

基于 MODIS-EVI 的四川省 2000—2020 年 植被覆盖度地形分异研究*

朱林富¹, 杨华², 谢世友³, 马明国^{3,4}, 夏军¹

1. 乐山师范学院 旅游与地理科学学院, 四川 乐山 614000;
2. 重庆师范大学 长江上游湿地科学研究重庆市重点实验室, 重庆 401331;
3. 西南大学 重庆金佛山喀斯特生态系统教育部野外科学观测研究站;
4. 西南大学 遥感大数据应用重庆市工程研究中心, 重庆 400715)

摘要:【目的】定量分析四川省 2000—2020 年的植被覆盖度地形分异特征,以便从宏观上了解区域植被覆盖变化情况。【方法】借助于 Google Earth Engine 平台,以 MODIS-EVI 和地形地貌数据为基础,运用变异系数和分布指数结合 GIS 空间分析技术对四川省 2000—2020 年的植被覆盖度变化进行分析。【结果】2000—2020 年四川省植被覆盖度波动变化以轻度波动类型为主,然后依次为稳定、中度波动和重度波动类型,它们的占比分别为 55.28%,25.55%,13.96%和 5.21%。在高程小于或等于 1 500 m 和大于 5 500 m,坡度小于或等于 15°,坡向为东北坡、东坡、东南坡和南坡,地貌为台地、丘陵、小起伏和中起伏山地区域,植被覆盖度波动变化以稳定类型分布为主;在高程范围为 >1 500~2 500 m 区域,植被覆盖度波动变化以轻度波动类型分布为主;在高程范围为 >2 500~4 500 m,坡向为西南坡、西坡和西北坡,地貌为大起伏山地区域,植被覆盖度波动变化以中度波动类型分布为主;在高程范围为 >4 500~5 500 m,坡度大于 15°,坡向为平地、北坡,地貌为平原和极大起伏山地区域,植被覆盖度波动变化以重度波动类型分布为主。【结论】2000—2020 年四川省植被覆盖度存在不同程度的波动变化,地形地貌空间分布差异明显;研究结果可为四川省后续的生态植被恢复工作提供参考。

关键词: MODIS; Google Earth Engine; 变异系数; 分布指数; 地形分布; 四川省

中图分类号: X37; P964

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2022)05-0058-11

植被是陆地生态环境的重要组成成分,是连接土壤圈、水圈和大气圈的自然“纽带”,对地表物质循环以及能量交换有着十分重要的作用^[1-2]。四川省地处长江上游,是长江上游的生态屏障,对维持三峡库区和长江下游地区的生态安全和经济发展有着十分重要的意义^[3-5]。随着经济的发展以及人类活动增加,地表的植被覆盖受到严重影响,从而导致了一系列生态环境问题,如水土流失加剧、局部生态环境恶化、自然灾害频发等^[2,5-6]。为了筑牢长江黄河上游生态安全屏障,四川省在“十四五”规划中提出坚持践行“绿水青山就是金山银山”理念,促进经济社会发展全面绿色转型,加强重点生态功能区建设,持续推进高原牧区减畜计划和退化草原生态保护修复,继续实施天然林保护,科学推进荒漠化、石漠化、水土流失综合治理,开展生态状况监测评价^[7]。

植被覆盖度是地表植被覆盖状况的一个综合衡量指标,因对生态环境具有很好的指示作用而被广泛应用于生态环境遥感监测中^[2,5,8]。Google Earth Engine(GEE)是全球尺度遥感数据计算、分析与处理的云平台,可以快速获取全球范围内的卫星数据和地理空间数据,在全球环境遥感监测分析方面具有十分明显的优势^[9-11]。MODIS 是目前世界上新一代“图谱合一”光学遥感仪器,光谱分辨率和时间分辨率高,可以对地表、大气和海洋进行长期全球观测;MODIS 数据能够实时提供地表的植被、水体、温度等特征信息,其地表植被覆盖数据产品主要是归一化植被指数(NDVI)和增强型植被指数(EVI);相比于 NDVI,EVI 对大气和土壤背景进行了校正^[12-13],并改进了合成算法^[13-14],克服了 NDVI 易饱和的问题^[4,14-18]。因此,EVI 不仅能更好地反映高覆盖区域的植被覆

* 收稿日期:2021-11-10 修回日期:2021-12-15 网络出版时间:2022-09-19 13:12

资助项目:国家自然科学基金重点项目(No. 41830648);四川旅游发展研究中心项目(No. LY20-29);四川世界遗产普及基地项目(No. YCKP1903);乐山师范学院科研项目(No. XJR19006)

第一作者简介:朱林富,男,讲师,博士,研究方向为资源环境遥感与 GIS 应用,E-mail:156340810@qq.com;通信作者:杨华,男,副教授,E-mail:csyanghua@263.net

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20220916.1835.029.html

盖状况^[13-14,19],还对低覆盖区域的植被覆盖状况具有更好的区分能力^[13,20-22]。

四川省生态环境异质性高,东西部的地形地貌差异大,植被类型丰富,是全球气候变化的敏感区^[2,23]。目前涉及四川省植被覆盖变化的研究主要集中在NDVI时空变化特征^[3,6,9,23-25]以及植被指数与气候^[1,4,6,8,23-27]、地形^[1,4,28]等地理环境因子的关系上,而选取EVI计算植被覆盖度并采用分布指数来定量分析植被波动变化地形分布特征的研究还比较少^[4-5]。本研究借助GEE平台,以MODIS-EVI数据为基础,采用变异系数和分布指数,并结合GIS技术定量分析了2000—2020年四川省植被覆盖度波动变化地形分布特征,揭示该区域植被覆盖地形变化分布规律,从而有助于从宏观上了解该区域植被覆盖的变化状况,研究结果有望为四川省后续生态植被恢复和持续健康发展提供一定参考。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

四川省地处中国西南部、长江上游地区,地理范围为北纬 $26^{\circ}03' \sim 34^{\circ}19'$ 、东经 $92^{\circ}21' \sim 108^{\circ}12'$,东西长约1 075 km,南北宽约900 km。四川省东连重庆市,西衔西藏自治区,北界陕西、甘肃、青海等3省,南接云南省和贵州省,幅员面积约 $4.86 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。四川省位于青藏高原和长江中下游平原的过渡带,地形地貌复杂多样,东西差异大,高差悬殊。四川省西部以高原和山地为主,海拔多在4 000 m以上;东部以盆地和丘陵为主,海拔多在1 000~3 000 m。全省可分为四川盆地、川西北高原和川西南山地共3部分:1)四川盆地周围主要是秦岭、大巴山、米仓山、龙门山、邛崃山、大娄山等围绕。四川盆地的西部是川西平原,土地肥沃,生产力较高;中部是丘陵,海拔为400~800 m;东部是平行岭谷。四川盆地气候为亚热带湿润季风气候,植被类型主要是亚热带常绿阔叶林。2)川西北高原属于青藏高原东南一隅,海拔多在3 000~5 000 m,气候为高寒气候,植被类型主要是高山草甸。3)川西南山地属于横断山脉北段,山高谷深,主要山脉有岷山、邛崃山、大雪山等,主要水系有岷江、大渡河、雅砻江、金沙江等。该区域气候垂直地带性明显,植被类型主要有亚热带常绿阔叶林、亚热带常绿和落叶混交林、温带针阔混交林、寒带针叶林等。

1.2 数据来源及处理

本研究采用的MODIS-EVI数据来源于GEE云平台。通过GEE平台上传四川省矢量范围,并调用平台中的JavaScript API在线裁剪、重投影和最大值合成2000—2020年MOD13Q1的EVI数据,将处理好的数据导入Google Drive,然后下载到本地根据像元二分模型计算出植被覆盖度,再采用变异系数来判断植被覆盖度波动变化情况,最后运用分布指数来分析植被覆盖波动变化的地形分布特征。

DEM、地貌和植被类型数据均来源于中国科学院资源环境科学与数据中心。DEM数据是根据SRTM V4.1重采样生成的全国一张图数据,采用WGS84椭球投影,包括250,500和1 000 m共3种精度。SRTM数据的优势在于现实性强且免费获取,因而在环境分析中得到了广泛应用。本研究选取250 m分辨率,经裁剪生成四川省DEM数据,并将高程划分为13级;根据林业调查中的坡度和坡向分级标准,将坡度分为6级、坡向分为9类(表1)。地貌数据是1:100万中国地貌类型空间分布数据,全面反映了中国地貌分布规律以及各区域的地貌空间差异,在全国环境保护、区域规划、灾害监测和土地调查等方面得到了广泛的应用。植被类型数据是1:100万中国植被图集,数据包括13个植被大类、58个植被亚类,是研究全球环境变化、环境保护与监测等的重要数据。本研究以四川省矢量范围为掩膜进行裁剪,经过投影转换和重采样为WGS84投影、250 m分辨率的四川省地貌类型和植被类型分布图,将地貌类型划分为平原、台地、丘陵、小起伏山地、中起伏山地、大起伏山地、极大起伏山地等7类,植被类型划分为栽培植被(包含耕地的农作物以及建设用地的绿化植物等)、沼泽、灌丛、草地、林地、高山植被、其他等7类。

2 研究方法

2.1 GEE云平台

GEE云平台是基于云计算的地理空间数据分析、处理的可视化平台,能够提供多尺度、多源的全球遥感影像数据和地理空间数据,包括Landsat、MODIS、Sentinel以及气象、地形等^[10,29],所存储的数据超过了500万张遥感影像,容量高达PB级别,且每日都在更新和增加^[30]。GEE摒弃了传统的遥感影像收集、预处理、信息提取、分

析与应用等模式,而是通过 JavaScript API 和 Python API 基于谷歌云平台和后台处理器分析与处理数据,极大地提升了空间数据分析与处理效率,解决了大尺度研究中的许多难题,如数据收集难、数据量大、数据计算效率低等^[10,29-30]。

表 1 四川省高程、坡度分级和坡向分类

Tab. 1 The classification of the gradient of elevation and slope and the type of aspect of Sichuan province

指标	分级或分类
高程	1. ≤ 500 m; 2. $> 500 \sim 1\ 000$ m; 3. $> 1\ 000 \sim 1\ 500$ m; 4. $> 1\ 500 \sim 2\ 000$ m; 5. $> 2\ 000 \sim 2\ 500$ m; 6. $> 2\ 500 \sim 3\ 000$ m; 7. $> 3\ 000 \sim 3\ 500$ m; 8. $> 3\ 500 \sim 4\ 000$ m; 9. $> 4\ 000 \sim 4\ 500$ m; 10. $> 4\ 500 \sim 5\ 000$ m; 11. $> 5\ 000 \sim 5\ 500$ m; 12. $> 5\ 500 \sim 6\ 000$ m; 13. $> 6\ 000$ m
坡度	1. $\leq 5^\circ$; 2. $> 5^\circ \sim 15^\circ$; 3. $> 15^\circ \sim 25^\circ$; 4. $> 25^\circ \sim 35^\circ$; 5. $> 35^\circ \sim 45^\circ$; 6. $> 45^\circ$
坡向	平地(-1); 北坡($337.5^\circ \sim 22.5^\circ$); 东北坡($> 22.5^\circ \sim 67.5^\circ$); 东坡($> 67.5^\circ \sim 112.5^\circ$); 东南坡($> 112.5^\circ \sim 157.5^\circ$); 南坡($> 157.5^\circ \sim 202.5^\circ$); 西南坡($> 202.5^\circ \sim 247.5^\circ$); 西坡($> 247.5^\circ \sim 292.5^\circ$); 西北坡($> 292.5^\circ \sim 337.5^\circ$)

GEE 云平台的优势在于云端存储数据量大、网页或客户端可视化访问便捷、云端后台计算与分析能力强大等,是全球资源环境遥感监测的先进技术和研究工具,可以为资源和环境的管理提供决策支持^[30]。在大数据和信息化时代,GEE 平台不受空间和时间限制,实现了海量数据的快速、批量化处理,极大方便了广大遥感科研人员监测和量化分析地表环境动态变化^[10,30]。目前,GEE 已经被广泛应用到了地学遥感研究中,如植被、水体、城镇、土地利用变化监测等^[9-11,29-30]。

2.2 像元二分模型

像元二分模型的原理是假设遥感传感器观测到的光谱信息是由植被信息和土壤信息线性加权合成,它们的权重是两者的面积在像元中所占的比例^[31-33]。假设遥感影像中的植被光谱信息(包含了植被的类型、结构等信息)为 I_{veg} ,遥感影像中的土壤背景信息(土壤的类型、颜色、湿度等信息)为 I_{soil} ,某一个像元的植被像元所占比例为植被覆盖度(F),则土壤像元的比例为 $1-F$,植被覆盖度的计算公式^[34]如下:

$$F = \frac{I - I_{soil}}{I_{veg} - I_{soil}}$$

其中: I 为遥感图像像元光谱信息。受大气以及地表环境的影响, I_{veg} 和 I_{soil} 会随着时间和空间的变化而变化,采用固定的 I_{veg} 和 I_{soil} 值显然不合理。本研究选取像元数累积百分比分别为 0.5%,99.5%的像元值为纯土壤、纯植被的像元值。像元二分模型中的各参数具有明确的意义,在很大程度上削弱了植被类型、结构、土壤湿度、颜色以及大气的的影响,且不受地理环境和区域条件的限制,容易推广使用^[30,35]。

2.3 变异系数

变异系数是由标准差与均值的比值计算而来,能够反映一组数据的离散程度,可以消除多个数组之间因单位或平均数不同而导致的对数组的波动比较的影响,是衡量数据波动程度的统计量^[36]。变异系数越小,说明数据分布越集中,表示植被覆盖度随时间的变化波动越小、稳定性越好;反之则说明数据分布越离散,表示植被覆盖度随时间变化波动越大、稳定性越差。本研究中,将植被覆盖度波动类型分为 4 类:稳定(变异系数小于或等于 0.1)、轻度波动(变异系数范围为 $> 0.1 \sim 0.2$)、中度波动(变异系数范围为 $> 0.2 \sim 0.3$)和重度波动(变异系数大于 0.3)。

2.4 分布指数

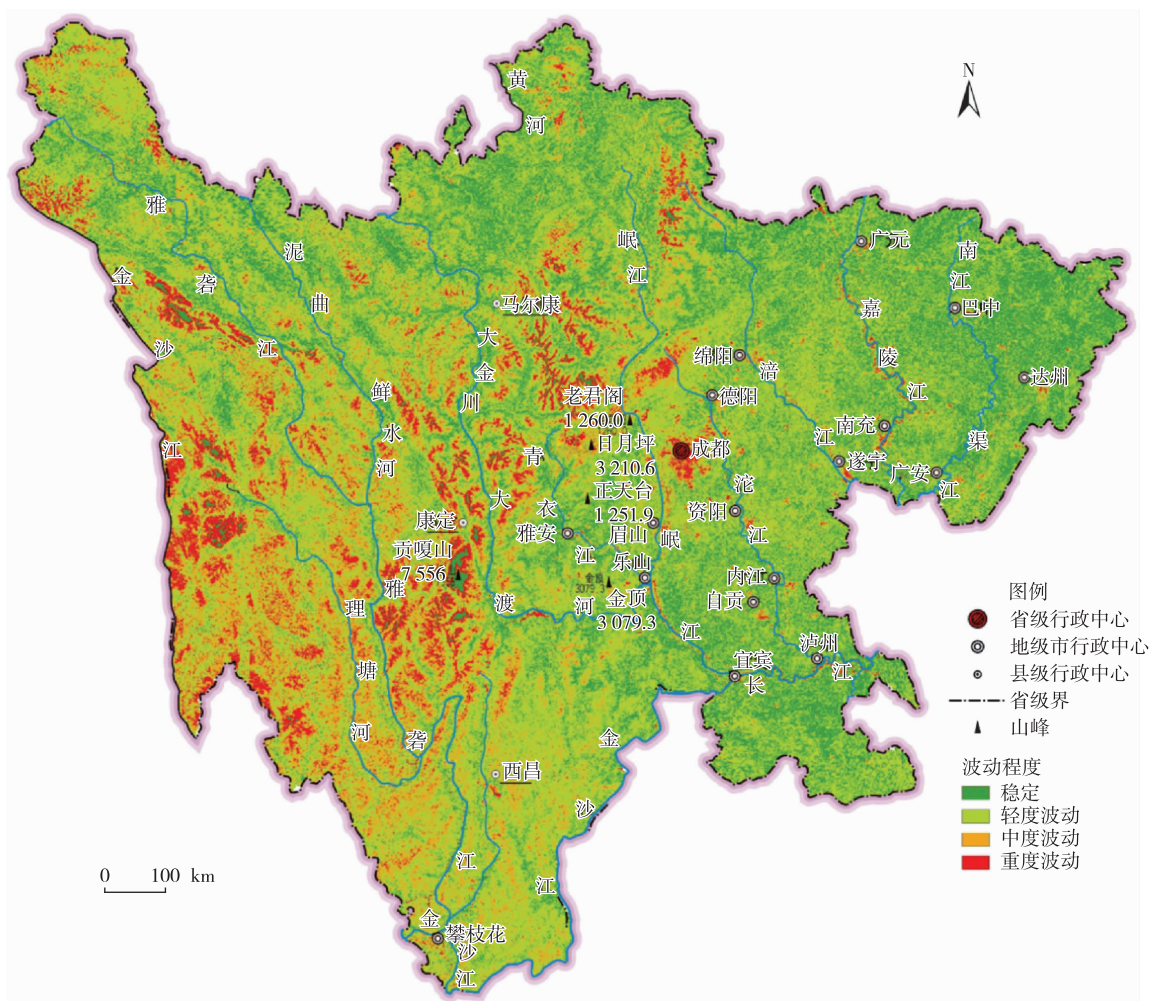
植被覆盖度的变化在不同的地形地貌下差异明显。在进行植被覆盖度变化地形分布特征评价时,某一变化类型在某特定地形条件下面积虽然较小,但相比于该变化类型在整个研究区域的比例却较大,从而增加了植被覆盖度变化地形分布特征评价中的不合理性或不确定性^[37-38]。为了消除因分类或分级而产生的绝对面积差异对结果评价的干扰,本研究采用分布指数(D)^[38-40]来定量评价植被覆盖度波动变化的地形分布特征,该指标计算公式如下:

$$D = \frac{S_{ie}}{S_e} \times \frac{S}{S_i}$$

其中: S_{ie} 表示第 i 类植被覆盖度波动类型在第 e 类地形地貌条件下的面积, S_i 表示第 i 类植被覆盖度波动类型的总面积, S_e 表示第 e 类地形地貌的总面积, S 表示整个研究区总面积。当 $D > 1$ 时,表示第 i 类植被覆盖度波动类型在第 e 类地形地貌条件呈优势分布, D 值越大表示优势越明显;当 $D = 1$ 时,表示第 i 类植被覆盖度波动类型在第 e 类地形地貌条件处于平稳状态;当 $D < 1$ 时,表示第 i 类植被覆盖度波动类型在第 e 类地形地貌条件为劣势分布, D 值越小表示分布越弱^[41-42]。

3 结果与分析

研究结果显示,2000—2020 年四川省植被覆盖度波动变化以轻度波动类型为主(占比为 55.28%),稳定类型次之(占比为 25.55%),中度波动类型第三(占比为 13.96%),重度波动类型最低(占比为 5.21%)(图 1)。稳定类型主要分布在栽培植被以及积雪覆盖区域,轻度波动类型主要分布在林地及沼泽区域,中度波动类型主要分布在灌丛和高山植被区域,重度波动类型主要分布在城市、水系以及高山植被区域。由此可知,2000—2020 年四川省植被覆盖度总体上波动较小,但在灌丛和高山植被区域波动较大。



注:底图来源于自然资源部网站标准地图服务系统,审图号:GS(2019)3333 号

图 1 2000—2020 年四川省植被覆盖度波动变化空间分布

Fig. 1 The spatial distribution of the fluctuation of vegetation coverage in Sichuan province from 2000 to 2020

3.1 高程分布

图 2a 显示,在不同的高程区域,植被覆盖度波动变化分布优势差异明显。稳定类型优势分布区域为 1~3 级 (≤ 1500 m) 和 11~13 级 (> 5000 m),轻度波动类型分布优势区域为 3~9 级 ($> 1000 \sim 4500$ m),中度波动类型分布优势区域为 6~10 级 ($> 2500 \sim 5000$ m),重度波动类型分布优势区域为 9~11 级 ($> 4000 \sim 5500$ m)。从图 2a 可知,在 1~3 级和 12,13 级区域,植被覆盖度波动变化以稳定类型为主;在 4,5 级 ($> 1500 \sim 2500$ m)

区域,植被覆盖度波动变化以轻度波动类型为主;在 6~9 级(>2 500~4 500 m)区域,植被覆盖度波动变化以中度波动类型为主;在 10,11 级区域(>4 500~5 500 m)区域,植被覆盖度波动变化以重度波动类型为主。

从图 2b 可知,随着高程的变化,稳定类型比例先降低后升高,轻度、中度和重度波动类型均先升高后降低。稳定类型在 13 级(>6 000 m)区域占比最高,达 100%;轻度波动类型在 5 级(>2 000~2 500 m)区域占比最高,为 70.21%;中度波动类型在 10 级(>4 500~5 000 m)区域比例最高,为 27.57%;重度波动类型在 11 级(>5 000~5 500 m)区域比例最高,为 50.03%。

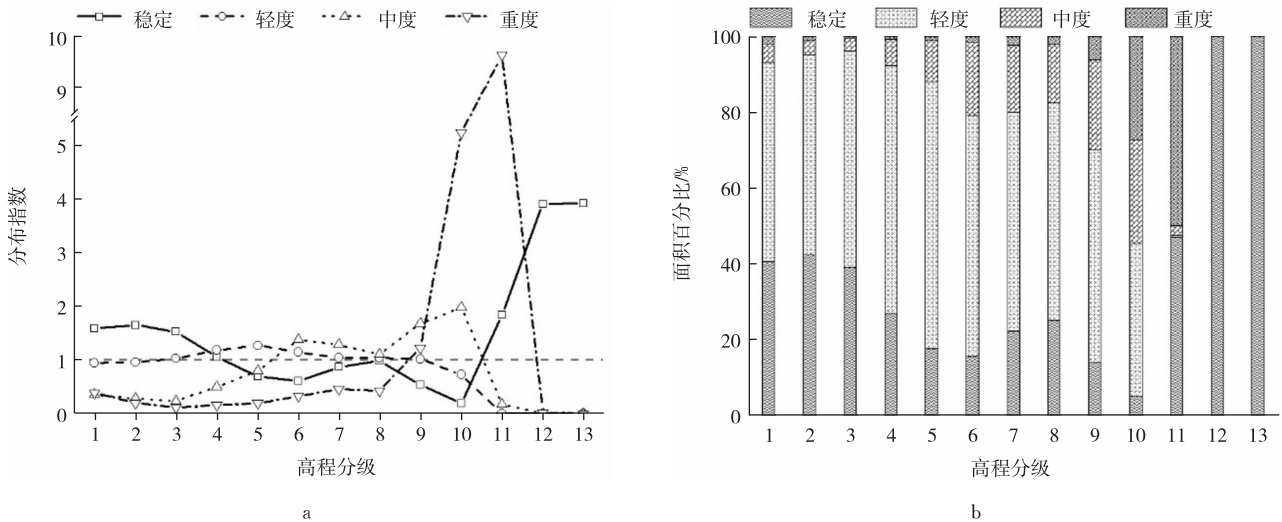


图 2 2000—2020 年四川省植被覆盖度波动变化的高程分布

Fig. 2 The spatial distribution of vegetation coverage fluctuation depending on elevation in Sichuan province from 2000 to 2020

综上可知,2000—2020 年四川省植被覆盖度波动变化受高程影响明显。在 1~3 级和 12,13 级区域,稳定类型分布优势明显,其中 1~3 级主要是栽培植被,12,13 级主要是积雪覆盖区域;在 4,5 级区域,轻度波动类型分布优势明显,此区域以林地为主;在 6~9 级区域,中度波动类型分布优势明显,此区域以灌丛为主;在 10,11 级区域,重度波动类型分布优势明显,此区域以草地为主。

3.2 坡度分布

在不同的坡度区域,植被覆盖度波动变化分布差异明显(图 3a)。稳定类型优势分布区域为 1,2 级(≤15°),轻度波动类型优势分布区域为 1 级(≤5°),中度和重度波动类型优势分布区域均为 3~6 级(>15°)。从图 3a 可知,在 1,2 级(≤15°)区域,植被覆盖度波动变化以稳定类型为主;在 3~6 级(>15°)区域,植被覆盖度波动变化以重度波动类型为主。

从图 3b 可知,随着坡度的变化,稳定和轻度波动类型占比逐渐降低,中度和重度波动类型占比逐渐升高。稳定和轻度波动类型在 1 级(≤5°)区域占比最高,分别为 32.34%和 56.08%;中度波动类型在 5 级(>35°~45°)区域占比最高,为 19.20%;重度波动类型在 6 级(>45°)区域占比最高,为 7.82%。

综上可知,2000—2020 年四川省植被覆盖度波动变化受坡度影响明显。在 1,2 级区域,稳定类型分布优势明显,此区域以栽培植被和草地为主;在 3~6 级区域,重度波动类型分布优势明显,此区域以灌丛和林地为主。

3.3 坡向分布

在不同坡向区域,植被覆盖度波动变化分布存在差异(图 4a)。稳定类型优势分布区域为东北坡、东坡、东南坡和南坡,轻度波动类型优势分布区域为平地、北坡、西坡和西北坡,中度和重度波动类型优势分布区域为平地、北坡、西南坡、西坡和西北坡。从图 4a 可知,在平地和北坡区域,植被覆盖度波动变化以重度波动类型为主;在东北坡、东坡、东南坡和南坡区域,植被覆盖度波动变化以稳定类型为主;在西南坡、西坡和西北坡区域,植被覆盖度波动变化以中度波动类型为主。

从图 4b 可知,随着坡向的变化,稳定类型占比先升高后降低,轻度、中度和重度波动类型占比先降低后升高。稳定类型在东南坡区域比例最高,为 28.65%;轻度波动类型在西北坡区域比例最高,为 56.58%;中度和重

度波动类型在平地区域比例最高,分别为 16.39%和 8.63%。

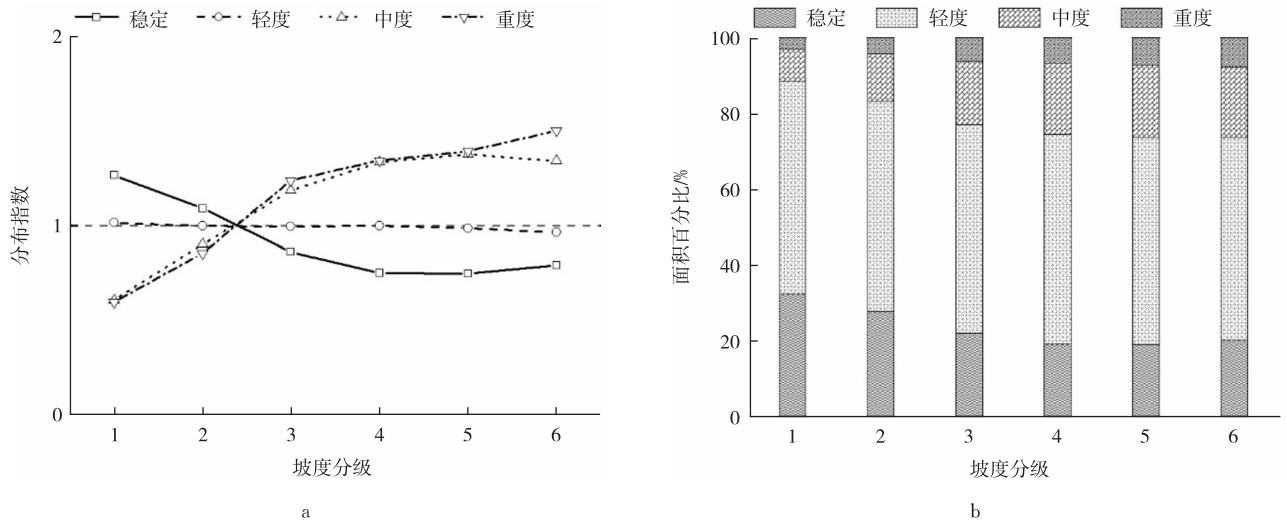


图 3 2000—2020 年四川省植被覆盖度波动变化的坡度分布

Fig. 3 The spatial distribution of vegetation coverage fluctuation depending on slope in Sichuan province from 2000 to 2020

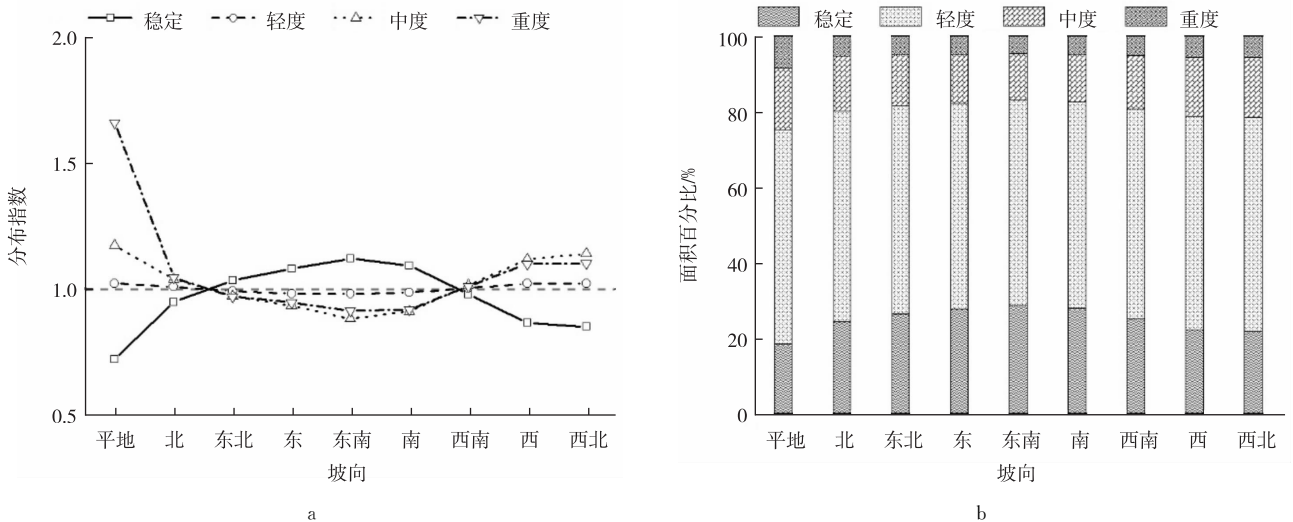


图 4 2000—2020 年四川省植被覆盖度波动变化的坡向分布

Fig. 4 The spatial distribution of vegetation coverage fluctuation depending on aspect in Sichuan province from 2000 to 2020

综上所述,2000—2020 年四川省植被覆盖度波动变化在坡向上的分布特征为:在平地 and 北坡区域,重度波动类型分布优势明显,此区域以栽培植被和林地为主;在东北坡、东坡、东南坡和南坡区域,稳定类型分布优势明显,此区域以栽培植被和高山植被为主;在西南坡、西坡和西北坡区域,中度波动类型分布优势明显,此区域以灌丛和草地为主。

3.4 地貌分布

在不同的地貌区域,植被覆盖度波动变化优势分布差异明显(图 5a)。稳定类型优势分布区域为台地、丘陵、小起伏和中起伏山地,轻度波动类型优势分布区域为平原、台地和中起伏山地,中度波动类型优势分布区域为大起伏和极大起伏山地,重度波动类型优势分布区域为平原、大起伏和极大起伏山地。图 5a 显示:在平原和极大起伏山地区域,植被覆盖度波动变化以重度波动类型为主;在台地、丘陵、小起伏和中起伏山地区域,植被覆盖度波动变化以稳定类型为主;在大起伏山地区域,植被覆盖度波动变化以中度波动类型为主。

从图 5b 可知,随着地貌的变化,稳定类型和轻度波动类型占比先升高后降低,中度和重度波动类型占比先降低后升高。稳定类型在丘陵地区占比最高,为 40.50%;轻度波动类型在中起伏山地区域占比最高,为

59.76%；中度和重度波动类型在极大起伏山地区域占比最高，分别为 30.13% 和 40.76%。

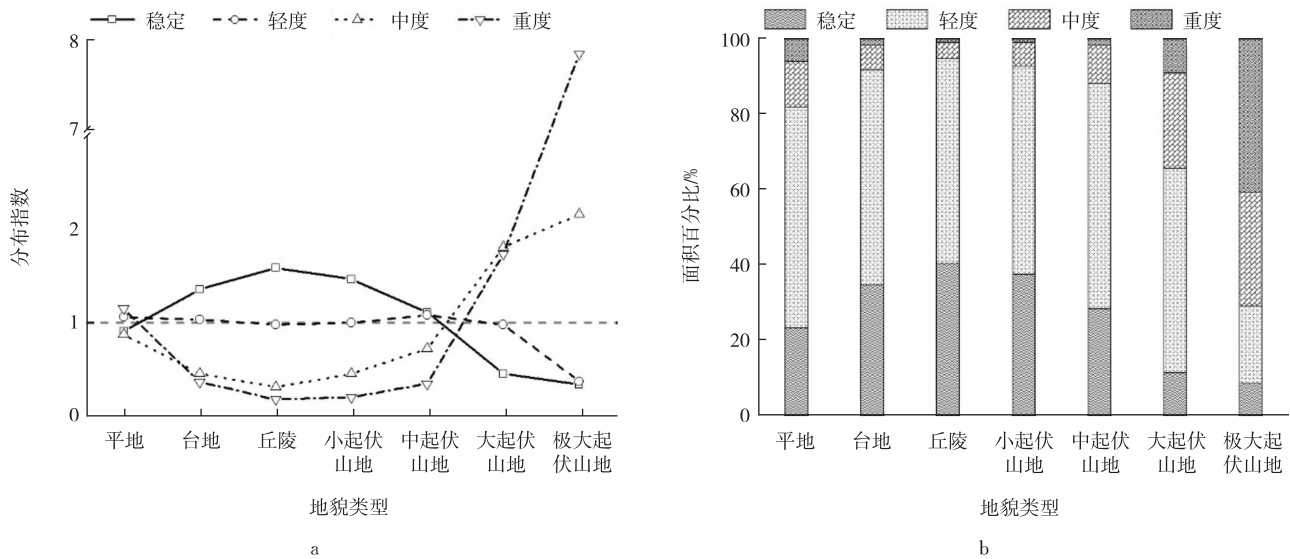


图 5 2000—2020 年四川省植被覆盖度波动变化的地貌分布

Fig. 5 The spatial distribution of vegetation coverage fluctuation depending on landform in Sichuan province from 2000 to 2020

综上所述,2000—2020 年四川省植被覆盖度波动变化在地貌上的分布特征为:在平原和极大起伏山地区域,重度波动类型分布优势明显,此区域主要是栽培植被和高山植被;在台地、丘陵、小起伏和中起伏山地区域,稳定类型分布优势明显,此区域主要是栽培植被和草地;在大起伏山地区域,中度波动类型分布优势明显,此区域主要是灌丛和林地。

4 结论与讨论

本研究利用 2000—2020 年四川省的 MODIS-EVI 数据,结合地形地貌数据,采用分布指数定量分析了四川省在上述时期的植被覆盖度波动变化的地形地貌分布特征,主要结果如下:

1) 植被覆盖波动变化以轻度波动类型为主,然后依次为稳定、中度波动和重度波动类型,占比分别为 55.28%,25.55%,13.96% 和 5.21%。

2) 植被覆盖度波动变化在高程上的分布特征为:在高程小于或等于 1 500 m 和大于 5 500 m 区域,稳定类型分布优势明显;在高程范围为 $>1\ 500\sim 2\ 500$ m 区域,轻度波动类型分布优势明显;在高程范围为 $>2\ 500\sim 4\ 500$ m 区域,中度波动类型分布优势明显;在高程范围为 $>4\ 500\sim 5\ 500$ m 区域,重度波动类型分布优势明显。

3) 植被覆盖度波动变化在坡度上的分布特征为:在坡度小于或等于 5° 区域,稳定类型分布优势明显;在坡度大于 15° 区域,重度波动类型分布优势明显。

4) 植被覆盖度波动变化在坡向上的分布特征为:在平地 and 北坡区域,重度波动类型分布优势明显;东北坡、东坡、东南坡 and 南坡区域,稳定类型分布优势明显;西南坡、西坡 and 西北坡区域,中度波动类型分布优势明显。

5) 植被覆盖度波动变化在地貌上的分布特征为:在平原和极大起伏山地区域,重度波动类型分布优势明显;台地、丘陵、小起伏和中起伏山地区域,稳定类型分布优势明显;大起伏山地区域,中度波动类型分布优势明显。

由上述结果不难发现,2000—2020 年四川省植被覆盖度轻度波动变化面积占比在大多数区域大于其他变化类型,但仅在高程范围为 $>1\ 500\sim 2\ 500$ m 区域占优势;稳定类型、中度波动类型和重度波动类型在面积占比上均比较小,但均有各自的优势分布区域。这说明单纯根据面积大小或占比大小来分析或判断植被覆盖度变化的优势类型存在较大的片面性或不确定性。分布指数是一个标准化的无量纲数据,不仅能够避免因分类或分级造成的绝对面积差异对结果评价的影响,还能够根据分布指数大小进行不同类型分布优势大小的对比分析。

在分析植被覆盖度变化原因时,本研究参考了四川省的植被类型分布图,并进行了叠加分析。在不同的地形地貌条件下,四川省植被覆盖度波动变化在植被类型上的差异较大,例如:植被覆盖度重度波动变化在高程分

布中以草地为主,在坡度分布中以灌丛和草地为主,在坡向分布中以栽培植被和林地为主,在地貌分布中以栽培植被和高山植被为主。这说明植被覆盖度波动变化具有很强的地形地貌分布特征,在进行植被覆盖变化分析中要特别注意。同时,在海拔高、坡度大、起伏度大的区域,植被覆盖度的中度、重度波动变化较为突出,说明在这些区域内植被覆盖极不稳定,在后期的生态保护与恢复工作中应予以重视和关注。

受诸多条件限制,本研究仅仅分析了地形地貌因素对植被覆盖度波动变化的影响。然而,引起植被覆盖变化的原因众多,机制复杂,因此还需要在后续研究中不断探索多源长时间序列数据的融合与分析,从而进一步加深对相关问题的认识。

参考文献:

- [1] 彭文甫,张冬梅,罗艳玫,等.自然因子对四川植被NDVI变化的地理探测[J].地理学报,2019,74(9):1758-1776.
PENG W F,ZHANG D M,LUO Y M,et al. Influence of natural factors on vegetation NDVI using geographical detection in Sichuan province[J]. Acta Geographica Sinica,2019,74(9):1758-1776.
- [2] 李美丽,尹礼昌,张园,等.基于MODIS-EVI的西南地区植被覆盖时空变化及驱动因素研究[J].生态学报,2021,41(3):1138-1147.
LI M L,YIN L C,ZHANG Y,et al. Spatio-temporal dynamics of fractional vegetation coverage based on MODIS-EVI and its driving factors in southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica,2021,41(3):1138-1147.
- [3] 杨承建,赵梓健,任小兰,等.基于遥感和GIS的川西绿被时空变化研究[J].生态学报,2012,32(2):632-640.
YANG C J,ZHAO Z J,REN X L,et al. The analysis of the green vegetation cover change in western Sichuan based on GIS and Remote sensing[J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(2):632-640.
- [4] 荣欣,易桂花,张廷斌,等.2000—2015年川西高原植被EVI海拔梯度变化及其对气候变化的响应[J].长江流域资源与环境,2019,28(12):3014-3028.
RONG X,YI G H,ZHANG T B,et al. Change of vegetation EVI with altitude gradient and its response to climate change in the western Sichuan plateau from 2000 to 2015[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2019,28(12):3014-3028.
- [5] 伍宜丹,马悦,吴浩然,等.基于MODIS-EVI指数的四川省植被指数时空演变特征及驱动力[J].水土保持研究,2020,27(5):230-236.
WU Y D,MA Y,WU H R,et al. Characteristics of temporal and spatial evolution and driving forces of vegetation index in Sichuan based on MODIS-EVI[J]. Research of Soil and Water Conservation,2020,27(5):230-236.
- [6] 周金霖,马明国,肖青,等.西南地区植被覆盖动态及其与气候因子的关系[J].遥感技术与应用,2017,32(5):966-972.
ZHOU J L,MA M G,XIAO Q,et al. Vegetation dynamics and its relationship with climatic factors in southwestern China[J]. Remote Sensing Technology and Application,2017,32(5):966-972.
- [7] 四川省人民政府.四川省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要[EB/OL].(2021-03-16)[2021-11-10].<http://www.sc.gov.cn/10462/10464/10797/2021/3/16/2c8e39641f08499487a9e958384f2278.shtml>.
The People's Government of Sichuan Province. The outline of the 14th five-year plan for economic and social development and long-range objectives through the year 2035 of Sichuan province[EB/OL].(2021-03-16)[2021-11-10].<http://www.sc.gov.cn/10462/10464/10797/2021/3/16/2c8e39641f08499487a9e958384f2278.shtml>.
- [8] 王静,万红莲,姚顺波.生长季川陕不同地带植被覆盖对气候变化的时空响应[J].生态学报,2019,39(14):5218-5231.
WANG J,WAN H L,YAO S B. Spatial and temporal response of vegetation cover to climate change in different zones of Sichuan-Shaanxi area during growing season[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(14):5218-5231.
- [9] 冯李,胡文英,李应鑫,等.Google Earth Engine在四川省多年植被覆盖度动态监测中的应用[J].林业资源管理,2019(4):124-131.
FENG L,HU W Y,LI Y X,et al. Dynamic monitoring of multi-year vegetation coverage in Sichuan province based on Google Earth Engines[J]. Forest Resources Management,2019(4):124-131.
- [10] 胡克宏,张震,郜敏,等.中国丝绸之路经济带沿线植被覆盖变化及自然影响因素分析[J].农业工程学报,2020,36(17):149-157.
HU K H,ZHANG Z,GAO M,et al. Variations in vegetation cover and natural factors of provinces in China along silk road economic belt during 2000—2018[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2020,36(17):149-157.
- [11] ALENCAR A,Z SHIMBO J,LENTI F,et al. Mapping three decades of changes in the Brazilian savanna native vegetation using Landsat data processed in the google earth engine platform[J/OL]. Remote Sensing,2020,12(6):924. [2021-11-10]. <https://>

www.mdpi.com/2072-4292/12/6/924/htm.

- [12] QIU B W, ZENG C Y, TANG Z H, et al. Characterizing spatiotemporal non-stationarity in vegetation dynamics in China using MODIS EVI dataset[J]. *Environmental monitoring and assessment*, 2013, 185(11): 9019-9035.
- [13] 王正兴, 刘闯, 陈文波, 等. MODIS 增强型植被指数 EVI 与 NDVI 初步比较[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2006, 31(5): 407-410.
WANG Z X, LIU C, CHEN W B, et al. Preliminary comparison of MODIS-NDVI and MODIS-EVI in eastern Asia[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(5): 407-410.
- [14] 李文梅, 覃志豪, 李文娟, 等. MODIS NDVI 与 MODIS EVI 的比较分析[J]. *遥感信息*, 2010, 25(6): 73-78.
LI W M, QIN Z H, LI W J, et al. Comparison and analysis of MODIS NDVI and MODIS EVI[J]. *Remote Sensing Information*, 2010, 25(6): 73-78.
- [15] JAFARI R, BASHARI H, TARKESH M. Discriminating and monitoring rangeland condition classes with MODIS NDVI and EVI indices in Iranian arid and semi-arid lands[J]. *Arid Land Research and Management*, 2017, 31(1): 94-110.
- [16] ZOUNGRANA B J B, CONRAD C, AMEKUDZI L K, et al. Land use/cover response to rainfall variability: a comparing analysis between NDVI and EVI in the Southwest of Burkina Faso[J]. *Climate*, 2014, 3(1): 63-77.
- [17] ALADEMOMI A S, OKOLIE C J, DARAMOLA O E, et al. Assessing the relationship of LST, NDVI and EVI with land cover changes in the Lagos Lagoon environment[J]. *Quaestiones Geographicae*, 2020, 39(3): 87-109.
- [18] 李红军, 郑力, 雷玉平, 等. 基于 EOS/MODIS 数据的 NDVI 与 EVI 比较研究[J]. *地理科学进展*, 2007, 26(1): 26-32.
LI H J, ZHENG L, LEI Y P, et al. Comparison of NDVI and EVI based on EOS/MODIS data[J]. *Progress in Geography*, 2007, 26(1): 26-32.
- [19] 王正兴, 刘闯, HUETE Alfredo. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI[J]. *生态学报*, 2003, 23(5): 979-987.
WANG Z X, LIU C, HUETE A. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: advances in vegetation index research[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 979-987.
- [20] 陈燕丽, 罗永明, 莫伟华, 等. MODIS NDVI 与 MODIS EVI 对气候因子响应差异[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(10): 1802-1812.
CHEN Y L, LUO Y M, MO W H, et al. Differences between MODIS NDVI and MODIS EVI in response to climatic factors[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(10): 1802-1812.
- [21] WARDLOW B D, EGBERT S L. A comparison of MODIS 250-m EVI and NDVI data for crop mapping: a case study for southwest Kansas[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(3): 805-830.
- [22] 左丽君, 张增祥, 董婷婷, 等. MODIS/NDVI 和 MODIS/EVI 在耕地信息提取中的应用及对比分析[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(3): 167-172.
ZUO L J, ZHANG Z X, DONG T T, et al. Application of MODIS/NDVI and MODIS EVI to extracting the information of cultivated land and comparison analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(3): 167-172.
- [23] 伍良旭, 王晗, 邵怀勇, 等. 川西高原植被时空格局及其对气候变化的响应[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(1): 171-178.
WU L X, WANG H, SHAO H Y, et al. Spatiotemporal pattern of vegetation and its response to climate change in the western Sichuan plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(1): 171-178.
- [24] 冯磊, 杨东, 黄悦悦. 2000—2017 年川渝地区植被 NDVI 特征及其对极端气候的响应[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(7): 2316-2326.
FENG L, YANG D, HUANG Y Y. Vegetation NDVI characteristics and response to extreme climate in Sichuan and Chongqing from 2000 to 2017[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(7): 2316-2326.
- [25] 张勃, 王东, 王桂钢, 等. 西南地区近 14 a 植被覆盖变化及其与气候因子的关系[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(6): 956-964.
ZHANG B, WANG D, WANG G G, et al. Vegetation cover change over the southwest China and its relation to climatic factors[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(6): 956-964.
- [26] LI P, HE Z, HE D, et al. Fractional vegetation coverage response to climatic factors based on grey relational analysis during the 2000—2017 growing season in Sichuan province, China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(3): 1170-1190.
- [27] 张国斌, 张勃, 王东, 等. 近 14 年西南地区植被季节变化及与气候关系[J]. *遥感信息*, 2016, 31(1): 89-95.
ZAHNG G B, ZHANG B, WANG D, et al. Seasonal changes of vegetation in southwestern China and its relation to climate factors in recent 14 years[J]. *Remote Sensing Information*, 2016, 31(1): 89-95.
- [28] 陈瑶, 胥晓, 张德然, 等. 四川龙门山西北部植被分布与地形因子的相关性[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(9): 1052-1055.
CHEN Y, XU X, ZHANG D R, et al. Correlations between vegetation distribution and topographical factors in the northwest of

- Longmen Mountain, Sichuan province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(9): 1052-1055.
- [29] 娄佩卿, 付波霖, 林星辰, 等. 基于 GEE 的 1998—2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(12): 5473-5483.
- LOU P Q, FU B L, LIN X C, et al. Influence of land use change on ecosystem service value based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 1998 to 2018[J]. Environmental Science, 2019, 40(12): 5473-5483.
- [30] 郝斌飞, 韩旭军, 马明国, 等. Google Earth Engine 在地球科学与环境科学中的应用研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(4): 600-611.
- HAO B F, HAN X J, MA M G, et al. Research progress on the application of Google Earth Engine in geoscience and environmental sciences[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(4): 600-611.
- [31] 赵丽苹. 基于 MODIS 数据的喀斯特地区石漠化时空演变特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- Zhao L P. Study on developmental characteristics of the karst rocky desertification based on MODIS[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.
- [32] FERNÁNDEZ-GUISURAGA J M, CALVO L, SUÁREZ-SEOANE S. Comparison of pixel unmixing models in the evaluation of post-fire forest resilience based on temporal series of satellite imagery at moderate and very high spatial resolution[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 164: 217-228.
- [33] 魏石磊, 翟亮, 桑会勇, 等. 像元分解模型的植被覆盖度遥感估算[J]. 测绘科学, 2016, 41(1): 139-143.
- WEI S L, ZHAI L, SANG H Y, et al. Remote sensing estimation of vegetation coverage based on sub-pixel analysis model[J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, 41(1): 139-143.
- [34] 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.
- LI M M, WU B F, YAN C Z, et al. Estimation of vegetation fraction in the upper basin of Miyun reservoir by remote sensing[J]. Resources Science, 2004, 26(4): 153-159.
- [35] 贾坤, 姚云军, 魏香琴, 等. 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, et al. A review on fractional vegetation cover estimation using remote sensing[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(7): 774-782.
- [36] 闫峰, 吴波, 王艳姣. 2000—2011 年毛乌素沙地植被生长状况时空变化特征[J]. 地理科学, 2013, 33(5): 602-608.
- YAN F, WU B, WANG Y J. Spatial and temporal variations of vegetation growth status in Mu Us sandy land in 2000—2011[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(5): 602-608.
- [37] 童晓伟, 王克林, 岳跃民, 等. 桂西北喀斯特区域植被变化趋势及其对气候和地形的响应[J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3425-3434.
- TONG X W, WANG K L, YUE Y M, et al. Trends in vegetation and their responses to climate and topography in northwest Guangxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(12): 3425-3434.
- [38] 马士彬, 张勇荣, 安裕伦. 山区城市土地利用动态空间分布特征: 以贵州省六盘水市为例[J]. 自然资源学报, 2012, 27(3): 489-496.
- MA S B, ZHANG Y R, AN Y L. Spatial pattern of urban land use in the mountain area: a case study of Liupanshui in Guizhou province[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(3): 489-496.
- [39] 陈利顶, 杨爽, 冯晓明. 土地利用变化的地形梯度特征与空间扩展: 以北京市海淀区和延庆县为例[J]. 地理研究, 2008, 27(6): 1225-1234.
- CHEN L D, YANG S, FENG X M. Land use change characteristics along the terrain gradient and the spatial expanding analysis: a case study of Haidian district and Yanqing county, Beijing[J]. Geographical Research, 2008, 27(6): 1225-1234.
- [40] 喻红, 曾辉, 江子瀛. 快速城市化地区景观组分在地形梯度上的分布特征研究[J]. 地理科学, 2001, 21(1): 64-69.
- YU H, ZENG H, JIANG Z Y. Study on distribution characteristics of landscape elements along the terrain gradient[J]. Scientia Geographica Sinica, 2001, 21(1): 64-69.
- [41] 王权, 李阳兵, 刘亚香, 等. 基于地形梯度的岩溶槽谷区土地利用空间格局分析[J]. 生态学报, 2019, 39(21): 7866-7880.
- WANG Q, LI Y B, LIU Y X, et al. Analysis spatial pattern of land use based on terrain gradient in karst trough valley area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21): 7866-7880.
- [42] 简萍, 李阳兵, 王权. 基于地形梯度的典型峰丛洼地区土地利用空间分布格局分析[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(5): 1128-1139.
- JIAN P, LI Y B, WANG Q. Analysis of the spatial distribution pattern of land use in typical peak-cluster depression areas based on Terrain gradient[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(5): 1128-1139.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area**Research on the Topographic Variability of Vegetation Coverage in Sichuan Province Based on MODIS-EVI from 2000 to 2020**ZHU Linfu¹, YANG Hua², XIE Shiyu³, MA Mingguo^{3,4}, XIA Jun¹

(1. College of Tourism and Geographical Science, Leshan Normal University, Leshan Sichuan 614000; 2. Chongqing Key Laboratory of Wetland Science Research of the Upper Yangtze River, Chongqing Normal University, Chongqing 401331; 3. Chongqing Jinpo Mountain Field Scientific Observation and Research Station for Karst Ecosystem, Ministry of Education, Southwest University; 4. Chongqing Engineering Research Center for Remote Sensing Big Data, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: [Purposes]Quantitatively analyze the topographic variability of vegetation coverage in Sichuan province from 2000 to 2020, and understand the changes in vegetation coverage from a macro perspective. [Methods]Based on the MODIS-EVI and topography data, it analyzed the variability of vegetation coverage in Sichuan province from 2000 to 2020 by using the Google Earth Engine platform combined with the GIS spatial technology, the coefficient of variation and the distribution index. [Findings]From 2000 to 2020, the fluctuation of vegetation coverage in Sichuan province was dominated by mild fluctuation types, followed by stable, moderate fluctuation and severe fluctuation types, and their proportions were 55.28%, 25.55%, 13.96% and 5.21%, respectively. The types of vegetation stable were mainly distributed in the areas where the elevations were less than or equal to 1 500 m and greater than 5 500 m, slopes less than or equal to 15°, northeast aspects, east aspects, southeast aspects, south aspects, terraces, hills, small undulating mountains and moderately undulating mountains. The types of vegetation mild fluctuations were mainly distributed in the areas where the elevations were between 1 500 m and 2 500 m. The types of vegetation moderate fluctuations were mainly distributed in the areas where the elevations were between 2 500 m and 4 500 m, southwest aspects, west aspects, northwest aspects and large undulating mountains. The types of vegetation severe fluctuations were mainly distributed in the areas where the elevations were between 4 500 m and 5 500 m, slopes greater than 15°, flat, northern aspects, plains and extremely large undulating mountains. [Conclusions]From 2000 to 2020, the vegetation coverage in Sichuan Province had fluctuated to varying degrees, and the spatial distribution of topography and landforms was significantly different. The research results can provide reference for the follow-up ecological vegetation restoration work in Sichuan province.

Keywords: MODIS; Google Earth Engine; coefficient of variation; distribution index; topographical distribution; Sichuan province

(责任编辑 方 兴)