

doi: 10.6046/zrzyg.2020187

引用格式: 李益敏, 杨舒婷, 吴博闻, 等. 昆明市呈贡区不透水面时空变化及驱动力分析[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(2): 136–143. (Li Y M, Yang S T, Wu B W, et al. Spatiotemporal evolution of impervious surface and the driving factors in Chenggong District, Kunming City[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(2): 136–143.)

昆明市呈贡区不透水面时空变化及驱动力分析

李益敏^{1,2}, 杨舒婷¹, 吴博闻¹, 梁雨西¹, 孟月玥³

(1. 云南大学地球科学学院, 昆明 650500; 2. 云南省高校国产高分卫星遥感地质工程研究中心, 昆明 650500; 3. 中国自然资源航空物探遥感中心, 100083)

摘要: 地表不透水面是衡量城市生态环境的关键因素, 及时准确地掌握不透水面的动态变化对城市发展规划具有重要意义。以昆明市呈贡区为研究区, 基于 2007 年、2011 年、2015 年、2019 年 4 期 Landsat 影像为数据源, 对比研究归一化差值不透水面指数(normalized difference impervious surface index, NDISI)和调整型土壤调节植被指数(modified soil adjusted vegetation index, MSAVI)2 种方法的提取精度, 择优提取呈贡区不透水面, 并分析呈贡区不透水面时空动态变化。结果表明: NDISI 平均提取精度为 87.01%, 平均 Kappa 系数为 0.81, 优于 MSAVI 的 81.78% 和 0.75, 故选用 NDISI 方法提取呈贡区不透水面; 2007—2019 年间, 呈贡区不透水面快速增长, 其面积由 2007 年的 46.12 km² 增长到 2011 年的 72.64 km², 2015 年的 146.94 km², 2019 年的 164.42 km², 尤其是 2011—2015 年, 不透水面面积增长速度最快, 增长近一倍; 呈贡区不透水面变化主要受国家政策、城市规划、地形因素和交通发展等因素影响, 呈贡区西部的滇池方向以及中部几个街道办事处增加较快, 对城市内涝、滇池防治带来一定的压力。在未来城市规划过程中, 应协调好不透水面的扩张范围和速度, 避免不透水面空间格局不合理带来生态环境问题。

关键词: 不透水面; 遥感提取; 时空特征; 驱动力; 呈贡区

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)02-0136-08

0 引言

不透水面是指由各种不透水建筑材料所覆盖的表面, 如由瓦片、沥青、水泥混凝土等材料构成的屋顶、道路和广场, 是衡量城市化的重要指标之一^[1]。不透水面是衡量城市化水平和城市生态环境状况的重要指标, 其面积大小、空间分布特征、透水层和不透水面的比例等指标, 可以用来检测城市中生态环境的变化以及人与自然的和谐状况, 在城市化进程及环境质量评估中具有重要的意义^[2]。国家政策、经济发展、人口增加、地形因素影响城市的发展, 进而影响不透水面的变化^[3-4]。

遥感技术的发展为高效准确地掌握不透水面的时空分布及动态变化特征提供了技术支撑^[5]。不透水面提取方法主要有机器学习法^[2]、指数法^[6-10]、光谱混合分析法^[9-11]和分类回归树法^[12-13]等, 其中, 应用最多的方法是光谱混合分析法和指数法。

光谱混合分析法适用于中低空间分辨率遥感影像中的不透水面提取, 在区域尺度下, 光谱混合分析方法在一定程度上解决了中低空间分辨率影像的混合像元问题, 选择合适的端元对混合像元分解的精度有着重要的影响^[14]。赵怡等^[15]结合 Sentinel-2A 与 Landsat8 影像, 利用干旱优化指数与干旱裸土指数进一步对光谱混合分析的结果进一步优化, 提高不透水面提取精度; 杨玉婷等^[16]利用随机森林方法反演实现了对杭州市 1997—2017 年不透水面的提取。

指数法原理简单易懂, 找到各类地物反射率最强和最弱的反射波段, 利用数学模型进行归一化比值运算来提取不透水面。徐涵秋^[17]和穆亚超等^[18]分别利用各自提出的指数实现了对相应目标区域的不透水面提取。

利用不透水面信息的提取, 可以实现对城市形态发展的分析, 张晓萍等^[19]利用不透水面指数(imperious surfaces, IS)指数提取舟山市不透水面后

收稿日期: 2021-06-16; 修订日期: 2021-12-06

基金项目: 云南省科技厅-云南大学联合基金重点项目“‘天空地’协同的高山峡谷区重大地质灾害隐患识别监测预警研究”(编号: 2019FY003017)和云南省教育厅-科技创新人才计划项目“云南大学大湄公河次区域气候变化研究省创新团队”(编号: 2019HC027)共同资助。

第一作者: 李益敏(1965-), 女, 研究员, 主要从事 3S 技术在山地资源环境和地质灾害中的应用研究。Email: 648119611@qq.com。

分析了时间序列的变化。

当前利用各种信息提取不透水面的方法较多,提取方法的精度随各地区土地覆被、气候、城市形态而发生波动。择优选取高精度的不透水面提取方法具有一定学术价值和应用价值。

呈贡区是当前昆明市发展政策扶持的热点区域,其不透水面变化较为明显。本文运用修改型土壤调节植被指数(modified soil adjusted vegetation index, MSAVI)和归一化差值不透水面指数(normalized difference impervious surface index, NDISI)2种指数对呈贡区2007—2019年不透水面进行提取,并对比2种指数,择优选取合适的指数对其提取结果进行分析,以研究呈贡区不透水面时空动态变化的驱动力。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

呈贡区隶属云南省昆明市,面积为461 km²,辖10个街道办事处,西临滇池,东部是山地(图1)。呈贡区属低纬度高原季风气候,全年温差小,呈贡斗南花卉市场是亚洲第一、世界第二的鲜花贸易区,被誉为“花卉市场的风向标”。2011年呈贡新区成立、昆明市政府从主城区搬迁至呈贡新区,云南大学等高校新校区也搬迁至呈贡新区大学城;2015年昆明市地铁开通,连接呈贡新区和昆明主城区;2016年底,昆明高铁开通,呈贡新区高铁南站开通,为呈贡区发展带来新的契机。呈贡新区成为“一带一路”战略规划中辐射东南亚的重要基础设施及云南“八出省、四出境”的重要枢纽中心。



图1 呈贡区地理位置概况

Fig. 1 Overview of geographical location of Chenggong District

1.2 数据源及预处理

本文所选时间考虑呈贡区发展的重要时间节点,2011年呈贡新区成立、市政府和大学城搬迁,2015年开通地铁,因此以4 a间隔选取呈贡区2007年、2011年、2015年、2019年4个年度云量小于1.25%、成像质量较好的Landsat卫星数据进行动态变化分析。

其中,2007年和2011年为Landsat5卫星TM影像,2015年和2019年为Landsat8卫星OLI遥感影像,空间分辨率为30 m,重访周期16 d,均来自美国地质调查局(<https://earthexplorer.usgs.gov/>),遥感数据采用WGS 84坐标系和UTM投影系统。GDP统计数据均来源于昆明市人民政府网站、呈贡区人民政府网站。

对影像进行辐射定标和大气校正等预处理操作,以消除由大气散射等引起的辐射误差,将影像DN值转化为辐射亮度值,再转化为地表反射率,以消除大气散射、吸收和反射造成的误差。

本文采用指数法中的NDISI和MSAVI^[20]进行地表不透水面提取,为避免植被和水体对不透水面的影响,在提取不透水面前,先用归一化植被指数NDVI和归一化水体指数NDWI掩模植被和水体,公式分别为:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}, \quad (1)$$

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}, \quad (2)$$

式中Green, Red, NIR分别为绿光波段、红光波段、近红外波段的反射率。

NDISI是徐涵秋于2008年提出的一种快速提取不透水面指数,将地物分为水体、土壤、建筑物、植被4大类,利用绿光波段、近红外波段、热红外波段、中红外第1波段强化不透水面地物信息,抑制透水面地物信息,进而提取不透水面,公式为:

$$NDISI = \frac{TIR - (MNDWI + NIR + MIR)/3}{TIR + (MNDWI + NIR + MIR)/3}, \quad (3)$$

$$MNDWI = \frac{Green - MIR}{Green + MIR}, \quad (4)$$

式中:MNDWI为改进的归一化水体指数;TIR和MIR分别代表Landsat影像的热红外波段和中红外第1波段的反射率。

闫如柳等^[21]通过NDWI, NDVI和MSAVI完成水体、植被及土壤掩模,将3种信息叠加;再运用MNF变换将原始影像信息集中至前3个波段;最后,将掩模文件与MNF变换后影像合成,选取阈值

提取不透水面信息。本文参考该方法提取不透水面,将地物分为建筑物、水体、植被、土壤 4 类,重点

在透水面(水体、植被、土壤)的提取,利用 MSAVI 进行土壤掩模,反操作提取不透水面,公式为:

$$MSAVI = \frac{2NIR + 1 - \sqrt{(2NIR + 1)^2 - 8(NIR - Red)}}{2} \quad (5)$$

表 1 提取不透水面 2 种指数对比

Tab. 1 Comparison of 2 indexes of impervious surface extracted geographical location of Chenggong District

指数	比值运算所用波段	原理	提取差异
NDISI	绿光波段 近红外波段 热红外波段 中红外第 1 波段	热红外波段和近红外波段用于区分不透水面和植被;热红外波段、中红外第 1 波段和绿光波段用于区分不透水面和水体、土壤	正向提取
MSAVI	红光波段 近红外波段	红光波段和近红外波段用于提取土壤	反向提取

2 呈贡区不透水面时空动态变化

2.1 基于遥感技术的不透水面 2 种指数提取方法对比

水体光谱特征与低反照度不透水面相似,在近红外和中红外波段具有低反射率和强吸收率,需要采用 NDWI 掩模水体,排除水体对提取不透水面的干扰。植物叶片在近红外波段有较强的反射率,NDVI 用于加强红光与近红外差值,是描述植被状况、掩模植被的植被指数。

NDISI 和 MSAVI 这 2 种方法都是目前不透水面提取常用的指数(表 1),2 种指数方法将地物分为水体、土壤、建筑物、植被 4 大类,利用各类地物对不同波段的反射、吸收差异提取不透水面;区别在于 NDISI 指数是从剔除水体和植被的影像中正向直接提取不透水面,而 MSAVI 指数是反向提取,从剔除水体和植被的影像中再提取土壤,剩余影像为不透水面。

2.2 2 种方法提取结果及精度验证

2 种指数法都是将地物分为水体、植被、土壤和透水面 4 类,由于水体和植被对提取不透水面影响较大,提取之前,均使用 NDWI 和 NDVI 剔除水体和植被,且阈值相同,所以 2 种方法最终提取不透水面面积的影响因素来自土壤和透水面,2 种方法的提取结果分别如图 2 所示。

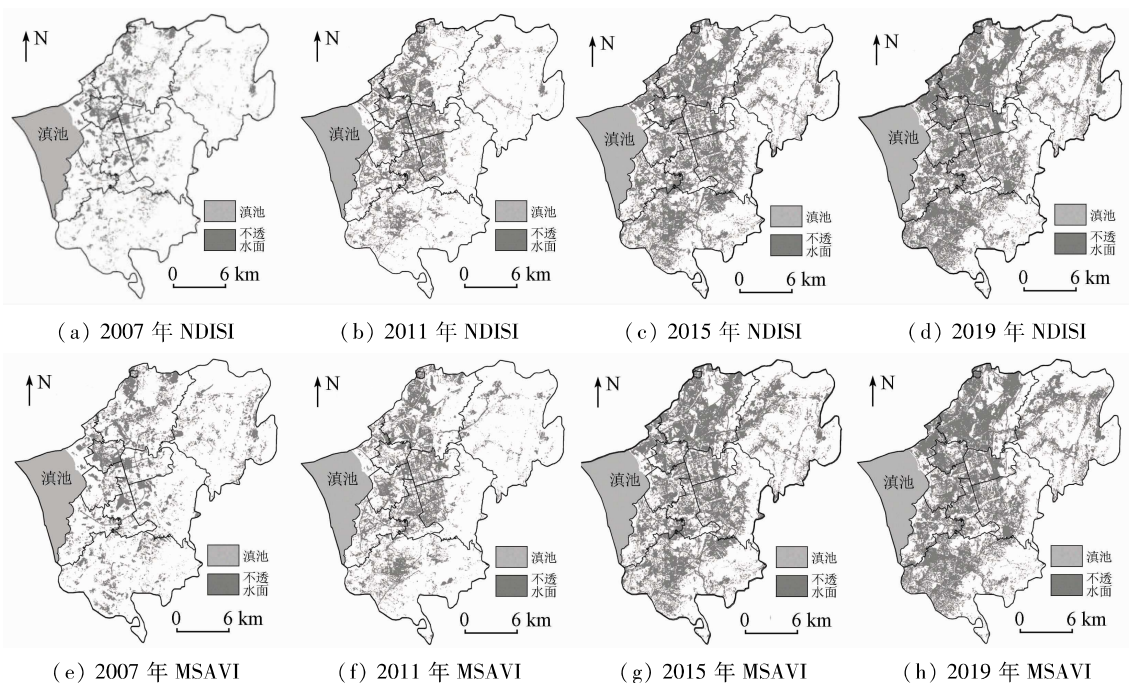


图 2 不透水面提取结果

Fig. 2 Extraction results of impervious surface

为了验证不透水面提取精度,利用 ArcGIS 软件随机生成 260 个样本点,与同时期 Google Earth 高清影像对比进行不透水面提取精度验证,同时在 2019 年 Google Earth 高清影像上选取 100 个点,到呈贡区进行实地验证,验证结果如表 2。2 种方法提取精度有所差异,NDISI 指数的平均 Kappa 系数为 0.81,

MSAVI 为 0.75,结果较为可靠。NDISI 指数的 260 个样本点验证平均精度为 87.01%,高于 MSAVI 指数的验证平均精度 81.78%,通过影像对比、实地验证 2 种验证结果显示,NDISI 指数提取的不透水面结果更为精确。

表 2 各年份不透水面面积占比及精度验证

Tab.2 Proportion of impervious surface area and accuracy verification in each year

年份	NDISI					MSAVI				
	地表不透水面面积/ km ²	面积占比/%	260 个点 验证精度/%	100 个点 实地验证 精度/%	Kappa 系数	地表不透水面面积/ km ²	面积占比/%	260 个点 验证精度/%	100 个点 实地验证 精度/%	Kappa 系数
2007 年	46.12	10.00	88.46	—	0.85	64.99	14.10	81.30	—	0.82
2011 年	72.64	15.76	87.69	—	0.84	78.44	17.02	82.07	—	0.71
2015 年	146.94	31.87	84.23	—	0.71	151.48	32.86	80.30	—	0.66
2019 年	164.42	35.67	87.69	82	0.84	169.75	36.82	83.46	79	0.80

总体上,MSAVI 方法提取的不透水面面积均大于 NDISI 方法,2007—2019 年,2 种指数法提取结果越来越接近。图 3 中(a)—(c)分别为 2007 年局部原始影像、NDISI 和 MSAVI 提取土壤结果,白色部分为不透水面;(d)—(f)分别为 2011 年局部原始影像、NDISI 和 MSAVI 提取结果,提取效果表明 NDISI 指数对于土壤的识别准确率大于 MSAVI 指数,MSAVI 指数容易将土壤识别为不透水面,越接近 2007 年,呈贡区土壤等透水面面积越多,故 MSAVI 提取结果不透水面面积偏大。

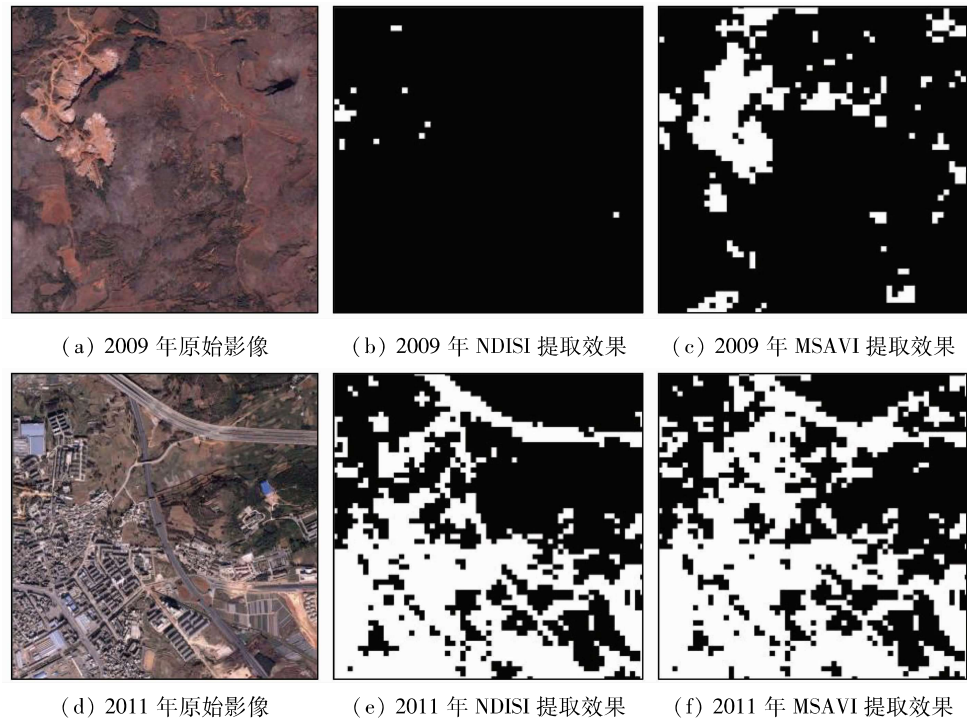


图 3 提取土壤对比(局部)

Fig.3 Comparison of extracted soil (local)

白色大棚属于透水面还是不透水面学界尚未统一,本文参考国务院第一次全国地理国情普查中的相关内容,将白色大棚确定为不透水面。图 4 分别为 2007 年、2011 年、2015 年、2019 年同一位置影像和白色大棚提取结果,可以发现越接近 2007 年,影像中白色大棚颜色与建筑物差别越大,越容易被识别成透水面。白色大棚不能完全被正确识别,会影响不透水面提取精度,是指数法的局限,未来研究中将优化创新方法有效提取白色大棚。



图 4-1 提取白色大棚对比(局部)

Fig.4-1 Comparison of extracted white greenhouses (local)

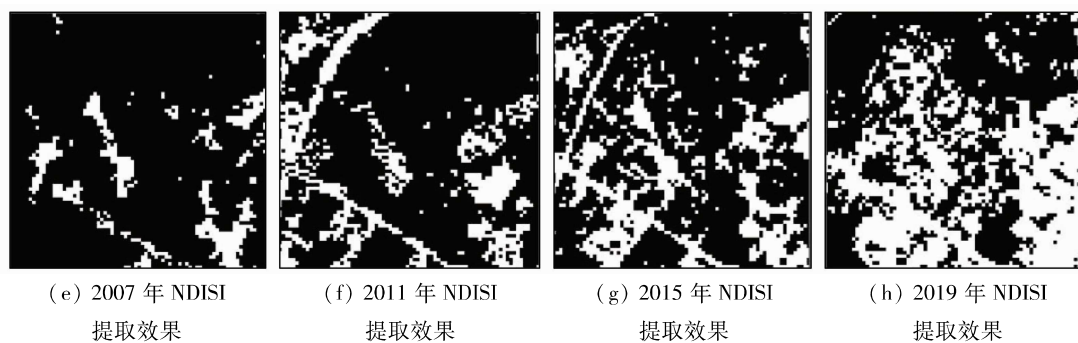


图 4-2 提取白色大棚对比图(局部)

Fig. 4-2 Comparison of extracted white greenhouses (local)

2.3 不透水面时空动态变化特征及分析

2.3.1 不透水面时空变化特征及驱动因素分析

呈贡区不透水面围绕西部滇池发展(图 5)。呈贡区不透水面快速增加对城市内涝和滇池污染防治造成很大压力。交通环境也是驱动呈贡城市发展的一个重要因素,呈贡区围绕地铁经过路线、站点发展,高铁附近发展快速;呈贡区东面为山地,地形地貌特征不适合城市发展,不透水面扩张较为缓慢。

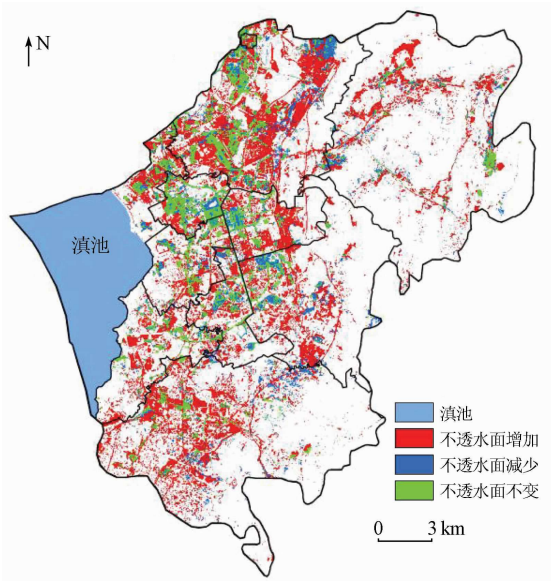


图 5 2007—2019 年不透水面时空变化
Fig. 5 Temporal and spatial variation of impervious surface from 2007 to 2019

2007—2019 年,呈贡区不透水面面积增长较快,国家政策、城市发展规划、区域位置、交通环境和地形地貌是影响城市化进程的主要驱动因素。昆明市 2003 年提出“一湖四片”,即围绕滇池,建设昆明北片(主城区)、东片(呈贡新区)、西片(海口)和南片(晋宁),到 2016 年的“南延北拓”,昆明的城市发展一直围绕着滇池发展。2007—2019 年,作为东片的呈贡新区得到快速发展,不透水面面积占比从 10.00% 增至 35.67% (表 2)。其中,2007—2011 年,不透水面占比从 10.00% 增至 15.76%,驱动因素为昆明东片规划发展以及 2011 年呈贡新区成立,昆明市政府、高校从昆明主城区不断搬迁至呈贡新

区,不透水面快速增加,原不透水面区域建筑用地密度亦逐渐增大;2011—2015 年不透水面增长最快,占比从 15.76% 增至 31.87%,增长 1 倍,主要驱动因素是昆明市政府、高校已从昆明主城区搬迁至呈贡区,建筑用地增加,以及昆明地铁站、高铁站建设开通,呈贡区内交通条件大幅提升,吸引地产开发商投资;2015—2019 年,呈贡区不透水面占比从 31.87% 增至 35.67%,建筑用地面积扩张速度明显变缓。

经济发展会影响城镇建设速度,是影响城市化进程的驱动因素。呈贡区 2007—2019 年不透水面面积变化与 GDP 增长情况如图 6 所示,不透水面面积占呈贡区总面积的比例由 2007 年的 10% 增加到 35.67%,面积增长了 2.19 倍,GDP 由 46.39 亿元增加到 476.79 亿元,GDP 增长了 10.34 倍,呈贡区不透水面面积增长与 GDP 增长具有较强的正相关性。

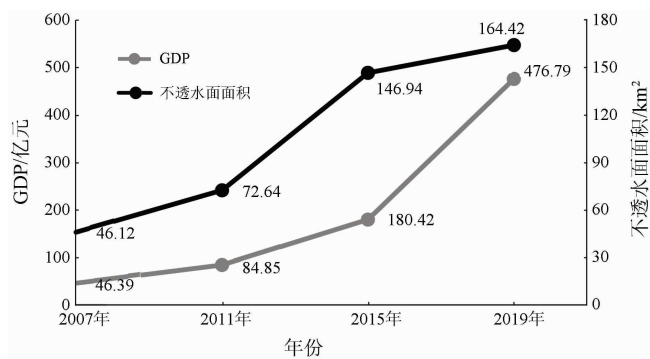


图 6 呈贡区 2007—2019 年 GDP 增长与不透水面面积变化
Fig. 6 GDP growth and change of impervious surface area in Chenggong District from 2007 to 2019

2.3.2 基于行政单元的时空变化特征及驱动因素分析

以街道为单位分析呈贡区 10 个乡镇级行政单元的时空变化特征,结果表明,西部的街道发展较快,东部的街道发展缓慢。平均坡度大的街道发展相对缓慢(表 3 和图 7)。从表 3 可以看出,不透水面扩张受地形因素影响,由呈贡区北部的洛羊街道向呈贡区中部乌龙、龙城、雨花、大渔、洛龙街道扩张,平均坡度较高的马金铺、吴家营、七甸街道扩张

较慢。雨花、洛龙、斗南、乌龙 4 个街道不透水面增加幅度较大,不透水面增加超过 47%,尤其是雨花街道,不透水面增加最快,达到 62.57%,城市化显著。大渔、洛羊、龙城 3 个街道不透水面面积增加幅度在 40%~47% 之间;马金铺、吴家营、七甸 3 个街道是呈贡区的山地分布区,因不适宜大规模开展城市建设,不透水面增长相对较慢,不透水面增长率均低于 40%,尤其是七甸街道,坡度大,不适宜开展城市建设,不透水面增长相对较慢。呈贡区平均坡度与不透水面增长率相关性为 0.71,由于斗南街道大部分区域为滇池水面,剔除斗南街道后的相关性可达到 0.8。

表 3 2007—2019 年不透水面面积增长变化
Tab.3 Area change of impervious surface area from 2007 to 2019

街道名称	街道面积/km ²	平均坡度/(°)	2007—2019 年不透水面增长面积/km ²	2007—2019 年不透水面增长率/%
雨花街道	12.16	4.84	7.61	62.57
洛龙街道	17.76	6.09	8.78	49.41
斗南街道	11.27	0.27	5.37	47.64
乌龙街道	18.41	2.91	8.72	47.35
大渔街道	25.70	4.97	11.69	45.50
洛羊街道	77.63	6.40	34.87	44.92
龙城街道	9.47	4.12	4.13	43.66
马金铺街道	104.82	9.38	40.52	38.65
吴家营街道	64.70	9.53	19.25	29.76
七甸街道	126.00	11.12	25.57	20.30

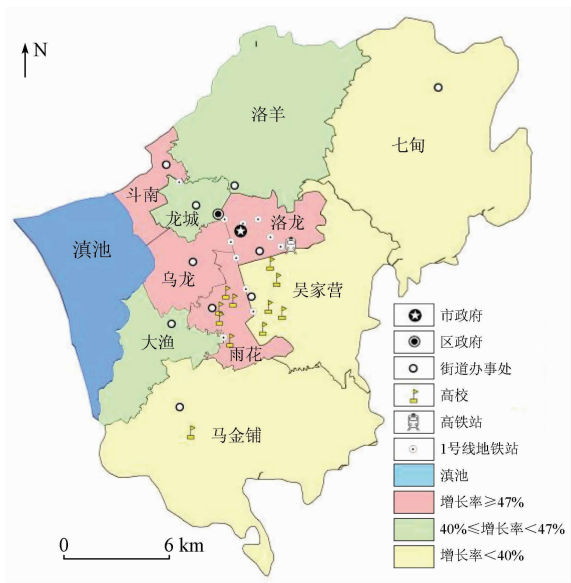


图 7 2007—2019 年各街道不透水面增长速率
Fig.7 Growth rate of impervious surface in each street from 2007 to 2019

3 结论及展望

本文以城市化发展迅速的昆明市呈贡区为研究

对象,对研究区不透水面进行提取和分析,对比研究归一化差值不透水面指数 NDISI 和调整型土壤调节植被指数 MSAVI 提取地表不透水面精度,研究结果表明,NDISI 方法提取不透水面平均提取精度为 87.01%,平均 Kappa 系数为 0.81,优于 MSAVI 方法,平均精度为 81.78%,平均 Kappa 系数为 0.75,NDISI 方法提取结果较为理想。这是因为 MSAVI 提取过程中采用多个阈值,会造成误差累积,降低提取精度,同时部分低反射率建筑物也会在该方法中被识别为透水面,这些都会导致 MSAVI 和 NDISI 对呈贡区域不透水面的提取精度造成差异。

受自然环境、政策、经济发展等因素的影响,呈贡区发展速度惊人,不透水面占比从 2007 年的 10.00% 增长至 2019 年的 35.67%,城市化进程迅速,扩张速度位于云南省前列。尤其是作为文教中心的雨花街道,不透水面增长速度最快,2019 年,不透水面占比达 62.57%。呈贡区不透水面快速增加对城市内涝和滇池污染防治带来一定压力,城市化发展需要平衡城市发展与生态建设之间的关系。

呈贡区遥感影像中建筑物与其他透水面地物区别较大,因此本文提取城市不透水面采取的 2 种指数方法提取效果较好,精度都在 80% 以上。白色大棚识别精度不高,白色大棚虽然定义为不透水面,但是其具有类似于透水面的反射特征,因此如何提高白色大棚的提取精度将是下一步研究的重点。

参考文献 (References) :

[1] 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.
Xu H Q, Wang M Y. Remote sensing - based retrieval of ground impervious surfaces[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5): 1270 - 1289.

[2] 蔡博文,王树根,王 磊,等. 基于深度学习模型的城市高分辨率遥感影像不透水面提取[J]. 地球信息科学学报,2019,21(9):1420-1429.
Cai B W, Wang S G, Wang L, et al. Extraction of urban impervious surface from high - resolution remote sensing imagery based on deep learning[J]. Journal of Geo - Information Science, 2019, 21(9): 1420 - 1429.

[3] 周正龙,沙晋明,范跃新,等. 厦门市不透水面景观格局时空变化及驱动力分析[J]. 应用生态学报,2020,31(1):230-238.
Zhou Z L, Sha J M, Fan Y X, et al. Temporal and spatial variations of impervious surface landscape pattern and the driving factors in Xiamen City, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(1): 230 - 238.

[4] Omurakunova G, Bao A M, Xu W Q, et al. Expansion of impervious

- surfaces and their driving forces in highly urbanized cities in Kyrgyzstan [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(1): 362.
- [5] 李 涵, 李 龙, 张 婷, 等. 徐州市中心城区不透水面时空异质性分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(3): 668–680.
- Li H, Li L, Zhang T, et al. Mapping and characterizing the spatio-temporal heterogeneity of impervious surface in Xuzhou urban area [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(3): 668–680.
- [6] 刘 畅, 杨 康, 程 亮, 等. Landsat8 不透水面遥感信息提取方法对比[J]. *国土资源遥感*, 2019, 31(3): 148–156. doi:10.6046/gtzyyg. 2019.03.19.
- Liu C, Yang K, Cheng L, et al. Comparison of Landsat8 impervious surface extraction methods[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2019, 31(3): 148–156. doi:10.6046/gtzyyg. 2019.03.19.
- [7] 周玄德, 郭华东, 孜比布·司马义. 城市扩张过程中不透水面空间格局演变及其对地表温度的影响——以乌鲁木齐为例[J]. *生态学报*, 2018, 38(20): 7336–7347.
- Zhou X D, Guo H D, Zibibula S. Spatial pattern evolution of impervious surfaces and its influence on surface temperature in the process of urban expansion: A case study of Urumqi [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(20): 7336–7347.
- [8] 帅艳民, 马现伟, 曲 歌, 等. 协同多时相波谱特征的不透水面信息级联提取[J]. *地球信息科学学报*, 2021, 23(1): 171–186.
- Shuai Y M, Ma X W, Qu G, et al. Cascade extraction of impervious surface information based on the signature of temporal spectrum [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2021, 23(1): 171–186.
- [9] Yang J, He Y. Automated mapping of impervious surfaces in urban and suburban areas: Linear spectral unmixing of high spatial resolution imagery[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 54: 53–64.
- [10] 吴 溪, 郭 斌, 陈忠升, 等. 基于 Landsat 影像的环胶州湾不透水面格局演变过程[J]. *资源科学*, 2018, 40(11): 2260–2269.
- Wu X, Guo B, Chen Z S, et al. Spatio-temporal dynamic characterization of impervious surface in the Jiaozhou Bay based on Landsat imagery[J]. *Resources Science*, 2018, 40(11): 2260–2269.
- [11] 李 波, 黄敬峰, 吴次芳. 基于热红外遥感数据和光谱混合分解模型的城市不透水面估算[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(9): 1590–1600.
- Li B, Huang J F, Wu C F. Estimating urban impervious surface based on thermal infrared remote sensing data and a spectral mixture analysis model [J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(9): 1590–1600.
- [12] Yang L, Huang C, Homer C G, et al. An approach for mapping large area impervious surfaces: Synergistic use of Landsat-7 ETM+ and high spatial resolution imagery [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2003, 29(2): 230–240.
- [13] 张 路, 高志宏, 廖明生, 等. 利用多源遥感数据进行城市不透水面覆盖度估算[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2010, 35(10): 1212–1216.
- Zhang L, Gao Z H, Liao M S, et al. Estimating urban impervious surface percentage with multisource remote sensing data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(10): 1212–1216.
- [14] 蔡耀通, 刘书彤, 林 辉, 等. 基于多源遥感数据的 CNN 水稻提取研究[J]. *国土资源遥感*, 2020, 32(4): 97–104. doi:10.6046/gtzyyg. 2020.04.14.
- Cai Y T, Liu S T, Lin H, et al. Extraction of paddy rice based on convolutional neural network using multi-source remote sensing data [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2020, 32(4): 97–104. doi:10.6046/gtzyyg. 2020.04.14.
- [15] 赵 怡, 许剑辉, 钟凯文, 等. 基于 Sentinel-2A 和 Landsat8 的城市不透水面的提取[J]. *国土资源遥感*, 2021, 33(2): 40–47. doi:10.6046/gtzyyg. 2020215.
- Zhao Y, Xu J H, Zhong K W, et al. Impervious surface extraction based on Sentinel-2A and Landsat8 [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2021, 33(2): 40–47. doi:10.6046/gtzyyg. 2020215.
- [16] 杨玉婷, 陈海兰, 左家旗. 1990—2017 年间杭州市不透水面比例遥感监测[J]. *国土资源遥感*, 2020, 32(2): 241–250. doi:10.6046/gtzyyg. 2020.02.31.
- Yang Y T, Chen H L, Zuo J Q. Remote sensing monitoring of impervious surface percentage in Hangzhou during 1990—2017 [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2020, 32(2): 241–250. doi:10.6046/gtzyyg. 2020.02.31.
- [17] 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): 1212–1216.
- Xu H Q. A new remote sensing index for fastly extracting impervious surface information [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(11): 1212–1216.
- [18] 穆亚超, 顾耀文, 张玲玲, 等. 一种新的增强型不透水面指数[J]. *测绘科学*, 2018, 43(2): 83–87.
- Mu Y C, Jie Y W, Zhang L L, et al. An enhanced normalized difference impervious surface index [J]. *Science for Surveying and Mapping*, 2018, 43(2): 83–87.
- [19] 张晓萍, 吕 颖, 张华国, 等. 1990—2011 年舟山群岛不透水面动态遥感分析[J]. *国土资源遥感*, 2018, 30(2): 178–185. doi:10.6046/gtzyyg. 2018.02.24.
- Zhang X P, Lyu Y, Zhang H G, et al. Remote sensing analysis of impervious surface changes in Zhoushan Islands during 1990—2011 [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2018, 30(2): 178–185. doi:10.6046/gtzyyg. 2018.02.24.
- [20] 徐雯靓, 王少军. PROSAIL 模型模拟下的植被指数土壤调节能力比较与适用环境分析[J]. *遥感学报*, 2014, 18(4): 826–842.
- Xu W L, Wang S J. Soil-adjusted power comparison and application conditions of vegetation indices based on PROSAIL model [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(4): 826–842.
- [21] 闫如柳, 杨树文, 张 珊, 等. 一种 Landsat8 影像提取不透水面的新方法[J]. *遥感信息*, 2019, 34(4): 128–132.
- Yan R L, Yang S W, Zhang S, et al. A new extraction method of impervious surface based on Landsat8 [J]. *Remote Sensing Information*, 2019, 34(4): 128–132.

Spatiotemporal evolution of impervious surface and the driving factors in Chenggong District, Kunming City

LI Yimin^{1,2}, YANG Shuting¹, WU Bowen¹, LIANG Yuxi¹, MENG Yueyue³

(1. School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, China; 2. Research Center of Domestic High-Resolution Satellite Remote Sensing Geological Engineering, Kunming 650500, China; 3. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: Impervious surface is a key factor to measure the urban ecological environment. It is of great significance for urban development planning to grasp the dynamic changes of impervious surfaces timely and accurately. Taking the Chenggong District of Kunming City as an example, based on the Landsat images in 2007, 2011, 2015, and 2019, the comparative study of normalized difference impervious surface index (NDISI) and modified soil adjusted vegetation index (MSAVI) was carried out to analyze the spatial and temporal evolution characteristics of impervious surface. The results showed that: ① As the extraction accuracy and Kappa coefficient of NDISI were 87.01% and 0.81, respectively, which were better than MSAVI's 81.78% and 0.75, this paper selected the NDISI method to extract impervious surfaces in the Chenggong District; ② the impervious surface area extracted in this paper increased from 46.12 km² in 2007 to 72.64 km² in 2011, 146.94 km² in 2015 and 164.42 km² in 2019, especially from 2011 to 2015, the impervious surface area had the fastest growth rate and nearly doubled. The changes to the impervious surface in Chenggong District are mainly influenced by such factors as national policies, urban planning, topographic factors, and traffic development. The impervious surface area along the Dianchi Lake in the west of Chenggong District and several administrative regions in the middle of Chenggong District developed rapidly, which brings certain pressure on the prevention and control of waterlogging in urban areas and the Dianchi Lake area. In the process of future urban planning, the expansion scope and speed of impervious surfaces should be well controlled to avoid ecological and environmental problems caused by the unreasonable spatial patterns of impervious surfaces.

Keywords: impervious surface area; extraction by remote sensing; spatiotemporal characteristics; driving force; Chenggong District

(责任编辑: 陈 理)