

引用格式: WANG Haiyi, WANG Hongrong, CHEN Shuxin, *et al.* Dynamic change analysis of vegetation coverage and landscape pattern characteristics in Longquan Mountain Urban Forest Park, Chengdu City[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2023, 38(6): 1455-1466. [王海熠, 王洪荣, 陈树新, 等. 成都市龙泉山城市森林公园植被覆盖度与景观格局特征动态变化分析[J]. 遥感技术与应用, 2023, 38(6): 1455-1466.]
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2023.6.1455

成都市龙泉山城市森林公园植被覆盖度与景观格局特征动态变化分析

王海熠¹, 王洪荣², 陈树新¹, 罗鑫¹, 刘炳杰³, 田昕¹, 冯毅⁴, 王鹏杰⁵

(1. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091;

2. 四川省林业和草原调查规划院, 四川 成都 610081;

3. 北京林业大学森林资源和环境管理国家林草局重点实验室, 北京 100083;

4. 成都龙泉山城市森林公园管委会, 四川 成都 610000;

5. 国家林业和草原局林草调查规划院, 北京 100013)

摘要: 生态环境恶化问题引起人们高度重视, 对植被覆盖度与景观格局特征动态变化研究, 可有效增强植被群落稳定性。成都市龙泉山城市森林公园为川中丘陵区生态恢复典型自然地理代表。本研究基于 Landsat8 OLI 与 GF1 WFV 遥感影像数据, 结合像元二分模型和景观格局指数, 分析了该公园 2014~2021 年植被覆盖度变化特征与空间景观格局变化特征。结果表明: ① 龙泉山城市森林公园 2014、2017 和 2021 年植被覆盖度皆以中高覆盖度为主, 且 2021 年验证精度达 0.90。② 2014~2021 植被覆盖情况呈现先下降再上升的趋势: 2014~2017 年间, 植被覆盖度退化严重, 中高与高植被幅度盖度面积骤减, 景观上斑块复杂度与破碎度加剧; 2017~2021 年间, 由于政府保护措施的执行, 植被覆盖度有所恢复, 中低植被覆盖度面积减少幅度最大, 高植被覆盖度面积增加幅度最大, 植被生态有所恢复, 景观上斑块复杂度降低、景观破碎加剧程度有所缓解。本研究为川中丘陵区的生态恢复及今后规划提供一定的科学参考依据。

关键词: 植被覆盖度; 景观格局指数; 像元二分模型; 动态变化

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2023)06-1455-12

1 引言

龙泉山地处成都平原与丘陵区的过渡地带, 在川中丘陵区具有典型的自然地理代表性。龙泉山城市森林公园于 2017 年 3 月开始建设, 是成都市着力打造的“城市绿心”, 不属于传统意义上的公园, 因此不参与国家公园等级的划分。“城市绿心”的建设积极响应了习近平总书记视察四川时作出的“规

划好天府新区, 突出公园城市特点, 考虑生态价值”指示, 是实现中心城区与东部城市新区连接的重要环节^[1]。由于人类工程活动的干扰、林种结构的不合理等原因, 使得龙泉山城市森林公园低海拔的原始植被破坏情况严重, 林相单一, 生态环境相对脆弱。为防止城市洪涝和泥石流等灾害的发生, 贯彻习近平生态文明思想, 落实习近平总书记对四川及成都工作系列重要指示精神, 成都市在 2017 年与

收稿日期: 2023-05-16; 修订日期: 2023-11-12

基金项目: 高分辨率对地观测系统重大专项课题(21-Y20B01-9001-19/22-1), 四川省林草科技创新团队数字林草监测与林草碳汇创新研究与示范(CXTD2023003)。

作者简介: 王海熠(1998—), 女, 安徽淮南人, 硕士研究生, 主要从事遥感技术与应用研究。E-mail: wanghy@ifrit.ac.cn

通讯作者: 冯毅(1983—), 男, 四川阆中人, 助理研究员, 主要从事森林培育方面的研究。E-mail: 304006152@qq.com

2018年分别编制了《龙泉山城市森林公园总体规划(2016—2035年)》与《成都市龙泉山城市森林公园保护条例》,在2021年开展了公园城市龙泉山生态保护修复暨国家储备林项目,并结合四川省印发的《四川省川中丘陵区(龙泉山成都段)高质量国土绿化试点示范项目(2021—2022)》实施方案用以对公园进行生态复建^[1-2]。

植被是覆盖地表的植物群落的统称,在陆地地表生态系统中处于核心地位,对维护生态平衡和促进区域可持续发展起着举足轻重的作用^[3-4]。植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover, FVC)是指植被的叶、茎和枝部分在地表的垂直投影面积占统计区域总面积的百分比,与光合作用面积及植被茂密程度之间都存在着明显的对应关系,不仅能够体现植被的基本状况,在调节气候问题、改善水土流失和稳定生态系统等方面都起到了重要作用^[4-7]。传统的植被监测通常采用更新频率较低的统计方法,这些方法耗时、费力、成本高,最突出的短板是无法对大范围的植被覆盖变化进行监测。相反,遥感技术具有实时性强、广覆盖度等优点,已成为监测生态环境的一种行之有效的方法^[4]。

植被景观是由不同大小和形状的植被斑块单元排列而成的地理空间对象,具有显著视觉特性、尺度差异和生态人文特征^[8]。植被景观格局的变化是指在一定时期内景观的空间构成与功能的变化,可能受到生态系统结构与功能的自然因素和人文活动的影响^[9-10]。景观格局的变化将直接作用于生态系统服务在空间上的分布,并间接作用于景观内生态过程^[8,11]。研究景观格局的变化对土地利用变化、城市化、生态结构和功能以及环境保护等方面有着重要作用^[8,12]。

近年来,国内外有关FVC的研究多集中在对长时间序列FVC的制图分析上,少有在分析多时期FVC变化的基础上,结合景观格局的变化对研究区的林相情况进行分析和评价^[13]。本研究以龙泉山城市森林公园为研究区,利用龙泉山城市森林公园建设前期(2014年)、建设初期(2017年)和建设后期(2021年)的植被生长旺盛且清晰无云的遥感影像,基于归一化差值植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)构建像元二分模型(Dimidiated Pixel Model, DPM),分别获取了研究区3个时段的FVC,再通过机载CCD影像提取植被点并进行交叉验证,最后结合景观格局指数对FVC的

时空变化特征进行统计分析^[5]。在量化分析FVC与景观格局指数的基础上,以期对龙泉山城市森林公园和川中丘陵区的生态建设和环境保护有所借鉴,为可持续发展思想及成都市创建城市绿心奠定理论与实践基础,在森林生态价值转化等方面建成示范样板,形成可复制、可推广的经验^[1]。

2 数据与研究区

2.1 研究区概况

龙泉山城市森林公园地处四川省成都市的龙泉山脉成都段(104°09′~104°61′E, 30°21′~30°95′N),山脉狭长,整体呈南北走向,是成都市中心城区和东部城市新区的天然边界,地形以低山、平坝为主,地势绵延起伏,最高海拔达1 036 m(图1)。该地区属于中亚热带季风湿润气候,四季分明,夏季降雨集中、气候炎热,冬季降水偏少、气候干燥,年平均气温为16.1℃,年平均降水量为934 mm^[1,14-15]。森林植被林相单一,有底无景。森林资源质量不高且生物多样性不足,导致景观效果不佳,自然植物群落破坏较为严重。森林植被大部分为次生天然林或人工林,以柏木林为主要类型。区域人口居住分散、分布不均。

2.2 数据来源

由于研究区常年云雾较多,为获取云量少于5%的影像,研究所用的三期数据分别为2014年8月13日的Landsat-8 OLI影像,通过中科院地理空间数据云下载,空间分辨率为30 m;2017年7月10日与2021年8月2日的高分1号WFV影像,通过陆地观测卫星数据服务平台下载,空间分辨率为16 m,具体参数见表1。

三期遥感影像成像时间为夏季,是植被生长的旺季,时间上具有可对比性,代表性强,数据空间参考为“WGS_1984_UTM Zone_48N”。运用ENVI 5.3软件对遥感影像进行校正、异常值剔除和裁剪。再将两幅GF1 WFV影像16 m分辨率重采样至30 m,与Landsat-8 OLI影像分辨率保持一致。最后结合NDVI与DPM对植被覆盖信息进行等级划分,确定各等级覆盖面积与其变化范围。

辅助数据来自“成都龙泉山城市森林公园2021年森林植被地图绘制项目(510101202101070)”进行遥感实验所获取的0.3 m分辨率的航空CCD影像,成像时间为2021年7月11日。

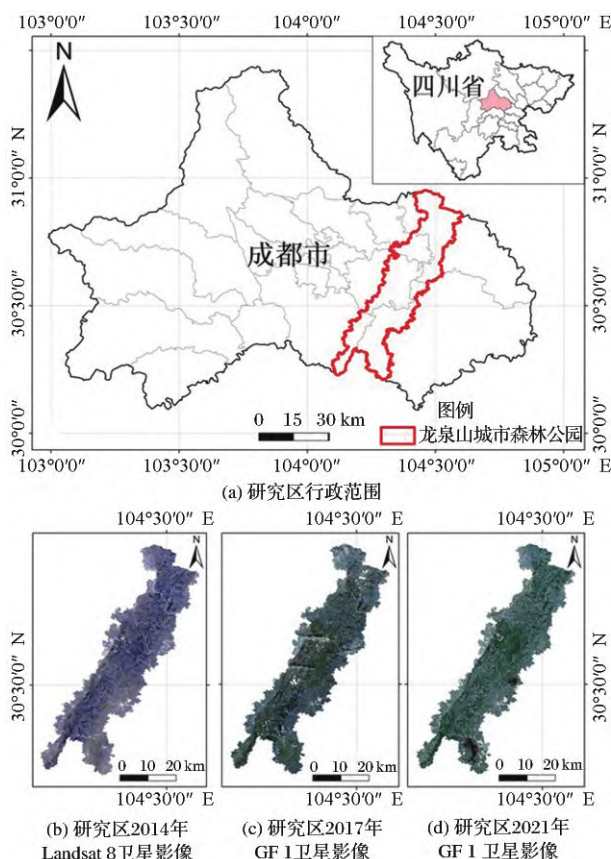


图 1 研究区位置与卫星影像图

Fig.1 The geographical location and satellite image of the study area

3 研究方法

3.1 植被覆盖度分析方法

3.1.1 归一化差值植被指数

NDVI对植被密度和长势具有显著的指示作用,且与FVC之间存在正相关性,反演FVC时具有

良好的提取效果^[16],计算公式为:

$$NDVI = \frac{(R_{NIR} - R_R)}{(R_{NIR} + R_R)} \quad (1)$$

$$NDVI_n = (NDVI_{lt} - 1) * (-1) + (NDVI_{gt} - 1) * 1 + (NDVI_{ge} - 1 \text{ and } NDVI_{le} - 1) * NDVI \quad (2)$$

式(1)中, R_{NIR} 为影像近红外波段的反射率, R_R 为影像红光波段的反射率。在Landsat8 OLI中为5、4波段,在GF1 WFV中为4、3波段。

式(2)中, $NDVI_n$ 为NDVI归一化后数值,在ENVI的波段计算中lt、gt、ge和le分别表示小于、大于、大于等于和小于等于。

NDVI的取值范围为 $[-1, 1]$,数值越高植被覆盖状况越好。由于受大气的影 响,会出现超出 $[-1, 1]$ 的异常值,需要通过公式(2)对NDVI异常值进行波段计算来实现归一化处理。

3.1.2 像元二分模型

DPM的计算原理是认为每一个像元都由植被与土壤两个要素构成,然后分解遥感光谱信息,再建立DPM,进而得到FVC^[17],计算公式为:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (3)$$

式(3)中,FVC为植被覆盖度, $NDVI_{soil}$ 为纯裸地覆盖像元的NDVI值; $NDVI_{veg}$ 为纯植被覆盖像元的NDVI值。

由于影像中的噪声是不可避免的,导致NDVI的极值并不一定是 $NDVI_{max}$ 与 $NDVI_{min}$,因此通过选取置信区间的方式来减少噪声的影响^[18-19]。区间最大值为 N_{veg} ,最小值为 N_{soil} ^[20]。根据三期影像各自计算所得的NDVI频率统计表,本研究中三期影像均选取 $[5\%, 95\%]$ 作为置信区间,最后利用FVC公

表 1 卫星参数信息

Table 1 Satellite parameter information

Landsat 8 OLI			GF 1 WFV		
波段名称	带宽/ μm	分辨率/m	波段名称	带宽/ μm	分辨率/m
Band1 Coastal	0.43~0.45	30	Band1 Blue	0.45~0.52	16
Band2 Blue	0.45~0.51	30	Band2 Green	0.52~0.59	16
Band3 Green	0.53~0.59	30	Band3 Red	0.63~0.69	16
Band4 Red	0.64~0.67	30	Band4 NIR	0.77~0.89	16
Band5 NIR	0.85~0.88	30			
Band6 SWIR1	1.57~1.65	30			
Band7 SWIR2	2.11~2.29	30			
Band8 Pan	0.50~0.68	15			
Band9 Cirrus	1.36~1.38	30			
Band10 TIRS1	10.6~11.19	100			
BAND11 TIRS2	11.5~12.51	100			

式(3)得到3个时期龙泉山城市森林公园的FVC分布图。

为利于下文的数据分析,本研究借鉴了相关文献划分标准,依据研究区的植被覆盖情况与生态环境特点,将FVC按表2所示分为了5个等级^[21-22]。

表2 植被覆盖度等级划分表

Table 2 Classification table of FVC grades

等级	划分范围	名称
I	$FVC \leq 0.30$	低植被覆盖度
II	$0.30 < FVC \leq 0.60$	中低植被覆盖度
III	$0.60 < FVC \leq 0.75$	中植被覆盖度
IV	$0.75 < FVC \leq 0.90$	中高植被覆盖度
V	$FVC > 0.90$	高植被覆盖度

3.1.3 植被覆盖度验证方法

将通过GF 1影像反演得到的FVC结果与通过CCD影像监督分类得到的FVC结果进行交叉验

证,来验证植被覆盖度精度。以2021年植被覆盖度作为验证对象,航空CCD影像的获取时间为2021年7月11日,GF 1影像的获取时间为2021年8月2日,两者均为2021年夏季(6~8月),符合森林植被相同物候期的要求。

具体方法是在分辨率0.3 m的CCD影像上划定一个大小为3.2 km×3.2 km范围的区域,在每个FVC等级中各有10个样点的前提下,从此区域中随机抽取50个16 m×16 m大小的感兴趣样点区域(图2),其中选取16 m×16 m窗口是为了确保和GF 1影像的空间分辨率一致^[5]。通过将筛选出的样点区域进行植被和非植被的分割来实现监督分类,该样点的FVC即为植被像元在其中的占比,将通过监督分类得到的FVC按表2进行等级划分,最后将划分后的FVC等级与反演所得的FVC等级进行对比,来实现精度检验。

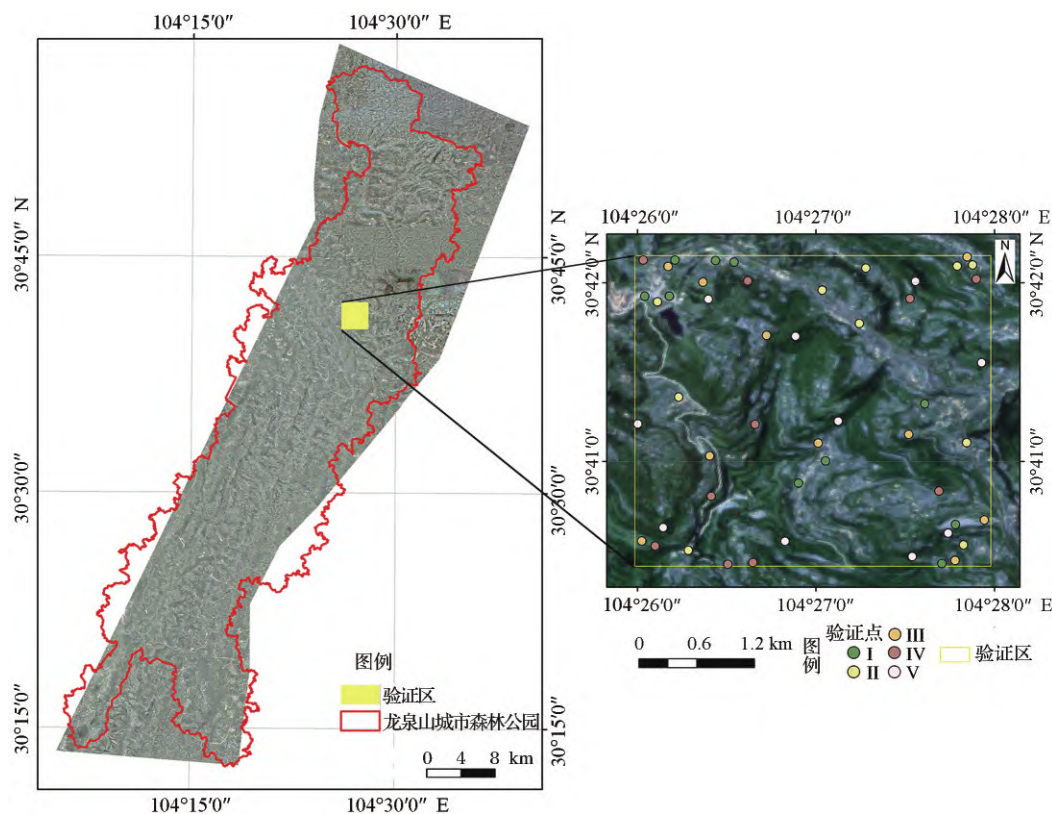


图2 研究区验证点在CCD影像上的位置

Fig.2 Location of the verification point in study area on the CCD image

3.1.4 植被覆盖动态度

植被覆盖动态度可以直观反映出某一时间范围内每个FVC等级的变化速率与特征^[5,23],公式如下:

$$D = \left(\frac{F_2}{F_1} - 1 \right) * \frac{1}{T} \times 100\% \quad (4)$$

式(4)中D为特定时间段内植被覆盖动态度, F_1 和 F_2 分别为某一研究时段期初和期末的植被覆盖面积, T 为两个时期的间隔年数。

3.1.5 植被覆盖度差值指数

采用插值法定量分析不同时期之间的植被覆盖度动态变化 ΔFVC ^[24-25],公式如下:

$$\Delta FVC = FVC_i - FVC_{i-1} \quad (5)$$

式(5)中的 ΔFVC 为植被覆盖差值指数, $\Delta FVC > 0$ 表示FVC增加, $\Delta FVC < 0$ 则表示减少。 FVC_i 及 FVC_{i-1} 是前后两期FVC影像上的像元值。 FVC 差值指数的取值范围 $[-1, 1]$,按照表3中的5个等级对差值进行划分,以此来表达FVC的退化或改善等变化程度^[25-26]。

表 3 植被覆盖变化类型等级划分表

Table 3 Classification table of vegetation cover change types and grades		
等级	划分范围	名称
1	$-1 \leq \Delta FVC \leq -0.3$	明显退化
2	$-0.3 < \Delta FVC \leq -0.1$	轻微退化
3	$-0.1 < \Delta FVC \leq 0.1$	无明显变化
4	$0.1 < \Delta FVC \leq 0.3$	轻微改善
5	$0.3 < \Delta FVC \leq 1$	明显改善

3.2 景观格局分析

采用景观指数对景观格局进行描述和分析,可以定量分析景观斑块特征、破碎化特征、多样性特征等^[7,29]。本研究选取5种基于斑块类型尺度指数作为分析基础,具体参数见表4,利用Fragstats4.2

软件计算上述5种指数。

表 4 景观格局指数

Table 4 Landscape pattern index	
应用尺度	指数
	斑块数量(Number of Patches, NP)
	平均斑块面积(Mean Patch Size, MPS)
斑块类型尺度	景观形状指数(Landscape Shape Index, LSI)
	最大斑块指数(Largest Patch Index, LPI)
	聚合度指数(Aggregation Indices, AI)

4 结果与分析

4.1 研究区植被覆盖度时空分布及总体变化

4.1.1 植被覆盖度空间分布特征

研究区2014年、2017年和2021年的FVC分布图(图3)显示,V分布在研究区中部往西南方向延伸区域,I分布于研究区边缘区域,多为湖泊河流与村落等建设用地。研究区内3期平均FVC分别为0.757 6、0.665 2、0.706 0,2014年FVC均值水平最高,2021年次之,2017年最低,其变化趋势与2017年开始针对龙泉山城市森林公园植被破坏严重进行生态保护建设情况相吻合。

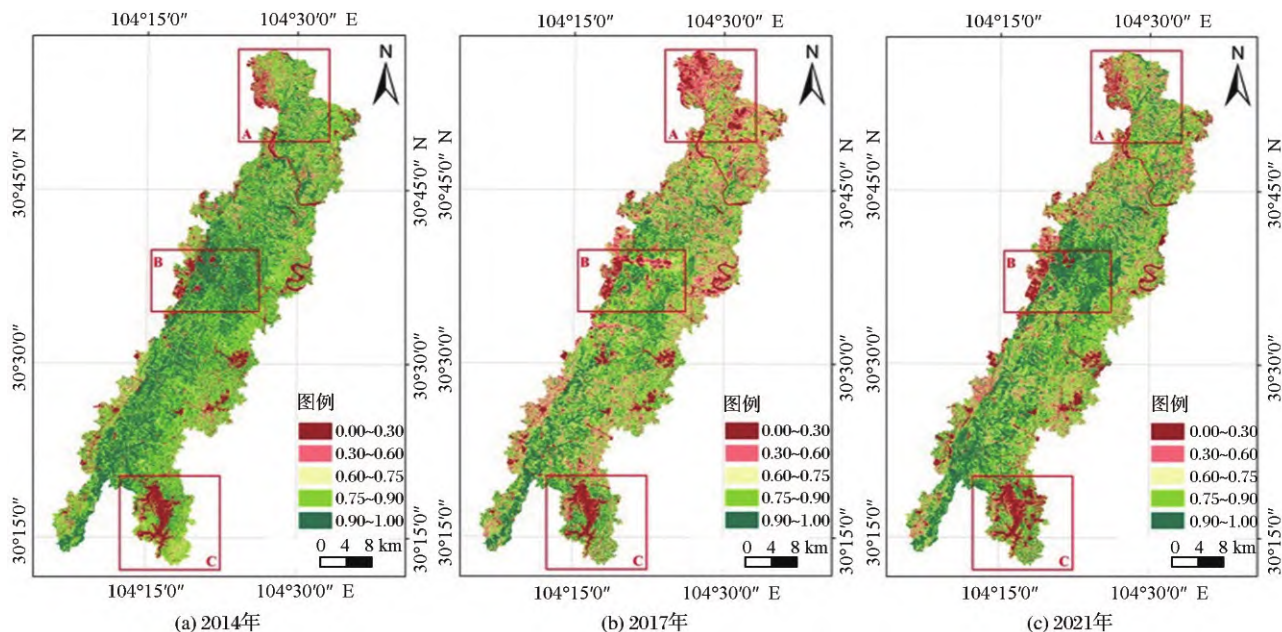


图 3 研究区 2014、2017、2021 年植被覆盖度等级空间分布

Fig.3 Spatial distribution of FVC levels in the study area in 2014, 2017 and 2021

从3期数据各等级FVC面积的统计结果(表5)可以看出,研究区2014年与2021年皆以Ⅳ与Ⅴ为主,2014年Ⅳ与Ⅴ面积总和为864.37 km²,占研究区总面积的67.86%;2021年Ⅳ与Ⅴ面积总和为710.90 km²,占研究区总面积55.81%。2017年则以Ⅱ、Ⅲ

与Ⅳ为主,三者面积总和为626.36 km²,占研究区总面积49.17%。3期数据的Ⅳ占比均较高,维持在(30±4)%范围内。2017~2021年间,Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ面积占比总和皆高于60%,分别达到82.18%、67.74%、73.71%,说明研究区植被覆盖情况良好。

表5 研究区不同时期、不同植被覆盖度等级面积统计表(km²)Table 5 Statistical table of different periods and different levels of vegetation coverage in the study area(km²)

FVC 等级	2014年		2017年		2021年	
	面积	占比	面积	占比	面积	占比
I	103.29	8.11%	139.32	10.94%	130.46	10.24%
II	123.69	9.71%	271.54	21.32%	204.46	16.05%
III	182.45	14.32%	281.45	22.09%	228.01	17.90%
IV	431.89	33.91%	344.92	27.08%	367.45	28.85%
V	432.48	33.95%	236.61	18.57%	343.45	26.96%
合计	1 273.81	100%	1 273.83	100%	1 273.83	100%

4.1.2 2021年植被覆盖度估算结果验证

通过对比GF 1影像反演得到的FVC结果与过CCD影像监督分类得到的FVC结果进行精度验证。50个样点中,5个样点不属于反演所得到的FVC等级范围,即存在5个误差点,分别是Ⅲ的2个样点与Ⅳ的3个样点。对于50个样点进行交叉验证,结果表明,基于GF 1数据的2021年FVC估算精度为0.90。

4.1.3 植被覆盖度时间变化趋势

通过公式(5)计算出3个时期之间FVC的变化程度,统计结果见图4与表6。由图4与表6可以看出研究区植被覆盖变化类型以未发生明显变化为主,2014~2017年无明显变化等级的占比为37.41%,2017~2021年无明显变化等级的占比为42.21%,2014~2021年无明显变化等级的占比为42.27%。2014~2017年期间,FVC退化面积(575.13 km²)大于改善面积(221.54 km²),植被退化较为严重;2017~2021年期间,FVC改善面积(463.46 km²)大于退化面积(272.69 km²),植被生态有所恢复。总体来看,2014年至2021年期间,FVC退化面积(456.95 km²)大于改善面积(277.89 km²),植被依旧未恢复之前生态状况,但比之2017年有所好转,表明龙泉山城市森林公园生态保护建设起到了一定效果。从整体上看,各等级的FVC之间存在着相互转移的关系,向相邻的低或高等级转移的面积大,跨等级转移的面积比较小,表明3个时期内的研究区植被变化情况虽复杂但正常。

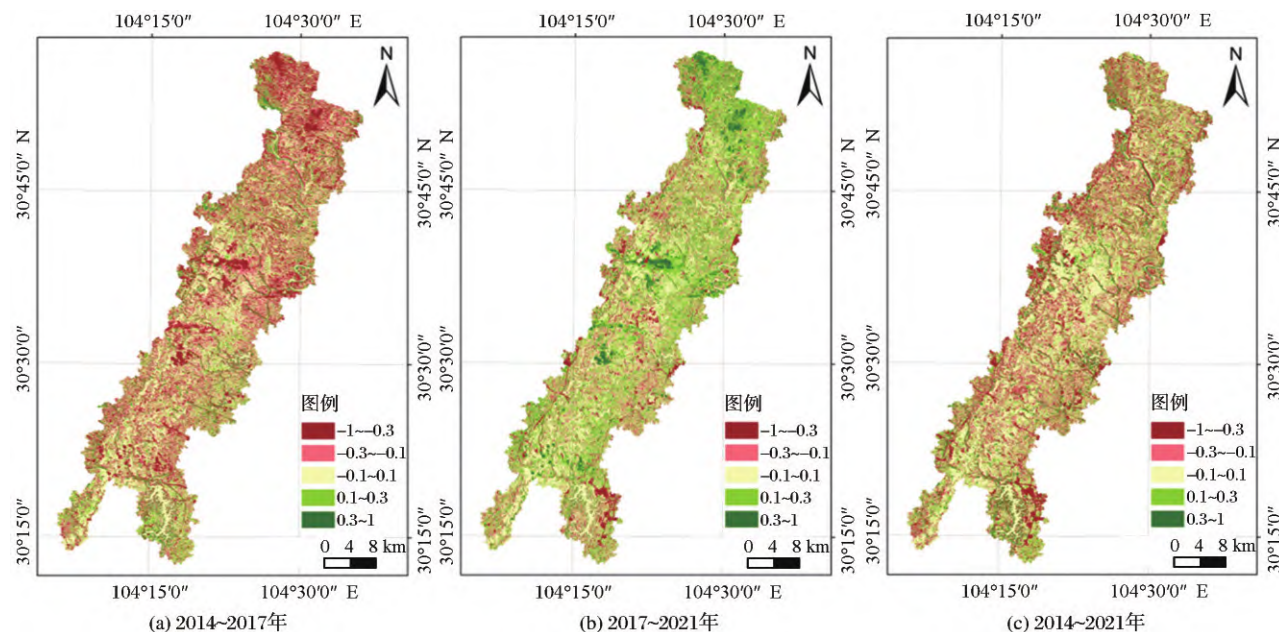


图4 研究区植被覆盖度变化空间分布图

Fig.4 Spatial distribution of vegetation coverage changes in the study area

4.1.4 植被覆盖度动态变化分析

从表7可以看出,2014~2017年期间Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ面积增加,Ⅳ和Ⅴ面积减少。其中,Ⅱ增长最为显著、增加幅度最大,增加147.85 km²,动态度为39.84%;Ⅴ面积减少较为严重、减大幅度最大,减少195.87 km²,动态度为-15.1%。由此表明,2014~2017年间研究区Ⅳ与Ⅴ斑块遭到不同程度的破坏,

植被状况逐渐下降,Ⅳ与Ⅴ的植被存在明显退化现象,生态破坏较为严重。其中,A区块与B区块范围内的植被退化情况较为严重,自然植被破坏、房屋扩建与人为活动等因素是导致这一现象的主要原因(如图5所示)。

2017~2021年期间,Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ的面积减少,Ⅳ和Ⅴ面积增加。其中,Ⅱ的面积缩减最为明显、减

表 6 研究区不同等级植被覆盖度差值指数统计表(km²)
Table 6 Area statistics of FVC change in the study area (km²)

变化等级	2014~2017 年		2017~2021 年		2014~2021 年	
	面积	占比	面积	占比	面积	占比
明显退化	232.54	18.27%	95.30	7.48%	191.07	15.01%
轻微退化	342.59	26.91%	177.39	13.93%	265.88	20.89%
无明显变化	476.18	37.41%	537.68	42.21%	538.02	42.27%
轻微改善	144.01	11.31%	311.17	24.43%	177.04	13.91%
明显改善	77.53	6.09%	152.29	11.96%	100.84	7.92%
合计	1 272.85	100%	1 273.83	100%	1 272.85	100%

表 7 研究区不同等级植被覆盖度面积变化统计表
Table 7 Statistical table of area change of FVC of different grades in the study area

FVC 等级	变化量/km ²			动态度		
	2014~	2017~	2014~	2014~	2017~	2014~
	2017 年	2021 年	2021 年	2017 年	2021 年	2021 年
I	36.03	-8.86	27.17	11.63%	-2.12%	8.77%
II	147.85	-67.08	80.77	39.84%	-8.23%	21.77%
III	99.00	-53.44	45.56	18.09%	-6.33%	8.32%
IV	-86.97	22.53	-64.44	-6.71%	2.18%	-4.97%
V	-195.87	106.84	-89.03	-15.10%	15.05%	-6.86%

少幅度最大,减少面积为 67.08 km²,动态度为 -8.23%;V 面积增长最为显著、增加幅度最大,增加面积为 106.84 km²,动态度为 15.05%。整体看,2017 年~2021 年间,研究区植被状况逐渐改善,尤其 V 面积的增加说明了生态保护起到了效果。其中,A 与 B 区块的植被覆盖情况有所改善,C 区块的

三岔湖景区东部 FVC 下降较多。对比两期影像(如图 6 所示)可以看出道路与房屋扩建是造成 C 区块 FVC 下降的主要原因。

2014~2021 年期间,FVC 变化的趋势与 2014~2017 年一致:I、II 和 III 面积增加,IV 和 V 面积减少,但变化幅度相比 2014~2017 年要减缓许多。其中,II 面积增加最多(80.77 km²),动态度达 21.77%;V 面积减少最为严重(89.03 km²),动态度达 -6.86%。可以看出 8 年间 FVC 经历了先大幅度下降再有所升高的“V”字形过程,但总体还未恢复到 2014 年水平。由此表明,自 2017 年开始一系列政策的实施对生态环境起到了有效的保护作用。

4.2 景观格局结果与分析

研究区在各时期景观指数变化趋势如图 7 所示。在一定程度上,斑块数量 NP 能够度量某一特定斑块类型的破碎程度。由图 5(a)可知,2014~2021 年 I 的 NP 数值呈先上升再下降趋势,其余等级 FVC 皆呈现先下降再上升趋势。其中,III 的 NP 数值一直处于最高水平,II、IV 与 V 在 2014~2017 年呈现下降趋势,2017~2021 年间有所上升。

斑块数量 NP 与平均斑块面积 MPS 均能部分代表景观破碎化程度,MPS 增大、NP 减小斑块破碎度降低^[27]。但由于各等级的 FVC 面积之间存在着相互转移的关系,会造成两者变化趋势不一定完全相反的情况。从图 7(b)中可以看出,三期影像的 III 的 MPS 在 2014~2021 年间一直维持在最小水平,

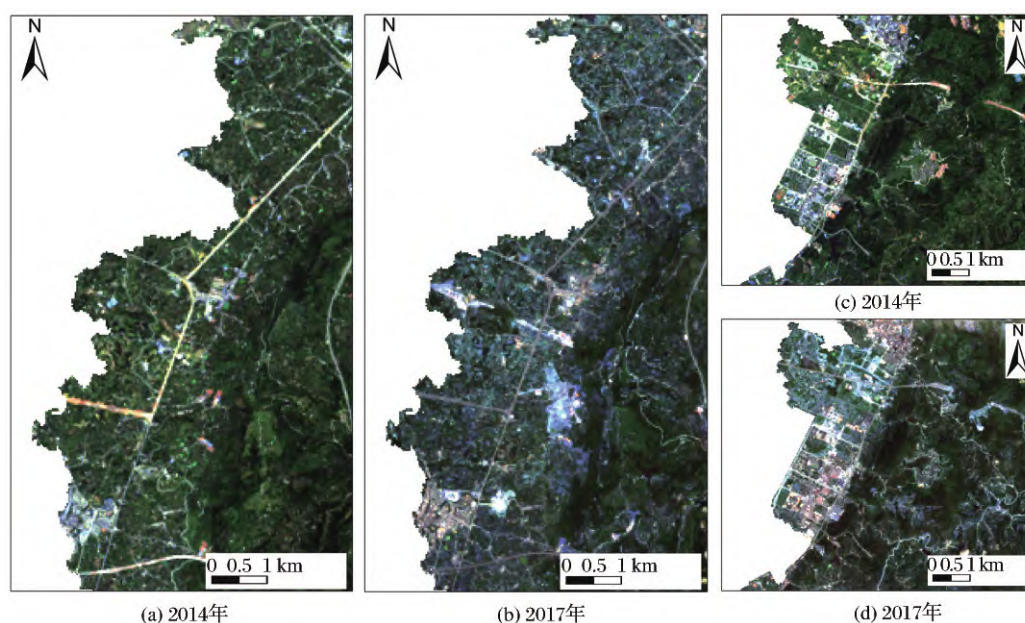


图 5 2014 年(a、c)与 2017 年(b、d)局部对比图

Fig.5 Local comparison map in 2014 (a, c) and 2017 (b, d)

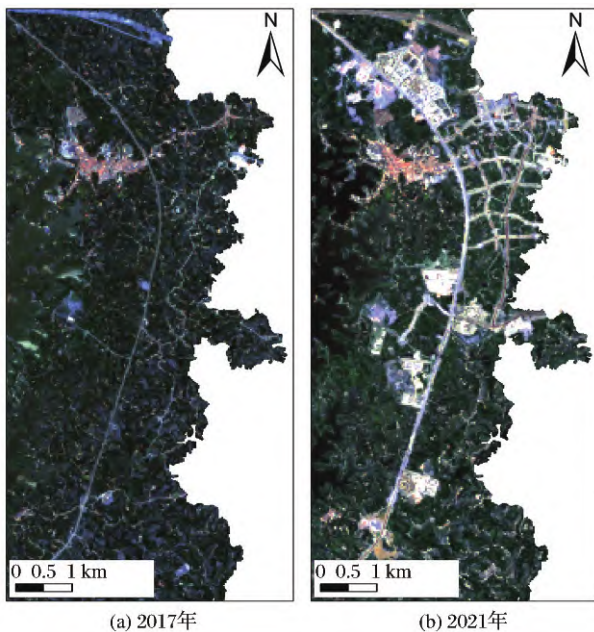


图6 2017年与2021年三岔湖景区局部对比图

Fig.6 Local comparison map of Sancha Lake Scenic Spot in 2017 and 2021

表明其受人类活动影响较大,破碎程度较高。在2014~2017年间Ⅱ与Ⅲ破碎度下降,Ⅰ、Ⅳ与Ⅴ破碎度上升;而在2017~2021年间破碎度变化呈现出相反的趋势,除Ⅱ与Ⅲ破碎度加剧外,Ⅰ、Ⅳ与Ⅴ的破碎度均呈现下降趋势,Ⅴ破碎度下降程度最为显著。结合NP数据可以得出,2017年后研究区景观破碎程度整体呈下降趋势,人类活动影响减弱,生态环境有所改善。

最大斑块指数LPI为某种类型中的最大斑块在景观总面积中所占的比重,体现了景观空间格局,它的大小对景观中的优势种、内部种的丰度等指标有重要影响,体现着人类活动的方向与强弱,可以作为确定优势景观元素的依据,与景观破碎度呈正相关性^[1,22]。从图7(c)中可以看出,2014~2021年期间Ⅱ和Ⅲ的LPI与Ⅰ、Ⅳ和Ⅴ的LPI呈现出相反变化趋势。Ⅵ的LPI从2014年的最大值6.77%断崖式下降至2017年的最小值0.38%,再上升至2021年的最大值4.43%。表明在此期间,Ⅵ的优势地位逐渐遭到削弱后,通过政府一系列政策措施的修复治理,后优势地位逐渐恢复、斑块整体性逐步加强。

景观形状指数LSI是衡量斑块形状复杂性的指数,其值越大说明斑块越复杂、形状越不规则^[28-29]。从图7(d)中可以看出,2014~2021年间Ⅰ的LSI先上升再小幅度降低,Ⅴ的LSI先下降再小幅度升高,Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ的LSI呈现逐步升高的趋势,且Ⅲ的增加

程度最为明显。2017~2021年间各等级FVC的LSI变化幅度相较于2014~2017年有明显减小。结果表明,在此期间除Ⅴ斑块的边界复杂度有所下降之外,其余等级斑块边界复杂程度皆增加,向不规则方向发展,后通过人为干预使得2017~2021年LSI值的增长幅度大大降低。

聚合度指数AI反映了斑块的聚集程度,其值越高说明斑块越集中,斑块间连接性越好^[30]。从图7(e)可以看出,2014~2021年间Ⅰ与Ⅴ的AI较高,且呈现先降低再升高趋势,Ⅱ的AI呈现先升高后降低趋势,Ⅲ与Ⅳ的AI呈现连续下降趋势。说明Ⅰ与Ⅴ区域分布较为集中,Ⅲ与Ⅳ区域离散程度变高。

5 讨论

(1)由于航空CCD影像获取困难、成本高等原因,本研究只采集到了研究区2021年7月的研究区CCD影像图,仅对2021年的影像数据进行了精度检验,可能存在其他两期FVC精度有所误差的现象未被发现的情况,无法全面客观地评价研究区的FVC现有状况。

(2)2021年开展的公园城市龙泉山生态保护修复暨国家储备林项目与2021年印发的《四川省川中丘陵区(龙泉山成都段)高质量国土绿化试点示范项目(2021—2022)》两项的措施实施时间与获取的2021年影像时间过近,无法在本研究中及时且准确地体现出两项措施的生态建设成果及景观营造成效。

(3)人类活动的干扰与研究区地质两者共同造成了龙泉山植被破坏严重的情况。龙泉山城市森林公园的道路与房屋扩建造成了研究区植被覆盖度下降、景观破碎度上升。由于研究区自然地形多为 $10^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 的坡度,而因道路与房屋形成的人工切割坡度多在 60° 以上,形成了坡度变化较大的起伏地形,物理风化严重,土壤贫瘠,受人类工程与降水量的影响较大,容易发生小型滑坡等地质灾害^[31-32]。另外由于动植物平衡被破坏,导致病虫害发生次数较多,农药的使用剂量增加,造成土壤环境污染等问题^[2]。

(4)后期植被覆盖度的上升与景观破碎度的下降与政府的保护措施与总体规划有关。从具体措施来看,针对道路与房屋扩建问题,龙泉驿站进行了生态移民,将移民后废弃的耕地与建筑进行了退耕还林、调整了林种结构、建立生态经济林和封山

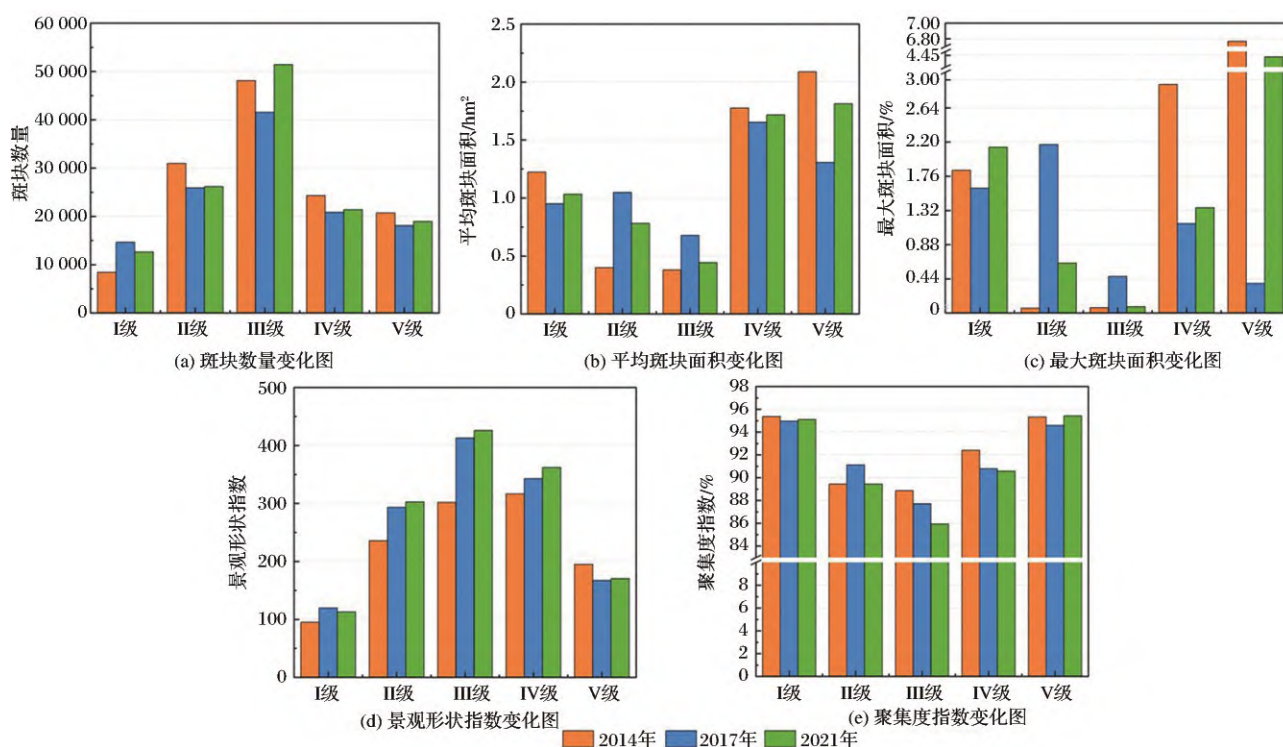


图7 研究区不同等级植被覆盖度上的景观指数

Fig.7 Landscape index on vegetation coverage of different grades in the study area

育林等植被恢复操作。针对地质与土壤问题,成都市启动了土壤修复工程并对地质灾害点进行了综合防治^[2,32,33]。从政策规划来看,成都市先后开展编制了《龙泉山植被恢复工程实施管理方案》、《龙泉山生态植被恢复工程成片植树造林项目》、《龙泉山城市森林公园总体规划(2016—2035年)》和《成都市龙泉山城市森林公园保护条例》等条例方案。

(5)从FVC与景观格局指数的变化趋势上可以看出研究区生态环境尚未完全恢复,后续还需进一步加强对研究区植被的恢复,重视研究区域周边植被保护和恢复建设工作,综合改善区域生态环境。

6 结 论

本研究基于2014年、2017年和2021年的3期遥感影像数据,采用像元二分模型和景观格局指数分析了四川省成都市龙泉山城市森林公园2014~2021年的FVC与景观格局特征。总体上,龙泉山城市森林公园2014~2021年间植被覆盖情况呈现出明显的两段性特征,结论如下:

(1)2014~2017年的FVC总体呈下降趋势,整体景观破碎度呈上升趋势,研究区自然植物群落破坏较为严重,生态环境脆弱。从FVC看,研究区IV和V面积显著减少,I、II与III等级面积增加,研究

区域内FVC呈现V转向I的趋势。在景观格局指标上,研究区破碎化程度加剧,V景观的优势地位下降,斑块复杂性与景观多样性增加。

(2)2017~2021年的FVC总体呈上升趋势,且整体景观生态格局呈现出良好的演化趋势,研究区人类活动影响不再剧烈,生态环境逐渐改善。从FVC看,研究区I、II与III等级面积总体减少,IV与V等级面积明显增加,研究区内FVC由I向V转入趋势明显。从景观格局指数看,研究区破碎化程度有所缓解,斑块整体性加强,V景观恢复优势地位。

(3)2014~2021年间,研究区FVC与景观格局稳定性整体呈现出“V”字形曲线,表现出先下降后上升的趋势,自然生态环境稳定性有所恢复。说明研究区环境保护工程实施效果显著,《龙泉山城市森林公园总体规划(2016—2035年)》《成都市龙泉山城市森林公园保护条例》与公园城市龙泉山生态保护修复暨国家储备林项目等措施落施效果显著。

参考文献(References):

- [1] LIU Yunyu, Study on landscape pattern evolution of Longquanshan Urban Forest Park based on GIS technology [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019. [刘蕴瑜. 基于GIS技术的龙泉山城市森林公园景观格局演变研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.]

- [2] LI Xia, Accelerating the protection and construction of ecological environment in the Hilly Areas of Eastern Chengdu: A research report on the implementation of vegetation restoration and protection project in Longquan Mountain, Longquanyi District[J]. Journal of The Chengdu Municipal Party College of C.P.C, 2011(2): 67-69, 83.[李霞. 加快成都东部山丘区生态环境保护 and 建设——对龙泉山区龙泉山实施植被恢复与保护工程的调研报告[J]. 中共成都市委党校学报, 2011(2): 67-69, 83.]
- [3] WANG Jing, ZHOU Weiqi, XU Kaipeng, *et al.* Spatiotemporal pattern of vegetation cover and its relationship with urbanization in Beijing-Tianjin-Hebei megaregion from 2000 to 2010[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7019-7029. [王静, 周伟奇, 许开鹏, 等. 京津冀地区城市化对植被覆盖度及景观格局的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7019-7029.]
- [4] LIANG D, TENG L, HUANG L, *et al.* Dynamic analysis of urban landscape patterns of vegetation coverage based on multi-temporal Landsat dataset [C] // International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture. Springer, Cham, 2015: 300-316. DOI: 10.1007/978-3-319-48357-3_30
- [5] SUN Hong, TIAN Xin, YAN Min, *et al.* Analysis of dynamic changes of fractional vegetation coverage and influencing factors of the Genhe in the Great Khingan of Inner Mongolia[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(6): 1159-1169.[孙红, 田昕, 闫敏, 等. 内蒙古大兴安岭根河植被覆盖度动态变化及影响因素的分析[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(6): 1159-1169.]
- [6] ZHAO Shuyi, GONG Zhaoning, LIU Xuying. Correlation analysis between vegetation coverage and climate drought conditions in North China during 2001-2013[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(5): 717-729.[赵舒怡, 宫兆宁, 刘旭颖. 2001-2013年华北地区植被覆盖度与干旱条件的相关分析[J]. 地理学报, 2015, 70(5): 717-729.]
- [7] YAN Min, LI Zengyuan, CHEN Erxue, *et al.* Vegetation fractional coverage change in Daxinganling Genhe forest reserve of Inner Mongolia. [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(2): 508 - 515.[闫敏, 李增元, 陈尔学, 等. 内蒙古大兴安岭根河森林保护区植被覆盖度变化[J]. 生态学杂志, 2016, 35(2): 508 - 515]
- [8] SUI X, CHEN L, CHEN A, *et al.* Assessment of temporal and spatial landscape and avifauna changes in the Yellow River wetland and natural reserves in 1990-2013, China[J]. Ecological Engineering, 2015, 84: 520-531. DOI: 10.1016/j.ecoleng. 2015.09.035
- [9] DADASHPOOR H, AZIZI P, MOGHADASI M. Land use change, urbanization, and change in landscape pattern in a metropolitan area [J]. Science of the Total Environment, 2019, 655: 707-719. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.267
- [10] DADASHPOOR H, SALARIAN F. Urban sprawl on natural lands: Analyzing and predicting the trend of land use changes and sprawl in Mazandaran city region, Iran [J]. Environment, Development and Sustainability, 2020, 22(2): 593-614. DOI: 10.1007/s10668-018-0211-2
- [11] HAO R, YU D, LIU Y, *et al.* Impacts of changes in climate and landscape pattern on ecosystem services[J]. Science of the Total Environment, 2017, 579: 718-728. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.036
- [12] FENG Y J, LIU Y, TONG X H. Comparison of metaheuristic cellular automata models: A case study of dynamic land use simulation in the Yangtze River Delta [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2018, 70: 138-150. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2018.03.003
- [13] LIU B, GU X, ZHANG J, *et al.* Analysis on landscape pattern change and ecosystem services value of modern agriculture corridor: A case study of Jingcheng Highway [J]. International Society for Optics and Photonics, 2009. DOI: 10.1117/12.833937
- [14] CHEN Junhua, XIE Chuan, GONG Gutang, *et al.* Site condition classification of Longquan Mountain Urban Forest Park in Chengdu [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(3): 273-280.[陈俊华, 谢川, 龚固堂, 等. 成都市龙泉山城市森林公园立地条件类型划分研究[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(3): 273-280.]
- [15] HOU Xiaoyun, LI Yanqiong, ZHENG Shaowei. Characteristics of typical plant communities and climate effects in Longquan Mountain Urban Forest Park [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(6): 274-280.[侯晓云, 黎燕琼, 郑绍伟. 龙泉山城市森林公园典型植物群落特征与气候效应研究[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(6): 274-280.]
- [16] A Duo, ZHAO Wenji, GONG Zhaoning, *et al.* Temporal analysis of climate change and its relationship with vegetation cover on the north china plain from 1981 to 2013[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(2): 576-592.[阿多, 赵文吉, 宫兆宁, 等. 1981—2013华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 576-592.]
- [17] TONG Siqin, BAO Yuhai, ZHANG Qiaofeng, *et al.* Spatiotemporal changes of vegetation coverage in Inner Mongolia based on the dimidiate pixel model and intensity analysis[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(5): 737-743. [佟斯琴, 包玉海, 张巧凤, 等. 基于像元二分法和强度分析方法的内蒙古植被覆盖度时空变化规律分析[J]. 生态环境学报, 2016, 25(5): 737-743.]

- [18] XIAO Yang, XIONG Qinli, OUYANG Zhiyun, *et al.* An analysis of dynamic changes in vegetation coverage in Chongqing Municipality using MODIS/Terra NDVI data[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2013, 35(7): 121-126.[肖洋,熊勤犁,欧阳志云,等.基于MODIS数据的重庆市植被覆盖度动态变化研究[J].西南大学学报(自然科学版),2013,35(7):121-126.]
- [19] LI Miaomiao, WU Bingfang, YAN Changzhen, *et al.* Estimation of vegetation fraction in the upper basin of Miyun Reservoir by remote sensing[J]. Resources Science, 2004(4): 153-159.[李苗苗,吴炳方,颜长珍,等.密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J].资源科学,2004(4):153-159.]
- [20] WANG Xiping, SHAO Fengluan, MAO Zhihong, *et al.* Dynamic monitoring of the annual maximum vegetation coverage in Jinan City based on MODIS data[J]. Areal Research and Development, 2016, 35(1): 150-155.[王欣平,邵凤鸾,毛志红,等.基于MODIS数据的济南市年最大植被覆盖度动态监测[J].地域研究与开发,2016,35(1):150-155.]
- [21] LIU Xianfeng, YANG Yong, REN Zhiyuan. Changes of vegetation coverage in the Loess Plateau in 2000-2009[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(4): 1244 - 1249.[刘宪锋,杨勇,任志远,等.2000—2009年黄土高原地区植被覆盖度时空变化[J].中国沙漠,2013,33(4):1244-1249.]
- [22] LI Hengkai, LEI Jun, YANG Liu. Extraction of vegetation coverage and analysis of landscape pattern in rare earth mining area based on Landsat image[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(10): 267-276.[李恒凯,雷军,杨柳.基于Landsat影像的离子稀土矿区植被覆盖度提取及景观格局分析[J].农业工程学报,2016,32(10):267-276.]
- [23] HU Suliyang, LI Hui, GU Yansheng, *et al.* An analysis of land use changes and driving forces of Dajihu wetland in Shennongjia based on high resolution remote sensing images: Constraints from the multi-source and long-term remote sensing information[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2021, 33(1): 221-230.[胡苏李扬,李辉,顾延生,等.基于高分辨率遥感影像的神农架大九湖湿地土地利用类型变化及其驱动力分析——来自长时间尺度多源遥感信息的约束[J].国土资源遥感,2021,33(1):221-230.]
- [24] YIN Douduo, WANG Yanhui. Temporal and spatial changes of vegetation coverage and its topographic differentiation in temperate continental semi-arid monsoon climate region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(3): 1158-1167.[银朵朵,王艳慧.温带大陆性半干旱季风气候区植被覆盖度时空变化及其地形分异研究[J].生态学报,2021,41(3):1158-1167.]
- [25] ZHANG Xuelling, ZHANG Ying, NIU Dekui, *et al.* Spatial-temporal dynamics of upland meadow coverage on Wugong Mountain based on TM NDVI[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(7): 2414-2424.[张学玲,张莹,牛德奎,等.基于TM NDVI的武功山山地草甸植被覆盖度时空变化研究[J].生态学报,2018,38(7):2414-2424.]
- [26] YANG Can, WEI Tianxing, LI Yiran, *et al.* Spatiotemporal variations and topographic differentiation of fractional vegetation cover in typical counties of Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(6): 1830-1838.[杨灿,魏天兴,李亦然,等.黄土高原典型县域植被覆盖度时空变化及地形分异特征[J].生态学杂志,2021,40(6):1830-1838.]
- [27] SUN Xiaoli, ZHEN Yi, ZHAO Ran, *et al.* Analysis on temporal and spatial changes of land use pattern in Yangzonghai basin[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, 35(10): 2387-2394.[孙晓莉,郑毅,赵然,等.阳宗海流域土地利用景观格局时空变化分析[J].西南农业学报,2022,35(10):2387-2394.]
- [28] YANG Lei, ZHANG Mei, LUO Mingliang, *et al.* Landscape pattern change of vegetation coverage in hilly area of central Sichuan, Southwest China based on MODIS NDVI[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(1): 171-177.[杨磊,张梅,罗明良,等.基于MODIS NDVI的川中丘陵区植被覆盖度景观格局变化[J].生态学杂志,2013,32(1):171-177.]
- [29] ZHU Linfu, Analysis on the landscape pattern characteristics of fractional vegetation coverage based on MODIS data in Sichuan[J]. Journal of Leshan Normal University, 2022, 37(4): 45-51+83.[朱林富.基于MODIS数据的四川植被覆盖度景观格局特征分析[J].乐山师范学院学报,2022,37(4):45-51+83.]
- [30] GONG Zhaoning, ZHANG Yiran, GONG Huili, *et al.* Evolution of wetland landscape pattern and its driving factors in Beijing[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(1): 77-88.[宫兆宁,张翼然,宫辉力,等.北京湿地景观格局演变特征与驱动机制分析[J].地理学报,2011,66(1):77-88.]
- [31] GUO Ziqi, LI Shengwei, WANG Donghui, *et al.* Environmental geology of the Longquanshan Urban Forest Park, Chengdu, Sichuan[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2019, 39(4): 90-99.[郭子奇,李胜伟,王东辉,等.浅析四川成都龙泉山城市森林公园主要环境地质问题[J].沉积与特提斯地质,2019,39(4):90-99.]
- [32] ZHAO Hongsong, XIE Tianzi, XIE Chuan, *et al.* Study on species selection in vegetation restoration of the Longquan Mountain Urban Forest Park in Chengdu[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2020, 41(6): 41-47.[赵洪松,谢天资,谢川,等.成都市龙泉山城市森林公园植被恢复中物种选择研究[J].四川林业科技,2020,41(6):41-47.]

Dynamic Change Analysis of Vegetation Coverage and Landscape Pattern Characteristics in Longquan Mountain Urban Forest Park, Chengdu City

WANG Haiyi¹, WANG Hongrong², CHEN Shuxin¹, LUO Xin¹,
LIU Bingjie³, TIAN Xin¹, FENG Yi⁴, WANG Pengjie⁵

(1.*Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;*

2.*Sichuan Forestry and Grassland Survey and Planning Institute, Chengdu 610081, China;*

3.*Forest Resources and Environmental Management National Forest and Grass Bureau Key Laboratory, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;*

4.*Chengdu Longquan Mountain Urban Forest Park Management Committee, Chengdu 610000, China;*

5.*Forestry and Grassland Investigation and Planning Institute of the State Forestry and Grassland Administration, Beijing 100013, China)*

Abstract: People attach great importance to the deterioration of ecological environment. The study on the dynamic changes of vegetation coverage and landscape pattern characteristics can effectively enhance the stability of vegetation community. Longquan Mountain Urban Forest Park in Chengdu is a typical physical and geographical representative of ecological restoration in the hilly area of central Sichuan. Based on Landsat8OLI and GF1WV remote sensing image data, combined with pixel dichotomy model and landscape pattern index, this study analyzed the change characteristics of vegetation coverage and spatial landscape pattern in the park from 2014 to 2021. The results show that: ① the vegetation coverage of Longquan Mountain Urban Forest Park is mainly medium and high coverage in 2014, 2017 and 2021, and the verification accuracy is 0.90 in 2021. ② from 2014 to 2021, the vegetation cover decreased first and then increased: from 2014 to 2017, the vegetation coverage degraded seriously, the coverage area of medium-high and high vegetation amplitude decreased sharply, and the patch complexity and fragmentation on the landscape increased. From 2017 to 2021, due to the implementation of government protection measures, the vegetation coverage was restored, the area of middle and low vegetation coverage decreased the most, the area of high vegetation coverage increased the most, the vegetation ecology was restored, the complexity of patches on the landscape decreased and the degree of landscape fragmentation was alleviated. This study provides a certain scientific reference basis for ecological restoration and future planning in the hilly area of central Sichuan.

Key words: Fractional vegetation cover; Landscape pattern index; Dimidiate pixel model; Dynamic change