

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.09.013

基于 MODIS-EVI 的四川植被覆盖地形分布特征

朱林富¹, 谢世友², 杨华³, 马明国^{2,4}, 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. 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, 重庆 400715;
3. 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;
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: 借助 Google Earth Engine 平台, 以 MODIS-EVI 数据为基础, 运用 GIS 技术结合像元二分模型和分布指数定量分析四川省近 20 年来的植被覆盖地形分布特征。结果表明: ① 2000—2019 年四川植被覆盖度以中覆盖度为主(64.56%), 低覆盖度次之(17.04%), 高覆盖度第三(13.59%), 劣覆盖度第四(4.03%), 无植被覆盖仅占 0.78%; ② 无植被覆盖和劣覆盖度主要分布在高程 > 4 500 m、坡度 > 15°、北坡、东北坡、西南坡和大起伏、极大起伏山地区域; ③ 低覆盖度主要分布在高程 3 000~4 500 m、西坡和西北坡区域; ④ 中覆盖度主要分布在高程 ≤ 1 000 m、坡度 ≤ 15°、台地、丘陵和小起伏山地区域; ⑤ 高覆盖度主要分布在高程 1 000~3 000 m、平地、东坡、东南坡、南坡和平原、中起伏山地区域。

关键词: 中分辨率成像光谱仪; 植被覆盖度; 分布指数;
地形分布

中图分类号: P942; Q948

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2022)09-0122-11

Topographic Distribution Characteristics of Fractional Vegetation Coverage Based on MODIS-EVI in Sichuan

ZHU Linfu¹, XIE Shiyu², YANG Hua³, MA Mingguo^{2,4}, XIA Jun¹

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

Abstract: Based on the MODIS-EVI, this article uses the Google Earth Engine remote sensing big data

收稿日期: 2021-11-23

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41830648); 四川旅游发展研究中心项目(LY20-29); 四川世界遗产普及基地项目(YCKP1903); 乐山师范学院科研项目(XJR19006)。

作者简介: 朱林富, 博士, 讲师, 主要从事资源环境遥感与 GIS 应用研究。

cloud computing platform analyzing the topographical distribution characteristics of fractional vegetation coverage in Sichuan in the past 20 years with the GIS and Dimidiate Pixel Model and Distribution Index. The results indicated that, from 2000 to 2019, the vegetation coverage was mainly medium coverage (64.56%), followed in the order of low coverage (17.04%), high coverage (13.59%), and poor coverage (4.03%), and free coverage only accounted for 0.78%. Free coverage and poor coverage were mainly distributed in the areas with elevations greater than 4 500 m, slopes greater than 15°, north slopes, northeast slopes, southwest slopes, large and extremely undulating mountains. The low coverage was mainly distributed in the areas with elevations between 3 000 m and 4 500 m, west slopes and northwest slopes. The medium coverage was mainly distributed in the areas with elevations less than 1 000 m, slopes less than 15°, terraces, hills and small undulating mountains. The high coverage was mainly distributed in the areas with elevations between 1 000 m and 3 000 m, flats, east slopes, southeast slopes, south slopes and plains, and medium undulating mountains.

Key words: MODIS; fractional vegetation coverage; distribution index; topographical distribution

植被是陆地生态环境的重要组成部分,在地表物质循环和能量交换中扮演着重要的角色,是连接土壤、大气和水分的自然“纽带”^[1-2].四川是长江上游生态屏障的主体,对三峡库区及长江下游地区的经济发展和生态安全起着十分重要的作用^[3-5].长期以来,随着人口的增长和经济的发展,资源的不合理利用、毁林开垦、过度放牧等造成地表植被破坏严重,从而导致水土流失、局部生态环境恶化、自然灾害频发^[2, 5-8].党的十八大以来,四川省认真贯彻国家关于加强生态环境保护的指示,为实现生态优先绿色发展,积极稳步推进新一轮退耕还林、退牧还草、天然林保护等一系列植被恢复工程^[2, 5].

植被覆盖度是地表植被覆盖状况的一个综合衡量指标,对生态环境具有很好的指示作用,被广泛应用于生态环境遥感监测中^[2, 5, 9].Google Earth Engine(GEE)是全球尺度卫星数据计算分析处理的云平台,在获取全球范围内遥感数据及大型地理空间数据集方面具有非常大的优势^[10-12].MODIS是目前世界上新一代的“图谱合一”光学遥感仪器,光谱和时间分辨率高,可以及时提供地表的植被、水体、温度等特征信息,实现了对地表、大气和海洋的长期全球观测.在MODIS数据中,反映植被覆盖状况的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经过了全面的大气和土壤背景校正^[13-14],并在合成算法上进行了改进^[14-15],不仅克服了NDVI易饱和的问题^[4, 15-19],能更好地反映高覆盖区域的植被状况^[14-15, 20],还能对低覆盖区域的植被很好地区分^[14, 21-23].

四川地形地貌差异大,植被类型多样,生态环境异质性高,是全球气候变化敏感区^[2, 24].目前,关于植被覆盖变化的研究主要集中在NDVI时空变化特征^[3, 8, 10, 24-26]以及与气候^[1, 4, 8-9, 24-28]、地形^[1, 4, 29]等因子之间的关系,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地形分布特征的研究还较少^[4-5].本研究借助于GEE平台,以MODIS-EVI数据为基础,运用GIS技术结合像元二分模型和分布指数定量分析四川省近20年来的植被覆盖地形分布规律,有助于从宏观方面了解区域植被覆盖状况,以为四川省生态植被恢复和健康可持续发展提供一定的参考.

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、长江上游地区,92°21′-108°12′E,26°03′-34°19′N,东西长约1 075 km,南北宽约900 km.东与重庆相连,南与云南、贵州相邻,西与西藏相衔,北与陕西、甘肃、青海相界,面积约 $48.6 \times 10^4 \text{ km}^2$.

四川省处于青藏高原向长江中下游平原的过渡地带,地形高差悬殊,地貌复杂多样,东西差异大.西部大部分地区海拔大于 4 000 m,以高原和山地为主;东部大部分地区海拔在 1 000~3 000 m,以盆地和丘陵为主.

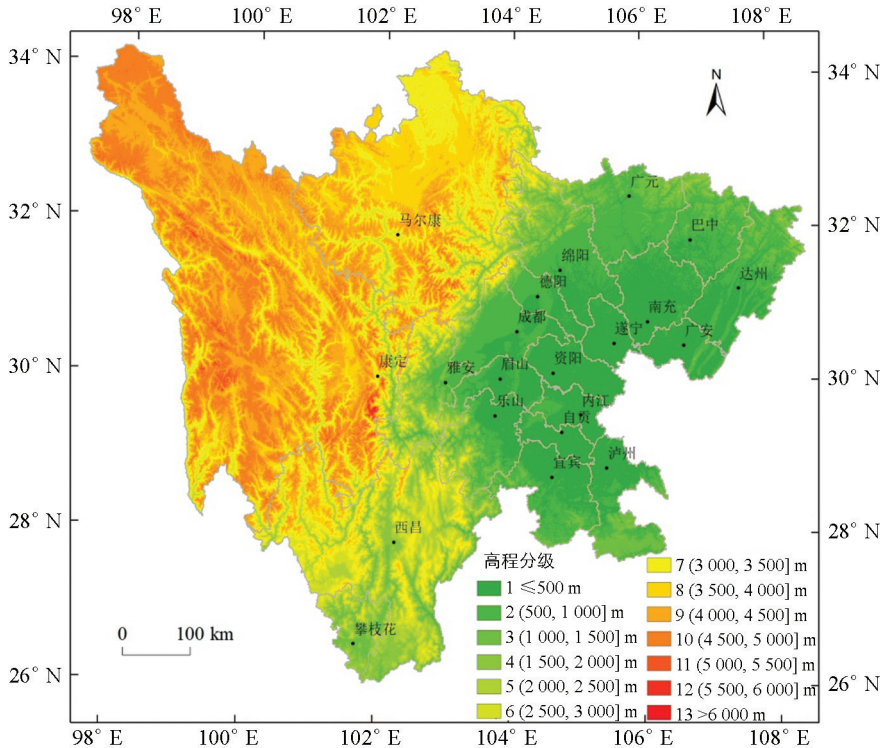
四川省根据地形特点可分为四川盆地、川西北高原和川西南山地.四川盆地包括川西平原、盆地丘陵和川东平行岭谷,海拔多在 400~800 m,盆地周围主要有秦岭、米仓山、大巴山、大娄山、龙门山、邛崃山等,水系主要有岷江、沱江、涪江、嘉陵江等,属亚热带湿润季风气候,以亚热带常绿阔叶林为主;川西北主要是高山原和高山峡谷区,海拔多在 3 000~5 000 m,属高寒气候,以高山草甸植被为主;川西南山地为横断山脉北段,山高谷深,主要有岷山、邛崃山、大雪山等,水系有岷江、大渡河、雅砻江、金沙江等,气候垂直地带性显著,主要有寒带针叶林、温带针阔混交林、亚热带常绿和落叶混交林、亚热带常绿阔叶林等.

1.2 数据来源及处理

MODIS-EVI 数据来源于 GEE 云平台.本研究通过 GEE 平台,调用 JavaScript API,上传四川省矢量图,在线裁剪、重投影并采用最大值合成法获取 2000—2019 年 MOD13Q1 的 EVI 数据,再根据像元二分模型计算出植被覆盖度.为了便于数据分析,参考相关研究文献[2],将植被覆盖度划分为 5 级,分别是无植被覆盖($\leq 5\%$)、劣覆盖度($5\% \sim 30\%$)、低覆盖度($30\% \sim 50\%$)、中覆盖度($50\% \sim 70\%$)、高覆盖度($> 70\%$).

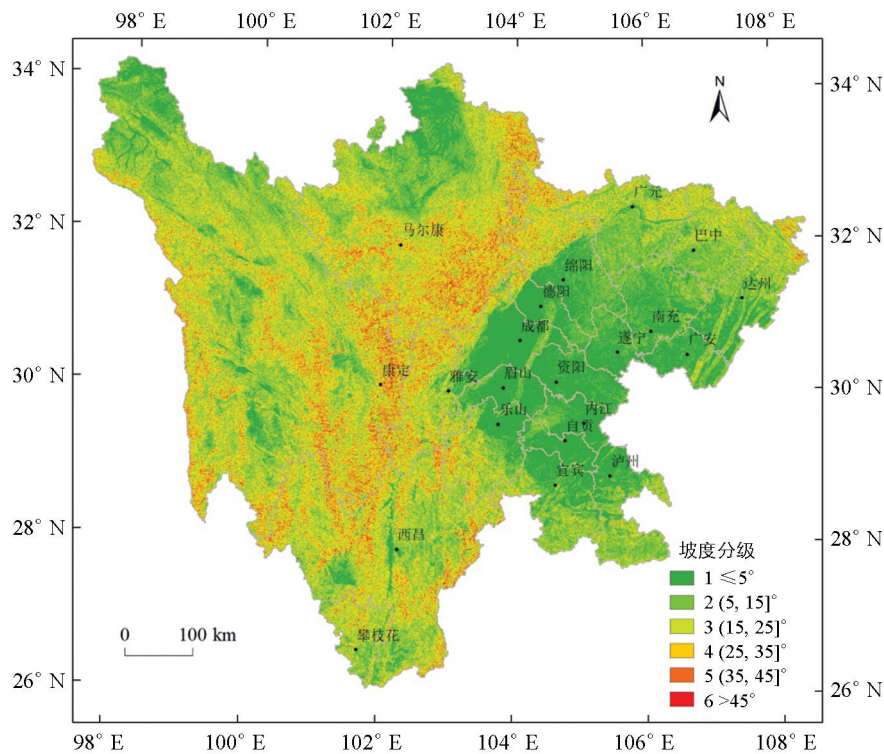
DEM 数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心的 SRTM 数据.该数据集包括 1 000,500,250 m 3 种精度,采用 WGS 84 投影.本研究选取 250 m 分辨率,经裁剪生成四川省 DEM 数据.根据研究需要,将 DEM 数据划分为 13 级(图 1);根据林业调查中的坡度和坡向分级标准,将坡度分为 6 级(图 2)、坡向分为 9 类(图 3).

地貌数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心的 1:100 万中国地貌类型空间分布数据,已广泛应用在环境保护、土地调查、灾害监测、区域规划等方面.本研究以四川省矢量范围为掩膜进行裁剪,再经过投影转换和重采样为 WGS 84 投影、250 m 分辨率,并划分为 7 种类型(图 4).



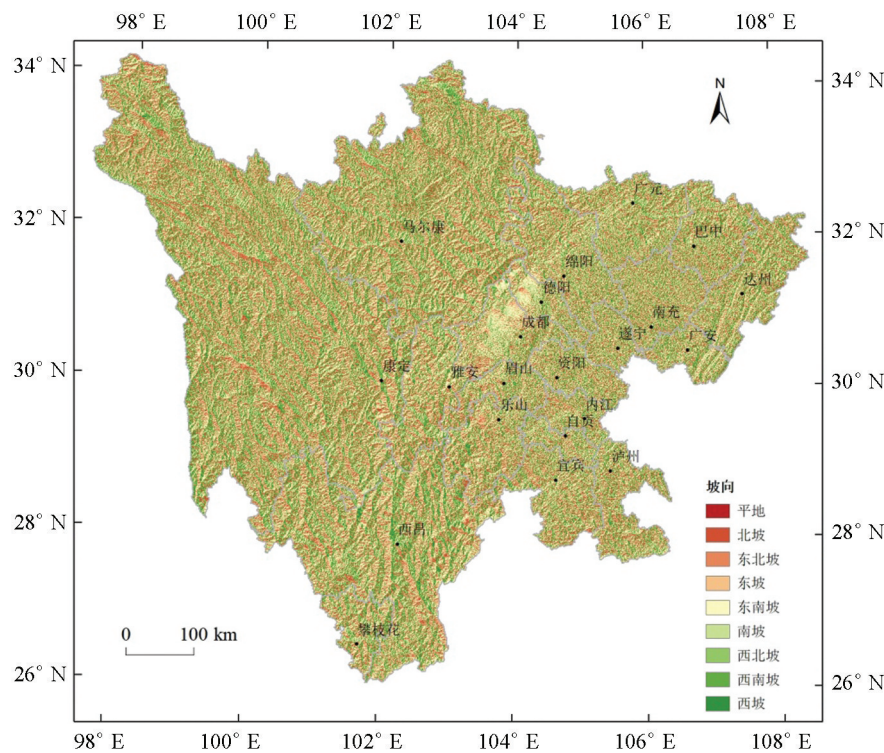
审图号: GS(2019)3333 号.

图 1 四川省高程图



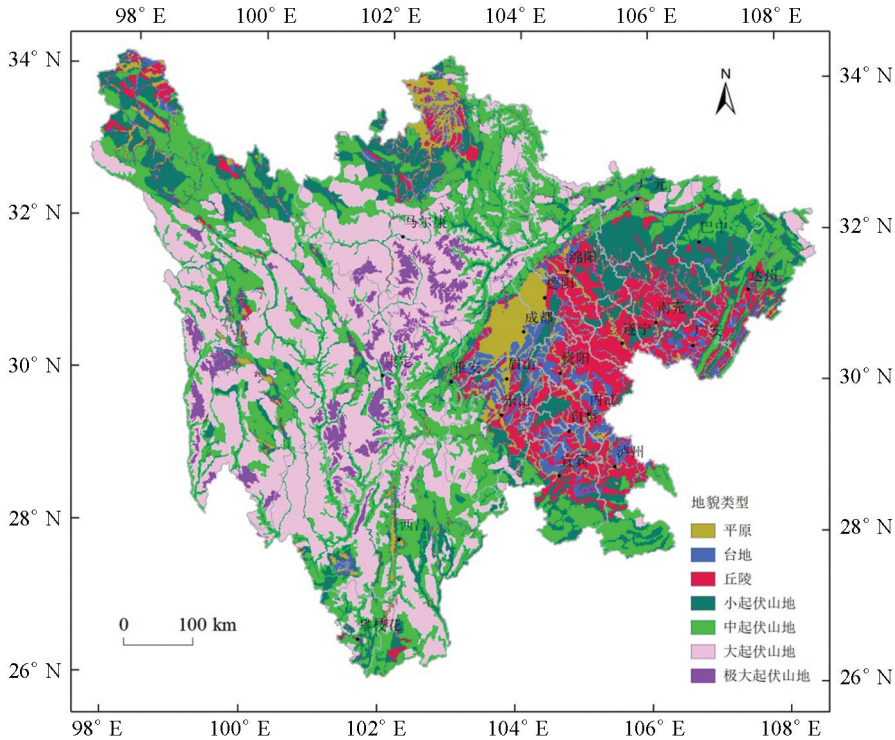
审图号: GS(2019)3333 号.

图 2 四川省坡度图



审图号: GS(2019)3333 号.

图 3 四川省坡向图



审图号: GS(2019)3333 号.

图 4 四川省地貌类型图

2 研究方法

2.1 Google Earth Engine 云平台

GEE 是一个基于谷歌云计算的地理空间信息数据处理的可视化平台,它能够提供更全球尺度的遥感影像数据和地理空间数据,包括 Landsat, MODIS, Sentinel 以及气象、地形等多尺度、多源数据集^[11, 30],容量达到 PB 级别,超过 500 万张遥感影像^[31].

GEE 云平台集云端海量数据存储、便捷的网页或客户端可视化访问、强大的云端后台计算与分析等众多优势于一体,为全球资源环境遥感监测提供了先进的研究技术和工具^[31]. 相比于传统的遥感影像收集、预处理、信息提取、分析与应用模式, GEE 通过 JavaScript API 和 Python API, 基于谷歌云平台和后台处理器处理数据,解决了大尺度研究中数据收集难、数据量大、数据集计算效率低等难题,极大地提升了空间数据分析与处理效率^[11, 30-31].

在大数据背景下, GEE 可以快速、批量化处理数据,不受空间和时间限制,这为遥感科学家、研究人员和开发人员在地表动态监测与量化分析中提供了便利^[11, 31]. 目前, GEE 已经广泛地应用在地学遥感研究中,如植被、水体、城镇、土地利用变化监测等^[10-12, 30-31].

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所获得的光谱信息(EVI)是由植被信息(EVI_{veg})和非植被信息(EVI_{soil})通过线性加权合成,其权重就是植被信息与非植被信息的面积在像元中所占的比例^[32-34]. 假设在一个像元中,植被信息所占比例为 FVC ,即植被覆盖度,则非植被信息所占的比例为 $1-FVC$,那该像元的植被覆盖度计算公式^[35]如下:

$$FVC = (EVI - EVI_{soil}) / (EVI_{veg} - EVI_{soil}) \quad (1)$$

式中: EVI_{veg} 包含了植被的类型、结构等信息; EVI_{soil} 包含了土壤的类型、湿度等背景信息. 在复杂的地表环境中, EVI_{veg} 和 EVI_{soil} 会随时间和空间变化. 本研究选取相应影像像元数累计百分比 0.5% 的为纯非

植被像元值, 99.5% 的为纯植被像元值. 像元二分模型的参数物理含义明确, 同时削弱了大气、土壤以及植被类型的影响, 不受区域限制, 容易推广使用^[32, 36].

2.3 分布指数

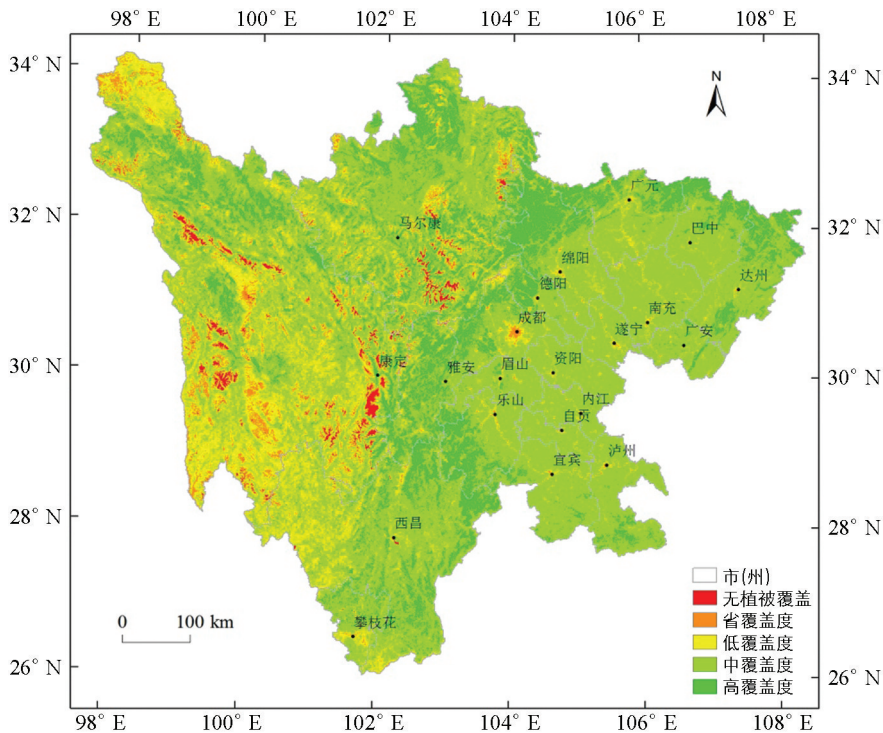
在评价植被覆盖空间分布差异的实际应用中, 某一地形条件下某一植被覆盖类型的面积虽然较小, 但相比于该植被覆盖类型在整个研究区的比例却较大, 由此导致植被覆盖地形分布评价的不合理或者不确定性^[37-38]. 为了消除地形因子因分类标准不同而产生的绝对面积不同对评价结果所带来的干扰, 本研究采用分布指数^[39-40]来定量评价植被覆盖地形分布特征, 其计算公式如下:

$$DI = \frac{S_{ie}}{S_e} / \frac{S_i}{S} \quad (2)$$

式中: S_{ie} 为 i 植被覆盖类型在 e 地形条件下的面积; S_i 为 i 植被覆盖类型在研究区内的总面积; S_e 为 e 地形条件在研究区内的总面积; S 为研究区的总面积; 当 $DI > 1$ 时, 说明 i 植被覆盖类型在 e 地形条件下为优势分布, 值越大优势越明显; $DI = 1$ 时, 说明 i 植被覆盖类型在 e 地形条件下属于正常分布; $DI < 1$ 时, 说明 i 植被覆盖类型在 e 地形条件下为弱势分布, 值越小分布越弱^[41-42].

3 结果与分析

2000—2019 年四川省植被以中覆盖度为主(64.56%), 分布广泛, 在四川盆地连片分布, 其次是低覆盖度(17.04%), 主要分布在城乡结合区域以及川西北、攀西高原区等. 高覆盖度第三(13.59%), 主要分布在华蓥山、大巴山、岷山、龙门山、青城山、峨眉山、大凉山一线以及若尔盖草原、雅砻江、泥曲河沿线. 劣覆盖度(4.03%)主要分布在各大城市区域以及贡嘎山、四姑娘山、格聂山、雪宝顶、雀儿山、赞布贡玛扎、仙乃日等地. 无植被覆盖仅占 0.78%, 主要是贡嘎山、四姑娘山、格聂山、雪宝顶、雀儿山等地(图 5). 由此可以看出, 四川省植被覆盖虽然整体比较好, 但区域差异明显.



审图号: GS(2019)3333 号.

图 5 2000—2019 年四川省年均植被覆盖度空间分布

3.1 高程分布

不同的高程区域, 植被覆盖度分布优势区域差异明显(图 6a). 无植被覆盖优势分布区域为 10-13 级, 劣覆盖度优势分布区域为 9-11 级, 低覆盖度优势分布区域为 7-10 级, 中覆盖度优势分布区域为 1-2 级和 6-8 级, 高覆盖度优势分布区域为 3-7 级. 其中, 在 1-2 级高程区域, 以中覆盖度分布为主; 3-6 级高程区域, 以高覆盖度分布为主; 7-9 级高程区域, 以低覆盖度分布为主; 10 级高程区域, 以劣覆盖度分布为主; 11-13 级高程区域, 以无植被覆盖分布为主.

随着高程的增加, 无植被覆盖比例逐渐增加, 劣覆盖度、低覆盖度和高覆盖度比例先增加后降低, 中覆盖度比例逐渐降低(图 6b). 其中, 无植被覆盖比例在 13 级为 100%; 劣覆盖度在 11 级比例最高, 为 28.94%; 低覆盖度在 10 级比例最高, 为 41.44%; 中覆盖度在 1 级比例最高, 为 90.35%; 高覆盖度在 4 级比例最高, 为 43.94%.

综上可知, 植被覆盖受高程影响明显. 在 $\leq 1\ 000\ \text{m}$ 区域, 中覆盖度呈优势分布, 此区域为四川盆地, 以栽培植被为主; 在 $1\ 000\sim 3\ 000\ \text{m}$ 区域, 高覆盖度优势明显, 此区域主要是盆周山地区域, 以林地为主; 在 $3\ 000\sim 4\ 500\ \text{m}$ 区域, 低覆盖度呈优势分布, 此区域为川西高原区, 以草地、灌丛为主; 在 $>4\ 500\ \text{m}$ 区域, 劣覆盖度和无植被覆盖优势明显, 这是由于高海拔区域主要为积雪、冰川, 几乎没有植被覆盖.

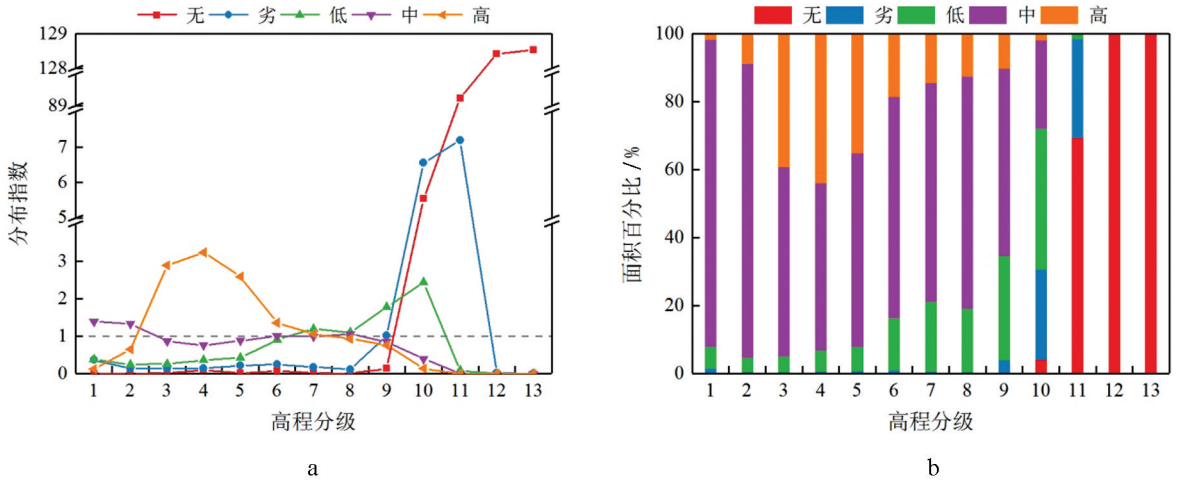


图 6 2000—2019 年四川省年均植被覆盖度的高程分布

3.2 坡度分布

随着坡度的增加, 无植被覆盖度和低覆盖度分布指数逐渐增加, 劣覆盖度和高覆盖度分布指数先增加后降低, 中覆盖度分布指数逐渐降低(图 7a). 无植被覆盖、劣覆盖度、低覆盖度和高覆盖度分布优势区域均为 3-6 级, 中覆盖度分布优势区域为 1-2 级. 其中, 在 1-2 级坡度区域, 以中覆盖度分布为主; 在 3-6 级坡度区域, 以无植被覆盖分布为主.

随着坡度的增加, 无植被覆盖和低覆盖度比例逐渐增加, 劣覆盖度和高覆盖度比例先增加后降低, 中覆盖度比例逐渐降低(图 7b). 其中, 无植被覆盖比例在 6 级最高(2.04%), 劣覆盖度比例在 3 级最高(4.83%), 低覆盖度比例在 6 级最高(23.32%), 中覆盖度比例在 1 级最高(76.33%), 高覆盖度比例在 4 级最高(18.14%).

综上可知, 在不同的坡度区域, 植被覆盖差异明显. 在 $\leq 15^\circ$ 区域, 中覆盖度比例高, 呈优势分布, 主要为栽培植被和草地; 在 $>15^\circ$ 区域, 无植被覆盖比例虽小但优势明显.

3.3 坡向分布

随着坡向的变化, 无植被覆盖、劣覆盖度、低覆盖度、中覆盖度分布指数先降低后增加, 高覆盖度分布指数先增加后降低(图 8a). 其中, 无植被覆盖分布优势区域为北坡、东北坡和西北坡, 劣覆盖度和低覆盖

度分布优势区域为平地、北坡、西南坡、西坡和西北坡, 中覆盖度分布优势区域为北坡、东北坡、西坡和西北坡, 高覆盖度分布优势区域为平地、东北坡、东坡、东南坡和南坡. 其中, 在平地、东坡、东南坡和南坡区域, 以高覆盖度分布为主; 在北坡和东北坡区域, 以无植被覆盖分布为主; 在西南坡区域, 以劣覆盖度分布为主; 在西坡和西北坡区域, 以低覆盖度分布为主.

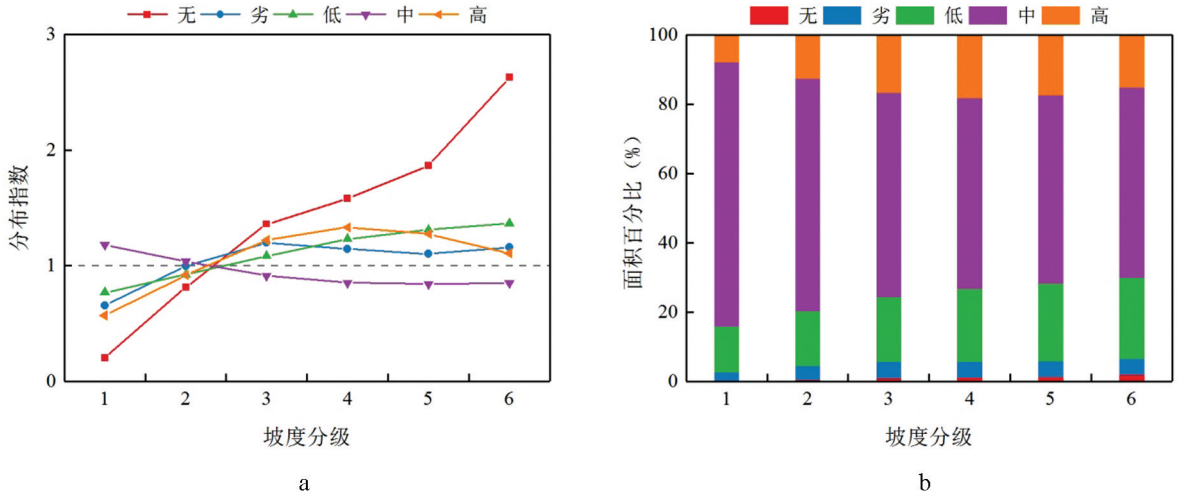


图 7 2000—2019 年四川省年均植被覆盖度的坡度分布

随着坡向的变化, 无植被覆盖、劣覆盖度、低覆盖度、中覆盖度比例先降低后增加, 高覆盖度比例先增加后降低(图 8b). 其中, 无植被覆盖比例在北坡最高(0.93%)、西坡最低(0.70%), 劣覆盖度比例在西坡最高(4.30%)、东南坡最低(3.71%), 低覆盖度比例在西北坡最高(20.22%)、东南坡最低(14.28%), 中覆盖度比例在西坡最高(66.23%)、东南坡最低(62.63%), 高覆盖度比例在东南坡最高(18.66%)、西北坡最低(8.66%).

综上可知, 在平地、东坡、东南坡和南坡区域, 高覆盖度优势明显; 在北坡、东北坡和西南坡, 无植被覆盖、劣覆盖度为优势分布; 在西坡和西北坡, 低覆盖度为优势分布.

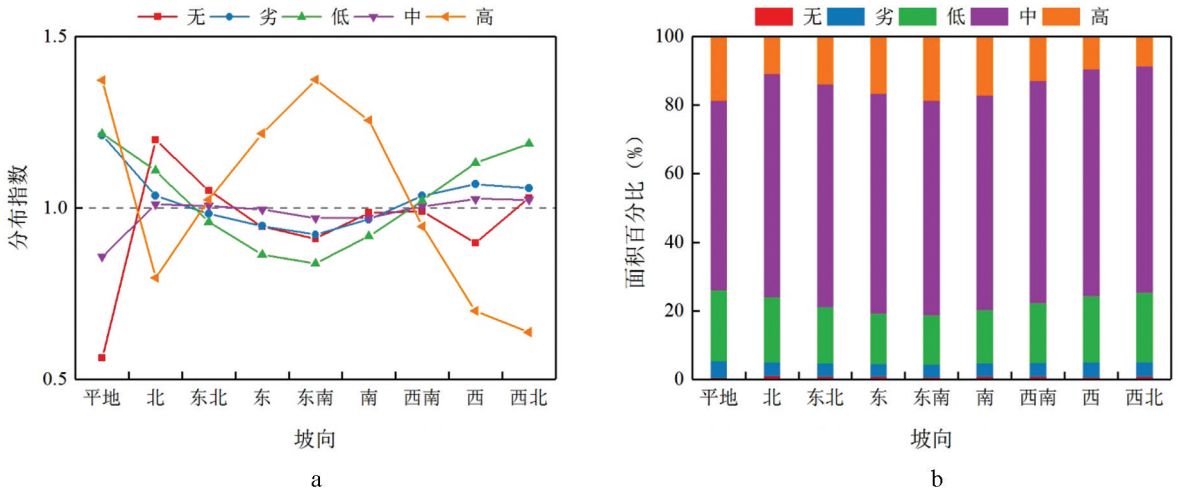


图 8 2000—2019 年四川省年均植被覆盖度的坡向分布

3.4 地貌分布

在不同的地貌区域, 植被覆盖优势差异明显(图 9a). 无植被覆盖分布优势区域为大起伏山地和极大起伏山地, 劣覆盖度和低覆盖度分布优势区域为平原、大起伏山地和极大起伏山地, 中覆盖度分布优势区域为台地、丘陵和小起伏山地, 高覆盖度分布优势区域为平原和中起伏山地. 其中, 在平原和中起伏山地区域, 以高覆盖度分布为主; 在台地、丘陵和小起伏山地区域, 以中覆盖度分布为主; 在大起伏山地区域, 以

劣覆盖度分布为主；在极大起伏山地区域，以无植被覆盖分布为主。

随着地貌的变化，无植被覆盖、劣覆盖度和低覆盖度比例先降低后增加，中覆盖度比例先增加后降低，高覆盖度比例先降低后增加又降低(图 9b)。其中，无植被覆盖、劣覆盖度和低覆盖度比例在极大起伏山地区域最高，丘陵区域最低；中覆盖度比例在丘陵区域最高，极大起伏山地区域最低；高覆盖度比例在中起伏山地区域最高，极大起伏山地区域最低。

综上所述，在平原和中起伏山地，高覆盖度优势明显；在台地、丘陵和小起伏山地，中覆盖度优势明显；在大起伏和极大起伏山地，无植被覆盖和劣覆盖度优势明显。

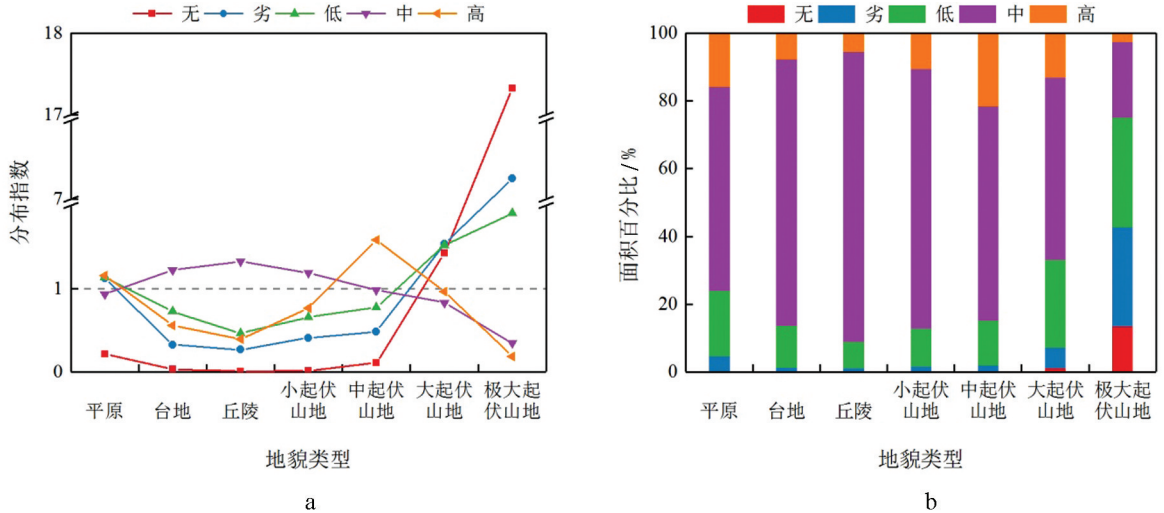


图 9 2000—2019 年四川省年均植被覆盖度的地貌分布

4 讨论

本研究利用 2000—2019 年的 MODIS-EVI 数据，采用地形分布指数分析了四川省近 20 年来的植被覆盖度与地形因子之间的定量关系。从中可以发现，在各种地形条件下，除了高程 $>4\,500\text{ m}$ 和极大起伏山地外，中覆盖度所占比例均高于其他覆盖类型，这与四川省植被以中覆盖度为主基本一致。根据分布指数，中覆盖度仅在高程 $\leq 1\,000\text{ m}$ 、坡度 $\leq 15^\circ$ 以及台地、丘陵、小起伏山地区域大于其他覆盖类型，说明在这些区域中覆盖度分布占优势，而在其余区域均不占优势。由此表明，单纯地以面积比例来分析植被分布特征存在一定的不确定性或片面性，而分布指数是一个标准化、无量纲指数，可以更加客观地反映出植被的地形分布特征。

从各地形的分布指数可以看出，分布指数的变化趋势与其对应的面积比例的变化趋势基本一致，由此说明分布指数还可以反映出植被覆盖在各个地形的比例变化趋势。此外，高程和地貌的分布指数变化范围要比坡度和坡向的变化范围大，这说明高程和地貌对植被覆盖度的影响比坡度和坡向大，可能是因为像四川省这样水热条件充足的地区，坡度和坡向没有高程和地貌的影响显著。四川省地域辽阔、地形复杂，植被“三向地带性”显著，对遥感监测数据的质量要求高。目前的 MODIS-EVI 时间序列还较短，虽然文中 EVI 已经过最大值合成，但仍然难免存在误差，还有待长时序列数据的积累和进一步的研究。

5 结论

2000—2019 年四川省植被覆盖度总体较好，但区域差异明显。四川省植被覆盖以中覆盖度为主 (64.56%)，低覆盖度次之 (17.04%)，高覆盖度第三 (13.59%)，劣覆盖度第四 (4.03%)，无植被覆盖仅占 0.78%；无植被覆盖和劣覆盖度主要分布在城市以及中高山区区域，低覆盖度主要分布在川西北、攀西高原，中覆盖度分布范围广泛，高覆盖度主要分布在中低山区区域。

高程分布中,在 $\leq 1\ 000\text{ m}$ 区域,中覆盖度分布优势明显; $1\ 000\sim 3\ 000\text{ m}$ 区域,高覆盖度优势分布明显; $3\ 000\sim 4\ 500\text{ m}$ 区域,低覆盖度优势分布明显; $> 4\ 500\text{ m}$ 区域,无植被覆盖和劣覆盖度优势分布十分显著。

坡度分布中,在坡度 $\leq 15^\circ$ 区域,中覆盖度分布优势明显; $> 15^\circ$ 区域,无植被覆盖优势分布明显。

坡向分布中,在平地、东坡、东南坡和南坡区域,高覆盖度分布优势明显;北坡、东北坡和西南坡区域,无植被覆盖和劣覆盖度分布优势明显;西坡和西北坡区域,低覆盖度分布优势明显。

地貌分布中,在平原和中起伏山地区域,高覆盖度分布优势明显;在台地、丘陵和小起伏山地区域,中覆盖度分布优势明显;大起伏和极大起伏山地区域,无植被覆盖和劣覆盖度分布优势明显。

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.
- [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.
- [3] 杨存建,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.
- [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.
- [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, 243, 2.
- [6] 钟旭珍,刘馨悦,姚坤,等. 基于生态功能分区的沱江流域土壤侵蚀研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(12): 127-136.
- [7] 秦微,兰安军,李芸,等. 铜仁地区遥感反演与大气污染物 VOCs 耦合分析 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2019, 44(4): 71-76.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] ALENCAR A, SHIMBO J Z, 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]. Remote Sensing, 2020, 12(6): 924.
- [13] 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.
- [14] 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, 427.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] ZOUNGRANA B, CONRAD C, AMEKUDZI L, 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.
- [18] 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.
- [19] 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.

- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 张勃, 王东, 王桂钢, 等. 西南地区近 14a 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.
- [27] LI P, HE Z W, 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [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.
- [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.
- [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, 1481.
- [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.
- [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.
- [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.