

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0089

LIU Youcun, ZOU Jieping, YIN Xiaoling, et al. Review on HSPF model in watershed hydrology and water environment research[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(1):225-232. [刘友存, 邹杰平, 尹小玲, 等. HSPF模型在流域水文与水环境研究中的进展[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1):225-232.]

# HSPF模型在流域水文与水环境研究中的进展

刘友存<sup>1</sup>, 邹杰平<sup>1</sup>, 尹小玲<sup>2</sup>, 孟丽红<sup>3</sup>, 陈 明<sup>1</sup>,  
曾金凤<sup>4,5</sup>, 乔丽潘古丽·吐尔洪<sup>1</sup>

(1. 江西理工大学 资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000; 2. 广东省科学院 广州地理研究所, 广东 广州 510070; 3. 赣南师范大学 地理与环境工程学院, 江西 赣州 341000; 4. 江西理工大学 建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000; 5. 江西省赣州市水文局, 江西 赣州 341000)

**摘 要:** HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran)模型是在Stanford水文模型的基础上发展起来的。作为半分布式水文水质模型的优秀代表, HSPF模型能够综合模拟河道水力、流域径流、土壤流失、污染物迁移等过程, 从而被广泛应用于流域水文与水环境研究中。通过概述HSPF模型研发与整合的发展历程, 以及模型中PERLND、IMPLND与RCHRES等3个主要模块结构, 且综述了模型在土地利用变化、水文过程、非点源污染模拟以及模型参数校验等方面的研究进展。研究表明: HSPF模型对于经验公式和假设估计仍然存在改进与完善的空间; 对参数的深入分析研究参有助于降低模拟结果的不确定性; HSPF模型对采集数据精度和规范性的要求也较高。最后, 从经验公式完善、参数不确定性探讨和模拟精度提高等方面对模型的完善提出相关建议, 供相关研究提供参考。

**关键词:** HSPF模型; 模拟应用; 水文; 非点源污染

**中图分类号:** P334<sup>+</sup>.92    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1000-0240(2021)01-0225-08

## 0 引言

近年来, 随着社会经济的快速发展、气候变化及土地利用方式的改变, 导致了水污染主要方式由点源向非点源污染转换。而非点源污染具有隐蔽性、随机性、分散性、难以监测和不易量化处理等特点, 同时, 它和流域径流、土壤流失、物质迁移等水文过程紧密相连, 因此研究难度极大。所以通过构建数学模型, 对其进行长时间和大空间序列的模拟是解决该问题的一种有效方式<sup>[1-2]</sup>。随着地理信息系统(GIS)、遥感(RS)影像摄影和雷达检测等空间数据获取技术的成熟和现代计算机处理数据能力的提升, 水文模型和水质模型得到了极大地发展和广泛的应用<sup>[3]</sup>。代表性的模型如表1所示<sup>[4-7]</sup>, 从表1中可知, 各个模型具有自己的优势, 并在相

关领域中得到了广泛的应用和较大的改进。作为近年来兴起的水文水质模型, 一方面, HSPF模型集合了分布式与集中式水文模型的优点, 提高了流域水文模拟的准确性; 另一方面, 相对于现在发达的信息交流而言, 模型本身存在参数无法运用于国内的不足之处已然解决。然而, 由于模型早期的参数和设置均基于欧美标准, 加之由于国内监测设备相对落后、水文数据不完整以及数据共享度低等原因的限制, 该模型在国外得到了广泛地运用, 而国内仅在密云水库、云南滇池和东江流域等少数地区研究中有应用, 所以针对该模型本土化参数的修订和应用研究亟需开展<sup>[8]</sup>。

作为水资源与水环境演化过程模拟的重要工具之一, HSPF模型是美国环保署(EPA)为了更好地进行环境灾害预测, 基于SWM (Stanford Water-

收稿日期: 2020-06-27; 修订日期: 2020-07-30

基金项目: 江西省自然科学基金资助项目(20202BABL203031; 20181BAB203026); 广东省自然科学基金面上项目(2020A1515011068); 国家自然科学基金项目(41861002); 江西省“双千计划”创新人才项目(JXSQ2018106054); 赣州市科技计划创新人才项目(赣市科发2019[60]号)资助

作者简介: 刘友存, 副教授, 主要从事水资源与水环境研究. E-mail: liuyoucun@126.com

表1 我国常用的面源污染模型对比

Table 1 Comparison of non-point source pollution models commonly used in China

模型名称	参数形式	空间尺度	时间尺度	模型组块	优势	不足
CREAMS	集中, 分布	农田等小区域	长期连续	水文、侵蚀和污染物	在预测降雨事件中的降雨的模拟效果较好	不能应用于大型流域的非点源污染, 难以提供过程信息
SWMM	分布	流域	长期连续	降雨径流和水质	可以模拟城市降水事件和水质, 且能详细模拟水流在地表和管道中运动	运用单一, 模拟区域相对较小
VIC	分布	流域	长期连续	陆面过程和汇流	能够同时进行陆-气间能量平衡以及水量平衡的模拟	产流过程模拟较差, 水文参数率定难度大
MIKE SHE	分布	流域	长期连续	坡面流、河流和湖泊、不饱和带/包气带、蒸散发、饱和带、融雪	不依赖于长期监测的实测数据, 完整耦合地表水与地下水	需要率定大量水力参数, 水文过程仅基于物理计算, 模型参数与模拟结果是非线性关系
SWAT	集中, 分布	流域	长期连续	水文、面源污染负荷、河道污染物、湖泊水体水质	增加了径流和沉积物汇流过程, 结合 GIS 开发水土保持模块, 操作简便	无法用于单个洪水事件, 需根据运用的区域修改数据库, 修改难度大
HSPF	集中, 分布	流域	长期连续	透水地段和不透水地段、河流水库、水文水质	可模拟详细的径流形成过程, 擅长连续时间步长, 拥有 BASINS 操作平台, 使用方便	关于空间描述有待完善, 部分参数无法应用于信息缺乏地区

shed Model)模型的基础上结合 ArcView 自身强大的空间数据处理能力和贮存能力搭建而成的。HSPF 模型具有自动提取模拟地区的地势地貌、土地利用方式和土地植被覆盖等空间数据, 并进行非点源污染负荷在长时间序列上的连续模拟的功能<sup>[9]</sup>。该模型是一种适用于较大流域范围、且具有很高的模拟精度的分布式综合水文模型。模型研发至今, 不仅组合了早期的 HSP (Hydrologic Simulation Program)、ARM (Agricultural Runoff Management) 和 NPS (Nonpoint Source) 等模块, 而且将常见的各种污染物模块整合到了其中, 包括总氮、总磷、大肠杆菌群和水体叶绿素含量的模拟等。因此, 它是一种能够进行地面河流、壤中流过程、累积、迁移和转化的综合性的模拟方法<sup>[10]</sup>。本文旨在介绍 HSPF 模型研发与整合的发展历程, 以及模型中 PERLND、IMPLND 与 RCHRES 等 3 个主要模块结构, 同时对该模型在不同空间利用、水文变化、非点源污染迁移转化和参数改变等方面的模拟研究进展进行综述, 并对该模型本土化的模拟应用研究进行展望。

1 HSPF 模型的发展和模块结构

1.1 HSPF 模型的发展

20 世纪 70 年代末, 美国环保署发现运用模型模拟的方法在解决复杂的水资源问题中具有很大的价值, 因此, 他们在 SWM 模型的基础上研发一个较为复杂的 FORTRAN 程序, 其包含了 HSP

(1977)、ARM (1978) 和 NPS (1979) 三种模型的功能, 之后扩展形成 HSPF 模型。20 世纪 80 年代到 90 年代, 美国地质调查局 (USGS) 的产品 ANNIE, WDM 和 HSPEXP 极大地推动和简化了流域模型的应用。之后在经过不断地发展完善, 模型已经可以提供多种沉积化学作用模式, 并结合水动力方程实现沉积物以及多种污染物的地表径流、壤中流过程及其迁移、转化的综合模拟<sup>[11]</sup>。总之, 目前模型已经发展到了功能比较齐全、模拟效果准确的阶段。HSPF 模型的主要发展历程如表 2 所示。

1.2 HSPF 模型的模块结构

HSPF 模型是一种兼具有分布式与集中式水文模型的综合式水文模型。相比 SWAT 模型将模拟过程分为陆面产流阶段和汇流阶段两方面来说<sup>[12]</sup>, HSPF 模型是将水文水质模拟划分为 3 个模块: ①透水地面水文水质过程模拟 (PERLND), 主要运用在流域内以地表径流、壤中流和地下渗流等三种流动方式进行水沙、污染物和有机质的迁移转化过程的模拟; ②不透水地面水文水质过程模拟 (IMPLND), 主要运用在很少或者几乎不发生渗透的界面上, 与前一模块的不同在于不依赖于水沙的积累和迁移过程, 可对城市中固体颗粒的堆积和搬运过程进行模拟; ③河流水库水文水质模拟 (RCHRES), 适用于单一开放式河流河段, 封闭式渠系或者湖泊, 水库等水体的模拟<sup>[13]</sup>。由于模型系统比较复杂, 规模相对较大, 所以在上述三大模块下又附属了很多子模块 (图 1), 在一系列模块的整

表2 HSPF模型的发展历程

Table 2 Evolution of HSPF

年份	版本	改进
1980年	5, 6	首次官方发布, 优化性能
1981年	7	增强子模块
1984年	8	模拟精度增强, 提出PC版
1988年	9	PC版分类, 在BASINS平台上搭建模型
1993年	10, BASINS1.0	沉积物-营养物的交互
1994年	11, BASINS2.0	增补水校准, 大气的沉积作用, 以及森林氮气模块
1995年至今	BASINS3.0~4.5	推出视窗交互式版本; 增加决策支持分析工具 Gen Scn (Generation and Analysis of Model Simulation Scenarios)可进行多种情景模拟; 增加了微生物模拟模块等, 并且仍在不断更新

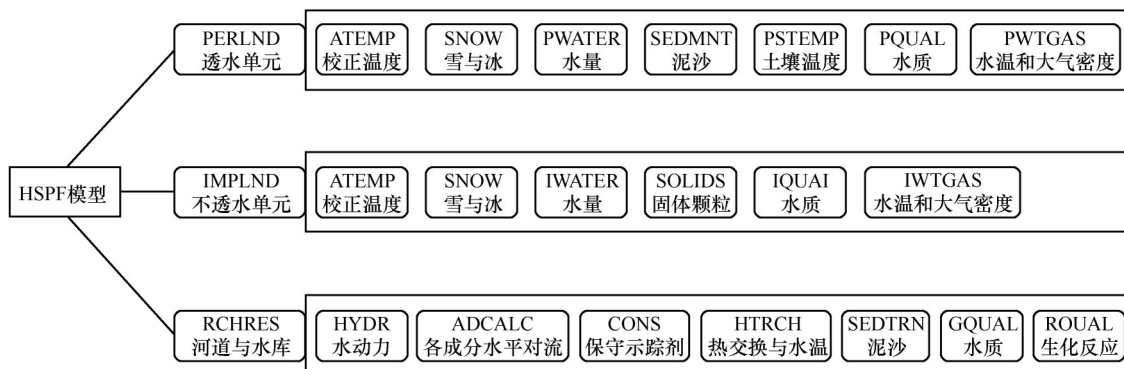


图1 HSPF模型结构与功能

Fig. 1 Structure and function chart of HSPF

合下实现了对径流、泥沙和水温, 以及生化需氧量、溶解氧、氮和磷等污染物的负荷与迁移转化的连续模拟。

## 2 HSPF模型的应用研究进展

HSPF模型自开发到今天, 已经在多个国家和地区被广泛的应用。而且随着模型的完善和发展, 所取得的成果愈来愈好, 并逐渐得到广大学者的认可。该模型模拟的主要内容有流域径流、输沙和营养物质的迁移转化等。本节主要从以下4个主要方面对模型的研究进展进行综述。

### 2.1 HSPF模型在不同土地利用空间条件下的模拟

针对模型在不同空间条件下的应用研究, 国内外研究的主要侧重点在于土地利用方式及覆被等方面的研究。对于非水质方面, Chen<sup>[14]</sup>运用HSPF模型分析不同土地利用方案对中国东部西苕溪盆地降水径流的影响时发现, HSPF模型可以很好地再现实测的日流量和季节流量, 但是不能准确地重现极端条件下的径流, 且参数的不确定性对径流的影响随时间尺度变化而变化。吴慧凤等<sup>[15]</sup>用

HSPF模型模拟了不同土地利用方式(园地、耕地和林地)对流域输沙的影响时表现出了较高的模拟精度, 其中园地和耕地会导致输沙量上升, 而林地则降低, 但降低幅度很有限。Kuntoro等<sup>[16]</sup>运用HSPF模型模拟分析了土地利用变化对万隆的西瓜哇Cikapundung流域流量的影响, 指出森林面积减少时流量变化幅度会增大, 也就是说土地利用发生变化会对流域径流产生影响。Choi等<sup>[17]</sup>在威斯康辛州东南部的Milwaukee河流域采用HSPF模型进行土地利用变化对气候变化的影响研究, 结果表明土地利用变化对气候变化所产生影响非常小, 几乎可以忽略不计。Alarcon等<sup>[18]</sup>运用HSPF模型对基于土地利用变化的Quilmo河流域(智利南部)水文响应进行了评估, 指出草原和原生森林的水文响应效果明显不同, 但二者相结合可以得到水文响应的动态平衡点, 此后出现的洪峰曲线比较平缓。Liu等<sup>[19]</sup>运用HSPF模型在美国俄亥俄州的上游小迈阿密河流域模拟土地变化的水文影响时发现HSPF模型对来自土地利用变化的非点源污染模拟非常有效, 得出在宽度为60 m、90 m和120 m的河岸林带和湿地缓冲区可使年平均流量减少0.26%~0.28%, 硝酸



盐和亚硝酸盐增加 2.9%~6.1%，总磷降低 3.2%~7.8%；此外，Ouyang 等<sup>[20]</sup>在密西西比州下亚祖河流域应用 HSPF 模型进行了 10 年的模型模拟，发现林地不会减少从地表进入地下水的补给。总之，HSPF 模型从不但能模拟单一土地利用变化情景，也能模拟复杂土地利用等多种变化情景及其组合，能解决更加综合的水文问题。

除了水体本身，水体污染更多来自于与土地空间利用方式紧密相关的人类活动。众多研究表明，流域土地利用方式的变化和水质有着直接或者间接的联系，且不同空间尺度的土地利用变化是水质响应的重要驱动力<sup>[21]</sup>。在这个方面，刘永锋<sup>[22]</sup>运用 HSPF 模型估算了流溪河流域 6 种不同土地利用方式对非点源污染的贡献率，并分析了该流域非点源污染负荷在时间和空间分布上的规律及其对不同时期土地利用方式的响应。Akter 等<sup>[23]</sup>基于不同土地利用对河流水质的影响，发现 HSPF 模型在径流的水质模拟方面具有很好的效果，并应用 HSPF 模型对泰国 Mun 河流域进行评价的结果表明农业用地和总氮具有良好的线性相关性。Cothren<sup>[24]</sup>开展了基于土地利用变化的 HSPF 模型的水质模拟研究，通过 GIS 转换集成发现潜在着土地利用变化对水质有着重要的影响。综上，可以发现 HSPF 模型在分析不同土地利用类型对流域水质的影响的研究逐渐受到了国内外科技工作者的重视，并取得了较好的研究成果。

## 2.2 HSPF 模型在水文方面的研究模拟

近年来，国内外学者从降雨径流等方面运用 HSPF 模型对水文过程进行了研究模拟。在降雨方面，刘婕<sup>[25]</sup>在乌伦古湖流域运用 HSPF 模型对长时期内降水对径流的影响进行模拟分析，发现平均降水值和降水变差系数均对径流存在较大的影响，而降水强度也是流域径流发生变化的重要因素；Solakian 等<sup>[26]</sup>在 HSPF 模型中，引用了基于卫星的降水产品来估算水质指标的潜力，发现卫星降水产品中观测到的时空变化对径流和水质指标均有可量化的影响。而在径流和水分补给方面，Yazdi 等<sup>[27]</sup>运用 HSPF 模型模拟了城市流域径流，发现 HSPF 模型能较好地模拟径流过程，但对于平均径流模拟结果较好，而洪峰流量略差；Stern 等<sup>[28]</sup>对北加利福尼亚的萨克拉门托河流域进行径流分析时发现，HSPF 模型模拟精度高，可以很好弥补数据缺失的问题并为水资源评价提供支撑；蒋昌波等<sup>[29]</sup>以洸水

流域中上游为研究区域，运用 HSPF 模型分析了该流域径流在 2000—2015 年对不透水面扩张的响应过程，发现不透水面的变化对汛期径流过程影响较大；Fonseca<sup>[30-31]</sup>首先用 HSPF 模型模拟了葡萄牙北部 Corgo 河流域的径流过程，经过 5 个水文站的实测数据进行了验证，发现模拟效果很好。以上研究表明，HSPF 模型在水文过程尤其是径流过程方面已经取得了研究成果，并得到了广泛的应用，但是极端水文尤其是洪峰流量的模拟方面还有较大的提升空间。

## 2.3 HSPF 模型对非点源污染物的迁移转化模拟

非点源污染物的负荷和迁移是水环境污染模拟研究的重要方面，其主要研究对象是 N 和 P，以及新兴的生物指标评价<sup>[32]</sup>，而 HSPF 模型整合了分布式与集中式水文模型的长处，使其能够更好地分析并模拟非点源污染过程。目前，HSPF 模型作为美国环保署在水文水质研究中的推选模型，在流域非点源污染中的功效愈发凸显。Jeon 等<sup>[33]</sup>运用 HSPF 模型对一个含有 30% 水稻田的区域进行污染物负荷的模拟，发现该区域的总氮 (TN) 和总磷 (TP) 的模拟值和实测值非常接近；Mishra 等<sup>[34]</sup>运用 HSPF 模型对印度一典型土地用类型 (土地农业、灌木丛、森林、岩石和草地) 小流域的径流过程进行了模拟，发现在季节性情况下 HSPF 模型模拟的径流产沙量和 N、P、S 污染物均与实测值高度吻合；Patil 等<sup>[35]</sup>应用 HSPF 模型在时间尺度上对美国路易斯安那州的安岩河的硝酸盐氮负荷进行了估算，发现硝态氮负荷随时间 (日、周、双周、月) 的增加而降低；Xie 等<sup>[36]</sup>应用 HSPF 模型构建了基于降雨-径流事件的模型，通过引入变量，然后使用经验证的模型来模拟流动、悬浮沉积物、总磷 (TP) 和总氮 (TN) 在 100 个不同事件类型的降雨-径流事件中的变化效果非常好。Topalova 等<sup>[37]</sup>运用 HSPF 模型对保加利亚西部 Beli Iskar 水库到 Iskar 水库的一段河流进行有机质的迁移转化模拟，并用数学依赖、生物算法和指示性的相关性去分析。近十年来，HSPF 模型的应用在国内也逐步得到了广泛的重视，张恒等<sup>[38]</sup>结合回归方程使用 HSPF 模型在广东省东江流域对非点源的污染负荷进行计算模拟，发现模型很好地重现了悬浮泥沙、SS、COD<sub>Cr</sub>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和总磷等污染要素在 2010 年内的通量及时间序列变化；白晓燕等<sup>[39]</sup>采用 HSPF 模型模拟了东江流域的非点源污染负荷的时空特征，并系统地分析了 2007—

2009 年各个非点源污染负荷及其降水变化的响应, 总之, HSPF 模型在模拟非点源污染尤其是 N、P、S 等污染物过程时效果较好, 但由于降水资料的差异和模型参数的设定, 精度还有待于进一步提高。

除上述外, 模型在流域生物学指标评价方面受到极大关注。Lee 等<sup>[40]</sup>对 HSPF 模型中浮游植物的生长温度公式进行了自动标定和修正, 并提出一种改进的赤潮预测方法, 有助于对藻类水华爆发进行早期预警。Rolle 等<sup>[41]</sup>应用 HSPF 模型在沿海水域中进行的粪便大肠菌迁移模拟, 指出粪便大肠菌群污染源主要来自森林地区, 而不是来自有牲畜和养殖的地区。因此, HSPF 模型在流域生物学指标评价方面的模拟研究还处于探索阶段, 尤其是菌类微生物的迁移过程及影响因素等, 仍需要有更深入的研究, 而对模型进行二次开发或改进是必然趋势。

#### 2.4 HSPF 模型参数的不确定性研究

同大多数模型一样, HSPF 模型也存在由于自身参数的不确定性而影响精度的问题。因此, HSPF 模型参数的选取和率定也逐渐受到了学界的广泛重视。在 PEST(Politics Economy Society Technology)自动校准方法方面, 杨博等<sup>[42]</sup>在 PEST 自动校准方法基础上, 以晋江山美水库流域为例, 对 HSPF 模型的径流模拟进行了优化, 发现多个目标的率定可以更好地获取径流的变化趋势和精度; 李金城等<sup>[43]</sup>以中河流域为例, 运用 PEST 自动校准方法并基于子流域划分的数量对流量的模拟精度影响进行判断, 发现子流域的划分对 HSPF 模型模拟效果的影响十分显著, 但是存在阈值效应, 当超出阈值时, 径流模拟精度都会受到很大影响, 其中子流域划分数量为 10~20 之间的时候, 对模拟结果的精确度影响最大; Zhang 等<sup>[44]</sup>应用 HSPF 模型基于参数估计(PEST)方法对辽宁省太子江流域的径流进行了模拟, 发现 HSPF 模型具有较好的适用性。总之, PEST 自动校准方法可以对 HSPF 模型的模拟进行优化, 使其具有更好的本土适用性。

而在另一方面, 刘兴坡等<sup>[45]</sup>应用回应面优化法进行 HSPF 模型的参数寻优和可靠性分析, 结果表明回应面优化方法在优化效果和效率等方面比 PEST 参数自动校准方法为好, 而且参数的交互作用对于模拟结果的影响是比较明显的; 薛联青等<sup>[46]</sup>应用 HSPF 模型对塔里木河流域日径流量进行模拟, 并选用纳什效率系数(NSE)、可决系数( $R^2$ )和均方根误差( $\sigma$ )对模拟结果进行率定, 发现率定期

和验证期地表水模拟纳什系数都大于 0.7, 不仅对长期连续径流模拟效果比较好, 而且地下水位模拟随补给量变化与实测值基本一致; 刘洁等<sup>[47]</sup>在东江流域应用 HSPF 模型对径流与非点源污染进行了模拟, 并在这个基础上对东江流域非点源污染的时空分布进行分析, 发现只有当满足径流模拟的相对误差在 10% 以内, 纳什效率系数大于 0.8, 泥沙和非点源污染的氨氮与总磷模拟的相对误差在 15% 以内, 进一步发现纳什效率系数大于 0.6 时才能说明模型模拟的东江流域径流与非点源污染长期变化过程与时空分布特征是准确的。而在国外, Kim<sup>[48]</sup>使用 HSPF 模型模拟干旱条件下围堰施工前后水质的变化, 发现在非干旱条件下模型参数化中隐含的平稳性假设在干旱条件下是无效的, 由此可知模型在模拟干旱对水质生化过程的影响时性能降低; Ahmadisharaf 等<sup>[49]</sup>通过 HSPF 模型进行不确定性分析, 并模拟了细菌浓度变化, 发现在污染物减少的极端情况下, 具有非常高可靠性的 OLS 是无法提供可以满足与细菌 TMDL 相关的水质标准, 并用于评估替代污染物减少的方案。总之, 参数的优化对于模型模拟结果精度的提高具有很大的意义, 所以模型的本土化参数的修订和应用研究是目前亟需解决的问题。

### 3 结论与展望

相对于国外而言, 由于受国内早期数据共享程度较低和获取不便等因素影响<sup>[50]</sup>, 致使 HSPF 模型在国内流域水环境方面的研究发展相对缓慢。近年来, 随着国内实测数据的不断积累和数据共享平台的建立和开放, 流域水环境(水文水质)的模拟研究不再受到数据来源的限制, 故使得 HSPF 模型在国内的应用研究也将更加广泛。然而, 就目前国内外对流域水环境(水文水质)模拟研究的现状和背景看来, HSPF 模型若要想取得广泛的应用和更大的进展, 还需要从以下的几方面加强:

(1) 模型的模拟研究主要是依赖于以往的经验公式和诸多的假设估计来进行分析研究。但是, 很多经验公式和假设估计对于不同地区可能存在着不可估计的差异。因此, 对于经验公式和假设估计仍然存在改进与完善的空间。

(2) 模型所用参数的随机性和敏感性也给模拟结果带来了不确定性因素。因此, 所用参数的深入分析研究对模型的应用具有重要意义。



(3) HSPF模型对采集数据精度的要求非常高,但国内对于采集数据精度的要求偏低,导致模拟结果存在一定程度的偏差。因此要在提高采集数据精度上狠下功夫,并制定相应的采集数据规范。

综上所述,国内流域水环境(水文水质)研究的历程是漫长的,急需从零散式的研究转向大数据的统计和模拟,将HSPF模型的理论研究更多地应用于实践,并要加强HSPF模型在国内的适用性分析研究,使得HSPF模型在国内流域水环境(水文水质)等研究中发挥更大作用。鉴于HSPF模型在国内已取得的诸多研究成果,相信HSPF模型在今后不断改进中,会更加完善并得到广泛应用。

**致谢:**感谢中科院西北生态环境资源研究院焦克勤研究员在论文的撰写过程中提出的宝贵意见,并从逻辑和语言上对论文进行了仔细的推敲和认真的修改。

#### 参考文献(References):

- [1] Wu Xianfeng, Liu changming. Progress in watershed hydrological models[J]. Progress in Geography, 2002, 21(4): 341-348. [吴险峰, 刘昌明. 流域水文模型研究的若干进展[J]. 地理科学进展, 2002, 21(4): 341-348.]
- [2] Xiang Xiao, Zhong Linying, Wang Luhai. Review of non-point source pollution models[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science), 2013, 31(2): 53-60. [向霄, 钟玲盈, 王鲁梅. 非点源污染模型研究进展[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2013, 31(2): 53-60.]
- [3] Yang Yifan. Simulation of non-point source pollution of river sinuosity in Yixing based on HSPF model[D]. Xi'an: Journal of Xi'an University, 2015. [杨一帆. 基于HSPF模型的宜兴平原河网地区非点源污染模拟相关研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015]
- [4] Liu Siwen, Liu Hailong, Wang Ling. Development and application of MIKE SHE model[J]. Journal of China Hydrology, 2018, 38(5): 23-28. [刘斯文, 刘海隆, 王玲. MIKE SHE模型的发展与应用研究[J]. 水文, 2018, 38(5): 23-28.]
- [5] Long Yinping, Zhang Yaonan, Zhao Guohui, et al. The uncertainty in meteorological and hydrological processes modeled by using SWAT Model: a case study in the Buhachu River basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(3): 660-667. [龙银平, 张耀南, 赵国辉, 等. SWAT模型水文过程模拟的数据不确定性分析——以青海湖布哈河流域为例[J]. 冰川冻土, 2012, 34(3): 660-667.]
- [6] He Siwei, Nan Zhuotong, Zhang Ling, et al. Spatial-temporal distribution of water and energy fluxes in the upper reaches of the Heihe River simulated with VIC model[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1): 211-225. [何思为, 南卓铜, 张凌, 等. 用VIC模型模拟黑河上游流域水分和能量通量的时空分布[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 211-225.]
- [7] Wu Peilin, Yu Fangqin, Wang Ting, et al. Waterlogging risk assessment based on SWMM in Zhangjiagang City[J]. Journal of China Hydrology, 2020, 40(2): 31-37. [吴沛霖, 俞芳琴, 王婷等. 基于SWMM的张家港市排水防涝风险评估[J]. 水文, 2020, 40(2): 31-37.]
- [8] Chen Xinneng. Uncertainty analysis method of hydrological data based on HSPF model[J]. Shandong Industrial Technology, 2018, 35(9): 200-201. [陈心能. 基于HSPF模型水文数据不确定性分析方法[J]. 山东工业技术, 2018, 35(9): 200-201.]
- [9] Xue Yifeng, Wang Xiaoyan. HSPF model and the application in the study of non-point source pollution[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2009, 30(3): 61-65. [薛亦峰, 王晓燕. HSPF模型及其在非点源污染研究中的应用[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2009, 30(3): 61-65.]
- [10] Dong Yanjun, Deng Jiaquan, Li Jie, et al. Distributed hydrological model for Dongjiang watershed based on HSPF model[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(9): 57-63. [董延军, 邓家泉, 李杰等. 基于HSPF的东江分布式水文模型构建[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(9): 57-63.]
- [11] Han Li, Liu Sufang, Huang Minsheng. Review of simulation research in hydrology and water quality based on HSPF model[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2015, 53(2): 40-47. [韩莉, 刘素芳, 黄民生. 基于HSPF模型的流域水文水质模拟研究进展[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2015, 53(2): 40-47.]
- [12] Gao Hongkai, Zhao Fang. A review of global hydrological models: the opportunities, challenges and outlook[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1): 224-233. [高红凯, 赵舫. 全球尺度水文模型: 机遇、挑战与展望[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 224-233.]
- [13] 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. [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.]
- [14] Chen Y. Uncertainty in simulation of land-use change impacts on catchment runoff with multi-timescales based on the comparison of the HSPF and SWAT models[J]. Journal of Hydrology, 2019, 573: 486-500.
- [15] Wu Huifeng, Chen Ying. Sediment discharge response to land-use change in Xixi Basin of Jinjiang River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4): 48-53. [吴慧凤, 陈莹. 晋江西流域土地利用变化的输沙回应[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4): 48-53.]
- [16] Kuntoro A A, Putro A W, Kusuma M S B, et al. The effect of land use change to maximum and minimum discharge in Cikapundung River Basin[C]//AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2017, 1903(1): 100011.
- [17] Choi W, Pan F, Wu C. Impacts of climate change and urban growth on the streamflow of the Milwaukee River (Wisconsin, USA)[J]. Regional Environmental Change, 2017, 17(3): 889-899.
- [18] Alarcon V J, Alcayaga H. Simulation of hydrograph response to land use scenarios for a southern Chile watershed[C]//International Conference on Computational Science and Its Applications. Springer, Cham, 2017, 23(3): 613-625.
- [19] 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, 2015, 17(1): 15-24.
- [20] Ouyang Y, Jin W, Grace J M, et al. Estimating impact of forest land on groundwater recharge in a humid subtropical watershed of the Lower Mississippi River Alluvial Valley[J]. Jour-

- nal of Hydrology: Regional Studies, 2019, 26: 100631.
- [21] Liu Yan, Liu Youcun, Jiao Keqin, et al. Advances on water resources research in upper reaches of the Urumqi River since 1990 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(4): 958-967. [刘燕, 刘友存, 焦克勤, 等. 1990年以来天山乌鲁木齐河上游水资源研究进展[J]. 冰川冻土, 2019, 41(4): 958-967.]
- [22] Liu Yongfeng. Assessment of non-point source pollution in Liuxi River watershed [J]. Journal of Langfang Normal University (Natural Science Edition), 2012, 12(3): 54-55. [刘永锋. 流溪河流域非点源污染负荷变化分析[J]. 廊坊师范学院学报(自然科学版), 2012, 12(3): 54-55.]
- [23] Akter A, Babel M S. Hydrological modeling of the Mun River basin in Thailand [J]. Journal of Hydrology, 2012, 452: 232-246.
- [24] Cothren GM. GIS water quality simulation study: Chinchuba Watershed [J]. Journal of Geographic Information System, 2019, 11(3): 405-406.
- [25] Liu Jie. Simulation analysis of the effect of runoff on precipitation in Wulungu Lake basin [J]. Shaanxi Water Resources, 2019, 53(2): 45-47. [刘婕. 乌伦古湖流域径流对降水影响的模拟分析[J]. 陕西水利, 2019, 53(2): 45-47]
- [26] Solakian J, Maggioni V, Lodhi A, et al. Investigating the use of satellite-based precipitation products for monitoring water quality in the Occoquan Watershed [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2019, 26: 100630.
- [27] Yazdi M N, Ketabchy M, Sample D J, et al. An evaluation of HSPF and SWMM for simulating streamflow regimes in an urban watershed [J]. Environmental Modelling & Software, 2019, 118(3): 211-225.
- [28] Stern M, Flint L, Minear J, et al. Characterizing changes in streamflow and sediment supply in the Sacramento River Basin, California, using hydrological simulation program: FORTRAN (HSPF) [J]. Water, 2016, 8(10): 432.
- [29] Jiang Cangbo, Zhong Liang, Long Yuannan. Response of runoff to impervious surface expansion in the upper and middle reach of the Weishui River basin [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(5): 32-39. [蒋昌波, 钟量, 隆院男. 汾水流域中上游径流对不透水面扩张的响应[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5): 32-39.]
- [30] Fonseca A R, Santos J A. A new very high-resolution climatological dataset in Portugal: application to hydrological modeling in a mountainous watershed [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2019, 109: 2-8.
- [31] Fonseca A R, Santos J A. Predicting hydrologic flows under climate change: the Tâmega basin as an analog for the Mediterranean region [J]. Science of The Total Environment, 2019, 668: 1013-1024.
- [32] Xu Yanying, Liu Youcun, Zhang Jun, et al. Spatial distribution and risk assessment of nitrogen and heavy metals in typical watershed of the up [J]. Earth and Environment, 2020, 48(5): 574-583. [许燕颖, 刘友存, 张军等. 赣江上游典型流域水体三氮及重金属空间分布特征与风险评价[J]. 地球与环境, 2020, 48(5): 574-583.]
- [33] Jeon J H, Yoon C G, Donigian J A S, et al. Development of the HSPF-Paddy model to estimate watershed pollutant loads in paddy farming regions [J]. Agricultural Water Management, 2007, 90(1/2): 75-86.
- [34] Mishra A, Kar S, Raghuwanshi N S. Modeling nonpoint source pollutant losses from a small watershed using HSPF model [J]. Journal of Environmental Engineering, 2009, 135(2): 92-100.
- [35] Patil A, Deng Z. Temporal scale effect of loading data on in-stream nitrate-nitrogen load computation [J]. Water Science and Technology, 2012, 66(1): 36-44.
- [36] Xie H, Dong J, Shen Z, et al. Intra-and inter-event characteristics and controlling factors of agricultural nonpoint source pollution under different types of rainfall-runoff events [J]. Catena, 2019, 182(2): 104-105.
- [37] Topalova Y, Schneider I, Todorova Y, et al. Analogous modeling of nutrient transformation in Iskar River sediments at different moisture content: microbiological and enzymological indicators [J]. Biotechnology & Biotechnological Equipment, 2013, 27(4): 3923-3931.
- [38] Zhang Heng, Zeng Fantang, Fang Huaiyang. Estimating non-point pollution loading from the Danshui catchment based on HSPF and regression model [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(4): 856-864. [张恒, 曾凡棠, 房怀阳. 基于HSPF及回归模型的淡水河流域非点源负荷计算[J]. 环境科学学报, 2012, 32(4): 856-864.]
- [39] Bai Xiaoyan, Wei Shuai, Shi Xu. Using the HSPF model to study the effects of precipitation on nonpoint source pollution in Dongjiang basin [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(7): 112-119. [白晓燕, 位帅, 时序. 基于HSPF模型的东江流域降水对非点源污染的影响分析[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(7): 112-119.]
- [40] Lee D H, Kim J H, Park M H, et al. Automatic calibration and improvements on an instream chlorophyll a simulation in the HSPF model [J]. Ecological Modelling, 2020, 415: 108835.
- [41] Rolle K, Gitau M W, Chen G, et al. Assessing fecal coliform fate and transport in a coastal watershed using HSPF [J]. Water Science and Technology, 2012, 66(5): 1096-1102.
- [42] Yang Bo, Chen Ying, Chen Xingwei. HSPF runoff simulation and optimization based on PEST automatic calibration [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(2): 9-16. [杨博, 陈莹, 陈兴伟. 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): 9-16.]
- [43] Li Jincheng, Gao Wei, Chang Xuexiu. Impacts of sub-watershed division on runoff simulation of HSPF model [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(10): 27-30. [李金城, 高伟, 常学秀. 子流域划分对HSPF模型径流模拟效果的影响[J]. 水电能源科学, 2018, 36(10): 27-30.]
- [44] Zhang P, Zhang J, Song Y. Hydrological simulation of Taizi River basin with HSPF model [C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019, 330(3): 3-4.
- [45] Liu Xingpo, Cheng Xingtie, Hu Xiao. Parameter calibration method of HSPF model for Qinglong River watershed based on response surface optimization [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(5): 163-170. [刘兴坡, 程星铁, 胡小. 基于响应面优化的青龙河流域HSPF模型参数校准方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(5): 163-170.]
- [46] Xue Lianqing, Wei Qing, Wei Guanghui. Coupled simulation of surface water and groundwater in the main stream of Tarim River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(3): 195-201. [薛联青, 魏卿, 魏光辉. 塔里木河干流地表水与地下水耦合模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 195-201.]
- [47] Liu Jie, Chen Xiaohong, Xu Zhencheng. Simulation and analysis of temporal and spatial distribution of non-point source pollution in the Dongjiang River basin [J]. Areal Research and Development, 2015, 34(2): 154-160. [刘洁, 陈晓宏, 许振成.]

- 东江流域非点源污染模拟及时空分布研究[J]. 地域研究与开发, 2015, 34(2): 154-160. ]
- [48] Kim S. Drought and weir construction impact stationarity assumption in watershed water quality modeling in South Korea [J]. Ecological Informatics, 2018, 45: 38-47.
- [49] Ahmadisharaf E, Benham B L. Risk-based decision making to evaluate pollutant reduction scenarios[J]. Science of The Total Environment, 2020, 702: 135022.
- [50] Liu Youcun, Jiao Keqin, Zhao Kui, et al. The response of precipitation to global climate change in the Tianshan Mountains, China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39 (4): 748-759. [刘友存, 焦克勤, 赵奎, 等. 中国天山地区降水对全球气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 748-759. ]

## Review on HSPF model in watershed hydrology and water environment research

LIU Youcun<sup>1</sup>, ZOU Jieping<sup>1</sup>, YIN Xiaoling<sup>2</sup>, MENG Lihong<sup>3</sup>, CHEN Ming<sup>1</sup>,  
ZENG Jinfeng<sup>4,5</sup>, Jolipanguli Turkhon<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China; 2. Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China; 3. College of Geography and Environmental Engineering, Gannan Normal University, Ganzhou 341000, Jiangxi, China; 4. School of Architecture and Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China; 5. Ganzhou Bureau of Hydrology, Jiangxi Province, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

**Abstract:** Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF) model is developed based on the Stanford hydrological model. As an excellent representative of a semi-distributed hydrological and water quality model, the HSPF model can comprehensively simulate processes such as river hydraulics, watershed runoff, soil loss, and pollutant migration, and thus is widely used in watershed hydrology and water environment research. This article outlines the development process of model development and integration, as well as the three main module structures of PERLND, IMPLND, and RCHRES in the model. It also summarizes the various aspects of the model in land use change, hydrological processes, non-point source pollution simulation and model parameter verification. The research progress of the HSPF model found that: the HSPF model still has room for improvement and perfection of empirical formulas and hypothetical estimates; the in-depth analysis of parameters helps reduce the uncertainty of the simulation results; The HSPF model also has higher requirements for the accuracy and standardization of the collected data. Therefore, this article puts forward relevant suggestions on the improvement of the model from the aspects of empirical formula improvement, parameter uncertainty discussion and simulation accuracy improvement.

**Key words:** HSPF model; simulation application; hydrology; non-point source pollution

(责任编辑: 陈仁升; 编辑: 周成林, 庞瑜)