

# 2000~2020 年岷江上游植被 NDVI

## 时空变化及其地形响应

向珈瑶<sup>1, 2</sup> 彭文甫<sup>1, 2</sup> 陶帅<sup>1, 21</sup>

(1. 四川师范大学地理与资源科学学院, 四川 成都 610068; 2. 四川师范大学

西南土地资源评价与监测教育部重点实验室, 四川 成都 610068)

**【摘要】:** 岷江上游地区承载着不可替代的资源支撑、生态服务与环境调节功能, 是国家生态红线的水土流失敏感主控区域, 也是国家生存与发展重要的自然基础。目前, 该区域生态和经济社会过程在空间上的叠加, 不仅影响到资源、环境与生态等功能的发挥, 而且对岷江流域乃至长江上游的生态安全和区域的可持续发展均构成严重威胁。认识和理解岷江上游植被 NDVI 时空变化及其地形响应机制, 分析植被变化最佳地形位, 可以为该地区生态环境建设提供方向指引与科学参考。综合运用遥感与 GIS 技术对岷江上游植被 NDVI 时空变化进行分析, 并通过空间叠加分析详细探讨了植被 NDVI 时空变化对海拔、坡度、坡向与地形起伏度等地形因子的响应, 结合不同植被变化类型的分布指数进一步明确了不同地形因子背景下植被变化地域分异规律, 得出了不同植被变化类型最佳地形位。结果表明: (1) 2000~2020 年间, 岷江上游地区植被覆盖良好且格局稳定, 主要沿河谷地带扩散状分布约有 26.62% 的区域植被显著增长, 仅有 1.21% 的区域植被显著退化; (2) 植被变化趋势类型在高程、坡度、坡向与地形起伏度等不同地形位下具有显著不同的分布格局, 整体而言不同地形位下面积占比波动较小, 分布指数各异; (3) 植被显著退化区域的最佳地形位分别为受人类活动影响的“优势”地带与受自然条件制约的“劣势”地带, 植被显著增长区域的最佳地形位主要分布在海拔相对较低, 而坡度、起伏度较大且为阴坡的人类聚落辐射区域。

**【关键词】:** 归一化植被指数 趋势分析 空间叠加 地形因子 岷江上游

**【中图分类号】:** Q948 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)07-1534-14

作为陆地生态系统的主体, 植被与气候、地形、土壤、人类活动等要素关系密切, 在保持水土、涵养水源、改善土壤、调节气候、净化空气等生态功能方面具有不可替代的作用<sup>[1,2,3]</sup>。在全球变化背景下, 植被变化直接影响全球或区域的生态系统平衡和生境安全。研究植被变化及其响应机制对落实生态保护理念与明晰全球变化机制意义重大, 成为许多学者关注的热点方向。其中, 基于遥感影像并借助 RS 与 GIS 技术展开植被变化监测在尺度、效率上具有不可比拟的优势, 成为主流的研究方法之一。在各种遥感影像产品中, MODIS 数据以其大范围、长时序、可重复性监测而在植被动态监测方面获得广泛应用, 形成了以归一化植被指数 (NDVI, Normalized Different Vegetation Index) 为主的监测陆地植被生长变化方法体系<sup>[4]</sup>。

近年来, 国内外诸多学者基于长时间序列的 NDVI 数据集, 在不同时空尺度上对地表植被时空变化规律进行了深入研究, 主

**作者简介:** 向珈瑶(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境遥感. E-mail: 799507219@qq.com; 彭文甫 E-mail: pwfzh@126.com

**基金项目:** 教育部人文社科规划基金项目(17YJA850007); 国家自然科学基金项目(41371125)

要集中于区域尺度 NDVI 变化趋势及对气候变化、人类活动与地形等要素的响应机制<sup>[5,6,7]</sup>。其中,地形因子作为影响植被变化的自然环境本底,通过地势地貌、坡度等外部形态影响区域小气候差异及人类活动频率,进而影响植被变化时空格局,已得到许多研究的证实<sup>[7,8,9,10]</sup>。例如,近年来,童晓伟等<sup>[6]</sup>运用一元线性回归趋势分析、偏相关分析与地形差异修正指数(分布指数)分析了桂西北喀斯特区域植被变化趋势及空间差异,并结合气象和地形数据分析了植被与气候、地形的响应关系。魏建琪等<sup>[11]</sup>通过像元二分模型估算了 2000 与 2015 年卧龙自然保护区植被覆盖度,借助栅格差值计算分析了植被变化状况,并运用地形差异修正指数揭示了植被变化对地形因子的响应机制。姚镇海等<sup>[12]</sup>综合运用 GIS 与 RS 技术分析了 2001~2019 年安徽省植被覆盖度分布状况,探讨了其时间变化特征及其与海拔、坡向的响应。但是,多数研究都是选取典型年份分析植被变化,利用长时间序列数据进行植被变化趋势分析的研究较少。在分析长时间序列植被趋势变化的基础上,对不同背景下地形因子的响应机制进行探讨,能够进一步揭示植被时空变化地域分异规律,助力区域植被恢复与生态保护。

岷江上游地处青藏高原东缘,是长江上游生态安全屏障的重要组成部分和成都平原的水源“生命线”。但由于区内复杂的地理环境,地形山高坡陡,地质灾害频发,水土流失严重,人类活动影响剧烈,生态环境极为脆弱,因而也是我国典型的生态脆弱区与敏感区,受到许多学者的关注。目前,关于岷江上游的相关研究主要集中在地质灾害<sup>[13,14]</sup>、水文<sup>[15,16]</sup>、土壤<sup>[17,18]</sup>与生态系统服务价值<sup>[19,20]</sup>等方面,涉及该区域长时间序列植被变化及地形因子响应机制的研究较少。因此,本文运用 MODIS 遥感影像提取的年度 NDVI 数据表征植被覆盖度,运用 TheilSen 斜率与 Manna-Kendall 趋势分析方法对 2000~2020 年岷江上游植被 NDVI 时空变化进行分析,并借助 GIS 技术与各地形因子进行空间叠加分析,深入揭示岷江上游地区植被变化地域分异规律,以期在当地未来植被保护、水土保持与生态环境建设提供方向指引与科学参考。

## 1 研究区概况

岷江上游地处青藏高原东缘,靠近四川盆地西北部,介于 102° 34' 55" E~104° 15' 50" E,30° 44' 33" N~33° 09' 15" N 之间,在行政区划上大体与阿坝藏族羌族自治州下辖汶川县、理县、茂县、松潘县、黑水县五县一致,流域面积约为  $2.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。岷江上游地貌以高原和高山峡谷为主,地势西北高东南低,地形起伏大,平均海拔高度约为 3400m,且地质结构复杂,新构造活动强烈,多地震、滑坡、泥石流等自然灾害。岷江上游气候区划上包括中亚热带、北亚热带、高原气候区,气候从亚热带到温带、寒温带、寒带,呈明显的垂直性差异;具有干、雨季分明、降水分配不均的特点,年均降雨量约为 637.7mm,且 80%以上降雨集中在 5~10 月,降雨多为强度较大而历时短暂的暴雨;气温较低且年差较小、日差较大,年平均气温为 11℃,日照充足,年平均陆面蒸发量达 793.4mm;河谷地带焚风效应显著,年降雨量最低的不足 500mm,蒸发量达 1340mm。随着海拔和水热条件的变化,植被和土壤类型具有明显的垂直地带性,植被类型随海拔由低到高分布有干旱河谷灌丛、亚热带阔叶林、亚高山针叶林、亚高山草甸、高山灌丛等生态类型,土壤类型由低到高分布有褐土、棕壤、黄棕壤、暗棕壤、灌丛草甸土、草甸土、亚高山草甸土和高山寒漠土等<sup>[21]</sup>,均为典型的山地立体结构。

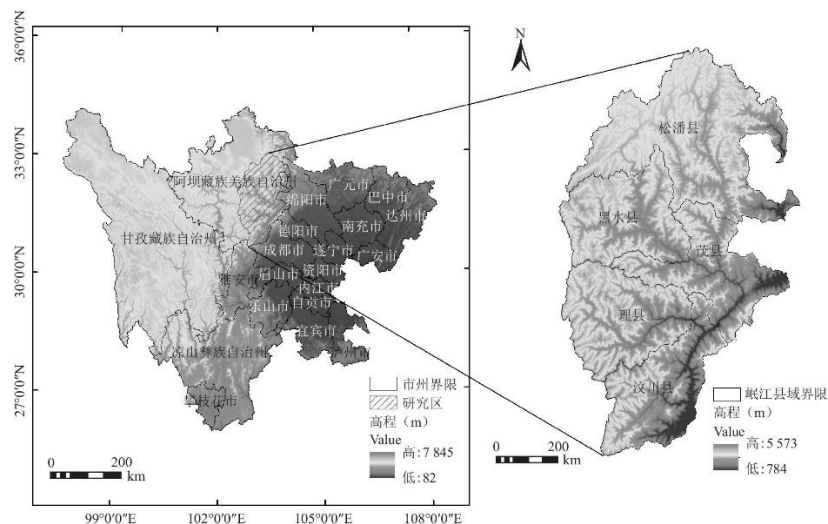


图 1 研究区位置

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源及处理

研究所采用的 NDVI 数据来自美国国家航天局 MOD13Q1 陆地 3 级标准数据产品(<https://search.earthdata.nasa.gov/search>), 空间分辨率为 250m×250m, 时间分辨率为 16d。本文选取了 2000 年 3 月至 2020 年 12 月的 MODISNDVI 数据共 480 期影像为数据源, 首先利用 MRT 进行提取和投影转换的批量处理、然后再利用 ArcGIS 软件进行批量拼接和剪裁以及对坐标系进行投影转换等处理, 运用 ArcGIS 软件对 NDVI 数据采用最大值合成法(MaximumValueComposite, MVC)进而消除云层、大气和太阳高度角的干扰, 以合成年度 NDVI 数据, 用于表征岷江上游植被覆盖度并分析其时空变化。

各类地形数据提取自 DEM 数据, 来源于 NASA 提供的 ASTERGDEM2 数据, 原始空间分辨率为 30m, 通过重采样为 250m 将其与 MODIS 数据像元尺度相统一, 进一步进行裁剪、拼接, 并利用 ArcGIS 空间分析工具集下的表面分析、焦点统计等获取岷江上游的高程、坡度、坡向、地表起伏度等地形数据。在参考前人研究成果基础上<sup>[22,23,24]</sup>, 结合岷江上游实际地理环境情况, 最后对各地形因子进行重分类处理, 其分级如下:

#### (1) 高程:

岷江上游高程范围为 784~5573m, 平均海拔较高, 以高原、高山与半高山为主。参考通用的高程划分标准并结合岷江上游海拔情况, 将<1500m 的区域划分为低海拔区, 1500~5000m 则以 500m 为间隔, ≥5000m 的区域划分为极高海拔区, 共划分 9 个高程带如图 2a。

#### (2) 坡度:

岷江上游坡度范围在 0°~58° 之间, 南部地势较为陡峭, 北部稍缓。参考国际通用的坡度划分标准, 按照<5°, 5°~15°, 15°~25°, 25°~35°, ≥35° 将其划分为 5 个坡度带如图 2b。

#### (3) 坡向:

将坡向数据按照平地(-1)、北坡(0°~22.5° 和 337.5°~360°)、东北坡(22.5°~67.5°)、东坡(67.5°~112.5°)、东南坡(112.5°~157.5°)、南坡(157.5°~202.5°)、西南坡(202.5°~247.5°)、西坡(247.5°~292.5°)、西北坡(292.5°~337.5°)的标准划分为 9 个坡向带如图 2c。

#### (4) 地形起伏度:

通过统计相邻领域高差得到, 岷江上游地形起伏度范围在 0~1056m 之间, 地形起伏极为悬殊。参考国内相关学者提出的地形起伏度划分标准并结合研究区特点, 将其按照<100m, 100~200m, 200~400m, 400~600m, ≥600m 的标准划分为 5 个地形起伏度带如图 2d。

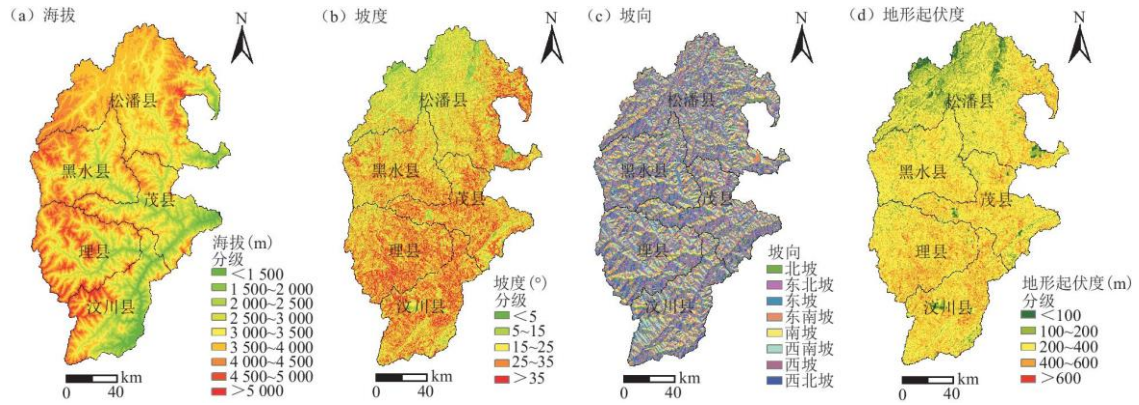


图2 岷江上游地形因子分级

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 植被变化趋势分析

TheilSen 斜率可以有效避免时间序列数据缺失和数据分布形态的影响，并且可以消除异常值对时间序列的干扰<sup>[26]</sup>。Sen 氏斜率计算公式如下：

$$\beta = \text{median} \frac{NDVI_j - NDVI_i}{j - i} \quad (1)$$

式中： $1 < i < j < n$ ， $i$ 、 $j$  为时间序列数； $NDVI_i$ 、 $NDVI_j$  分别为  $i$ 、 $j$  时间序列的归一化植被指数即植被覆盖度。当斜率  $\beta$  大于 0 则表示存在上升趋势，小于 0 表示存在下降趋势。

Mann-Kendall (M-K) 检验是用于分析数据序列随时间的变化趋势的一种非参数的统计检验方法<sup>[26]</sup>，不需要样本数据遵从特定的分布，能够有效的剔除异常值，适用于非正态分布的数据<sup>[26]</sup>。其检验过程如下：

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(\theta) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases} \quad (3)$$

由此构建趋势检验的统计量：

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}}S > 0 \\ 0S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}}S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

在公式(2)、(3)、(4)的检验过程中,

$$\theta = NDVI_j - NDVI_i$$

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

式中:  $NDVI_i$  和  $NDVI_j$  分别表示第  $i$  年和第  $j$  年的 NDVI 值;  $n$  为时间序列的长度;  $sgn$  为函数符号。在给定的显著性水平  $\alpha$  下, 当  $|Z_{MK}| > \mu_{1-\alpha/2}$  时, 表示研究序列在  $\alpha$  水平下存在显著变化。所以, 本文采用 TheilSen 斜率与 Manna-Kendall 趋势分析方法相结合, 分析岷江上游植被覆盖度在像元尺度上的变化趋势及显著性。据此可以将植被变化趋势分为 6 个等级: 极显著退化 ( $\beta < 0, \alpha \leq 0.01$ ), 显著退化 ( $\beta < 0, 0.01 \leq \alpha < 0.05$ ), 不显著退化 ( $\beta < 0, \alpha \geq 0.05$ ), 不显著增长 ( $\beta > 0, \alpha \geq 0.05$ ), 显著增长 ( $\beta > 0, 0.01 \leq \alpha < 0.05$ ), 极显著增长 ( $\beta > 0, \alpha \leq 0.01$ )。

## 2.2.2 叠加分析与分布指数

利用 GIS 空间分析功能, 将植被变化趋势等级图层分别与高程、坡度、坡向和地表起伏度图层进行叠加分析, 统计各级地形因子对应的不同植被变化状况, 可以分析植被变化与单一地形因子之间的关系; 再将植被变化趋势等级图层与全部地形因子叠置成综合图层, 可以进一步探讨影响植被时空变化的最佳地形位, 明晰其地域分异规律。

进一步地, 为了更全面了解不同地形条件上植被变化状况, 通过引入分布指数以消除不同地形因子自身面积分布差异造成的影响, 明确不同地形因子级别对植被 NDVI 时空变化的影响力, 以便进行有效的横向评价<sup>[22]</sup>。分布指数计算公式如下:

$$P = \frac{S_{ie}/S_i}{S_e/S} \quad (5)$$

式中:  $P$  为植被变化趋势等级  $i$  在第  $e$  种地形因子级别下的分布;  $S_{ie}$  为植被变化趋势等级  $i$  在第  $e$  种地形条件下的面积;  $S_i$  为研究区内植被变化趋势等级  $i$  的总面积;  $S_e$  为研究区内第  $e$  种地形因子级别的总面积;  $S$  为研究区总面积。当  $P > 1$  时, 表示植被变化趋势等级  $i$  在某地形位上的比重大于研究区内植被变化趋势等级  $i$  的比重, 说明该变化趋势在该类地形位上出现的频率较高, 即该地形位为植被变化趋势等级  $i$  的优势地形位, 若  $P$  值越大, 优势程度越明显。

## 3 结果与分析

### 3.1 植被时空变化趋势分析

#### 3.1.1 植被覆盖空间格局

通过逐像元求取 2000~2020 年岷江上游 NDVI 均值如图 3,可以分析岷江上游地区植被覆盖空间格局。总体上看,岷江上游多年植被覆盖处于较好的水平,大部分区域多年 NDVI 均值均在 0.6 以上,整体呈现由东向西逐渐减少的趋势。具体表现为:多年 NDVI 均值大于 0.9 的区域主要沿河谷两侧分布,集中于汶川县东南部、茂县东部及松潘县东北部等区域,理县、黑水县呈零星散状分布;此外,多年 NDVI 均值小于 0.5 的区域主要分布在海拔较高的高山区域,集中于松潘县东北部、黑水县西北部、理县中北部与汶川县西部,少部分沿河谷分布。一般将 NDVI 低于 0.15 的区域视为冰雪、裸土等非植被地表,这一类主要呈零星分布在海拔较高的区域。总体而言,多年平均 NDVI 随海拔逐渐上升呈现逐渐下降的趋势。

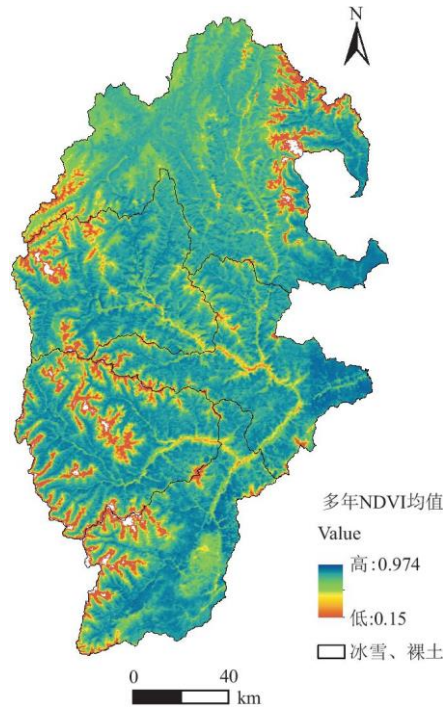


图 3 2000~2020 年岷江上游多年平均 NDVI 空间分布

### 3.1.2 植被覆盖时空变化特征

基于 TheilSen 斜率与 M-K 趋势检验,得到岷江上游植被覆盖时空变化状况及变化趋势如图 4,进一步统计除冰雪、裸地等非植被地表下垫面以外的各植被变化趋势面积占比如表 1。

TheilSen 斜率分析表明,在过去 21 年里,岷江上游绝大部分区域植被都处于缓慢增长的状态,少部分区域处于缓慢退化。结合 M-K 趋势检验结果可以发现,岷江上游植被极显著退化与显著退化区域面积占比极小,分别为 0.28%与 0.93%,主要分布在汶川县、茂县东南部、松潘县西北部及松潘县、黑水县、茂县三县交界地带;不显著退化区域面积占比达 19.2%,主要分布在汶川县大部、理县西部及黑水县北部,松潘县、茂县呈零星分布;不显著增长区域面积占比高达 53.01%,呈广泛分布的态势;显著增长与极显著增长区域面积占比分别为 13.08%与 13.5%,主要分布在茂县、松潘县大部、黑水县东南部、理县东部、汶川县东北部和东南部。总体而言,植被显著增长区域主要沿河谷地带扩散状分布。

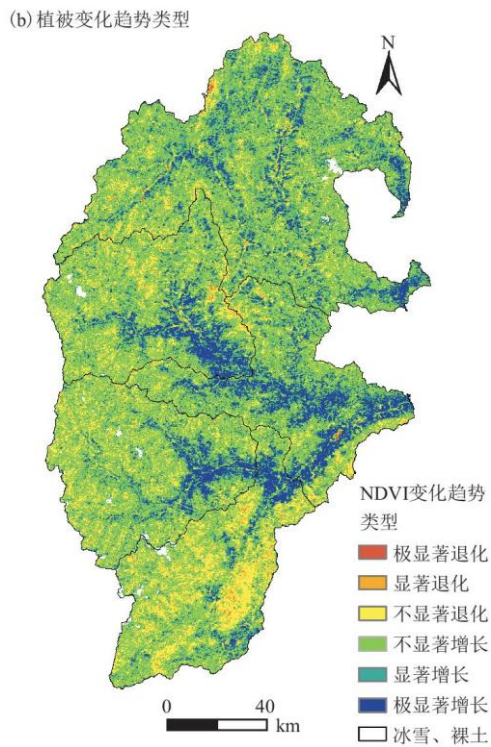
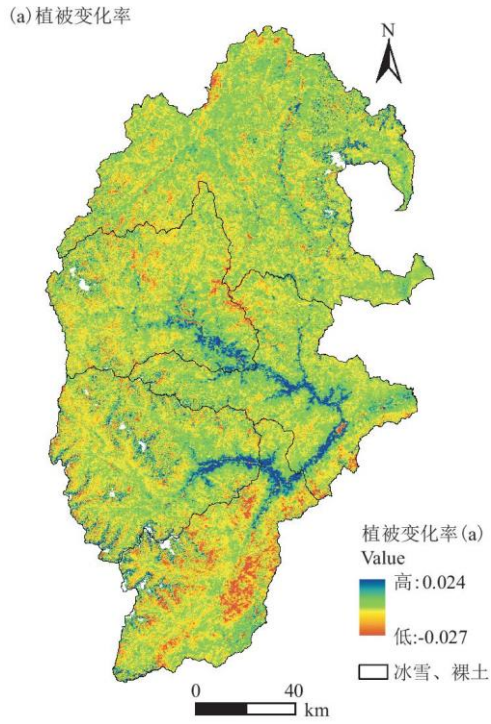


图4 岷江上游植被变化率(a)及植被变化趋势(b)

结合表1可知，岷江上游不同区域内部植被变化趋势也存在一定差异。其中，理县、黑水县、松潘县不同植被变化趋势面积状况与岷江上游整体较为一致。这3个县海拔较高，人口相对较少，社会经济活动频率不如其他两县，因而植被变化结构相对稳

定。剩下两县中，汶川县则是植被极显著退化、显著退化与不显著退化区域面积占比明显高于其他县份及全区水平，分别达 0.47%、2.28%与 33%；而植被增长区域面积明显低于全区水平，合计仅占 64.25%。究其原因，一方面是由于汶川县是岷江上游社会经济最为发达、人类活动影响最大的县份，植被恢复难度相对较大；另一方面则是由于 2008 年汶川大地震的影响，使得原有植被遭受严重破坏，植被进入缓慢恢复的阶段。茂县植被不显著退化面积占比明显低于全区水平；而显著增长、极显著增长区域面积明显高于全区水平，占比分别为 15.68%和 23.26%。这是由于茂县是阿坝州率先实施退耕还林生态建设工程的县份，且植被受地震影响相对较小，其植被恢复成效相当显著。

表 1 不同植被变化趋势面积占比 单位:%

植被变化趋势	区域					
	岷江上游	汶川县	茂县	理县	黑水县	松潘县
极显著退化	0.28	0.47	0.28	0.13	0.29	0.26
显著退化	0.93	2.28	0.63	0.66	0.89	0.59
不显著退化	19.2	33.00	12.69	21.23	19.68	14.27
不显著增长	53.01	47.48	47.46	55.92	52.83	56.86
显著增长	13.08	8.26	15.68	11.25	11.84	15.76
极显著增长	13.5	8.51	23.26	10.81	14.47	12.26

### 3.2 植被 NDVI 变化对地形的响应特征

将岷江上游植被 NDVI 变化趋势分别与高程、坡度、坡向与地形起伏度 4 个地形因子利用 ArcGIS 进行叠加分析，并计算其分布指数，进一步分析不同 NDVI 变化趋势在各地形因子上的响应特征。

#### 3.2.1 NDVI 变化的高程响应特征

高程作为最为主要的地形因子之一，其变化直接影响着气温、水分、热量的供给，是构成山地垂直立体气候结构的主要原因，并对人类活动频率产生影响，进而使植被生长出现明显的垂直地带性分布<sup>[27]</sup>。如图 5 所示，分别统计了岷江上游不同植被变化趋势在不同高程带上的面积占比及其分布指数。

如图 5a 显示，随着海拔高度的增加，不同植被变化趋势类型分布具有不同的面积占比。植被极显著退化与显著退化型面积占比总体较小，随着海拔上升呈波动下降，二者合计面积占比在<1500m 的高程带约为 2.07%，之后在 1500~3000m 的高程范围内占比约为 1.5%。植被不显著退化型占比随海拔上升逐渐增加，在 4000~4500m 高程带达到最大后降低。植被不显著增长型在绝大部分高程范围内都占有主要地位，且随着海拔的上升其面积占比呈波动趋势迅速增加高达 60%左右，仅在 1500~2000m 的高程带有所减少退居第二。植被极显著增长型面积占比随着海拔的升高而逐渐降低，在超过 4500m 的海拔后又有所增加，显著增长型占比情况与极显著增长型相对一致。值得注意的是，在海拔低于 2500m 的区域，植被极显著增长型占比均高于 30%，2500~3000m 高程带内为 24.16%。

再结合图 5b 分布指数展开分析，可以发现：不同植被变化趋势类型在不同高程带上分布指数变化剧烈。植被极显著增长型



在海拔低于 3000m 范围内均为主导优势分布 ( $1.79 < P < 2.97$ ), 随后迅速降低且未达优势分布 ( $P < 1$ ), 这也侧面印证了当地退耕还林等生态建设工程的实施成效。植被显著增长型分布相对稳定, 在海拔低于 3000m 范围内均具有优势分布, 且在 3000~3500m 高程带为主导优势分布, 而后先降低未达优势分布 ( $P < 1$ ), 然后在海拔高于 5000m 区域升高也为主导优势分布。与此同时, 在海拔低于 3000m 范围内植被极显著退化与显著退化也具有优势分布 ( $P > 1$ ), 这是由于这一区域海拔较低, 主要位于河谷地带, 是当地社会经济活动分布的主要区域, 植被受人类活动影响最为强烈。此外, 不显著增长与不显著退化型整体上呈逐渐上升趋势, 但在海拔低于 3500m 的区域都未达优势分布 ( $P < 1$ ), 而后都具有优势分布。

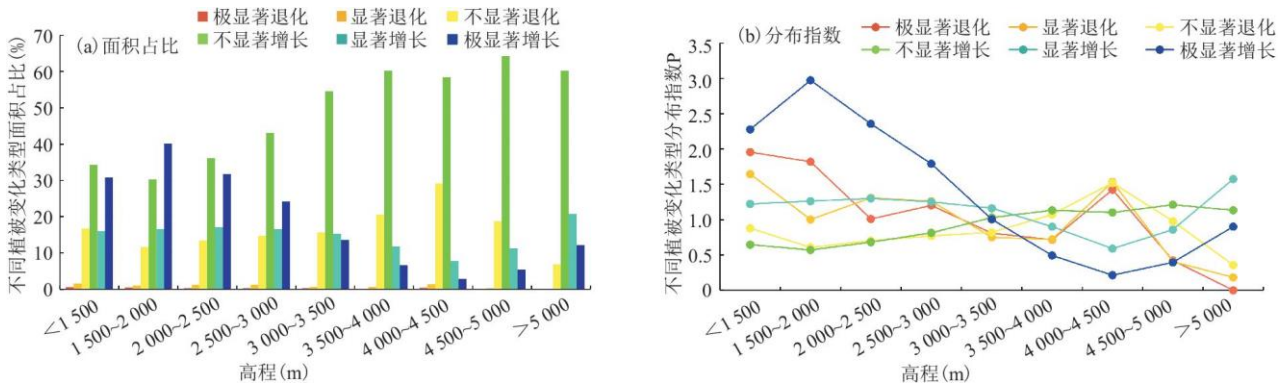


图 5 不同植被变化类型在不同高程带面积占比 (a) 及分布指数 (b)

### 3. 2. 2NDVI 变化的坡度响应特征

坡度也是主要的地形因子之一, 其大小表示不同地区的陡峭程度, 进而影响水土保持、人类活动与植被生长<sup>[27]</sup>。一般认为, 坡度大于 25° 以上的区域就不适宜进行农业生产, 需开展退耕还林等生态建设工程以涵养水源、保持水土<sup>[28]</sup>。如图 6 展示了岷江上游不同植被变化趋势在不同坡度带上的面积占比及分布指数。

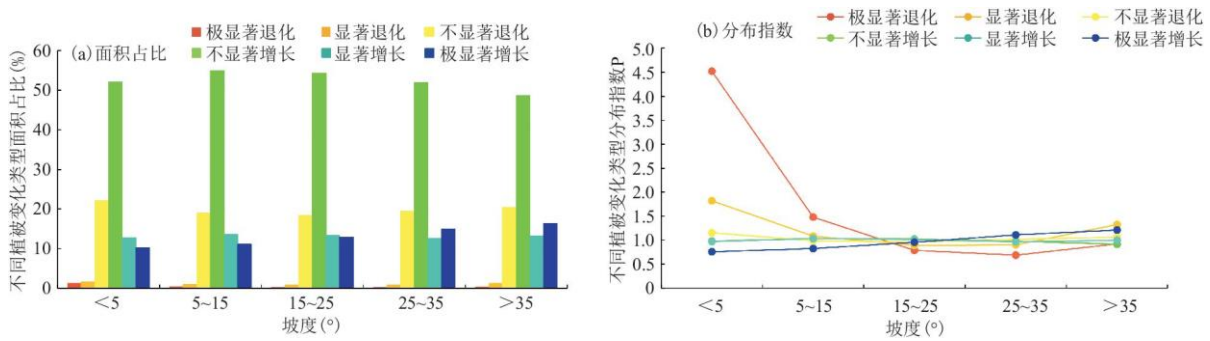


图 6 不同植被变化类型在不同坡度带面积占比 (a) 及分布指数 (b)

图 6a 显示, 随着地形陡峭程度的增加, 不同植被变化趋势类型分布波动变化。植被极显著退化与显著退化型在坡度小于 5° 区域面积占比最大累计为 2.96%, 之后随坡度增大迅速下降, 在大于 35° 区域则存在增大的趋势累计占比约 1.9%。植被不显著变化类型合计在各坡度带都具有最大的面积占比, 整体上呈逐渐微弱下降趋势, 由小于 5° 区域的 74.06% 降为大于 35° 区域的 69.02%。植被显著增长型在不同坡度带上分布占比相对一致, 在 12.67%~13.59% 之间呈微弱波动变化。随着坡度的增大, 植被极显著增长型面积占比不断上升, 由小于 5° 区域的 10.23% 增加至大于 35° 区域的 16.33%, 面积占比增长率为明显。

结合图 6b 分布指数可以发现:除了植被极显著退化型外,其他各植被变化趋势在不同坡度带上的分布指数 P 值都较为稳定。植被极显著退化型在坡度小于 15° 的区域分布优势极其明显,均为主导优势分布 ( $1.48 < P < 4.52$ ),随后迅速降低呈非优势分布 ( $P < 1$ )。植被显著退化型在坡度小于 15° 的区域也呈优势分布 ( $P > 1$ ),而后在 15° ~ 35° 的区域降低未达优势分布,在大于 35° 的区域又有所增加呈主导优势分布。植被不显著退化型则是在坡度小于 5°、大于 25° 的区域达到优势分布,在 5° ~ 25° 之间的区域呈非优势分布。不同植被退化趋势的分布指数鲜明的表现了岷江上游人类活动的坡度指向性,大多数社会经济活动分布在小于 15° 的区域,从而导致具有统计意义的植被退化占据主导分布。与此同时,植被不显著增长与显著增长型分布指数相对一致,其中,不显著增长型在 15° ~ 25° 坡度区域呈主导优势分布 ( $P > 1$ )。植被极显著增长型分布指数同面积占比一致,随着坡度增大而不断增加,在小于 25° 区域都未达优势分布,而在其他区域都为优势分布,且 25° ~ 35° 区域呈主导优势分布。不同植被增长趋势的分布指数情况反映了岷江上游地区退耕还林等生态建设工程落实较为到位,在坡度大于 25° 以上的区域植被恢复良好。

### 3.2. 3NDVI 变化的坡向响应特征

坡向对地表太阳辐射的多少有决定性作用,是造成局地小气候分异的重要地形差异<sup>[29,30]</sup>,阳坡对植被生长具有重要的促进作用。如图 7 展示了岷江上游不同植被变化趋势在不同坡向带上的面积占比及分布指数。

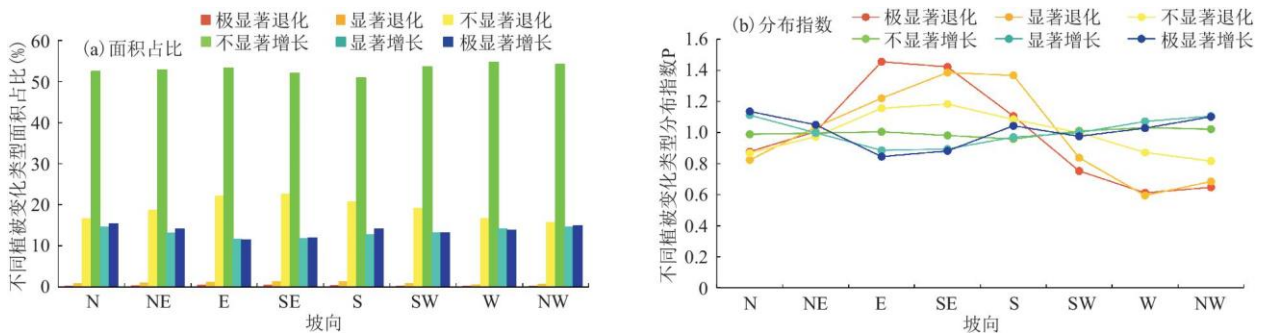


图 7 不同植被变化类型在不同坡向带面积占比 (a) 及分布指数 (b)

图 7a 显示,不同坡向上各植被变化趋势类型面积占比变化不大,都以植被不显著增长为主。植被极显著退化与显著退化型合计面积占比比较高的区域主要分布在东坡、东南坡与南坡的阳坡区域,均超过 1.5%;而在西南坡、西坡与西北坡等阴坡区域,合计面积占比较小均未达 1%。植被不显著退化型分布也具有这一趋势,在以上三个阳坡坡向上占比均高于其他坡向超过 20%,阴坡坡向上面积占比均未超过 20%。值得注意的是,植被变化呈增长趋势面积占比则随着阴坡转阳坡而有所下降,随着阳坡转阴坡而有所上升。其中,植被极显著变化型在北坡这一典型阴坡坡向上面积占比达到最高为 15.33%,而在东坡、东南坡的阳坡坡向占比最小仅为 11.4%, 11.9%,而后在南坡这一典型阳坡坡向上又上升为 14.08%,然后向阴坡转进过程中又波动变化。

进一步结合图 7b 分布指数可以发现:不同植被变化趋势类型在不同坡向上分布指数波动较大。以北坡为出发点顺时针转进,植被极显著退化与显著退化型分布指数在北坡均未达优势分布 ( $P < 1$ );而后迅速上升在东北坡、东坡、东南坡与南坡坡向上达到优势分布 ( $P > 1$ ),并分别在东坡和东南坡、南坡呈主导优势分布 ( $1.11 < P < 1.46$ );然后在西南坡、西坡与西北坡坡向上迅速下降呈非优势分布 ( $P < 1$ )。植被不显著退化型整体分布指数变化幅度不如前两种强烈,但也在东坡、东南坡与南坡坡向上达到优势分布 ( $P > 1$ )。植被不显著增长型分布指数波动幅度极小。此外,植被显著增长与极显著增长型分布指数波动幅度也较为微弱,呈现出与植被极显著退化与显著退化型相反的波动趋势,在北坡、西南坡、西坡与西北坡这些阴坡坡向上达到优势分布 ( $P > 1$ ),而在其他阳坡坡向上呈非优势分布 ( $P < 1$ )。不同坡向对植被变化趋势形成了错综复杂难以解构的影响,究其原因,一方面是岷江上游人类居住用地、农业用地的扩张都进一步挤占了传统阳坡空间,从而影响植被生长造成退化;另一方面则是北坡等阴坡接受的太阳辐射相对较少,蒸发量小,水土保持能力较好,对乔木等植被生长具有积极作用。

### 3.2. 4NDVI 变化的地形起伏度响应特征

地形起伏度反映了植被生长的地形复杂程度，对区域水土流失、局部气候具有重要影响，进而影响植被群落生长水平与种群密度。如图 8 展示了岷江上游不同植被变化趋势在不同地形起伏度带上的面积占比及分布指数。

图 8a 显示，随着地形起伏度的增加，不同植被变量趋势类型面积波动变化，整体上幅度较小。植被极显著退化型在地形起伏度小于 100m 的区域面积占比达到 2.02%，而后迅速下降至不超过 0.5%。植被显著退化型面积占比呈现波动趋势，在地形起伏度小于 100m 的区域面积占比达到 2.09%，而后逐渐下降又在地形起伏度大于 400m 的区域有所上升；植被不显著退化型面积占比波动趋势与其较为一致。与此同时，随着地形起伏度增加，植被不显著增长型面积占比呈现先增加后降低的波动趋势，在 100~200m 区域达到最大为 55.15%，而后缓慢下降。植被显著增长型面积占比整体较为稳定，在 12.62%~13.73%之间微弱波动。植被极显著增长型面积占比随地形起伏度增加呈现明显的上升趋势，由小于 100m 的 10.16% 逐渐上升至大于 600m 的 15.47%。

再结合图 8b 分布指数可以发现：除植被极显著退化型外，其他各植被变化趋势分布指数整体较为一致。植被极显著退化型在地形起伏度小于 200m 区域均呈主导优势分布 ( $1.32 < P < 7.27$ )，而后缓慢下降在 200~400m 区域呈优势分布 ( $P > 1$ )，再在大于 400m 区域未达优势分布 ( $P < 1$ )。植被显著退化型在地形起伏度小于 100m 与 200~400m 区域呈优势分布 ( $P > 1$ )，而在其他区域呈非优势分布 ( $P < 1$ )。究其原因，地形起伏度与坡度相似，岷江上游地形复杂，地势陡峭，人类生产生活与社会经济活动主要分布在地势较为平坦的河谷地带，因而主要在地形起伏度小于 200m 的区域出现明显的植被退化。此外值得注意的是，其他各植被变化趋势特别是植被增长区域除了在 200~400m 区域上呈现优势分布外 ( $P > 1$ )，在其他区域均未达到优势分布 ( $P < 1$ )。地形起伏度较小的区域人类活动强烈，而起伏度大的区域则对植被生长发育具有严重的不利影响，从而导致仅在地形起伏度适中的区域出现植被显著增长。

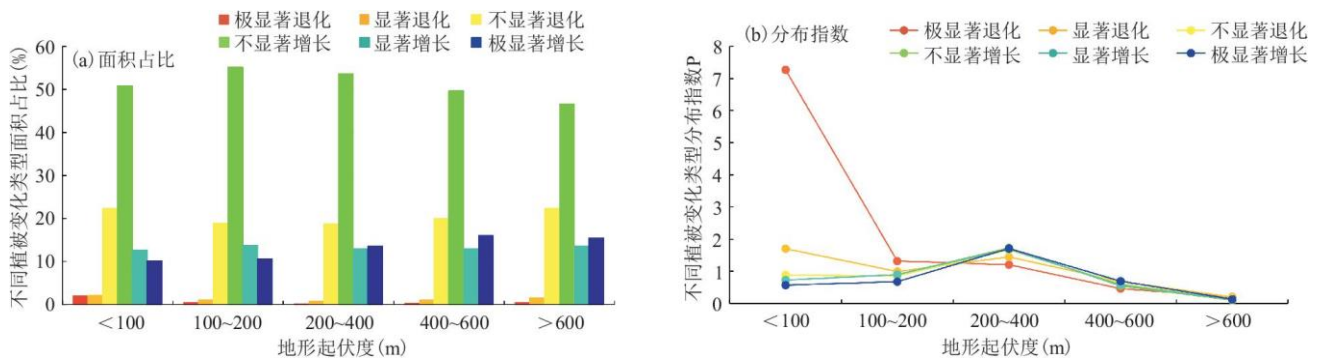


图 8 不同植被变化类型在不同地形起伏度带面积占比(a)及分布指数(b)

### 3.3NDVI 变化的最佳地形位

基于 ArcGIS 空间分析将植被变化趋势类型与高程、坡度、坡向与地形起伏度等地形因子同时叠置为综合图层，并分别就其不同地形因子背景下各植被变化类型面积占岷江上游总面积比例状况制图如图 9，再结合前文相关分析结果，可以进一步就不同植被变化趋势的最佳地形位展开描绘，以全面反映岷江上游地区植被变化的地形响应机制。

可以发现，植被呈现显著退化以上(显著退化及极显著退化)区域主要分布在高程位于 3000m 以下及 4000~4500m 的区域，坡度则处于小于 15° 及大于 35° 的区域，坡向则主要集中在东坡、东南坡与南坡等阳坡区域，地形起伏度则主要分布于小于 100m 及大于 400m 的区域。据此能够得到岷江上游植被显著退化区域的最佳地形位：一是海拔相对较低、坡度较缓、地形起伏度较为平坦且为阳坡的“优势”地带，这些区域是当地人类活动最为频繁、社会经济活动最为发达的区域，植被受人类影响严重；二是

海拔较高、坡度较陡、地形起伏较大的“劣势”地带，这些区域水热土等自然条件恶劣，滑坡、塌方等地质灾害频发不利于植被生长。

进一步地，植被呈现显著增长的区域主要分布在高程位于 3500m 以下区域，坡度则处于大于 15° 以上区域，坡向则主要集中于西南坡、西坡、西北坡与北坡等阴坡区域，地形起伏度则主要分布于 200~400m 及的区域。据此可以分析岷江上游植被显著增长区域的最佳地形位：主要分布在海拔相对较低，而坡度、起伏度较大的阴坡区域，这些区域靠近当地人类聚落辐射范围，但其地势、光照条件不利于其他社会经济活动的开展，因而成为生态建设工程实施的“一线”重点区域，表现出最为显著的植被保护成效。实施生态建设工程必须依据以上地形位条件，因地制宜的选择实施地点，以确保实施成效。

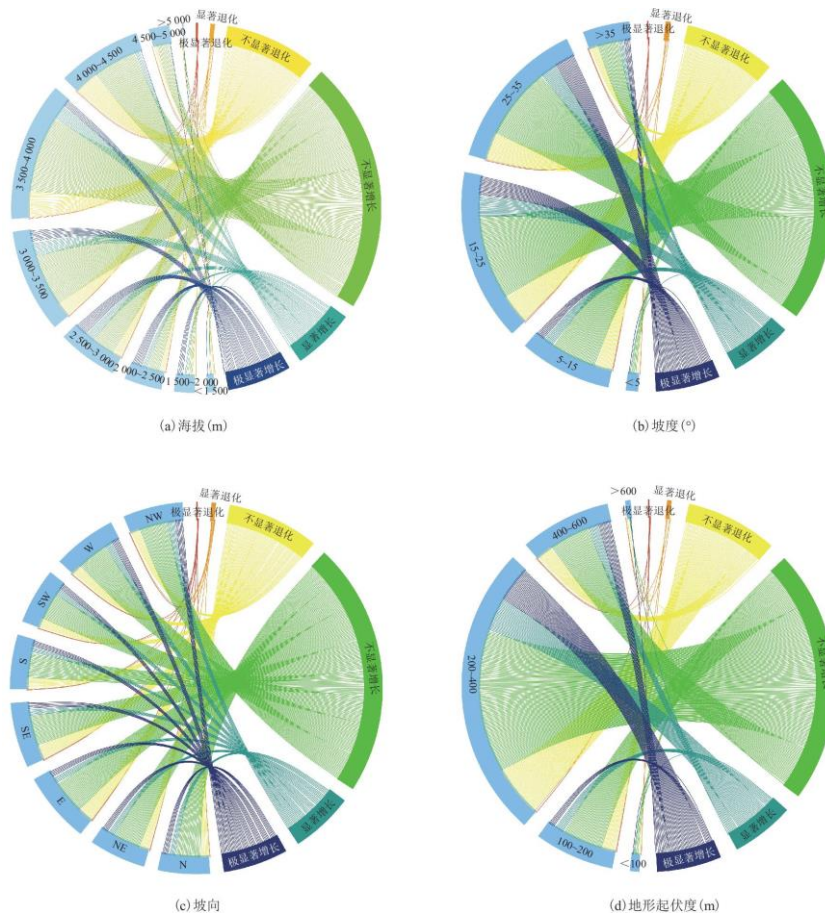


图 9 不同植被变化类型在不同地形因子分级面积占岷江上游总面积比例

此外，由于植被呈现不显著变化的区域面积分布最广，无法明确确定其最佳地形位，在此不再赘述。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

本文选择生态环境极具代表性的岷江上游地区为研究区，运用 GIS 与 RS 技术对其植被 NDVI 时空变化进行分析，并通过空间叠加分析详细探讨了植被时空变化对地形因子的响应特征，结合分布指数明确了不同地形因子的植被变化地域分异规律。

研究发现,岷江上游植被空间分异格局与地形因子关系密切。其中,海拔、坡度、坡向与地形起伏度对植被变化分别产生了不可忽视的重要影响。海拔制约着小区域水热条件,进而影响区域植被生长状况与时空变化。相关研究表明,岷江上游地区在海拔 3000m 以下区域具有良好的水热条件<sup>[31]</sup>,本文的植被显著增长区域也与其相对一致,表现出了明显的植被生长垂直地带性。坡度与地形起伏度对区域人类活动影响显著,人类生产生活对平地资源的挤占和原始植被的破坏,使得岷江上游区域植被显著增长区域都分布在二者相对较大的地区,与前人研究结论相对一致<sup>[32]</sup>。最后,不同坡向对区域水热条件有所影响,在阳坡接受太阳辐射较多的背景下,植物光合作用强烈,生长状况更佳;而阴坡蒸发量相对较少,有利于水土保持。岷江上游河谷地带是典型的亚热带干旱河谷气候,其降水较少、蒸发旺盛、太阳辐射强烈<sup>[32,33]</sup>,因而阴坡区域反而有利于植被增长。

通过空间叠加分析从空间位置的角度出发反映不同地形因子对植被变化的影响。但是,对于植被变化而言,其影响因子之间并非完全的单向线性关系,而是存在错综复杂的非线性关系。因此,在植被变化的地形响应机制上,可选择其他能够反映非线性关系的空间模型,如地理加权回归<sup>[34,35]</sup>、地理探测器<sup>[26]</sup>等进行表达。此外,本文选择的 NDVI 数据空间分辨率为 250m,能够较好的反演较大区域的植被变化状况,但该数据对一些变化微小的山区城镇边缘反演结果较为粗糙,可以进一步利用分辨率较高的 Landsat 数据、无人机影像等展开研究<sup>[32,36]</sup>。

## 4.2 结论

(1) 2000~2020 年间,岷江上游地区植被覆盖良好且格局稳定。

趋势分析表明,绝大部分区域呈现微弱波动变化,面积占比约 72.17%;具有统计学意义的植被退化区域面积占比极小,合计约 1.21%;植被显著增长区域面积分布较广,占比约 26.62%,主要沿河谷地带扩散状分布。

(2) 不同地形因子的植被 NDVI 变化趋势类型具有显著不同的分布格局。

随着海拔高度的增加,不同植被变化趋势类型分布面积占比各异,其分布指数变化剧烈;不同植被变化趋势类型分布随坡度增大而波动变化,除植被极显著退化型外其他分布指数都较为稳定;在不同坡向上各植被变化趋势类型面积占比结构类似,但分布指数波动幅度较大;随着地形起伏度的增加,不同植被变化趋势类型面积呈微弱波动变化,除植被极显著退化型外其他分布指数整体较为一致。

(3) 不同植被变化类型最佳地形位具有显著差异。

植被显著退化区域的最佳地形位分为海拔相对较低、坡度较缓、地形起伏度较为平坦且为阳坡的人类活动“优势”地带与海拔较高、坡度较陡、地形起伏较大的水热土条件“劣势”地带;植被显著增长区域的最佳地形位主要分布在海拔相对较低,而坡度、起伏度较大且为阴坡的人类聚落辐射区域。

## 参考文献:

[1] CUI L, SHI J. Temporal and spatial response of vegetation NDVI to temperature and precipitation in eastern China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20(2):163-176.

[2] 高江波, 吴绍洪, 蔡运龙. 区域植被覆盖的多尺度空间变异性——以贵州喀斯特高原为例[J]. 地理研究, 2013, 32(12): 2179-2188.

[3] DUVEILLER G, HOOKER J, CESCATTI A. The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance[J]. Nature

---

Communications, 2018, 9(1):612-679.

[4] DUTTA D, DAS P K, PAUL S, et al. Assessment of ecological disturbance in the mangrove forest of Sundarbans caused by cyclones using MODIS time-series data (2001-2011) [J]. *Natural Hazards (Dordrecht)*, 2015, 79(2):775-790.

[5] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2001-2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征 [J]. *地理学报*, 2012, 67(9):1255-1268.

[6] 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.

[7] 刘梁美子, 占车生, 胡实, 等. 黔桂喀斯特山区植被变化及其地形效应 [J]. *地理研究*, 2018, 37(12):2433-2446.

[8] 熊俊楠, 张昊, 彭超, 等. 汶川地震灾区植被覆盖度变化与地形因子的关系 [J]. *水土保持通报*, 2018, 38(3):24-31.

[9] 熊巧利, 何云玲, 李同艳, 等. 西南地区生长季植被覆盖时空变化特征及其对气候与地形因子的响应 [J]. *水土保持研究*, 2019, 26(6):259-266.

[10] 陈亮, 王学雷, 杨超, 等. 2000~2018 年鄂西山区植被 EVI 时空变化特征及其地形效应 [J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(2):419-426.

[11] 魏建瑛, 徐建英, 樊斐斐. 卧龙自然保护区植被覆盖度变化及其对地形因子的响应 [J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(2):440-449.

[12] 姚镇海, 吴丹娃, 褚荣浩, 等. 安徽省植被覆盖度动态变化及其对地形的响应 [J]. *水土保持通报*, 2021, 41(3):283-290.

[13] 李艳豪, 蒋汉朝, 徐红艳, 等. 四川岷江上游滑坡触发因素分析 [J]. *地震地质*, 2015, 37(4):1147-1161.

[14] 魏昌利, 张瑛, 冯文凯, 等. 岷江上游地质灾害发育强度与规律分析 [J]. *工程地质学报*, 2019, 27(3):640-650.

[15] 曾超, 赵景峰, 李旭娇. GIS 支持下岷江上游水文特征空间分析 [J]. *水土保持研究*, 2011, 18(3):5-9.

[16] 康磊, 刘世荣, 刘宪钊. 岷江上游水文气象因子多尺度周期性分析 [J]. *生态学报*, 2016, 36(5):1253-1262.

[17] 文星跃, 黄艳娟, 黄成敏. 岷江上游河谷土壤发生的空间分异及环境意义 [J]. *地理科学*, 2017, 37(2):266-273.

[18] 姜琳, 边金虎, 李爱农, 等. 岷江上游 2000-2010 年土壤侵蚀时空格局动态变化 [J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1):18-25.

[19] 郭兵, 姜琳, 孙彩红, 等. 基于多源数据的岷江上游生态系统服务价值动态评估 [J]. *水土保持研究*, 2017, 24(6):131-138.

[20] 刘菊, 傅斌, 张成虎, 等. 基于 InVEST 模型的岷江上游生态系统水源涵养量与价值评估 [J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(3):577-585.

[21] 柏松, 黄成敏, 唐亚. 岷江上游干旱河谷海拔梯度上的土壤发生特征 [J]. *土壤*, 2008, 40(6):980-985.

- 
- [22]孟浩斌, 周启刚, 李明慧, 等. 基于 MODIS 像元尺度的三峡库区植被覆盖度变化的地形分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(8): 1790-1799.
- [23]覃金兰, 薛联青. 西北干旱区玛纳斯河流域植被时空变化特征及其与地形因子的空间关系[J]. 生态环境学报, 2020, 29(11): 2179-2188.
- [24]邓元杰, 姚顺波, 侯孟阳, 等. 长江流域中上游植被 NDVI 时空变化及其地形分异效应[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(1): 66-78.
- [25]刘亚龙, 王庆, 毕景芝, 等. 基于 Mann-Kendall 方法的胶东半岛海岸带归一化植被指数趋势分析[J]. 海洋学报(中文版), 2010, 32(3): 79-87.
- [26]陶帅, 邝婷婷, 彭文甫, 等. 2000-2015 年长江上游 NDVI 时空变化及驱动力——以宜宾市为例[J]. 生态学报, 2020, 40(14): 5029-5043.
- [27]朱林富, 谢世友, 杨华, 等. 基于 MODIS EVI 的重庆植被覆盖变化的地形效应[J]. 自然资源学报, 2017, 32(12): 2023-2033.
- [28]汪芳甜, 安萍莉, 蔡璐佳, 等. 基于 RS 与 GIS 的内蒙古武川县退耕还林生态成效监测[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 269-275.
- [29]许宗文, 骆汉, 赵廷宁, 等. 基于 GIS 的复杂地形下的太阳直接辐射分布规律[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(3): 113-118.
- [30]赵婷, 白红英, 邓晨晖, 等. 2000-2016 年秦岭山地植被覆盖变化地形分异效应[J]. 生态学报, 2019, 39(12): 4499-4509.
- [31]张文江, 宁吉才, 宋克超, 等. 岷江上游植被覆被对水热条件的响应[J]. 山地学报, 2013, 31(3): 280-286.
- [32]张诗羽, 张毅, 王昌全, 等. 岷江上游流域植被覆盖度及其与地形因子的相关性[J]. 水土保持通报, 2018, 38(1): 69-75.
- [33]庞学勇, 包维楷, 吴宁. 岷江上游干旱河谷气候特征及成因[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(S1): 46-53.
- [34]李晶晶, 闫庆武, 胡苗苗. 基于地理加权回归模型的能源“金三角”地区植被时空演变及主导因素分析[J]. 生态与环境学报, 2018, 34(8): 700-708.
- [35]张雪梅, 王克林, 岳跃民, 等. 生态工程背景下西南喀斯特植被变化主导因素及其空间非平稳性[J]. 生态学报, 2017, 37(12): 4008-4018.
- [36]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.