

# 低影响开发单项设施模拟模型研究与应用进展

李亚娇<sup>1</sup>, 徐毓江<sup>1</sup>, 李家科<sup>2</sup>

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 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)

**摘要:** 随着我国城市化进程的加快,城市内涝、雨水径流污染及水质恶化等问题日益严峻。低影响开发(LID)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,在削减城市雨洪和滞留污染物等方面效果显著。为更好的模拟 LID 措施对环境带来的影响,不同尺度低影响开发模拟模型应运而生。本文总结了 SWC、HYDRUS、DRAINMOD、RECARGA 等典型小尺度单项设施模拟模型的特点、结构、适用条件和优缺点,分析了现有典型单项设施模拟模型的不足之处,指出模型参数选择、模型适应性检验以及水质水量耦合模型研发为今后的研究方向。

**关键词:** 低影响开发(LID); 单项设施模型; SWC 模型; HYDRUS 模型; DRAINMOD 模型; RECARGA 模型  
**中图分类号:** TV213.9; X52      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-643X(2017)05-0135-07

## Advance in simulation model research and application for single facility of low impact development

LI Yajiao<sup>1</sup>, XU Yujiang<sup>1</sup>, LI Jiako<sup>2</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;  
2. State Key Laboratory Base of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** With the acceleration of urbanization process in China, the problems involving urban waterlogging, rainwater runoff pollution and water quality deterioration have become increasingly serious. As a new stormwater management strategy of international urban water environmental protection and sustainable development, the low impact development (LID) strategy can dramatically reduce urban stormwater and detained pollutants. In order to better simulate the effects of LID on the environment, different scale LID simulation models have been developed. This paper summarizes the characteristics, structures, application conditions, advantages and disadvantages of typical small scale simulation models for single facilities of LID, including models of SWC, HYDRUS, DRAINMOD, and RECARGA. The shortcomings of existing typical single facility model are analyzed. The research trends in the future are put forward, which include the parameter selection, the adaptability verification of model and the coupling model development of water quality and quantity.

**Key words:** low-impact development (LID); single facility model; storm water calculator (SWC); HYDRUS; DRAINMOD; RECARGA

## 1 研究背景

随着城市化进程的加快,城市内涝、水环境恶化及雨水径流污染等问题日益凸显。来自屋面、道路、停车场、绿化景观区域的雨水不仅造成排水管道溢流,也携带大量非点源污染进入水体<sup>[1]</sup>。一方面,城市化进程改变了原有的水文循环,使降雨入渗量

大大减少,汇流时间缩短,雨洪峰值增加,导致城市雨洪危害加剧,水涝灾害频发;另一方面,城市开发不合理,可渗透下垫面表面积骤减,暴雨径流产生的面源污染已成为城市水环境恶化的重要原因<sup>[2]</sup>。针对城市径流污染,传统的“末端治理”设施占地面积大、建设集中、造价高,虽然在一定程度上降低了初期雨水污染,却无法改善城市环境<sup>[3]</sup>。

收稿日期:2017-04-25; 修回日期:2017-06-28

基金项目:陕西省自然科学基金重点项目(2015JZ013);国家自然科学基金项目(51279158)

作者简介:李亚娇(1978-),女,辽宁大石桥人,博士,副教授,研究方向为环境水文。

低影响开发(low impact development, LID)是在最佳管理措施(Best Management Practices, BMP)基础上提出的新概念<sup>[4]</sup>。近年来,LID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,愈来愈被学者广泛使用,我国海绵城市建设理念也基于此。LID于20世纪90年代发源于美国马里兰州,其主要包括生物滞留(bio-retention)、绿色屋顶(green roof)、可渗透/漏路面铺装系统(permeable/porous pavement system, PPS)等措施<sup>[5]</sup>。LID的出现为治理城市化快速发展引起的非点源污染问题提供了新的思路,为更好应用LID的各种措施,低影响开发模拟模型应运而生,且很快得到了广泛的关注和应用。这些模型既包括适用于流域的大尺度模型也包括适用于单项设施的小尺度模型。一般适用于LID流域的大尺度模型有10种左右,例如SWMM<sup>[1,6-9]</sup>、HSPF<sup>[1,9-10]</sup>、InfoWorks CS<sup>[1,8-9,11]</sup>、SLAMM<sup>[1,9]</sup>、STORM<sup>[8-9,12]</sup>、DR3M - QUAL<sup>[8-9]</sup>、MOUSE<sup>[8-9]</sup>、SUSTAIN<sup>[8,13-14]</sup>、MIKE<sup>[15-16]</sup>等。但适用于LID典型单项设施的小尺度模型并不多,主要有SWC<sup>[17-18]</sup>、DRAINMOD<sup>[19-21]</sup>、HYDRUS<sup>[22]</sup>、RE-CARGA<sup>[21,23]</sup>。国内外对大尺度模拟模型使用率较高,相应模型成熟,适用性广泛,如SWMM、SUSTAIN等。但系统的分析LID单项设施模拟模型的研究,国内外尚不多见。基于此,本文总结典型小尺度模型的特点、结构、适用条件和优缺点,分析现有典型单项设施模拟模型的不足之处,以期对LID单项设施的结构优化和净化效果的提高以及我国的海绵城市建设提供参考和依据。

## 2 LID 单项设施模拟模型及研究进展

### 2.1 LID 单项设施模拟模型概述

模型模拟是指导LID设计、预测运行结果的有效手段。为优化系统的运行,开发一些高灵敏度、高精度的模型很有必要<sup>[24]</sup>。对于LID单项设施模型而言,典型模型有SWC、HYDRUS、DRAINMOD、RE-CARGA 4种。此外,Deletic<sup>[25]</sup>开发了一维模型TRAVA,该模型是在假设植物未被水流淹没的条件下,预测径流的产生和泥沙的运移,既能用于预测出流沉积物的粒度分布,又能用于预测生物滞留带对泥沙的去除效果;随后又对TRAVA模型进行了改进,改进后的模型对预测出水中的泥沙量有较好效果,但该模型对除泥沙外的污染物预测尚显不足<sup>[26]</sup>。Li Jiake等<sup>[27]</sup>基于填料平衡浓度的假设,建立了生物滞留系统出水磷预测模型,该模型既适用

于短期也适用于长期模拟。对于短期或单场降雨,高浓度磷含量的填料中的浓度关系为 $C_{eq} > C_e > C_0$ ( $C_{eq}$ 为平衡浓度, $C_e$ 为流出浓度, $C_0$ 为入流磷浓度),低浓度磷含量的填料中 $C_{eq} < C_e < C_0$ ;在长期的模拟中,入流雨水与填料平衡磷浓度的关系为 $C_{eq} \approx C_e \approx C_0$ 。同时,该模型还解释了磷浓度随填料深度变化。以下对典型LID单项设施模型进行概述。

2.1.1 SWC 模型 SWC(Storm Water Calculator)是2014年由USEPA发布的城市雨洪管理计算机模型程序,使用SWMM5(EPA,2010)<sup>[28]</sup>的径流、入渗和LID子模型作为其后台计算引擎,通过内嵌的全美范围长期的气象、水文和LID设施等资料测算模拟区域的径流量。该模型主要用于分析雨水径流生成量、滞留量和LID设施类型及其面积,也可以直观显示出模拟区域的降雨径流比例关系。每种控制设施都有特定的设计参数,同时根据实际情况,使用者可以将所需设施的默认参数进行修改。SWC模型适用于土壤均匀、场地规模较小的环境中。其模拟的水文过程包括植被表面的蒸发、洼蓄降雨的蒸发、土壤的渗透损失和地表漫流<sup>[17]</sup>。

SWC模型具有位置、降雨量、蒸发量、土壤类型、气候变化、地形、土壤排水、土地覆盖和LID设施等9个输入界面<sup>[29]</sup>,并且可模拟以面积为参数的屋面断接、收集雨水、绿色屋顶、雨水花园、绿化带、渗坑和渗透漏水铺装等7种LID设施。而且以上7种LID设施都可以被该模型任意进行简单组合。每种控制设施都有特定的设计参数,根据实际情况,使用者可以将所需设施的默认参数进行相应的修改<sup>[22]</sup>。该模型能够利用简单的输入条件进行运算,直观显示出模拟区域的降雨径流比例关系。但由于该软件的使用需要获取大量前期基础资料,故对不同地区的推广使用存在一定局限性<sup>[30]</sup>。

2.1.2 HYDRUS 模型 HYDRUS-1D是由美国盐土实验室(US Salinity laboratory)所研发的,该模型可用于计算盐分运移规律和包气带水分。且不仅可以进行建模用以分析饱和-非饱和多孔介质水的流动和多种溶质运移,也可以模拟非均匀土壤的水流区域<sup>[31]</sup>。近年来在农业领域或室内模拟试验中,该模型越来越被广泛应用。如计算田间氮的转化和流失<sup>[32-34]</sup>;农药在田间的转化迁移<sup>[35]</sup>;灌溉水量周期性变化<sup>[36-37]</sup>;重金属离子的运移<sup>[38-39]</sup>等。

HYDRUS-1D模型不仅能准确模拟LID的小型试验出水情况,也可以准确模拟污染物浓度的垂向分布。在各个参数的实测值和经验值较为准确的

情况下,其模拟结果比较接近实测值,故实用价值很高。但 HYDRUS-1D 模型不能模拟生物滞留槽中微生物的生化反应;仅能模拟污染物的物理吸附和化学反应。而由于现阶段很难准确获得中下层非饱和介质土壤特性曲线的参数值,所以这也将 HYDRUS-1D 应用于现有 LID 技术的障碍<sup>[40]</sup>。

**2.1.3 DRAINMOD 模型** DRAINMOD 是一种计算机模拟长期的农田排水模型,主要应用于农业领域。1980 年由北卡罗来纳州立大学生物与农业工程系的 R. Wayne Skaggs 博士开发。该模型被开发以来,已被应用于控制排水、灌溉、湿地水文、氮动态,现场废水处理、森林水文和其他应用程序的农业排灌系统<sup>[19]</sup>。近年来,DRAINMOD 模型也逐渐被应用于 LID 设施调控效果的模拟,如验证和校准生物滞留池的水文特性<sup>[41]</sup>等。该模型主要输入参数包括模拟区域的气象数据(日最高、最低气温等)、水力设计参数(排水沟渠的深度、间距等)、土壤参数(土壤水分特性曲线,不透水层深度,饱和导水率等)、以及作物资料(作物根系深度和种植及收获日期等)等等。该模型还可以根据实际要求,模拟土壤中的

氮素转化以及盐分积累<sup>[20]</sup>。输出参数为排泄水量、氮素流失、盐分运移、蒸散量等<sup>[21]</sup>。

**2.1.4 RECARGA 模型** RECARGA 是由 Wisconsin 大学研发的专门针对生物滞留池等入渗设施水文性能分析和设计的软件,具有界面友好、操作简单等特点,用户还可以通过修改程序中的土壤参数满足自己特定的要求<sup>[23]</sup>。

该模型可以分析不同设计要素下生物滞留池的水文性能,以此为生物滞留池的合理设计提供理论依据。RECARGA 模型采用 TR-55CN 程序模拟研究区(透水性区域和不透水性区域)的径流量。其输入参数主要包括不透水性区域的比例、研究区域面积和 CN(无量纲综合参数,用来反映研究区域的土壤特性和土地利用特征)<sup>[42-43]</sup>。模型输出包括水量平衡方程的各项要素(如排泄水量、地下水补给、溢出水量等)。因此,利用该模型可以反复设计模拟生物滞留池的各个要素(如根区土壤特性、面积等),从而达到特定的性能目标(如增加地下水入渗量,降低径流量等)。

4 种 LID 单项设施模拟模型概况如表 1 所示。

表 1 LID 单项设施模拟模型概况<sup>[17,43]</sup>

模型概况	SWC	HYDRUS	DRAINMOD	RECARGA
发行方	USEPA	US Salinity laboratory	U. S. Department of Agriculture	Dussaillant
模拟类型	水量模型	水量模型、水质模型	水量模型	水量模型
模拟方式	连续模拟、暴雨事件	连续模拟、暴雨事件	连续模拟、暴雨事件	连续模拟、暴雨事件
功能	输出降雨径流比例关系、雨水径流生成量、滞留量等。	输出水量、氮(氨氮和硝氮)、磷(磷酸盐)和常见金属离子等。	输出排泄水量、氮素流失、盐分运移等。	输出溢流和排泄水量、地下水补给量、水量消减曲线等。
模型结构	Green-Ampt 模型计算土壤入渗率 3 个参数:1. 饱和导水率(Ksat);2. 吸入水头;3. 初始水分亏缺(IMD)。	Pemman 植物蒸发方程,水分胁迫和盐分胁迫模型处理根系吸水过程;PHREEQC 模型;Logistic 方程模拟植物生长过程;Freundlich 非线性方程模拟土壤吸附过程。	Green-Ampt 入渗模型、Hooghoudt 和 Kirkham 排水公式、Thornthwaite 蒸发模型、氮素运移、盐分运移模型。	TR-55CN 程序模拟研究区域的径流量、Green-Ampt 模型模拟入渗、van Genuchten 非线性方程模拟介质中的水分运动。

表 1 中按照模拟类型可分为水量模型和水质模型,其中,仅有 HYDRUS-1D 既可模拟水量也可模拟水质,其余 3 种模型只能模拟水量;按照模拟方式可分为单场降雨和连续模拟,4 种模型均可进行两种方式模拟。SWC 是 2014 年由 USEPA 发布,可以将任意 LID 设施进行简单组合,但尚属于新型模型

且使用率不高,使用 SWC 模型模拟的成果并不多见;HYDRUS 和 DRAINMOD 不仅模型成熟、易于操作,而且长期监测结果表明这两种模型较其它模型更精确,故应用最为广泛。

**2.2 LID 单项设施模拟模型应用进展**

李研<sup>[17]</sup>用 SWC 模型对浙江省嘉兴市蒋水港生

态驳岸研究区域进行建模,根据模拟区域的地形、土壤类型、蒸发量、降雨量以及土壤覆盖等基础数据,对该研究区域内地表降雨量与径流量的关系、降雨天数、降雨滞留率以及不同重现期条件下降雨量与径流量的关系进行模拟,并评估了 LID 设施削减径流量的潜力。结果表明,产生径流的主要因素是不透水面积的变化,同时,对于 30 mm 以下降雨所产生径流量,LID 设施具有良好的削减效果;但对于重现期五年以上的强降雨情形,其削减效果仍然有限,又由于该模型内嵌美国城市气象数据,在使用过程中需选择与研究地气候相近的城市,故计算数据精确性不高,具有一定的误差。

HYDRUS-1D 模型主要应用于农业水土工程领域。赖晓明等<sup>[44]</sup>利用 HYDRUS-1D 模型并结合深层土壤溶液取样和氮磷浓度的测定,对太湖流域典型稻麦轮作农田的土壤水分渗漏作了模拟,分析了在当前耕作方式下农田水分渗漏和氮磷淋失特征。结果表明,土壤水的渗漏与前期土壤含水率、降雨及灌溉有关。近年来,该模型也逐渐被应用于 LID 设施调控效果的模拟。李家科等<sup>[45-46]</sup>、李鹏等<sup>[47]</sup>利用 HYDRUS-1D 模型对在生态滤沟系统中的 3 种入流浓度下 TP 迁移进行了模拟,TP 出水浓度模拟值与实测值平均相对误差分别为 14.11%、17.33% 和 26.57%,模拟结果可靠。同时也用该模型模拟了 TN 污染物溶质运移的过程,因对氮的去除而言,生物作用相对明显,故模拟效果偏差较大。但该软件不能模拟生物滞留槽填料层中微生物的生化反应,仅能模拟污染物的物理吸附及其伴随的化学反应,因此在模拟上有一定的局限性。

DRAINMOD 模型是一个田间水文模型,主要应用于农业领域。罗纨等<sup>[48]</sup>采用 DRAINMOD 模型对宁夏银南灌区稻田的田间地下水位和排水过程进行了模拟。研究发现,年平均排水量误差仅为 0.4%,非常接近试验观测值。王少丽等<sup>[49]</sup>运用 DRAINMOD 模型模拟了不同排水系统布置下的地下水位和排水量,发现实测结果非常接近模拟结果,说明该模型可以对田间水文过程作较好的预测。近年来,LID 设施调控效果的模拟也逐渐应用此模型。Brown 等<sup>[42]</sup>应用 DRAINMOD 模型来验证和校准北卡罗来纳州 Nashville 和 Rocky Mount 两处生物滞留池的水文特性,考虑的因素主要有填料的类型、填料的深度、底层土壤类型以及排水结构等。结果表明,两处生物滞留池排水和蒸散发模拟效果良好。

RECARGA 模型为生物滞留入渗模型。SUN

等<sup>[50]</sup>通过 RECARGA 模型分析了位于美国雷内克萨市一处停车场的 LID 单项设施的水文性能指标,发现对于大部分水文指标来说,表面积是最敏感的因素,砾石深度是不敏感因素,种植土壤的饱和入渗率和原生土壤饱和入渗率是其他两个最敏感的元素。朋四海等<sup>[51]</sup>通过该模型对合肥市建造的 3 个生物滞留设施的水文效应以及对径流的净化效果进行考察,提出建有下排水系统的生物滞留设施的服务面积比宜取 5%~7%,填料渗透速率宜取 3~5 cm/h,设施的表面出水深度宜取 15~20 cm。孙艳伟等<sup>[52]</sup>利用 RECARGA 模型模拟了生物滞留系统的水文效应,表明影响其地下水补给幅度、积水时间和径流削减幅度的最重要影响因素是生物滞留池面积。当研究区域中不透水面积有 15% 左右为生物滞留池的面积时,径流削减量可达到 80%,且可将其补给地下水;当出于为了增加地下水入渗补给的目的而设计生物滞留池时,影响地下水入渗补给最重要的因素为研究区域天然土壤的饱和水力传导系数。

综上所述,SWC 模型适用于分析雨水径流生成量、滞留量和 LID 设施类型及其面积,适用于土壤均匀、场地规模较小的环境;HYDRUS 模型可用于模拟田间尺度的水盐运移规律、地下水污染评估和计算农业领域或室内试验的径流和泥沙,氮、磷等元素的浓度和流失,也适用于分析生物滞留系统对城市径流的净化效果和污染物的迁移机理;DRAINMOD 模型可以准确地预测地下水位、排水速率和排水总量,尤其适用于分析长时间序列的田间水文模拟、氮素的转化和盐分的积累以及盐碱地的灌溉和排水系统,也可用于 LID 设施水文模拟;RECARGA 模型适用于模拟生物滞留入渗的各项要素。

### 3 结果与讨论

对上述 4 种典型 LID 单项设施模型从优缺点、特点 3 方面来进行详细比较,具体如表 2 所示。并指出其存在问题,以供使用者参考。

由表 2 知,上述 4 种模型都由欧美国家机构研发,有些模型内嵌自己国家的城市气象数据,针对性较强,所以在使用过程中局限性较大,如 SWC 模型。HYDRUS 模型的模拟结果比较接近实测值,故实用价值很高。但由于现阶段很难获得中下层非饱和介质土壤特性曲线的参数值,所以这是目前将 HYDRUS 应用到现有 LID 技术的阻碍。DRAINMOD 模型为田间水文模型,它既可以连续不断的进行长期模拟,也可模拟多种不同的排水情况。但未总结降雪、融雪以

及冻融情况下对土壤中水分运移过程的影响。RE-CARGA 模型既可以准确模拟雨水径流通过 LID 设施

的非均质渗透状况,也可以预测 LID 系统的堵塞问题,但模型较为复杂,计算精度不高。

表 2 单项设施模拟模型优缺点、特点对比<sup>[17,43,53-54]</sup>

模型名称	特点	优点	缺点
SWC	可以直观显示出模拟区域的降雨径流比例关系。能够模拟植被表面或洼蓄降雨的蒸发、土壤的渗透损失,未涉及植被吸收散失或重新转化为地表水进入排水渠道或溪流等渗透水的最终转化路径。	可以任意将 LID 设施进行简单组合。每种控制设施都有特定的设计参数,根据实际情况,使用者可以将所需设施的默认参数进行相应的修改,在强大数据库下的简化模型,操作简便,易于推广。	模型内嵌美国城市气象数据,使用过程中,需选择与研究地气候,相近的城市,计算数据精确性不高,具有一定的误差,影响模拟结果准确性。对不同地区的推广使用有一定的局限性。
HYDRUS	既可以预测排泄水量,也可以预测出流水质(部分污染物)。	能准确模拟 LID 的小型试验出水情况,也可以准确模拟污染物浓度的垂向分布。在各个参数的实测值和经验值较为准确的情况下,其模拟结果比较接近实测值,实用价值很高。	不能模拟生物滞留槽中微生物的生化反应;仅能模拟污染物的物理吸附和化学反应。而由于现阶段很难准确获得中下层非饱和介质土壤特性曲线的参数值,所以这也是将 HYDRUS - 1D 应用于现有 LID 技术的障碍。
DRAINMOD	可以准确地预测地下水位、排水速率和排水总量,尤其适合于长时间序列水文模拟。该模型区别于其他模型之处主要在于:其内部贮水区排水结构和土壤含水率的计算方法,DRAINMOD 模型使用土壤水分分布特征曲线来研究填料介质中的水文特性。	可以连续不断的进行长期模拟(50 年或者更多),对生物滞留设施进行校正和检验。也可模拟多种不同的排水情况(其他模型到目前为止仍未做到这点)。	未总结降雪、融雪以及冻融情况下,对土壤中水分运移过程的影响,因此,只适用于湿润地区土壤没有冻融的条件。
RECARGA	能够预测不同根区深度、不同介质层土壤、不同天然土壤、不同降水类型以及出流设施对 LID 水文效应的影响。	可以准确的模拟雨水径流通过 LID 设施的非均质渗透状况,也可以预测 LID 系统的堵塞问题。	该模型较为复杂,对一特定的暴雨量常会出现保守的设计。而且在预测粒径小于 6 $\mu\text{m}$ 的颗粒浓度方面尚缺乏灵敏性。

通过上述分析,LID 单项设施模拟模型研究的不足之处为:对于 LID 技术的很多研究,仅仅只是局限在某些具体措施上,缺乏对 LID 技术全面、系统深入的监测、模拟和评价研究。模型模拟研究需要结合研究区域土地利用的实际情况,用监测数据来验证模型的准确性,从而指导 LID 措施的建造和设计,但这些数据往往积累不够。目前,关于 LID 技术的研究大多基于小试及模拟降雨的条件,对各种污染物的影响系统效能发挥因素、去除机理等方面尚未明晰,也缺乏对长期运行效果进行考察。所以 LID 技术模拟模型的发展仍处于起步阶段,需要大量的研究为目前众多问题的解决提供理论支持。

## 4 结论与展望

本文系统论述和分析了 4 种典型 LID 单项设施模型的发展历史、模拟方式、模型类型、代表研究、模型结构及特点等。同时,归纳了 4 种模型的优缺点及适用性。相对而言,HYDRUS、DRAINMOD 两个模型较 SWC、RECARGA 成熟,适用性也更加广泛。通过上述分析,可以预期以下方面将成为 LID 技术模拟研究的重要研究方向:

(1) 单项设施模拟模型参数的研究。由于我国许多城市基础数据匮乏,资料无从查找或查找起来较困难,而且在 LID 技术研究与应用上主要是借鉴

国外的模型。因此,如何准确获取大量的城市基础数据是我国研发 LID 模型的一个方向。

(2) 单项设施模拟模型适应性的研究。模型模拟的研究需要结合研究区域的实际情况,国外模型在我国不同地区的模拟情况不同。我国南方地区人口密集,城市化进展快,水污染程度相对严重;而我国北方地区发展较南方相对落后,特别是黄土高原地区环境恶劣,地形复杂。因此,检验和改进模型是目前急需开展的工作之一。结合我国实际情况对模拟模型进行精度的检验以及必要的修正或改进,以提高模型的预测精度。

(3) 水量水质耦合模型的研发。现有模型功能有限,开发高灵敏度、高精度、适用范围广、考虑多种影响因素、能够预测多种污染物(尤其是溶解性污染物和超细污染物)、水质水量耦合的机理模型是今后发展的重点。

#### 参考文献:

- [1] 秦语涵,王红武,张一龙. 城市雨洪径流模型研究进展[J]. 环境科学与技术,2016,39(1):13-19.
- [2] 尹澄清. 城市面源污染的控制原理和技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [3] 杨德敏,曹文志,陈能汪,等. 厦门城市降雨径流氮、磷污染特征[J]. 生态学杂志,2006,25(6):625-628.
- [4] 赵林波,李龙,陈新,等. 城市雨洪管理新模式——低影响开发(LID)[J]. 价值工程,2013(24):147-148.
- [5] 孙艳伟,魏晓妹,Pomeroy C A. 低影响发展的雨洪资源调控措施研究现状与展望[J]. 水科学进展,2011,22(2):287-293.
- [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.
- [7] Campbell C W, Sullivan S M. Simulating time-varying cave flow and water levels using the storm water management model[J]. Engineering Geology, 2002, 65(2-3):133-139.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 毛云峰,王红武,高原,等. 基于 InfoWorks CS 软件的上海市某排水系统运行现状评估[J]. 给水排水,2013,39(12):111-114.
- [12] 哈斯纳维 M D, 董耀华. 雨水收集在减缓洪水与泥沙淤积中的作用[J]. 水利水电快报,2016,37(2):36-39.
- [13] 邢薇,王浩正,赵冬泉,等. 城市暴雨处理及分析集成模型系统(SUSTAIN)介绍[J]. 中国给水排水,2012,28(2):29-33.
- [14] 高洁,王如松,周传斌,等. 基于 SUSTAIN 模型方法的社区暴雨径流管理 BMP 措施模拟与优化[J]. 给水排水,2015,41(S1):254-260.
- [15] 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,2015,34(4):100-104.
- [16] 邵知宇,曾奕铭,康威,等. 建筑小区低影响开发雨水径流模型现状及展望[J]. 中国给水排水,2016,32(22):63-67.
- [17] 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,2012.
- [18] Agency UUSE. National stormwater calculator user's guide[S]. 2014.
- [19] Brown R A, Hunt W F, Skaggs R W. Modeling bioretention hydrology with DRAINMOD[C]//Low Impact Development International Conference, 2010:441-450.
- [20] Skaggs R W. DrainMOD user's manual[M]. University of North Carolina Water Resource Research Institute, 1990.
- [21] 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.
- [22] Roger N H. Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D[J]. Journal of Hydrology, 2008,358(3-4):288-293.
- [23] Atchison D, Severson L. RECARGA user's manual version 2.3[M/OL]. University of Wisconsin-Madison, Civil and Environmental Engineering Department Water Resources Group. Report and executable program available. 2004 at: <http://www.dnr.state.wi.us/runoff/models/>.
- [24] Phillips B C, Thompson G. Virtual stormwater management planning in the 21st century[J]. Global Solutions for Urban Drainage,2002,147:1-15.
- [25] Deletic A. Modeling of water and sediment transport over grassed areas[J]. Journal of Hydrology, 2001,248(1-4):168-182.
- [26] Deletic A. Sediment transport in urban runoff over grassed areas[J]. Journal of Hydrology, 2005,301(1-4):108-122.
- [27] Li Jiake, Davis A P. A unified look at phosphorus treatment using bioretention[J]. Water Research, 2016,90:141-155.
- [28] Rossman L A. Storm water management model user's man-

- ual, version \_5.0 [M]. Cincinnati, OH: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, 2010, US Environmental Protection Agency.
- [29] USEPA (United States Environmental Protection Agency). National stormwater calculator user's guide [R]. Environmental Protection Agency, 2014, 600/R-13/085b.
- [30] 乔 冈. 天山北麓平原区包气带水分运移机理与数值分析 [D]. 西安: 长安大学, 2006.
- [31] 王宝山. 城市雨水径流污染物输移规律研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
- [32] Ramos T B, Simunek J, Goncalves M C, et al. Field evaluation of a multicomponent solute transport model in soils irrigated with saline water [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 407(1-4): 129-144.
- [33] 郝芳华, 孙雯, 曾阿妍, 等. Hydrus-1D 模型对河套灌区不同灌施情景下氮素迁移的模拟 [J]. *环境科学学报*, 2008, 28(5): 853-858.
- [34] Heatwole K, McCray J. Modeling potential vadose-zone transport of nitrogen from onsite wastewater systems at the development scale [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2007, 91(1-2): 184-201.
- [35] Kohne J M, Kohn S, Simunek J. Multi-process herbicide transport in structured soil columns: Experiments and model analysis [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2006, 85(1-2): 1-32.
- [36] 汤英, 徐利岗, 张红玲, 等. HYDRUS-1D/2D 在土壤水分入渗过程模拟中的应用 [J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(36): 22390-22393.
- [37] 马欢, 杨大文, 雷慧闽, 等. Hydrus-1D 模型在田间水循环规律分析中的应用及改进 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(3): 6-12.
- [38] Ngoc M, Dultz S, Kasbohm J. Simulation of retention and transport of copper, lead and zinc in a paddysoil of the Red River Delta, Vietnam [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2009, 129(1-3): 8-16.
- [39] 傅臣家, 刘洪禄, 吴文勇, 等. 六价铬在土壤中吸持和迁移的试验研究 [J]. *灌溉排水学报*, 2008, 27(2): 9-13+42.
- [40] 张佳扬. 生态滤沟处理城市雨水径流的小试与模拟 [D]. 西安: 西安理工大学, 2014.
- [41] Brown R A, Skaggs R W, Hunt III. Calibration and validation of DRAINMOD to model bioretention hydrology [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 486: 430-442.
- [42] Cronshey R. Urban hydrology for small watersheds, Tr-55 [J]. *American Society of Civil Engineers*, 1985, 55: 1268-1273.
- [43] Genschten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity for unsaturated soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892-898.
- [44] 赖晓明, 廖凯华, 朱青, 等. 基于 Hydrus-1D 模型的太湖流域农田系统渗漏和氮磷淋失特征分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(9): 1491-1498.
- [45] 李家科, 蒋春博, 张思翀, 等. 生态滤沟对城市路面径流的净化效果试验及模拟 [J]. *水科学进展*, 2016, 27(6): 898-908.
- [46] 李家科, 梁正, 程杨, 等. 生物滞留系统对城市路面径流的净化性能小型试验与模拟 [J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2): 20-25+33.
- [47] 李鹏, 李家科, 林培娟, 等. 生物滞留槽对城市路面径流水质处理效果的试验研究 [J]. *水力发电学报*, 2016, 35(8): 72-79.
- [48] 罗 纨, 贾忠华, Skaggs R W. 利用 DRAINMOD 模型模拟银南灌区稻田排水过程 [J]. *农业工程学报*, 2006, 22(9): 53-57.
- [49] 王少丽, 王兴奎, Prasher S O, 等. 应用 DRAINMOD 农田排水模型对地下水位和排水量的模拟 [J]. *农业工程学报*, 2006, 22(2): 54-59.
- [50] Sun Yanwei, Wei Xiaomei, Christine A P. Global analysis of sensitivity of bioretention cell design elements to hydrologic performance [J]. *Water Science and Engineering*, 2011, 4(3): 246-257.
- [51] 朋四海, 李田, 黄俊杰. 合肥地区生物滞留设施的合理构型和设计参数 [J]. *中国给水排水*, 2014, 30(17): 145-149.
- [52] 孙艳伟, 魏晓妹. 生物滞留池的水文效应分析 [J]. *灌溉排水学报*, 2011, 30(2): 98-103.
- [53] Lucas W C, ASCE S M. Design of integrated bioinfiltration-detention urban retrofits with design storm and continuous simulation methods [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2010, 15(6): 486-498.
- [54] Siriwardene N R, Deletic A, Fletcher T D. Clogging of stormwater gravel infiltration systems and filters: Insights from a laboratory study [J]. *Water Research*, 2007, 41(7): 1433-1440.