

DOI: 10.5846/stxb201805040993

祝聪, 彭文甫, 张丽芳, 罗瑶, 董永波, 王梅芳. 2006—2016 年岷江上游植被覆盖度时空变化及驱动力研究. 生态学报, 2019, 39(5): - .
Zhu C, Peng W F, Zhang L F, Luo Y, Dong Y B, Wang M F. Study of temporal and spatial variation and driving force of fractional vegetation cover in upper reaches of Minjiang River from 2006 to 2016. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(5): - .

2006—2016 年岷江上游植被覆盖度时空变化及驱动力研究

祝 聪^{1,2}, 彭文甫^{1,2,*}, 张丽芳^{1,2}, 罗 瑶^{1,2}, 董永波^{1,2}, 王梅芳³

1 四川师范大学地理与资源科学学院, 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, 成都 610068

3 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001

摘要: 基于 MODIS NDVI 遥感数据, 采用像元二分模型估算岷江上游植被覆盖度, 运用一元线性回归分析和稳定性分析方法, 研究 2006—2016 年岷江上游植被覆盖度时空变化格局及稳定性, 并分段讨论 2008 年“5.12 汶川地震”对岷江上游植被的破坏程度以及震后植被恢复情况, 利用地理探测器模型对岷江上游植被覆盖度影响因子及影响力进行探测, 分析岷江上游植被覆盖度变化驱动力。结果表明: (1) 2006—2016 年岷江上游植被覆盖整体状况良好, 植被覆盖总体情况较为稳定, 多年平均植被覆盖度为 0.79, 植被覆盖度大于 0.8 的区域占整个岷江上游地区面积的 69%。(2) 2008 年“5.12 汶川地震”给整个岷江上游植被造成了严重的破坏, 植被覆盖度退化区域面积为 14013.41 km², 占整个岷江上游面积的 57%, 2008—2016 年岷江上游植被恢复状况良好, 植被覆盖度改善区域面积为 17390.69 km², 占整个岷江上游面积的 71%, 岷江上游植被覆盖度已经超过震前水平。(3) 岷江上游植被覆盖度主要受海拔、气温、土壤类型、降水 4 个因子的影响, 其解释力均在 40% 以上; 地貌类型、植被类型的解释力在 20%—40% 之间; 坡度、坡向的解释力均小于 1%。

关键词: 岷江上游; 植被覆盖度; 像元二分模型; 时空变化; 地理探测器

Study of temporal and spatial variation and driving force of fractional vegetation cover in upper reaches of Minjiang River from 2006 to 2016

ZHU Cong^{1,2}, PENG Wenfu^{1,2,*}, ZHANG Lifang^{1,2}, LUO Yao^{1,2}, DONG Yongbo^{1,2}, WANG Meifang³

1 The Institute of Geography and Resources Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China

2 Key Lab of Land Resources Evaluation and Monitoring in Southwest, Ministry of Education, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China

3 The Institute of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

Abstract: Based on moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) normalized difference vegetation index (NDVI) remote sensing data, the fractional vegetation cover in the upper reaches of Minjiang River was estimated using a pixel dichotomy model. Furthermore, the temporal and spatial variation pattern and stability of the fractional vegetation cover in the upper reaches of Minjiang River from 2006 to 2016 were studied using univariate linear regression and stability analyses. The damage degree of the vegetation in the upper reaches of Minjiang River and the vegetation restoration after the earthquake are discussed in sections. The influencing factors of fractional vegetation cover in the upper reaches of Minjiang River were detected using the Geographic detector model. The driving force of vegetation cover change in the upper reaches of Minjiang River was analyzed. The results showed the following. (1) The fractional vegetation cover in the upper reaches

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.41371125); 教育部人文社科研究规划基金项目 (No.17YJA850007)

收稿日期: 2018-05-04; **网络出版日期:** 2018-08-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: pwfzh@126.com

of Minjiang River from 2006 to 2016 was good, and the overall fractional vegetation cover was stable. The annual average fractional vegetation cover was 0.79, and the area with fractional vegetation cover > 0.8 accounted for 69% of the total area of the upper reaches of the Minjiang River. (2) The "5.12 Wenchuan earthquake" in 2008 seriously damaged the vegetation in the upper reaches of Minjiang River. The degraded area of fractional vegetation cover was 14013.41 km², which accounted for 57% of the total area of the upper reaches of the Minjiang River. The vegetation restoration condition in the upper reaches of Minjiang River from 2008 to 2016 was good. The area of fractional vegetation cover improvement was 17390.69 km², which accounted for 71% of the total area of the upper reaches of the Minjiang River. The fractional vegetation cover in the upper reaches of Minjiang River exceeded the pre-earthquake level. (3) The fractional vegetation cover in the upper reaches of Minjiang River was mainly affected by four factors: altitude, temperature, agrotypes, and precipitation. Its explanatory power was > 40%, the interpretation of the Geomorphic type and vegetation types was between 20% and 40%, and the interpretation of slope and aspect was < 1%.

Key Words: upper reaches of Minjiang River; fractional vegetation cover; pixel dichotomy model; space-time variation; geographic detector

植被是陆地生态系统重要组成部分,是联结大气、水、生物、岩石、土壤等自然地理环境要素的纽带^[1]。植物通过光合作用进行物质循环、能量流动和信息传递,为人类的生存和发展提供环境和物质资源,同时也为其他生物的繁衍和栖息提供食物和场所^[2]。此外,植被还具备净化空气、涵养水源、调节气候、防风固沙、美化环境等众多生态功能^[3-5]。所以,植被的覆盖状况是评价区域环境质量和生态系统平衡状况的一项重要指标^[6]。植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover, FVC)是指植被(包括叶、茎、枝)在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比^[7]。它量化了植被的茂密程度,反应了植被的生长态势,是描述生态系统的重要基础数据^[8],被广泛运用于水文、生态、气候、大气污染等研究领域^[9-12]。掌握植被覆盖度时空变化规律,探讨植被覆盖度变化驱动力,对评价区域环境质量和维护生态系统平衡具有重要的现实意义^[13]。

传统的地面实测植被覆盖度估算方法如目估法、采样法、仪器法等^[14],因其操作复杂、成本高、效率低等原因而逐渐被能够大范围、及时、准确、低价的遥感估算方法所取代^[15]。随着遥感技术的快速发展,尤其是高光谱、高空间分辨率、高时间分辨率遥感的出现,监测大范围、长时间序列的植被覆盖空间分布特征及动态变化过程变得更加容易^[16],植被覆盖度遥感估算方法已经得到广泛运用^[17-19]。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)是植被覆盖度遥感估算方法中最常见的植被指数^[20],它综合反映了观测区植被类型、植被生长状况以及覆盖密度,是植物生长状态以及植被空间分布密度的最佳指示因子^[21],与植被分布密度呈线性相关,因而被广泛运用于植被覆盖度动态监测研究^[22-24]。

岷江上游地处我国地形三级阶梯划分中第一级阶梯与第二级阶梯过渡地带,地形结构复杂,自然资源丰富,是长江上游重要的生态屏障,是成都平原最主要的水源地,在整个长江上游地区的生态系统平衡中发挥着重要作用^[25]。同时,岷江上游又是长江上游典型生态脆弱区,自然灾害频发,水土流失严重。2008年“5.12汶川地震”对岷江上游地区植被造成了巨大破坏,加剧了生态脆弱性,地震虽已过去多年,但鲜有学者对岷江上游植被破坏程度及恢复状况进行深入研究。鉴于上述情况,本文基于MODIS NDVI遥感数据,采用像元二分模型法估算岷江上游植被覆盖度,运用一元线性回归分析和稳定性分析方法,研究2006—2016年岷江上游植被覆盖度时空变化格局,并分段讨论2008年“5.12汶川地震”对岷江上游植被破坏程度以及震后植被恢复情况,利用地理探测器模型对岷江上游植被覆盖度影响因子及影响力进行探测,分析岷江上游植被覆盖度变化驱动力,为岷江上游生态安全和植被保护提供科学依据。

1 研究区概况

岷江上游一般是指岷江流域都江堰以上的区域,该区地处青藏高原东南缘,横断山脉北端与川西北高山

峡谷东侧的结合部。介于 $102^{\circ}32'—104^{\circ}15'E$, $30^{\circ}45'—33^{\circ}09'N$ 之间,其范围与四川省阿坝藏族羌族自治州的松潘、黑水、茂县、理县、汶川 5 个县的行政辖区基本重合,全区面积 24753.42 km^2 。该流域地貌以高山峡谷为主,地势西北高东南低,由西北向东南倾斜,地形起伏大,最低处海拔 762 m ,最高处海拔 5870 m 。岷江上游是我国横断山区干温河谷分布区,山地立体型气候典型发育,随着海拔高度的变化,气候从亚热带—山地暖温带—温带—山地亚寒带—山地亚带—山地冰川带呈明显的垂直性差异。夏季温凉,冬春寒冷,干湿季明显,降水分配不均,主要集中在 5—10 月份和海拔 2500 m 以下的河谷地带,夏季多暴雨,降水强度大。全区植被类型丰富多样,主要有阔叶林、针叶林、针阔叶混交林、灌丛、草甸、高山植被等。土壤类型主要有棕壤、黄棕壤、暗棕壤、褐土、粗骨土、草毡土、黑毡土、寒冻土等。岷江上游地质结构复杂,新构造活动强烈,多地震、滑坡、泥石流等自然灾害,生态环境脆弱,尤其是 2008 年“5.12 汶川地震”的爆发,对该流域的生态环境造成了严重的破坏。

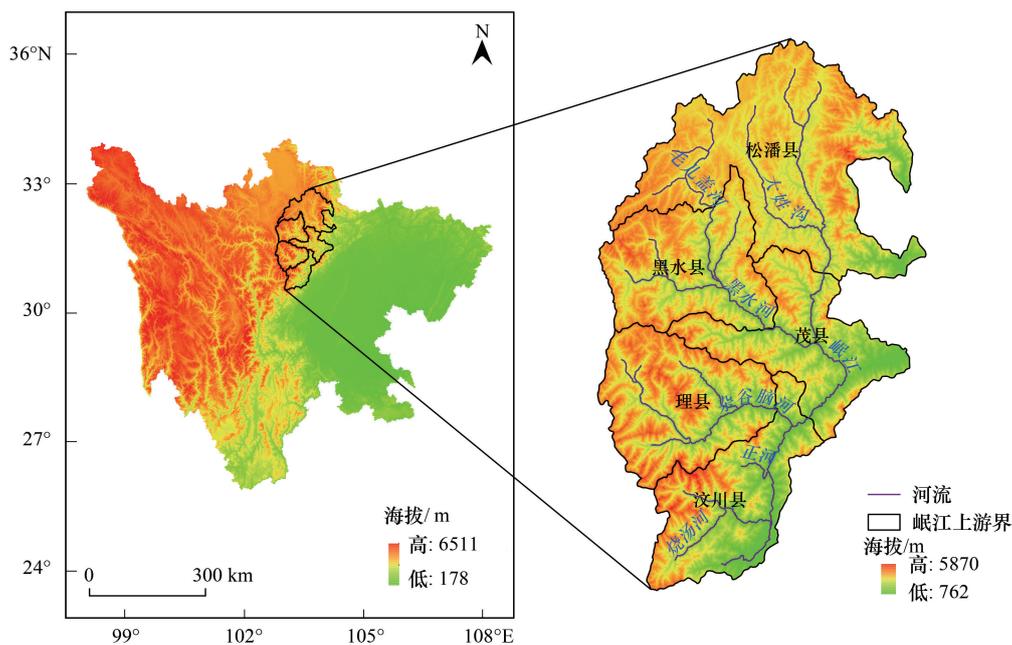


图 1 岷江上游地理位置示意图

Fig.1 The geographical position of the upper reaches of Minjiang

2 数据与方法

2.1 数据来源与预处理

本文获取的用于估算岷江上游植被覆盖度的 NDVI 数据为 MODIS MOD 13Q1 产品,该产品是由美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提供的陆地 3 级标准数据产品,空间分辨率为 $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$,时间分辨率为 16 d 。为研究 2006—2016 年岷江上游植被覆盖度时空变化格局,本文选取了时间序列为 2006—2016 年间偶数年份,时相为植物生长季(5 月—10 月),且质量较好的 62 景 MODIS NDVI 数据。运用 MODIS 重投影工具(MODIS Reprojection Tool, MRT)将 MODIS MOD 13Q1 产品的正弦曲线投影转换为 UTM 投影(Universal Transverse Mercator Projection—通用横轴墨卡托投影),地理坐标系设置为 WGS_84;采用 Savitzky-Golay 滤波重建 MODIS NDVI 数据,剔除噪声影响^[26];利用最大合成法(Maximum Value Composite, MVC)合成年最大 NDVI,该方法可以有效地减少云、大气、太阳高度角等因素的影响^[27];最后在 ENVI 软件中通过岷江上游矢量边界进行掩膜,裁剪出 6 期用于植被覆盖度估算的年最大 NDVI 栅格数据。

本文用于验证 MODIS 数据植被覆盖度估算精度的 3 景 Landsat 8-OLI 遥感数据来源于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>),其轨道号分别为 130/037、130/038、130/039,数据经过辐射定标、大气校正、

镶嵌、裁剪等预处理,并进行 NDVI 计算、NDVI 异常值去除,最终得到 30 m 分辨率的岷江上游 NDVI 数据。岷江上游 ASTER GDEM V2 全球数字高程数据来源于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>),数据经过拼接、格式转换、裁剪得到岷江上游 30 m 分辨率的 DEM 数据。运用 ArcGIS 10.3 软件将岷江上游 DEM 数据进行表面分析,计算出坡度和坡向,进行水文分析,提取出河流网络。岷江上游多年平均气温和平均降水数据、植被类型数据、地貌类型数据、土壤类型数据分别来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)编制的 500 m×500 m 的中国气象背景数据、《1:1 000 000 中国植被集》、《中华人民共和国地貌图集(1:100 万)》、《1:100 万中华人民共和国土壤图》栅格图像,数据经过投影转换、岷江上游矢量数据掩膜、重采样等处理后与 MODIS NDVI 数据投影相同、像元大小一致。

2.2 研究方法

2.2.1 植被覆盖度估算

像元二分模型是一种操作简单、运用广泛的植被覆盖度遥感估算模型^[28],其原理是假设一个像元的信息是由裸土与绿色植被两部分所贡献,像元中有植被覆盖的面积比例即为该像元的植被覆盖度^[29],其计算公式为:

$$FVC = \frac{S - S_{soil}}{S_{veg} - S_{soil}}$$

式中,FVC 为植被覆盖度, S 为遥感传感器所观测到的信息, S_{veg} 为绿色植被所覆盖的纯像元所得的遥感信息, S_{soil} 为土壤所覆盖的纯像元所得的遥感信息。由于 NDVI 与植被覆盖度之间呈极显著的线性相关,所以将二者进行转换可以直接提取植被覆盖度信息^[30],其计算公式为:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}}$$

式中,NDVI 为归一化植被指数值, $NDVI_{soil}$ 为裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 值, $NDVI_{veg}$ 则代表完全被植被所覆盖的像元的 NDVI 值,即纯植被像元的 NDVI 值。理论上 $NDVI_{soil}$ 的值应该接近为 0, $NDVI_{veg}$ 代表全植被覆盖像元的最大值,但是,由于受光照条件、时空变化、影像质量、植被类型等众多因素影响, $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$ 的实际值会发生变化^[13]。在运用像元二分模型估算植被覆盖度时,通常根据经验取给定置信区间内 NDVI 的最小值和最大值为 $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$ 的值^[31],研究中发现,多数学者将置信区间设置为 0.5%—99.5%^[32] 和 5%—95%^[33]。本文根据影像大小、影像清晰度和 NDVI 灰度分布等情况,结合实地考察经验,发现采用 2% 的置信度截取 NDVI 的上下阈值,选取累计频率为 2% 的 NDVI 值作为 $NDVI_{soil}$,累计频率 98% 的 NDVI 值作为 $NDVI_{veg}$ 估算得到的岷江上游植被覆盖度更加准确。

2.2.2 趋势分析

时间序列数据往往存在着某种长期趋势,分析这种长期趋势就是拟合一条适当的趋势线,来反演长期趋势的变化态势^[34]。本文采用一元线性回归模型,将植被覆盖度与时间序列做回归分析,研究基于像元的岷江上游 2006—2016 年植被覆盖度变化趋势,计算公式如下:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n i \times F_i - \frac{1}{n} \times \left(\sum_{i=1}^n i \right) \times \left(\sum_{i=1}^n F_i \right)}{\sum_{i=1}^n i^2 - \frac{1}{n} \times \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2}$$

式中, K 为变化趋势的斜率, $K > 0$ 表示监测时段内植被覆盖度增加, $K < 0$ 表示监测时段内植被覆盖度减少, n 为监测年数, F_i 代表第 i 年的植被覆盖度。变化趋势检验采用 F 检验,以 P 值为 0.01、0.05 为节点,将变化趋势分为:极显著退化;显著退化;不显著退化;不显著改善;显著改善;极显著改善六个等级^[35]。

2.2.3 变异系数

为研究岷江上游植被覆盖度在 2006—2016 年间相对变化(波动)程度,本文通过计算基于像元的植被覆

盖度变异系数来描述岷江上游植被覆盖度的稳定性,其计算公式如下:

$$C_v = \frac{1}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2}{n-1}}} \times 100\%$$

式中, C_v 为变异系数, n 为监测年数, \bar{F} 为研究时段平均植被覆盖度, F_i 为第*i*年的植被覆盖度。

2.2.4 地理探测器

地理探测器是王劲峰团队基于空间分异理论,结合 GIS 空间分析技术提出的,用于探测因子变量与结果变量空间分布关系的一种统计学方法^[36-37]。该方法克服了传统数学统计模型中假设条件多、数据量要求大的局限^[38]。传统的植被覆盖度变化驱动力因子分析方法,多采用假设植被覆盖度与某些因素有关系,再通过相关系数的计算和检验来描述驱动力因子与植被覆盖度之间关系的密切程度^[39],当驱动力因子过多时,其计算过程较为繁琐^[40]。所以,本文运用地理探测器中因子探测方法研究被选取的各个因子对岷江上游植被覆盖度解释力大小,其模型如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}$$

式中, q 值表示某因子解释了 $q \times 100\%$ 的岷江上游植被覆盖度, $h=1, \dots, L$ 为影响因子的分层数, N_h 和 N 分别为影响因子的层*h*和整个岷江上游的样本数, σ_h 和 σ 分别为层*h*和整个岷江上游的植被覆盖度值的方差。 q 的值域为 $[0, 1]$, q 值越大表明该因子对岷江上游植被覆盖度解释力越强。

本文运用地理探测器中生态探测方法来比较任意两个自然因子对岷江上游植被覆盖度空间分布的影响是否有显著的差异,以 F 统计量来衡量:

$$F = \frac{N_{x_1}(N_{x_2} - 1) \times \text{SSW}_{x_1}}{N_{x_2}(N_{x_1} - 1) \times \text{SSW}_{x_2}}$$

$$\text{SSW}_{x_1} = \sum_{h=1}^{L_1} N_h \sigma_h^2, \text{SSW}_{x_2} = \sum_{h=1}^{L_2} N_h \sigma_h^2$$

式中, N_{x_1} 及 N_{x_2} 分别表示因子 X_1 和 X_2 的样本量; SSW_{x_1} 和 SSW_{x_2} 分别表示由 X_1 和 X_2 形成的分层的层内方差之和; L_1 和 L_2 分别表示变量 X_1 和 X_2 分层数目。其中零假设 $H_0: \text{SSW}_{x_1} = \text{SSW}_{x_2}$ 。如果在显著性水平 α 上拒绝 H_0 ,这表明因子 X_1 和 X_2 对岷江上游植被覆盖度空间分布的影响存在着显著的差异。

2.2.5 精度验证

本文采用同期较高分辨率影像对比与实测数据验证相结合的方法,对基于 MODIS 数据估算的岷江上游植被覆盖度进行验证。获取了 2014 年 6 月 1 日的 3 景 Landsat 8-OLI 遥感数据,该数据云量少且处在植被茂盛的季节,符合验证需求。利用 ArcGIS 10.3 软件在岷江上游矢量边界图上,随机自动生成了 500 个点,提取 2014 年基于 MDOIS 数据估算得到的植被覆盖度值和基于 Landsat 8-OLI 数据估算得到的植被覆盖度值到点,运用 SPSS 软件将两组数据进行相关性分析,绘制拟合曲线如图 2a 所示,结果显示($r=0.849, P<0.001, N=500$),基于 MDOIS 数据估算得到的植被覆盖度值与基于 Landsat 8-OLI 数据估算得到的植被覆盖度值之间存在显著相关,说明基于 MODIS 数据估算得到的岷江上游植被覆盖度具有较高的精度,符合本文研究要求。

本文将 2017 年 8 月在汶川县和茂县运用 SpectroSense 2 冠层光谱测量系统实地测量的 102 个 NDVI 值与对应坐标的 2016 年 MODIS 数据 NDVI 值进行相关性分析,绘制拟合曲线如图 2b 所示。虽然实测数据与影像数据不在同一年份,但考虑两组数据时间跨度不大,实测数据位于植被生长茂盛期,较具代表性,且 2016 年至 2017 年间岷江上游无大范围自然灾害造成植被覆盖大面积改变,所以数据能够满足验证需求。结果显示($r=0.886, p<0.001, N=102$),实测 NDVI 值与 MODIS 数据 NDVI 值之间存在显著相关,说明利用 MODIS NDVI 数据估算岷江上游植被覆盖度的方法具有科学性和可靠性。

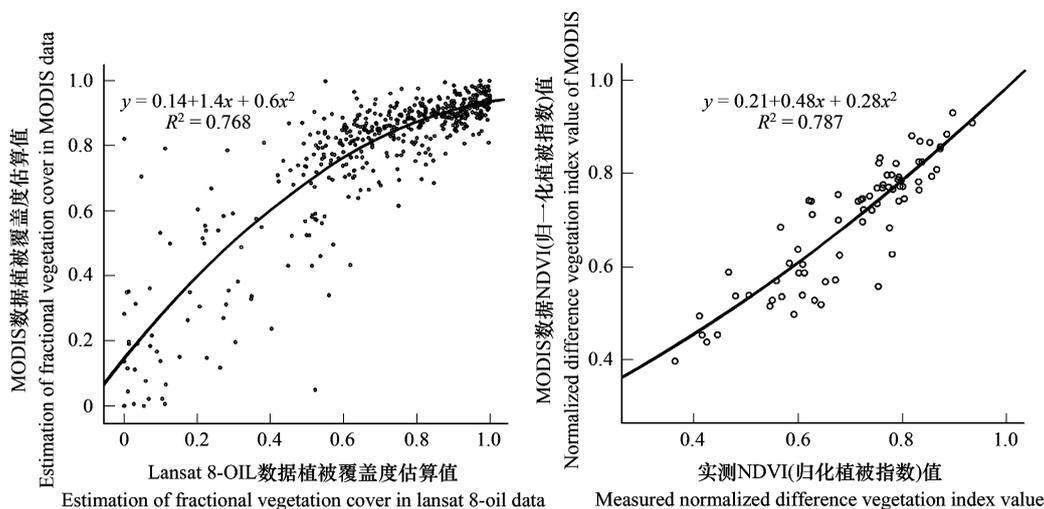


图2 2014年 Landsat 8-OLI 数据植被覆盖度估算值与 MODIS 数据植被覆盖度估算值曲线拟合 (a)、实测 NDVI(归一化植被指数)值与 2016年 MODIS 数据 NDVI(归一化植被指数)值曲线拟合 (b)

Fig.2 Curve fitting between FVC (Fractional Vegetation Cover) estimation of Landsat 8-OLI data and FVC estimation of MODIS data in 2014 (a), Curve fitting between measured NDVI (Normalized Differential Vegetation Index) value and NDVI value of 2016 MODIS data (b)

3 结果与分析

3.1 植被覆盖度空间变化格局及稳定性

2006—2016年岷江上游多年平均植被覆盖度空间分布如图3所示,从图上可以得出,岷江上游地区植被覆盖总体状况良好,多年平均植被覆盖度的像元平均值为0.79。多年平均植被覆盖度大于0.8的区域占整个岷江上游地区面积的69%,主要分布在岷江上游海拔3600m以下的灌丛、草甸、阔叶林和针阔叶混交林区;0.6—0.8的区域占18%,主要分布在岷江及其支流两侧的山坡上、汶川县东南部中低山和西北部中高山区、松潘县西北部山区;0.2—0.6的区域占9%,主要分布在黑水河、岷江上游干流、杂谷脑河的河流两岸、岷江上游西部和东北部高山植被边缘;小于0.2的区域仅占3%,分布区域主要为岷江上游西部和东北部海拔高于4500m的极高海拔地区。

2006—2016年岷江上游植被覆盖度逐像元变化趋势如图4a所示,11年间,岷江上游植被覆盖度整体上呈缓慢上升的趋势,植被覆盖度增加($K > 0$)的区域占整个岷江上游面积的66%,减少($K < 0$)的区域占33%,常年冰雪覆盖和湖泊区占1%。其中,植被覆盖度不显著变化面积占整个岷江上游面积的72%,分布在岷江上游大部分地区,显著改善和极显著改善面积占13%,主要分布在黑水河、杂谷脑河及岷江等河流两侧,显著退化和极显著退化面积占14%,主要分布在海拔高于4000m、地势起伏大的高山区域。

从2006—2016年岷江上游植被覆盖度变异系数图(图4b)上可以看出,岷江上游地区11年间植被覆盖整体情况较为稳定,植被覆盖度平均变异系数为13.21%。变异系数低于15%的植被覆盖度稳定区域占整个岷江上游地区面积的83%,主要分布在多年平均植被覆盖度高

于0.8的高植被覆盖地区及其边缘;15%与40%之间植被覆盖度不稳定区域占11%,主要分布在岷江上游河流两侧、岷江上游南部、西部和东北部区域;变异系数高于40%的植被覆盖度极不稳定区域占5%,主要分布在极高山极低植被覆盖区。

3.2 植被覆盖度逐年变化趋势

图5为2006—2016年岷江上游平均植被覆盖度逐年变化趋势折线图,从图上可以看出,岷江上游地区在研究时段内各年平均植被覆盖度总体较高,最高值为2016年的80.80%,最低值为2008年的76.91%,逐年变

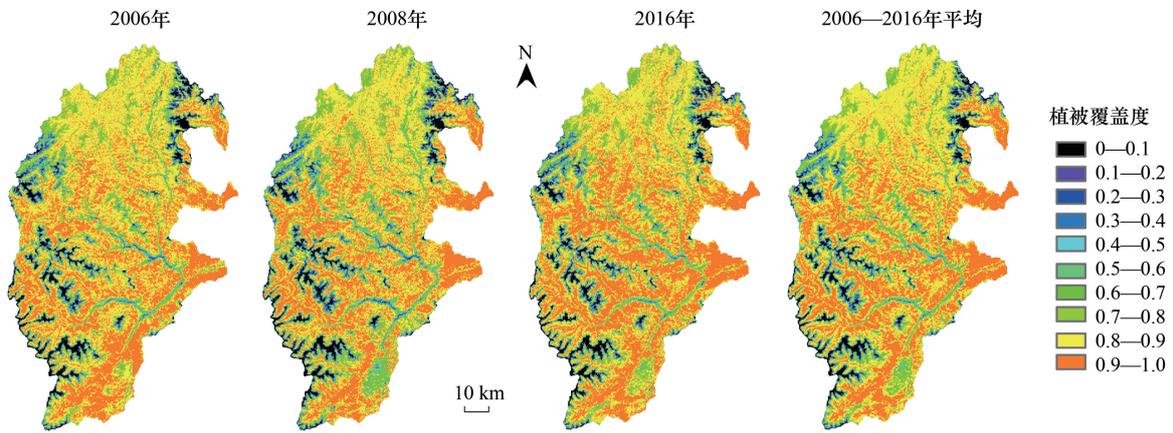


图3 岷江上游 2006 年、2008 年、2016 年、2006—2016 年平均 (avg) 植被覆盖度空间分布

Fig.3 Spatial distribution of fractional vegetation cover in the upper reaches of Minjiang River In 2006, 2008, 2016 and the average of 2006—2016

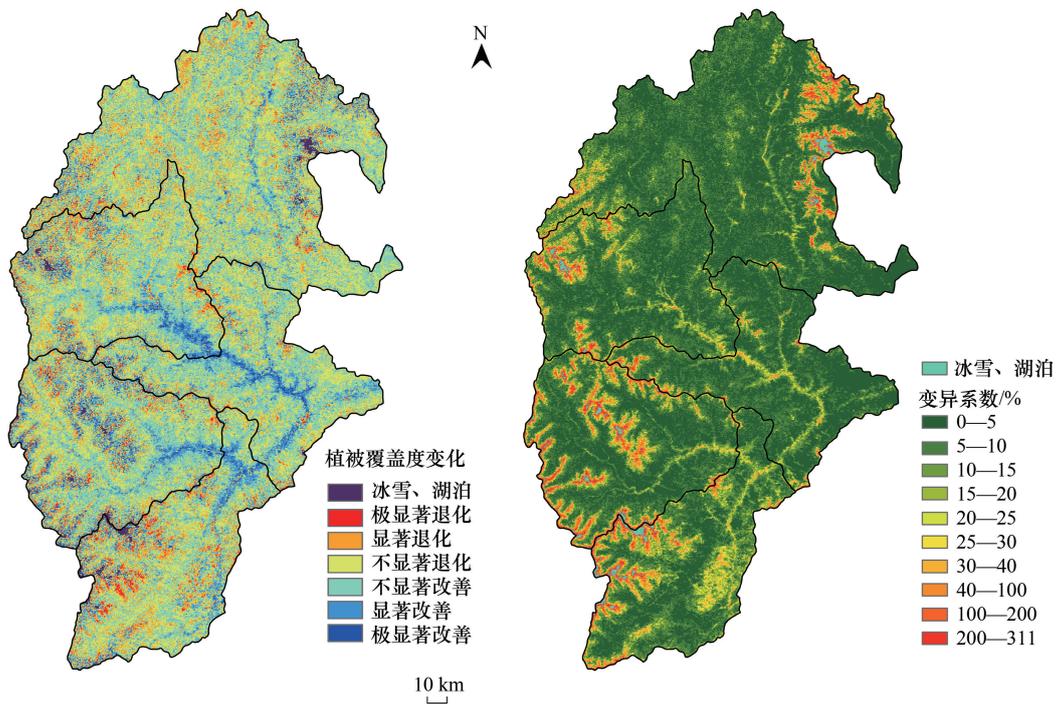


图4 2006—2016 年岷江上游逐像元植被覆盖度变化趋势 (a) 与变异系数 (b) 空间分布

Fig.4 Spatial distribution of the change trend (a) and the variable coefficient (b) of fractional vegetation cover in the upper reaches of Minjiang River from 2006 to 2016

化趋势可分为两个阶段,第一阶段为 2006—2008 年,年平均植被覆盖度呈急速下降的趋势,第二阶段为 2008—2016 年,年平均植被覆盖度呈波动上升的趋势。岷江上游地区植被覆盖度在 2008 年出现大幅下降,是由于 2008 年“5.12 汶川地震”的爆发给整个岷江上游地区植被造成了严重的破坏,经过多年的恢复,岷江上游植被覆盖度才逐渐恢复到震前水平。

图 6 为 2006—2016 年岷江上游各级植被覆盖度面积统计柱状图,从图上可以看出,各年植被覆盖度大于 0.6 的区域占整个岷江上游地区面积的绝大部分,并且主要集中在植被覆盖度大于 0.8 的高植被覆盖区域。其中 2008 年植被覆盖度大于 0.8 的区域面积小于其他年份,0.1—0.8 的各段植被覆盖度分布面积均大于其他

年份,说明 2008 年岷江上游植被覆盖度有由高植被覆盖度向低植被覆盖度转化的过程,进一步说明了 2008 年“5.12 汶川地震”对岷江上游植被造成显著的破坏。

3.3 “5.12 汶川地震”对岷江上游植被破坏及震后植被恢复

为综合研究 2008 年“5.12 汶川地震”对岷江上游植被造成的破坏以及震后植被的恢复

情况,本文将研究时段分为 2006—2008 年和 2008—2016 年两段进行讨论。2006、2008、2016 年的植被覆盖度空间分布如图 3 所示,从图上可以看出,2008 年岷江上游植被覆盖度出现了明显的下降,植被覆盖度

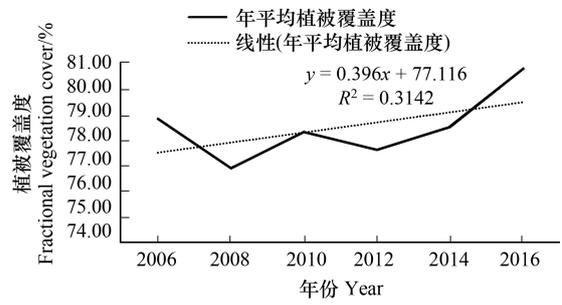


图 5 2006—2016 年岷江上游植被覆盖度变化趋势
Fig.5 The change trend of fractional vegetation cover in the upper reaches of Minjiang River from 2006 to 2016

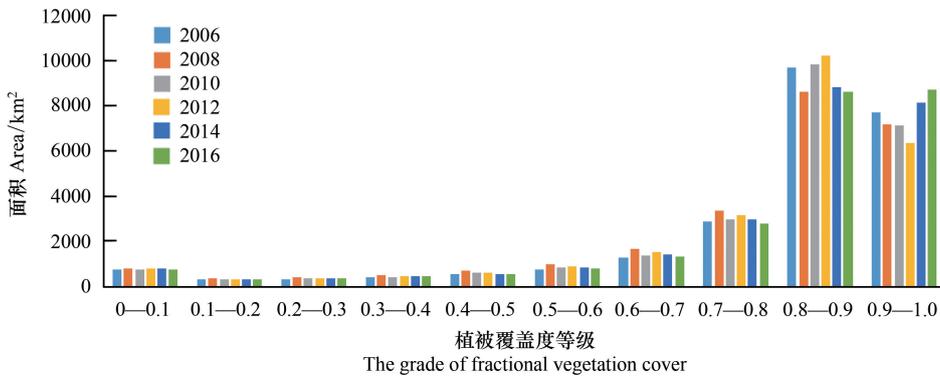


图 6 2006—2016 年岷江上游各等级植被覆盖度面积统计
Fig.6 The area statistics of fractional vegetation cover in the upper reaches of Minjiang River from 2006 to 2016

下降区域主要包括汶川县大部分地区、岷江上游河流两侧山区,其原因为:汶川县位于震中地区,受地震冲击最大,植被受损最为严重;岷江上游具有山高谷深、河流深切的地貌特点,地震爆发时,河流两岸发生大面积的滑坡、塌方等次生地质灾害,造成植被的严重破坏。2016 年岷江上游植被覆盖度整体状况明显好于 2008 年,甚至超过了 2006 年,说明岷江上游植被恢复状况良好,已经恢复到震前水平。

图 7 为 2006—2008 年、2008—2016 年岷江上游植被覆盖度逐像元变化趋势图。从图中可以得出,2006—2008 年间岷江上游植被覆盖度整体呈下降趋势,汶川县植被覆盖出现大面积、大幅度的退化,茂县和松潘县大部分地区、理县和黑水县东部地区植被覆盖出现不同程度的破坏。其中,植被覆盖退化 ($K < 0$) 的区域面积为 14013.41 km²,占整个岷江上游面积的 57%,显著改善和极显著改善区域仅占 15%,可以看出 2008 年汶川地震对岷江上游地区植被破坏程度巨大。2008—2016 年岷江上游植被覆盖度状况有明显改善,植被覆盖改善 ($K > 0$) 的区域面积为 17390.69 km²,占整个岷江上游面积的 71%,其中显著改善区域占 11%,极显著改善区域占 3%,植被覆盖明显改善的地区与地震破坏较为严重的地区存在空间的相似性,说明地震后岷江上游植被恢复状况良好,植被覆盖度状况已经超过震前水平。

3.4 植被覆盖度影响因子的地理探测

本文选取海拔、坡度、坡向、气温、降水、土壤类型、植被类型、地貌类型等 8 个自然环境因子,用于探测岷江上游植被覆盖度地域分异机制。在 ArcGIS 10.3 软件中将岷江上游地区进行规则网格划分,设置网格大小为 5 km×5 km,取每个网格的中心点为采样点,共计 992 个。将海拔、气温和降水栅格数据采用自然间断点分级法各分级为 9 类;坡度以 10°为间隔分为 9 类;坡向采用相等间隔分级法分为 10 类;参照《1:100 万中华人民共和国土壤图》土壤分类方法将岷江上游土壤类型分为棕壤、黑毡土、草毡土等 18 个类别;参照《1:1 000 000 中国植被图集》植被分类方法,将岷江上游植被类型分为灌丛、草甸、针叶林等 8 个类别,参照《中华人民

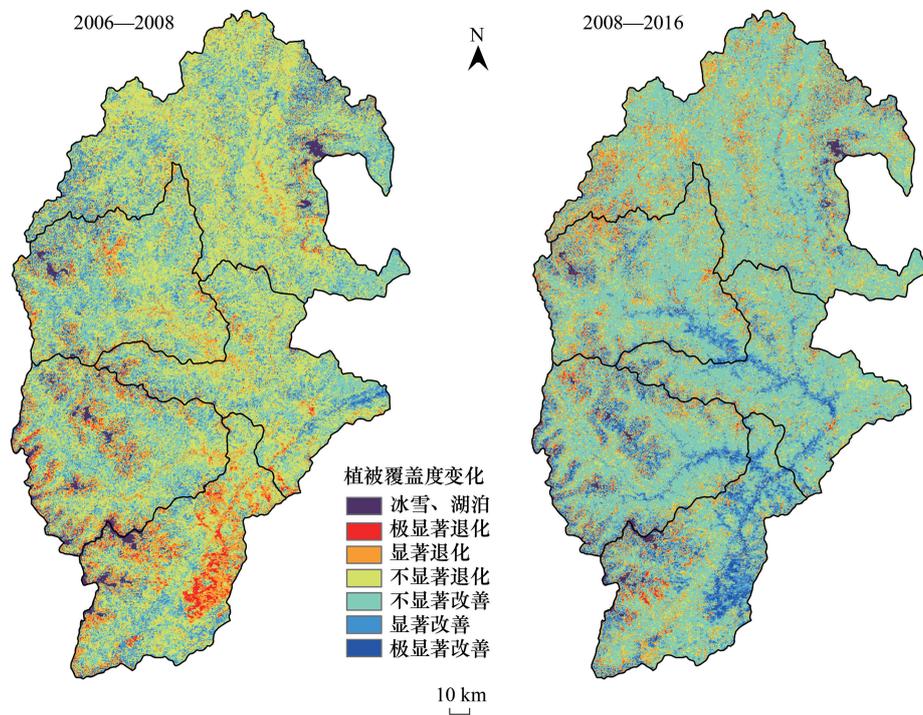


图7 2006—2008年、2008—2016年岷江上游植被覆盖度逐像元变化趋势

Fig.7 The pixel change trend of fractional vegetation cover in the upper reaches of Minjiang River during 2006—2008 and 2008—2016

共和国地貌图集(1:100万)》地貌分类方法,将岷江上游地貌分为中海拔丘陵、中海拔台地、中起伏高山等24个类别。将各个自然因子类型数据以及岷江上游多年平均植被覆盖度值提取到点,再将各采样点对应的自然因子数据和多年平均植被覆盖度值导入地理探测器软件进行运算。

地理探测器因子探测结果如表1所示,从表中可以得出,各自然因子对应的 q 值大小排序为:海拔>气温>土壤类型>降水>地貌类型>植被类型>坡度>坡向。从解释力角度来看,海拔、气温、土壤类型、降水四个因子是影响岷江上游植被覆盖度的最主要因素,其解释力都在40%以上;地貌类型、植被类型为次要影响因素,其解释力在20%—40%之间;坡度和坡向虽然是影响植物生长的重要因素,但这两个因子对岷江上游植被覆盖度的解释力均低于1%,说明岷江上游植被覆盖度受坡度和坡向的直接影响较小。

表1 因子探测结果

Table 1 The result of factor detection

自然因子 Natural factor	海拔 Altitude	坡度 Slope	坡向 Aspect	气温 Temperature	降水 Precipitation	土壤类型 Agrotype	植被类型 Vegetation type	地貌类型 Geomorphic type
q 值 q value	0.7569	0.0169	0.0039	0.5950	0.4054	0.5060	0.2240	0.3664

表2为生态探测结果,从表中可以看出,海拔与其他因子之间无显著性差异;气温与降水、土壤类型、植被类型、地貌类型之间无显著性差异;土壤类型与植被类型、地貌类型之间无显著性差异;降水与植被类型、地貌类型之间无显著性差异;地貌类型与植被类型之间存在显著性差异;坡度和坡向分别与气温、降水、土壤类型、植被类型、地貌类型之间存在显著性差异,坡度和坡向二者之间无显著性差异。这进一步说明了,海拔、气温、土壤类型、降水4个因子对岷江上游植被覆盖度影响最大,地貌类型、植被类型影响较大,坡度、坡向影响较小。

表 2 生态探测结果

Table 2 The result of ecological detection

	海拔 Altitude	坡度 Slope	坡向 Aspect	气温 Temperature	降水 Precipitation	土壤类型 Agrotype	植被类型 Vegetation type	地貌类型 Geomorphie type
海拔 Altitude								
坡度 Slope	N							
坡向 Aspect	N	N						
气温 Temperature	N	Y	Y					
降水 Precipitation	N	Y	Y	N				
土壤类型 Agrotype	N	Y	Y	N	Y			
植被类型 Vegetation type	N	Y	Y	N	N	N		
地貌类型 Geomorphie type	N	Y	Y	N	N	N	Y	

采用显著性水平为 0.05 的 F 检验, Y: 是, Yes, 表示两种因子在对植被覆盖度影响上存在显著性差异; N: 否, No, 表示无显著性差异

4 结论与讨论

4.1 讨论

岷江上游地区多云雾天气, 较高分辨率遥感影像多被厚厚的云层遮盖, 使得本次岷江上游植被覆盖度遥感估算只能借助较大尺度、较低分辨率的 MODIS 遥感数据, 虽然通过同期较高分辨率遥感影像对比和实测 NDVI 值验证取得良好结果, 但植被覆盖度遥感估算值与实测值难以完全相同, 估算的植被覆盖度还有待进一步检验^[14]。此外, 本文利用最大合成法 (Maximum Value Composite, MVC) 合成年最大 NDVI, 在此基础上估算得到的岷江上游植被覆盖度为年最大植被覆盖度, 较实测值或其他遥感估算方法所得值要高。利用像元二分模型估算植被覆盖度的方法虽早已得到广泛运用, 但直接关系到植被覆盖度估算结果的 $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$ 两个参数的取值, 依旧没有统一的标准^[30]。在利用像元二分模型估算植被覆盖度时, 需要研究者综合影像大小、影像清晰程度、NDVI 灰度分布等情况, 对比不同置信区间下估算得到的植被覆盖度, 并结合实测数据进行验证, 从而选择合适的 $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$ 值。

地理探测器模型最早运用于疾病防控领域, 因其在识别多因子之间关系方面展现出的强大优势而被广泛运用于驱动力研究^[41-42]。本文尝试将地理探测器模型引入到植被覆盖度地域分异机制研究中, 探测岷江上游植被覆盖度变化驱动力。结果表明, 运用地理探测器模型探测结果符合岷江上游植被生长规律, 说明运用地理探测器模型探测各因子对植被覆盖度有无影响以及影响力大小的方法具有科学性和可行性。本文用于驱动力探测的岷江上游植被覆盖度数据和各影响因子数据均为栅格图层, 需要在 ArcGIS 平台上生成格点, 然后提取每个格点上的数据带入模型进行运算。格点越密, 计算结果的精度就会越大, 但计算量也越大^[38]。所以, 在设置格点密度时, 需要兼顾空间特征与模型效率, 同时保持格点均匀分布^[43]。常用的栅格图层分类方法有自然断点分级法、相等间隔法、几何间隔法等, 研究中发现, 不同的分类方法对探测结果具有一定的影响, 在运用地理探测器模型进行植被覆盖度研究时, 应根据数据实际情况尝试不同的分类方法进行探测, 综合分析探测结果得出重要结论^[44]。

4.2 结论

本文基于 MODIS NDVI 遥感数据, 采用一元线性回归模型、计算变异系数等方法, 反演了 2006—2016 年岷江上游植被覆盖度时空变化格局, 评价了 2006—2016 年岷江上游植被覆盖度稳定性; 以 2008 年“5.12 汶川地震”为节点, 分段讨论了地震对岷江上游植被的破坏程度以及震后植被恢复状况; 利用地理探测器模型, 探测了各自然因子对岷江上游植被覆盖度有无影响以及影响力大小。得出以下结论:

(1) 2006—2016 年岷江上游地区植被覆盖整体状况良好, 植被覆盖度整体上呈缓慢上升的趋势, 多年平

均植被覆盖度为 0.79, 植被覆盖度大于 0.8 的区域占整个岷江上游地区面积的 69%, 植被覆盖度增加区域面积占整个岷江上游面积的 66%。

(2) 岷江上游 11 年间植被覆盖度整体情况较为稳定, 平均变异系数为 13.21%, 变异系数低于 15% 的植被覆盖度稳定区域占整个岷江上游地区面积的 83%。2006—2016 年岷江上游植被覆盖度逐年变化趋势可分为两个阶段, 第一阶段为 2006—2008 年, 平均年最大植被覆盖度呈急速下降; 第二阶段为 2008—2016 年, 平均年最大植被覆盖度呈波动上升。

(3) 2008 年“5.12 汶川地震”给整个岷江上游植被造成了严重的破坏, 植被覆盖度退化区域面积为 14013.41km², 占整个岷江上游面积的 57%; 2008—2016 年岷江上游植被恢复状况良好, 植被覆盖度改善区域面积为 17390.69km², 占整个岷江上游面积的 71%, 2016 年岷江上游植被覆盖度已经超过震前水平。

(4) 在选取的 8 个自然因子中, 岷江上游植被覆盖度主要受海拔、气温、土壤类型、降水 4 个因子的影响, 其解释力均在 40% 以上; 地貌类型、植被类型的解释力在 20%—40% 之间; 坡度、坡向的解释力均小于 1%。

参考文献 (References):

- [1] 陈效速, 王恒. 1982—2003 年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化. 地理学报, 2009, 64(1): 84-94.
- [2] Wang Q, Zhang Q P, Zhou W. Grassland coverage changes and analysis of the driving forces in Maqu County. Physics Procedia, 2012, 33: 1292-1297.
- [3] 任志远, 李晶. 陕南秦巴山区植被生态功能的价值测评. 地理学报, 2003, 58(4): 503-511.
- [4] 孟婷婷, 倪健, 王国宏. 植物功能性状与环境 and 生态系统功能. 植物生态学报, 2007, 31(1): 150-165.
- [5] 赵丽红, 王屏, 欧阳勋志, 吴志伟. 南昌市植被覆盖度时空演变及其对非气候因素响应. 生态学报, 2016, 36(12): 3723-3733.
- [6] 赵舒怡, 宫兆宁, 刘旭颖. 2001-2013 年华北地区植被覆盖度与干旱条件的相关分析. 地理学报, 2015, 70(5): 717-729.
- [7] 甘春英, 王兮之, 李保生, 梁钊雄, 李志文, 温小浩. 连江流域近 18 年来植被覆盖度变化分析. 地理科学, 2011, 31(8): 1019-1024.
- [8] Pabi O. Understanding land-use/cover change process for land and environmental resources use management policy in Ghana. GeoJournal, 2007, 68(4): 369-383.
- [9] Gong Z N, Zhao S Y, Gu J Z. Correlation analysis between fractional vegetation cover and climate drought conditions in North China during 2001-2013. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(2): 143-160.
- [10] 高海东, 庞国伟, 李占斌, 程圣东. 黄土高原植被恢复潜力研究. 地理学报, 2017, 72(5): 863-874.
- [11] 阿多, 赵文吉, 宫兆宁, 张敏, 范云豹. 1981—2013 华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响. 生态学报, 2017, 37(2): 576-592.
- [12] 刘海猛, 方创琳, 黄解军, 朱向东, 周艺, 王振波, 张蕾. 京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析. 地理学报, 2018, 73(1): 177-191.
- [13] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 刚成诚, 周伟, 居为民. 2001-2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征. 地理学报, 2012, 67(9): 1255-1268.
- [14] 彭文甫, 王广杰, 周介铭, 徐新良, 罗怀良, 赵景峰, 杨存建. 基于多时相 Landsat5/8 影像的岷江汶川-都江堰段植被覆盖动态监测. 生态学报, 2016, 36(7): 1975-1988.
- [15] 程红芳, 章文波, 陈锋. 植被覆盖度遥感估算方法研究进展. 国土资源遥感, 2008, (1): 13-18.
- [16] 贾坤, 姚云军, 魏香琴, 高帅, 江波, 赵祥. 植被覆盖度遥感估算研究进展. 地球科学进展, 2013, 28(7): 774-782.
- [17] 郑朝菊, 曾源, 赵玉金, 赵旦, 吴炳方. 近 15 年中国西南地区植被覆盖度动态变化. 国土资源遥感, 2017, 29(3): 128-136.
- [18] Zhang Y J, Zhai J, Ma H P, Li Z L, Rahaman M H, Dai Y G. Spatio-temporal variation of fractional fractional vegetation cover and response to climatic factors in Three Gorges Reservoir area from 2010 to 2014. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 94: 012126.
- [19] 朱敬芳, 邢白灵, 居为民, 朱高龙, 柳艺博. 内蒙古草原植被覆盖度遥感估算. 植物生态学报, 2011, 35(6): 615-622.
- [20] Lagomasino D, Price R M, Whitman D, Melesse A, Oberbauer S F. Spatial and temporal variability in spectral-based surface energy evapotranspiration measured from Landsat 5TM across two mangrove ecotones. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 213: 304-316.
- [21] 苗正红, 刘志明, 王宗明, 宋开山, 任春颖, 杜嘉, 曾丽红. 基于 MODIS NDVI 的吉林省植被覆盖度动态遥感监测. 遥感技术与应用, 2010, 25(3): 387-393.
- [22] Camacho-De Coca F, Garcia-Haro F J, Gilabert M A, Meliá J. Vegetation cover seasonal changes assessment from TM imagery in a semi-arid landscape. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(17): 3451-3476.
- [23] Jiménez-Muñoz J C, Sobrino J A, Plaza A, Guanter L, Moreno J, Martínez P. Comparison between fractional vegetation cover retrievals from vegetation indices and spectral mixture analysis: case study of PROBA/CHRIS data over an agricultural area. Sensors, 2009, 9(2): 768-793.

- [24] 李登科, 范建忠, 王娟. 陕西省植被覆盖度变化特征及其成因. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2896-2903.
- [25] 刘颖, 邓伟, 宋雪茜, 周俊. 基于地形起伏度的山区人口密度修正——以岷江上游为例. 地理科学, 2015, 35(4): 464-470.
- [26] Bian J H, Li A N, Song M Q, Ma L Q, Jiang J G. Reconstruction of NDVI time-series datasets of MODIS based on Savitzky-Golay filter. Journal of Remote Sensing, 2010, 14(4): 725-741.
- [27] Stow D, Petersen A, Hope A, Engstrom R, Coulter L. Greenness trends of Arctic tundra vegetation in the 1990s: comparison of two NDVI data sets from NOAA AVHRR systems. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(21): 4807-4822.
- [28] 何宝忠, 丁建丽, 张喆, 阿布都瓦斯提·吾拉木. 新疆植被覆盖度趋势演变实验性分析. 地理学报, 2016, 71(11): 1948-1966.
- [29] 马娜, 胡云锋, 庄大方, 张学利. 基于遥感和像元二分模型的内蒙古正蓝旗植被覆盖度格局和动态变化. 地理科学, 2012, 32(2): 251-256.
- [30] 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 周为峰. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算. 资源科学, 2004, 26(4): 153-159.
- [31] 刘宪锋, 杨勇, 任志远, 林志慧. 2000—2009年黄土高原地区植被覆盖度时空变化. 中国沙漠, 2013, 33(4): 1244-1249.
- [32] 吴志杰, 何国金, 王猛猛, 傅娇凤, 邹丹. 南方丘陵区植被覆盖度遥感估算与时空变化研究——以福建省永定县为例. 遥感技术与应用, 2016, 31(6): 1201-1208.
- [33] 张学玲, 张莹, 牛德奎, 张文元, 李志, 李真真, 郭晓敏. 基于 TM NDVI 的武功山山地草甸植被覆盖度时空变化研究. 生态学报, 2018, 38(7): 2414-2424.
- [34] 祝萍, 黄麟, 肖桐, 王军邦. 中国典型自然保护区生境状况时空变化特征. 地理学报, 2018, 73(1): 92-103.
- [35] 李卓, 孙然好, 张继超, 张翀. 京津冀城市群地区植被覆盖动态变化时空分析. 生态学报, 2017, 37(22): 7418-7426.
- [36] 李佳泓, 陆大道, 徐成东, 李扬, 陈明星. 胡焕庸线两侧人口的空间分异性及其变化. 地理学报, 2017, 72(1): 148-160.
- [37] 刘彦随, 李进涛. 中国县域农村贫困化分异机制的地理探测与优化决策. 地理学报, 2017, 72(1): 161-173.
- [38] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [39] 彭飞, 范闻捷, 徐希孺, 刘星. 2000—2014年呼伦贝尔草原植被覆盖度时空变化分析. 北京大学学报: 自然科学版, 2017, 53(3): 563-572.
- [40] 胡姝婧, 胡德勇, 赵文吉. 基于 LSMM 和改进的 FCM 提取城市植被覆盖度——以北京市海淀区为例. 生态学报, 2010, 30(4): 1018-1024.
- [41] 周亮, 周成虎, 杨帆, 王波, 孙东琪. 2000-2011年中国 PM_{2.5}时空演化特征及驱动因素解析. 地理学报, 2017, 72(11): 2079-2092.
- [42] 叶妍君, 齐清文, 姜莉莉, 张岸. 基于地理探测器的黑龙江垦区农场粮食产量影响因素分析. 地理研究, 2018, 37(1): 171-182.
- [43] 李莹莹, 尤罗利, 陈永生, 黄季夏. 环巢湖地区多水塘景观时空格局演变特征及其驱动因素. 生态学报, 2018, (17): 1-11.
- [44] 毕硕本, 计晗, 陈昌春, 杨鸿儒, 沈香. 地理探测器在史前聚落人地关系研究中的应用与分析. 地理科学进展, 2015, 34(1): 118-127.