

文章编号:1000-5641(2015)02-0040-08

基于 HSPF 模型的流域水文水质 模拟研究进展

韩 莉, 刘素芳, 黄民生, 马俊飞, 魏金豹, 胡 伟

(华东师范大学 生态与环境科学学院, 上海 200062)

摘要: HSPF 模型是基于 BASINS 平台的半分布式的综合水文模型,能够准确模拟流域水文水质状况,并已在水资源和水环境领域中得到广泛的普及和应用.介绍了 HSPF 模型对水文、泥沙侵蚀及污染物的迁移模拟机理,对其在径流、污染物迁移、土地利用覆被变化及气候变化对流域水文水质的影响等领域的最新进展进行了评述.初步探讨了完善 HSPF 模型的研究方向,主要包括加强污染物迁移转化机理、参数的不确定性及与多学科模拟模型整合等方面的研究.

关键词: 水文水质模拟; HSPF 模型; 径流; 土地利用; 气候变化

中图分类号: X522 **文献标识码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1000-5641.2015.02.005

Review of simulation research in hydrology and water quality based on HSPF model

HAN Li, LIU Su-fang, HUANG Min-sheng,

MA Jun-fei, WEI Jin-bao, HU Wei

(School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF) is a comprehensively semi-distributed hydrological model and can simulate hydrological conditions and water quality accurately in watersheds. It has been extensively applied in the fields of water resources and environment. The article reviewed the model mechanism of hydrology, sediment erosion and migration of pollutants, and summarized the latest developments in the modeling of the runoff, the migration of pollutants, the influence of land use or land cover change and climate change on watersheds. Besides, the research directions of complete the model were discussed, including the migration mechanism of pollutant, the uncertainty of model parameters and the combination with other models.

Key words: simulation of hydrology and water quality; HSPF model; runoff; land use; climate change

收稿日期:2014-07

基金项目:国家科技重大专项(2014ZX07101012,2013ZX07310001)

第一作者:韩莉,女,博士研究生,研究方向为水环境治理与修复. E-mail: hl8949@gmail.com.

通信作者:黄民生,男,教授,博士生导师,研究方向为水环境治理与修复. E-mail: mshuang@des.ecnu.edu.cn.

0 引言

近年来,由于气候变化、社会经济发展、农业产业发展及土地利用类型的改变,致使河流湖泊等流域的水文水质发生了很大变化,引起了诸如富营养化、水体缺氧、生物多样性受损等一系列环境问题^[1-3],对居民生活用水和区域经济发展构成了严重威胁。因此,定量确定流域径流量,流域内各类污染物的负荷及迁移转化规律是改善流域水环境并对其进行有效管理的首要条件。

HSPF(Hydrologic Simulate Program- FORTRAN),全称水文模拟模型,是由美国国家环境保护局于1981年开发完成的。1998年,美国环保署又开发完成了一套基于GIS技术的整合式平台系统BASINS。该系统把HSPF模型集成在具有强大空间数据存储和处理能力的Arcview上,为HSPF自动提取模拟区域的地形地貌、土地利用、土壤植被、河流等数据,以及非点源污染负荷的长时间连续模拟提供了方便^[4]。发展至今,HSPF模型又集成了HSP、ARM、NPS等模块。它将常见的污染物和毒性有机物模拟纳入到模型中,能够实现多种污染物地表、壤中流过程及蓄积、迁移、转化的综合模拟^[5]。HSPF模型是半分布式综合性流域模型的优秀代表。在国外已经被广泛应用于水、颗粒沉积物、营养盐、化学污染物、有机物质和微生物等的模拟研究,在我国,由于缺乏大量基础数据,对HSPF模型的研究还处于起步阶段。

1 模型机理

HSPF模型将模拟地段分为透水地面、不透水地面、河流或完全混合型湖泊水库三部分,其主模块包括透水地段水文水质模拟模块(PERLND)、不透水地段水文水质模拟模块(IMPLND)以及地表水体模拟模块(RCHRES)^[6]。三大模块下按照功能又分为水文模块、侵蚀模块和污染迁移转化模块等子模块^[7],可以实现对径流、颗粒沉积物、营养盐、化学污染物、有机物质和微生物等的连续模拟。

1.1 水文过程模拟

HSPF模型水文模块在非点源模型中是最为完善的^[8]。它以Stanford IV机理模型为基础,将研究区域分为透水地面和不透水地面两种类型,针对不同地面水文过程进行模拟。模型将研究区域自上而下分为树冠层、植被层和各土壤层(包括表层土壤、上土壤层、下土壤层和地下水涵养层)。降水在这些垂直的存储层间进行分配。透水地面的模拟考虑降雨或降雪、截留、地表填洼、渗透、蒸散发、地表径流、壤中流和地下水流等水文过程。降雨或降雪被地面截留一部分,再扣除地表填洼、下渗、蒸发,最后形成地表径流。不透水地面的模拟考虑降雨或降雪、截留、蒸散发、地表径流。降雨或降雪经扣除屋顶集水、沥青变湿及植被截留后形成地表径流。降雨最终由地表径流、壤中流和地下水流进入河流。

1.2 泥沙侵蚀模拟

相比目前很多模型采用的通用土壤流失方程(USLE)^[9],HSPF模型对泥沙侵蚀的模拟更具有机理性。它将侵蚀过程分为雨滴溅蚀、径流冲刷和径流运移等若干子过程,分别对其进行模拟。泥沙侵蚀模拟过程包括降雨对透水地面土壤的剥蚀,对不透水地面的冲刷以及地表径流对泥沙的输移过程。用于模拟泥沙剥蚀和迁移过程的数学方程是基于Meyer和Wischmeier所提出的降雨对土壤表面侵蚀的算法。泥沙随水流的演进输移,HSPF模型采

用 Toffaleti, collby 或幂函数法以及临界切应力原理进行模拟. 泥沙的传输按照泥沙粒径大小, 粉沙和粘粒的传输、沉降和冲刷根据临界剪切应力原理判断产生沉积或是冲刷, 沙粒的传输可以用 Toffaleti, Collby 或幂级数函数法来计算.

1.3 污染物迁移模拟

HSPF 模型污染物迁移模块考虑了污染物在多种环境介质之间的迁移转化过程^[10], 考虑了污染物在土壤中的状态、含量, 及其受到各种物理化学过程及生物过程的影响, 可以模拟输出 BOD、DO、营养物、农药和微生物等多种污染物负荷. 尤其对氮的模拟, 模型综合考虑了溶解态, 吸附态氮, 有机氮和无机氮, 氮素间的相互转化, 以及氮素与环境介质间的迁移等多个过程.

2 HSPF 模型的适用性

HSPF 模型结合了分布式流域水文模型和其它非分布式流域模型的一些优点, 是一个可以模拟流域内连续的水文过程以及水质变化过程的模型. ①模型集成于 BASINS 系统平台, 实现了模拟区域地形地貌、土地利用、土壤植被、河流等数据的自动提取. 与 SWAT 模型相比, 它包含融雪模块, 因此对冬季径流的模拟具有优势. ②对于降雨径流, HSPF 模型能够将降水径流过程按某一尺度进行空间划分, 对每一区域降雨、下渗等过程分别进行动态和连续的模拟. ③对于子流域, HSPF 模型每个子流域间具有承接关系, 并可根据不同需要调整子流域水文响应单元大小. 既实现了分布式模拟, 又能减少计算冗余, 同时避免了类似分布式的结构假定函数与实际不符而造成的错误. ④对于模拟尺度, HSPF 模型主要用于农业和城市混合型的不同时空尺度流域, 能够模拟时间尺度为小时的产汇流过程. 模型中 WDMUtil 软件可将现有气候气象数据进行衍生和扩充, 延长了模拟时间序列.

3 研究进展

近几年, HSPF 模型在流域降雨径流, 污染物迁移转化, 土地利用覆被及气候变化对流域水文水质的影响上有较多应用.

3.1 径流

径流模拟是研究其它水文问题的基础, 也是水文模拟研究中最基本最重要的一个环节. HSPF 模型能够按某一尺度进行空间划分, 模拟动态连续的降雨径流过程. Kourgialas 等将 HSPF 模型用于洪水频发的喀斯特地区 Koiliaris 河的地表和地下水的径流模拟, 模拟结果较好^[11]. Hsu 比较了 HSPF 模型和 FLO-2D 模型对洪峰流量和径流退水周期的模拟效果, 证明 HSPF 模型模拟结果更好^[12]. Lee 等利用 HSPF 模型模拟了小流域径流量和水质, 推荐用于水域管理^[13]. Diaz-Ramirez 成功地将 HSPF 模型应用于 Luxapallila 流域和 Rio Canonillas 集水区日流量模拟^[14]. 国内, 薛亦峰应用 HSPF 模型对潮河支流大阁河流域进行径流量模拟, 模拟流量多年相对误差为 0.17, Ens 为 0.87, 表明 HSPF 模型对研究区流域长期的连续径流量模拟具有较好的适用性^[15].

径流与降雨事件密切相关, 而降雨极具随机性, 诸如气象数据的分散性, 时间和空间分辨率的不同, 都会给模拟带来很大的不确定性, 影响径流模拟的精度. Diaz-Ramirez^[16]利用 HSPF 模型评估了美国阿拉巴马州亚热带滨岸集水区 3 场降雨数据集对水文过程模拟的影响. 研究发现, 降雨事件的高度空间变异性会使径流模拟结果产生很大的不确定性.

程晓光^[17,18]利用 HSPF 模型对北京妫水河流域径流量进行了模拟,并对参数进行了不确定性分析.发现不确定性范围与径流大小密切相关,径流愈大其不确定性范围愈大.为提高模型预测结果准确性,需要对这些不确定性进行定量化研究和分析.将不同尺度、不同来源的数据通过优化处理进行融合,构建具有多时空尺度、多分辨率和精度的输入数据集,是减少模型输入不确定性的有效途径.

3.2 污染物迁移

通过模型模拟的方式对污染物迁移进行定量化研究,已成为当前进行流域非点源污染研究的重要途径之一. HSPF 模型能够实现 3 种沉积物和 BOD、DO、氮、磷、农药等多种污染物的地表、壤中径流过程和蓄积、迁移、转化的综合模拟^[19]. Akter 将 HSPF 模型应用于评价泰国 Mun 河流域不同土地利用对河流水质的影响.经 RID 校准模型参数,模型对径流的模拟结果较好,研究结果表明农业用地和总氮呈现良好的线性相关性. Ouyang 用 HSPF 模型研究了美国佛罗里达州 Cedar-Ortega 河流域排放到 Lower St. Johns 河汞的负荷,为流域研究汞污染提供了一个很好的案例^[20]. Jeon 将 HSPF 模型用于 BOD₅ 的模拟,模拟误差在可接受范围^[21]. Kourgialas 利用 HSPF 模拟了洪水暴发时的流速及沉积物的输移负荷,结果表明,当除草率增加时,洪水深水波随流量、流速和沉积物输移负荷增加而降低^[22]. Tsai 利用 HSPF 模型模拟了山体滑坡造成沉积物输送到水库的比率^[23]. Ouyang 利用 HSPF 模型评价了密西西比河 Lower Yazoo 河流域植树造林对输沙量和水流的影响,结果表明森林面积的成倍增加将会使近似两倍水流量和输沙量减少^[24]. Patil 将 HSPF 模型用于美国路易斯安那州 Amite 河流域硝态氮负荷的计算,结果表明,硝态氮负荷随着数据时间尺度的增大而降低^[25]. Topalova 利用 HSPF 模型模拟了河流沉积物中有机质的迁移过程,结果表明总的脱氢酶、硝酸盐还原酶和磷酸酶的活性可以被用作水质管理和迁移率预测的有效工具^[26]. 国内,张恒将 HSPF 模型与回归模型结合,对广东省东江流域中淡水河流域的非点源负荷进行计算,研究结果显示,模型较好地再现了 SS、COD_{Cr}、NO₃⁻-N 及 TP 在 2010 年内的通量随时间的变化过程^[27]. 李伟利用 HSPF 模型对模型苕河流域的水文、泥沙、营养盐等非点源污染负荷进行了模拟^[28]. 姚锡良构建研究流域的 HSPF 模型模拟了圣堂断面控制流域各非点源污染物的逐日过程,分析得出 2010 各类污染负荷单位产出量最高的集中在耕地或建设用地,最少的为水域或荒地^[29].

近几年,因流域水资源、水环境综合管理的需要,流域生物学指标评价越来越受到重视. HSPF 模型应用于流域微生物的模拟已有很多报道. Fonseca 等将 HSPF 模型用于葡萄牙莱利亚地区勒拿河流域点源及非点源污染对河水水质的影响,建议有必要改变废水管理措施,以防止以粪大肠杆菌为主的污染物增加^[30]. Kim 等利用 HSPF 模型研究了美国费吉尼亚州 Hardware 河的日细菌负荷,模拟结果显示,细菌主要来自于家畜、野生动物的直接排放以及土壤的渗透^[31]. Petersen 利用 HSPF 模型对美国休斯顿布法罗湾大肠杆菌进行了模拟,研究表明,径流在所有水流中携带细菌最多^[32]. Rolle 用 HSPF 模型模拟了一个海岸的粪大肠杆菌的迁移、污染来源及主要污染区域,结果表明,污染主要来自森林而不是养殖区,这和以往的报道完全不同^[33]. Desai 利用 HSPF 模型评价了细菌对德克萨斯州城市水体的影响^[34].

然而,模型对污染物迁移转化的模拟仍然比较粗略,尤其是细菌等微生物的迁移过程及影响因素等需要有更深入及精确的研究. 另外,由于流域非点源污染过程具有复杂性,单凭

一个模型很难得到非点源污染各个过程理想的模拟结果. 将各类流域模型耦合联用或对模型进行二次开发将是发展趋势. Hsu 整合 HSPF 模型和 TRIGRS 模型预测了土壤侵蚀, 浅层滑坡时的产沙量, 模拟结果良好^[35]. Ciou 将 HSPF 模型与 CE-QUAL-W2 模型结合, 模拟了台湾一个水库 2002—2003 年污染物负荷, 将结果用 BMPs 的优选和布置. 在未来的发展中, 水质评价也将不仅仅局限于现有的小部分参数, 如溶氧、营养盐浓度、农药和微生物等^[36]. 水质模拟将向更广的物理化学、生物学及形态学方向发展.

3.3 土地利用及覆被变化

HSPF 模型能够根据需要设立不同土地利用覆被变化情景, 评价其对水文水质的影响, 为流域管理提供决策依据. Liu 等利用 HSPF 模型模拟次集水区滨岸带土地利用变化对水文水质的影响, 结果表明 60、90 和 120 m 的滨岸林或湿地缓冲带可使年均流量降低 0.26%~0.28%, 硝酸盐和亚硝酸盐负荷减少 2.9%~6.1%, 总磷减少 3.2%~7.8%^[37]. Duan 用 HSPF 模拟了 Saint Louis 湾土地利用变化对水文水质的影响, 结果表明, 林地减少和裸地增加将导致土壤侵蚀加剧, 径流泥沙输出量增大, 水质恶化^[38]. He 在区域发展的基础上设立可能的城镇化情景. 利用 HSPF 模型, 模拟了美国上圣克拉拉河年径流量和丰水期流量变化情况. 结果表明, 快速发展增加了年总径流量和丰水期流量, 而降低了枯水期和丰水期的基流和地下水补给^[39]. Ferrari 等利用 HSPF 模型模拟矿区开矿增加对洪水的影响, 结果显示洪水规模呈线性增加趋势^[40]. Praskievicz 等使用 HSPF 模型设定了 2 种土地利用变化情景模拟土地利用变化对水文、泥沙、营养盐输出的影响^[41]. Cho 等将 HSPF 模型和 MODFLOW 结合, 模拟了 8 种土地利用情景对河道径流和地下水位的影响^[42].

国内, 白晓燕采用 HSPF 模型模拟了东江流域 1980、2000 和 2008 年土地利用情景下的径流过程, 并识别了不同土地利用类型对水文效应的敏感性. 结果表明, 土地利用变化对流域的洪水过程影响显著. 耕地的减少和城镇用地的扩张使径流量增加, 林地面积的增加使径流量减少^[43]. 何泓杰利用 HSPF 水文模型对流溪河流域进行非点源污染负荷估算以及不同时期土地利用类型变化所造成的影响. 结果表明, 林地、草地和水域湿地的非点源污染负荷贡献率最小, 耕地和城乡建设用地贡献率最大^[44].

未来, HSPF 模型将模拟除气候变化、土地利用变化以外多种自然过程或人类活动对水文、水质的影响. 模型将从模拟单一土地利用变化或气候变化情景, 扩展到复杂土地利用、多种气候变化情景及组合, 以解决更加综合的水环境问题.

3.4 气候变化

气候变化对水文过程影响显著, HSPF 模型可对多种气候变化情景进行模拟, 评价大气 CO₂ 浓度变化、气候变化对植被、水文、污染物释放等的影响. Butcher 等利用 SWAT 和 HSPF 模型研究了流域对气候变化的响应^[45]. 两个模型预测结果表明, 随着气候变化, CO₂ 浓度升高, 径流量增加. G ncü 利用 HSPF 模拟了土耳其西部 21 世纪前五十年气候变化对河流流量、水库容量的影响^[46]. 结果表明, 气候变化将导致河流、水库及流域的降雨径流季节变化更加显著. Tong 设立了 LMR 流域到 2050 年 5 种气候变化情景, 利用 HSPF 模拟了这些变化情景下河水流量和氮迁移过程. 研究结果表明, 气候变化将使 LMR 流域流量和总氮总磷浓度升高^[47]. He 利用 HSPF 模型对 USJRW 流域以积雪为主的 5 个源头流域气候变化对水文系统的敏感性进行了分析. 结果表明, USJRW 流域流量对气候变化最敏感. 即使降水没有变化, 年总流量仍然会随着温度升高而下降 18%~23%^[48]. Kim 将 HSPF 模

型应用于气候变化条件下流域水量水质的管理问题,将其应用于韩国城市水量大量消耗、水质恶化的流域,模拟结果良好,为流域规划管理提供了依据^[49]. Taner 利用 HSPF 和 UFILS4 模型模拟了气候变化对纽约 Onondaga 湖集水区水文及热平衡的影响,模拟结果显示,洪峰流量增加,将增大营养盐的输出^[50]. Lopez 等利用 HSPF 模型对流域水文对气候变化的敏感性,模拟了流量变化和输水率的变化^[51]. 国内,邓晓宇使用 HSPF 模型定量分析了影响期气候变化和人类活动对信江流域径流的影响及其各自的贡献率. 结果表明,气候变化对径流的影响分量在 65.6%~88.0% 之间,人类活动对径流的影响分量在 12.0%~34.4% 之间^[52].

由于现有的气象数据的严重不足,对气候变化预测在空间及时间尺度上进行降尺度,是解决这一问题的有效办法. 降尺度处理还可以提高模拟精度,从而改善模拟结果. Jun 利用加拿大全球耦合模型(CGCM3)和统计降尺度模型(SDSM)模拟出未来气象数据,再利用 HSPF 模型模拟未来径流量和水质^[53]. GUO 等通过 HadCM3 降尺度数据与 HSPF 水文模型耦合,探讨了未来气候变化情景下妫水河流域日最高、最低气温与降水量的变化情况. 结果表明,妫水河流域未来 90 年的气温总体呈升高趋势,而降水量和地表流量呈减小趋势,流域干旱加剧的可能性进一步加大^[54].

4 展 望

HSPF 模型已经广泛应用于区域的水资源水环境模拟,并取得了精确的结果. 未来,气候变化、土地利用覆被变化等情景模拟以及非点源污染对流域水文水质的影响,以及地区水资源、水环境综合管理问题解决仍将是研究的热点. 在我国,随着实测数据的不断积累及数据共享平台不断开放,水文水质的模拟将不再受到数据的限制,HSPF 模型在我国的应用也将更加广泛.

但从目前流域水文水质模拟的研究现状来看,HSPF 模型若要在流域水文水质模拟上有更大的突破,需要加强以下几方面的研究:①污染物迁移转化机理的研究. 现有的模型依赖于很多经验关系或近似假设来表达污染物在介质间的迁移过程,很多参数的随机性给模型预测结果带来了不确定性,其中的某些方案或算法也仍然有改进和完善的空间. ②参数的敏感性及不确定性研究. 由于模型所需的参数数量很大,对模拟过程参数进行敏感性分析及对参数不确定性进行定量化研究,将对模型使用效率具有重要意义. ③与多学科模拟模型整合联用的研究. HSPF 模型仅限于对均匀混合的河流、水库和一维水体模拟. 因此对于复杂流域或水体的模拟研究,需要将 HSPF 模型与其它模型整合以解决更加综合的问题.

[参 考 文 献]

- [1] THOMAS A, DAVIDSON, ERIK J. The role of palaeolimnology in assessing eutrophication and its impact on lakes[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2013, 49(3): 391-410.
- [2] SARAH K C, JOHNNY A W, THOMAS J S, et al. A new model for the Kellwasser Anoxia Events (Late Devonian): Shallow water anoxia in an open oceanic setting in the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 399: 394-403.
- [3] BRADLEY J C, DUFFY J E, ANDREW G, et al. Biodiversity loss and its impact on humanity[J]. *Nature*, 2012, 486(7401): 59-67.
- [4] 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.

- [5] 李兆富,刘红玉,李燕. HSPF 水文水质模型应用研究综述[J]. 2012, 33(7): 2218-2224.
- [6] 董延军,李杰,郑江丽,等. 流域水文水质模拟软件(HSPF)应用指南[M]. 郑州:黄河水利出版社,2009.
- [7] 刘仙. 基于 BASINS-HSPF 模型的岩溶槽谷区地下水模拟研究[D]. 重庆:西南大学,2009.
- [8] DENIEL E B, CAMP J V, LEBOEUF E J, et al. Watershed modeling and its applications: A state-of-the-art review[J]. Open Hydrology Journal, 2011(5): 26-50.
- [9] WISCHMEIER W H, SMITH D D. A universal soil-loss equation to guide conservationfarm planning[J]. Transactions 7th int Congr Soil Sci, 1960(1): 418-425.
- [10] LIU Z J, WELLER D E. A stream network model for integrated watershed modeling[J]. Environmental Modeling and Assessment, 2008, 13(2): 291-303.
- [11] KOURGIALAS N N, KARATZAS G P, NIKOLAIDIS N P, et al. An integrated framework for the hydrologic simulation of a complex geomorphological river basin[J]. Journal of Hydrology, 2010, 381(3-4): 308-321.
- [12] HSU S M, CHIOU L B, LIN G F, et al. Applications of simulation technique on debris-flow hazard zone delineation: a case study in Hualien County, Taiwan[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2010, 10(3): 535-545.
- [13] LEE S B, YOON C G, JUNG K W, et al. Comparative evaluation of runoff and water quality using HSPF and SWMM[J]. Water Science and Technology, 2010, 62(6): 1401-1409.
- [14] DIAZ-RAMIREZ J N, MCANALLY W H, MARTIN J L. Sensitivity of simulating hydrologic processes to gauge and radar rainfall data in subtropical coastal catchments[J]. Water Resources Management, 2012, 26(12): 3515-3538.
- [15] 薛亦峰,王晓燕,王立峰,等. 基于 HSPF 模型的大阁河流域径流量模拟[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(10): 103-107.
- [16] DIAZ-RAMIREZ J N, MCANALLY W H, MARTIN J L. Analysis of hydrological processes applying the HSPF model in selected watersheds in Alabama, Mississippi and Puerto Rico[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2011, 27(6): 937-954.
- [17] 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.
- [18] 程晓光,张静,宫辉力. 基于 PEST 自动校正的 HSPF 水文模拟研究[J]. 2013, 35(12): 33-36.
- [19] AKTER A, BABEL M S. Hydrological modeling of the Mun River basin in Thailand[J]. 2012, 452: 232-246.
- [20] OUYANG Y, HIGMAN J, HATTEN J. Estimation of dynamic load of mercury in a river with BASINS-HSPF model[J]. Journal of Soils and Sediments, 2012, 12(2): 207-216.
- [21] JEON J H, LIM K J, YOON C G, et al. Multiple segmented reaches per subwatershed modeling approach for improving HSPF-Paddy water quality simulation[J]. Paddy and Water Environment, 2011, 9(2): 193-205.
- [22] KOURGIALAS N N, KARATZAS G P. A hydro-sedimentary modeling system for flash flood propagation and hazard estimation under different agricultural practices[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2014, 14(3): 625-634.
- [23] TSAI Z X, YOU G J Y, LEE H Y, et al. Modeling the sediment yield from landslides in the Shihmen Reservoir watershed, Taiwan[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2013, 38(7): 661-674.
- [24] OUYANG Y, LEININGER T D, MORAN M. Impacts of reforestation upon sediment load and water outflow in the Lower Yazoo River Watershed, Mississippi[J]. Ecological Engineering, 2013, 61: 394-406.
- [25] PATIL A, DENG Z Q. Temporal scale effect of loading data on instream nitrate-nitrogen load computation[J]. Water Science and Technology, 2012, 66(1): 36-44.
- [26] 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.
- [27] 张恒,曾凡棠,房怀阳,等. 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): 256-264.

- [28] 李伟. 苕溪流域地表水水质综合评价与非点源污染模拟研究[D]. 杭州:浙江大学, 2013.
- [29] 姚锡良. 农村非点源污染负荷核算研究[D]. 广州:华南理工大学, 2012.
- [30] FONSECA A, BOTELHO C, BOAVENTURA R A, et al. Integrated hydrological and water quality model for river management: A case study on Lena River[J]. The Science of the Total Environment, 2014, 485-486: 474-89.
- [31] KIM S M, BRANNAN K M, ZECKOSKI R W, et al. Development of total maximum daily loads for bacteria impaired watershed using the comprehensive hydrology and water quality simulation model[J]. Journal of Environmental and Health Part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering, 2014, 49(9): 1077-1089.
- [32] PETERSEN C M, RIFAI H S, VILLARREAL G C, et al. Modeling *Escherichia coli* and its sources in an urban bayou with Hydrologic Simulation Program-FORTRAN[J]. Journal of Environmental Engineering-ASCE, 2011, 137(6): 487-503.
- [33] 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.
- [34] DESAI A, RIFAI H S, PETERSEN T M, et al. Mass balance and water quality modeling for load allocation of *Escherichia coli* in an urban watershed[J]. Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE, 2011, 137(5): 412-427.
- [35] HSU S M, WEN H Y, CHEN N C, et al. Using an integrated method to estimate watershed sediment yield during heavy rain period: a case study in Hualien County, Taiwan[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2012, 12(6): 1949-1960.
- [36] CIOU S K, KUO J T, HSIEH P H, et al. Optimization model for BMP placement in a reservoir watershed[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE, 2012, 138(8): 736-747.
- [37] LIU Z, TONG S T. 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): 1-14.
- [38] DUAN Z Y, DIAZ J N, MARTIN J L, et al. Effects of land-use changes on Saint Louis Bay watershed modeling [J]. Journal of Coastal Research, 2008, 52: 117-124.
- [39] HE M X, HOGUE T S. Integrating hydrologic modeling and land use projections for evaluation of hydrologic response and regional water supply impacts in semi-arid environments[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 65(6): 1671-1685.
- [40] FERRARI J R, LOOKINGBILL T R, MCCORMICK B, et al. Surface mining and reclamation effects on flood response of watersheds in the central Appalachian Plateau region [J]. Water Resources Research, 2009, 45: W04407.
- [41] PRASKIEVICZ S, CHANG H. Impacts of climate change and urban development on water resources in the Tualatin River Basin, Oregon[J]. Annals of the Association of American Geographers, 2011, 101(2): 249-271.
- [42] CHO J, BARONE V A, MOSTAGHIMI S. Simulation of land use impacts on groundwater levels and streamflow in a Virginia watershed[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(1): 1-11.
- [43] 白晓燕, 丁华龙, 陈晓宏. 基于 HSPF 模型的东江流域土地利用变化对径流影响研究[J]. 2014, 33(2): 58-63.
- [44] 何泓杰. 基于 HSPF 模型的流溪河流域非点源污染负荷估算[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [45] BUTCHER J B, JOHNSON T E, NOVER D, et al. Incorporating the effects of increased atmospheric CO₂ in watershed model projections of climate change impacts [J]. Journal of Hydrology, 2014, 513: 322-334.
- [46] G NCÜ S, ALBEK E. Modeling climate change effects on streams and reservoirs with HSPF[J]. Water Resources Management, 2010, 24(4): 707-726.
- [47] TONG S T, SUN Y, RANATUNGA T, et al. Predicting plausible impacts of sets of climate and land use change scenarios on water resources[J]. Applied Geography, 2012, 32(2): 477-489.