

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.004.

林莹冰, 王小军, 全明英, 等. 江西和福建省植被覆盖时空特征及其地形梯度效应[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 290-300.

Lin Yingbing, Wang Xiaojun, Quan Mingying, et al. Spatiotemporal Characteristics of Vegetation Coverage and Its Terrain Gradient Effect in Jiangxi and Fujian Provinces in South China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 290-300.

江西和福建省植被覆盖时空特征及其地形梯度效应

林莹冰¹, 王小军^{2,3}, 全明英¹, 林杜锐^{3,4}, 卢毅¹, 刘光旭⁵

(1. 华南师范大学 地理科学学院, 广州 510631;

2. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029; 3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 中国科学院 南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 5. 赣南师范大学 地理与环境工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: [目的] 探讨华南地区植被覆盖时空特征, 为生态系统调查与保护提供参考。[方法] 以江西和福建省为例, 将 1998 年、2005 年、2010 年、2015 年、2019 年 5 年的植被覆盖由低到极高划分为 6 个等级, 使用土地利用研究中的动态度、转移等思路分析植被覆盖时空特征, 并探讨其地形梯度效应。[结果] (1) 江西和福建植被覆盖以高和极高覆盖为主 (78.47%~89.8%), 尤其是在内陆山地丘陵区, 而沿江、沿海等人口密集的城市区相对较低、面积较小; 1998—2019 年该区植被覆盖较好且变化的整体趋势仍是增加; 最显著变化发生在 2010—2015 年由高覆盖转移为极高覆盖。(2) 地形梯度指数显示, 中等植被覆盖及以下主要分布在海拔低于 200 m、坡度小于 6°、地形位小于 0.48 的 1~2 级地形梯度区; 较高覆盖及以上较为分散的分布在各地形梯度内, 且随着覆盖度增加有向海拔高于 200 m、坡度大于 6°、地形位大于 0.48 的 3~5 级地形梯度区分布趋势。(3) 在植被覆盖不变或改善类中, 低覆盖转移主要发生在 1 级地形梯度, 较低覆盖和中等覆盖转移主要发生在 1~3 级地形梯度区, 较高覆盖及以上的转移在 5 类地形梯度均有发生且相对分散; 在植被覆盖恶化类中, 中等覆盖及以下的转移多发生在 1~3 级地形梯度区, 较高覆盖及以上的转移在 5 类地形梯度区多有发生且相对分散; 转移等级跨度较大的情况多发生在较低等级的地形梯度区。[结论] 研究区植被覆盖率高, 植被覆盖变化存在时空差异, 生态系统调查与保护需要考虑不同地形梯度下的影响因素。

关键词: 植被覆盖; 时空特征; 地形梯度; 动态度; 弦图; 华南

中图分类号: K903

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0290-11

Spatiotemporal Characteristics of Vegetation Coverage and Its Terrain Gradient Effect in Jiangxi and Fujian Provinces in South China

Lin Yingbing¹, Wang Xiaojun^{2,3}, Quan Mingying¹, Lin Durui^{3,4}, Lu Yi¹, Liu Guangxu⁵

(1. School of Geography Sciences, South China Normal University, Guangzhou 510631, China; 2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 5. School of Geography and Environmental Engineering, Gannan Normal University, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

Abstract: [Objective] Exploration of the spatiotemporal characteristics of vegetation coverage in the South China region serves as a reference for ecosystem investigation and conservation. [Methods] Taking Jiangxi and Fujian provinces as examples, the vegetation cover of five years, including 1998, 2005, 2010, 2015, and 2019, was divided into six levels from low to high levels. The spatiotemporal characteristics of vegetation coverage were analyzed using concepts such as dynamic degree and transfer in land use research, and its topographic gradient effect was discussed. [Results] (1) The vegetation coverage in Jiangxi and Fujian was main-

收稿日期: 2022-12-12

修回日期: 2022-12-27

资助项目: 广东省科技创新战略专项资金攀登计划项目“近三千年来岭南地区重金属汞污染调查与潜在生态风险评估”(pdjh2020b0169); 江西省教育厅科技项目“基于人工智能的赣南稀土矿区洪水灾害测度方法集成及其环境效应研究”(GJJ201419); 江西省高校人文社会科学研究规划项目“基于人工智能算法的洪灾管理适用策略研究”(GL20116)

第一作者: 林莹冰(1998—), 女, 福建漳州人, 硕士, 研究方向为全球变化与环境演变。E-mail: 1489110637@qq.com

通信作者: 王小军(1994—), 男, 江西赣州人, 博士, 主要从事环境演变与资源生态等研究。E-mail: gwangxj@163.com

<http://stbcj.paperonce.org>

ly high and extremely high (78.47%~89.8%), especially in the inland mountainous and hilly areas, while the densely populated urban areas along the river and coastal areas were relatively low coverage and small area; the vegetation coverage in this area was good and the overall trend of change was still increasing from 1998 to 2019. The most significant change occurred in 2010—2015 from high to very high coverage. (2) The terrain gradient index showed that the moderate vegetation coverage and below mainly distributed in grade 1~2 terrain gradient areas with an altitude of less than 200 m, a slope of less than 6° and a terrain position of less than 0.48. High vegetation coverage and above scattered in each terrain gradients, and with the increase of coverage, they tended to distribute in the terrain gradient areas of grade 3~5 with altitude higher than 200 m, slope higher than 6° and terrain level higher than 0.48. (3) In the category of unchanged or improved vegetation coverage change, the low coverage transfer mainly occurred in the grade 1 terrain gradient, the low and medium coverage transfer mainly occurred in the grade 1~3 terrain gradient area, and the transfer of high coverage and above occurred in the five types of terrain gradient and is relatively scattered. In the category of vegetation coverage change as deterioration, the transfer of medium coverage and below mostly occurred in the terrain gradient area of grade 1~3, while the transfer of high coverage and above mostly occurred and relatively scattered in the terrain gradient area of grade 5. The large span of transfer level usually occurred in the lower grade terrain gradient area. [Conclusion] The vegetation coverage in the research area is relatively high, and there are spatial-temporal differences in vegetation coverage changes. Ecological system investigation and protection need to consider the influencing factors under different terrain gradients.

Keywords: vegetation coverage; spatial-temporal characteristics; terrain gradient; dynamic degree; chord diagram; South China

植被指数能够有效反映一定时间内植被覆盖程度和植被生长情况,是植被覆盖变化研究中的重要指标^[1]。得益于遥感技术的发展,MODIS,SPOT-VGT和GIMMS等归一化植被指数(NDVI)产品便利地提供了不同时空尺度陆地生态系统调查结果^[2]。植被是陆地生态系统的主体,是生态系统的重要组成部分,其变化不仅影响了生物圈,也会通过地球系统反馈至相互联系的其他圈层。因此,科学认识植被覆盖变化,从多维度综合分析植被覆盖时空特征,有针对性地制定不同条件下植被覆盖变化应对方案,对当前人类活动与气候变化双重影响背景下生态系统调查与保护具有重要意义。

中国东部尤其是华南地区植被覆盖度较高,同样也是人为扰动活跃地带,因此这里的植被覆盖变化时空特征及其对气候变化和人类活动的响应受到广泛关注^[3]。江西和福建两省具有优越的自然环境,植被覆盖率位居全国前列,且近几十年变化特征较为一致;两省地形地貌都以低山丘陵为主;两省位于武夷山两侧,生态环境保护均较好,重工业发展相对较少。因此,将两个省行政区一起研究,既可以相互对比又可以减少重复调查工作。利用遥感技术对该区域开展植被变化研究至少可以追溯到十几年前,福建闽江流域^[4-5]、长汀县红壤水土流失区^[6-7]、海岸带^[8],江西

东江源区^[9]、赣江上游^[10]、鄱阳湖流域等^[1]区域研究相继展开,加深了对特定地理单元植被覆盖变化的认识。此外对江西井冈山市^[11]、南昌市^[12]、兴国县^[13],福建永定县^[14]、平和县^[15]、厦门市等^[16]市县,以及福建省^[17-19]、江西省^[20-22]、多省份等^[23-25]不同行政空间尺度的植被覆盖变化,也有助于多角度全面认识城乡间、地区间和区域内差异,以及植被覆盖变化驱动因素的复杂性。当前研究利用长时间序列遥感数据,阐明了植被覆盖向好发展趋势,揭示了其变化对气候变化、人类活动、土地利用变化等因素的响应特征。然而植被覆盖在短暂几年内变化有其本身的群落波动,并非任何地点的小波动都需要异常关注。此外植被分布与变化对不同地表环境尤其是不同地形特征下的响应机制仍然需要进一步理解,因为地形也会影响植被覆盖变化驱动因素的分布。对福建闽江流域、长汀县、永定县、平和县等地的植被覆盖特征及其地形梯度效应研究均表明,海拔较高、坡度较大、光照较多的地形特征下,植被覆盖较高、较稳定^[5,7,14-15]。地形梯度反映了环境要素在高程、坡度、坡向、地形起伏度、地形位等方面的空间分布特征^[25],在土地利用格局^[25-26]、植被覆盖分布等^[27-28]研究领域有广泛的应用前景。因此本研究也采用该方法分析植被覆盖分布与变化特征。

本研究以华南覆盖率较高的江西和福建省为研究区,选择 1998 年、2005 年、2010 年、2015 年、2019 年等年份的植被覆盖数据,借助土地利用变化方法探讨植被覆盖时空特征,并分析植被覆盖分布与变化的地形梯度效应。以期尝试促进不同领域研究思路交汇,丰富植被覆盖变化研究内容,为华南地区生态系统调查与保护提供参考。

1 研究区概况

江西和福建省(113°35′—120°45′E,23°30′—30°05′N)位于中国东南丘陵,地形以低山丘陵为主(图 1A),将近 60%的区域海拔在 200~1 000 m。江西三面环山、南高

北低,福建地形特征素有“八山一水一分田”之称。江西和福建两省以武夷山为界,分别发育形成了以赣江和闽江为主的河流网络。该区气候是典型的亚热带季风气候,年均温约 20℃,年降水量 1 400~2 000 mm,降水集中在春夏季节^[29]。这里适宜油茶、脐橙和茶叶等喜温、喜湿的林果业生长^[30-32]。两省森林覆盖率均超过 60%,是植被覆盖较好的地区之一,福建省森林覆盖率常年位居中国第一^[19,21]。2021 年,江西常住人口 4 517.4 万人、GDP2.96 万亿元,福建常住人口 4 187 万人、GDP4.88 万亿元。逐渐增加的人口和经济活动越来越明显地改造着地表环境,土地利用/覆盖变化越来越频繁和复杂^[33]。

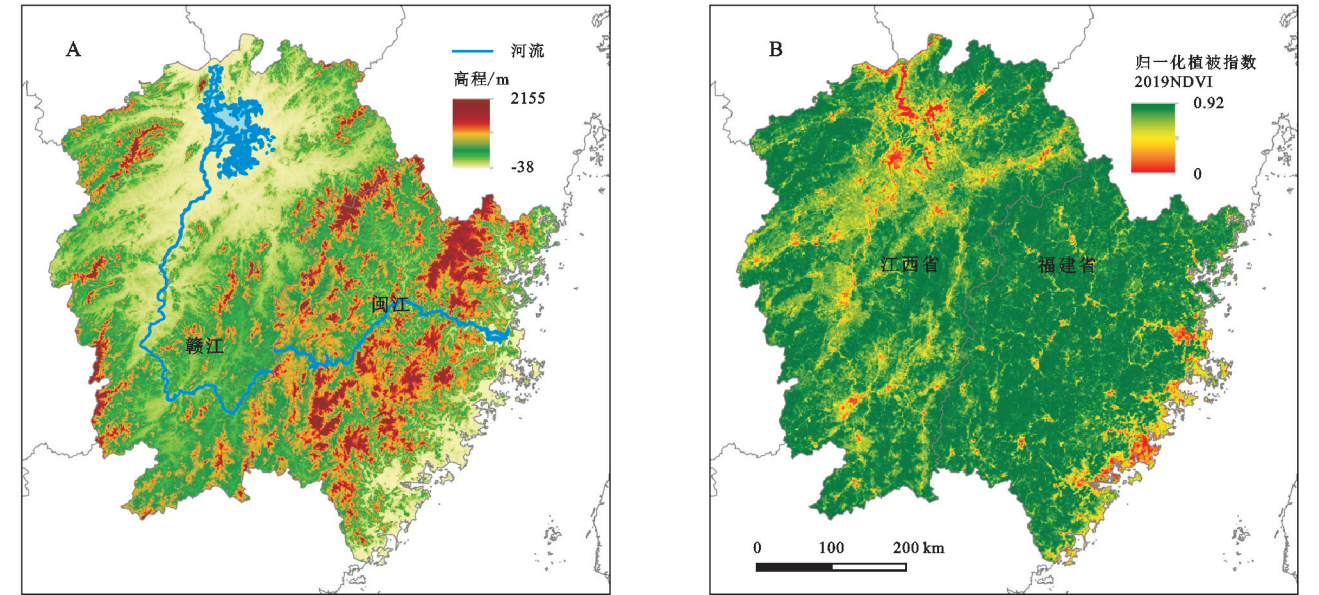


图 1 江西与福建省的地形、水系与植被覆盖度
Fig. 1 Terrain, water system, and vegetation coverage of Jiangxi and Fujian Provinces

2 资料与方法

2.1 数据来源

(1) 植被覆盖数据(1 km)来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),从中国年度植被指数空间分布数据集中提取了研究区 1998 年、2005 年、2010 年、2015 年、2019 年的数据。该数据基于连续时间序列的 SPOT/VEGETATION NDVI 卫星遥感数据,采用最大值合成法生成,年 NDVI 为该区一年内最大值。(2) 高程数据(DEM, 100 m)来源于 SRTM-v4.1 (<http://srtm.csi.cgiar.org>),它是覆盖面积广、采集数据量大、数据精度高的数字地形高程模型,其他地形相关数据基于 DEM 生成。各类数据统一坐标为 Asia_Lambert_Conformal_Conic,并利用 ArcGIS 10.2 和 Origin 2021 制图。

2.2 植被覆盖时空特征分析

2.2.1 植被覆盖度分级 研究区位于南方地区,且

植被覆盖整体较好,将其植被覆盖分化为 6 个等级:低覆盖度(0~0.1,代码 1)、较低覆盖度(0.1~0.3,代码 2)、中等覆盖度(0.3~0.5,代码 3)、较高覆盖度(0.5~0.7,代码 4)、高覆盖度(0.7~0.85,代码 5)和极高覆盖度(0.85~1,代码 6)。

2.2.2 植被覆盖动态度 基于土地利用动态度分析思路^[33],植被覆盖动态度用以反映一定时间内某区域植被覆盖的数量变化情况。不同植被覆盖等级动态度用于分析某类植被覆盖等级在不同研究期的数量变化,公式为:

$$VD=\frac{S_b-S_a}{S_a}\times\frac{1}{T}\times100\% \tag{1}$$

式中:VD 为某类植被覆盖等级的动态度; S_a 和 S_b 为别研究初期和末期某类植被覆盖等级的面积; T 为研究时长。动态度为正表明面积扩大,反之则缩小;动态度的绝对值越大表明相比于上一时期变化得越显著,反之则越稳定。

2.2.3 植被覆盖转移弦图 弦图可用于表示一种成分向另一种成分转移或表示占比情况变化,此前多用于生物、医学研究中,当前逐渐运用于地理学研究领域,如贸易格局、土地利用转移等,与桑基能量分流图效果类似^[25]。本研究利用弦图将不同植被覆盖等级的转移矩阵通过图形方式直观表达出来。

2.3 地形梯度指数

2.3.1 地形因子选择 高程和坡度分别表示了绝对高度和地表单元陡缓的程度。地形位指数(terrain position index, TPI)将某区域的高程和坡度综合描述,可用于定量分析不同地形条件下植被覆盖度变化,计算公式为^[25-26]:

$$TPI=\lg\left[\left(\frac{E}{E_0}+1\right)\times\left(\frac{S}{S_0}+1\right)\right] \quad (2)$$

式中:TPI 为地形位指数, E 和 E_0 分别为某点的海拔和研究区的平均海拔(m); S 和 S_0 分别为某点坡度和研究区平均坡度(°)。高程和坡度均较小,地形位指数越小,反之则越大。在 ArcGIS 10.2 的 Spatial Analyst 模块 Raster Calculator 功能输入上述公式计算即可得到结果。

2.3.2 地形因子分级 研究区高程、坡度和地形位指数分别在-33~2 155 m,0°~72.5°和 0~1.63 范围内变化。依据常用阈值,将高程分为 5 级,依次为-33~100 m,100~200 m,200~500 m,500~1 000 m 和 1 000~2 155 m,将坡度分为 5 级,依次为 0°~2°,2°~6°,6°~15°,15°~25°和 25°~72.5°。地形位指数采用自然间断法分为 5 级^[25-26],依次为 0~0.24,0.24~0.48,0.48~0.7,0.7~0.92,0.92~1.63。本研究基于高程、坡度和地形位指数的不同等级分析植被覆盖时空特征对地形梯度的响应。

2.3.3 地形分布优势指数 植被覆盖度变化可能会因地形梯度区段和不同面积尺度产生差异,地形分布指数(terrain distribution index, TDI)能够有效消除这一影响,它可以描述不同响应类型在各地形梯度上的概率分布,计算公式为^[25-26]:

$$TDI=\left(\frac{S_{ie}}{S_i}\right)\bigg/\left(\frac{S_e}{S}\right) \quad (3)$$

式中:TDI 为地形分布优势指数; e 为地形因子,即高程、坡度和地形位指数; S_{ie} 为 e 地形因子中某一等级下 i 类植被覆盖度(和转移)的面积; S_i 为 i 类植被覆盖度(和转移)的面积; S_e 为 e 地形因子在某一等级的面积; S 为研究区总面积。地形分布指数是一种标准化、无量纲的指数,其值越大,表明优势度越高,当 $TDI>1$ 表示该植被覆盖度(和转移)在该地形因子分级下占优势位,反之则不占优势位。本研究用地形分

布指数分析 1998 年和 2019 年植被覆盖分布,以及 1998—2019 年植被覆盖变化情况。其中植被覆盖变化结果分为 3 类,两个时期覆盖等级无变化称为不变,低等级类覆盖转变为高等级类覆盖称为改善,高等级类覆盖转变为低等级类覆盖称为恶化。

3 结果与分析

3.1 植被覆盖时空特征

3.1.1 植被覆盖分布 1998—2019 年江西和福建的植被覆盖整体较高,尤其表现在山地丘陵区;中等覆盖及以下区域的面积比例(1.97%~3.8%)远低于较高覆盖及以上区域(96.2%~98.03%)(表 1),且极高覆盖区扩张明显,表明植被覆盖度增加。中等覆盖及以下的区域主要分布在江西鄱阳湖沿岸和福建沿海地带,整体变化较小;其中低覆盖区面积占比仅 0.05%~0.15%(129~455 km²),较低覆盖区面积占比仅 0.29%~0.8%(871~2 375 km²),中等覆盖区面积占比仅 1.1%~2.89%(3 269~8 586 km²)。较高覆盖及以上的区域主要分布在低山丘陵区,分布区一定程度上发生变化;较高覆盖区在 1998—2005 年面积 37 266~58 109 km²(比例 12.54%~19.56%),2005 年后面积占比低于 10%(8.76%~9.49%,26 026~28 197 km²);高覆盖区在 1998—2010 年面积占比最大(76.8%~82.13%,228 156~243 995 km²),2010 年后降低(36.52%~40.2%,108 497~119 428 km²);极高覆盖区则在 2010 年后转变为面积占比最高(47.59%~50.19%,141 385~149 095 km²),此前只有不到 10%(0.05%~7.67%,143~26 068 km²)。高覆盖和极高覆盖区的变化最为明显,尤其是 2010—2015 年的丘陵山地地区,高覆盖区缩小了 124 567 km²(41.93%),极高覆盖区扩大了 118 590 km²(39.92%)。

3.1.2 植被覆盖动态度 1998—2019 年江西和福建不同植被覆盖等级动态度存在差异,极高覆盖的动态度显著、较低覆盖的动态度较低;不同时间段各等级的变化特征也不同,2005—2010 年和 2015—2019 年两个时间段植被覆盖动态度较低(表 1)。1998—2005 年,极高覆盖的动态度非常高(2 589.91%),其他等级较小且为负(-0.02%~-5.12%)。2005—2010 年,动态度均较小,高覆盖为正(1.39%)、其他为负(-12.73%~-2.51%)。2010—2015 年,动态度均有较大程度提高,高覆盖为负(-10.21%)、其他为正(0.1%~104.05%)。2015—2019 年,动态度整体上均较小(-5.27%~0.89%)。

3.1.3 植被覆盖转移 1998—2019 年江西和福建植被覆盖转移以较高、高和极高覆盖之间转移为主,其

他转移的面积相对较少(图 2)。1998—2005 年,较高覆盖转移为高覆盖(26 114 km²)和高覆盖转移为极高覆盖(25 853 km²)的面积较大,其次为高覆盖转移为较高覆盖(5 497 km²)(图 2A)。2005—2010 年,较高覆盖转移为高覆盖(17 702 km²)和极高覆盖转移为高覆盖(17 886 km²)的面积较大,其次为高覆盖转移为极高覆盖(14 376 km²)(图 2B)。2010—2015

年,高覆盖转移为极高覆盖(121 673 km²)面积较大,其次为高覆盖转移为较高覆盖(12 723 km²)和较高覆盖转移为高覆盖(9 153 km²)(图 2C)。2015—2019 年,高覆盖转移为极高覆盖(29 562 km²)和极高覆盖转移为高覆盖(21 747 km²)面积较大,其次为高覆盖转移为较高覆盖(9 038 km²)和较高覆盖转移为高覆盖(6 041 km²)(图 2D)。

表 1 1998—2019 年江西和福建植被覆盖度分级面积、比例和变化动态度

Table 1 Area, proportion, and dynamic changes of vegetation coverage grading in Jiangxi and Fujian from 1998 to 2019							
时间	项目	低覆盖	较低覆盖	中等覆盖	较高覆盖	高覆盖	极高覆盖
1998	面积/km ²	379.00	1714.00	3766.00	58109.00	232974.00	143.00
	比例/%	0.13	0.57	1.27	19.56	78.42	0.05
2005	面积/km ²	355.00	1479.00	3761.00	37266.00	228156.00	26068.00
	比例/%	0.12	0.50	1.27	12.54	76.80	8.77
2010	面积/km ²	129.00	871.00	3269.00	26026.00	243995.00	22795.00
	比例/%	0.05	0.29	1.10	8.76	82.13	7.67
2015	面积/km ²	455.00	2274.00	7392.00	26151.00	119428.00	141385.00
	比例/%	0.15	0.77	2.49	8.80	40.20	47.59
2019	面积/km ²	335.00	2375.00	8586.00	28197.00	108497.00	149095.00
	比例/%	0.11	0.80	2.89	9.49	36.52	50.19
1998—2005	动态度/%	−0.90	−1.96	−0.02	−5.12	−0.30	2589.91
2005—2010	动态度/%	−12.73	−8.22	−2.62	−6.03	1.39	−2.51
2010—2015	动态度/%	50.54	32.22	25.22	0.10	−10.21	104.05
2015—2019	动态度/%	−5.27	0.89	3.23	1.56	−1.83	1.09

3.2 植被覆盖分布与变化对地形梯度的响应

3.2.1 对高程梯度的响应 高程分级后 1~5 级面积分别占研究区面积的 22.97%,15.52%,35.31%,23%和 3.15%,绝大部分区域海拔低于 1 000 m。1998 年、2019 年植被覆盖分布高程梯度的分布优势指数显示,中等覆盖及以下在海拔低于 100 m 的区域占优势,高覆盖以上在海拔高于 200 m 以上的区域相对占优势,较高覆盖为过渡等级(图 3A)。1998 年植被覆盖分布的高程梯度,低覆盖仅在海拔低于 100 m 的区域(分布优势指数 4.35),较低覆盖(4.34)和中等覆盖(4.06)也在该区域占优势;较高覆盖在 1~5 级高程内的分布优势指数依次降低(2.53~0.01)。高覆盖和极高覆盖分别在海拔高于 200 m,500 m 的区域分布优势指数大于 1。2019 年植被覆盖分布的高程梯度,较高覆盖及以下的分布特征与 1998 年差异不大;高覆盖变为在海拔低于 200 m 的区域分布优势指数大于 1;极高覆盖分布优势指数大于 1 区域的海拔下移为高于 500 m。

1998—2019 年植被覆盖变化为不变或改善类的高程梯度分布优势指数显示,中等覆盖及以下类转移为不变或其他高等级类覆盖主要发生在海拔低于 100 m 的

区域,较高覆盖及以上类转移为不变或其他高等级类覆盖在各海拔均有发生,主要在海拔 100~200 m 的区域(图 3B)。低覆盖、较低覆盖两类转移为不变或其他高等级类覆盖主要发生在海拔低于 100 m 的区域,少量在 100~200 m;中等覆盖转移为不变或其他高等级类覆盖除了在海拔低于 100 m 的区域,在 100~200 m 范围的分布优势指数也较大,还上移到 200~500 m;较高覆盖、高覆盖转移为不变或其他高等级类覆盖在海拔 100~200 m 区域的分布优势指数大多超过 10,远高于其他转移;极高覆盖不变区在海拔 100~200 m 和大于 1 000 m 的区域占优势。

1998—2019 年植被覆盖变化为恶化类的高程梯度分布优势指数显示,中等覆盖及以下类转移为其他低等级类覆盖主要发生在海拔低于 100 m 的区域,较高覆盖及以上类转移为其他低等级类覆盖多发生在海拔低于 1 000 m,转移等级跨度较大的情况多发生海拔较低区域(图 3C)。较低覆盖、中等覆盖两类转移为其他低等级类覆盖主要发生在海拔低于 100 m 的区域,少量在 100~200 m;较高覆盖转移为其他低等级类覆盖主要分布海拔低于 200 m 的区域,尤其是在 100~200 m 范围的分布优势指数较

大,还上移到 200~1 000 m;高覆盖转移为其他低等级类覆盖发生在多个海拔,尤其是在海拔 100~200 m 区域的分布优势指数大多超过 9;极高覆盖转移为中

等覆盖在海拔 100~200 m 区域的分布优势指数非常高(55.44),极高覆盖转移为其他低等级类覆盖在其他海拔区分布相对较低。

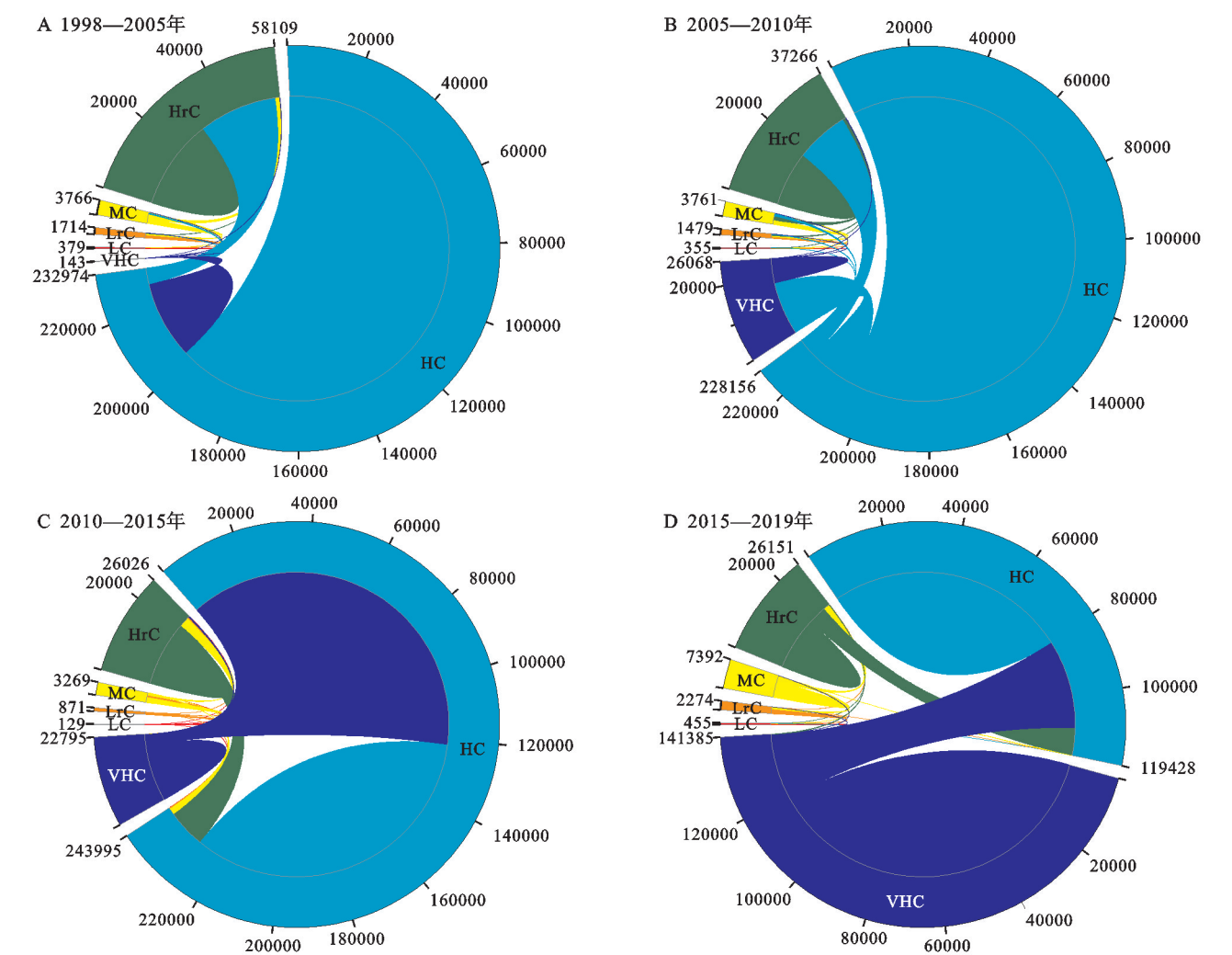


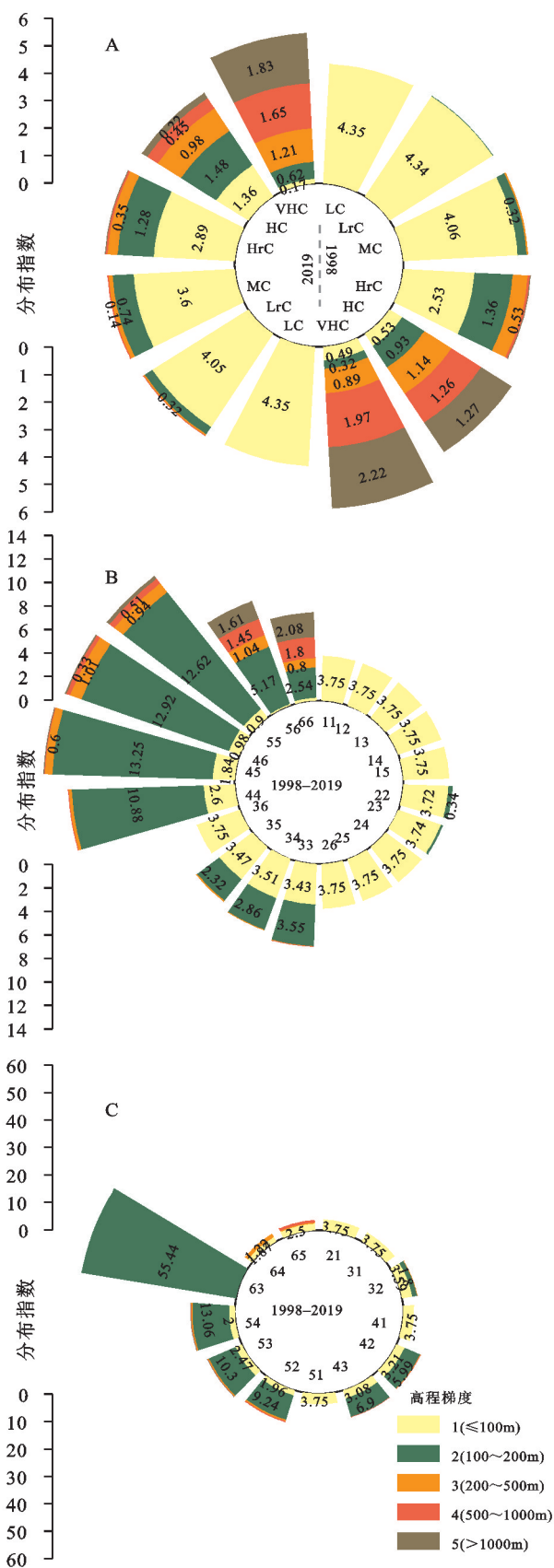
图 2 植被覆盖转移弦图

Fig. 2 Chord diagram of vegetation cover transfer

3.2.2 对坡度梯度的响应 坡度分级后 1~5 级面积分别占研究区的 18.17%,20.22%,33.55%,21.64%和 6.42%,大部分区域为斜坡以下。1998 年、2019 年植被覆盖分布坡度梯度的分布优势指数显示,中等覆盖及以下在坡度低于 2°的区域占优势,极高覆盖在 2°以上的区域相对占优势,较高覆盖和高覆盖为过渡等级(图 4A)。1998 年植被覆盖分布的坡度梯度,低覆盖和较低覆盖在坡度小于 2°的区域分布优势指数大于 5,中等覆盖(4.27)也在该区域占优势;较高覆盖在 1~5 级坡度内的分布优势指数依次降低(2.54~0.08)。高覆盖和极高覆盖分别在坡度大于 6°,15°的区域分布优势指数大于 1。2019 年植被覆盖分布的坡度梯度,低覆盖和较高覆盖区的分布特征与 1998 年差异不大,较低覆盖和中等覆盖区相对更为分散,在坡度低于 2°区域的分布优势指数比 1998 年降低近

1;高覆盖区变为在坡度小于 6°的区域分布优势指数大于 1;极高覆盖分布优势指数大于 1 区域的坡度下降到大于 6°。

1998—2019 年植被覆盖变化为不变或改善类的坡度梯度分布优势指数显示,中等覆盖及以下类转移为不变或其他高等级类覆盖主要发生在坡度小于 2°的区域,较高覆盖及以上类转移为不变或其他高等级类覆盖在各海拔均有发生(图 4B)。低覆盖转移为不变或其他高等级类覆盖主要发生在坡度小于 2°的区域,极少在 2°~15°;较低覆盖和中等覆盖转移为不变或其他高等级类覆盖主要发生在坡度小于 2°的区域,部分在大于 2°的区域;较高覆盖及以上类转移为不变或其他高等级类覆盖在不同坡度均有发生,较高覆盖和高覆盖的转移主要发生在坡度 0°~15°的区域,极高覆盖不变区在坡度大于 15°的区域占优势。



注: (A) 分布; (B) 稳定和改善; (C) 恶化; (B) 和 (C) 中, 圆内代码两位数分别表示 1998 年、2019 年植被覆盖等级, 下同。

图 3 基于高程梯度的植被覆盖特征

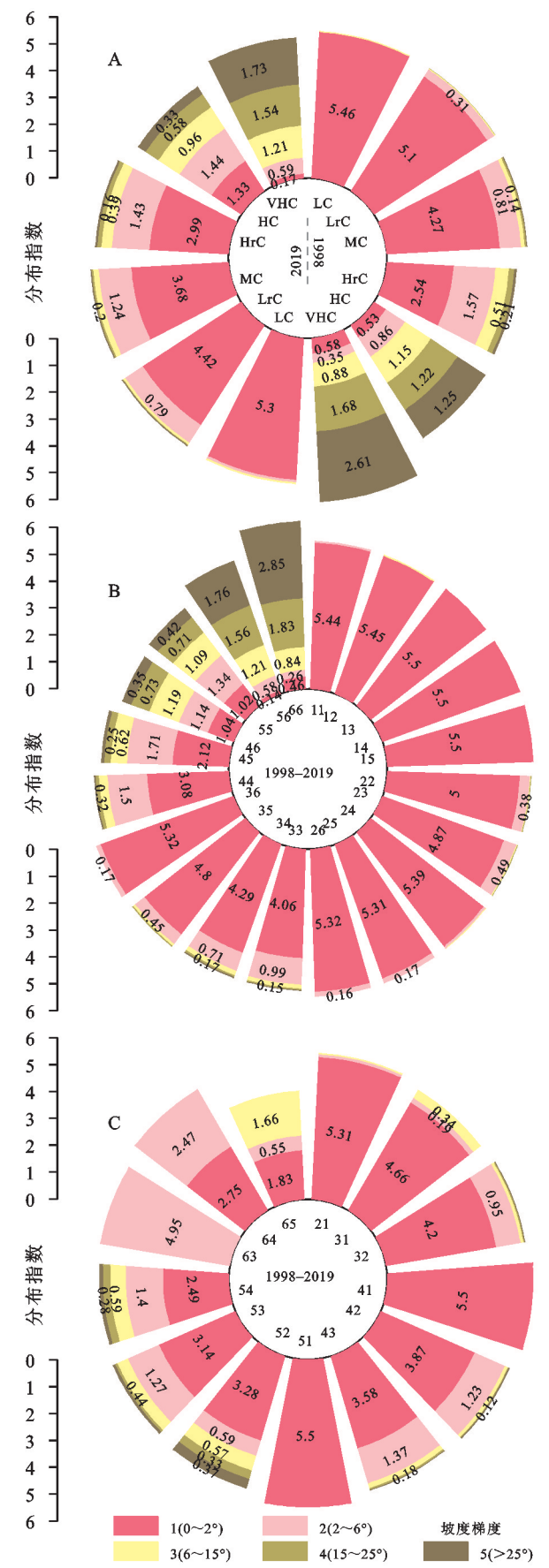
Fig. 3 Vegetation coverage characteristics based on elevation gradient

1998—2019 年植被覆盖变化为恶化类的坡度梯度分布优势指数显示, 中等覆盖及以下类和极高覆盖转移为其他低等级类覆盖主要发生在坡度小于 15° 的区域, 较高覆盖和高覆盖转移为其他低等级类覆盖在不同坡度均有发生, 转移等级跨度较大的情况多发生坡度较小的区域 (图 4C)。较低覆盖、中等覆盖两类转移为其他低等级类覆盖主要发生在坡度小于 15° 的区域, 少量在大于 15° ; 较高覆盖和高覆盖转移为其他低等级类覆盖主要发生坡度 $0^\circ \sim 6^\circ$, 部分在大于 6° 的区域; 极高覆盖转移为其他低等级类覆盖在坡度 $0^\circ \sim 15^\circ$ 的区域差异相对较小。

3.2.3 对地形位梯度的响应 地形位分级后 1~5 级面积分别占研究区的 23.27%, 20.23%, 23.38%, 21.57% 和 11.55%, 差异较小。1998 年、2019 年植被覆盖分布地形位梯度的分布优势指数显示, 中等覆盖及以下在地形位 1 级区域占优势, 极高覆盖在 1 级区域相对占优势, 较高覆盖和高覆盖为过渡等级 (图 5A)。1998 年植被覆盖分布的地形位梯度, 低覆盖和较低覆盖在地形位 1 级区的分布优势指数大于 4, 中等覆盖 (3.91) 也在该区域占优势; 较高覆盖在 1~5 级坡度内的分布指数依次降低 (2.61~0.04)。高覆盖和极高覆盖分别在地形位 3 级、4 级的区域分布优势指数大于 1。2019 植被覆盖分布的地形位梯度, 较高覆盖及以下的分布特征与 1998 年差异不大; 高覆盖变为在地形位低于 2 级的区域分布优势指数大于 1; 极高覆盖分布优势指数大于 1 区域的地形位降低为 3 级以上。

1998—2019 年植被覆盖变化为不变或改善类的地形位梯度分布优势指数显示, 中等覆盖及以下类转移为不变或其他高等级类覆盖主要发生在 3 级地形位区域, 尤其是 1 级, 较高覆盖及以上类转移为不变或其他高等级类覆盖在各地形位均有发生 (图 5B)。低覆盖、较低覆盖两类转移为不变或其他高等级类覆盖主要发生在 1 级地形位, 少量在 2~3 级; 中等覆盖转移为不变或其他高等级类覆盖主要发生在 1~2 级地形位; 较高覆盖转移为不变或其他高等级类覆盖主要发生 1~2 级且扩展到其他地形位; 高覆盖和极高覆盖转移为不变或其他高等级类覆盖逐渐由 1~3 级地形位占优势变成 3~5 级占优势。

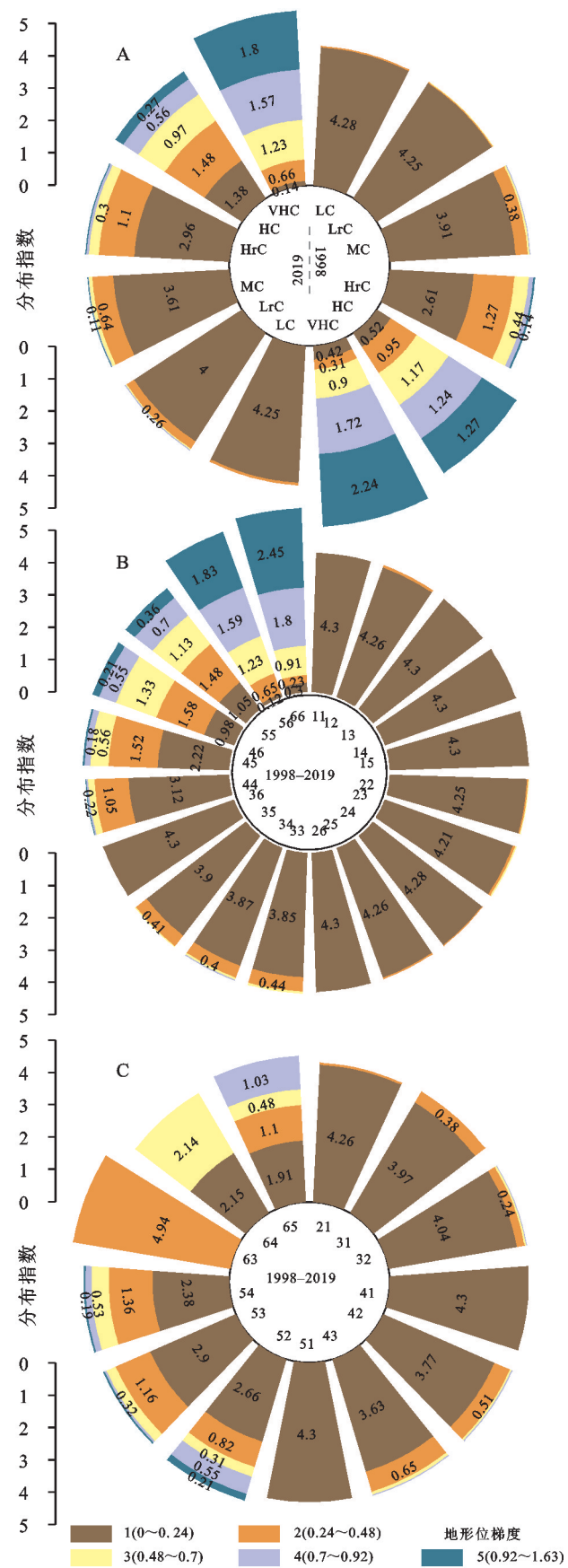
1998—2019 年植被覆盖变化为恶化类的地形位梯度分布优势指数显示, 中等覆盖及以下类和极高覆盖转移为其他低等级类覆盖主要发生在 3 级地形位及以下的区域, 较高覆盖和高覆盖转移为其他低等级类覆盖在不同地形位均有发生, 转移等级跨度较大的情况多发生地形位较低的区域 (图 5C)。较低覆盖、中等覆盖两类转移为其他低等级类覆盖主要发生在 1~2 级地形位, 极少在 3~4 级; 较高覆盖和极高覆盖转移为其他低等级类覆盖发生 1~4 级地形位, 主要在 1~2 级且极高覆盖转移的区域差异相对较小; 高覆盖转移为其他低等级类覆盖在不同地形位均有发生且区域差异相对较小。



注: (A) 分布; (B) 稳定和改善; (C) 恶化。

图 4 基于坡度梯度的植被覆盖特征

Fig. 4 Vegetation coverage characteristics based on slope gradient



注: (A) 分布; (B) 稳定和改善; (C) 恶化。

图 5 基于地形位置指数的植被覆盖特征

Fig. 5 Vegetation coverage characteristics based on terrain position index gradient

4 讨论与结论

4.1 讨论

陆地变绿是近几十年全球生物圈变化最为显著的特征之一^[34]。江西和福建植被覆盖在内陆山地丘陵区较高,沿江、沿海等人口密集的城市区相对较低,植被覆盖较好且变化的整体趋势仍是增加,这与相关研究的结果基本一致。植被覆盖变化原因方面,对江西和福建植被覆盖变化研究表明,气温影响强于降水量,但存在空间差异和时间滞后^[10,20];地形因子、社会经济、土地利用变化等非气象因素对植被覆盖分布与变化贡献更明显^[7,12,15,23];人工林面积增加和裸地面积减少导致植被覆盖面积增加,快速城镇化导致植被覆盖面积减少^[18];土地利用与降水的交互作用对江西植被覆盖变化的解释力最强^[21]。此外本研究还表明2010—2015年植被覆盖改善最明显,这可能与水土流失治理以及政府政策支持生态环境保护有关。2009年《鄱阳湖生态经济区规划》、2016年《国家生态文明试验区(福建)实施方案》和2017年《国家生态文明试验区(江西)实施方案》相继公布,说明政府层面越来越重视生态环境保护与经济社会发展协同。

本研究不足之处在于仅选择5个年份分析植被覆盖时空特征,对于二十余年连续变化特征表现不足。然而本研究借用土地利用/覆被变化研究中的动态度、转移等思路分析不同年份植被覆盖时空特征,并利用图的形式代替表格展示地形梯度差异,一定程度上给当前研究领域增加了多样化选择。

4.2 结论

(1) 1998—2019年江西和福建的植被覆盖整体较高,尤其表现在山地丘陵区;江西鄱阳湖沿岸和福建沿海地带植被覆盖较小,且整体变化较小。中等覆盖及以下区域的面积比例(1.97%~3.8%)远低于较高覆盖及以上区域(96.2%~98.03%),且极高覆盖区扩张明显,表明植被覆盖度增加。植被覆盖分布、动态度和转移均显示了2010—2015年变化更显著,尤其表现在极高覆盖的扩张。极高覆盖区在20多年间增加巨大面积,主要来源于高覆盖区转移。

(2) 植被覆盖分布基本呈现两大类特征,中等覆盖及以下主要在地形梯度1~2级(海拔低于200 m、坡度小于6°、地形位小于0.48),较高覆盖及以上在各地形梯度内均有分布,较为分散,且覆盖度越高有向3~5级(海拔高于200 m、坡度大于6°、地形位大于0.48)分布趋势。

(3) 植被覆盖不变或改善类的地形梯度基本呈现三大类特征,低覆盖转移主要发生在1级地形梯

度,较低覆盖和中等覆盖转移主要发生在1~3级(海拔低于500 m、坡度小于15°、地形位小于0.7),尤其是1级,较高覆盖及以上在5类地形梯度均有发生且相对分散。植被覆盖恶化类的地形梯度基本也呈现三大类特征,中等覆盖及以下的转移多发生在1~3级,尤其是1级,较高覆盖及以上在5类地形梯度多有发生且相对分散,转移等级跨度较大的情况多发生在较低等级的地形梯度。

参考文献:

- [1] 刘婷婷,杨晓霞,叶许春,等.人类活动对2000—2020年鄱阳湖流域陆地植被覆盖变化的影响[J].水土保持通报,2022,42(4):320-329.
Liu T T, Zhang X X, Ye X C, et al. Effects of human activities on terrestrial vegetation coverage change of Poyang Lake Basin during 2000—2020[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(4):320-329.
- [2] 田智慧,任祖光,魏海涛.2000—2020年黄河流域植被时空演化驱动机制[J].环境科学,2022,43(2):743-751.
Tian Z H, Ren Z G, Wei H T. Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020[J]. Environmental Science, 2022,43(2):743-751.
- [3] 辛宇,孙梦鑫,张岳,等.2000—2020年四川省植被覆盖时空变化特征及其气候驱动因子[J].水土保持通报,2022,42(4):312-319.
Xin Y, Sun M X, Zhang Y, et al. Spatiotemporal characteristics of vegetation cover and climate driving factors in Sichuan Province from 2000 to 2020[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(4):312-319.
- [4] 谢晓华,赖日文,李永实.基于RS技术的闽江流域植被覆盖度时空变化分析[J].贵州大学学报:自然科学版,2008,25(5):536-539.
Xie X H, Lai R W, Li Y S. The analysis and appraisal of vegetation coverage pattern in minjiang Watershed[J]. Journal of Guizhou University: Natural Sciences, 2008,25(5):536-539.
- [5] 高倩倩,陈灿,刘贺娜,等.闽江流域植被覆盖度时空变化及地形分异特征[J].林业资源管理,2022(2):91-99.
Gao Q Q, Chen C, Liu H N, et al. Spatiotemporal variations and topographic differentiation of fractional vegetation cover in minjiang River[J]. Forest Resources Management, 2022(2):91-99.
- [6] 张灿,徐涵秋,张好,等.南方红壤典型水土流失区植被覆盖度变化及其生态效应评估:以福建省长汀县为例[J].自然资源学报,2015,30(6):917-928.
Zhang C, Xu H Q, Zhang H, et al. Fractional vegetation cover change and its ecological effect assessment in a typical reddish soil region of Southeastern China;

- Changting county, Fujian province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(6): 917-928.
- [7] 田地, 张厚喜, 刘政, 等. 地形因子对长汀县植被覆盖度时空特征的驱动影响[J]. *福建农林大学学报: 自然科学版*, 2019, 48(6): 796-802.
- Tian D, Zhang H X, Liu Z, et al. Impacts of topographical factors on temporal and spatial characteristics of fractional vegetation coverage in Changting County [J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2019, 48(6): 796-802.
- [8] 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.
- Qiao W H, Wang Q. Characteristics of vegetation coverage in coastal zone of Fujian Province from 2001 to 2016 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(1): 236-242.
- [9] 吴娇, 李恒凯, 雷军. 东江源区植被覆盖时空演变遥感监测与分析[J]. *江西理工大学学报*, 2017, 38(1): 29-36.
- Wu J, Li H K, Lei J. Remote sensing monitoring of spatiotemporal variation of vegetation cover in Dongjiang source area[J]. *Journal of Jiangxi University of Science and Technology*, 2017, 38(1): 29-36.
- [10] 刘明霞, 刘友存, 陈明, 等. 2000—2018 年赣江上游植被覆盖度时空演化及其对气候变化的响应[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(5): 284-290.
- Liu M X, Liu Y C, Chen M, et al. Spatiotemporal evolution of vegetation coverage and its response to climate change in upper reaches of Ganjiang River basin during 2000 to 2018[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(5): 284-290.
- [11] Zhang J, Zhang L, Xu C, et al. Vegetation variation of mid-subtropical forest based on MODIS NDVI data: A case study of Jinggangshan City, Jiangxi Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(1): 7-12.
- [12] 赵丽红, 王屏, 欧阳勋志, 等. 南昌市植被覆盖度时空演变及其对非气候因素的响应[J]. *生态学报*, 2016, 36(12): 3723-3733.
- Zhao L H, Wang P, Ouyang X Z, et al. An analysis of the spatio-temporal variation in fractional vegetation cover and its relationship with non-climate factors in Nanchang City, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(12): 3723-3733.
- [13] 徐丽, 彭浩贤, 潘萍, 等. 江西省兴国县植被覆盖度及其空间格局变化[J]. *浙江农林大学学报*, 2021, 38(6): 1117-1126.
- Xu L, Peng H X, Pan P, et al. Vegetation coverage and its spatial pattern changes in Xingguo County, Jiangxi Province[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2021, 38(6): 1117-1126.
- [14] 吴志杰, 何国金, 黄绍霖, 等. 南方丘陵区植被覆盖度遥感估算的地形效应评估[J]. *遥感学报*, 2017, 21(1): 159-167.
- Wu Z I, He G J, Huang S L, et al. Terrain effects assessment on remotely sensed fractional vegetation cover in hilly area of southern China [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(1): 159-167.
- [15] 杨辰丛海. 2000—2021 年平和县植被覆盖度变化及其地形驱动因子分析[J]. *浙江农业科学*, 2021, 62(8): 1625-1628.
- Yang C C H. Analysis of vegetation coverage changes and its terrain driving factors in Pinghe County from 2000 to 2021[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2021, 62(8): 1625-1628.
- [16] 周梦遥, 何东进, 覃德华, 等. 1995—2015 年厦门市土地利用变化对植被覆盖度的影响[J]. *森林与环境学报*, 2017, 37(4): 440-445.
- Zhou M Y, He D J, Tan D H, et al. Impacts of land use change on vegetation coverage in Xiamen City from 1995 to 2015[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2017, 37(4): 440-445.
- [17] 罗文玮, 赖日文, 陈思雨, 等. 基于 NDVI 的福建省植被变化特征分析[J]. *森林与环境学报*, 2016, 36(2): 141-147.
- Luo W W, Lai R W, Chen S Y, et al. Analysis of vegetation variation characteristics in Fujian based on NDVI[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2016, 36(2): 141-147.
- [18] 李超, 赵淑清, 方精云. 1975—2014 年福建省植被覆盖变化及其驱动因素[J]. *植物生态学报*, 2017, 41(2): 157-164.
- Li C, Zhao S Q, Fang J Y. Vegetation cover change and driving factors in Fujian Province between 1975 and 2014[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 41(2): 157-164.
- [19] 王文辉, 马祥庆, 邹显花, 等. 2000—2010 年福建省植被覆盖度的时空演变特征[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(4): 234-239.
- Wang W H, Ma X Q, Zhou X H, et al. Spatiotemporal Variations of Vegetation Change in Fujian Province from 2000 to 2010 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(4): 234-239.
- [20] 郭梦媚, 郭胜利, 周佳雯, 等. 江西省植被 NDVI 变化及其对气候变化的响应[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(11): 421-426.
- Guo M M, Guo S L, Zhou J W, et al. Variation of vegetation NDVI and its response to climate change in Jiangxi Province [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(11): 421-426.
- [21] 廖成浩, 曾艳, 姚昆, 等. 江西植被 EVI 时空动态监测及

- 驱动因素分析[J].云南大学学报:自然科学版,2022,44(5):981-989.
- Liao C H, Zeng Y, Yao K, et al. Spatio-temporal dynamic monitoring and driving factor analysis of vegetation EVI in Jiangxi Province[J]. Journal of Yunnan University(Natural Sciences), 2022, 44(5):981-989.
- [22] 廖凯涛,宋月君,谢颂华,等.基于 Google Earth Engine 的江西省植被覆盖度时空变化特征分析[J].中国水土保持,2022(10):64-67.
- Liao K T, Song Y J, Xie S H, et al. Spatial and temporal variation characteristics of vegetation coverage in Jiangxi Province based on google earth engine[J]. Soil and Water Conservation in China, 2022(10):64-67.
- [23] 齐文,邱炳文,范占领.闽赣自然植被覆盖格局及其驱动机制分析[J].长江科学院院报,2016,33(12):138-143.
- Qi W, Qiu B W, Fan Z L. Vegetation cover pattern in Fujian and Jiangxi Provinces and its driving mechanism based on geographically weighted regression model[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research, 2016, 33(12):138-143.
- [24] 陈佳,李忠武,方怒放,等.红壤丘陵区不同植被覆盖阈值小流域时空分布规律[J].水土保持研究,2023,30(2):186-192.
- Chen J, Li Z W, Fang N F, et al. Spatiotemporal patterns of small watersheds with different vegetation coverage thresholds in red soil hilly region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(2):186-192.
- [25] Wang X, Liu G, Xiang A, et al. Terrain gradient response of landscape ecological environment to land use and land cover change in the hilly watershed in South China[J]. Ecological Indicators, 2023,146:109797.
- [26] 张丽,王平,段霄,等.大山包地区土地利用的地形梯度效应与空间结构特征[J].水土保持通报,2022,42(2):315-321.
- Zhang L, Zhang P, Duan X, et al. Terrain gradient effect and spatial structure characteristics of land use in Dashanbao area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(2):315-321.
- [27] 尉文艺,李旭东.贵州省北盘江流域 2000—2018 年 NDVI 变化及其与地形梯度、人口分布的关系[J].水土保持通报,2021,41(6):361-368.
- Wei W Y, Li X D. Changes of NDVI in Beipan River Basin of Guizhou Province and its relationship with terrain gradient and population distribution during 2000—2018[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(6):361-368.
- [28] 龙映豪,李旭东,程东亚.山区植被覆盖度变化的地形分异特征:以贵州开阳县为例[J].水土保持研究,2022,29(5):268-275.
- Long Y H, Li X D, Cheng D Y. Topographic differentiation of vegetation coverage changes between shaded slopes and sunny slopes in mountainous areas: A case of Kaiyang County, Guizhou Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(5):268-275.
- [29] 刘光旭,王小军,徐新创,等.低山丘陵区暴雨洪水特征与洪灾风险评估:以赣江上游为例[J].水土保持通报,2019,39(5):236-241.
- Liu G X, Wang X J, Xu X C, et al. Characteristics of rainstorm flood and risk assessment in a low mountainous and hilly area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(5):236-241.
- [30] 王小军,刘光旭,相爱存,等.江西省油茶综合生产潜力与资源利用效率评估[J].应用生态学报,2020,31(4):1175-1184.
- Wang X J, Liu G X, Xiang A C, et al. Evaluation of comprehensive potential productivity and resource utilization efficiency of Camellia oleifera in Jiangxi Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(4):1175-1184.
- [31] 王小军,刘光旭,肖彤.气候变化情景下油茶生长的适宜性特征[J].热带地理,2020,40(5):868-880.
- Wang X J, Liu G X, Xiao T. Suitability characteristics of Camellia oleifera growth under climate change scenarios[J]. Tropical Geography, 2020,40(5):868-880.
- [32] 王小军,刘光旭,王炳香,等.基于气候因子的油茶含油率时空特征与种植分区研究[J].云南大学学报:自然科学版,2020,42(6):1202-1211.
- Wang X J, Liu G X, Wang B X, et al. Study on temporal and spatial characteristics of oil content and planting divisions of Camellia oleifera based on climate factors[J]. Journal of Yunnan University(Natural Sciences), 2020,42(6):1202-1211.
- [33] 刘光旭,王小军,相爱存,等.赣江中上游地区土地利用变化空间分异与驱动因素[J].应用生态学报,2021,32(7):2545-2554.
- Liu G X, Wang X J, Xiang A C, et al. Spatial heterogeneity and driving factors of land use change in the middle and upper reaches of Ganjiang River, southern China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(7):2545-2554.
- [34] Piao S, Wang X, Park T, et al. Characteristics, drivers, and feedback of global greening[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020,1(1):14-27.