

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.23.017

不透水面数据自动提取的遥感技术方法

易翰枫¹, 卿晓霞², 赵劲翔¹

(1. 重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 高效准确地提取不透水面数据对提高降雨径流模拟效率和精度至关重要。针对中低分遥感(RS)影像存在混合像元、高分RS影像具有光谱局限性的不足,以重庆某小区为研究对象,通过遥感指数法扩充光谱波段,使研究区域易错分地类与其他地类的可分离性得到明显增强,其平均最小分离度由扩充前的1.26、0.16和0.69分别增大到3.29、4.74和8.89,整体平均最小分离度由0.70增大至5.64;基于eCognition Developer平台,采用FNEA算法、K最邻近算法实现了面向对象的不透水面数据自动提取;用混淆矩阵进行精度计算,得到分类总体精度为82.98%、Kappa系数为0.75、不透水面的用户精度为94.85%;研究区域的SWMM模拟结果得到纳什效率系数(NSE)为0.92,径流峰值误差为9.56%,峰现时间误差为0,表明该方法不仅自动化程度高、时效性强,而且模拟精度高,尤其适用于手动提取基本不具备可行性的大尺度区域不透水面数据的提取。

关键词: 遥感技术; 不透水面数据提取; 降雨-径流模型; 下垫面数据提取

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)23-0101-07

Remote Sensing Technique for Automatic Extraction of Impervious Surface Data

YI Han-feng¹, QING Xiao-xia², ZHAO Jin-xiang¹

(1. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Efficient and accurate extraction of impervious surface is crucial to rainfall-runoff simulation. Since the shortcomings of mixed pixels in the low and medium resolution remote sensing (RS) images and the spectral limitations of high resolution RS images, the remote sensing index method was used in a community in Chongqing to extend the spectral band. The separability between easily misclassified land types and other land types in the study area was significantly enhanced. The average minimum separation degree increased from 1.26, 0.16 and 0.69 before expansion to 3.29, 4.74 and 8.89, respectively, and the overall minimum average separation degree increased from 0.70 to 5.64. The object-oriented method based on eCognition Developer with FNEA image segmentation algorithm and K-nearest neighbor classification algorithm was adopted in automatic extraction of the impervious surface data. The results showed that by the confusion matrix the overall accuracy of the underlying surface extraction was 82.98%, the Kappa coefficient was 0.75, and the user accuracy of the impervious surface was 94.85%. The simulation results of SWMM model showed that the peak time error was 0, the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient(NSE) was 0.92, and the peak runoff error was 9.56%, which indicated

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404704); 重庆市科委社会民生类重点研发项目(cstc2018jszx-zdyfxmX0010)

通信作者: 卿晓霞 E-mail:13983707801@126.com

that the method not only had a high degree of automation and strong timeliness, but also had high simulation accuracy. It was especially suitable for efficient automatic extraction of impervious surface data in large-scale area in which manual extraction was not feasible.

Key words: remote sensing technique; extraction of impervious surface data; rainfall-runoff model; extraction of underlying surface data

随着我国城市化进程的加快,不透水面面积不断增加导致地表径流加大、峰值流量上升,城市内涝灾害频发。近年来,降雨径流模拟被广泛用于预测和评估城市内涝风险,且其模拟精度与不透水面参数的取值直接相关^[1]。例如,吴亚男等人^[2]通过对SWMM模型参数进行敏感性分析,发现在中、大、特大3场降雨中,不透水面比例均为影响径流量的最敏感参数;张少钦等人^[3]研究表明,在2年一遇的降雨情景中,不透水面比例对径流总量和峰值流量的各阶敏感性指数之和达0.8,超过其他参数的总和;Yao等人^[4]的研究结果表明,当子汇水区空间尺度很小($<1\text{ hm}^2$),而降雨强度很大时,不透水面比例增加10%会贡献约20%的径流量,也说明了不透水面比例对径流量起着决定性作用。

目前,不透水面数据的获取方式主要有4种:从国土调查数据库获取、从规划资料获取、人工解译施工图以及地面勘察测绘。这些方法均存在不能实时获取最新数据,且自动化水平低,不能高效、准确提取信息的问题。遥感(RS)是一种利用各种遥感器远距离收集地物所发射和反射的电磁波信息,并进行处理、分类和应用的技术,已广泛用于气象预报、资源探测、环境监测等领域,也为降雨径流模拟时自动、高效地提取不透水面数据开拓了新方法。Wu等人^[5]采用线性光谱混合分析法,对中分RS影像的混合像元进行分解,并基于植被-不透水地表-土壤模型成功实现了不透水面数据的自动提取。但该方法采用线性模型,难以准确拟合波段光谱值,且由于同一研究区中不同像元间端元组成并不相同,固定端元使得分解结果存在较大误差。近年来,随着高分遥感卫星影像信息的应用,RS数据的地物细节、空间分布和几何特征等信息愈发丰富,为准确提取地物信息创造了更好的条件。然而,由于像元间的光谱差异会随着空间分辨率的增加而降低,导致地物间呈现“同物异谱,同谱异物”现象,传统基于像元的提取法并不适于高分影像数据。面向对象法可利用影像的多层特征,在处理高分RS影像分类

和目标地物提取时更具优越性,如颜伟等^[6]研究发现,对于高分影像信息,面向对象法的总体精度相比基于像元法可提高约20%。但面向对象法精度的进一步提高却被高分影像中较少的光谱波段数所制约^[7]。针对上述问题,笔者首先通过遥感指数法扩充高分RS影像光谱波段,然后基于面向对象法,自动提取不透水面面积,最后以重庆某小区为研究对象构建SWMM模型,进行了技术应用。

1 基于面向对象法的不透水面数据自动提取

1.1 RS数据源获取

研究区域为重庆融侨城2期D区,面积约为 20 hm^2 。小区雨水管网分布见图1,A、B为排放口。研究区域的正射RS影像从Google earth的Landsat数据库获取,如图2所示。空间参考坐标系为基于WGS-84坐标的通用横轴墨卡托投影坐标系。获取的RS数据经过大气校正与阴影修复,为8 bit编码的栅格数据,分辨率为 0.13 m ,文件格式为基于LTWG标准的通用栅格GeoTIFF格式(.tif)。

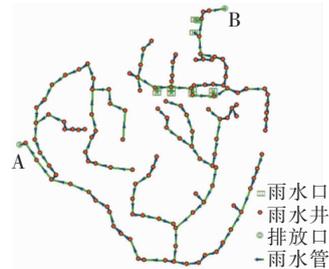


图1 研究区域雨水管网分布

Fig. 1 Rainwater network in study area



图2 研究区域正射RS影像

Fig. 2 Orthographic RS image of study area

1.2 RS 影像数据提取

像元是构成 RS 数字图像的最小单元,也是同时具有影像光谱特征和空间特征的数据元。基于像元的 RS 数据提取法,通过分析各像元的光谱信息,对同类地物的像元进行聚类,即可实现下垫面数据的提取。但是,面对具有显著光谱局限性的高分影像,基于像元法的分类精度很低。对象是若干个同质像元的集合,不仅包含了影像的光谱特征,还包含了地物的纹理和几何特征。面向对象的 RS 数据提取法,以对象为基本单元,通过分析其光谱、纹理、几何等多方面特征,对影像进行分类,不仅可避免混合像元现象,而且能改善因同种地物光谱变异较大而造成的错分和分类边界不清晰现象,更适用于不透水面数据的自动提取。

1.2.1 波段扩充及融合

虽然高分 RS 数据克服了混合像元和空间分辨率低的问题,但是其少量的光谱特征无法完整地描述实际复杂多样的地物。本研究采用遥感指数法扩充波段,并与原始波段进行多特征融合,以提高地物间的可分离性。遥感指数法的基本原理是在多光谱波段内找出所研究地类的强反射波段和弱反射波段,通过强、弱波段之间的组合和运算构造新的波段,使得所研究地类在新生成的指数影像上的亮度得到增强,扩大其与其他地类的差距,使之更容易分离和提取。

波段扩充的实现步骤:首先,对研究区域的 RS 影像基于像元法进行预分类,将错分比例较大的下垫面类型视为易错分地类;然后,分析波段特征,采用遥感指数法扩充新波段,达到区分易错分地类和其他地类的目的。

遥感指数公式^[8]为:

$$\text{Band}_U = N \sum_{i=1}^n (\text{Band}_{\max} - \text{Band}_i) \quad (1)$$

式中: Band_U 为扩充后的指数波段; Band_{\max} 为易错分地类光谱中像元灰度值(digital number, DN)最大的波段; Band_i 是与 Band_{\max} 的 DN 值差异明显的波段, $i=1,2,\dots,n$; N 为归一化系数。

本研究区域下垫面分为不透水面、林地、草地和未开发用地 4 类。根据预分类结果,未开发用地为易错分地类。在未开发用地中随机选取 7 个样本点进行分,发现各样本点 Band_1 的 DN 值明显高于 Band_2 和 Band_3 (如图 3 所示);林地与不透水面的 Band_1 、 Band_2 、 Band_3 之间的 DN 值差异均很小;草地

的 Band_1 与 Band_2 的 DN 值差异很小(如图 4 所示)。为此,设定遥感指数公式为:

$$\text{Band}_U = 1.5 \times [(\text{Band}_1 - \text{Band}_2) + (\text{Band}_1 - \text{Band}_3)] \quad (2)$$

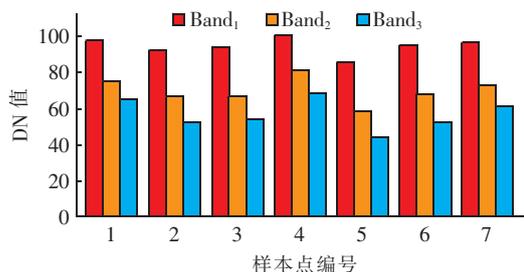


图3 未开发用地各波段 DN 值

Fig. 3 DN of each band of undeveloped land

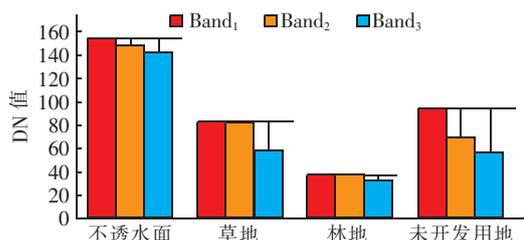


图4 研究区下垫面各波段 DN 值

Fig. 4 DN of each band on underlying surface of study area

本研究基于遥感图像处理平台 ENVI 及底层的交互式数据语言 IDL,编程实现了基于像元的影像预分类和多波段数据扩充。

扩充波段 Band_U 的可视化图如图 5 所示。可以看出,与周围地物相比,未开发用地的亮度得到了显著增强。将 Band_U 与原始 3 波段数据进行多特征融合,并以 GeoTIFF 格式输出,最终得到一个包含 4 个波段的 RS 影像数据。

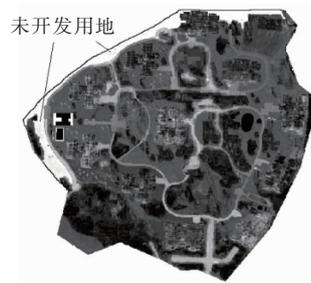


图5 Band_U 的可视化图

Fig. 5 Band_U visualization image

为验证波段扩充后的效果,分别计算各地类原始 3 波段和扩充后 4 波段 RS 数据中未开发用地与其他地类的平均最小分离度,结果表明,未开发用地

(C_4)与不透水面(C_1)、草地(C_2)、林地(C_3)两两间的平均最小分离度 C_1/C_4 、 C_2/C_4 、 C_3/C_4 由扩充前的1.26、0.16和0.69分别增大到3.29、4.74和8.89;整体平均最小分离度由0.70增大到5.64。表明波段扩充并融合后,未开发用地的可分离性得到显著增强。

1.2.2 RS影像分割与对象生成

对象是RS影像数据提取过程中属性信息的中间实体。通过影像分割生成对象是实现面向对象提取的前提。由于不同地物的空间尺度不同,与之相适宜的对象尺度也不同。在适宜的对象尺度上提取对象信息才能有更高的精度。分形网络演化算法(FNEA)^[9]是一种基于像元区域增长的多尺度分割算法,可根据目标地物生成尺度适宜的对象,其根本原理是通过同时考虑光谱异质性和空间异质性,使所有分割对象的平均异质度最小。eCognition Developer平台是一个面向对象的RS数据分析开发环境,主要包含进程树开发窗口和分类结构开发窗口,可实现基于特征数据层的影像分割和分类。

本研究采用FNEA算法对融合后的RS影像进行分割,并采用均值方差法确定生成对象的异质度阈值。在eCognition Developer的进程树开发窗口插入进程,调用FNEA算法;在eCognition Developer的分类结构开发窗口构建分类结构体系,通过各类间平均最小分离度矩阵确定最优特征数据层组合,结果如图6、图7所示。图6为研究区域基于像元生成的对象,图7表明最优特征数据层组合为Band_U、Band₁、Band₂、Band₃、光滑度(Bor.In)、紧致度(Com.pa)和纹理系数(GLCMA)等7个。



图6 FNEA生成的对象

Fig. 6 Generate objects based on pixels combination

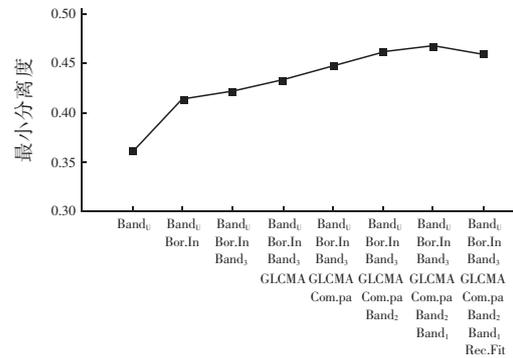


图7 最优特征组合选取结果

Fig. 7 Selection result of optimal feature

1.2.3 基于K最邻近分类算法提取下垫面数据

面向对象的K最邻近(K-Nearest Neighbor)算法^[10]是一种典型的机器学习算法,其利用多个数据层构建对象的特征空间,以最小距离为测度进行判别分类,完成下垫面的自动提取。K最邻近算法提取下垫面数据的流程如下:

- ① 设定分类类别,记为 C_k ,对每个地类赋予不同的颜色。
- ② 定义特征空间,记为 f_i , i 为特征空间的维数,同时也是对象特征数据层的个数,对象在每一维 f_i 的特征值记为 v_{f_i} 。
- ③ 选取训练样本,记为 s_n , n 为训练样本的个数,给每个地类赋予相应具有代表性的目标地物。
- ④ 计算最小距离。对每个待分类对象,在特征空间根据式(3)计算其与类别 C_k 的最小距离。

$$d_{C_k} = \min(d_{os_j}) = \min \sqrt{\sum_{f_i} \left[\frac{v_{f_i}^{(s_j)} - v_{f_i}^{(o)}}{e_{f_i}} \right]^2} \quad (3)$$

式中: s_j 表示类别 C_k 第 j 个训练样本; d_{C_k} 表示待分类对象 o 到类别 C_k 之间的距离; d_{os_j} 为类别 C_k 所选的样本 s_j 与待分类对象 o 在特征空间内的距离; $v_{f_i}^{(s_j)}$ 为样本 s_j 的特征 f_i 的特征值; $v_{f_i}^{(o)}$ 为待分类对象 o 的特征 f_i 的特征值; e_{f_i} 为所有待分类对象的特征 f_i 的标准差。

⑤ 最邻近分类。如式(4),比较上一步中得到的 k 个距离,获得最小距离 d 。每个待分类对象都根据其最近的样本对象被自动划分为某一类,并赋予相应的色度值。

$$d = \min(d_{C_k}) \quad (4)$$

⑥ 不透水面比例计算。输出各地类带有地理编码(gridcode)的栅格数据,并导入ArcGIS软件中;

编写 python 代码将 gridcode 与属性字段信息批量转换为包含属性数据库的矢量数据,并与模型子汇水区空间配准。根据式(5)计算每个汇水区的不透水面比例。

$$A = \frac{\sum_{i=1}^4 P_i A_i}{\sum_{i=1}^4 A_i} \quad (5)$$

式中: A 为子汇水区的不透水面比例; P_i 为不同地类中不透水面比例,本研究中草地、林地取 0,不透水面取 1,未开发用地取 0.5; A_i 为子汇水区中不同地类对应的面积。

在 eCognition Developer 的进程树开发窗的生成对象进程中插入一个子进程,进行 K 最邻近计算,设置作用域为对象数据层,并使用类别描述工具完成 K 最邻近计算与 7 个最优特征数据层的链接。

2 结果与讨论

2.1 提取精度评价

本研究得到的下垫面分类结果见图 8。可以看出,下垫面地物清晰,细节特征明显,其中,草地占 41.72%,不透水面占 32.70%,未开发用地占 4.58%,林地占 21.00%。

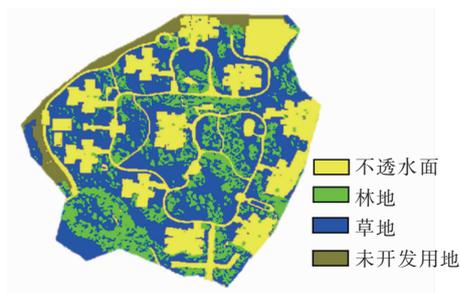


图 8 研究区面向对象法下垫面分色图

Fig. 8 Underlying surface color separation map of object-oriented method in study area

为定量评价提取精度,通过与地面参照数据对比,用混淆矩阵^[11]进行精度计算。地面参照数据采用研究区 CAD 施工图,经过 ArcGIS 软件手动绘制转换为栅格文件。在遵循校验点的随机性和空间均匀分布的原则下,从影像分类结果和地面参照数据中一一对应地抽取了 282 个样本点,计算结果如表 1 所示。可见,总体精度为 82.98%,Kappa 系数为 0.75。其中,不透水面的生产者精度达到 94.85%,说明本方法能有效提取高分 RS 影像中的不透水面;未开发用地的分类精度较低,大部分未开发地样点在地面参照数据中显示为林地和草地,生产

者精度和用户精度都只有 36.84%。分析原因,本研究采用的地面参照数据为研究区施工图,其中未开发用地的地类性质为林地、草地,与 RS 影像数据差异很大。虽然经过波段扩充增强了未开发用地的可分离性,但在与地面参照数据对比时仍被判定为分类错误。

表 1 提取结果精度评价

Tab. 1 Classification results accuracy evaluation

项目	不透水面	林地	草地	未开发用地
不透水面	92	8	7	0
林地	3	38	5	3
草地	0	0	97	9
未开发用地	2	1	9	7
生产者精度/%	94.85	80.85	82.20	36.84
用户精度/%	85.19	77.55	91.51	36.84
总体精度/%	82.98			
Kappa 系数	0.75			

2.2 径流模拟结果

利用本研究提取的不透水面数据建立研究区 SWMM 模型,采用泰森多边形法划分子汇水区,产流选择霍顿下渗模型,汇流采用非线性水库法,管流选择动力波法。利用 2017 年 4 月 26 日排口 A 的监测数据,采用 GLUE 方法^[12]对模型参数进行率定,采用 2018 年 9 月 24 日排口 A 的监测数据对模型进行验证,结果显示纳什效率系数(NSE)为 0.92,峰值误差为 9.56%,峰现时间误差为 0。与在同一研究区域采用 CAD 施工图手动提取不透水面的模拟结果^[13]进行对比,如图 9 所示,两条流量曲线的趋势相似,峰值流量、径流起止时间接近,与时间轴所围面积(径流总量)大致相等,都较好地反映了地面真实径流过程。两种方法各项精度评价指标见表 2。

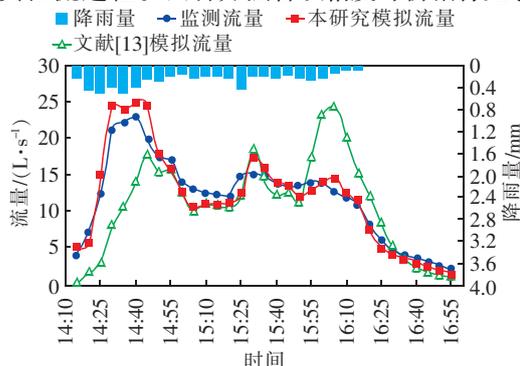


图 9 两种不透水面提取法的径流模拟结果对比

Fig. 9 Comparison of runoff simulation results between two impervious surface extraction methods

表2 两种不透水面提取法的径流模拟精度对比

Tab.2 Comparison of runoff simulation accuracy between two impervious surface extraction methods

项 目	径流模拟结果			不透水面提取方法		
	峰现时间误差/min	NSE	峰值流量误差/%	数据来源	提取效率	准确度
RS 技术提取	0	0.92	9.56	高分 RS 影像	高	高,时效性好
手动提取 ^[13]	95	0.55	5.26	CAD 施工图	低	较高,但不可更新

由表2可知,与手动提取法相比,本研究方法的纳什效率系数更高,峰值流量相差不大,峰现时间更准确。由此表明,基于RS技术的不透水面数据提取方法不仅自动、高效,而且模拟误差更小、时效性更高,尤其适用于手动提取法基本不具备可行性的的大尺度区域的不透水面数据提取。

3 结论

① 采用遥感指数法扩充光谱波段并与原始3波段数据进行多特征融合后,使得未开发用地与不透水面、草地、林地两两间的平均最小分离度由扩充前的1.26、0.16和0.69分别增大到3.29、4.74和8.89,整体平均最小分离度由0.70增大到了5.64,表明波段扩充并融合后,易错分地类的可分离性得到显著增强。

② 基于FNEA算法和eCognition Developer平台实现了影像分割并生成对象,采用K最邻近分类算法提取下垫面数据,得到研究区域草地占41.72%、不透水面占32.70%、未开发用地占4.58%、林地占21.00%。用混淆矩阵进行精度计算,得到分类总体精度为82.98%,Kappa系数为0.75,不透水面的生产者精度达到94.85%,表明本方法能有效提取高分RS影像的不透水面数据。

③ 建立研究区域SWMM模型,模拟结果显示纳什效率系数为0.92,峰值误差为9.56%,峰现时间误差为0。与手动提取法相比,本方法不仅能实现不透水面数据的自动提取,而且模拟误差更小、时效性更高,尤其适用于手动提取法基本不具备可行性的的大尺度区域的不透水面数据提取。

参考文献:

[1] 宋晓猛,占车生,夏军,等. 流域水文模型参数不确定性量化理论方法与应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2014.

Song Xiaomeng, Zhan Chesheng, Xia Jun, et al. Methodology and Application of Parameter Uncertainty Quantification in Watershed Hydrological Models [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2014 (in Chinese).

- [2] 吴亚男,熊家晴,任欣欣,等. 深圳鹅颈水流域SWMM模型参数敏感性分析及率定研究[J]. 给水排水, 2015, 41(11): 126-131.
- Wu Yanan, Xiong Jiaqing, Ren Xinxin, et al. Sensitivity analysis and calibration study on the parameters of SWMM for Ejing watershed in Shenzhen [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(11): 126-131 (in Chinese).
- [3] 张少钦,吴珊,李俊. 全局敏感性分析在LID措施选择中的应用研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33(19): 125-129.
- Zhang Shaoqin, Wu Shan, Li Jun. Application of global sensitivity analysis in selection of LID measures [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(19): 125-129 (in Chinese).
- [4] Yao L, Chen L, Wei W. Assessing the effectiveness of imperviousness on stormwater runoff in micro urban catchments by model simulation [J]. Hydrol Process, 2016, 30(12): 1836-1848.
- [5] Wu C, Murray A T. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(4): 493-505.
- [6] 颜伟,周雯,易利龙,等. 森林类型遥感分类及变化监测研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(3): 445-454.
- Yan Wei, Zhou Wen, Yi Lilong, et al. Research progress of remote sensing classification and change monitoring on forest types [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(3): 445-454 (in Chinese).
- [7] Lu D, Hetrick S, Moran E. Impervious surface mapping with Quickbird imagery [J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32(9): 2519-2533.
- [8] Deng C, Wu C. BCI: A biophysical composition index for remote sensing of urban environment [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 127: 247-259.
- [9] 张永梅,孙海燕,胥玉龙. 一种改进的基于超像素的多光谱图像分割方法[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(1): 58-64.
- Zhang Yongmei, Sun Haiyan, Xu Yulong. An improved multispectral image segmentation method based on superpixels [J]. Remote Sensing for Land & Resources,

- 2019,31(1):58-64(in Chinese).
- [10] 陈金丽. 面向对象的最邻近算法研究与实现[D]. 北京:中国地质大学(北京),2009.
Chen Jinli. Research of Realization of Object Oriented Nearest Neighbor Classification Algorithm[D]. Beijing: China University of Geosciences,2009(in Chinese).
- [11] 李宜展,潘耀忠,朱秀芳,等. 土地覆盖类别面积混淆矩阵校正与回归遥感估算方法对比[J]. 农业工程学报,2013,29(11):115-123,295.
Li Yizhan, Pan Yaozhong, Zhu Xiufang, *et al.* Comparison analysis on land cover area estimators: Confusion matrix calibration and regression [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (11): 115 - 123, 295 (in Chinese).
- [12] Beven K, Binley A. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction[J]. Hydrol Process,1992,6(3):279-298.
- [13] 侯韬. 三维降雨径流模拟与LID设施优化选址研究[D]. 重庆:重庆大学,2017.

Hou Tao. Study on 3D Urban Rainfall-runoff Modeling and the Optimized Location of LID Facilities [D]. Chongqing:Chongqing University,2017(in Chinese).



作者简介:易翰枫(1996-),男,湖南永州人,硕士研究生,研究方向为海绵城市和城市内涝模拟。

E-mail:1094303326@qq.com

收稿日期:2019-12-20

(上接第93页)

- Li Zhihua, Qiu Liang, Wu Xiaoting, *et al.* Optimization of flow rates in a MAAO process treating low COD/TN ratio municipal wastewater[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2019,51(2):288-293,300(in Chinese).
- [13] 葛士建,彭永臻,曹旭,等. 改良UCT分段进水工艺处理生活污水性能优化研究[J]. 环境科学,2011,32(7):2006-2012.
Ge Shijian, Peng Yongzhen, Cao Xu, *et al.* Optimization of a modified UCT step feed process treating municipal wastewater[J]. Environmental Science, 2011, 32 (7): 2006 - 2012 (in Chinese).
- [14] 张立秋,吴丹,张朝升,等. SBBR反应器同步硝化反硝化处理微污染水源水[J]. 中国给水排水,2016,32(23):61-64.
Zhang Liqiu, Wu Dan, Zhang Chaosheng, *et al.* Treatment of micro-polluted source water by simultaneous nitrification and denitrification in SBBR [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32 (23): 61 - 64 (in Chinese).
- [15] 肖才林,沈建华,李甫昌,等. 连续流分段进水生物脱

氮工艺研究进展[J]. 水处理技术,2016,42(7):1-5.
Xiao Cailin, Shen Jianhua, Li Fuchang, *et al.* Advances in continuous step feed biological nutrient removal process research [J]. Technology of Water Treatment, 2016,42(7):1-5(in Chinese).



作者简介:黄子洪(1994-),男,江苏宿迁人,硕士研究生,研究方向为环境生物技术。

E-mail:1115243250@qq.com

收稿日期:2019-08-23