

四川省 2009—2020 年植被覆盖度 时空变化遥感动态监测

何利平, 简季

(成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059)

摘要: [目的] 监测和分析四川省 2009—2020 年植被覆盖度时空变化特征, 为定量评估区域生态环境提供重要的基础研究数据, 也为城市规划及可持续城市发展提供科学参考。[方法] 借助 Google Earth Engine 云计算平台, 获取了 2009—2020 年四川省 Landsat 系列影像, 利用像元二分模型对研究区植被覆盖度进行了定量估算。[结果] ① 2009—2020 年间, 四川省主要以高、中高植被覆盖度为主, 其面积可达全省面积的 80%, 而低、中低植被覆盖度面积所占比例低于 10%。② 从空间上分布, 四川省植被覆盖度空间差异比较明显, 植被覆盖度较低区域主要分布在成都平原经济区及川西部分地区; ③ 从空间变化特征上分析, 2009—2020 年研究区的植被覆盖度整体呈现基本稳定趋势(44.39%), 植被覆盖度改善的区域面积(30.78%)大于植被覆盖度退化区域(24.82%), 其中明显退化区域面积所占比例最少, 仅占全省面积的 4.96%。[结论] 总体上, 2009—2020 年四川省的植被覆盖状况良好, 以高、中高植被覆盖度为主, 植被覆盖度呈现基本稳定趋势。

关键词: 植被覆盖度; 像元二分模型; 时空分析; 遥感动态监测; Google Earth Engine (GEE)

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)02-0203-07

中图分类号: Q948

文献参数: 何利平, 简季. 四川省 2009—2020 年植被覆盖度时空变化遥感动态监测[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 203-209. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.02.028; He Liping, Jian Ji. Remote sensing dynamic monitoring on temporal and spatial changes of vegetation coverage in Sichuan Province from 2009 to 2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 203-209.

Remote Sensing Dynamic Monitoring on Temporal and Spatial Changes of Vegetation Coverage in Sichuan Province from 2009 to 2020

He Liping, Jian Ji

(College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: [Objective] The temporal and spatial variation characteristics of vegetation coverage in Sichuan Province from 2009 to 2020 were monitored and analyzed, in order to provide important basic research data for quantitative assessment of the regional ecological environment, and scientific references for urban planning and sustainable urban development. [Methods] Landsat images of Sichuan Province from 2009 to 2020 were acquired from the Google Earth Engine cloud computing platform, and the vegetation coverage area was quantitatively estimated by the binary pixel model. [Results] ① In the 11 years from 2009 to 2020, Sichuan Province was mainly dominated by high and medium high vegetation coverage, accounting for 80% of the province's area, while the proportion of low and medium low vegetation coverage was less than 10%. ② From the perspective of spatial distribution, the spatial difference of fractional vegetative cover (FVC) in Sichuan Province was obvious. The areas with low FVC were mainly located in the Chengdu Plain Economic Zone and some areas in Western Sichuan Province. ③ From the analysis of spatial change characteristics, FVC in the study area showed a basically stable trend (44.39%) from 2009 to 2020. The area of FVC

收稿日期: 2021-11-13

修回日期: 2021-12-06

资助项目: 国家自然科学基金项目“上下文感知的旅游信息智能推荐方法”(41771444)

第一作者: 何利平(1996年—), 女(汉族), 四川省遂宁市人, 硕士研究生, 研究方向为 3S 技术与数字国土。Email: 1041092195@qq.com。

通讯作者: 简季(1972年—), 男(汉族), 四川省内江市人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事三维建模及高光谱遥感研究。Email: 924325665@qq.com。

improvement (30.78%) was larger than that of FVC degradation (24.82%), and the area of obvious degradation accounted for the least proportion (only 4.96% of the province's area). [Conclusion] On the whole, vegetation coverage in Sichuan Province from 2009 to 2020 was in good condition, mainly with high and medium high vegetation coverage. The vegetation coverage showed a basically stable trend. From 2009 to 2020, the area of Sichuan Province was mainly dominated by high and medium high FVC levels that accounted for 80% of the province's area, while the area of low and medium low FVC accounted for less than 10% of the area.

Keywords: vegetation coverage; pixel binary model; spatio-temporal analysis; remote sensing dynamic monitoring; Google Earth Engine (GEE)

植被是区域覆盖植物群落的总称,是生态系统的重要组成部分,不仅影响全球的物质与能量循环,而且对保持水土、碳的收支平衡、维持气候及整个生态系统稳定等方面都具有十分重要的作用^[1-2]。植被覆盖度(fraction of vegetation coverage, FVC),通常被定义为植被(含叶、茎、枝)在地面的垂直投影面积占统计区总面积的比例^[3],是分析地表植被覆盖的重要参数,可以用来监测不同尺度的地表覆盖状况^[4],对区域生态系统环境变化具有突出的指示作用^[5]。植被覆盖与生态环境之间有着紧密的联系,植被覆盖度作为生态系统表述的重要数据基础,在植被动态监测和区域生态环境评价等方面具有重要意义。归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)对植被的生物物理特征十分敏感,并且在时效、尺度方面具有较大优势,所以通常用来对区域尺度的植被覆盖度进行估算^[6],大量研究^[7-9]证实植被指数与植被覆盖度之间具有较好相关性,因此使用植被指数来计算植被覆盖度是适合的。近年来,众多学者在利用遥感技术对植被覆盖度进行动态监测方面开展了大量研究,已经取得了较多的成果。如李晶等^[10]基于 SPOT/VEGETATION NDVI 数据,利用趋势分析法、像元二分模型,综合多种统计方法,对呼伦贝尔市植被覆盖度时空变化及驱动力进行定性与定量分析。皮新宇等^[11]提出一种基于多源遥感数据与时间混合分析的城市植被覆盖度估算方法,通过时空融合、植被物候特征分析获得最佳时序的 GF-1 NDVI 数据,再基于时间序列的多源数据,采用时间混合分析方法估算城市植被覆盖度。Niu Yaxiao 等^[12]利用机器学习算法从无人机多光谱影像中估算水分胁迫下内蒙古玉米地植被覆盖度,为基于无人机多光谱图像的植被覆盖度模型提供参考。李苗苗等^[13]在对像元二分模型 2 个重要参数推导的基础上,改进了已有模型的参数估算方法,建立了利用 NDVI 归一化植被指数对定量植被覆盖度进行估算的模型。谷歌地球引擎(GEE)作为全球尺度地球科学数据可视化计算分析的地理空间分析云平台,以其海量卫星数据存档和强大的并行计算能力,为长时间

序列的遥感监测提供了技术便利。2013 年,GEE 开始应用于地球科学领域。Hensen 等^[14]最早利用 12 a 共 654 178 景 Landsat 影像,采用决策树方法,在 GEE 平台上实现了对 2000—2012 年 30 m 尺度的全球森林范围和动态变化的识别和监测。GEE 拥有海量数据计算能力^[15],目前已广泛应用于城市热岛效应^[16]、局部地区生态环境状况^[17]、建筑用地提取^[18]、生态环境监测^[19]、湿地湖泊系 pH 值估算等^[20]方面的研究。

四川省是我国西部地区经济发展的重要支柱,在四川省委召开的十一届三次全会上,作出构建“一干多支,五区协同”的区域发展新格局部署。经济的发展必然伴随着对自然资源的消耗,如何在发展经济的同时,科学协调人与自然的的关系,是长久以来的需要我们解决的难题。因此,本文基于 GEE 云处理平台,使用 Landsat 遥感卫星数据以及相关辅助数据,运用一元线性回归趋势分析、像元二分模型等方法,对 2009—2020 年四川省植被覆盖度的分布特征及时空变化特征进行分析,旨在为四川省的生态环境质量评价与治理等提供可靠参考,促进“五区协同”发展,推动成都平原经济区、川南经济区、川东北经济区、攀西经济区、川西北生态示范区协同发展。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

四川省(26°03'—34°19'N,97°21'—108°12'E)位于中国西南地区内陆,地处长江上游。该省位于中国大陆地势三大阶梯中的第一级青藏高原和第二级长江中下游平原的过渡地带,东西地貌差异大,地形复杂多样,地势西高东低,由山地、丘陵、平原、盆地和高原构成。气候复杂多样,地带性和垂直变化比较明显,根据水热条件和光照条件差异,全省可分为 3 大气候,分别为四川盆地中亚热带湿润气候,川西南山地亚热带半湿润气候,川西北高山高原高寒气候。四川境内土壤类型众多^[21],主要自然植被共有 8 个植被型、18 个群系纲、48 个群系组^[22],生物资源比较丰富。根据四川省委召开的十一届三次全会中提出的

构建“一千多支,五区协同”的区域发展新格局,将四川省分为成都平原经济区、川南经济区、川东北经济区、攀西经济区以及川西北生态示范区共 5 个区域。

1.2 数据源

遥感影像数据来源于美国地质调查局,在 GEE 平台中,针对 2009—2020 年的 Landsat 影像,通过 JavaScript API 在线访问四川省 2009,2013,2017 和 2020 年的影像数据,影像空间分辨率为 30 m,时间分辨率为 16 d。影像为地表反射率图像(surface reflectance, SR),已经辐射校正、大气校正以及几何精校正,其中 Landsat 5 和 Landsat 8 卫星影像分别有 577 景和 1 945 景。

影像数据获取和预处理主要包括去云处理、植被指数计算、影像合成与镶嵌等。首先根据成像日期筛选出每年 1 月 1 日至 12 月 31 日的影像数据,使用 Landsat 影像中通过 CFMASK 算法生成的质量评价波段进行去云处理。然后基于 GEE 平台在线计算归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI),并利用最大值合成法(maximum value compositing, MVC)将每年多时相的 NDVI 数据进行合成,进一步消除云雾、大气以及卫星传感器角度等对数据带来的影响,影像的拼接、裁剪也在线完成。

2 研究方法

2.1 植被指数空间数据提取

利用最大值合成法(maximum value compositing, MVC)^[23],对植被指数的年际变化进行研究,第 i 年植被覆盖度的取值计算方法为:

$$I_{\text{NDVI}}^{\text{max}} = \max_{p=1}^m I_{\text{NDVI}}^p \quad (1)$$

式中: $I_{\text{NDVI}}^{\text{max}}$ 是第 i 年 NDVI 的最大值,即植被覆盖最高时 NDVI 的取值; I_{NDVI}^p 是第 i 年第 p 期的遥感影像 NDVI 取值; m 是第 i 年遥感影像总数。

2.2 植被覆盖度遥感反演模型

目前比较常用的植被覆盖度遥感估算方法有机器学习法、混合像元分解模型法、植被冠层模型法等。本文利用像元二分模型估算研究区植被覆盖度,该模型是混合像元分解模型法中最具有代表性的一种线性模型,在很大程度上削弱了土壤背景、大气和植被类型的影响,应用范围比较广泛。像元二分模型^[13]基本原理是假设一个像元的光谱信息由植被与非植被光谱信息线性加权合成,而它们在像元面积中所占的比例就是线性加权的权重,其中植被覆盖区域在像元中所占的比例即为该像元的 FVC。由此推算出植被覆盖度计算公式为:

$$\text{FVC} = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}}{\text{NDVI}_{\text{veg}} - \text{NDVI}_{\text{soil}}} \quad (2)$$

式中:FVC 为像元植被覆盖度取值;NDVI 为混合像元的植被指数取值;NDVI_{veg} 为纯植被像元的植被指数取值;NDVI_{soil} 为纯土壤像元的植被指数取值。

理论上,NDVI_{veg} 和 NDVI_{soil} 的取值应为 1 和 0,但实际上由于地表温度、土壤类型、土壤颜色等条件的不同,值会发生相应的改变,取值一般在 -0.1~0.2 之间变动^[24]。因此,本文采用给定置信度的置信区间内的最大值和最小值的方法估算 NDVI_{veg} 和 NDVI_{soil} 的取值,该方法在一定程度上可消除由遥感影像噪声而产生的误差^[13]。结合四川省植被覆盖实际状况和植被指数频率统计表,经试验对比,最终取 NDVI 年最大合成频率累计表上累积频率为 5% 的值为 NDVI_{soil},取 NDVI 年最大合成频率累计表上累积频率为 95% 的值为 NDVI_{veg}。

2.3 植被覆盖度的时空变化趋势分析

本文采用一元线性回归趋势分析法,基于像元对四川省 2009—2020 年植被覆盖度时空变化趋势进行定量分析,即采用最小二乘法拟合每个像元取值的斜率,以此来计算像元的变化率,最终揭示研究区植被覆盖度变化的时空特征^[25]。计算公式为:

$$l_{\text{slope}} = \frac{n \sum_{i=1}^n i f_i - (\sum_{i=1}^n i) (\sum_{i=1}^n f_i)}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (3)$$

式中: l_{slope} 为 FVC 变化斜率,即年际变化率; n 为监测年数; f_i 为对应第 i 年的像元植被覆盖度取值。 $l_{\text{slope}} > 0$,表明在研究期间内 FVC 呈增长趋势; $l_{\text{slope}} < 0$,表明 FVC 呈下降趋势; $l_{\text{slope}} = 0$,表明 FVC 没有发生改变。 l_{slope} 绝对值越大,表明研究期间 FVC 变化越明显。

3 研究结果

3.1 植被覆盖度时空分布特征

本文参考众多相关研究成果,结合研究区植被覆盖实际情况,采用等间距划分法对植被覆盖度进行分类^[26-27],将四川省植被覆盖状况划分为低覆盖、中低覆盖、中覆盖、中高覆盖、高覆盖共 5 种类型(表 1)。

表 1 四川省植被覆盖度(FVC)类型分类

FVC 等级	FVC 取值
低覆盖	$0 \leq \text{FVC} < 0.2$
中低覆盖	$0.2 \leq \text{FVC} < 0.4$
中覆盖	$0.4 \leq \text{FVC} < 0.6$
中高覆盖	$0.6 \leq \text{FVC} < 0.8$
高覆盖	$0.8 \leq \text{FVC} \leq 1$

根据等间距划分法对植被覆盖度进行分级显示的结果,统计出 2009,2013,2017 和 2020 年 4 个年份不同等级植被覆盖度的面积及比例,并形成了的植被覆盖分级图,对图 1 和表 2 进行分析可知,从总体来看,研究区植被覆盖状况较好,以中高、高植被覆盖为主,比例约占全省面积的 80%,而低、中低植被覆盖区域较少,所占比例不到 10%。低、中低植被覆盖区

域从 2009—2020 年,所占比例分别降低了 0.45% 和 0.95%,变化不明显,呈略微降低趋势;中植被覆盖区域 2009—2017 年所占比例逐渐下降,2020 年有所回升,总体变化不大;中高植被覆盖区域所占比例在 2009,2013 和 2017 年基本保持不变,在 33% 左右波动,2020 年增长到 35.47%;高植被覆盖区域呈先增长后下降趋势,于 2013 年达到最大比例 49.02%。

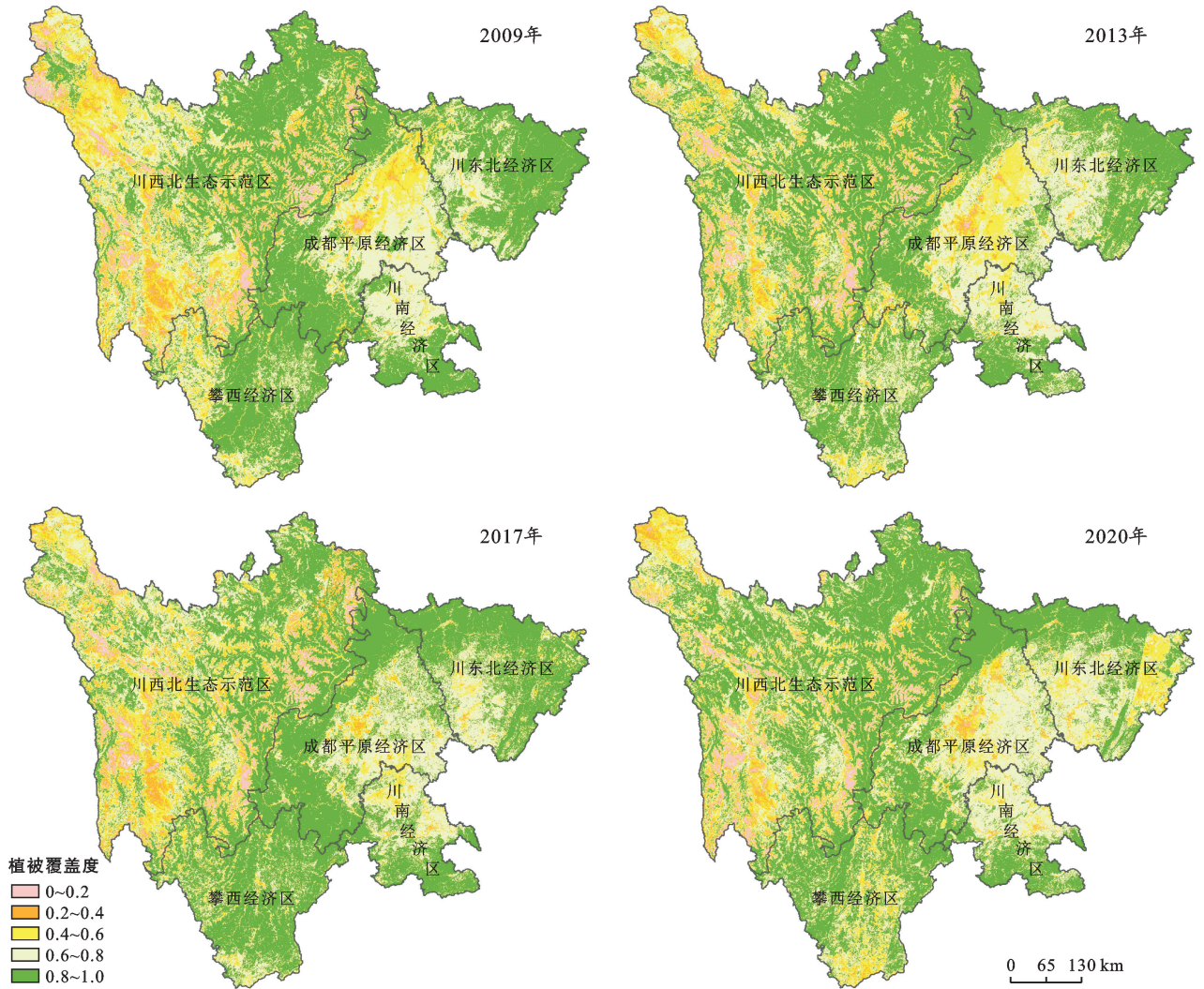


图 1 四川省 5 大经济区 2009—2020 年植被覆盖度等级分布

表 2 四川省 2009—2020 年植被覆盖分级面积及比例

盖度等级	2009 年		2013 年		2017 年		2020 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
低	2.21×10 ⁴	4.54	1.75×10 ⁴	3.61	1.98×10 ⁴	4.06	2.00×10 ⁴	4.09
中低	2.29×10 ⁴	4.68	1.70×10 ⁴	3.49	2.07×10 ⁴	4.24	1.82×10 ⁴	3.73
中	5.56×10 ⁴	11.39	4.91×10 ⁴	10.09	4.86×10 ⁴	9.96	4.90×10 ⁴	10.05
中高	1.62×10 ⁵	33.14	1.65×10 ⁵	33.79	1.61×10 ⁵	33.10	1.73×10 ⁵	35.47
高	2.26×10 ⁵	46.25	2.39×10 ⁵	49.02	2.37×10 ⁵	48.64	2.27×10 ⁵	46.66

对研究期间内的 2009—2020 年 4 期植被覆盖度数据求平均得到多年平均植被覆盖度,对植被覆盖度

进行分级显示得到多年平均植被覆盖度分级图(图 2)。

根据四川省区域发展新格局,分别对 5 大区域植被覆盖度空间分布特征进行分析。川西北地区植被覆盖度整体较高,植被生长状况较好,呈自西向东逐渐良好趋势,但部分地区植被覆盖度相对较低。植被覆盖度较高区域主要分布在森林、草地等植被生长旺盛的地区,如红原县,若尔盖县,阿坝县等区域;而植被覆盖度相对较低区域主要分布在高山地带,气温低,常年积雪,而且部分地区海拔很高,土壤条件差,满足植被生长条件的土壤覆盖面积较少,导致植被覆盖度较低。如德格县中部,汶川县与小金县、理县三县交界处,康定市、泸定县交界处,巴塘县等区域。攀西地区植被覆盖度以高、中高植被覆盖为主,植被生长状况较好。这是由于该地区地理条件的限制,自然资源不易被开发,植被覆盖度相对较高,如盐边县,金阳县,美姑县,德昌县等区域;而植被覆盖度相对较低区域主要分布在攀西西部和南部部分冰雪覆盖区域,植被难以生长,以及分布有较多的城镇和耕地的谷地和平原地区,如西昌市邛海以北附近区域,攀枝花东区、西区等地区。

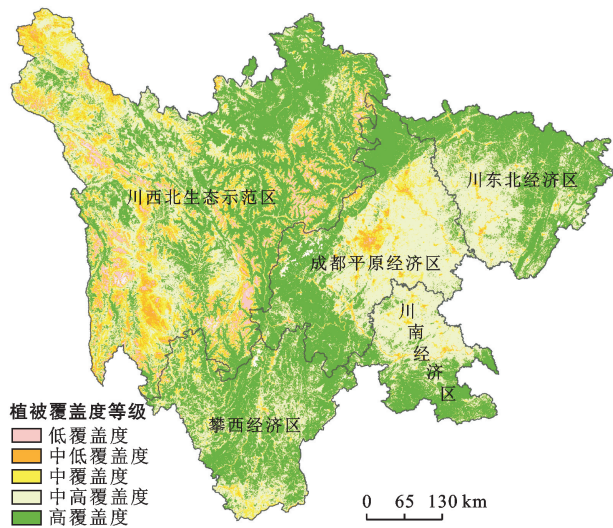


图 2 四川省 5 大经济区多年平均植被覆盖度等级分布

川南经济区整体植被覆盖度较高,植被生长状况良好,整体上呈现出“南高北低”的分布特征。川南大部分地区为高、中高植被覆盖,而低、中低植被覆盖零散分布在长江沿岸以及城镇分布地区。如龙马潭区、江阳区交界处,贡井区、自流井区以及沿滩区交界处等区域。成都平原经济区植被覆盖度呈现出由川西高原山地区域—平原周边区域—冲积平原区域逐渐降低的趋势。受人为活动和水热条件的影响,高植被覆盖区主要集中在高山高原地区。如平武县、北川羌族自治县、乐山市西南片区等区域,而低、中低植被覆

盖区多分布在平原地区,经济发展快,建设用地较多,植被覆盖度较低。如成都市三环内,绵阳市涪城区、江油市及游仙区交界处,德阳市旌阳区等区域。川东北经济区植被生长状况较好,整体呈现“北高南低,东高西低”分布趋势,植被覆盖度以高、中高植被覆盖为主,而低、中低植被覆盖区域较少,主要集中在城镇分布区域,如南充市顺庆区、嘉陵区及高坪区三区交界处,阆中市中部,广元市利州区等区域。

3.2 植被覆盖度时空变化特征

基于一元线性回归模型,计算出四川省 2009—2020 年植被覆盖度变化趋势,不同区域存在着不同的取值,即不同的变化趋势^[25]。 L_{slope} 为正值,则表示 FVC 呈增长趋势,反之,则表示 FVC 呈下降趋势。根据 L_{slope} 的取值,利用自然断点分级法将 FVC 变化趋势划分为 5 类: $L_{slope} \leq -0.090\ 892$,表示植被覆盖变化呈明显退化趋势; $-0.090\ 892 < L_{slope} \leq -0.028\ 072$,表示轻度退化; $-0.028\ 072 < L_{slope} \leq 0.017\ 615$,表示基本稳定; $0.017\ 615 \leq L_{slope} \leq 0.077\ 579$,表示轻度改善; $L_{slope} > 0.077\ 579$,表示明显改善。根据利用自然断点分级法对植被覆盖变化情况进行分级的结果,得到 FVC 变化趋势图(图 3)及 FVC 变化面积和比例统计表(表 3)。通过对图 3 和表 3 进行分析可以得出,整体上,2009—2020 年间,四川省大部分区域的植被覆盖度呈基本稳定状态,而明显退化、明显改善、轻度退化区域面积所占比例较小。呈基本稳定状态区域分布较广,面积高达 215 397.205 7 km²,占该省面积的 44.39%,所占比例最高。植被覆盖有所改善的区域主要分布在川西北生态示范区、攀西经济区及川东北部分地区,植被覆盖有所改善的区域面积高于退化区域,植被覆盖呈增加趋势的面积所占比例 30.78%,其中有 5.45% 为明显增加;植被覆盖呈退化趋势的区域主要分布在川西北部分地区、成都片区及川东北少数区域,面积所占比例为 24.82%,其中明显退化区域仅占 4.96%,所占比例最少。从面积比例来看,植被覆盖度呈基本稳定区域面积所占比例最大,有所改善的区域多于植被覆盖退化的区域。

表 3 四川省多年植被覆盖度变化面积及比例

变化趋势等级	面积/km ²	面积比例/%
明显退化	2.41×10^4	4.96
轻度退化	9.64×10^4	19.86
基本稳定	2.15×10^5	44.39
轻度改善	1.23×10^5	25.33
明显改善	2.64×10^4	5.45

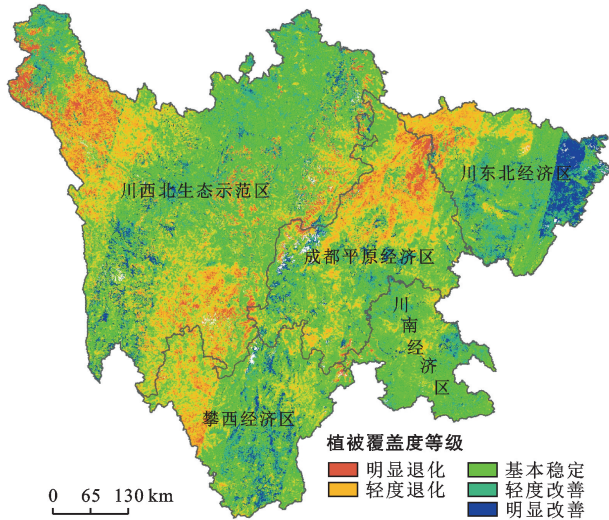


图 3 四川省 2009—2020 年四川省 5 大经济区植被覆盖度变化趋势

4 讨论与结论

目前已有对四川省全域的植被覆盖度进行研究,讨论全省植被覆盖度的总体变化情况。但并没有依据目前四川省的 5 大经济分区做出具体分析,因此本研究基于 GEE 平台对四川省 5 大经济区具体的植被覆盖度空间分布特征进行分析讨论,从而在区域尺度下,为四川省生态环境质量评价与治理提供参考,以促进“五区协同”发展,进一步推动四川省的区域协调发展。

(1) 2009—2020 年,四川省植被覆盖度整体状况良好,大部分区域处于高、中高植被覆盖度,所占比例约为 80%,而低、中低植被覆盖度面积所占比例低于 10%。不同地区存在着不同程度的变化,其中攀西经济区的植被覆盖增加最为明显,川西北生态示范区、川东北经济区植被覆盖情况也有一定的改善。

(2) 从空间分布上来看,四川省植被覆盖度空间差异比较明显,植被覆盖度较低区域主要分布在成都平原经济区及川西北生态示范区的部分地区。这是因为成都平原经济区是四川省的经济活动中心,植被覆盖度较低,比如成都市中心城区,而川西北部分地区受海拔、气候等自然条件因素的影响,导致植被生长状况较差。

(3) 从空间变化特征分析上来看,2009—2020 年四川省植被覆盖变化趋势总体表现为相对稳定状态,呈改善、稳定和退化趋势的面积分别占四川省区域的 30.78%,44.39%和 24.82%,其中明显退化区域仅占 4.96%,植被覆盖状况有所改善的区域面积高于退化的区域。

(4) 与传统的遥感信息提取方法相比,本文利用 GEE 云平台,通过在线编程的方式即可实现遥感数据集的收集、处理及结果的输出与下载,极大地提高了遥感影像处理的效率,为植被覆盖度的大范围、长时间序列的遥感动态变化监测研究提供了广阔前景。

为了提高区域植被覆盖度,使生态环境可持续发展,需要对影响植被覆盖度的主要影响因素采取相应措施,但本文主要利用遥感影像数据揭示了四川省 2009—2020 年的植被覆盖度时空变化特征,并未讨论分析影响植被覆盖度变化的主要驱动力因素,因此,对区域植被覆盖度变化进行驱动力分析是研究的下一步工作。此外,本研究主要利用 Landsat 数据对植被覆盖度进行监测,但随着使用数据的分辨率的进一步提高,植被覆盖度反演模型和结果的精度也会随之提高,使用高光谱分辨率和高空间分辨率的数据或者利用多源数据对植被覆盖度进行分析也是今后的发展趋势。

[参 考 文 献]

- [1] 赵英时.遥感应用分析原理与方法[M].北京:遥感应用分析原理与方法,2003.
- [2] 颜明,贺莉,王随继,等.基于 NDVI 的 1982—2012 年黄河流域多时间尺度植被覆盖变化[J].中国水土保持科学,2018,16(3):86-94.
- [3] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction [J]. Remote Sensing of Environment, 2002,80(1):76-87.
- [4] 朱高龙,柳艺博,居为民,等.4 种常用植被指数的地形效应评估[J].遥感学报,2013,17(1):210-234.
- [5] 马锋,卓静,何慧娟,等.陕西省榆林市植被生态演变及其驱动机制[J].水土保持通报,2020,40(5):257-261,267.
- [6] 何国兴,柳小妮,张德罡,等.甘肃省高寒草甸植被覆盖度反演及其时空变化研究[J].草地学报,2021,29(3):593-602.
- [7] 乔文慧,王强.2001—2016 年福建省海岸带植被覆盖变化特征[J].水土保持通报,2020,40(1):236-242.
- [8] 李梓钰,陈启慧,黄峰,等.吐鲁番盆地骆驼刺保护区植被覆盖度时空演变[J].干旱区研究,2021,38(4):1104-1110.
- [9] 杨绘婷,徐涵秋,施婷婷,等.基于植被信息季节变换的植被覆盖度变化:以福建省连江县为例[J].应用生态学报,2019,30(1):285-291.
- [10] 李晶,刘乾龙,刘鹏宇.1998—2018 年呼伦贝尔市植被覆盖度时空变化及驱动力分析[J].生态学报,2022,42(1):220-235.
- [11] 皮新宇,曾永年,贺城墙.融合多源遥感数据的高分辨率城市植被覆盖度估算[J].遥感学报,2021,25(6):1216-1226.
- [12] Niu Yaxiao, Han Wenting, Zhang Huihui, et al. Esti-

- mating fractional vegetation cover of maize under water stress from UAV multispectral imagery using machine learning algorithms [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 189(8): 106414.
- [13] 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, 26(4): 153-159.
- [14] Hansen M C, Potapov P V, Moore R, et al. High-resolution global maps of 21st century forest cover change[J]. *science*, 2013, 342(6160): 850-853.
- [15] Tamiminia H, Salehi B, Mahdianpari M, et al. Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 164: 152-170.
- [16] Fashae O A, Adagbasa E G, Olusola A O, et al. Land use/land cover change and land surface temperature of Ibadan and environs, Nigeria [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(2): 1-18.
- [17] Chen Bangqian, Xiao Xiangming, Li Xiangping, et al. A mangrove forest map of China in 2015: Analysis of time series Landsat 7/8 and Sentinel-1A imagery in Google Earth Engine cloud computing platform [J]. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 131: 104-120.
- [18] Sun Zhongchang, Xu Ru, Du Wenjie, et al. High-resolution urban land mapping in China from sentinel 1A/2 imagery based on Google Earth Engine [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(7): 752.
- [19] 陈炜, 黄慧萍, 田亦陈, 等. 基于 Google Earth Engine 平台的三江源地区生态环境质量动态监测与分析[J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(9): 1382-1391.
- [20] Pereira O J R, Merino E R, Montes C R, et al. Estimating water pH using cloud-based landsat images for a new classification of the Nhecolndia Lakes (Brazilian Pantanal)[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(7): 1090.
- [21] 赵海凤. 四川省森林生态系统服务价值计量与分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [22] 黄从德. 四川森林生态系统碳储量及其空间分异特征[D]. 四川 成都: 四川农业大学, 2008.
- [23] Holben, Brent N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1417-1434.
- [24] Carlson T N, Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62(3): 241-252.
- [25] 李晶, 崔绿园, 闫萧萧, 等. 草原矿区长时序植被覆盖度变化趋势对比分析[J]. *测绘通报*, 2019(8): 130-134, 157.
- [26] 张本昀, 喻铮铮, 刘良云, 等. 北京山区植被覆盖动态变化遥感监测研究[J]. *地域研究与开发*, 2008, 27(1): 108-112.
- [27] 李林叶, 田美荣, 梁会, 等. 2000—2016年呼伦贝尔草原植被覆盖度时空变化及其影响因素分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(7): 584-591.

(上接第 202 页)

- [26] 陈洪凯, 唐红梅. 川藏公路地质灾害危险性评价[J]. *公路*, 2011(9): 17-23.
- [27] 孟兆兴. 基于 GIS 的川藏公路鲁朗—通麦段滑坡易发性评价[D]. 河北 邯郸: 河北工程大学, 2020.
- [28] 李斌, 彭福坦. 西藏林芝地区原生植被保护和恢复研究[J]. *林业建设*, 2004(6): 12-18.
- [29] 张泽明, 丁慧霞, 董昕, 等. 冈底斯岩浆弧的形成与演化[J]. *岩石学报*, 2019, 35(2): 275-294.
- [30] 宋涛, 刁谦, 真允庆. 青藏高原地热资源与地幔柱构造的关系: 地幔热柱多级演化导致岩浆上侵成为浅部热源[J]. *河北地质大学学报*, 2018, 41(6): 1-24.
- [31] 刘晓. 基于遥感与 GIS 的林芝中部地区地质灾害危险性评价研究[D]. 辽宁 大连: 辽宁师范大学, 2019.
- [32] 盛逸凡, 李远耀, 徐勇, 等. 基于有效降雨强度和逻辑回归的降雨型滑坡预测模型[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(1): 156-162, 172.
- [33] 唐红梅, 魏来, 高阳华, 等. 基于逻辑回归的重庆地区降雨型滑坡预报模型[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2013, 24(3): 32-37.
- [34] 黄润秋, 李为乐. “5·12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(12): 2585-2592.
- [35] 张锡涛, 刘翔宇, 谢谟文, 等. 基于岩质滑坡引发泥石流的影响范围评价模型[J]. *工程地质学报*, 2013, 21(4): 598-606.
- [36] 常鸣, 唐川, 苏永超, 等. 雅鲁藏布江米林段泥石流堆积扇危险范围预测模型[J]. *工程地质学报*, 2012, 20(6): 971-978.
- [37] 刘传正, 刘艳辉. 地质灾害区域预警原理与显式预警系统设计研究[J]. *水文地质工程地质*, 2007, 34(6): 109-115, 125.
- [38] 梁润娥, 李中社, 苗高建, 等. 区域地质灾害气象预警模型研究现状与展望[J]. *安全与环境工程*, 2013, 20(1): 30-35.