

张蓓 李家科 李亚娇. 不同开发模式下城市雨洪及污染模拟研究进展[J]. 环境科学与技术 2017 40(8) 37-95. Zhang Bei, Li Jiako, Li Yajiao. Study on urban storm water and non-point source simulation under different development patterns[J]. Environmental Science & Technology 2017 40(8) 37-95.

# 不同开发模式下城市雨洪及污染模拟研究进展

张蓓<sup>1</sup>, 李家科<sup>1\*</sup>, 李亚娇<sup>2</sup>

(1.西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地 陕西 西安 710048;

2.西安科技大学建筑与土木工程学院 陕西 西安 710054)

**摘要** 近年来,城市化进程的加快加剧了城市洪涝灾害及面源污染问题,建立有效的、适合中国城市发展状况的雨洪及面源污染模拟模型,可为海绵城市规划和建设提供有力支撑。总结了典型城市雨洪及面源污染模型的计算方法,对比了各模型对城市传统开发和低影响开发模式的模拟结果。低影响开发模式较传统开发模式,对城市地表径流量、水质有较好地调控效果。同时,探讨了各模拟软件现状和不足。为提高模型的适应性和模拟的准确性,城市雨洪及面源污染模型在模拟计算时需强化具体的量化方法、考虑多种影响因素并对模型模拟结果进行不确定性分析。未来研究的重点应侧重于:从宏观尺度上,研究和开发水文学-水力学、水量-水质耦合模型、提高雨水监测技术、强化3S技术耦合能力;从微观尺度上,耦合土壤孔隙介质变化过程中水流和溶质迁移过程模型。同时,结合低影响开发水文与水质改善情况,模拟过程中可进行经济、环境和社会效益分析,为区域水土环境保护决策提供定量依据。

**关键词** 城市雨洪; 面源污染; 开发模式; 模型; 模拟

中图分类号 X52 文献标志码 A doi:10.3969/j.issn.1003-6504.2017.08.014 文章编号:1003-6504(2017)08-0087-09

## Study on Urban Storm Water and Non-point Source Simulation under Different Development Patterns

ZHANG Bei<sup>1</sup>, LI Jiako<sup>1\*</sup>, LI Yajiao<sup>2</sup>

(1.State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048,

China; 2.School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract**: In recent years, the rapid development of urbanization has aggravated the problems of urban flood and non-point pollution. An effective and appropriate simulation model for storm water and non-point source pollution can provide a strong support for sponge city planning and construction in China. The calculation methods of typical urban storm water and non-point source pollution models were summarized. The simulation results of different urban development modes (traditional development, TD and low impact development, LID) were compared. Results show that LID mode has better regulation effects on urban surface runoff and water quality than TD mode. Meanwhile, the present situation and shortcomings of the simulation software were discussed. In order to improve the adaptability of the models and the accuracy of the simulation, urban storm water and non-point source pollution models need to strengthen the specific quantitative methods of simulation calculation, and take into account a variety of influencing factors and analyze the uncertainty of the simulation results. The emphasis of future research should focus on, on the macroscopic scale, the development of hydrology-hydraulics, water-water quality coupling model should be researched, and the storm water monitoring technology should be improved and the coupling ability of 3S technology; On the microscopic scale, the process model of water and solute transport during the change of soil pore medium should be coupled. At the same time, combining with the improvement of hydrology and water quality of LID, the analysis of economic, environmental and social benefits can be conducted to provide the quantitative foundation for regional water and soil environmental protection decision.

《环境科学与技术》编辑部 (网址)http://fjks.chinajournal.net.cn (电话)027-87643502 (电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期 2016-12-22 修回 2017-03-08

基金项目 陕西省自然科学基金重点资助项目(2015JZ013) 国家自然科学基金资助项目(51279158)

作者简介 张蓓(1994-)女,硕士研究生,研究方向为非点源污染与水資源保护 (电子信箱)393526022@qq.com,\*通讯作者 (电子信箱)xaut\_lik@

163.com ©1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

**Key words** : urban rain and flood ; non-point source pollution ; development mode ; model ; simulation

城市化是人类社会发展的重要过程,近年来城市快速发展使得自然环境和城市下垫面组成发生了很大变化,加剧了城市暴雨洪涝及面源污染等生态环境问题<sup>[1]</sup>。传统的城市开发模式无法解决由于快速城市化建设导致的雨洪径流量增多、峰流量增大以及径流污染等问题,随着海绵城市建设的推进、低影响开发技术的发展,可有效缓解快速城市化发展引起的一系列问题,实现城市与自然和谐相处<sup>[2]</sup>。

城市暴雨径流模型可以模拟城市产汇流的形成,从而有效进行洪水预测以及减灾措施的实施和改善;面源污染模型可以模拟污染物在径流形成过程中的迁移和转化,从而有效控制和防止降雨径流产生的污染<sup>[3]</sup>。目前,国内外在城市雨洪与面源污染模型的研究已相当广泛,代表性模型有 SWMM、MIKE、Digital water、Info Works、SWC、SUSTAIN 等<sup>[4]</sup>。其中,城市雨洪产汇流计算方法是城市雨洪模型建立的基础,污染负荷定量研究是非点源污染模型研究的本质<sup>[5]</sup>。低影响开发(LID)技术作为目前国际上城市水环境保护和可持续发展的雨洪管理新策略,其主要包括绿色屋顶、雨水花园、下凹式绿地、渗透铺装等措施,通过利用植物、微生物化学及物理等特性,实现径流量、峰值流量和径流污染控制的目的<sup>[6]</sup>。现阶段,部分模拟软件已添加了低影响开发(LID)模块,但由于城市地表污染受降雨特征、天气情况和地表特征等影响因素,大大增加了模拟在径流流量削减、污染定量分析和有效控制等难度,同时也是现有模型准确性和适用性欠佳

的原因。鉴于此,在总结模型基本原理和近几年模型应用进展的基础上,主要就模型计算方法选取、模型模拟效果进行了总结和分析,归纳并提出了几个亟待解决的科学问题,以期使模型能更好地服务于城市水资源和水环境管理。

## 1 模型基本原理

城市雨洪和非点源污染模型发展进程均经历了 3 个阶段:经验阶段、模型阶段和 3S(GIS、GPS、RS)技术耦合应用阶段<sup>[7]</sup>。目前,城市雨洪产汇流计算被归纳为城市雨洪产流计算、城市雨洪地面汇流计算以及城市雨洪地下管流计算等 3 方面;污染负荷的主要研究方法有污染物累积和污染物冲刷计算。

### 1.1 城市雨洪产汇流计算方法

城区雨洪产汇流因城市下垫面的特殊性,使其计算方法具有独特性。模拟中往往采用简便快捷的水文学方法与准确的水力学方法相结合的方式<sup>[8]</sup>,以满足城市防涝减灾的模拟及预测。

#### 1.1.1 地面产流计算

城市产流过程就是暴雨扣损过程<sup>[9]</sup>。即城市降雨消耗于城市地表植物截留、下渗、洼蓄等,产生径流的部分降雨。根据城市下垫面组成的不同,将城市分为透水区和不透水区,城市透水区与不透水区的分布直接影响城市的产流特性<sup>[10]</sup>。目前多采用一些简单经验型公式或数据统计分析拟合公式来研究城市产流过程,如表 1 所示。

表 1 城市雨洪产流计算方法汇总  
Table 1 Summary of methods for urban runoff calculation

| 方法                      | 优点         | 缺点                      | 功能          | 参考文献  |        |
|-------------------------|------------|-------------------------|-------------|---|--------|
| 城市不透水区<br>(降雨损失主要以洼蓄为主) | SCS 曲线法    | 结构较简单、资料的需求量少、应用广泛      | 概化严重,计算不够精确 | 降雨径流关系用一个反映流域综合特征的参数来计算降雨损耗                     | [1]    |
|                         | 降雨径流相关法    | 资料需求量少,原理简单             | 可靠性偏低       | 建立一个径流与降雨量、不透水面积等相关性关系,形成降雨与净峰、洪峰的经验相关图         | [11]   |
|                         | 径流系数法      | 经验丰富,精确度高,仅有一个经验系数,简易可行 | 可靠性低        | 应用不同地表类型的降雨径流系数,结合降雨强度来计算降雨损耗                   | [12]   |
|                         | 蓄满产流法      | 计算精度较高、资料需求量大           | 计算较为复杂      | 用径流系数来计算降雨损耗,径流系数等于累积面积与流域总面积之比                 | [13]   |
| 城市透水区<br>(降雨损失主要以下渗为主)  | $\phi$ 指数法 | 计算简单、资料需求量少             | 精确度低        | 通过给定的指数判断降雨强度与径流量的关系                            | [5,14] |
|                         | 下渗曲线法      | 应用广泛,计算精度较高             | 计算稍复杂       | 由下渗公式计算产流过程;如 Green-Ampt, Horton 和 Philip 下渗曲线等 | [15]   |

因城市下垫面的复杂性、土壤湿度和植物截留等因素直接影响到城市的产流特性<sup>[15]</sup>,产流计算方法研究仍与实际状况存在较大差距。如何确定上述因素对产流规律的影响是日后发展的主要方向。目前,产流

计算方法不仅仅局限于单一的某种算法,人们通常会按照下垫面的不同情况及所要求数据的精确性来选取较为适合的计算方法。

#### 1.1.2 地面汇流计算

城市地面汇流过程是净雨在地表产流后到流入雨水管道系统集水口的过程<sup>[16]</sup>。目前已经具有多种城

市雨洪汇流计算方法,大体可分为水动力学和水文学 2 种计算方法,如表 2 所示。

表 2 城市雨洪汇流计算方法汇总  
Table 2 Summary of methods for urban runoff calculation

| 方法                | 优点           | 缺点                  | 功能  | 参考文献 |
|-------------------|--------------|---------------------|---|------|
| 水动力学方法<br>圣维南方程组法 | 物理过程明确, 计算精确 | 计算相对复杂、耗时           | 基于圣维南方程组模拟地表坡面汇流过程; 流量和水位形成空间和时间的函数。                | [16] |
| 水文学方法<br>推理公式法    | 过程简单         | 不能很好反映径流过程线, 计算精确度低 | 假定径流系数不变、流域面积线性增长, 只关注洪峰, 不关注流量过程变化                 | [17] |
| 等流时线法             | 较好的模拟汇流的整个过程 | 较难划分, 较难汇流区域        | 根据时间-面积曲线计算流量过程; 假定径流系数不变、流域面积线性增长; 瞬时暴雨强度通过积分确定过程线 | [1]  |
| 瞬时单位线法            | 资料需求少, 计算简单  | 精确度较差               | 假设区域为线性系统, 将瞬时单位线采用 S 曲线法转化为时段单位线                   | [18] |
| 线性水库法             | 计算简单         | 效果一般                | 过理想化地计算方法来模拟地表坡面汇流过程                                | [7]  |
| 非线性水库法            | 计算相对简单、精确    | 物理机制不太明显            | 用非线性水库的调蓄过程进行模拟, 采用有限差分法求解其数值解                      | [17] |

对于城市地表汇流计算,水动力学计算模型计算繁琐,应用较为困难,而水文学计算方法简单,但物理机制不明确。精确的水动力学方法和简便快捷的水文学方法者均有局限性<sup>[19]</sup>。如何将两者结合起来,建立适合城市地区的地表汇流水文-水动力学计算方法是目前亟待开展的研究。目前,模型中多采用非线性水库法进行地表汇流模拟<sup>[20]</sup>。

排水管网是一个水流状况较复杂的汇流系统,且水流为非恒定流,模拟和模型的构建过程也相应复杂<sup>[21]</sup>。构建管网汇流模型的方法大致可分为 2 类,一类是水动力学方法,一类是水文学方法,见表 3。水文学方法相对简单,一般只是时间的一维函数,如马斯京根法参数少、计算相对简单但精度低;水力学方法除了考虑时间因素,还需考虑空间因素<sup>[22]</sup>,如动力波法精度高但求解复杂。

1.1.3 地下管流计算

表 3 城市管网水流计算方法汇总  
Table 3 Summary of methods for urban water flow in network calculation

| 方法                 | 优点                        | 缺点              | 功能  | 参考文献 |
|--------------------|---------------------------|-----------------|---|------|
| 水动力学方法<br>(圣维南方程组) | 计算简单, 只需要一个边界条件           | 完全忽略下游回水的影响     | 假定水流是均匀的, 消除了加速度和压力的影响, 只适用于坡度大、下游回水影响小的管道              | [21] |
| 扩散波                | 可以较准确地模拟管网水流状况, 计算精度较高    | 不适用于各种流态共存的水流运动 | 省去了动量方程中的惯性项, 本地加速度和对流加速度项, 所以也称为非惯性波                   | [23] |
| 动力波                | 精度高且适用范围广                 | 资料要求较高, 求解比较复杂  | 能够模拟回水对上游水流的影响, 管道中的逆向流、压力流、渗入渗出等相对管道而言的损失以及洪峰在管道传播中的衰减 | [24] |
| 水文学方法<br>马斯京根法     | 计算相对简便, 参数少, 应用范围广, 资料需求少 | 计算精度较低          | 把连续方程简化为水量平衡方程, 将动力方程简化为槽蓄方程再求出流量的过程                    | [25] |
| 瞬时单位线法             | 计算精确                      | 调试难度较大          | 瞬时单位线转换成 10 mm 实用单位线后, 再进行汇流计算                          | [26] |

目前简单的水文学方法和精确的水动力学方法的应用均已相对成熟。根据已有研究成果分析,可针对不同精度要求和资料掌握情况,若精度要求高,资料完整,可优先考虑水力学方法,反之选择水文学方法,选用最适合的管网水流计算方法模拟研究区的城市管网水流形态。

污染物的累积过程,可以通过单位子汇水面积的质量或者单位边沿长度的质量进行描述<sup>[23]</sup>。地表污染物的累积具有上限,累积速度在初始时最快,随后逐渐降低。因城市下垫面不同,污染物累积过程就会有不同方式,如表 4。常见的污染物累积过程曲线有线性函数模型、幂函数模型、指数函数模型和饱和函数模型等<sup>[23]</sup>。

1.2 面源污染定量负荷计算方法

1.2.2 污染物冲刷

在径流形成过程中,污染物迁移和转化非常复杂,为了有效防止和控制径流污染,有必要对污染物进行分析和模拟<sup>[27]</sup>。其中,面源污染过程主要分为污染物累积和污染物冲刷。

径流形成过程中,对污染物会形成冲刷,冲刷过程会形成再次污染<sup>[29]</sup>。污染物累积模型的输出是污染物冲刷模型的输入。常见模拟冲刷方法有指数冲刷、性能曲线冲刷和事件平均浓度,如表 5。性能曲线冲刷

1.2.1 污染物累积

表 4 污染物累积过程计算方法汇总  
Table 4 Summary of methods for pollutants growth process calculation

| 方法   | 表达式                                | 参数  | 优点                | 缺点                  | 功能   | 参考文献   |
|------|------------------------------------|---|-------------------|---------------------|--|--------|
| 线性函数 | $B = \text{Min}(C_1, C_2 t)$       | $C_1$ 为最大增长可能<br>$C_2$ 为增长速率常数                | 计算简单,<br>参数易于确定   | 过于理想化的污染物<br>描述累积过程 | 污染物累积(B)与时间(t)<br>成正比关系,直到达到最大限制           | [28]   |
| 幂函数  | $B = \text{Min}(C_1, C_2 t^{C_3})$ | $C_1$ 为最大增长可能<br>$C_2$ 为增长速率常数<br>$C_3$ 为时间指数 | 计算较为精确,<br>过程简单   | 无雨期历时较长时<br>计算不精确   | 污染物累积(B)与时间(t)的 $C_3$ 次幂<br>成正比关系,直到达到最大限制 | [30]   |
| 指数函数 | $B = C_1(1 - e^{-C_2 t})$          | $C_1$ 为最大增长可能<br>$C_2$ 为增长速率常数                | 计算精度较好            | 污染物模拟<br>上限值不定      | 污染物累积(B)遵从指数增长曲线,<br>渐进达到最大值               | [7,28] |
| 饱和函数 | $B = \frac{C_1 t}{C_2 + t}$        | $C_1$ 为最大增长可能<br>$C_2$ 为半饱和和常数                | 参数易于选取,<br>计算精度较差 | 机理模糊,<br>拟合效果一般     | 污染物累积(B)以线性速率开始,<br>随时间持续下降,直到达到饱和数值       | [31]   |

和事件平均浓度冲刷两者仅考虑了降雨径流量对冲刷过程的影响,指数冲刷则同时考虑污染物累积量和降雨径流量对冲刷过程的影响,但目前存在的冲刷模

型在无雨期历时较长时,计算均不精确<sup>[32]</sup>。事件平均浓度和指数冲刷方法因计算简单、参数易选取,普遍被用于模拟冲刷过程<sup>[33]</sup>。

表 5 污染物冲刷过程计算方法汇总  
Table 5 Summary of methods for pollutants washing process calculation

| 方法         | 公式                  | 参数   | 功能                                 | 优点               | 缺点                    | 参考文献 |
|------------|---------------------|--|------------------------------------|------------------|-----------------------|------|
| 指数冲刷       | $W = C_1 q^{C_2} B$ | $C_1$ 为冲刷系数<br>$C_2$ 为冲刷指数<br>$q$ 为单位面积的径流速率<br>$B$ 为污染物增长 | 冲刷负荷(W)与径流的<br>$C_2$ 次幂成正比关系       | 计算较为简单,<br>参数易选取 | 仅考虑了降雨径流量<br>对冲刷过程的影响 | [33] |
| 性能<br>曲线冲刷 | $W = C_1 Q^{C_2}$   | $C_1$ 为冲刷系数<br>$C_2$ 为冲刷指数<br>$Q$ 为径流速率                    | 冲刷负荷(W)的性能与径流速率<br>的 $C_2$ 次幂成正比关系 | 参数易选取,<br>计算简单   | 计算不精确,<br>物理机制不明确     | [34] |
| 事件<br>平均浓度 | $W = C_1 Q$         | $C_1$ 为冲刷系数<br>$Q$ 为径流速率                                   | 性能曲线的冲刷的特殊情况,<br>污染物相对于径流量的平均浓度    | 可比较不同场次、<br>不同样点 | 物理机制不明确,<br>理想化严重     | [34] |

目前污染物累积模型和污染物冲刷模型基本属于经验模型或统计学模型,缺乏对污染物转移过程的机理描述<sup>[33]</sup>,因此,从污染物转移机理出发进行模型的构建是今后污染物累积和冲刷模型发展方向。

2 不同城市发展模式下模型应用进展

城市化快速发展引起城市区域总径流量增加、洪峰流量增多、径流污染物增长等问题,针对这些问题,美国最先提出了最佳管理措施(BMPs)和低影响开发(LID)技术,英国提出了可持续城市雨水管理理念(SUDS),澳大利亚提出了水敏感性城市设计理念(WSUD),新西兰提出了低影响城市设计与开发理念(LIUIDD),新加坡提出了 ABC 计划等,随后中国提出了海绵城市建设理念。根据目前国际城市的发展理念,传统城市暴雨管理和非点源控制技术已不能满足目前城市发展可持续发展的需求。低影响开发(LID)技术是从源头上控制、通过结合一系列景观实现对研究区域地表径流调控的措施<sup>[34]</sup>,加强 LID 等措施对城市地表径流水质、水量调控效果的模拟研究可以有效缓解城市化发展带来的上述问题。

2.1 城市雨洪模拟应用进展

SWMM、MIKE、Digital water、Info Works、SWC、SUSTAIN 等雨洪管理模型现广泛应用于低影响开发(LID)技术中。现阶段,我国对低影响开发模拟大多为

试点区或住宅小区,结合城市管网的大规模区域研究模拟相对较少。表 6 对比了试点区有无 LID 措施下城市雨洪模拟应用研究,并对其模拟效果进行了归纳和总结。

对比表 6 分析研究成果可以发现,LID 措施对于小型降雨的滞蓄作用明显,具有削峰减量的作用,但随着重现期的增大、降雨强度的增加径流削减率也随之减少,同时,LID 措施改造面积和布设方案的优化对雨水资源达到有效的利用。

现阶段,城市雨洪模拟技术已形成了较为完善的模型框架,但由于对水文物理过程机理的认识和数据管理能力的不足,模型通常采用相对简单的数学公式来描述复杂的水文过程,往往会导致“失真”,这必然导致城市雨洪模型的不确定性<sup>[35]</sup>。问题的解决主要依靠水文学、水动力学理论、计算机技术及测量技术的发展<sup>[36]</sup>。因此,融合 RS、GIS 等空间信息技术、强化城市暴雨洪水监测能力、进行参数敏感性分析,形成较好的快速的运算速度、准确的分析结果和预报预警等功能的城市雨洪模型必将成为雨洪模拟技术发展的趋势<sup>[37]</sup>。

总体而言,低影响开发(LID)措施对城市区域削峰减量有一定的功效,在以后发展建设中,考虑参数敏感性、输入数据误差以及模型结构误差等多种影响因素,强化具体的量化方法和精确的计算能力,可为

表 6 有无 LID 措施下城市雨洪模拟应用研究对比  
Table 6 Urban rain flood simulation application research with or without LID measures

| 模型            | 模型方法   | 模拟条件  | 降雨径流条件  | 峰流量<br>削减率/% | 径流量<br>削减率/% | 参考<br>文献 |
|---------------|--|---|---|--------------|--------------|----------|
| SWMM          | 产流 :入渗曲线法(Horton)<br>汇流 :非线性水库法<br>管网水流 :动力波法      | 研究区域 :清华大学校园<br>研究区域总面积 :18.7 hm <sup>2</sup><br>LID 措施改造面积 :1.525 hm <sup>2</sup> (8.2%)<br>LID 布设方案 :透水铺装 69%、<br>下凹式绿地 25%、雨水花园 3%、<br>地下蓄水池 3%    | 采用 5 年一遇设计暴雨<br>历时 10 h 17 min 区域<br>径流达到峰值状态                                     | 28.57        | 24.35        | [38]     |
|               | 产流 :入渗曲线法(Horton)<br>汇流 :非线性水库法<br>管网水流 :水动力学法     | 研究区域 :汉中市某一住宅商业区<br>研究区域总面积 :36.48 hm <sup>2</sup><br>LID 措施改造面积 :10.9 hm <sup>2</sup> (30%)<br>LID 布设方案 :下凹式绿地 80%、<br>透水砖 20%                       | 采用 5 年一遇设计暴雨<br>降雨历时 2 h  | 17.64        | —            | [39]     |
| MIKE Urban    | 产流 :入渗曲线法(Horton)<br>汇流 :非线性水库法<br>管网水流 :运动波法      | 研究区域 :北京市新开发区<br>研究区域总面积 :960 km <sup>2</sup><br>LID 措施改造面积 :33.6 km <sup>2</sup> (3.5%)<br>LID 布设方案 :雨水花园  | 采用 5 年一遇设计暴雨<br>降雨历时 2 h  | —            | 25.7         | [40]     |
|               | 产流 :入渗曲线法(Horton)<br>汇流 :等流时线法<br>管网水流 :运动波法       | 研究区域 :深圳市光明新区<br>研究区域总面积 :68 hm <sup>2</sup><br>LID 措施改造面积 :20.1 hm <sup>2</sup> (70.4%)<br>LID 布设方案 :多功能景观水体 99.5%、<br>复合介质生物滞留减排措施 0.5%             | 设计雨量来自示范区雨量<br>计场次降雨降雨历时 3 h  | 76           | 65           | [41]     |
| Digital water | 产流 :入渗曲线法(Green-Ampt)<br>汇流 :水文学方法<br>管网水流 :水动力学方法 | 研究区域 :长沙市某居民小区<br>研究区域总面积 :3.0 hm <sup>2</sup><br>LID 措施改造面积 :3.64 hm <sup>2</sup> (45%)<br>LID 布设方案 :绿色屋顶 7%、<br>下凹式绿地 23%、植被浅沟 26.5%、<br>渗透铺装 43.5% | 采用 0.5 年一遇设计暴雨<br>降雨总量 80.88 mm<br>降雨历时 1 h                                       | 30.51        | 46.43        | [42]     |
|               | 产流 :入渗曲线法(Horton)<br>汇流 :非线性水库法<br>管网水流 :动力波法      | 研究区域 :第一批海绵城市试点区<br>研究区域总面积 :1.352 5 hm <sup>2</sup><br>LID 措施改造面积 :0.312 7 hm <sup>2</sup> (23%)<br>LID 布设方案 :生态滞留池 65.37%、<br>透水铺装 34.63%           | 采用 10 年一遇设计暴雨<br>降雨总量 78.16 mm<br>平均雨强 39.08 mm/h<br>峰值雨强 211.36 mm/h<br>降雨历时 2 h | —            | 29           | [43]     |
| Info Works    | 产流 :入渗曲线法<br>汇流 :水动力学方法<br>管网水流 :水动力学方法            | 研究区域 :合肥市老城区<br>研究区域总面积 :273.35 m <sup>2</sup><br>LID 措施改造面积 :77.68 m <sup>2</sup> (28.42%)<br>LID 布设方案 :绿色屋顶 70.48%、<br>渗透铺装 20.37%、生物滞留池 9.15%      | 选取 1993 年为典型水平<br>年 以该年 4-11 月实际<br>降雨过程作为输入进行<br>长期连续模拟                          | —            | 26.89        | [44]     |
|               | 产流 :入渗曲线法(Horton)<br>汇流 :等流时线法<br>管网水流 :运动波法       | 研究区域 :天津某大学生活区<br>研究区域总面积 :3.32 hm <sup>2</sup><br>LID 措施改造面积 :1.46 hm <sup>2</sup> (45.3%)<br>LID 布设方案 :绿色屋顶 61.6%、<br>下凹式绿地 38.4%                   | 采用 5 年一遇设计暴雨<br>降雨历时 2 h<br>累计降水量为 78.7 mm  | 41.1         | 49.9         | [45]     |
| SWC           | 产流 :入渗曲线(Green-Ampt)<br>汇流 :非线性水库法<br>管网水流 :动力波法   | 研究区域 :嘉兴市蒋水港<br>研究区域总面积 :40.5 hm <sup>2</sup><br>LID 措施改造面积 :0.139 2 hm <sup>2</sup> (3%)<br>LID 布设方案 :雨水花园 34.5%、<br>植被浅沟 34.6%、生物浮岛 21.9%           | 全年平均降雨量<br>1 135.38 mm  | 21.2         | 23           | [46]     |
|               | 产流 :入渗曲线(Green-Ampt)<br>汇流 :非线性水库法<br>管网水流 :动力波法   | 研究区域 :嘉兴市晴湾佳苑<br>研究区域总面积 :3.3 hm <sup>2</sup><br>LID 措施改造面积 :0.448 hm <sup>2</sup> (5.4%)<br>LID 布设方案 :雨水花园 6.25%、<br>植被浅沟 40.18%、透水铺装 53.57%         | 采用 2014 年全年每日<br>每小时的降雨量为基础<br>降雨数据总降雨量<br>为 1 438 mm 最大小时<br>降雨量为 125.4 mm       | 35.4         | 40           | [46]     |

研究城市雨洪模型提供可靠的技术支持<sup>[47]</sup>。

### 2.2 面源污染模拟应用进展

在以往研究中,低影响开发(LID)技术的研究主要侧重于水量方面的削减效果,关于水质净化效果研究总体很少。表 7 归纳了几种常用模拟软件在有无 LID 措施下各种控制效果应用模拟,为妥善解决城市水质问题提供一定依据。

由表 7 可以看出 LID 多种措施组合串联效应的

广泛应用能较大程度上解决传统工艺易堵塞、渗透性差的问题并提升雨水控制效果,高强度降雨较低强度降雨对受纳水体造成更大的污染。

目前,城市面源污染模型虽有一定的研究成果但经验型的多,机理型的少,不能充分模拟污染物的生化反应过程<sup>[48]</sup>,所以软件在运用 LID 措施模拟方面存在一定的局限性<sup>[49]</sup>;同时,随着人们对模型模拟精度要求的提高,对于定量描述污染物迁移转化结果的可

表 7 有无 LID 措施下面源污染模拟应用研究对比  
Table 7 Non-point source simulation application research with or without LID measures

| 模型            | 模型方法                       | 模拟条件  | 降雨径流条件  | 峰值污染物浓度削减率/% |      |      |    | 参考文献 |
|---------------|----------------------------|---|---|--------------|------|------|----|------|
|               |                            |   |   | TSS          | COD  | TN   | TP |      |
| SWMM          | 污染物累积和冲刷模型<br>均选用指数模型      | 研究区域 北京某拟建小区<br>研究区域总面积 1.3 hm <sup>2</sup><br>LID 措施改造面积 0.177 hm <sup>2</sup> (14%)<br>LID 布设方案 植被浅沟 18.1%、<br>雨水花园 25.9%、渗透铺装 56%      | 采用 5 年一遇设计<br>暴雨降雨历时 2 h<br>降雨量 71 mm   | 73           | —    | —    | —  | [50] |
| MIKE          | 污染物累积和冲刷模型<br>均选用指数模型      | 研究区域 深圳市光明新区<br>研究区域总面积 68 hm <sup>2</sup><br>LID 措施改造面积 20.1 hm <sup>2</sup> (70.4%)<br>LID 布设方案 多功能景观水体 99.5%、<br>复合介质生物滞留减排措施 0.5%     | 采用 0.5 年一遇设计<br>暴雨降雨历时 1 h<br>降雨总量 80.88 mm                                       | 48           | 69   | 45   | 59 | [41] |
| Digital water | 污染物累积 指数函数<br>污染物冲刷 EMC 函数 | 研究区域 海绵城市试点区<br>研究区域总面积 1.35 hm <sup>2</sup><br>LID 措施改造面积 0.31 hm <sup>2</sup> (23%)<br>LID 布设方案 生态滞留池 65.37%、<br>透水铺装 34.63%            | 采用 10 年一遇设计<br>暴雨降雨历时 2 h<br>降雨总量 78.16 mm<br>平均雨强 39.08 mm/h<br>峰值雨强 211.36 mm/h | 56.5         | 41.5 | 49.5 | —  | [43] |
| SUSTAIN       | 污染物累积 指数函数<br>污染物冲刷 事件平均浓度 | 研究区域 嘉兴市晴湾佳苑<br>研究区域总面积 8.3 hm <sup>2</sup><br>LID 措施改造面积 0.448 hm <sup>2</sup> (5.4%)<br>LID 布设方案 雨水花园 6.25%、<br>植被浅沟 40.18%、透水铺装 53.57% | 采用 2014 年全年每日<br>每小时的降雨量为基础<br>降雨数据总降雨量为<br>1 438 mm,最大小时<br>降雨量为 125.4 mm        | 59           | 52   | 52   | 55 | [46] |

靠性引起了很大的争议,自然界本身固有的不确定性、模型不确定性和数据的不确定性都会导致理论值与真实值的差异<sup>[51]</sup>。敏感性分析是一种动态不确定性分析,是城市面源污染模型中不确定性分析常用的方法。现阶段,无论国内还是国外环境模型,不确定性分析主要应用于地下水、水文和空气质量模型方面,关于城市面源污染模型不确定性分析的研究还比较少,这也将成为面源污染模型未来研究方向之一。

综上,多种 LID 措施组合布施,是雨水污染控制效果改善的有效途径之一,进一步向模块化发展、与 GIS 的耦合应用以及在模型中引入模糊理论、不确定性分析和风险评价等是面源污染模型今后的发展趋势<sup>[52]</sup>。

### 3 模拟在应用中存在的问题

对上述城市雨洪及面源污染模型计算方法概述和模拟应用进展可以看出,随着城市化发展,国内外城市雨洪和面源污染模型得到了快速发展和广泛应用,但纵观这些方法应用,不同开发模式下多种监测技术和多过程耦合机制等方面研究仍存在一定的局限性,主要体现在以下几个方面:

(1)长期监测技术落后,数据累积不足<sup>[53]</sup>。目前资料的难获取和监测技术的落后性是模拟应用过程中最大挑战,数据的不足导致模拟过程中有较多参数难以设定,造成模拟结果真实情况可能存在较大偏差,进而影响模拟结果的预测。

(2)模型定量化结果与实测数据存在较大差距。大多数模型不能对暴雨携带的泥沙、水中污染物的生化反应过程等进行模拟<sup>[54]</sup>,同时,模型的构建往往需要

大量的参数输入,而这些参数的取值常存在一些不确定性,模型应用基本是结合实测数据进行率定、验证后直接使用,使得模型在精度上与实际情况存在很大差异,因此模型模拟结果的可靠性也引起了一些争议。

(3)国际上的模型应用于我国存在“水土不服”问题。如今被国际认可自主研发且通用的模型较少,缺乏结合我国实际情况所研发的模型,目前可通过增强模型的适应性检验以提高研究区模拟结果的精度和应用范围。

(4)对城市雨洪多种管理技术包括低影响开发(LID)技术等措施对城市地表径流量、水质调控效果模拟效果较差<sup>[55]</sup>。模拟效果的提高能更好地预测由于快速城市化建设导致的洪峰暴雨增大以及径流污染等问题,从而实现雨水资源有效利用和城市的可持续性发展。

### 4 结论与展望

城市雨洪和面源污染模拟在城市水环境管理中有不可替代的作用。多种模型计算方法综合应用是目前对模型模拟结果的合理完善,考虑多种影响因素、对模拟结果进行不确定性分析以及研究和开发水文学-水力学、水量-水质耦合模型是今后研究的重点。随着低影响开发(LID)技术的发展,强稳定性、高精度和快速计算能力是城市模拟发展的要求与未来发展的趋势。随着模型应用发展研究的深入,在宏观尺度上,未来模型在“3S”技术耦合、水量和水质监测和定量模拟等方面相继会得到进一步发展;与此同时,在微观尺度上,耦合土壤空隙介质变化过程中水流和溶质迁

移过程的理论与定量模型能更加准确地评估污染物负荷;地表水与地下水的区域耦合模型亟待提升,同时,结合水文与水质改善情况,模拟过程中可进一步分析低影响开发(LID)措施对城市发展所带来的经济、环境效益和社会效益,为区域水土环境保护决策提供定量工具。

## [参考文献]

- [1] 胡伟贤,何文华,黄国如,等.城市雨洪模拟技术研究进展[J].水科学进展,2010,21(1):137-144.  
Hu Weixian, He Wenhua, Huang Guoru, et al. Review of urban stormwater simulation techniques [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(1): 137-144.
- [2] 李家科,李亚,沈冰,等.基于SWMM模型的城市雨水花园调控措施的效果模拟[J].水力发电学报,2014,33(4):60-67.  
Li Jiako, Li Ya, Shen Bing, et al. Simulation of rain garden effects in urbanized area based on SWMM [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(4): 60-67.
- [3] 冯耀龙,肖静,马姗姗.城区产汇流计算方法分析研究[J].中国农村水利水电,2015(6):43-47.  
Feng Yaolong, Xiao Jing, Ma Shanshan. The analysis and study of urban runoff calculation method [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(6): 43-47.
- [4] 李玥,俞快,程娘珠,等.低影响开发的7种城市雨洪管理模型[J].广东园林,2016,38(4):9-13.  
Li Yue, Yu Kuai, Cheng Niangzhu, et al. Seven stormwater management models in low impact development [J]. Guangdong Landscape Architecture, 2016, 38(4): 9-13.
- [5] 宋晓猛,张建云,王国庆,等.变化环境下城市水文学的发展与挑战——城市雨洪模拟与管理[J].水科学进展,2014,25(5):752-764.  
Song Xiaomeng, Zhang Jianyun, Wang Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: urban stormwater modeling and management [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(5): 752-764.
- [6] 陈虹,李家科,李亚娇,等.暴雨洪水管理模型SWMM的研究及应用进展[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2015,43(12):225-234.  
Chen Hong, Li Jiako, Li Yajiao, et al. Progress on research and application of storm water management model (SWMM) [J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2015, 43(12): 225-234.
- [7] 张一龙,王红武,秦语涵.城市地表产流计算方法和径流模型研究进展[J].四川环境,2015(1):113-119.  
Zhang Yilong, Wang Hongwu, Qin Yuhuan. Review of urban surface runoff calculation method and relevant models [J]. Sichuan Environment, 2015(1): 113-119.
- [8] Yang H B, McCoy E L, Grewal P S, et al. Dissolved nutrients and atrazine removal by column-scale monophasic and biphasic rain garden model systems [J]. Chemosphere, 2010, 80(8): 929-34.
- [9] Warwick J J, Wilson J S. Estimating uncertainty of stormwater runoff computations [J]. Journal of Water Resource Planning & Management, 1990, 116(2): 187-204.
- [10] 岑国平,沈晋,范荣生,等.城市地面产流的试验研究[J].水利学报,1997(10):47-52.  
Cen Guoping, Shen Jin, Fan Rongsheng, et al. Experimental study on urban ground runoff [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(10): 47-52.
- [11] 杨永平.降雨径流相关法在金钱河南宽坪水文站洪水预报的应用[J].陕西水利,2016(3):7-8.  
Yang Yongping. Application of rainfall-runoff correlation method in flood forecast of Kuanping Hydrologic Station [J]. Shaanxi Water Resource, 2016(3): 7-8.
- [12] 邓培德.城市雨水道设计洪峰径流系数法研究及数学模型法探讨[J].给水排水,2014(5):108-112.  
Deng Peide. Study on the flood-peak runoff coefficient method of urban stormwater pipe design and mathematic model [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014(5): 108-112.
- [13] 任伯帜,周赛军,邓仁建.城市地表产流特性与计算方法分析[J].南华大学学报:自然科学版,2006,20(1):3-12.  
Ren Bozhi, Zhou Saijun, Deng Renjian. Analysis of urban surface runoff characteristics and computational methods [J]. Journal of Nanhua University: Natural Science Edition, 2006, 20(1): 3-12.
- [14] 任伯帜.城市设计暴雨及雨水径流计算模型研究[D].重庆:重庆大学,2004.  
Ren Bozhi. Study on the Urban Design Rainstorm and Rainfall Runoff Calculation Model [D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.
- [15] 岑国平,沈晋.城市暴雨径流计算模型的建立和检验[J].西安理工大学学报,1996(3):184-190.  
Cen Guoping, Shen Jin. Establishment and verification of urban storm runoff model [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1996(3): 184-190.
- [16] 王纲胜,夏军,牛存稳.分布式水文模拟汇流方法及应用[J].地理研究,2004,23(2):175-182.  
Wang Gangsheng, Xia Jun, Niu Cunwen. Flow routing method and its application in distributed hydrological modeling [J]. Geographical Research, 2004, 23(2): 175-182.
- [17] 温会.城市内涝积水量计算模型研究与应用[D].太原:太原理工大学,2015.  
Wen Hui. Research and Application of Calculation Model of Urban Waterlogging [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.
- [18] 张小娜,冯杰,刘方贵.城市雨水管网暴雨洪水计算模型研

- 制及应用[J]. 水电能源科学, 2008, 26(5): 40-42.  
Zhang Xiaona, Feng Jie, Liu Fanggui. Development and application of storm flood computation model for urban rain pipe network[J]. Water Resource and Power, 2008, 26(5): 40-42.
- [19] 任伯帆, 邓仁建. 城市地表雨水汇流特性及计算方法分析[J]. 中国给水排水, 2006, 22(14): 39-42.  
Ren Bozhi, Deng Renjian. Analyses of properties and calculation methods of urban surface rainwater conflux[J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(14): 39-42.
- [20] 班玉龙, 孔繁花, 尹海伟, 等. 土地利用格局对 SWMM 模型汇流模式选择及相应产流特征的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(14): 4317-4326.  
Ban Yulong, Kong Fanhua, Yin Haiwei, et al. Impacts of land use patterns on the overland flow routing options and simulation outputs of stormwater management models[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(14): 4317-4326.
- [21] 谢莹莹. 城市排水管网系统模拟方法和应用[D]. 上海: 同济大学, 2007.  
Xie Yingying. The Method and Application of Urban Sewer System Simulation[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [22] 汪俊杰. 城市雨水排水系统的管网模型研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.  
Wang Junjie. Study on Pipe Network Model of Urban Stormwater Drainage System[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [23] Gironás J, Roesner L A, Rossman L A, et al. A new applications manual for the Storm Water Management Model (SWMM)[J]. Environmental Modelling & Software, 2010, 25(6): 813-814.
- [24] 徐向阳, 李文起. 北京市管网排水流域雨洪模型研究[J]. 水利水电技术, 1993(4): 1-5.  
Xu Xiangyang, Li Wenqi. Study on rainfall model of drainage basin in Beijing[J]. Water Resource and Hydro-power Engineering, 1993(4): 1-5.
- [25] 刘文标, 傅春. 马斯京根法的改进[J]. 南昌大学学报: 工科版, 2007, 29(3): 303-306.  
Liu Wenbiao, Fu Chun. Improving on the Mskingum method[J]. Journal of Nanchang University: Engineering & Technology, 2007, 29(3): 303-306.
- [26] 王明胜. 瞬时单位线法在水文资料缺乏地区洪峰流量推算中的应用[J]. 科技资讯, 2010(28): 31.  
Wang Mingsheng. Application of instantaneous unit hydrograph in the calculation of flood peak discharge in areas lack of hydrologic data[J]. Science & Technology Information, 2010(28): 31.
- [27] 李家科, 刘增超, 黄宁俊, 等. 低影响开发(LID)生物滞留技术研究进展[J]. 干旱区研究, 2014, 31(3): 431-439.  
Li Jiako, Liu Zengchao, Huang Ningjun, et al. Advance in the study on bioretention technology for low-impact development[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(3): 431-439.
- [28] 边博. 城市地表污染物累积模型研究[J]. 土木工程, 2010, 32(6): 137-141.  
Bian Bo. Modeling the buildup of pollutants on urban different land use types[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32(6): 137-141.
- [29] Murakami M, Fujita M, Furumai H, et al. Sorption behavior of heavy metal species by soakaway sediment receiving urban road runoff from residential and heavily trafficked areas[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 164(2/3): 707-712.
- [30] 巴特, 杨昆, 朱彦辉, 等. 基于开源 GIS 的城市非点源污染负荷模拟研究[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(11): 233-238.  
Ba Te, Yang Kun, Zhu Yanhui, et al. Design and implementation of urban non-point source pollution load simulation system based on open source GIS[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(11): 233-238.
- [31] 秦攀, 雷坤, Khu Soon-Thiam, 等. 我国城市非点源污染特征及其模型应用探讨[J]. 环境工程技术学报, 2016, 6(4): 397-406.  
Qin Pan, Lei Kun, Khu Soon-Thiam, et al. Discussion on characteristics and model application of urban nonpoint source pollution in China[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2016, 6(4): 397-406.
- [32] 马箐, 沙晓军, 徐向阳, 等. 基于 SWMM 模型的低影响开发对城市住宅区非点源污染负荷的控制效果模拟[J]. 水电能源科学, 2015, 24(9): 53-57.  
Ma Qing, Sha Xiaojun, Xu Xiangyang, et al. Control effect simulation of low impact development on non-point source pollution load in urban residential area based on SWMM model[J]. Water Resource and Power, 2015, 24(9): 53-57.
- [33] 王龙, 黄跃飞, 王光谦. 城市非点源污染模型研究进展[J]. 环境科学, 2010, 31(10): 2532-2540.  
Wang Long, Huang Yuefei, Wang Guangqian. Review of urban nonpoint source pollution models[J]. Environmental Science, 2010, 31(10): 2532-2540.
- [34] 侯改娟. 绿色建筑与小区低影响开发雨水系统模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.  
Hou Gaijuan. Study on Rainwater System Model of Low Impact Development of Green Building and Community[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [35] McDonald R I, Green P, Balk D, et al. Urban growth, climate change and freshwater availability[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(15): 6312.
- [36] Deletic A, Dotto C B S, McCarthy D T, et al. Assessing uncertainties in urban drainage models[J]. Physics & Chemistry of the Earth Parts A/B/C, 2012, 42/43/44(208): 3-10.



- [37] 刘艳丽, 梁国华, 周惠成. 水文模型不确定性分析的多准则似然判据 GLUE 方法[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2009, 41(4).  
Liu Yanli, Liang Guohua, Zhou Huicheng. Multi-criteria likelihood criterion GLUE method for hydrological model uncertainty analysis[J]. Journal of Sichuan University Engineering Science Edition, 2009, 41(4).
- [38] 刘一瑶, 郭国文, 孟真, 等. 基于低影响开发的清华学堂路雨洪管理与景观设计研究[J]. 风景园林, 2016(3): 14-20.  
Liu Yiyao, Guo Guowen, Meng Zhen, et al. Stormwater management and landscape design on Xuetao Road of Tsinghua Campus based on the low impact development technology[J]. Landscape Architecture, 2016(3): 14-20.
- [39] 余嵘, 赵丹, 刘渊博, 等. SWMM 模型中不同 LID 措施在排水系统模拟中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2016(1): 35-38.  
Yu Rong, Zhao Dan, Liu Yuanbo, et al. Application of different LID measures of SWMM model in the drainage system in simulation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(1): 35-38.
- [40] 王文亮, 边静, 李俊奇, 等. 基于模型分析的低影响开发提升城市雨水排水标准案例研究[J]. 净水技术, 2015(4): 100-104.  
Wang Wenliang, Bian Jing, Li Junqi, et al. Case study on low impact development (LID) for design standard upgrading of urban stormwater drainage based on model analysis[J]. Water Purification Technology, 2015(4): 100-104.
- [41] 戚海军. 低影响开发雨水管理措施的设计及效能模拟研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2013.  
Qi Haijun. Design and Efficiency Simulation of Rainwater Management Measures for Low Impact Development [D]. Beijing: Beijing Architecture University, 2013.
- [42] 许仕荣, 王晔. 降雨强度及降雨间隔对低影响开发雨洪控制的影响及分析[J]. 科学技术与工程, 2015(18): 219-223.  
Xu Shirong, Wang Ye. Effect and analysis of rainfall intensity and interval on stormwater control of low impact development[J]. Science Technology and Engineering, 2015(18): 219-223.
- [43] 郭效琛, 杜鹏飞, 赵冬泉, 等. 基于 DigitalWater 的两种 LID 措施模拟方法对总量的影响评估[J]. 给水排水, 2016(S1): 24-45.  
Guo Xiaochen, Du Pengfei, Zhao Dongquan, et al. Evaluation of impacts of two LID simulation methods based on digitalWater on total amount[J]. Supply and Drain Water, 2016(S1): 24-45.
- [44] 张颖, 李田. LID 措施降低老城区合流制溢流污染的模拟研究[J]. 中国给水排水, 2016(11): 127-131.  
Zhang Ying, Li Tian. Simulation on LID measures for control of combined sewer overflows in existing urban areas [J]. China Water & Wastewater, 2016(11): 127-131.
- [45] 马姗姗, 庄宝玉, 张新波, 等. 绿色屋顶与下凹式绿地串联对洪峰的削减效应分析[J]. 中国给水排水, 2014(3): 101-105.  
Ma Shanshan, Zhuang Baoyu, Zhang Xinbo, et al. Analysis of peak flow reduction with green roof and sunken lawn applied in series[J]. China Water & Wastewater, 2014(3): 101-105.
- [46] 李研. 基于 SUSTAIN 与 SWC 的城市雨水 LID 设施评价方法研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2015.  
Li Yan. Study on Evaluation Method of Urban Rainwater LID Facilities Based on SUSTAIN and SWC [D]. Beijing: Beijing Architecture University, 2015.
- [47] 陈昌军, 郑雄伟, 张卫飞. 三种水文模型不确定性分析方法比较[J]. 水文, 2012, 32(2): 16-20.  
Chen Changjun, Zheng Xiongwei, Zhang Weifei. Comparison of three kinds of hydrological model uncertainty analysis methods[J]. Hydrology, 2012, 32(2): 16-20.
- [48] Shen Z Y, Chen L, Chen T. Analysis of parameter uncertainty in hydrological modeling using GLUE method: a case study of SWAT model applied to Three Gorges Reservoir Region, China[J]. Hydrology & Earth System Sciences Discussions, 2011, 8(4): 8203-8229.
- [49] 徐宗学, 李占玲. 黑河源区径流模拟与模型不确定性分析[C]// 中国水利学会水资源专业委员会 2009 学术年会, 2009.
- [50] 马晓宇. SWMM 模型应用于城市住宅区非点源污染负荷模拟研究[D]. 温州: 温州医学院, 2012.  
Ma Xiaoyu. Application of SWMM Model to Simulation of Non-point Source Pollution Load in Urban Residential Area [D]. Wenzhou: Wenzhou Medical College, 2012.
- [51] Delleur J W. New results and research needs on sediment movement in urban drainage[J]. Journal of Water Resource Planning & Management, 2001, 127(3): 186-193.
- [52] 邢可霞, 郭怀成. 环境模型不确定性分析方法综述[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(5): 112-114.  
Xing Kexia, Guo Huaicheng. A review of uncertainty analysis methods for environmental models [J]. Environmental Science and Technology, 2006, 29(5): 112-114.
- [53] 郑辉. 南京市主城区暴雨内涝灾害预报模拟[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.  
Zheng Hui. Simulation of Waterlogging Disaster Forecast in the Main Urban Area of Nanjing [D]. Nanjing: Nanjing Information Engineering University, 2014.
- [54] 陈明燕. 山地城市雨水系统数值模拟及优化设计[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.  
Chen Mingyan. Numerical Simulation and Optimization Design for the Rain System in Mountainous City [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [55] 李昌爱. 近 35 年苏南典型地区的土地利用动态变化研究: 以宜兴市为例[D]. 芜湖: 安徽师范大学, 2003.  
Li Chang'ai. Land Use Change in the Typical Region of Jiangsu Province for Last 35 Years: a Case Study for Yixing City [D]. Wuhu: Anhui Normal University, 2003.