

南昌地区不透水面遥感估算研究

赵晨, 聂运菊*, 汪博军, 李永飞 (东华理工大学测绘工程学院, 江西南昌 330013)

摘要 基于亚像元思想, 采用线性光谱混合模型对混合像元进行分解, 结合传统与手动方法选取端元, 使用 Landsat 8 OLI 数据对研究区不透水面覆盖度 (Impervious Surface Coverage, ISC) 进行提取, 并对初步提取的不透水面采用 NDVI 阈值法进行优化处理。对于模型的分解精度, RMS 平均值为 0.008 812, 达到精度要求。提取结果经精度验证, 提取的不透水面盖度的均方根误差为 0.139 8, 平均绝对误差为 0.080 9, 具有较高的精度。最后, 对南昌部分地区进行不透水面盖度统计, 并对其进行空间分布分析。研究结果表明: 使用线性光谱混合模型并结合传统与手动选取端元, 能够较好的提取南昌地区不透水面盖度信息, 可以解决仅仅基于像元的不透水面提取精度不高的问题; 南昌地区不透水面主要集中在研究区的中部地区, 四周不透水面盖度较低, 平均不透水面盖度最高的地区为青云谱区, 平均 ISC 达到 59%。

关键词 不透水面; 线性光谱混合模型; 端元; 遥感

中图分类号 P 237 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2019)14-0063-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.14.021



开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

Remote Sensing Estimation of Impervious Surface in Nanchang Area

ZHAO Chen, NIE Yun-ju, WANG Bo-jun et al (Faculty of Geomatics, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013)

Abstract Based on the sub-pixel idea, this paper used linear spectral mixture model to decompose the mixed pixels, which combined the traditional and manual methods to select the endmembers. The landsat 8 operational land imager data was used to extract the impervious surface coverage of the study area and the NDVI threshold method was used to optimize the impervious surface of the initial extraction. For the decomposition accuracy of this paper, the RMS average was 0.008 812, which met the accuracy requirements. The extraction result was verified by accuracy, and the root mean square error of the extracted impervious surface coverage was 0.139 8, and the average absolute error was 0.080 9, which had high precision. Finally, the impervious surface coverage statistics of some areas in Nanchang was conducted and the spatial distribution was analyzed. The results showed that the linear spectral mixture model combined with traditional and manual selection of endmembers could better extract the coverage of the impervious surface in Nanchang area, which can solve the problem of low precision of impervious surface extraction based on only pixels; the impervious surface of Nanchang area was mainly concentrated in the central part of the study area. The area with impervious surface coverage was lower, and the area with the highest average impervious surface coverage was Qingyunpu area, with an average ISC of 59%.

Key words Impervious surface; Linear spectral mixture model; Endmember; Remote sensing

近年来城镇化进程不断加快, 生态环境的变化也逐渐引起人们的重视, 而城市化最显著的特点是土地利用类型的变化, 主要是不透水面与以植被为主的非不透水面之间的转换。不透水面是指诸如屋顶、沥青或水泥道路及停车场等具有不透水性的地面。当地表不透水面率达到 10% 时, 流域水质就会受到影响, 当不透水面率超过 30% 时水质会下降^[1], 因此, 不透水面积的增加对生态环境有一定的负面影响。不透水面盖度 (Impervious Surface Coverage, ISC) 是指某区域内不透水面覆盖面积与区域面积的比例^[2], 在城区尺度上, 不透水面盖度是表征城市化程度的重要指标, 现已被广泛应用于城市居民区的人口估算、土地利用规划、地表覆盖制图等各方面^[3]。

由于现有影像分辨率的限制, 相对容易获取的中低分辨率遥感影像基于像元的不透水面遥感提取精度较低。因此, 基于亚像元的不透水面遥感提取方法逐渐成为研究的热点。亚像元分类是针对混合像元的分类方法, 它不将每个像元强行归为某类, 而是计算每个像元中各组成地类端元所占的比例^[4]。Ridd^[5]于 1995 年提出了城市生态环境组分的概念模

型: 植被-不透水面-土壤模型 (Vegetation-Impervious surface-Soil model, 简称 V-I-S 模型), 为定量研究城市生态环境提供了理论依据。Wu 等^[6]在此基础上提出了一种四端元组合 (高反射、低反射、植被和土壤) 来表示城市地表, 并将其应用于 Landsat ETM+ 影像上, 实现真正意义上的混合像元分解, 来提取城市不透水面信息。岳文泽等^[7]采用线性光谱分解的方法, 使用四端元模型 (植被-土壤-高反射率-低反射率) 对上海市的城市不透水面进行估算研究, 并取得一定成果。不同季节地表覆被有一定的差异, 程熙等^[8]使用夏季遥感数据, 采用除土壤的三端元组合对不透水面覆盖率进行估算研究并与 SVM 法对比, 但精度与 SVM 相比较低。

笔者以南昌部分地区为研究区, 使用 Landsat 8 OLI 数据, 采用植被、土壤、高反射率、低反射率不透水面端元组合方式, 使用线性光谱混合模型, 结合传统和手动方法来选取端元, 分别获得低反射率和高反射率不透水面丰度图, 进而获取研究区的不透水面覆盖度, 并对南昌部分地区的不透水面覆盖度及其空间分布进行简单分析, 以期为该区土地利用变化和城市化监测以及城市规划建设等提供参考。

1 研究区域与数据预处理

1.1 研究区概况 南昌地处江西中部偏北, 赣江、抚河下游, 鄱阳湖西南岸, 位于 115°27'~116°35'N、28°10'~29°11'E。南昌市全境以平原为主, 约占总面积的 35.8%, 西北丘陵起伏, 东南相对平坦, 境内水网密布, 湖泊众多。南昌市属于亚

基金项目 江西省数字国土重点实验室项目 (DLLJ201812); 国家自然科学基金 (41602258)。

作者简介 赵晨 (1993—), 女, 安徽亳州人, 硕士研究生, 研究方向: 资源环境遥感、地理信息系统应用。* 通信作者, 副教授, 博士, 从事资源环境遥感、地理信息系统应用研究。

收稿日期 2019-02-23; **修回日期** 2019-03-21

热带湿润季风气候,气候湿润温和,夏季炎热,冬季寒冷,日照充足,一年中夏冬季长,春秋季节短。该研究选择的研究区范围是南昌市部分城区,主要包括湾里区、新建区、青山湖区、东湖区、西湖区、青云谱区和南昌县(图1)。

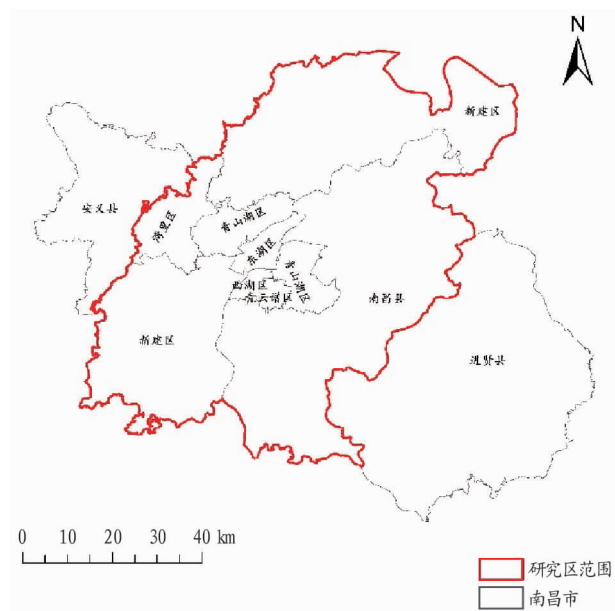


图1 研究区范围

Fig.1 Study area

1.2 数据与预处理 该研究所使用的遥感数据为 Landsat 8 的 OLI 数据,下载自地理空间数据云,日期是 2017 年 9 月 14 日,云量极少。在波段设置和辐射分辨率上 OLI/TIRS 数据比 ETM+数据都有很大的改进。南昌市最新行政区划矢量数据用于影像裁剪,来源于 HOTOSM (<https://export.hotosm.org/en/v3/>)。同时相的谷歌高分影像,分辨率为 2.3 m,重采样后为 3.0 m,用于对提取的不透水面精度验证以及端元选取时的辅助参考数据,数据来源于 LocaSpaceViewer。以上数据空间参考 UTM WGS-84。

试验所下载的 Landsat 8 数据为 level 1 产品,影像已经过几何校正。因此,数据预处理主要包括:辐射定标、FLAASH 大气校正、研究区范围裁剪。辐射定标是将影像的 DN 值转换为辐射率,消除传感器造成的内部误差,辐射定标参数设置为适用于 FLAASH 大气校正的参数,以便后续对影像进行大气校正,并将 DN 值转换为辐射率。FLAASH 大气校正能用来消除或减弱大气对遥感影像的影响,改善影像的光谱信息,将辐射率转变为反射率,从而更好的进行光谱混合分解。最后,对南昌市行政区划数据进行选择与融合,获取研究范围的矢量图,使用研究区范围矢量图进行影像裁剪,得到用于不透水面研究的遥感影像范围。该研究使用 ENVI 5.3 对遥感数据进行处理。

2 研究方法

不透水面覆盖度遥感估算技术路线如图 2 所示。

2.1 水体掩膜与 MNF 变换

2.2.1 水体剔除。为了减小水体对不透水面提取的干扰,首先需要进行水体的剔除,即水体掩膜。该研究使用徐涵秋^[9]

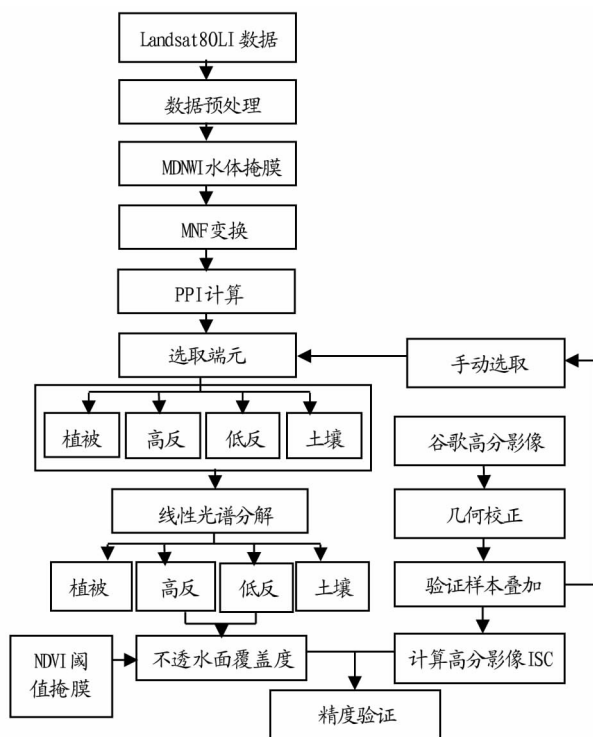


图2 不透水面提取流程

Fig.2 Impervious surface extraction flow chart

改进的归一化水体指数(MNDWI)进行水体掩膜,MNDWI 计算公式如公式(1),经多次密度分割试验后确定阈值为 0.119 5。

$$MNDWI = \frac{Green - MIR_1}{Green + MIR_1} \quad (1)$$

2.1.2 MNF 变换。MNF 变换即最小噪声分离(minimum noise fraction, MNF),其相当于 2 次叠加的主成分变换,通过 MNF 变换能够有效实现数据的降维,对噪声进行分离,从而消除数据之间的相关性,减少噪声对研究目标的干扰。该研究中,MNF 变换后前 4 个分量的信息量已达到 87%,因此使用前 4 个分量的组合来选取端元。

2.2 线性光谱分解模型 由于遥感影像分辨率的限制,中低分辨率影像中一个像元有时不止包含一种地物类型,因此在进行遥感影像分类时,仅仅基于像元的分类方法分类精度往往不能达到精度要求。对混合像元进行分解,从而确定各种终端地类在单个像元中所占的比例,成为遥感分类研究的热点。线性光谱混合模型(linear spectral mixture model, LSMM)是目前应用较为广泛的光谱混合模型。线性光谱混合模型(LSMM)认为混合光谱是各端元与其比例的线性组合^[10]。该模型的数学表达式如公式(2)所示。

$$R_b = \sum_{i=1}^N f_i R_{i,b} + e_b \quad (2)$$

式中, R_b 为 b 波段的像元反射率; f_i 为单一像元内第 i 个端元的反射率所占比例; $R_{i,b}$ 为端元 i 在第 b 波段上的反射率, N 为端元个数; e_b 为第 b 波段的误差。另外,模型还必须满足 2 个约束条件以保证其物理意义,约束条件如式(3),完全约束的线性光谱混合模型可通过最小二乘法原理求解出每个像

元中各端元所占的比例,即丰度,最终分解出每个端元的各像元值均在 0 到 1 之间。

$$\sum_{i=1}^n f_i = 1 \text{ 且 } f_i \geq 0 \quad (3)$$

2.3 端元选取与不透水面提取 在混合像元分解中端元的选择与获取是保证分解精度的关键步骤。端元选择主要有 2 种方法:二维散点图法和 PPI 计算基础上的 n 维可视化分析法。二维散点图是将 MNF 变换后的前 3 个分量任意两两分量组合成二维散点图。散点图的形状一般为似三角形,而端元一般分布在三角形的顶点,越往边缘纯度越高^[7]。而基于 PPI 的 n 维可视化分析法,是通过计算像元的 PPI 值来获得纯净度较高的像元,PPI 值越大则像元纯度越高。

多次试验发现,单纯使用这 2 种方法选取的端元均不能达到很好的分解效果。有研究表明,使用手工选取的方法能达到较高精度^[11],但仅使用手工选取工作量较大,也可能产生一定的人为误差,因此该研究使用结合 PPI 法和手动选取的方法来获取端元。首先对 MNF 变换后的数据进行 PPI 计算,经比较设 PPI 阈值为 5 和 2,能较好的选出植被和山区、田田间土壤端元,通过对研究区影像目视判读以及参考文献^[12],土壤端元还应包括建筑工地裸露土壤以及裸露基岩,对于这些不透水面,主要借助高分辨率影像目视解译手工选取,不透水面分为高反射率不透水面和低反射率不透水面,主要在水泥、沥青地面和屋顶处选取。将以上选取的端元加载到谷歌高分辨率影像上,交互浏览,删除错分和纯度不高的像元,获得质量较好的端元。

线性分解的结果是各个端元的丰度图和最后一个残差均方根(RMS Error)波段,不透水面覆盖度即为高反射率不透水面与低反射率不透水面覆盖度之和;RMS 的值用来检验线性光谱分解的合理性,RMS 均值一般要小于 0.02^[6]。该文的分解结果 RMS 平均值为 0.008 812,表明模型分解具有较高的精度。

2.4 优化处理 在初步分解的结果中往往存在一些错分现象,如阴坡植被容易与低反射率不透水面混淆,干土壤容易与高反射率不透水面混淆,这就增大了不透水面提取结果的误差。为了优化结果,对初步提取的不透水面结果,可使用归一化建筑指数(NDBI)和归一化植被指数(NDVI)进行掩膜处理。有研究分别使用这 2 个指数处理,提高了不透水面的提取精度^[4,13]。但对于该文的研究区域,试验发现,使用 NDBI 进行掩膜处理,在剔除山体植被的同时,也掩膜掉了部分建筑,造成不透水面提取误差,因此,该文使用 NDVI 进行优化处理。

理论上当 $\text{NDVI} > \text{NDVI}_0$ 时, $\text{ISC} = 0$, NDVI_0 为植被与非植被的临界值,经密度分割以及交互浏览多次试验,并在保证不透水面基本范围的基础上,将 NDVI_0 设为 0.557。初提不透水面覆盖度以及进行优化处理的不透水面覆盖度结果分别如图 3 和图 4 所示。为了对比优化处理的结果,在验证精度时,分别对初步提取和经优化处理后的数据进行精度验证。

3 结果与分析

3.1 不透水面提取精度验证 该研究采用均方根误差

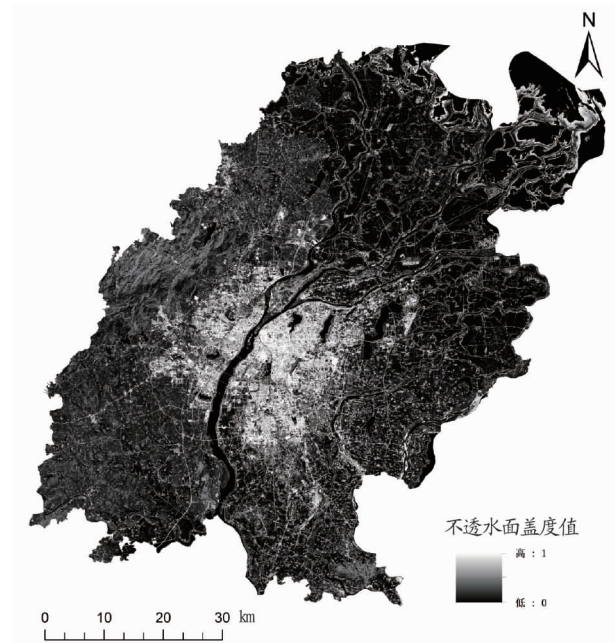


图 3 初提不透水面覆盖度

Fig.3 Initially impervious surface coverage

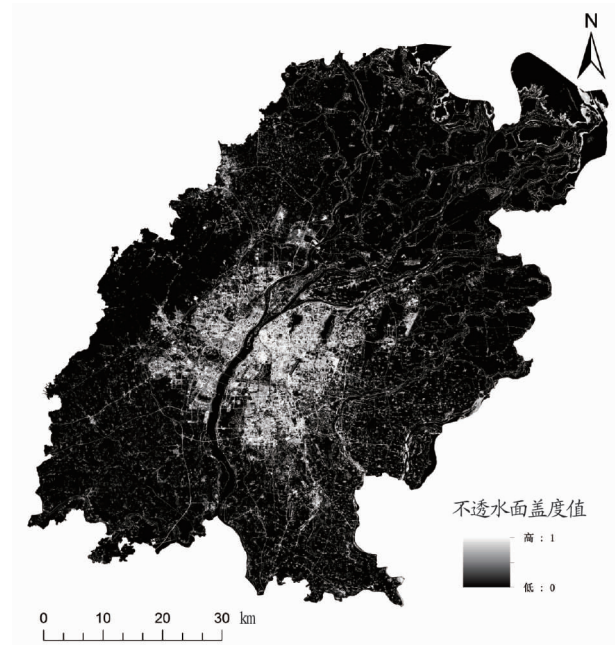


图 4 NDVI 阈值掩膜后不透水面覆盖度

Fig.4 Impervious surface coverage after NDVI threshold mask

(RMSE)和平均绝对误差(MAE)来验证初步提取和经过优化处理后的不透水面覆盖度提取精度,RMSE 和 MAE 的值越小表明误差越小,即精度越高。精度验证使用经几何校正后的 3.0 m 谷歌高分辨率影像,校正误差小于 0.5 个像元。以 3×3 个像元窗口为样本单元,在研究区的原始影像上均匀选取 50 个样本(对应高分辨率影像上,样本大小即为 30×30 个像元),分别统计初提和经优化处理后每个样本的不透水面覆盖度;将样本进行矢量化并加载到谷歌高分影像上,通过目视解译,统计计算每个样本的不透水面比例,作为真实数据。RMSE 和 MAE 计算公式分别如式(4)和(5)所示。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{n}}$$
 (4)

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - X_i|}{n}$$
 (5)

式中, Y_i 为高分辨率影像验证样本的真实不透水面比例, X_i 为该文提取结果的样本区域内不透水面比例, n 为样本数, 在该研究中 n 为 50。

经统计计算, 线性光谱分解初步提取结果的 RMSE 为 0.144 3, MAE 为 0.092 2; 经优化处理后的 RMSE 为 0.139 8, MAE 为 0.080 9。结果表明, 线性光谱分解获得的不透水面盖度具有较高的精度, 特别是经 NDVI 优化处理后精度得到一定程度的提高。

3.2 南昌地区不透水面空间分布分析 对最终的不透水面盖度提取结果进行统计处理, 获得南昌部分地区的不透水面盖度分布情况, 结果如表 1 所示。为了更好地对比每个区县的不透水面盖度情况, 使用 ENVI 分区统计扩展工具进行分区统计, 并计算不透水面面积, 结果如表 2 所示。分类后不透水面空间分布情况如图 5 所示。

由统计结果可知, 含有不透水面的像元数占总像元数的 22.87%, 其中不透水面盖度在 75% 以上的面积占总面积的 9.39%。由不透水面盖度空间分布图 (图 5) 以及表 2 可知, 不透水面分布较集中, 主要分布在青山湖区、青云谱区、西湖区、东湖区以及南昌县的西南部地区, 其中, 青云谱区和西湖区的平均不透水面盖度最高, 分别达到 59% 和 57%。而不透水面盖度的低值区主要在研究区的四周, 其中湾里区尤为显著, 主要因为该地区以山地为主, 植被茂盛, 建筑物稀少, 从而不透水面盖度较低。另外新建区的大部分地区以丘陵农田为主, 开发的建设用地所占比例相对较低, 因此其整体不透水面盖度不高。

表 1 研究区不透水面盖度分布情况

Table 1 Distribution of impervious surface coverage in the study area

不透水面盖度 Impervious surface coverage	像元数 Number of pixels	所占总比例 Total proportion
0	3 930 228	0.771 343
0~0.25	85 437	0.016 768
0.25~0.50	24 541	0.048 172
0.50~0.75	355 992	0.069 863
0.75~1.00	478 215	0.093 854

4 结语

该研究基于混合像元的存在, 采用完全约束的线性光谱混合模型 (LSMM) 对南昌部分地区不透水面盖度的提取方法进行研究, 采用植被—土壤—高反射率—低反射率端元的四端元组合, 能够较好的表示研究区的地表覆被情况。结合手动选取端元方式, 提取出高反射率和低反射率不透水面丰度图, 从而获得研究区不透水面盖度, 由分解结果及精度验证可知, 该方法能够有效的获取南昌地区不透水面盖度及空间分布情况。精度验证结果表明, 不透水面提取整体精

度较高, 具有一定的可信性。

表 2 行政区划内不透水面覆盖度统计

Table 2 Statistics of impervious surface coverage in administrative divisions

行政区 Administrative district	平均不透 水面覆盖度 Average impervious surface coverage	不透水面 估算面积 Estimated area of impervious surface//km ²
东湖区 Donghu district	0.403 7	33.421 9
西湖区 Xihu district	0.571 7	25.146 3
青云谱区 Qingyunpu district	0.594 7	21.449 3
青山湖区 Qingshanhu district	0.351 0	102.433 4
湾里区 Wanli district	0.063 6	14.519 52
新建区 Xinjian district	0.108 4	227.748 4
南昌县 Nanchang County	0.147 7	267.320 6

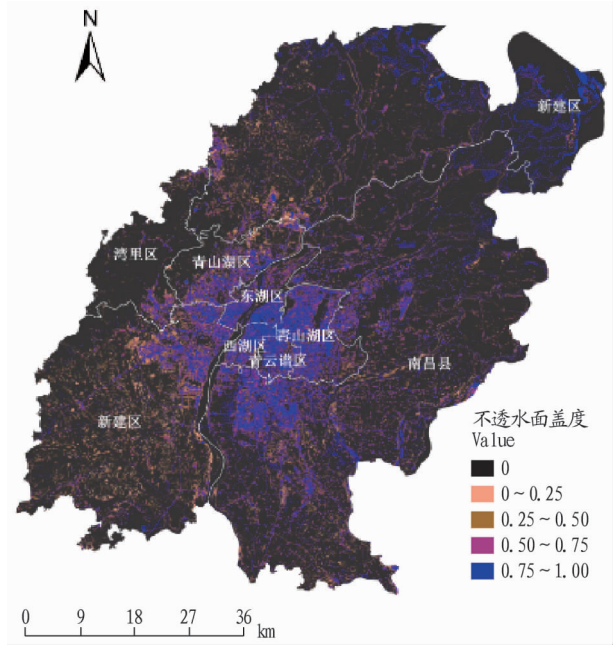


图 5 南昌部分地区不透水面盖度空间分布
Fig.5 Spatial distribution of impervious surface coverage in parts of Nanchang

该研究有些地区不透水面的提取还有待继续探讨: 在研究区域的东北部, 即鄱阳湖与陆地的交界处, 由于富含水分, 造成地表覆被类型复杂, 可能存在较小部分的反射率较低的含水泥沙等, 并且很难通过剔除水体的方式去除。因此, 会对该小部分区域的低反射率不透水面的提取有一定影响, 从而可能降低该区域不透水面整体的提取精度, 仅使用剔除水体的四端元组合很难对这部分地区进行精确的分解。而在初步的尝试中, 将水体作为端元则对南昌城市内部的低反射率不透水面的提取中有明显的影响, 降低了低反射率不透水面的提取精度。在后续研究中可将这些因素考虑进去, 探讨新的端元组合形式与不透水面提取方法, 从而更好地提取特定区域的不透水面信息。

表 2 河北省番茄病毒病原鉴定
Tab 2 Identification of tomato virus disease in Hebei

采集地点 Sample origin	样品数 Sample quantity	ToCV 侵染率 Infections of ToCV /// %	TYLCV 侵染率 Infections of TYLCV /// %	ToCV+TYLCV 混合侵染率 Mixed infection of ToCV+TYLCV /// %	ToMV 侵染率 Infections of ToMV /// %
高邑 Gaoyi	10	50.00	50.00	50.00	0.00
藁城 Gaocheng	20	40.00	40.00	40.00	0.00
栾城 Luancheng	5	0.00	80.00	0.00	0.00
博野 Boye	65	30.77	33.67	30.77	1.54
定州 Dingzhou	15	40.00	60.00	40.00	0.00
清苑 Qingyuan	33	19.65	57.13	19.65	0.00
定兴 Dingxing	20	20.00	65.00	20.00	0.00
雄安 Xiong'an	18	5.56	38.89	5.56	0.00
滦南 Luannan	4	0.00	100	0.00	0.00
丰南 Fengnan	24	4.17	95.80	4.17	0.00
乐亭 Leting	27	0.00	100.00	0.00	0.00
献县 Xianxian	20	5.00	85.00	5.00	0.00
肃宁 Suning	16	25.00	62.50	25.00	0.00
饶阳 Raoyang	29	13.79	37.93	13.79	0.00
永年 Yongnian	13	0.00	100.00	0.00	0.00
肥乡 Feixiang	9	11.11	33.30	11.11	0.00
临城 Lincheng	9	11.11	44.44	11.11	0.00
邢台 Xingtai	9	33.30	55.56	33.30	0.00
总计 Total	346	17.19	63.29	17.19	0.09

除了以上几种病毒外,TSWV 也是该次检测的重点。TSWV 可以侵染茄科、葫芦科、豆科、菊科等多种植物,是番茄上一种重要的病毒,目前云南^[9]、广州^[10]、北京^[11]、山东^[12]、宁夏^[13]等地已有报道。受采样范围所限,该次调查中暂未检测到该病毒在河北省发生。鉴于各地区种子、种苗调运日益频繁,该病毒的传播介体西花蓟马寄主广泛,繁殖力强,田间防治难以有效控制,TSWV 传播范围有可能进一步扩大,因此还应加强监测力度,警惕该病毒在河北省的发生。

参考文献

[1] 冯兰香,蔡少华,郑贵彬,等.我国番茄病毒病的主要毒原种类和番茄上烟草花叶病毒株系的鉴定[J].中国农业科学,1987,20(3):60-66.
[2] 赵世民,李秀生,谈文.番茄病毒病调查及其毒源种类的鉴定[J].河南农业大学学报,1991,25(4):407-414.
[3] 邸垫平,攻焕然,张书敏,等.河北省发生一种番茄新病害-番茄黄化曲叶病毒病[C]//成卓敏.粮食安全与植保科技创新.北京:中国农业科学技术出版社,2009:207-209.

(上接第 66 页)

城市不透水面覆盖度变化会对地表径流、城市热环境等有一定影响,并与城市化进程有一定关系。因此,对于不透水面提取的研究,能够为城市生态健康状况评价、土地利用变化和城市化监测以及城市规划建设等提供一些辅助信息,具有一定的实际应用价值。

参考文献

[1] ARNOLD C L,Jr,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.
[2] 王浩,卢善龙,吴炳方,等.不透水面遥感提取及应用研究进展[J].地球科学进展,2013,28(3):327-336.
[3] 姜增琛,张继贤,梁勇,等.泰安市区不透水面覆盖度遥感估算研究[J].测绘科学,2017,42(5):76-81.
[4] 徐涵秋,王美雅.地表不透水面信息遥感的主要方法分析[J].遥感学报,2016,20(5):1270-1289.
[5] RIDD M K.Exploring a V-I-S (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing:Comparative anatomy for cities[J].International journal of remote sensing,1995,16(12):2165-

[4] 孙国珍,高利利,陆文利,等.河北省设施番茄褪绿病毒分子检测和鉴定研究[J].北方园艺,2015(9):95-98.
[5] 刘玉乐,蔡健和,李冬玲,等.中国番茄黄化曲叶病毒——双生病毒的一个新种[J].中国科学(C 辑),1998,28(2):148-153.
[6] 周莹,尚巧霞,罗晨,等.番茄黄化曲叶病毒的鉴定与群体进化分析[J].植物保护 2016,42(1):106-111.
[7] 于翠.番茄花叶病毒(ToMV)和黄瓜花叶病毒(CMV)单克隆抗体制备及 ToMV 在烟草上致病分子机理研究[D].杭州:浙江大学,2004.
[8] 姜玉霞.新疆加工番茄上番茄花叶病毒的分子检测及全序列测定[D].石河子:石河子大学,2008.
[9] 朱敏,王泊婷,黄莹,等.云南天竺葵上发现番茄斑萎病毒[J].南京农业大学学报,2017,40(3):450-456.
[10] 刘勇,李媛媛,吴竹妍,等.广州辣椒上番茄斑萎病毒属病毒的鉴定[J].植物保护学报,2010,37(4):383-384.
[11] 李飞,吴青君,徐宝云,等.北京地区发现番茄斑萎病毒[J].植物保护,2012,38(6):186-188.
[12] 李洁,迟胜起,杨勤民,等.山东烟台地区发生番茄斑萎病毒病危害[J].植物保护,2017,43(1):228-232.
[13] 曹金强,谢学文,柴阿丽,等.李宝聚博士门诊手记(九十三) 番茄斑萎病毒病在宁夏的发现与防治[J].中国蔬菜,2016(4):87-89.

2185.
[6] WU C S,MURRAY A T.Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis[J].Remote sensing of environment,2003,84(4):493-505.
[7] 岳文泽,吴次芳.基于混合光谱分解的城市不透水面分布估算[J].遥感学报,2007,11(6):914-922.
[8] 程熙,沈占锋,骆剑承,等.利用混合光谱分解与 SVM 估算不透水面覆盖度[J].遥感学报,2011,15(6):1228-1241.
[9] 徐涵秋.一种快速提取不透水面的新型遥感指数[J].武汉大学学报(信息科学版),2008,33(11):1150-1153.
[10] BROMN M,LEWIS H G,GUNN S R.Linear spectral mixture models and support vector machines for remote sensing[J].IEEE Transaction Geoscience and Remote Sensing,2000,38(5):2346-2360.
[11] 黄艳妮,查良松,陈健.基于线性光谱混合模型的混合像元分解研究:以合肥市为例[J].安徽师范大学学报(自然科学版),2012,35(3):258-263.
[12] 邓蕾,赵小锋,王慧娜,等.城市混合像元分解中土壤与不透水面纯像元选取方法的对比研究:以厦门为例[J].遥感技术与应用,2013,28(6):1039-1045.
[13] 赵怡,许剑辉,钟凯文,等.ISMA 结合 NDBI 提取广州市部分城区不透水面的方法[J].地理空间信息,2018,16(3):90-93.