

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.06.006

城市有效不透水下垫面及其识别研究进展

周宏^{1,2}, 刘俊^{1,2}, 丁华凯³, 高成^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水科学研究院, 江苏 南京 210098;
3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要:城市中不透水下垫面,尤其是有效不透水下垫面的增加,会对城市水文循环的各个环节产生影响。针对城市有效不透水下垫面及其识别的问题,剖析了不透水下垫面的水文效应,从水文学的角度辨析了采用总不透水面积和有效不透水面积衡量城市不透水性的优缺点,系统梳理了现场调查与测定法、遥感及影像资料分析法、土地利用类型确定法、经验公式法以及降雨-径流关系法等国内外常用的有效不透水下垫面识别方法的优点与不足,指出未来需深入分析城市不同种类不透水下垫面之间的关系及其对城市雨洪过程的影响,从而提高城市雨洪模拟精度,为城市洪涝防治和海绵城市建设提供技术支撑。

关键词:有效不透水下垫面;城市水文循环;城市雨洪;海绵城市;识别技术

中图分类号:P333.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)06-0039-10

Research progress on urban effective impervious surface and its identification // ZHOU Hong^{1,2}, LIU Jun^{1,2}, DING Huakai³, GAO Cheng^{1,2} (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Institute of Water Science and Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: The increase of urban impervious surface, especially the effective impervious surface, has an impact on all aspects of the urban hydrological cycle. Aiming at the problem of urban effective impervious surface and its identification, the hydrological effect of impervious surface is analyzed, and the advantages and disadvantages of using total impervious area and effective impervious area to measure urban imperviousness are analyzed from the perspective of hydrology. The advantages and disadvantages of effective impervious surface identification methods commonly used at home and abroad, such as field survey and measurement method, remote sensing and image data analysis method, land use type determination method, empirical formula method and rainfall-runoff relationship method, are systematically combed. It is pointed out that in the future, it is necessary to deeply analyze the relationship between different types of impervious surfaces of cities and their impact on urban rainfall and flood process, so as to improve the accuracy of urban stormwater simulation and provide technical support for urban flood prevention and control and sponge city construction.

Key words: effective impervious surface; urban hydrological cycle; urban stormwater; sponge city; identification technology

城市是一个地区的政治、经济和文化中心,承载着人类社会的主要人口和财富。城市化不仅是人类社会发展的主要过程,也是衡量一个国家发展水平的重要标志^[1]。2018年世界城市人口占比达55%^[2],据联合国人口署预测,到2030年城市人口比例将达到60%,而到2050年这一比例将超过70%^[3]。作为全球最大的发展中国家,我国正处于

城市化进程不断推进和深入的时期,常住人口城镇化率从1978年的17.92%增长到2021年的64.7%,城市建成区面积由1981年的7438 km²增加到2020年的60721 km²^[4]。

随着城市化进程的不断推进,城市致涝效应日益显著,城市水安全问题日益突出^[5-6]。不透水下垫面的增加是导致城市化进程中水文循环过程改变

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0407201);中英联合科学创新基金(UUFRIP_100051)

作者简介:周宏(1992—),男,助理研究员,博士,主要从事城市水安全与洪涝防治研究。E-mail: hong_zhou@hhu.edu.cn

通信作者:刘俊(1968—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: lj@hhu.edu.cn

的主要因素,也是城市化的水文效应的主要原因^[7]。城市化过程中,人类通过改造下垫面来适应发展的需求,主要包括城市路网的增加、水体的填埋与碎片化、开发过程中减少洪泛区面积、河道渠化以及通过建筑物控制水量交换等。然而,目前对造成城市洪涝问题的主要影响因素——不透水下垫面的研究尚存在不足。在城市排水系统规划及设计中,我国排水管网的设计往往习惯先确定径流系数,再由径流系数根据推理公式得出设计流量值的方法来计算雨水设计流量值。虽然 GB 20014—2021《室外排水设计标准》规定,当汇水面积大于 2 km² 时,应采用数学模型法确定雨水设计流量,但未作硬性规定^[8-9],并且对城市雨洪模型中最重要的参数——城市不透水性,未作明确规定,也没有统一的计算方法,模型中城市不透水性是使用总不透水面积还是有效不透水面积、不透水下垫面面积如何确定等关键问题均无明确交代。此外,在海绵城市建设背景下,对城市水文学基础理论提出了越来越高的要求^[10-13],以往城市雨洪模拟过程中粗放式、集总式地对各种类型的下垫面进行概化处理,不能准确反映城市水文过程,不能适应新形势下的要求。

因此,开展对城市不透水下垫面的识别研究,揭示其对城市产汇流过程的影响,对城市雨洪精细化管理背景下深入推进城市洪涝防治及海绵城市建设具有重要意义。本文基于近年来国内外研究成果,对城市有效不透水下垫面及其识别的相关研究进展进行介绍与述评。

1 不透水下垫面对城市水文循环的影响

1.1 不透水下垫面的水文效应

城市不透水下垫面的增加会对城市水文循环的各个环节产生影响^[14-16]。城市化过程中由于不透水下垫面的快速增加,城市中出现排水管渠、泵站、水闸等工程水循环系统,与简单地理边界上的自然水文循环产生区别^[17]。自然水文循环的垂向主要是蒸发、下渗,由于不透水下垫面的增加,降水下渗减少,使地下水位降低,基流量减少,地表径流大大增加^[18-20]。而对地表径流、壤中流、地下水等横向汇流过程,不透水下垫面的增加会使城市化地区汇流水力效率提高,汇流时间缩短^[21-22],并且由于不透水下垫面增加大大降低了城区降雨入渗能力,从而使径流总量、地表径流量、洪峰流量均大幅增加^[5, 23-24],导致地面积水频次、积水深度、积水历时增加,间接对下游地区防洪安全产生不利影响^[25]。特别是城市化早期阶段,由于不透水下垫面增加,城市排水管网密度增加,会导致洪峰的显著增大。但

对于固定的土地利用类型和降水量,无论城市排水管网密度增加多少,洪水峰、量都接近一个上限。对于重现期超过 100 a 的极端降雨事件,不透水性对径流流量和总量的影响相对较小,但会根据降雨过程的不同影响峰值流量^[26]。因此,随着不透水性的增加,径流的响应表现为对小降雨事件的放大效应,而对极端降雨事件影响不如小降雨事件明显。不透水下垫面的增加还会导致城市蒸发机制发生改变^[27],形成热岛效应,导致降水总量及降雨强度的改变^[28-29]。由于径流数量和质量的变化,与植被下渗过程中占主导地位的天然流域相比,不透水下垫面占比高的流域还表现出地貌和生物种类的变化^[30]。城市不透水下垫面的增加还被证实与河流中的磷和其他污染物浓度呈正相关关系^[31-33]。

目前评估集水区不透水性的水文响应变化的相关研究较多,例如,不透水下垫面增加导致集水区更频繁出现低重现期的径流事件和更高的峰值流量^[14],Schueler 等^[34-35]最早阐明了不透水性重要性,提出按照集水区不透水下垫面百分比划分不透水下垫面对受纳水体的影响:当集水区不透水下垫面占比为 1% ~ 10% 时为“压力”阶段,占比为 11% ~ 25% 时为“影响”阶段,而占比 26% ~ 100% 则为“退化”阶段;Klein^[36]提出 10% 的总不透水性会对水生生态系统产生影响,30% 的不透水性会产生“严重”影响;Booth 等^[37-38]指出在有效不透水下垫面面积达到 10% ~ 12% 时,受纳水体基流和水生系统受到影响,并强调了有效不透水面积对水文响应的重要影响。

此外,集水区不透水区域的空间分布^[39],特别是其相互连通性^[40-41]及其与排水网络的接近程度^[42-43]以及水力结构(如集水区滞留设施和自然河道改造)^[26]的变化会直接影响径流过程。Mejía 等^[40-41]研究了不透水空间分布对以城市土地利用为特征的流域水文响应的影响,结果表明不透水格局是影响城市化流域水文响应的重要因素;Yao 等^[44]以北京的一个典型城市住宅集水区为研究对象,采用总不透水面积和直接连通不透水面积(即有效不透水面积)两个指标对各分区的不透水空间特征进行了量化,并利用模型模拟了总径流深、峰值流量和流域滞时 3 个径流变量表征特定的降雨-径流特征;Epps 等^[45]利用数学模型进行了有效不透水下垫面的空间识别,认为针对空间识别的有效不透水下垫面的断接可以更高效地控制径流;Deng 等^[46]以南京大学仙林校区为研究区域,构建模型分析不透水下垫面、植被等空间分布对径流系数和峰值流量的影响,研究结果表明,增加有效不透水下垫

面的断接及提高透水下垫面的持水能力是控制城市雨洪的有效策略。总体而言,目前大多数研究仅从面上关注不透水下垫面空间分布的径流响应,鲜有关注不透水下垫面断接的水文过程响应的差异,因此不透水下垫面空间分布的研究需要更加重视。

1.2 衡量城市不透水性的必要性

城市化发展初期,人们通常认为来自不透水下垫面的径流是形成峰值流量的主导过程^[47],因而设计城市雨水排除系统,得以快速、有效地将城市地表径流排除。但随着城市化的持续发展,城市区域不断扩大、人口和财富不断集中,对管理部门来说,城市雨洪的控制和管理显得尤为重要。自1970年以来,城市雨水系统的设计重点已从快速排除地表径流扩展到峰值流量控制(20世纪70年代)、污染物削减(20世纪80年代),以及城市受纳水体中水流模式的变化(20世纪90年代)^[48]。随着城市雨洪管理的不断深入发展,低影响开发^[49-50]、可持续城市排水系统^[51]、水敏感城市设计^[52]及海绵城市^[53-55]等城市雨洪管理方法与理念不断兴起,这些理念和方法都强调通过增加透水下垫面、减少不透水下垫面、构建完善的城市排水防涝系统来达到减少城市洪涝灾害的目的。

由于不透水下垫面的增加,城市化使水文循环的不同环节中的水量重新分配,与城市化之前相比,相同频率的径流事件明显更加频繁^[7]。由于水文变化是雨水径流通过不透水下垫面以及雨水管道和排水管渠组成的“水力高效排水系统”输送到河道的结果^[56],城市化对水文影响的研究通常寻求环境系统的变化与城市化易于测量的指标之间的联系^[7]。早期,一些替代性指标被提出,如人口密度或道路密度^[7],但这些替代性指标无法充分代表造成影响的城市环境要素及其变化过程。也有人提出连通性指标,但在城市环境中,连通性很难量化^[7]。由于不透水下垫面的增加是城市化进程中水文变化的主要原因,许多学者将不透水性作为衡量城市化水文效应的指标^[34-35],主要原因包括以下几点:①不透水性是目前城市发展中最常见的特征之一^[57],城市化过程伴随着不透水下垫面的增加,不透水性本身就可以反映城市发展水平,并与城市化的水文效应之间有着明显的联系;②不透水性是城市雨洪模型的一个重要参数,常被用来作为描述城市发展的参数,精确地衡量不透水性可以有助于城市雨洪模型的使用,并在城市排水防涝、海绵城市建设、城市内涝预报预警中发挥非工程性措施的重要作用;③不透水性是综合的^[58],它可以在不考虑具体因素的情况下估计或预测城市化对径流的影响,

提高城市雨洪的可预测性,并有助于减少非点源污染控制的复杂程度;④不透水性的可衡量性^[58]提高了它在规划和管理中的实用性,根据所考虑区域的大小和特定的应用场景,可以使用多种技术手段测量不透水下垫面的范围。

因此,作为城市水文学的要素之一的城市集水区的不透水性^[59]是衡量城市化及其水文效应的一个重要指标,也是几乎所有城市雨洪模型中的一个重要参数^[60]。目前衡量不透水性的最常用指标为总不透水面积(total impervious area, TIA)和有效不透水面积(effective impervious area, EIA)。

2 衡量不同不透水性的指标辨析

2.1 总不透水面积

总不透水面积是不渗透性的直观定义,即城市集水区中所有由非渗透下垫面(如混凝土、沥青和建筑物)覆盖的部分,与排水系统的流量、受纳水体的水质和生态健康密切相关^[61]。但从水文学角度来讲,这个定义是不准确的。首先,总不透水面积包括了一些可能对下游受纳河道的暴雨径流响应没有贡献的不透水区域^[37]。例如,与为了达到径流控制标准而设计的雨洪控制措施相连的不透水下垫面、绿地中间孤立的不透水下垫面、排水至绿地而非城市管道系统的屋顶等。在城市水文学研究中,仅对城市土地利用简单划分为不透水下垫面和透水下垫面不能很好地解释集水区对暴雨事件的水文响应,不足以解释城市化对当地水文过程的影响,难以反映不透水下垫面的连通性^[62],同样也不能适应当前新形势下城市雨洪精细管理的需求。这表明需要更详细的城市土地利用类型,超越简单划分的透水、不透水的下垫面类别,从而更好地识别由于不透水下垫面类型差异所导致的地表和地下水文过程的变化^[63],适应城市雨洪精细管理的需求。其次,总不透水面积忽略了有些名义上的“透水”下垫面在城市建设过程中被充分压实,土壤渗透能力、蓄水能力大大降低,土壤达到饱和的速度更快、更频繁,以至于它们产生的径流量与铺装路面相似或无法区分^[37],降低了前期影响雨量在城市径流形成中的重要性^[14],因此在城市雨洪模拟过程中需要考虑土壤压实对城市透水下垫面及其产流的影响^[64]。Wigmosta^[65]发现在华盛顿西部住宅区,不透水下垫面单位面积的径流量仅比湿润的薄草皮草坪等透水下垫面区域的径流量大20%。显然,透水下垫面的水文贡献不能完全忽视。透水下垫面产生的径流量与不透水下垫面的面积大小存在一定的相关性。在不透水区域,建设和开发活动更为密集,覆盖的面积

越来越大,在施工过程中,与不透水区相邻的绿地表土被剥离和压实的可能性也越来越大,虽然随后会在透水下垫面种植树木、草皮等,但其水文功能只得到不完全恢复^[37]。因此,名义上的透水下垫面产生的径流可能会被低估,在城市雨洪模拟过程中需要注意透水下垫面土壤的渗透性对径流产生的影响。透水下垫面对城市雨洪过程的影响不是本研究的重点,不再深入讨论;对下游受纳河道的暴雨径流响应没有贡献的不透水区域,可通过引入有效不透水面积的概念得到解决。

2.2 有效不透水面积

总不透水面积的径流预测往往不能很好地与实际径流吻合^[66],并未考虑城市中单个不透水下垫面分布的孤立性以及与其他透水、半透水下垫面及受纳水体的连通性,不能代表或整合相关水文现象表现出的有效性的要求^[37, 67-68],限定了不透水性对水文循环其他组成部分的潜在影响^[14]。有研究表明,总不透水面积中与下游排水系统直接水力连接的不透水表面部分,即有效不透水面积才是造成水文变化的真正原因^[66, 68-72],是水文循环变化的更好的预测指标^[30],可提高城市雨洪模拟的精度^[73]。

有效不透水面积是城市降雨径流过程中的重要参数,其大小、位置甚至形状等特性直接影响径流量及径流过程。许多城市雨洪模型假设落在所有不透水下垫面的降水都产生直接径流,实际上,对于频繁发生的低、中量级降雨事件,降雨落在不与排水系统水力连接的不透水区域上,不会迅速产生直接径流。有效不透水下垫面才是排水系统中主要的径流来源,且大部分径流量和质的变化是由有效不透水面积引起的,而不是由总不透水面积引起的^[74]。因此,在城市雨洪模拟时,应从总不透水面积中减去这部分不与排水系统水力连接的不透水区域,以获得更准确的有效不透水面积进行径流量估算^[75]。有效不透水下垫面不包括与为了达到径流控制标准而设计的低影响开发措施相连的不透水下垫面,也不包括排水系统间接水力连接的孤立不透水下垫面,或排水至透水区域的孤立不透水下垫面^[76]。

不与排水系统直接相连的不透水下垫面被归为非有效不透水下垫面,来自有效不透水下垫面和非有效不透水下垫面的径流沿着各自的汇流路径产生不同的水文过程。有效不透水下垫面上的径流直接排至雨水管道系统;非有效不透水下垫面上的径流则先排至相邻的透水下垫面,当透水下垫面由于接收降雨和非有效不透水下垫面上的径流而产流时,非有效不透水下垫面上的径流才通过透水下垫面排至雨水管道系统。因此,有效不透水下垫面和非有

效不透水下垫面对流域出口过程线的贡献并不相同。近年来,由于有效不透水下垫面对雨水径流的直接影响,减少有效不透水下垫面已被确定为控制雨水径流的有效措施^[68]。

有效不透水下垫面是通常在较低重现期降雨发生时就可产生雨水径流的区域,这是海绵城市及确定排水管网系统规模的主要关注点^[77]。不透水下垫面与排水系统的直接连接意味着即使是小的降雨事件也可以产生地表径流,通过排水系统排至受纳水体,小的降雨也可能产生较大量级的径流量。如果不透水下垫面没有与排水系统直接连接,而是与透水下垫面相连,那么小的降雨事件会被拦截和渗透,有可能不会产生地表径流或仅产生较少的地表径流。在海绵城市建设过程中,对有效不透水下垫面开展合理断接,保持集水区地表径流接近自然频率,是城市集水区雨洪控制利用的最主要策略和共识^[78]。合理确定有效不透水面积将使城市雨水基础设施的设计更具成本效益,并减小项目规模。因此,有效不透水面积是城市化对水文循环过程影响的重要指标,合理确定有效不透水面积将提高城市发展对区域水文循环过程影响的预测能力^[68]。

3 有效不透水下垫面的识别方法

城市集水区的地表组成和基础设施的异质性导致城市汇流路径的复杂性,其与空间和时间上的降雨异质性相结合^[56],增加了对城市产汇流机理准确认知的难度,也使得城市雨洪模拟的不确定性大大增加。虽然有效不透水面积与径流的相关性比总不透水面积更高,但由于有效不透水下垫面难以直接确定,大多数城市雨洪模拟实践中,集水区的不透水性由各种下垫面的不透水面积加权确定^[61],这意味着集水区的不透水部分和透水部分通过两条独立的路径排放到流域出口^[79]。然而,海绵城市建设主要通过对不透水下垫面的断接来达到控制径流的目的,如不考虑低影响开发的流动路径则不够合理^[59],不能充分反映有效不透水下垫面、非有效不透水下垫面以及透水下垫面上不同的产汇流过程。从海绵城市建设及城市雨洪精细模拟的角度来看,城市产汇流过程需要考虑下垫面高度破碎化、异质性导致的产汇流过程的变化^[80],这就对准确识别城市集水区的有效不透水下垫面提出了要求。目前,有效不透水下垫面识别与确定的主要方法包括现场调查与测定法、遥感及影像资料分析法、土地利用类型确定法、经验公式法、降雨-径流关系法等。

3.1 现场调查与测定法

现场调查与测定法确定有效不透水下垫面,须

进行详细的实地勘测,确定不同下垫面与排水系统水力连接情况^[30],主要步骤包括:①检查每个不透水下垫面,初步评估其水力特性,判断其与排水管道的连通性。②观察每条街道的铺装材料,并将街道划分为是否有路缘石和雨水井,带有路缘石和雨水井街道为直接与排水系统相连,归为有效不透水下垫面;否则为向邻近的透水下垫面排水,归为非有效不透水下垫面。③观察建筑屋顶落水管的位置,得到每个建筑的实际水力连通性。例如,当所有落水管连接到雨水管网时,则屋顶被全部划分为有效不透水下垫面;当屋顶上的所有落水管连接到草坪或其他透水表面时,则屋顶被全部划分为非有效不透水下垫面;如果屋顶 80% 的落水管连接到雨水管,20% 连接到草坪或其他透水表面,则 80% 的屋顶面积被划分为有效不透水下垫面,20% 被划分为非有效不透水下垫面。

通过实地调查可确定所有不透水下垫面与排水系统的连通性。Lee 等^[77]采用 5 种精度等级的方法来分析有效不透水面积:第一级为直接采用文献中的经验数据;第二级为利用地理信息系统(GIS)获取不透水下垫面,实际结果为总不透水面积;第三级在第二级的基础上去除少部分孤立的不透水下垫面;第四级在第三级的基础上对仅利用 GIS 资料无法区分排水方式的街道进行现场调查与测定;第五级为利用 GIS 确定总不透水面积,并对所有不透水下垫面进行实地调查与测定,以区分出有效不透水下垫面。结果表明,实地调查是识别与确定有效不透水下垫面最准确的方法,但可能需要额外花费大量时间、精力,仅适用于小范围地区^[66]。

3.2 遥感及影像资料分析法

高分辨率图像的出现,特别是那些小于 5 m 分辨率的图像,以及更高效的图像处理技术,共同推动了不透水下垫面遥感技术的发展。这些精细的高空间分辨率图像包含了丰富的空间信息,为提取更详细的专题信息(如土地利用和土地覆盖)、地物特征(建筑物和道路)以及立体图像中的信息(如高度和面积)提供了可能^[81-82],多源遥感数据(不同空间分辨率、不同时间分辨率、不同光谱分辨率)也为不透水面的准确识别提供了重要保障^[83]。虽然可以直接从遥感及影像资料中获取所有不透水下垫面的位置和大小,进而计算出总不透水面积,但有效不透水下垫面测量困难且烦琐,直接通过遥感及影像资料无法准确区分有效不透水下垫面与非有效不透水下垫面^[37]。侯精明等^[84]采用无人机航测技术对西安市西咸新区的地形进行测算,得到高分辨率(1 m)的下垫面分类数据,并利用该数据进行城市二维洪

涝模拟,取得了较好的效果,是国内城市雨洪模拟基础数据获取方面开创性的研究^[85]。为了解不同不透水下垫面对径流产生的贡献,Deng 等^[46]利用无人机航拍的高分辨率地面图像(0.5 m),采用一种新的分类方法,通过流动路径将不透水下垫面分为直接与排水系统相连的不透水区(即有效不透水下垫面)和不直接相连的不透水区(即非有效不透水下垫面),对南京大学仙林校区的城市降雨径流过程进行了模拟。程涛等^[86]利用无人机倾斜摄影技术获取精细化地表信息,基于此建立水文水动力学多过程耦合模型,评估地形刻画精细程度对洪涝模拟的影响,结果表明,高精度的地形数据能更好地刻画局部洼地,而降低分辨率则会坦化地形使模拟结果精度偏低。

通过遥感及影像资料确定有效不透水下垫面虽然具有视野开阔、瞬态成像、成本低等优势,但也存在一些问题:①要想从遥感及影像资料中获得有效不透水下垫面,还需要配合现场调查或 GIS 来确定。现场调查要耗费大量的时间和人力成本,通过 GIS 辅助确定时分辨率要求较高,分辨率达到最小目标直径的一半时才能准确确定不同地物^[81]。例如,道路雨水口一般尺寸为 750 mm × 450 mm,当需获取道路雨水口信息时,分辨率至少需要为 225 mm,而在大型集水区一般难以实现。②如果遥感影像资料分辨率较低,则遥感影像中会存在大量的混合像元,而在下垫面高度异质性的城市地区,可能每个像元都会出现混合下垫面类型,造成分类混乱^[61],不透水下垫面评价的准确性较低。③高分辨率遥感影像上存在大量的阴影区域,阴影遮挡是获取更高精度的高分辨遥感影像不透水层提取所亟待解决的问题之一^[87]。地形、高楼或树木引起的阴影会对不透水下垫面的识别造成一定影响^[61,81]。④建筑物屋顶直接连接到排水系统的比例往往无法获得,需要人为确定,这会带来一定的主观随意性,给有效不透水下垫面的识别和确定造成影响。

3.3 土地利用类型确定法

土地利用类型确定法主要是将有效不透水下垫面的占比与每一类土地利用类型相关联,通过子汇水区内的土地利用情况,计算出其有效不透水下垫面占比,主要适用于汇水面积较大的情况。这种方法是 SWMM 用户手册推荐的大型集水区不透水性计算方法,也是目前我国主要采用的方法。国外早期在确定城市集水区不透水性方面的大部分工作都用于编制特定土地利用类型内不透水面积的占比,商业、工业、机构、城市开放用地、高密度住宅区、中密度住宅区、低密度住宅区和森林的不透水下垫面

占比分别为 56%、76%、34%、11%、51%、38%、19% 和 19%^[88]。

直接按照土地利用类型折算不透水下垫面积的方法存在一些问题^[57]：①同一土地利用类型情况下的不渗透性实际是有相当大变化的，但利用该方法评估不透水性时，仅按照平均情况来计算，这表明在实际应用这些比例时，可能无法提供准确的结果；②用于当前研究的不透水下垫面比例的基础研究主要集中在 20 世纪 70—80 年代美国东海岸的城市地区，经过长时间的发展，城市人口和土地使用模式已经发生了很大变化，不透水下垫面比例也会发生改变，继续沿用可能会造成不透水下垫面评估的不准确性。

3.4 经验公式法

有关学者考虑根据易于获得的总不透水下垫面，在具有资料条件的地区建立有效不透水面积与总不透水面积（EIA-TIA）的经验关系式，先确定总不透水面积，再根据 EIA-TIA 经验关系确定有效不透水面积。Alley 等^[67]利用美国科罗拉多州丹佛市 14 个城市集水区的数据得到 EIA-TIA 经验关系式：

$$A_{Ei} = 0.15A_{Ti}^{1.41} \tag{1}$$

式中： A_{Ei} 为有效不透水面积； A_{Ti} 为总不透水面积。

基于美国乔治亚州一个集水区的数据，Wenger 等^[88]提出了线性的 EIA-TIA 经验关系式：

$$A_{Ei} = 1.046A_{Ti} - 6.23 \tag{2}$$

Sutherland 等^[75]使用美国俄勒冈州波特兰市 40 多个城市集水区的数据，提出了一系列 EIA-TIA 经验关系式，其中南加州地区最常用的经验关系为

$$A_{Ei} = aA_{Ti}^b \tag{3}$$

式中 a 和 b 为系数，取决于雨水排放系统的流域不透水区域连接条件， a 和 b 不同情况下的取值见表 1。

表 1 a 、 b 取值

Table 1 Values of a and b

a	b	取值确定条件
0.1	1.5	平均连通程度的集水区，住宅屋顶不直接与排水系统相连
0.4	1.2	高度连通的集水区，住宅屋顶直接连接到雨水管
1.0	1.0	完全由雨水管网排水，所有不透水下垫面直接连接排水系统
0.04	1.7	部分不相连的集水区，超过 50% 的面积由草洼地或路边沟渠而不是雨水管排水，住宅屋顶不直接与下水道相连
0.01	2.0	高度不相连的集水区，其中只有一小部分区域通过排水系统排水，或者有 70% 以上的不透水区域排入渗透区域

Sultana 等^[66]选择了南加州沿海地区的 7 个城市集水区，利用单一参数 A_{Ti} 建立了半干旱的南加州

的 EIA-TIA 回归关系：

$$A_{Ei} = 0.842A_{Ti} - 2.1594 \tag{4}$$

研究认为这种由实测降雨-径流关系分析得到的结论可以应用于其他面积、土地利用类型和地貌特征相似的半干旱流域^[67,75]。经验公式法主要应用于一些有较长实测资料的地区，由于有足够实测降雨、径流资料的区域很少，特定区域的 EIA-TIA 关系在其余区域可能适用性较差，大部分地区无法依赖实测资料分析出适用于本区域的经验公式。

3.5 降雨-径流关系法

降雨-径流关系法为一种利用集水区实测降雨和径流资料直接确定有效不透水面积的方法。与经验公式法本质相同，主要步骤为：①点绘径流深-降水量关系图；②用最小二乘法对点绘的数据进行回归分析；③舍去回归线上方径流深实测值与估计值大于 1 mm 的点，并将剩余点据继续采用最小二乘法进行回归分析；④回归线上方所有点径流深实测值与估计值均小于 1 mm，否则，重复步骤③，直到回归线上方所有点位于回归线 1 mm 范围内；⑤回归线 1 mm 范围内的点据为有效不透水面积事件，回归线 1 mm 范围外的点据为混合事件^[66]。降雨-径流关系法确定有效不透水面积过程见图 1，图中回归线的斜率即为有效不透水面积占集水区总面积的比例。

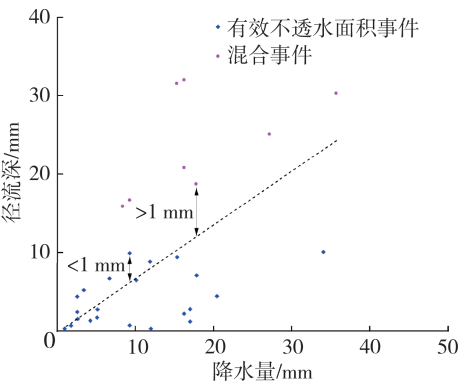


图 1 有效不透水面积确定过程

Fig. 1 Schematic diagram of EIA determination process

Ebrahimian 等^[70]为了确定有效不透水面积，利用欧洲、加拿大和澳大利亚的 11 个城市集水区的实测资料，提出了基于普通最小二乘法和加权最小二乘法两种计算有效不透水面积的方法，结果表明，该方法确定的有效不透水面积与实地调查获得的有效不透水面积基本一致。Sultana 等^[66]采用普通最小二乘法、修正的普通最小二乘法、加权最小二乘法等方法分析了南加州地区沿海地区的 7 个城市集水区降雨径流资料，结果表明，由加权最小二乘法得到的有效不透水面积满足敏感性检验要求，且确定性系

数最高。

降雨-径流关系法虽然可以得到较为准确的有效不透水面积,但也存在以下问题:①降雨-径流关系分析极度依赖于长系列的实测资料,在无资料地区并不适用;②降雨-径流关系分析得到的是整个集水区的有效不透水面积,无法获得有效不透水下垫面在集水区的空间分布情况。

4 结 语

城市不透水下垫面的增加,尤其是与排水系统直接连接的有效不透水下垫面的增加,会对城市水文循环的各个环节产生影响。由于有效不透水下垫面和非有效不透水下垫面对城市产汇流过程影响不同,有效不透水下垫面是较低重现期降雨就可产生径流的区域,是海绵城市及确定排水管网规模的主要关注点,其大小、位置、空间格局均会对城市雨洪过程产生一定影响。在城市雨洪精细化管理中必须区分不透水下垫面的有效性与非有效性,厘清两者的不同水文过程,这对城市雨洪模拟、城市洪涝防治、海绵城市建设及城市规划具有重要意义。

目前有效不透水下垫面的识别技术倾向于直接确定集水区内全部有效不透水下垫面,但存在有效不透水下垫面的空间位置不够明确、无法确定屋顶中有效不透水面积等问题,难以快速、准确识别城市有效不透水下垫面。由于城市不透水下垫面和透水下垫面构成的下垫面系统,在空间上具有异质性,时间上具有可变性,导致城市降雨、径流之间的响应关系较为复杂。有效不透水下垫面增加是城市化进程中水文循环变化的主要原因,但其导致变化的关键作用机理尚缺乏深入研究。未来需通过室内试验、野外观测、模型模拟相结合的手段,加强城市不透水下垫面大小、空间布局、形状等特性对城市产汇流过程影响的机理研究。

参考文献:

[1] 夏军,张印,梁昌梅,等. 城市雨洪模型研究综述[J]. 武汉大学学报(工学版),2018,51(2):95-105. (XIA Jun, ZHANG Yin, LIANG Changmei, et al. Review on urban storm water models [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(2): 95-105. (in Chinese))

[2] United Nations. World urbanization prospects: the 2018 Revision[EB/OL]. [2021-11-28]. <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-KeyFacts.pdf>.

[3] JHA A K, BLOCH R, LAMOND J. Cities and flooding [M]. Washington D. C.: The World Bank, 2012.

[4] 国家统计局. 中华人民共和国 2021 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. [2022-2-28]. [http://www.](http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202202/t20220227_1827960.html)

[stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202202/t20220227_1827960.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202202/t20220227_1827960.html).

[5] 周宏,刘俊,高成,等. 我国城市内涝防治现状及问题分析[J]. 灾害学,2018,33(3):147-151. (ZHOU Hong, LIU Jun, GAO Cheng, et al. Analysis of current situation and problems of urban waterlogging control in China[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(3): 147-151. (in Chinese))

[6] 皋云,李琼芳,周正模,等. 镇江市降雨场次划分与暴雨特性分析[J]. 水资源保护,2021,37(3):43-49. (GAO Yun, LI Qiongfang, ZHOU Zhengmo, et al. Division of rainfall events and analysis of rainstorm characteristics in Zhenjiang City[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 43-49. (in Chinese))

[7] JACOBSON C R. Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: a review [J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92(6): 1438-1448.

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家质量监督检验检疫总局. 室外排水设计标准: GB 50014—2021 [S]. 北京:中国计划出版社,2021.

[9] 王磊,周玉文. 国内外城市排水设计规范比较研究[J]. 中国给水排水,2012,28(8):23-27. (WANG Lei, ZHOU Yuwen. Comparative study on Chinese and foreign urban drainage design codes [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(8): 23-27. (in Chinese))

[10] 崔广柏,张其成,湛忠宇,等. 海绵城市建设研究进展与若干问题探讨[J]. 水资源保护,2016,32(2):1-4. (CUI Guangbo, ZHANG Qicheng, ZHAN Zhongyu, et al. Research progress and discussion of sponge city construction [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2): 1-4. (in Chinese))

[11] 左其亨. 我国海绵城市建设中的水科学难题[J]. 水资源保护,2016,32(4):21-26. (ZUO Qiting. Water science issues in sponge city construction [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(4): 21-26. (in Chinese))

[12] 夏军,石卫,王强,等. 海绵城市建设中若干水文学问题的研讨[J]. 水资源保护,2017,33(1):1-8. (XIA Jun, SHI Wei, WANG Qiang, et al. Discussion of several hydrological issues regarding sponge city construction [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 1-8. (in Chinese))

[13] 徐宗学,程涛. 城市水管理与海绵城市建设之理论基础: 城市水文学研究进展[J]. 水利学报,2019,50(1): 53-61. (XU Zongxue, CHENG Tao. Basic theory for urban water management and sponge city: review on urban hydrology [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(1): 53-61. (in Chinese))

[14] SHUSTER W D, BONTA J, THURSTON H, et al. Impacts of impervious surface on watershed hydrology: a review [J]. Urban Water Journal, 2005, 2(4): 263-275.

[15] NASCIMENTO N O, ELLIS J B, BAPTISTA M B, et al.

- Using detention basins: operational experience and lessons [J]. *Urban Water*, 1999, 1: 113-124.
- [16] 张建云, 宋晓猛, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战: I. 城市水文效应 [J]. *水科学进展*, 2014, 25(4): 594-605. (ZHANG Jianyun, SONG Xiaomeng, WANG Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I. hydrological response to urbanization [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(4): 594-605. (in Chinese))
- [17] MCGRANE S J. Impacts of urbanisation on hydrological and water quality dynamics, and urban water management: a review [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2016, 61(13): 2295-2311.
- [18] HSU M H, CHEN S H, CHANG T J. Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 234(1): 21-37.
- [19] SMAKHTIN V U. Low flow hydrology: a review [J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 240(3): 147-186.
- [20] BRABEC E, SCHULTE S, RICHARDS P L. Impervious surfaces and water quality: a review of current literature and its implications for watershed planning [J]. *Journal of Planning Literature*, 2002, 16(4): 499-514.
- [21] ADELEKAN I O. Vulnerability assessment of an urban flood in Nigeria: Abeokuta flood 2007 [J]. *Natural Hazards*, 2011, 56(1): 215-231.
- [22] SAUER V B, THOMAS W O, STRICKER V A, et al. Flood characteristics of urban watersheds in the United States [J]. *Integrated Data Analytics Wisconsin Science Center*, 1983, 13: 2207.
- [23] 徐向阳, 杜文成, 李文起. 北京市区降雨径流关系分析与综合 [J]. *中国给水排水*, 1991, 7(2): 33-34. (XU Xiangyang, DU Wencheng, LI Wenqi. Analysis and synthesis of rainfall-runoff relationship in Beijing urban area [J]. *China Water & Wastewater*, 1991, 7(2): 33-34. (in Chinese))
- [24] LI Y, WANG C. Impacts of urbanization on surface runoff of the Dardenne Creek Watershed, St. Charles County, Missouri [J]. *Physical Geography*, 2009, 30(6): 556-573.
- [25] MICHENER W K, HAEUBER R A. Flooding: natural and managed disturbances [J]. *Bioscience*, 1998, 48(9): 677-680.
- [26] OGDEN F L, RAJ PRADHAN N, DOWNER C W, et al. Relative importance of impervious area, drainage density, width function, and subsurface storm drainage on flood runoff from an urbanized catchment [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(12): 1-12.
- [27] CARLSON T N, ARTHUR S T. The impact of land use-land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: a satellite perspective [J]. *Global & Planetary Change*, 2000, 25(1): 49-65.
- [28] 刘俊, 周宏, 鲁春辉, 等. 城市暴雨强度公式研究进展与述评 [J]. *水科学进展*, 2018, 29(6): 898-910. (LIU Jun, ZHOU Hong, LU Chunhui, et al. A review on recent advances of urban rainfall intensity-duration-frequency relationships [J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(6): 898-910. (in Chinese))
- [29] JAUREGUI E, ROMALES E. Urban effects on convective precipitation in Mexico City [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, 30(20): 3383-3389.
- [30] ROY A H, SHUSTER W D. Assessing impervious surface connectivity and applications for watershed management [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2009, 45(1): 198-209.
- [31] TU J. Spatial variations in the relationships between land use and water quality across an urbanization gradient in the watersheds of Northern Georgia, USA [J]. *Environmental Management*, 2013, 51(1): 1-17.
- [32] HAIDARY A, AMIRI B J, ADAMOWSKI J, et al. Assessing the impacts of four land use types on the water quality of wetlands in Japan [J]. *Water Resources Management*, 2013, 27(7): 2217-2229.
- [33] XIA J, WANG L, YU J, et al. Impact of environmental factors on water quality at multiple spatial scales and its spatial variation in Huai River Basin, China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(1): 82-92.
- [34] SCHUELER T R. The importance of imperviousness [J]. *Watershed Protection Techniques*, 1994, 1(3): 1-12.
- [35] SCHUELER T R, FRALEY-MCNEAL L, CAPPIELLA K. Is impervious cover still important? review of recent research [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009, 14(4): 309-315.
- [36] KLEIN R D. Urbanization and stream quality impairment [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2010, 15(4): 948-963.
- [37] BOOTH D B, JACKSON C R. Urbanization of aquatic systems: degradation thresholds, stormwater detection, and the limits of mitigation [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1997, 33(5): 1077-1090.
- [38] WANG L, LYONS J, KANEHL P. Impacts of urbanization on stream habitat and fish across multiple spatial scales [J]. *Environmental Management*, 2001, 28(2): 255-266.
- [39] ALBERTI M, BOOTH D, HILL K, et al. The impact of urban patterns on aquatic ecosystems: an empirical analysis in Puget lowland sub-basins [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 80(4): 345-361.
- [40] MEJÍA A I, MOGLEN G E. Impact of the spatial distribution of imperviousness on the hydrologic response of an urbanizing basin [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(23): 3359-3373.
- [41] MEJÍA A I, MOGLEN G E. Spatial distribution of imperviousness and the space-time variability of rainfall, runoff generation, and routing [J]. *Water Resources*

- Research,2010,46(7):501.
- [42] GROVE M, HARBOR J, ENGEL B. Composite vs. distributed curve numbers: effects on estimates of storm runoff depths [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2002,34(5): 1015-1023.
- [43] SHEEDER S A, ROSS J D, CARLSON T N. Dual urban and rural hydrograph signals in three small watersheds [J]. Journal of the American Water Resources Association,2010,38(4):1027-1040.
- [44] YAO L,WEI W, CHEN L. How does imperviousness impact the urban rainfall-runoff process under various storm cases? [J]. Ecological Indicators, 2016, 60: 893-905.
- [45] EPPS T H, HATHAWAY J M. Using spatially-identified effective impervious area to target green infrastructure retrofits;a modeling study in Knoxville,TN[J]. Journal of Hydrology (Amsterdam),2019,575:442-453.
- [46] DENG J L,YIN H W,KONG F H,et al. Determination of runoff response to variation in overland flow area by flow routes using UAV imagery[J]. Journal of Environmental Management,2020,265:109868.
- [47] ANDRIEU H, CHOCAT B. Introduction to the special issue on urban hydrology[J]. Journal of Hydrology,2004, 299(3/4):163-165.
- [48] ZIMMER C A, HEATHCOTE I W, WHITELEY H R, et al. Low impact development practices for stormwater: implications for urban hydrology [J]. Canadian Water Resources Journal,2007,32(3):193-212.
- [49] DIETZ M E. Low impact development practices: a review of current research and recommendations for future directions[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2007, 186 (1/4):351-363.
- [50] 黄国如,赵晓莺,麦叶鹏. 低影响开发措施对雨水径流的控制效应[J]. 水资源保护, 2021, 37(4): 29-36. (HUANG Guoru, ZHAO Xiaoying, MAI Yepeng. Control effect of low impact development measures on rainwater runoff[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 29-36. (in Chinese))
- [51] MARTIN P, TURNER B, WADDINGTON K. Sustainable urban drainage systems design manual for Scotland and Northern Ireland[EB/OL]. (2000-01-01). <https://www.mysciencework.com/publication/show/sustainable-urban-drainage-systems-design-manual-scotland-northern-ireland-bed-31342>
- [52] WONG T H F. Water sensitive urban design-the journey thus far[J]. Australian Journal of Water Resources,2006, 10(3):213-222.
- [53] 俞孔坚,李迪华,袁弘,等. “海绵城市”理论与实践[J]. 城市规划, 2015, 39(6): 26-36. (YU Kongjian, LI Dihua, YUAN Hong, et al. “Sponge City”: theory and practice[J]. City Planning Review, 2015, 39(6): 26-36. (in Chinese))
- [54] 车伍,赵杨,李俊奇,等. 海绵城市建设指南解读之基本概念与综合目标[J]. 中国给水排水,2015,31(8):1-5. (CHE Wu, ZHAO Yang, LI Junqi, et al. Explanation of Sponge City development technical guide: basic concepts and comprehensive goals[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(8): 1-5. (in Chinese))
- [55] 仇保兴. 海绵城市(LID)的内涵、途径与展望[J]. 给水排水, 2015, 41(3): 1-7. (QIU Baoxing. Connotation, approach and prospect of Sponge City (LID)[J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(3): 1-7. (in Chinese))
- [56] MEIERDIERCKS K L, KOLOZSVARY M B, RHOADS K P, et al. The role of land surface versus drainage network characteristics in controlling water quality and quantity in a small urban watershed [J]. Hydrological Processes, 2017, 31(24):4384-4397.
- [57] BRABEC E, SCHULTE S, RICHARDS P L. Impervious surfaces and water quality: a review of current literature and its implications for watershed planning[J]. Journal of Planning Literature,2009,16(4):499-514.
- [58] ARNOLD C L, GIBBONS C J. Impervious surface coverage: the emergence of a key environmental indicator [J]. Journal of the American Planning Association,1996, 62(2):243-258.
- [59] GUO J C Y. Volume-based imperviousness for storm water designs [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering,2008,134(2):193-196.
- [60] SARMA A K, SINGH V P, KARTHA S A, et al. Urban hydrology, watershed management and socio-economic aspects[M]. Springer International Publishing, 2016.
- [61] HAN W S, BURLIAN S J. Determining effective impervious area for urban hydrologic modeling [J]. Journal of Hydrologic Engineering,2009,14(2): 111-120.
- [62] KONG F, BAN Y, YIN H, et al. Modeling stormwater management at the city district level in response to changes in land use and low impact development [J]. Environmental Modelling & Software,2017,95:132-142.
- [63] MILLER J D, KIM H, KJELDSEN T R, et al. Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover [J]. Journal of Hydrology,2014,515:59-70.
- [64] LAW N L, CAPIELLA K, NOVOTNEY M E. The need for improved pervious land cover characterization in urban watersheds[J]. Journal of Hydrologic Engineering,2009, 14(4SI):305-308.
- [65] WIGMOSTA M S. Modeling and monitoring to predict spatial and temporal characteristics in small catchments [D]. Washington:University of Washington,1994.
- [66] SULTANA R, MROCZEK M, SENGUPTA A, et al. Improving effective impervious estimates to inform

- stormwater management [J]. Water Resources Management,2020,34(2):747-762.
- [67] ALLEY W M, VEENHUIS J E. Effective impervious area in urban runoff modeling [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1983,109(2):313-319.
- [68] EBRAHIMIAN A, GULLIVER J S, WILSON B N. Effective impervious area for runoff in urban watersheds [J]. Hydrological Processes,2016,30(20):3717-3729.
- [69] BIRKINSHAW S J, O'DONNELL G, GLENIS V, et al. Improved hydrological modelling of urban catchments using runoff coefficients [J]. Journal of Hydrology,2021,594:125884.
- [70] EBRAHIMIAN A, WILSON B N, GULLIVER J S. Improved methods to estimate the effective impervious area in urban catchments using rainfall-runoff data [J]. Journal of Hydrology,2016,536:109-118.
- [71] LI C, LIU M, HU Y, et al. Effects of urbanization on direct runoff characteristics in urban functional zones [J]. Science of The Total Environment,2018,643:301-311.
- [72] SEO Y, CHOI N J, SCHMIDT A R. Contribution of directly connected and isolated impervious areas to urban drainage network hydrographs [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2013,17(9):3473-3483.
- [73] 石树兰, 庞博, 赵刚, 等. 基于有效不透水面识别的城市雨洪过程模拟研究 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(5):595-602. (SHI Shulan, PANG Bo, ZHAO Gang, et al. Urban stormwater simulation based on recognition of effective impervious area [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2019, 55(5):595-602. (in Chinese))
- [74] SILVA C D M, SILVA G B L D. Cumulative effect of the disconnection of impervious areas within residential lots on runoff generation and temporal patterns in a small urban area [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 253:109719.
- [75] SUTHERLAND R. Methods for estimating the effective impervious area of urban watersheds [J]. Watershed Protection Techniques, 1995, 2(1):282-284.
- [76] United States Environmental Protection Agency. Estimating change in impervious area (IA) and directly connected impervious areas (DCIA) for New Hampshire small MS4 permit [R]. New York: United States Environmental Protection Agency, 2011.
- [77] LEE J G, HEANEY J P. Estimation of urban imperviousness and its impacts on storm water systems [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2003, 129(5):419-426.
- [78] WALSH C, FLETCHER T, LADSON A. Stream restoration in urban catchments through redesigning stormwater systems: looking to the catchment to save the stream [J]. Journal of the North American Benthological Society, 2005, 24(3):690-705.
- [79] EARLES T A, GUO J C Y, BLACKLER G E, et al. Incentive index developed to evaluate storm-water low-impact designs [J]. Journal of Environmental Engineering, 2010, 136(12):1341-1346.
- [80] LEE J G, NIETCH C T, PANGULURI S. Drainage area characterization for evaluating green infrastructure using the storm water management model [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(5):2615-2635.
- [81] WENG Q. Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: requirements, methods, and trends [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 117:34-49.
- [82] SLONECKER E T, JENNINGS D B, GAROFALO D. Remote sensing of impervious surfaces: a review [J]. Remote Sensing Reviews, 2001, 20(3):227-255.
- [83] 王薇. 城市高度异质下垫面监测及热环境分析 [D]. 上海: 华东师范大学, 2016.
- [84] 侯精明, 王润, 李国栋, 等. 基于动力波法的高效高分辨率城市雨洪过程数值模型 [J]. 水力发电学报, 2018, 37(3):40-49. (HOU Jingming, WANG Run, LI Guodong, et al. High-performance numerical model for high-resolution urban rainfall-runoff process based on dynamic wave method [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(3):40-49. (in Chinese))
- [85] 徐宗学, 程涛, 洪思扬, 等. 遥感技术在城市洪涝模拟中的应用进展 [J]. 科学通报, 2018, 63(21):2156-2166. (XU Zongxue, CHENG Tao, HONG Siyang, et al. Review on applications of remote sensing in urban flood modeling [J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(21):2156-2166. (in Chinese))
- [86] 程涛, 黄本胜, 邱静, 等. 基于 UAV 精细化地表数据的城市洪涝模拟与分析: 以济南市海绵城市示范区为例 [J]. 水力发电学报, 2021, 40(5):110-124. (CHENG Tao, HUANG Bensheng, QIU Jing, et al. Urban flood simulation and analysis using UAV-based refined surface data: case study for sponge city pilot area of Jinan City [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(5):110-124. (in Chinese))
- [87] 李德仁, 罗晖, 邵振峰. 遥感技术在不透水层提取中的应用与展望 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(5):569-577. (LI Deren, LUO Hui, SHAO Zhenfeng. Review of impervious surface mapping using remote sensing technology and its application [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(5):569-577. (in Chinese))
- [88] WENGER S J, PETERSON J T, FREEMAN M C, et al. Stream fish occurrence in response to impervious cover, historic land use, and hydrogeomorphic factors [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2008, 65(7):1250-1264.

(收稿日期: 2021-09-29 编辑: 王芳)