

城市雨水管理

基于生态水文响应的海绵城市不透水面控制指标

陈 垚^{1,2,3}, 余雪花³, 郑 爽³, 朱子奇³

(1. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 环境水利工程重庆市工程实验室, 重庆 400074; 3. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

摘 要: 城市化改变了下垫面条件,进而影响河流生态水文条件,造成河流水体污染、栖息地退化、生物多样性丧失等水生态问题。在海绵城市建设中,掌握不透水性指标的属性,合理控制不透水面积,对有效控制地表径流并保护河流生态环境具有重要的意义。从河流生态水文响应角度,研究了总不透水性(TI)、有效不透水性(EI)和衰减不透水性(AI)等3种不透水表面指数,并介绍了各指标的确定方法。研究表明,在海绵城市建设中应采用EI或AI控制指标制定相应的低影响开发(LID)措施,才能最大限度保护(修复)生态敏感水域的生态水文条件,其中,AI还可用于初步确定LID设施的空间布局。

关键词: 海绵城市; 城市河流; 生态水文; 总不透水性; 有效不透水性; 衰减不透水性

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)15-0116-06

Control Index of Impervious Surface in Sponge City Based on Eco-hydrological Response

CHEN Yao^{1,2,3}, YU Xue-hua³, ZHENG Shuang³, ZHU Zi-qi³

(1. Key Laboratory of Hydraulic & Waterway Engineering <Ministry of Education>, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Engineering Laboratory of Environmental Hydraulic Engineering of Chongqing Municipal Development and Reform Commission, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Urbanization changes the underlying surface conditions and further affects the eco-hydrological conditions of rivers, which results in water pollution, habitat degradation, biodiversity loss and other problems. During the construction of sponge city, learning the properties of impervious indexes and reasonably controlling the impervious area have great significance to effectively control surface runoff and protect river ecological environment. Three indexes of impervious surface area including total imperviousness (TI), effective imperviousness (EI) and attenuated imperviousness (AI) were studied from the perspective of river eco-hydrological response, and determination approaches to those indexes were introduced. The results indicated that EI or AI index should be adopted to establish the corresponding low

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51709024); 国家留学基金委“西部地区人才培养特别项目”(201508505098); 重庆市科委基础科学与前沿技术研究项目(cstc2017jcyjAX0292); 重庆市留创计划项目(cx2017065)

impact development (LID) measures during the sponge city construction, and only in this way the eco-hydrological conditions of eco-sensitive waters could be protected or restored to the maximum extent. Besides, AI could be applied to preliminarily determine the spatial distribution of LID facilities.

Key words: sponge city; urban stream; eco-hydrology; total imperviousness; effective imperviousness; attenuated imperviousness

随着城市化的不断加快,区域不透水面大量增加,增加了地表径流量、泥沙含量和污染物排放量,并降低地下水入渗量和河流基流,从而对河流地貌和生态条件产生不利影响,最终导致“城市河流综合症”的形成^[1,2]。城市雨水径流决定着河流生态系统的退化过程,而其主要应激源为传统雨水排放方式^[3]。为应对水文机制改变所造成的河流水质恶化、生物栖息地退化与单一化,以及河流侵蚀等生态问题,研究者提出了一系列以“强调负荷削减”的城市雨洪管理新模式来取代“强调排水效率”的传统模式^[4],如 WSUD、LID、LIUDD、SUDS 以及我国提出的“海绵城市”等。我国颁布实施的《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》(简称“指南”)明确要求对城市原有生态系统进行保护,并实现生态恢复和修复,重点对象为城市河流这一生态敏感区。大量研究证实^[2,5],流域内不透水面的分布情况可作为河流生态健康的一个预测指标。但由于不透水面既可通过雨水口和雨水管渠与受纳水体实现水力连接,也可通过透水面进行有效隔离,以致不透水面控制指标不能简单地以不透水性进行表征。从城市河流生态恢复和修复的角度来看,在制定技术措施时,必须掌握不透水性指标的属性,才能揭示城市区域与河流间的物理连接机理^[6]。因此,海绵城市建设中应重点控制土地开发后所形成的区域不透水面的空间格局特征。

目前,在国外城市雨洪管理中常采用总不透水性(TI)、有效不透水性(EI)和衰减不透水性(AI)等不透水面控制指标^[2,7]。采取不同的不透水面控制指标进行雨洪管理,其产生的生态水文效应显著不同^[2,5,7]。但我国的海绵城市建设指南并未对不透水面控制指标做出明确说明,仅规定“合理控制不透水面积”,而这显然难以确保海绵城市建设途径的有效实施和实现保护城市水敏感区域这一建设目标。为此,笔者结合国外城市雨洪管理中不透水面控制指标的研究,对比分析这些指标对河流产生的生态水文响应,以期为我国海绵城市建设的重要指

导指标——城市不透水面积控制率提供参考。

1 不透水面控制指标

1.1 总不透水性(TI)

TI 为流域内不透水面所占流域面积比值,常作为城市开发密度的景观度量指标。相关研究证实^[8],当 TI 超过一定值(一般为 10%,亦称“10% 准则”)时,河流的生态条件将显著降低,导致河流发生退化。Steuer 等^[9]考察了 83 个水文要素与藻类、底栖动物和鱼类变化之间的关系,发现高流量频现次数可作为其研究区域内与生态条件最为相关的水文指标,并与 TI 呈正相关。但 King 等^[10]研究发现,即使在较低不透水性(TI 为 0.5%)下,仍能观察到物种丰度发生明显下降。同时, Walsh 等^[11]对墨尔本境内 Yarra 河研究段内底栖动物组成数量进行了监测,结果显示当 TI > 3.4% 时河流便可达到退化观测阈值;而在典型城市小型河流中, TI 需达到 7% 以上才可观测到河流的严重退化。另有研究发现,甚至当流域 TI 超过 10% 时,采用合适的雨水控制措施(SCMs)在打破“10% 准则”下仍能维持河流较好的健康水平^[8]。造成研究结果存在较大差异性的原因在于上述研究将 TI 作为河流生态降低的预测指标,但其并不能直接反映出径流与受纳水体间的关系。实际上影响 TI 的因素较为复杂,在应用中应考虑城市用地中汇水面积比例^[12]或城市用地综合度量标准^[13]等不同城市影响因素的指标,才能更好地预测河流的退化效应。同时,即使具有相等 TI 的汇水区,采用不同雨洪管理模式也会对河流生态产生不同的效应。如采用分散排放模式时,不透水面产生的雨水径流可直接排入透水面,从而可维持河流良好的生态条件;而采用传统排放模式时则对河流生态产生不可逆的退化作用。

可见, TI 指标缺乏一定的科学性和可实施性,难以作为城市开发的指导性控制指标^[14],并不能满足海绵城市建设对保护生态敏感水域的要求。

1.2 有效不透水性(EI)

EI 指汇区内通过排水管渠直接与河流连接

的不透水面所占比例,即总不透水面中通过水力连接的比例,亦称为直接连接不透水性。该指标从概念上将地表径流最小化与不透水面最少化目标进行了耦合。由于EI仅包含可能对河流有直接最大影响的不透水面,故其可较好预测河流的退化效应,适合作为河流生态条件的预测指标^[14]。该指标能较好阐释较低TI水平(<10%)下河流生态水文条件仍发生显著变化的原因。

相关研究证实^[14-16],EI还可作为河流底栖动物、硅藻组分和藻类生物量等与河流生态条件相关指标的解释变量,也可预测小型河流在基流状态下溶解性有机碳(DOC)、可滤还原性磷(FRP)和盐度(以电导率EC计)含量的中位数。Walsh等^[6]研究表明,在较低EI水平(1%~5%)下,藻类生物量与硅藻组分可达到河流退化的阈值。相对而言,底栖动物组分对河流退化并不敏感,需在较高EI水平(6%~15%)下才达到阈值,但以保护小型河流生态系统为目标的流域应将EI控制在5%以下。可见,EI不仅可反映河流流态变化,还可对河流水质、地貌条件和相关生态指标进行预测^[17,18]。

因此,基于城市化开发阈值——EI指标确定的SCMs,可有效控制城市土地开发中的不透水性,从而实现城市河流健康进行有效保护和恢复。

1.3 衰减不透水性(AI)

以不透水面从最近雨水排放管或接纳水体的径流路径距离对其进行逆向加权而得到的连接不透水性称为AI。该值由回归分析模型拟合确定,实质为EI的统计学变体,其可对EI景观格局演变进行预测^[7]。相较于TI,AI能更好地预测河流生物组分^[5,7,18],其不仅描述了汇水区域内对河流径流情势和水质高度干扰的不透水面比例,还可较好表征出这些干扰传递至下游接纳水体的传递效率,是一个集水文与水质应激源为一体的综合性指标,特别适用于河流生态系统的预测^[7]。

由于土地利用对河流生态条件的影响效应可能受土地利用类型及其相邻河流空间结构的影响^[19],并受水文路径的传递与衰减效应所调控。因此,减缓城市化对河流所产生的影响,需掌握城市化效应从流域不透水面传递至河流的具体路径,以及传递效应衰减所需的距离。Van Sickle等人^[19]在模型研究中认为,若采用自然径流路径的距离来衡量受干扰的土地利用,可提高河流生态水文响应的预测结

果。虽然土地利用可能破坏河流径流情势,但若土地开发所产生的径流被其自然径流路径上未开发的非农业用地(如森林)所截流,那么土地开发效应对河流生态所产生的影响可得到有效缓解。在城市化过程中,由于修建了大量高效水力型排水管网,并以此取代部分自然径流路径,以致降低了径流产生的生态水文衰减效应。研究结果表明^[5],若汇水区域内产生的雨水在径流路径上直接通过一定距离(一般为数十米,具体取决于地形坡度)的透水性坡地,土地利用产生的地表径流在到达河流之前通过雨水管的传递效应可以得到完全衰减。因此,如果采取的SCMs(如雨水生物滞留设施)能模拟雨水径流路径的水文过程,则可以实现河流生态条件的最有效保护。

综上分析可知,AI可用于预测河流的生态水文条件,制定减缓传统雨水排放模式产生传递效应的LID优先措施,并初步确定其空间布局方案。

2 不透水性确定方法

缓解城市土地开发对河流造成的生态水文影响,应采用EI或AI指标对城市不透水面进行控制。因此,流域内不透水性(EI或AI)的确定是研究城市雨洪管理模式对河流生态水文影响的基础工作。

2.1 EI的确定

虽然采用高精度数字化高程模型(DEM)、遥感卫星影像图和雨水管网数据可直接计算出流域的有效不透水面积(EIA),但在实际作业中往往因缺少有效数据而使计算显得极为困难^[20]。为解决这一问题,研究者^[6]常利用总不透水面积(TIA)与EIA的关系来间接确定EIA值,即:

$$EIA = TIA \cdot DCI \quad (1)$$

式中,DCI为排水连接指数(drainage connection index),该值代表了不透水面与接纳水体的水力连接度。若不透水面直接通过雨水管渠与河流连接,则DCI为1,此时TIA与EIA相等;若研究区域内无传统雨水排放设施,则DCI为零,此时不透水面产生的地表径流向周边透水面、林地或植草沟进行连接排放,最终排入河流。图1为利用MUSIC软件根据墨尔本郊区Dandenong流域历史降雨数据模拟生成的累计降雨频率曲线^[6],横坐标为处理设施所截留的日降雨量,截留值范围为1~15 mm/d,其中,1和15 mm/d分别为不透水面产生径流的有效降雨量和场地产生坡面流所需的平均日降雨量,纵坐标

为不同 DCI 下得到的降雨事件累计频率。该曲线可用于确定设计降雨量截留目标下削减 600 m² 场地降雨径流所需的 DCI 值。在确定某一研究区域的 EI 时,可按图 2 的步骤进行。

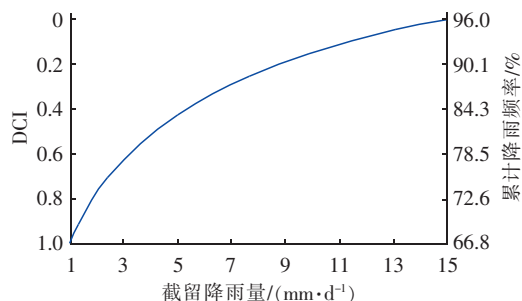


图 1 Dandenong 流域累计降雨频率曲线

Fig. 1 Cumulative rainfall frequency curve for calculating DCI in Dandenong Basin, Melbourne, Australia

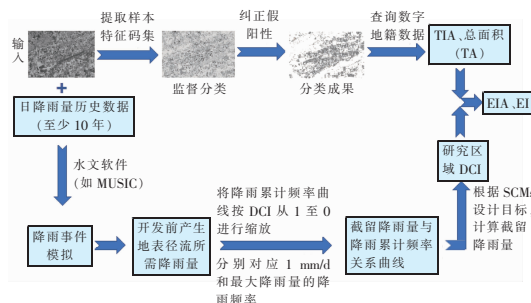


图 2 EI 计算流程

Fig. 2 Calculation flowchart of EI

通过上述方法,将计算异常困难的 EIA 转化为确定 TIA,而确定流域的 TIA 目前在技术和方法上较为成熟,可直接采用 GIS 技术和空间图像分析技术进行确定^[21]。目前常采用图像自动分析法确定研究区域内的 TIA 值。该方法主要利用图像分析软件创建研究区域的网格单元,属性表征后提取样本特征码集,并作为训练数据进行初始监督分类;随后进一步对特征码进行抽样,并再次分类运算以纠正假阳性;最后,通过数字地籍数据对比扣除假阳性后便可获得研究区域内的 TIA 值,如图 2 所示。但该方法容易因存在的阴影效应和不同颜色的屋面而产生错误信息,虽然下垫面颜色混淆效应可通过仔细筛选特征码颜色以及监督分类的多次迭代法来消除,但阴影效应却不易被纠正。如高玉斌等^[22]采用 BP 神经网络分类法对研究区域内的不透水面进行了分类提取,但总提取精度仅为 79.82%。为此,黄曦涛等^[23]利用光谱和纹理信息进行监督分类,并使用阈值和开闭运算提取阴影,有效纠正了阴影效应,

提取精度高达 91.42%;若对阴影进行检测和归类处理,提取精度可提高至 94.12%。同时,针对传统矢量叠加的多特征融合方法在光谱异质高的城市地表分类应用中的不足,于新菊^[24]提出了基于距离度量学习的图谱耦合的高分辨率不透水面分类方法,有效纠正了阴影效应,显著提升了城市地表分类精度。虽然目前大量研究者采用相关方法和技术对阴影效应产生的假阳性进行了有效纠正,显著提升了提取精度,但该方法对 GIS 相关专业软件(如 ArcGIS 和 ERDAS IMAGINE)应用熟练度的要求非常高。

2.2 AI 的确定

为缓解城市化对河流生态水文条件的影响,需要掌握城市化效应从汇水区域至河流的传递路径,以及传递效应随径流距离的衰减规律。为此, Walsh 等人^[5]利用数学模型将无衰减的不透水面、沿地面径流衰减(自然地面和修建 SCM 的地面可衰减传递效应,而传统雨水排放系统无法衰减传递效应)的不透水面和沿地面与河流衰减的不透水面作为预测变量,对不透水面的传递衰减效应进行了模拟(见图 3),以提高对 *Escherichia coli*、NO₃⁻/NO₂⁻ 和 SIGNAL(大型无脊椎动物组分指数)等河流生态指标的预测精度。

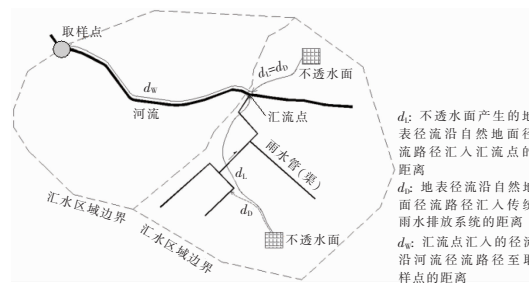


图 3 从不透水面最下游点至河流取样点的径流路径距离
Fig. 3 Flowpath distances from the most downstream point of an impervious surface to a stream sampling site

对于不同特性的不透水面, AI 代表不透水面中的衰减不透水性,并将其作为模型的自变量。AI 值等于汇水区域中不透水面积的加权值。

$$AI = 100 \left[\frac{\sum_j (A_j W_j)}{A_c} \right] \quad (2)$$

式中: A_j 为第 j 块不透水面的面积; A_c 为汇水区域面积; W_j 为 A_j 所占权重(%),由表 1 中的加权函数 W (分别对应于不同衰减路径下由最佳拟合模型确定的衰减函数)求得。

表1 不同衰减路径下的加权函数

Tab.1 Weighting functions of different attenuation pathways

径流衰减路径	加权函数 W
地面和河流不衰减传递效应	$W = 1$
沿地面衰减至河流汇流点且河流不衰减传递效应	$W = e^{(-\frac{d_L}{\alpha})}$
沿地面衰减至雨水管(渠)入流点且雨水管(渠)与河流不衰减传递效应	$W = e^{(-\frac{d_D}{\alpha})}$
沿地面衰减至河流汇流点且河流衰减传递效应	$W = e^{(-\frac{d_L}{\alpha})(-\frac{d_W}{\beta})}$
沿地面衰减至雨水管(渠)入流点且河流衰减传递效应	$W = e^{(-\frac{d_D}{\alpha})(-\frac{d_W}{\beta})}$
注: α 为地面指数衰减参数, β 为河流指数衰减参数。	

在确定加权函数时,必须先确定指数衰减参数 α 和 β 。由于采用最佳拟合法难以求解指数衰减参数,在实际模型回归拟合过程中,常采用半衰减距离(HDD)^[5]对加权函数 W 进行变换。变换后可得到以 HDD 作为参数的加权值为 α 或(和) β 的 1/2。其中, $HDD = \alpha(\text{或} \beta) \cdot \ln 2$ 。

在确定研究区域 AI 时,首先确定径流的衰减路径,然后结合河流的生态指标并根据监测数据进行回归拟合确定 HDD,之后通过 HDD 的负指数衰减函数确定各不透水面的权值 W_j ,最终通过加权求和获得 AI 值,并计算出雨水径流沿不透水面不同径流路径的衰减效应,从而可确定 SCMs 的空间布局。此外,在计算中还可根据皮尔逊相关系数(γ)研判指标间的相关性,以确定 AI 与水文指标间的相关性^[7]。可见, AI 可用于表征不透水面产生的地表径流在排放过程中对河流生态造成的影响程度,并使“不透水面”这一控制指标成为城市区域内径流变化的关键决定因子,影响并决定着城市化效应对河流生态水文条件的干扰程度。

3 结论

快速城市化导致下垫面条件发生剧烈变化,改变了城市不透水面空间格局,进而影响城市河流的生态水文条件。虽然 TI、EI 和 AI 均可作为城市化开发中的不透水表面指数,但 TI 并未考虑不透水面空间格局所造成的水力连接关系,难以反映出不同雨洪管理模式对河流生态水文条件所产生的效应差异性;EI 从概念上考虑了不透水面的水力连接性,能较好地预测河流退化效应,可作为海绵城市建设中城市化的开发阈值并以此确定 SCMs;而 AI 为 EI 的统计学变体,可作为 EI 景观格局演变的预测指

标,有效提高河流生态系统的预测水平,因此该指标可根据海绵城市建设中生态敏感水域的保护目标初步确定 LID 设施的空间布局。TI 可利用目前成熟的 GIS 技术和空间图像分析技术确定, EI 可根据 DCI 与 TI 间的关系间接求得,而 AI 则需根据径流衰减路径,结合河流生态指标监测数据并通过数学统计模型确定的衰减函数进行加权计算后获得。

在海绵城市建设中,不能简单地以不透水面积作为控制指标,必须掌握区域不透水面特征,选用 EI 或 AI 控制土地开发后不透水面的空间格局并制定相应的 LID 措施,才能最大限度保护(修复)生态敏感水域的生态水文条件。今后应加强对不透水性特征的本土化研究,细化海绵城市建设中不透水面积控制率指标,才能使 LID 措施的确定与空间布局更具科学性,保障海绵城市建设目标的实现。

参考文献:

- [1] Zhang G, Guhathakurta S, Dai G, et al. The control of land-use patterns for stormwater management at multiple spatial scales[J]. Environ Manage, 2013, 51(3): 555 - 570.
- [2] Askarizadeh A, Rippey M A, Fletcher T D, et al. From rain tanks to catchments: use of low-impact development to address hydrologic symptoms of the urban stream syndrome[J]. Environ Sci Technol, 2015, 49(19): 11264 - 11280.
- [3] Walsh C J, Fletcher T D, Burns M J. Urban stormwater runoff: A new class of environmental flow problem[J]. Plos One, 2012, 7(9): e45814.
- [4] Burns M J, Fletcher T D, Walsh C J, et al. Hydrologic shortcomings of conventional urban stormwater management and opportunities for reform[J]. Landscape Urban Plan, 2012, 105(3): 230 - 240.
- [5] Walsh C J, Kunapo J. The importance of upland flow paths in determining urban effects on stream ecosystems[J]. Journal of the North American Benthological Society, 2009, 28(4): 977 - 990.
- [6] Walsh C J, Leonard A W, Ladson A R, et al. Urban Stormwater and the Ecology of Streams[M]. Canberra: Cooperative Research Centre for Freshwater Ecology and Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, 2004.
- [7] Burns M J, Walsh C J, Fletcher T D, et al. A landscape measure of urban stormwater runoff effects is a better

- predictor of stream condition than a suite of hydrologic factors[J]. *Ecohydrology*,2015,8(1):160–171.
- [8] Beach D. Coastal sprawl:the effects of urban design on aquatic ecosystems in the United States[J]. *Advocate of Peace Through Justice*,2003,83(1):35.
- [9] Steuer J J,Stensvold K A,Gregory M B. Determination of biologically significant hydrologic condition metrics in urbanizing watersheds:an empirical analysis over a range of environmental settings[J]. *Hydrobiologia*,2010,654(1):27–55.
- [10] King R S,Baker M E,Kazyak P F,*et al.* How novel is too novel? Stream community thresholds at exceptionally low levels of catchment urbanization[J]. *Ecol Appl*,2011,21(5):1659–1678.
- [11] Walsh C J,Roy A H,Feminella J W,*et al.* The urban stream syndrome:current knowledge and the search for a cure[J]. *Journal of the North American Benthological Society*,2005,24(3):706–723.
- [12] Morley S A,Karr J R. Assessing and restoring the health of urban streams in the Puget Sound Basin[J]. *Conserv Biol*,2002,16(6):1498–1509.
- [13] McMahon G,Cuffney T F. Quantifying urban intensity in drainage basins for assessing ecological conditions[J]. *J Am Water Resour As*,2000,36(6):1247–1261.
- [14] Walsh C J. Protection of in-stream biota from urban impacts: minimise catchment imperviousness or improve drainage design? [J]. *Mar Freshwater Res*,2004,55(3):317–326.
- [15] Hatt B E,Fletcher T D,Walsh C J,*et al.* The influence of urban density and drainage infrastructure on the concentrations and loads of pollutants in small streams[J]. *Environ Manage*,2004,34(1):112–124.
- [16] Newall P,Walsh C J. Response of epilithic diatom assemblages to urbanization influences[J]. *Hydrobiologia*,2005,532:53–67.
- [17] Vietz G,Sammonds M J,Walsh C J,*et al.* Ecologically relevant geomorphic attributes of streams are impaired by even low levels of watershed effective imperviousness[J]. *Geomorphology*,2014,206:67–78.
- [18] Fletcher T D,Vietz G,Walsh C J. Protection of stream ecosystems from urban stormwater runoff: the multiple benefits of an ecohydrological approach[J]. *Prog Phys Geog*,2014,38(5):543–555.
- [19] Van Sickle J,Johnson C B. Parametric distance weighting of landscape influence on streams[J]. *Landscape Ecol*,2008,23(4):427–438.
- [20] Han W S,Burian S J. Determining effective impervious area for urban hydrologic modeling[J]. *J Hydrol Eng*,2009,14(2):111–120.
- [21] Bartley R,Speirs W J,Ellis T W,*et al.* A review of sediment and nutrient concentration data from Australia for use in catchment water quality models[J]. *Mar Pollut Bull*,2012,65(4/9):101–116.
- [22] 高玉斌,黄津辉,周飞祥. 基于遥感的高精度城市不透水面信息提取方法研究[J]. *中国给水排水*,2017,33(9):123–127.
- Gao Yubin, Huang Jinhui, Zhou Feixiang. High resolution urban impervious surface extraction methodology based on remote sensing [J]. *China Water & Wastewater*,2017,33(9):123–127(in Chinese).
- [23] 黄曦涛,李怀恩,张瑜,等. 利用影像纹理和阴影信息提取城市不透水面的方法——以咸阳市为例[J]. *测绘通报*,2016,(5):80–83.
- Huang Xitao, Li Huaen, Zhang Yu, *et al.* Extraction method of impervious surface information in city by textures and shadows—taking Xianyang City as an example [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*,2016,(5):80–83(in Chinese).
- [24] 于新菊. 图谱耦合的高分辨率城市精细不透水面提取方法研究[D]. 北京:中国科学院大学,2016.
- Yu Xinju. Fine Scale Impervious Surface Extraction Method Research Based on Coupled Spectral and Spatial Features[D]. Beijing:University of Chinese Academy of Sciences,2016(in Chinese).



作者简介:陈垚(1983–),男,浙江永康人,博士,副教授,系主任,主要从事水污染控制与城市雨洪管理方面的研究。

E-mail: cycqc@163.com

收稿日期:2018–01–03