个 SWAT 模型参数中,与地下水、土壤水和蒸散发过程相关的 4 个水文参数在我国不同地理区域的取值分布存在显著差异;7 个与地下水、土壤水、产流、蒸散发和河道过程相关的参数在我国及其部分区域的取值分布呈现明显的正偏态或负偏态;在我国流域应用时,全部 15 个参数均不宜直接使用模型默认值.

(3) 以 90% 和 75% 置信区间的形式给出了 SWAT 模型在我国本地化应用的参数取值建议,并针对不同数据条件下的模型应用提出了参数取值建议.

参考文献:

- [1] 尤丽萍, 林雪儿, 林美娇, 等. 可视化知识图谱的中国 SWAT 模型研究趋势分析[J]. 武夷学院学报, 2019, **38**(3): 33-39.
You L P, Lin X E, Lin M J, *et al.* An analysis of research trends of Chinese SWAT model based on visual knowledge map [J]. Journal of Wuyi University, 2019, **38**(3): 33-39.
- [2] Lian H S, Yen H, Huang J C, *et al.* CN-China: revised runoff curve number by using rainfall-runoff events data in China[J]. Water Research, 2020, **177**, doi: 10.1016/j.watres. 2020. 115767.
- [3] Arnold J G, Moriasi D N, Gassman P W, *et al.* SWAT: model use, calibration, and validation [J]. Transactions of the ASABE, 2012, **55**(4): 1491-1508.
- [4] Wang Q R, Liu R M, Men C, *et al.* Temporal-spatial analysis of water environmental capacity based on the couple of SWAT model and differential evolution algorithm [J]. Journal of Hydrology, 2019, **569**: 155-166.
- [5] Wang R, Yao Z J, Lei Y P. Modeling of soil available phosphorus surplus in an intensive wheat-maize rotation production area of the North China Plain [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, **269**: 22-29.
- [6] Hu J, Ma J, Nie C, *et al.* Attribution analysis of runoff change in Min-Tuo River Basin based on SWAT model simulations, China [J]. Scientific Reports, 2020, **10**(1), doi: 10.1038/s41598-020-59659-z.
- [7] 王晓朋, 乔飞, 雷坤, 等. SWAT 模型在我国的研究和应用进展[J]. 中国农村水利水电, 2015, (5): 109-113.
Wang X P, Qiao F, Lei K, *et al.* Research on and application of SWAT model in China [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015, (5): 109-113.
- [8] 高鑫. SWAT 模型径流过程参数时空差异研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2018.
Gao X. Spatial-temporal differences of hydrologic parameters in SWAT model [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2018.
- [9] 林炳青, 陈莹, 陈兴伟. SWAT 模型水文过程参数区域差异研究[J]. 自然资源学报, 2013, **28**(11): 1988-1999.
Lin B Q, Chen Y, Chen X W. A study on regional difference of hydrological parameters of SWAT model [J]. Journal of Natural Resources, 2013, **28**(11): 1988-1999.
- [10] Malagò A, Pagliero L, Bouraoui F, *et al.* Comparing calibrated parameter sets of the SWAT model for the Scandinavian and Iberian peninsulas [J]. Hydrological Sciences Journal, 2015, **60**(5): 949-967.
- [11] Dagupati P, Deb D, Srinivasan R, *et al.* Large-scale fine-resolution hydrological modeling using parameter regionalization in the Missouri River Basin [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2016, **52**(3): 648-666.
- [12] 荣易, 秦成新, 孙傅, 等. SWAT 模型在我国流域水环境模拟应用中的评估验证过程评价[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(11): 2571-2580.
Rong Y, Qin C X, Sun B, *et al.* Assessment of evaluation process of SWAT model application in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(11): 2571-2580.
- [13] 张雪松, 郝芳华, 程红光, 等. 亚流域划分对分布式水文模型模拟结果的影响[J]. 水利学报, 2004, (7): 119-123, 128.
Zhang X S, Hao F H, Cheng H G, *et al.* Influence of subdivision of watershed on distributed hydrological model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (7): 119-123, 128.
- [14] 陈肖敏, 郭平, 彭虹, 等. 子流域划分对 SWAT 模型模拟结果的影响研究[J]. 人民长江, 2016, **47**(23): 44-49.
Chen X M, Guo P, Peng H, *et al.* Influence of different sub-watershed division schemes on simulation results of SWAT model [J]. Yangtze River, 2016, **47**(23): 44-49.
- [15] 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.
- [16] Jha M, Gassman P W, Secchi S, *et al.* Effect of watershed

- subdivision on SWAT flow, sediment, and nutrient predictions [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2004, **40**(3): 811-825.
- [17] Fitzhugh T W, Mackay D S. Impacts of input parameter spatial aggregation on an agricultural nonpoint source pollution model [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, **236**(1-2): 35-53.
- [18] Yapo P O, Gupta H V, Sorooshian S. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data [J]. *Journal of Hydrology*, 1996, **181**(1-4): 23-48.
- [19] Huang Y C, Bardossy A. Impacts of data quantity and quality on model calibration: Implications for model parameterization in data-scarce catchments [J]. *Water*, 2020, **12**(9), doi: 10.3390/w12092352.
- [20] Li C Z, Wang H, Liu J, *et al.* Effect of calibration data series length on performance and optimal parameters of hydrological model [J]. *Water Science and Engineering*, 2010, **3**(4): 378-393.
- [21] Jackson E K, Roberts W, Nelsen B, *et al.* Introductory overview: error metrics for hydrologic modelling-A review of common practices and an open source library to facilitate use and adoption [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2019, **119**: 32-48.
- [22] Moriasi D N, Gitau M W, Pai N, *et al.* Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria [J]. *Transactions of the ASABE*, 2015, **58**(6): 1763-1785.
- [23] 邹志红, 孙靖南, 任广平. 模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用 [J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(4): 552-556.
- Zou Z H, Sun J N, Ren G P. Study and application on the entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, **25**(4): 552-556.
- [24] 尹军. 流域干旱还原理论与方法研究——以白洋淀流域为例 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017.
- Yin J. Research on drought reduction theory and method in basin-with Baiyangdian River basin as the case study [D]. Beijing: China Institute of Water Resources & Hydropower Research (IWHR), 2017.
- [25] 张亚娟. 流域“源—汇”景观格局对河流氮磷影响的研究 [D]. 天津: 天津师范大学, 2017.
- Zhang Y J. Effects of landscape pattern of “source-sink” on the nitrogen and phosphorus in rivers [D]. Tianjin: Tianjin Normal University, 2017.
- [26] 徐冬梅, 胡昊, 王文川, 等. SWAT 模型土壤物理属性数据库本土化构建研究 [J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2018, **39**(1): 36-41.
- Xu D M, Hu H, Wang W C, *et al.* Localization method for soil physical property database of SWAT model [J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2018, **39**(1): 36-41.

CONTENTS

Advances and Challenges in Biosafety Research for Urban Environments	SU Jian-qiang, AN Xin-li, HU An-yi, <i>et al.</i> (2565)
Key Problems and Novel Strategy of Controlling Emerging Trace Organic Contaminants During Municipal Wastewater Reclamation	WANG Wen-long, WU Qian-yuan, DU Ye, <i>et al.</i> (2573)
Mechanisms Summary and Potential Analysis of EPS as a Flame Retardant	HAO Xiao-di, ZHAO Zi-cheng, LI Ji, <i>et al.</i> (2583)
Concentrations, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} Carrier Metals in the Beijing Urban Area and Suburbs	ZHOU An-qi, LIU Jian-wei, ZHOU Xu, <i>et al.</i> (2595)
MAIAC AOD and PM _{2.5} Mass Concentrations Characteristics and Correlation Analysis in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	JIN Jian-nan, YANG Xing-chuan, YAN Xing, <i>et al.</i> (2604)
Formation and Prevention of Secondary Nitrate in PM _{2.5} in Tianjin	XIAO Zhi-mei, WU Ting, WEI Yu-ting, <i>et al.</i> (2616)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitro Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} of Nanjing, China	FU Yin-yin, WEN Hao-zhe, WANG Xiang-hua, <i>et al.</i> (2626)
Spatio-temporal Patterns and Potential Sources of Absorbing Aerosols in the Fenwei Plain	LIU Min-xia, LI Liang, YU Rui-xin, <i>et al.</i> (2634)
Sources Apportionment of Oxygenated Volatile Organic Compounds (OVOCs) in a Typical Southwestern Region in China During Summer	CHEN Mu-lan, WANG Sai-nan, CHEN Tian-shu, <i>et al.</i> (2648)
Aqueous-phase Oxidation of Dissolved Organic Matter (DOM) from Extracts of Ambient Aerosols	TAO Ye, CHEN Yan-tong, LI Nan-wang, <i>et al.</i> (2659)
Changes and Potential Sources of Atmospheric Black Carbon Concentration in Shanghai over the Past 40 Years Based on MERRA-2 Reanalysis Data	CAO Shan-shan, DUAN Yu-sen, GAO Chan-chan, <i>et al.</i> (2668)
Spatio-Temporal Evolution Characteristics and Source Apportionment of O ₃ and NO ₂ in Shijiazhuang	WANG Shuai, NIE Sai-sai, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (2679)
Applying Photochemical Indicators to Analyze Ozone Sensitivity in Handan	NIU Yuan, CHENG Shui-yuan, OU Sheng-ju, <i>et al.</i> (2691)
Spatiotemporal Distribution of Aerosol Optical Depth Based on Landsat Data in the Hinterland of the Guanzhong Basin and Its Relationship with Urbanization	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, ZHANG Xiu, <i>et al.</i> (2699)
Multidimensional Verification of Anthropogenic VOCs Emissions Inventory Through Satellite Retrievals and Ground Observations	WANG Yue, WEI Wei, REN Yun-ting, <i>et al.</i> (2713)
Estimation of the SOA Formation Potential of the National Trunk Highway in Central Plains Urban Agglomeration	WANG Na-ping, LI Hai-ping, ZHANG Fan (2721)
Economic Benefit of Air Quality Improvement During Implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Beijing	LU Ya-ling, FAN Zhao-yang, JIANG Hong-qiang, <i>et al.</i> (2730)
Emission Performance Quantitative Evaluation and Application of Industrial Air Pollution Sources	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (2740)
Screening and Sequencing High-risk Antibiotics in China's Water Environment Based on Ecological Risks	ZHOU Li, LIU Shan, GUO Jia-hua, <i>et al.</i> (2748)
China's Reuse Water Development and Utilization Potential Based on the RDA-REM Model	ZHENG Jin-tao, MA Tao, LIU Jiu-fu, <i>et al.</i> (2758)
Characteristic Analysis of SWAT Model Parameter Values Based on Assessment of Model Research Quality	RONG Yi, QIN Cheng-xin, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (2769)
Sensitivity Analysis of Boundary Load Reduction in a Large Shallow Lake Water Quality Model	WANG Ya-ning, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (2778)
Comparison of Available Nitrogen and Phosphorus Characteristics in the Land-Water Transition Zone of Different Watersheds and Their Environmental Significance	ZHU Hai, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2787)
Analysis of Spatial-Temporal Variation Characteristics of Potential Non-point Source Pollution Risks in the Upper Beiyun River Basin Using Different Weighting Methods	LI Hua-lin, ZHANG Jian-jun, ZHANG Yao-fang, <i>et al.</i> (2796)
Characteristics of Runoff-related Total Nitrogen and Phosphorus Losses Under Long-term Fertilization and Cultivation on Purple Soil Sloping Croplands	WU Xiao-yu, LI Tian-yang, HE Bing-hui (2810)
Hydrochemistry and Its Controlling Factors and Water Quality Assessment of Shallow Groundwater in the Weihe and Jinghe River Catchments	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (2817)
Characteristics and Drivers of Dissolved Carbon Dioxide and Methane Concentrations in the Nantaoxi River System in the Upper Reaches of the Taihu Lake Basin During Summer-Autumn	LIANG Jia-hui, TIAN Lin-lin, ZHOU Zhong-yu, <i>et al.</i> (2826)
Nitrogen Distribution and Inorganic Nitrogen Diffusion Flux in a Shallow Lake During the Low Temperature Period: A Case Study of the Baiyangdian Lake	WEN Yan, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang (2839)
Effects of Sediment Microenvironment on Sedimentary Phosphorus Release Under Capping	CHEN Shu-tong, LI Da-peng, XU Chu-tian, <i>et al.</i> (2848)
Coadsorption of Heavy Metal and Antibiotic onto Humic Acid from Polder River Sediment	XUE Xiang-dong, YANG Chen-hao, YU Jian-lin, <i>et al.</i> (2856)
Effects of Two PPCPs on Nitrification in Sediments in the Yarlung Zangbo River	LING Xin, XU Hui-ping, LU Guang-hua (2868)
Wastewater Treatment Effects of Ferric-carbon Micro-electrolysis and Zeolite in Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, ZHANG Yao-yu, <i>et al.</i> (2875)
CDS-BOC Nanophotocatalyst Activating Persulfate Under Visible Light for the Efficient Degradation of Typical PPCPs	LEI Qian, XU Lu, AI Wei, <i>et al.</i> (2885)
Preparation of pg-C ₃ N ₄ /BiOBr/Ag Composite and Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole	YANG Li-wei, LIU Li-jun, XIA Xun-feng, <i>et al.</i> (2896)
Sodium Alginate Loading of Zero-Valent Iron Sulfide for the Reduction of Cr(VI) in Water	WANG Xu, YANG Xin-nan, HUANG Bi-juan, <i>et al.</i> (2908)
Adsorption Mechanism of Cadmium by Superparamagnetic Nano-Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Functionalized Materials	ZHANG Li-zhi, YI Ping, FANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2917)
Pollution Characteristics and Removal of Typical Pharmaceuticals in Hospital Wastewater and Municipal Wastewater Treatment Plants	YE Pu, YOU Wen-dan, YANG Bin, <i>et al.</i> (2928)
Abundance Change of Antibiotic Resistance Genes During PDWW Recycling and Correlations with Environmental Factors	XU Yao-yao, WANG Rui, JIN Xin, <i>et al.</i> (2937)
Simultaneous Domestication of Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (2946)
Long-term Storage and Rapid Activity Recovery of ANAMMOX Granular Sludge	LI Dong, LIU Ming-yang, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (2957)
Migration and Environmental Effects of Heavy Metals in the Pyrolysis of Municipal Sludge	JIANG Yuan-yuan, WANG Yan, DUAN Wen-yan, <i>et al.</i> (2966)
Profiling of Antibiotic Resistance Genes in Different Croplands	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (2975)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Cattle Farms in Ningxia	ZHANG Jun-hua, CHEN Rui-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (2981)
Effects of Temperature and Stirring on the Changes of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Anaerobic Digestion of Dairy Manure	XU Ji-fei, ZHANG Qiu-ping, ZHU Tian-jiao, <i>et al.</i> (2992)
Effects of Wheat Straw-derived Biochar Application on Soil Carbon Content Under Different Tillage Practices	LIU Zhen-jie, LI Peng-fei, HUANG Shi-wei, <i>et al.</i> (3000)
Spatial Patterns of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Their Influencing Factors in a Typical Agro-pastoral Ecotone	ZHANG Yan-jiang, WANG Jun-peng, WANG Yu, <i>et al.</i> (3010)
Spatial Distribution Characteristics, Pollution, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals Around Mercury Mining Areas	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (3018)
Interaction and Mechanism Between Conditioning Agents and Two Elements in the Soil Enriched with Phosphorus and Cadmium	HUANG Yang, HU Xue-yu, CAO Kun-kun, <i>et al.</i> (3028)
Mechanism of S-allyl-L-cysteine Alleviating Cadmium Stress in Seedling Roots and Buds of Rice Seedlings	CHENG Liu-long, HUANG Yong-chun, WANG Chang-rong, <i>et al.</i> (3037)
Consecutive 4-year Elevated Atmospheric CO ₂ on Shaped Microbial Communities in the Rhizosphere Soil of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Seedlings Grown in Pb-contaminated Soils	JIA Xia, Lkhagvajargal Khadkhurel, ZHAO Yong-hua, <i>et al.</i> (3046)
Biodegradation of Polystyrene by <i>Geobacillus stearothermophilus</i>	XING Rui-zhi, ZHAO Zi-qiang, ZHAO Wen-qi, <i>et al.</i> (3056)
Micro-morphological Characteristics of Particles on Holly and Ligustrum Leaf Surfaces and Seasonal Changes in Bacterial Communities	LI Hui-juan, XU Ai-ling, QIAO Feng-lu, <i>et al.</i> (3063)
Effects of Roxithromycin on Reproduction, Growth, and Anti-oxidation System of <i>Daphnia magna</i>	ZHANG Ling-yu, LIU Jian-chao, LENG Yang, <i>et al.</i> (3074)
Relationship Between Relative Crop Yield/Woody Plant Biomass and Ground-level Ozone Pollution in China	FENG Zhao-zhong, PENG Jin-long (3084)