

西安城区植被光谱组分特征与变化信息提取

赵 选¹, 范辰乾¹, 李 乐¹, 朱亚红²

(1. 自然资源部第一地理信息制图院, 陕西 西安 710054; 2. 陕西省林业调查规划院, 陕西 西安 710082)

摘 要:近些年来,由于西安城区发展迅速而导致生态环境保护 and 城市发展矛盾突出,传统的遥感分类方法已经无法满足城市植被监测精度要求。如何从植被光谱组分特征出发,快速精准地进行城市植被动态监测值得研究。以 2016、2019、2022 年 3 期 Landsat 数据为主要信息源,基于线性光谱混合模型(LSMM)和变化区域格网分析等方法,对西安城区植被组分时空变化规律及影响因素进行分析。结果表明:1)2016—2022 年平均植被覆盖度达到 50%,达到国家园林城市标准,且整体植被覆盖度较高。2)西安城区植被变化剧烈,其中 2016—2022 年 36.54%低覆盖植被、28.26%中覆盖植被、22.98%高覆盖植被维持不变,三环边缘西北、东北、西南和东南 4 个区域植被变化显著。3)2016—2019 年植被质量有所降低;2019—2022 年植被质量整体向好的方向发展,主要归结于城市建设和城市绿化工程。研究结果一方面可快速获取城市植被动态变化信息,另一方面可为城市生态环境保护规划提供建议和数据支持。

关键词:城市植被;线性光谱混合模型;遥感;时空变化

中图分类号:S771.8

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)04-0241-09

Spectral Component Characteristics and Change Information Extraction of the Vegetations in Xi'an

ZHAO Xuan¹, FAN Chen-qian¹, LI Le¹, ZHU Ya-hong²

(1. The First Geographic Information Mapping Institute, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Forestry Survey and Planning Institute, Xi'an 710082, Shaanxi, China)

Abstract: In recent years, the rapid development of urbanization has resulted in prominent conflict between the social development and ecological environment, from which the traditional classification method of remote sensing classification can not meet the high requirement of urban vegetation monitoring. How to carry out rapid and accurate monitoring of urban vegetation dynamics from the characteristics of vegetation spectral components is worth studying. Taking the Landsat images of 2016, 2019 and 2022 as the main information sources, this research analyzed the law of the spatio-temporal changes of the vegetation components in Xi'an urban area and influencing factors based on linear spectral mixing model (LSMM). The results showed that 1) from 2016 to 2022, the average vegetation coverage reached more than 50%, meeting the national standard for garden cities, and the overall vegetation coverage was high. 2) From 2016 to 2022, 36.54% of the low-cover vegetation, 28.26% of the medium-cover vegetation and 22.98% of the high-cover vegetation remained unchanged, and the vegetation in the northwest, northeast, southwest and southeast regions at the edge of the Third Ring Road changed significantly. 3) From 2016 to 2019, the quality of vegetation decreased, while from 2019 to 2022, the overall vegetation quality had been improved mainly due to urban construction and urban greening projects. This study can quickly obtain the dynamic change informa-

收稿日期:2023-01-01 修回日期:2023-03-14

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2016YFD060020305)。

第一作者:赵 选,博士。研究方向:“3S”技术在资源环境中的应用。E-mail:zx666@nwafu.edu.cn

tion of urban vegetation, on the other hand, it provides suggestions and data support for urban ecological environment protection planning.

Key words: urban vegetation; linear spectral mixing model; remote sensing; spatio-temporal change

随着国家城市群与都市圈规划的制定实施,我国的 2018 年城镇化率已达到 59.58%^[1]。农村人口不断向城市转移,城市生态空间遭受危险,生态保护和经济发展矛盾突出,城市环境时空变化监测将变得越来越重要。城市植被是城市中公园、校园、寺庙、广场、球场、庭院、街道、农田以及空闲地等场所拥有的森林、灌丛、绿篱、花坛、草地、树木、作物等所有植物的总和^[2],是城市生态系统重要组成部分和最重要的元素,对促进城市生产的发展、丰富居民生活和维持生态平衡有着不可替代的作用,如缓解城市热岛效应、改善区域气候等^[3-5]。

在城市化快速发展的今天,植被覆盖变化是衡量城市生态状况和推进城市生态景观规划的重要基础^[6-7]。目前,国内外学者在城市植被覆盖动态研究方面已经开展了大量研究,主要研究方法集中在:1) 基于低空间分辨率数据的大尺度植被覆盖监测。卓嘎等^[8]利用 2000—2016 年 MODIS NDVI 数据以及气象观测数据,采用最大合成法、趋势性分析以及相关分析方法,探讨了不同时间尺度青藏高原地区 NDVI 的分布特征及其与降水、气温的关系。黎治华^[9]基于 MODIS 数据研究了长江三角洲地区生态环境演变规律,这种方法一般分辨率较低,且难以揭示精细化的植被变化信息。2) 基于中等空间分辨率数据的区域植被变化监测。赵恒谦等^[10]利用多源遥感数据阐明了北京市城区土地利用变化与城市生态环境之间的关系;Hussein^[11]利用 Landsat 影像提取土地利用分类数据,对城市植被覆盖进行了监测,这种方法多基于土地利用分类标准,难以反映不同覆盖度植被之间的动态转换信息。3) 基于高空间分辨率数据的局部绿地变化监测方法。张敏霞等^[12]指出无人机遥感在城市绿地信息提取等方面的技术以及非常成熟,可方便快捷地对城市绿地和生态服务进行评估;Hashim 等^[13]利用高分影像研究了城市绿地提取方法和植被指数阈值问题。但高分影像数据量大,成本较高,在应用推广上存在一定局限性。城市植被变化监测多集中在土地利用分类,但多耗时耗力,计算机分类识别算法多为统计学回归或者训练方法,多数为监督性建模分析^[14-15]。在区域尺度下结合高分辨率 Google 影像与中等分辨率的 Landsat 影像,可以从植被遥感机理-光谱分解角度进行城市植被快速提取,对于实现城区绿地的动态监测具有重要意义。西安是我国西北地区唯

一的特大城市,是“一带一路”沿线的重点城市。2014 年,西咸新区获国务院的批复;2018 年,国家发改委下发文件批准“关中平原城市群发展规划”,明确提出将西安建设成为第九个国家中心城市^[16-17]。这种发展趋势表明,西安城市建设速度加快,城市环境也在变化。因此,适时开展西安植被覆盖变化研究具有重要意义。

本研究以西安市城区三环内为研究范围,以 2016、2019、2022 年 3 期 TM 遥感数据为信息源,结合同期的高空间分辨率 Google 影像,分析西安城区近 6 a 间植被覆盖和植被结构在数量上变化规律、西安城区植被空间变化规律及其相互转换规律和西安城区植被变化影响因素。研究结果将为研究区城市植被建设和绿地系统规划提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区所在城市西安位于 107°40′—109°49′E, 33°39′—34°45′N(图 1),南和东南以秦岭山脉主脊为界,与汉中市、商洛市相邻;西以太白山及青化台源为界,与宝鸡市接壤;西北以渭河为界,与咸阳市隔河相望;东以零河和濡源山地为界,与渭南市相接。气候属暖温带半湿润季风气候,冷暖干湿,四季分明,冬季干冷,春季温暖、干燥,夏季炎热高温,日照强烈,秋季凉爽、多雨。西安城市绿地中,乔木以龙爪槐(*Sophora japonica*)、苦楝树(*Picrasma quassoides*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)等为主,占总数的大部分;灌木以小叶女贞(*Ligustrum quihoui*)、雀舌黄杨(*Buxus bodinieri*)等为主,数量占到灌木总数的 80% 以上;草坪类主要以草地早熟禾(*Poa pratensis*)、高羊茅(*Festuca elata*)、白三叶(*Trifolium repens*)、黑麦草(*Lolium perenne*)构成。

1.2 数据来源

本研究遥感数据来自中国科学院地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),参考数据来自 Google Earth,研究区行政界线数据提取于西安市森林资源二类调查数据库。考虑到获得遥感数据当日的云量<10% 以及植被生长季等因素影响,最终选定 2016 年 6 月 17 日和 2019 年 8 月 29 日 Landsat8 OLI 和 2022 年 8 月 13 的 Landsat9 OLI 数据,空间分辨率 30 m,轨道号为 127/36。利用 ENVI 5.3^[18]对原始影像进行辐射定标、FLAASH 大气校

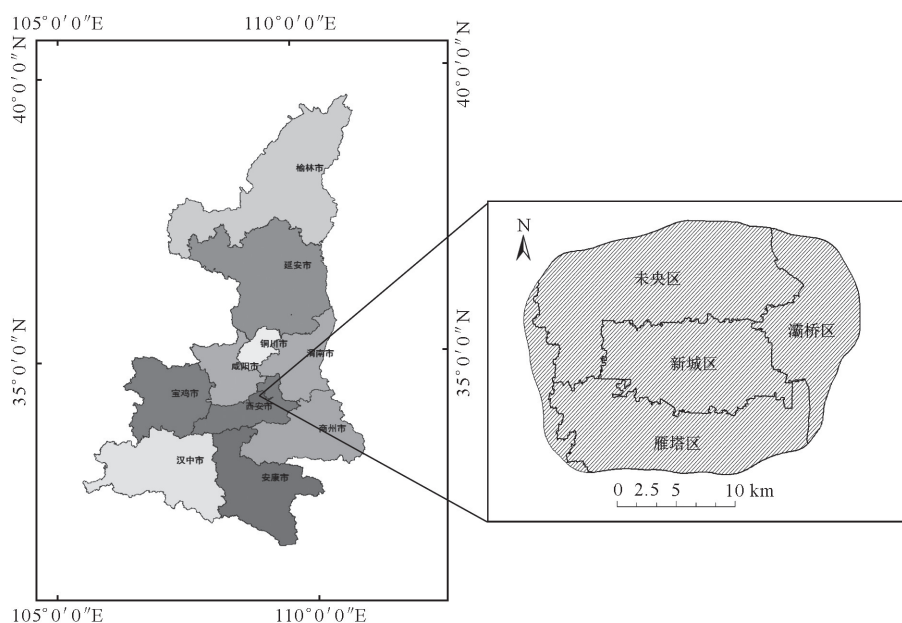


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Location of the study area

正、几何校正,并且利用研究区边界矢量文件进行裁剪获得研究区基础数据。

1.3 研究方法

1.3.1 植被覆盖度提取 遥感反演法通过建立研究区的植被遥感光谱信息与植被覆盖度建立相关关系,进而获得植被覆盖度信息,已成为植被覆盖度信息提取主要途径,也为此获得了大量的植被覆盖度遥感反演方法^[19-21]。本研究应用 LSMM 法分解并提取植被覆盖度,LSMM 法从地物光谱混合模型的角度出发最终估算植被在像元中所占的比例,不需要利用地面实测植被覆盖度数据进行建模,且易于推广,在植被覆盖度提取研究中应用广泛^[22]。LSMM 通常定义为像元在某一光段的反射率是由构成像元的终端单元的反射率以其所占像元面积比例为权重系数的线性组合^[23-24],公式如下

$$R_{i\lambda} = \sum_{k=1}^N f_{ki} C_{k\lambda} + \epsilon_{i\lambda} \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^N f_{ki} = 1 \quad (2)$$

$$R_{MS} = \left[\sum_{i=1}^{\lambda} (\epsilon_{i\lambda})^2 / N \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中: $R_{i\lambda}$ 为第 λ 波段第 i 像元的光谱反射值; N 为基本组分的数目, $N \leq m+1$, m 为波段数; f 为对应 i 像元的第 k 个基本组分所占的分量值; $C_{k\lambda}$ 第 k 个基本组分所在 λ 波段的光谱反射值; $\epsilon_{i\lambda}$ 为第 λ 波段第 i 个像元对应的误差值; R_{MS} 为均方根误差图像。端元收集是线性光谱分离的关键步骤,在缺乏野外实测研究的条件下,其必须从影像训练光谱中获得。

1.3.1.1 端元收集 端元收集是混合像元分解的

关键,其类型、数量及光谱值均影响 LSMM 分解的精度。根据本研究区土地覆盖的特点,确定端元类型为裸土、植被、不透水层和水体 4 类。通常端元收集的方法较多,如基于几何顶点的端元提取、基于 PPI(纯净像元指数)的端元提取、基于 SMACC(连续最大角凸锥)^[25]。本研究通过建立感兴趣(ROI)方式选择端元:首先通过最小噪声分离(minimum noise fraction,MNF)变换去相关分离数据噪声,确定数据内在的维数,减少随后处理的计算量^[26-27]。这样 3 期影像经 MNF 变化成 6 个波段分量,其中,前 3 个波段分量包含了 80% 的信息。再次将前 3 个分量进行波段合成,获得假彩色影像;然后以同期 Google Earth 历史影像为参考,建立感兴趣(ROI),最后收集原始影响光谱端元的范围^[28](图 2)。

1.3.1.2 LSMM 分解与结果检验 采用收集到的端元波谱特征,通过带约束性的最小二乘法进行 LSMM 分解,获得研究区植被覆盖度。根据 LSMM 分解所得 3 期数据均方根 RMS 图像可得平均误差为 1.69,基本满足植被覆盖度变化规律分析精度要求。

1.3.2 植被覆盖度等级转移变化 LSMM 提取的植被组分被定义为植被的覆盖度。根据研究区的现实状况,采用文献^[29-30]提出的分级方法,将研究区内植被覆盖度分为 5 级(表 1),得到植被覆盖等级的空间分布。进一步通过转移矩阵和等级编码(表 1)。

计算 2016、2019、2022 年两两之间植被覆盖等级的变化趋势。其公式为^[31]

$$Y_{i \times j} = X_{ti \times j} \times 10 + X_{(t+1) \times j} \quad (4)$$

式中: i 、 j 分别为栅格图像行列编码, $Y_{i \times j}$ 为由 t 时期到 $t+1$ 时期第 i 行 j 列像元的植被覆盖度等级

变化, $X_{ki \times j}$ 为前一期植被覆盖度等级编码, $X_{(k+1) \times j}$ 为后期一植被覆盖度等级编码^[31]。

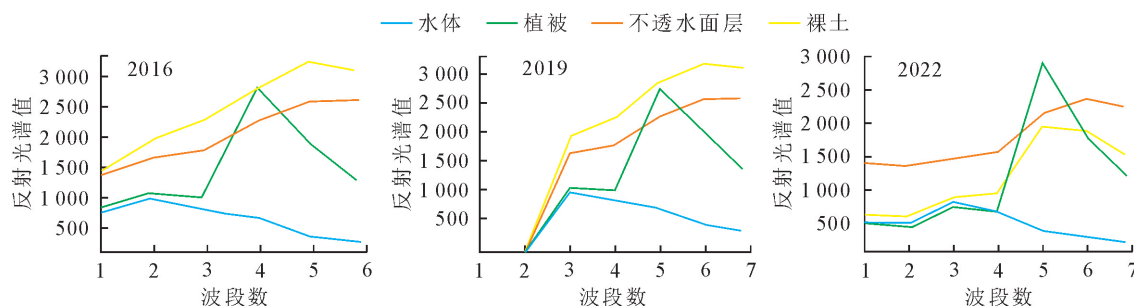


图2 端元波谱特征

Fig. 2 Spectral profile of end-members

表1 植被覆盖度分级标准

Table 1 Threshold of different vegetation coverage grades

植被覆盖度等级	无覆盖	低覆盖	中覆盖	高覆盖	全覆盖
等级编码	1	2	3	4	5
覆盖度范围(%)	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100)

1.3.3 基于地理空间网格法的植被质量等级变化分析 为了显著反映研究区植被覆盖变化,认识整体植被演变的主要信息及空间分布,本研究基于 30 m 空间分辨率的植被覆盖度分布,在格网分析尺度上描述植被变化的空间分布^[32]。综合考虑研究区面积和植被分布信息的合理表达形式,采用 480 m×480 m 格网,根据格网内植被变化类型权重定义格网内植被演变类型属性,格网内植被演变类型权重 >50%,则定义该类型为格网转移类型,以此得到植被演变类型的主要空间分布。

在转移矩阵及植被覆盖度等级空间分布的基础上,划分植被变化类型。植被覆盖度等级上升定义为植被覆盖高转型,植被覆盖度等级不变定义为植被覆盖不变型,植被覆盖度等级下降则定义为植被覆盖低转型。公式为^[31]

$$T_{Y_{i \times j}} = X_{(t+1) \times j} - X_{t \times j} \quad (5)$$

式中: $T_{Y_{i \times j}}$ 为由 t 时期到 $t+1$ 时期的植被覆盖等级变化类型, $X_{(k+1) \times j}$ 为前一期的植被覆盖等级编

码, $X_{ki \times j}$ 为后期植被覆盖等级编码(表 1)。若 $T_{Y_{i \times j}} > 0$, 定义为植被覆盖高转型,如 $T_{Y_{i \times j}} < 0$, 定义为植被覆盖低转型, $T_{Y_{i \times j}} = 0$, 定义为植被覆盖不变型。

2 结果与分析

2.1 西安城区植被组分特征

研究区 3 期平均植被覆盖度达到 50%, 覆盖率较高(图 3、表 2), 已超过国家森林城市评价标准^[33] (>40%) 的规定。2016—2019 年平均植被覆盖度降低 11%, 2019—2022 年平均植被覆盖度降低 3%, 2016—2022 年平均植被覆盖度降低 13%。研究区植被覆盖度标准差 3 期平均降低分别为 1.73%、6.17% 和 7.9%。从不同植被覆盖度等级面积可以看出, 3 期内无植被覆盖均呈现增加趋势; 低、中、高、全植被覆盖变化趋势中, 除低覆盖在 2016—2019 年略有增加和全覆盖在 2016—2022 年略有减少外, 其他均呈现不同程度的变化趋势。

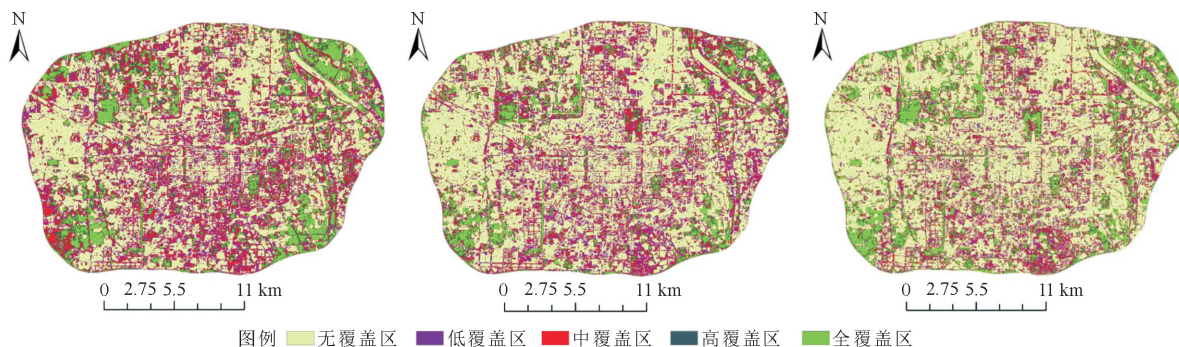


图3 研究区植被覆盖度分级

Fig. 3 The diagram of different vegetation coverage grades

表 2 研究区 3 期平均植被覆盖度及其等级组成面积统计

Table 2 Statistics of average vegetation coverage and its grade composition area between three stages of the study area

年份	植被覆盖度(%)		不同覆盖度等级面积/km ²				
	平均覆盖度	标准差	无覆盖	低覆盖	中覆盖	高覆盖	全覆盖
2016	58	35.88	190.28	94.72	75.33	50.72	46.70
2019	48	34.15	238.58	99.20	58.24	32.87	28.86
2022	45	27.99	251.80	76.79	51.27	32.72	45.15
Δ ₁₉₋₁₆	-11	-1.73	48.30	4.47	-17.09	-17.85	-17.84
Δ ₂₂₋₁₉	-3	-6.17	13.22	-22.40	-6.97	-0.14	16.30
Δ ₂₂₋₁₆	-13	-7.90	61.52	-17.93	-24.06	-17.99	-1.54

2.2 西安城区植被覆盖度等级转变规律

2016—2019 年,无覆盖等级广泛分布于城市建筑、水体等不透水区域(表 3、图 4a),其中 86.93% 维持原状,变化则主要向低覆盖和中覆盖等级组分转移,转移区域主要位于二环以外未央区中部、灞桥区南部和雁塔区南部。而转移为无覆盖等级的来源中,低、中、高、全覆盖等级均有,其综合作用导致无覆盖等级增加 48.3 km²。低覆盖等级 42.97% 维持不变,其余主要向无、中覆盖等级转移,分别占 44.61% 和 9.41%;向无覆盖转移区域在研究区各处均有分布;而转移为低覆盖等级的来源有无、中、高、全覆盖等级,综合作用导致低覆盖等级增加 4.47 km²。中覆盖等级组分除 31.06% 维持不变外,其余部分主要向无、低、高覆盖等级转移,三者合计转移面积比达到 95.8%。其除了向全覆盖转移区域位于研究区西北部区域和西南区外,其余在研究区均有分布。转移为中覆盖等级的主要来源为低、高覆盖和全覆盖等级区,综合作用导致中覆盖等级减少 17.09 km²。高覆盖等级 24.99% 维持不变,其余向无、低、中、全覆盖等级转移;其除了向全覆盖转移主要位于西北部和西南部外,其余在研究区均有分布。而转移为高覆盖等级的来源主要来源是中、全覆盖等级,综合作用导致高覆盖等级减少 17.85 km²。全覆盖等级 39.96% 维持不变,其余向无、低、中、高覆盖等级都有转移。其向无覆盖等级转移主要位于城区边缘部分;向低、中覆盖等级转移主要位于西北部、西南部和东部;向高覆盖等级转移主要位于除中部以外的西北、西南、东南和东北部。而转移为全覆盖等级的主要来源是中、高覆盖等级,综合作用导致全覆盖等级减少 17.84 km²。

2019—2022 年,无覆盖等级主要位置在城市建筑、水体等不透水区域,其中 84.8% 维持原状,其余主要向低覆盖和中覆盖等级组分转移,转移区域在研区北部、西南、东南和东部(表 4、图 4b)。而转移为无覆盖等级的来源有低、中、高、全覆盖等级组分,其综合作用导致无覆盖等级增加 13.22 km²。低覆

盖等级 36.66% 维持不变,其余主要向无、中、高、全覆盖等级转移,分别占 33.16%、21.98%、5.69%、2.51%;向无、中覆盖转移的位置在研究区内均有分布,向高、全覆盖转移的位置主要在研究区边缘部分;而转移为低覆盖等级的来源为无、中、高、全覆盖等级,综合作用导致低覆盖等级减少 22.4 km²。中覆盖等级组分除 29.35% 维持不变外,其余部分向无、低、高、全覆盖等级转移,并且转移面积比较为均匀。其除了向全覆盖等级转移位置主要集中在研究区西北、西南、东北部外,向其余覆盖等级转移的位置在研究区分散分布。而转移为中覆盖等级的主要来源为低、高、全覆盖等级,其综合作用导致中覆盖等级减少 6.97 km²。高覆盖等级 23.81% 维持不变,其余主要向无、中、全覆盖等级转移,其中向全覆盖等级转移占 42.87%;其向全覆盖等级转移的位置主要在西北、西南、东北靠研究区边缘,向其他等级转移的位置在研究区分散分布。而转移为高覆盖等级的来源主要是中、全覆盖等级,综合作用导致高覆盖等级减少 0.14 km²。全覆盖等级 65.28% 维持不变,其余向无、低、中、高覆盖等级都有不同程度的转移,且向这些等级转移的位置在研究区分布面积小,分散分布。而转移为全覆盖等级的主要来源是中、高覆盖等级,综合作用导致全覆盖等级增加 16.3 km²。

2016—2022 年,无覆盖等级主要位置在城市建筑、水体等不透水区域,其中 83.12% 维持原状(表 5、图 4c),其余主要向低覆盖和中覆盖等级组分转移;向低覆盖等级转移位置主要在研究区北部、南部和西南偏中部,中覆盖等级转移位置主要研究区北部和南部。而转移为无覆盖等级的来源有低、中、高、全覆盖等级组分,其综合作用导致无覆盖等级减小 7.9 km²。低覆盖等级 30% 维持不变,其余主要向无、中、高、全覆盖等级转移,分别占 50.10%、13.28%、3.91%、2.71%;向无覆盖等级转移的位置主要在北、西南和东北部,向高、全覆盖等级转移的位置在研究区边缘;而转移为低覆盖等级的来源为无、中、高、全覆盖等级,综合作用导致低覆盖等级减

少 17.93 km²。中覆盖等级组分除 24.39% 维持不变外,其余向无、低、高、全覆盖等级有不同比例的转移。这些转移中,除了向全覆盖等级转移位置主要集中在研究区边缘外,向无、低、高覆盖等级转移的位置在研究区分散分布。而转移为中覆盖等级的主要来源为无、低、高、全覆盖等级,其综合作用导致中覆盖等级减少 24.06 km²。高覆盖等级 20.15% 维持不变,其余向无、低、中、全覆盖等级转移;其向全

覆盖等级转移的位置主要在西北、西南靠中部、东北部,向其他等级转移的位置在研究区分散分布。而转移为高覆盖等级的来源主要是中、全覆盖等级,综合作用导致高覆盖等级减少 17.99 km²。全覆盖等级 44.69% 维持不变,其余主要向无、高覆盖等级转移,且转移的位置在研究区西北、西南、东北、东南部。而转移为全覆盖等级的主要来源是中、高覆盖等级,综合作用导致全覆盖等级减少 1.54 km²。

表 3 2016—2019 年植被覆盖度等级面积比转移矩阵

Table 3 The transition matrix of different vegetation coverage grade area from 2016 to 2019

km²

植被覆盖度等级转化(%)		2019				
		无覆盖	低覆盖	中覆盖	高覆盖	全覆盖
2016	无覆盖	86.93	10.22	2.04	0.58	0.24
	低覆盖	44.61	42.97	9.41	1.98	1.02
	中覆盖	20.37	35.70	31.06	8.68	4.19
	高覆盖	16.76	15.55	31.58	24.99	11.12
	全覆盖	15.73	8.63	12.82	22.87	39.96

表 4 2019—2022 年植被覆盖度等级面积比转移矩阵

Table 4 The transition matrix of different vegetation coverage grade area from 2019 to 2022

km²

植被覆盖度等级转化(%)		2022				
		无覆盖	低覆盖	中覆盖	高覆盖	全覆盖
2019	无覆盖	84.80	11.11	2.56	0.84	0.68
	低覆盖	33.16	36.66	21.98	5.69	2.51
	中覆盖	15.59	17.05	29.35	24.04	13.97
	高覆盖	12.79	7.17	13.36	23.81	42.87
	全覆盖	12.65	4.65	6.18	11.25	65.28

表 5 2016—2022 年植被覆盖度等级面积比转移矩阵

Table 5 The transition matrix of different vegetation coverage grade area from 2016 to 2022

km²

植被覆盖度等级转化(%)		2022				
		无覆盖	低覆盖	中覆盖	高覆盖	全覆盖
2016	无覆盖	83.12	10.66	3.73	1.47	1.02
	低覆盖	50.10	30.00	13.28	3.91	2.71
	中覆盖	29.98	22.71	24.39	13.25	9.67
	高覆盖	25.14	12.77	17.22	20.15	24.72
	全覆盖	24.07	9.01	9.35	12.89	44.69

2.3 植被覆盖度质量等级空间动态变化

2016、2019 年和 2022 年之间植被等级变化存在差异(图 5)。植被覆盖等级上升认为植被有好转趋势,植被等级不变认为植被保持不变,植被覆盖等级下降认为植被有退化趋势。2016—2019 年,研究区植被覆盖动态变化主要位于未央区西部、新城东部、灞桥区北部和雁塔区西部,总体植被覆盖等级下降格网数量大于等级上升数量,说明这些区域植被有退化趋势(图 5);2019—2022 年,研究区植被覆盖动态变化主要位于未央区西部、灞桥区北部和雁塔区东南部,并且植被覆盖等级升级格网数量大于等级下降数量,说明此阶段植被有好转趋势;2016—

2022 年,研究区植被覆盖动态变化的位置与 2019—2022 年间相似,植被覆盖等级上升格网数量稍小于等级下降格网数量,并且二者格网密度较大,说明六年间植被整体向好和退化趋势相当。

3 结论与讨论

3.1 结论

城市植被覆盖度变化研究,对制定和调整一个城市植被建设规划、改善城市人居环境具有重要作用。同时,可为城市植被的精细化管理提供依据。本研究获得以下结论。

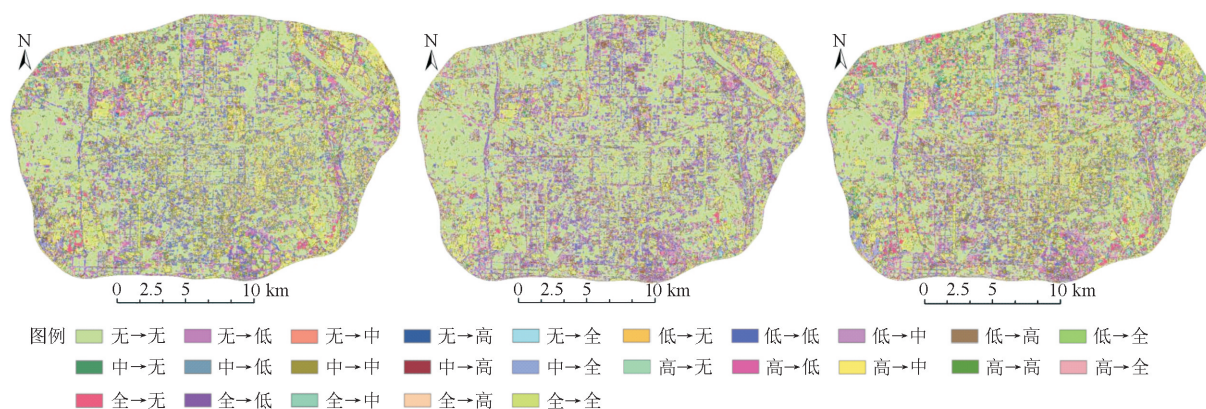


图4 研究区植被覆盖等级面积比例转移分布

Fig. 4 Transfer distribution map of area proportion of vegetation coverage grades in the study area

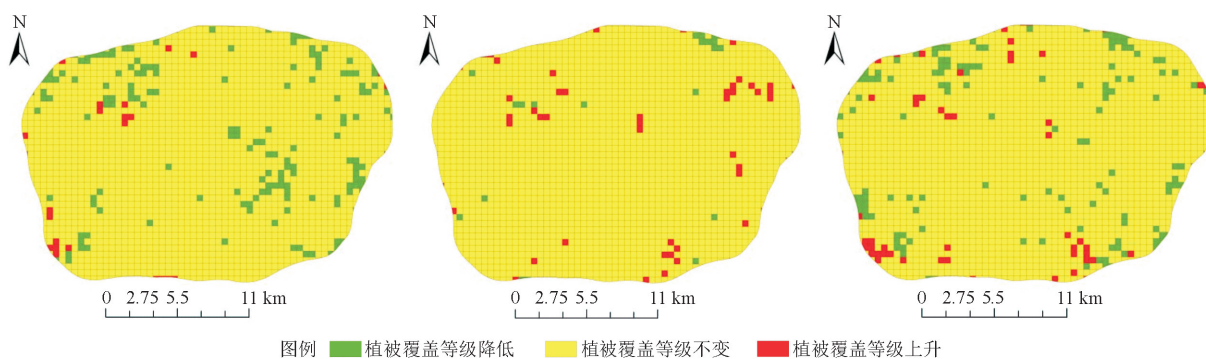


图5 3期植被覆盖等级空间动态变化

Fig. 5 Distribution of vegetation coverage grade dynamic in three stages of the study area

1) 2016—2022年,西安市主城区三环以内植被建设成效显著。研究结果显示,虽然不同年份植被覆盖度有波动,其中2016年与2019年、2022年比较,植被覆盖度均出现下降,下降幅度平均为12%。但是,6a间平均植被覆盖度在50%,已超过国家森林城市评价标准。短期内植被覆盖度出现波动是城市基础设施建设发展影响的正常现象,不影响城市植被覆盖度增加的总体趋势。

2) 不同年份之间,西安市主城区植被覆盖度的空间分布是一个动态变化过程。除中心区其变化相对稳定以外,研究区边缘西北、东北、西南和东南四个区域转移变化程度不同,其中,无植被覆盖等级转移发生在西北、东北、西南和东南部,低植被覆盖等级转移发生在北、西南和东北部,中植被覆盖等级转移发生在各个方向,高覆盖等级转移发生在西北和西南部,以及全覆盖等级转移区域在西北、西南、东南和东北部。植被覆盖度等级转移较大的区域发生在西北、北部的莲湖区和未央区、西北部的灞桥区以及西南部雁塔区,这一特征与西安市近六年的城市发展进度相一致。

3) 基于线性光谱模型的城市植被变化地理空间格网法分析法,能直观地表达植被质量变化。2016

—2019年西安市3期植被覆盖质量在未央区西部、新城区东部、灞桥区北部和雁塔区西部有退化趋势;2019—2022年,在未央区西部、灞桥区北部和雁塔区东南部植被有好转趋势;2016—2022年,研究区植被覆盖度密度增加,质量整体向好。

3.2 讨论

通过本研究的结果分析可知,近6a西安主城区三环内植被覆盖度发生了不同程度的量变和空间转移变化,这种变化符合一般城市发展的规律,年际变化有涨有落,整体上城市的中心区变化较小,城市边缘变化较大。这种变化是受到自然、人为、城市社会经济发展等多种因素综合影响的结果,但是主要原因还是城市建设对植被变化的影响。虽然研究区属于建成区,城市建筑物等不透水面空间分布相对固定,但是城市在不断发展,城市新的规划方案在不断出台,因此城市建设不断加强。根据西安市自然资源和规划局调查的资料^[34],西安市完成了一批综合性规划,如《关中-天水经济区发展规划》《西安国际化大都市总体规划发展战略研究》《大西安城市总体规划》《城市生态环境改善规划》《西安城市生态隔离体系控制规划》等,并已经或正在实施,这些建设举措影响了城市建设土地利用类型的变化,从而间

接影响植被的变化。这种城市建设的需要,导致有部分过去是低、中覆盖植被等级的土地可能转变成了建设用地,造成了短期内植被覆盖度减少的趋势。但是,这种趋势随着城市绿地系统的建设,将得到改善和提高。此外,城市绿化工程建设也对植被变化有不同程度的影响。因此,绿地广场面积的不断增多明显影响植被覆盖等级的提升,也有效促进了植被覆盖变化。

参考文献:

- [1] 孝金波,曹佳慧.统计局辟谣 2018 年中国人口负增长:人口红利仍在[EB/OL]. [2019-01-21]. <http://society.people.com.cn/n1/2019/0121/c1008-30581500.html>.
- [2] 王伯荪.城市植被与城市植被学[J]. 中山大学学报:自然科学版,1998,37(4):9-12.
WANG B S. Urban vegetation and urban vegetology[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni: Natural Science Edition,1998,37(4):9-12. (in Chinese)
- [3] 高峻,宋永昌,张庆费.遥感和 GIS 支持下的城市植被制图及其特征分析[J]. 植物生态学报,2002,26(1):1-9.
GAO J, SONG Y C, ZHANG Q F. Analysis on the characteristics of urban vegetation and its mapping based on remote sensing and geographic information system[J]. Acta Phytocologica Sinica,2002,26(1):1-9. (in Chinese)
- [4] 尤美子,黄晓霞,徐伟涛,等.城市道路绿带遥感绿量与地温相关性研究[J]. 西北林学院学报,2021,36(4):266-272.
YOU M Z, HUANG X X, XU W T, *et al.* Correlation between green quantity in urban road and land surface temperature on remote sensing image[J]. Journal of Northwest Forestry University,2021,36(4):266-272. (in Chinese)
- [5] 杨林,马秀枝,李长生,等.积雪时空变化规律及其影响因素研究进展[J]. 西北林学院学报,2019,34(6):96-102.
YANG L, MA X Z, LI C S, *et al.* Research progress in spatio-temporal variation of snow cover and the influencing factors [J]. Journal of Northwest Forestry University,2019,34(6):96-102. (in Chinese)
- [6] 张慧子,赵许宁,陈建军.西安城区植被覆盖度时空变化特征及其驱动机制研究[J]. 绿色科技,2019(10):1-4.
ZHANG H Z, ZHAO X N, CHEN J J. Study on spatiotemporal variation characteristics and driving mechanism of vegetation coverage in Xi'an urban area[J]. Journal of Green Science and Technology,2019(10):1-4. (in Chinese)
- [7] 马默衡,薛飞,党安荣,等.基于动态遥感数据的北京主城区环带间植被覆盖变化[J]. 环境工程技术学报,2019,9(4):404-413.
MA M H, XUE F, DANG A R, *et al.* Study on the spatial-temporal change of vegetation coverage between the belts of Beijing's main urban area based on dynamic remote sensing data [J]. Journal of Environmental Engineering Technology,2019,9(4):404-413. (in Chinese)
- [8] 卓嘎,陈思蓉,周兵.青藏高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应[J]. 生态学报,2018,38(9):3208-3218.
ZHUO G, CHEN S R, ZHOU B. Spatio-temporal variation of vegetation coverage over the Tibetan Plateau and its responses to climatic factors[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(9):3208-3218. (in Chinese)
- [9] 黎治华.基于 MODIS 反演重构时间序列数据的长江三角洲地区生态环境演变研究[D]. 上海:华东师范大学,2011.
- [10] 赵恒谦,贾梁,尹政然,等.基于多源遥感数据的北京市通州区土地利用/覆盖与生态环境变化监测研究[J]. 地理与地理信息科学,2019,35(1):38-43.
ZHAO H Q, JIA L, YIN Z R, *et al.* Dynamic monitoring of land use and ecological environment based on multiple remote sensing data: a case study of Tongzhou district, Beijing[J]. Geography and Geo-Information Science,2019,35(1):38-43. (in Chinese)
- [11] HUSSEIN S O. Monitoring urban greenness evolution using multitemporal Landsat imagery in the city of Erbil (Iraq)[J]. Central European Geology,2018,62(1):1-12.
- [12] 张敏霞,梅丹英,高伟俊,等.无人机遥感技术在城市绿地监测中的应用进展[J]. 中国城市林业,2019,17(5):5-11.
ZHANG M X, MEI D Y, GAO W J, *et al.* Review on the applications of UAV remote sensing technology to urban green space monitoring[J]. Journal of Chinese Urban Forestry,2019,17(5):5-11. (in Chinese)
- [13] HASHIM H, LATIF Z A, ADNAN N A. Urban vegetation classification with ndvi threshold value method with very high resolution (vhr) pleiades imagery[J]. ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,2019,16(1):237-240.
- [14] 杜培军,白旭宇,罗洁琼,等.城市遥感研究进展[J]. 南京信息工程大学学报,2018,10(1):16-29.
- [15] 杨超,邹国锋,李清泉,等.植被遥感分类方法研究进展[J]. 地理与地理信息科学,2018,34(4):24-32.
YANG C, WU G F, LI Q Q, *et al.* Research progress on remote sensing classification of vegetation[J]. Geography and Geo-Information Science,2018,34(4):24-32. (in Chinese)
- [16] 陈新.“一带一路”背景下西安城市发展战略对其进出口贸易的影响[J]. 现代经济信息,2019(4):155-156.
- [17] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.国家发展改革委住房城乡建设部关于印发关中平原城市群发展规划的通知(发改规划[2018]220号)[EB/OL]. [2018-02-07]. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201802/t20180207_876904.html.
- [18] 杨树文,董玉森,罗小波,等.遥感数字图像处理与分析[M]. 北京:电子工业出版社,2015:36-60.
- [19] PUREVDOR J S, TATEISHI R, ISHIYAMA T. Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices [J]. International Journal of Remote Sensing,1998,19(18):3519-3535.
- [20] 张云霞,李晓斌,陈云浩.草地植被覆盖度的多尺度遥感与实地测量方法综述[J]. 地球科学进展,2003,18(1):85-93.
- [21] 陈晋,陈云浩,何春阳.基于土地覆盖分类的植被覆盖率估算亚像元模型与应用[J]. 遥感学报,2001,5(6):416-422,481.
CHEN J, CHEN Y H, HE C Y. Sub-pixel Model for vegetation fraction estimation based on land cover classification[J]. Journal of Remote Sensing,2001,5(6):416-422,481. (in Chinese)
- [22] 贾坤,姚云军,魏香琴.植被覆盖度遥感估算研究进展[J]. 地

- 球科学进展,2013,28(7):774-782.
- JIA K, YAO Y J, WEI X Q. A review on fractional vegetation cover estimation using remote sensing[J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(7): 774-782. (in Chinese)
- [23] 张熙川, 赵英时. 应用线性光谱混合模型快速评价土地退化的方法研究[J]. *中国科学院研究生院学报*, 1999, 16(2): 170-172.
- [24] 万军, 蔡运龙. 应用线性光谱分离技术研究喀斯特地区土地覆被变化—以贵州省关岭县为例[J]. *地理研究*, 2003, 22(4): 440-443.
- WAN J, CAI Y L. Applying linear spectral unmixing approach to the research of land cover change in Karst area: a case in Guanling county of Guizhou Province[J]. *Geographical Research*, 2003, 22(4): 440-443. (in Chinese)
- [25] 邓书斌. ENVI 遥感图像处理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 347-349.
- [26] GREEN A A, CRAIG M D. Analysis of aircraft spectrometer data with logarithmic residuals; in proceedings[J]. *Environmental Science Mathematics*, 1985, 21(1): 111-119.
- [27] JOSEPH W. Automated spectral analysis: a geologic example using AVIRIS data, North Grapevine Mountains, Nevada[C]. Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, Environmental Research Institute of Michigan, 1994.
- [28] 李慧, 陈建飞, 余明. 线性光谱混合模型的 ASTER 影像植被应用分析[J]. *地球信息科学*, 2005, 7(1): 103-106, 113-115.
- LI H, CHEN J F, YU M. Extracting vegetation coverage information from ASTER remote sensing data based on linear spectral immixture model [J]. *GEO-Information Science*, 2005, 7(1): 103-106, 113-115. (in Chinese)
- [29] 高云, 谢苗苗, 付梅臣, 等. 高原河谷城市植被时空变化及其影响因素——以青海省西宁市为例[J]. *生态学报*, 2014, 34(5): 1094-1104.
- CAO Y, XIE M M, FU M C, *et al.* Pattern dynamics of vegetation coverage plateau valley-city in the Western China: a case study Xining[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(5): 1094-1104. (in Chinese)
- [30] 徐珂, 邢艳秋, 常晓晴. 亚热带常绿针叶林光能利用率模型优化与总初级生产力估算[J]. *森林工程*, 2021, 37(5): 28-36.
- XU K, XING Y Q, CHANG X Q. Model optimization and GPP estimation of light energy utilization in subtropical evergreen coniferous forest[J]. *Forest Engineering*, 2021, 37(5): 28-36. (in Chinese)
- [31] JIAN P, LIU Y, HONG S, *et al.* Vegetation coverage change and associated driving forces in mountain areas of Northwestern Yunnan, China using RS and GIS[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184(8): 4787-4798.
- [32] 姚永慧, 张百平, 罗扬, 等. 格网算法在空间格局分析中的应用——以贵州景观空间格局分析为例[J]. *地球信息科学*, 2006, 8(1): 73-78.
- YAO Y H, ZHANG B P, LUO Y, *et al.* The application of grid computing method to the research of spatial pattern——an analysis of Karst landscape pattern in Guizhou[J]. *Geo-Information Science*, 2006, 8(1): 73-78. (in Chinese)
- [33] 国家林业和草原局. 国家森林城市评价指标: GB/T 37342—2019[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2019.
- [34] 西安市自然资源和规划局(市林业局). 规划计划[EB/OL]. http://zygh.xa.gov.cn/ptl/def/def/index_954_6039.html.

(上接第 232 页)

- [36] 徐达松. 面向对象的草原植被参数反演方法及应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [37] LIANG L, ZHIHAO Q, SHUHE Z, *et al.* Estimating crop chlorophyll content with hyperspectral vegetation indices and the hybrid inversion method[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(13/14): 2923-2949.
- [38] OMARI K, WHITE H P, STAENZ K, *et al.* Retrieval of forest canopy parameters by inversion of the PROFLAIR leaf-canopy reflectance model using the LUT approach[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 6(2): 715-723.
- [39] 李小文. 定量遥感的发展与创新[J]. *河南大学学报: 自然科学版*, 2005, 35(4): 49-56.
- LI X W. Retrospect, prospect and innovation in quantitative remote sensing[J]. *Journal of Henan University: Natural Science*, 2005, 35(4): 49-56. (in Chinese)
- [40] 白丽. 基于高光谱数据的玉米 LAI 和叶绿素含量遥感反演方法的研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2020.
- [41] ALEIXANDRE V, BARET F, FERNANDO C. Optimal modalities for radiative transfer-neural network estimation of canopy biophysical characteristics: evaluation over an agricultural area with CHRIS/PROBA observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2): 415-426.
- [42] DANIEL D, ANGELA L, DANIEL S, *et al.* Extraction of Plant physiological status from hyperspectral signatures using machine learning methods[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(12): 12247.