

近 16 年金沙江流域植被覆盖时空 特征及其对气候的响应

张顾萍¹ 陈国民² 邵怀勇³ 仙巍⁴

(1. 西南交通大学 希望学院, 四川 成都 610400;

2. 成都市规划信息技术中心, 四川 成都 610041;

3. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059;

4. 成都信息工程大学, 四川 成都 610225)

【摘要】: 植被覆盖度是生态系统变化的主要指标之一。改善植被观测的时空尺度和植被动态变化及其驱动因素的方法, 能够为我们提供更多植被变化的信息, 有利于更好地了解该地区生态环境的特征和变化。基于 MODIS-EVI 数据, 使用 Sen 和 Mann-Kendall 模型, 结合偏相关分析和灰色关联分析 (GRA) 等方法, 探索了金沙江流域近 16 年植被覆盖的时空演变特征及其气候驱动力。结果表明: (1) 在近 16 年中, 金沙江流域的植被覆盖总体上呈增加的趋势, EVI 增速为 0.011/10a; (2) 植被覆盖改善区和退化区面积分别占总面积的 55.53% 和 28.95%; (3) 植被覆盖受气温和降水驱动的区域分别占总面积的 32.627% 和 28.265%。在半干旱区, 植被覆盖变化主要受降水的影响, 而在半湿润和湿润区主要受温度的影响, 但地形和植被类型会改变气候与植被覆盖之间的相关性; (4) 半干旱区植被覆盖对气候的响应不明显, 在半湿润和湿润区植被覆盖对温度的响应要慢于降水, 响应时间也随海拔和植被类型的不同而变化。高海拔地区的植被对气候因素的响应要快于低海拔地区, 农作物和草地对气候的响应更快, 针叶林和混交林对温度的响应要快于降水。

【关键词】: 植被覆盖度 时空特征 气候驱动力 时滞性 金沙江流域

【中图分类号】: Q948 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)07-1638-11

植被具有明显的年际和季节变化特征, 并在土壤保持, 调节大气和维持生态系统稳定等方面发挥着重要的作用^[1,2]。气候通过影响植被的光合、呼吸、蒸腾等作用成为影响植被生长发育重要的环境因子, 因此, 气候变化必然会影响到植被的生长情况。IPCC 近五次报告强调了全球气候变暖的事实, 尤其是近 50 年, 随着人口增长和自然资源的减少, 气候变化更加显著^[3]。全球气候变化对陆地生态系统产生了显著的影响^[4], 预计干旱地区将变得更加干热, 湿润地区将变得更加湿热^[5-7]。金沙江流域既是生态

作者简介: 张顾萍(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为资源与环境遥感. E-mail: 1612941493@qq.com

邵怀勇 E-mail: huaiyongshao@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41302282)

环境脆弱区，也是气候变化敏感区，其生态系统受到全球气候变化的影响^[8,9]。因此，监测该区域植被动态并探索其与气候的关系在生态环境保护中具有重要作用。

植被指数与植被覆盖呈高度线性正相关，能够在一定程度上反映地表复杂的结构、功能等信息。EVI 是由 Liu 等^[10]建立的能够在一定程度上表征地表植被覆盖度的增强植被指数。与归一化植被指数 (NDVI) 相比，EVI 可以克服植被生长易达到饱和的情况，能更准确地反映植被生长变化的过程^[11]；在相同的空间分辨率下，EVI 可以更好地反映植被覆盖的空间差异^[12]。MODIS 植被指数在监测大范围植被动态信息等方面具有明显的优势，在过去的几十年中，已有大量有关监测植被动态^[13]、探索其与气候因素和人类活动相关性的文章^[14~16]。偏相关分析用于监测植被动态与气候之间的相关性，可在一定程度上得到因子之间的正负相关性。但植被动态变化与气候因子之间存在非线性关系^[17]。灰色关联分析 (GRA) 主要探讨因素之间的几何对应关系，即序列的几何曲线越接近，它们之间的相关程度就越大，反之亦然。在关系不明确且未达到统计显著性水平的数据中，GRA 可以提高分辨率，增加分辨率距离并轻松得出结论^[18]。何东等^[19]利用 GRA 方法研究了 2000~2015 年内蒙古地区植被与气候因子之间的相关性，并在植被覆盖对气候响应的驱动力方面得到了很好的应用。由于 GRA 无法获得因素之间相关性的正负，因此有必要结合 GRA 和偏相关分析，探讨植被覆盖与气候的相关性，并进一步在像元的基础上分析植被覆盖对气候因子的响应情况。

已有研究者发表了金沙江流域植被覆盖变化及其与气候因子相关性的文章^[20,21]，研究结果主要基于线性回归分析监测植被动态；其次，探讨该区域植被覆盖与气候的相关性时使用具有线性特征的偏相关分析；再者，缺乏时滞分析或响应时间的空间分布。因此有必要进一步监测该区域植被覆盖时空变化及其对气候的响应机制。综上所述，本文基于空间分辨率为 250m 的 MOD13Q1-EVI 数据，使用 Sen 和 Mann-Kend11 模型探索 2000~2015 年生长季 (4~10 月) 植被覆盖的时空特征。以温度和降水为气象因子，利用偏相关分析和 GRA 方法研究了植被覆盖度与气象因子之间的相关性，并进一步探讨了气候因子的时滞性。主要包括以下内容：(1) 2000~2015 年生长季植被覆盖的时空特征。(2) 植被覆盖与气候因子间的相关性以及地形和植被类型对相关性的影响；(3) 生长季植被覆盖对气候因素的时滞性以及地形和植被类型对时滞性的影响。

1 数据与研究方法

1.1 研究区概况

金沙江流域属于长江上游地区，介于 90.54° E~104.95° E 和 24.46° N~35.78° N 之间，总面积约 47.46 万 km²。囊括了青藏高原、横断山区、滇北高原以及川西南山地。流域跨越了亚热带和青藏高原垂直分布带，以及湿润区和干旱区。研究区植被的纬度地带性显著，从半荒漠的干旱河谷演变到森林、高山灌丛、高山草甸和高原荒漠^[22] (图 1b)。

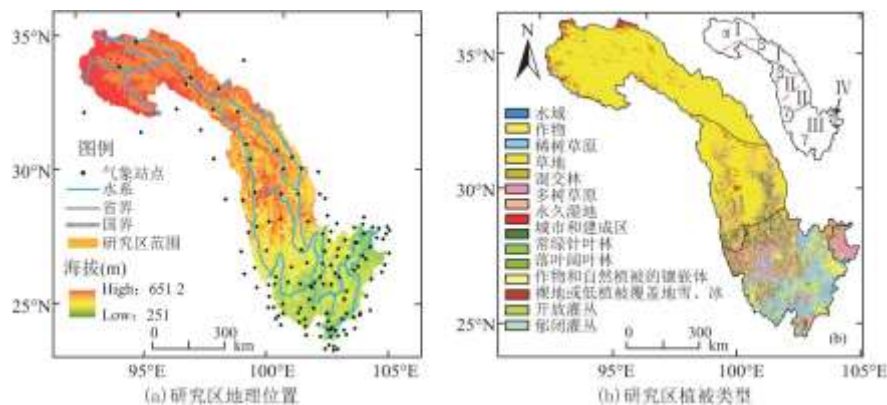


图 1 研究区概况

注：I-高寒草甸生态区；II-寒温性针叶林生态区；III-常绿阔叶林生态区；IV-农林复合生态区；α-半干旱区；β-半湿润区；γ-湿润区

1.2 数据处理

本研究选择了空间分辨率为 250m、时间分辨率为 16d 的 MOD13Q1-EVI 数据，时间跨度为 2000~2015 年，源于美国国家航空航天局(NASA)。由于原始影像存在噪音污染，本文对 EVI 进行时间序列谐波分析，处理后的数据能更好的反映植被生长的周期性变化^[23,24]；为有效的消除云、大气和太阳高度角的影响，采用最大合成法(MVC)得到逐月、逐年的 EVI 数据。本文主要探讨的是植被覆盖变化及其对气候的响应，需要剔除无植被覆盖区域。植被覆盖区域的年最大 EVI 值应该大于 0.1^[19]，因此将小于 0.1 的 EVI 值定义为无植被区。

气象数据选取了研究区及其周边 136 个气象站的气温与降水资料，源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)，干湿区划分结果源于中国干湿分区图。DEM 数据源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)，空间分辨率为 90m。由于气温同时受到经纬度和海拔的影响，因此本文采用了 TPS(薄板样条)对气温数据进行插值，得到的气温插值结果更为合理^[25]。降水数据则采用 Kriging 插值。生态区数据源于中国生态系统评估与生态安全数据库(<http://www.ecosystem.csdb.cn/index.jsp>)。植被类型数据源于 2010 年 MOD12Q1 产品集，分辨率为 1KM。

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析

结合 Theil-Sen 非参数趋势分析和 Mann-Kendall 检验，已成为判断长期序列数据趋势的重要方法，并已逐渐应用于植被的长期序列分析^[26~28]。由于研究区域内植被覆盖变化趋势尚不明确，并且考虑到可能存在异常值的情况，采用 Sen 方法对测量误差或离群数据具有较强的规避效果^[10]，且计算简单。公式如下：

$$\beta_{EVI} = \text{Mean}\left(\frac{X_j - X_i}{j - i}\right), \quad 2000 \leq i < j \leq 2015 \quad (1)$$

式中：β 表示 EVI 变化趋势，当 β > 0, 表示 EVI 呈上升趋势，β < 0, 表示 EVI 呈下降趋势。

非参数 Man-Kendall 趋势检验公式如下：

定义统计量

$$Z_S = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S < 0 \end{cases}$$

其中,

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

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

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

式中: i 、 j 表示时间序列; n 表示时间序列的长度; X_i 、 X_j 分别表示第 i 年和第 j 年的 EVI 值; sgn 是符号函数; 在给定的显著性水平 α 下, 当 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$, 表示原假设不成立, 且时间序列中存在显著趋势。其中 $Z_{1-\alpha/2}$ 是从标准正太分布表中获得。本文中取置信度 α 为 0.01 和 0.05, 通过查找表得 $Z_{1-\alpha/2}$ 分别为 1.96 和 2.58。

1.3.2 偏相关分析

地理系统是由多个元素组成的复杂的巨型系统。系统中任何元素的变化都将不可避免地影响其他元素的变化, 而偏相关分析可以有效地解决这一问题^[14]。计算公式如下:

$$r_{xy.z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)(1-r_{yz}^2)}} \quad (4)$$

式中: $r_{xy.z}$ 表示变量 z 固定后变量 x 与 y 的偏相关系数; r_{xy} 、 r_{xz} 、 r_{yz} 分别 x 与 y 、 x 与 z 、 y 与 z 之间的相关系数。其中, 相关系数计算公式为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{16} [(X_i - x)(y_i - y)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{16} (X_i - x)^2 \sum_{i=1}^{16} (y_i - y)^2}} \quad (5)$$

式中: r_{xy} 为 x 、 y 两变量的相关系数; x_i 为第 i 年/月的植被覆盖度; y_i 为第 i 年/月的温度或降水量; \bar{x} 为多年/年内各月植被覆盖度的平均值; \bar{y} 为多年/年内月温度或降水量的平均值; i 为样本数。

1.3.3 灰色关联分析

灰色关联分析是基于行为因素序列和行为主要序列的几何近似来分析和确定因素之间的影响程度或因素对主要行为的贡献^[29]。GRA 使用有限数据和信息来研究不确定性问题, 并且不受样本类型和概率分布的限制^[30], 计算公式如下:

比较因子数列表达为:

$$x_0 = [x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n)] \quad (6)$$

参考因子数列表达为:

$$X_i = [X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(n)] \quad (7)$$

X_i 与 x_0 的灰色关联系数 $\gamma(x_0, X_i)$ 为:

$$\gamma(x_0, X_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{x(\min) + \zeta x(\max)}{\Delta_{0i}(k) + \zeta x(\max)} \quad (8)$$

其中:

$$\Delta_{0i}(k) = |x_0(k) - X_i(k)|, \quad x(\min) = \min_i \min_k \Delta_{0i}(k), \\ x(\max) = \max_i \max_k \Delta_{0i}(k).$$

以 EVI 作为比较因子, 气温和降水作为参考因子, 分别计算得到 EVI 与气温、降水量的灰色关联系数。γ 越接近 1, 表示关联程度越高。

2 结果分析

2.1 金沙江流域生长季内植被覆盖的时空变化特征

利用研究区 2000~2015 年生长季平均 EVI 值得出 EVI 年际变化趋势(图 2)。金沙江流域的植被覆盖总体呈增加的趋势, EVI 增速为 0.011/10a, 均值为 0.363。其中 EVI 值在 2000、2003、2004、2005、2007、2008 和 2014 年低于均值, 其余年份高于均值。金沙江流域的平均植被覆盖趋于好转。

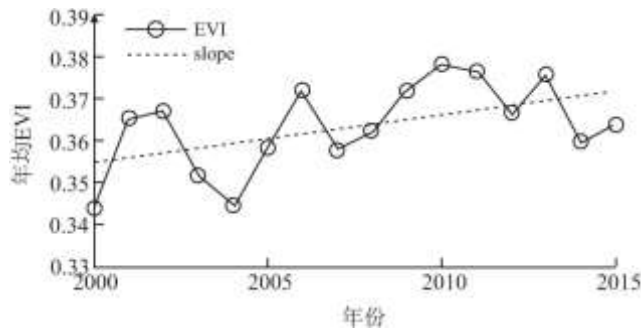


图 2 2000~2015 年金沙江流域生长季 EVI 年际变化

金沙江流域植被覆盖呈现南高北低的特点(图 3a), 低值主要集中在半干旱区, 植被类型为低覆盖草地和灌丛; 高值主要分布

在高寒草甸生态区南部、常绿阔叶林生态区以及农林复合生态区，植被类型多为中高覆盖度的灌草、林地和耕地。高寒草甸生态区南北植被覆盖差异大，平均 EVI 为 0.295；寒温性针叶林生态区的平均 EVI 为 0.366，该区域位于川西藏东高山深谷，海拔差异大，植被类型丰富多样，以针叶林、高山灌丛和草地为主；常绿阔叶林生态区海拔介于 260~5900m，除了大面积的林地，还包括栽培植被，EVI 均值为 0.427；农林复合生态区平均海拔为 1570m，属于中亚热带的湿润气候，加之未利用地极少，EVI 均值高达 0.53。

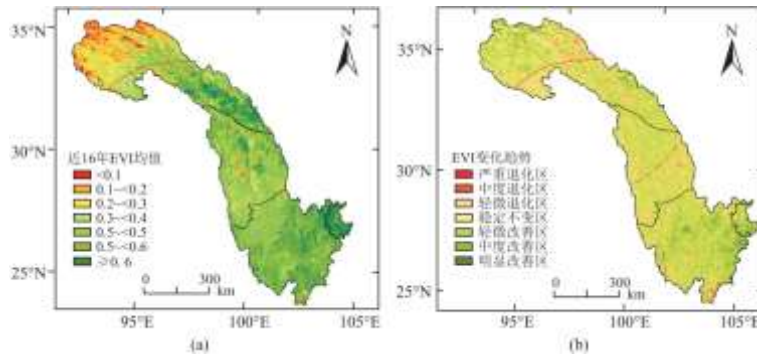


图 3(a) 2000~2015 年金沙江流域生长季多年年均 EVI, (b) EVI 变化趋势

2.2 空间趋势特征

结合 Sen 趋势分析和 Mann-Kendall 检验，可以有效地反映近 16 年 EVI 的空间变化趋势。由于极少存在不变化的区域，将 β_{EVI} 介于 -0.0005 和 0.0005 的值划分为稳定区域，高于 0.0005 的值划分为改善区域，低于 -0.0005 的值划分为退化区域^[13]。取置信度水平 α 为 0.05 和 0.01，得到相应的 Z 值为 1.96 和 2.58，将 Sen-Kendall 检验结果划分为极显著变化 ($Z > 2.58$ 或 $Z < -2.58$)、显著变化 ($Z > 1.96$ 或 $Z < -1.96$) 和变化不显著 ($-1.96 \leq Z \leq 1.96$)，叠加 Sen 趋势分析和 Mann-Kendall 检验分级结果，最终得到 EVI 变化趋势(表 1)。从表 1 可以看出，金沙江流域植被覆盖整体呈现出好转的趋势，植被改善区面积要远大于退化区，轻微改善区面积最大，其次是轻微退化区，严重退化区仅占 0.85%。金沙江流域植被覆盖变化趋势空间分布差异明显(图 3b)。

表 1 EVI 变化趋势统计

β_{EVI}	Z 值	EVI 趋势变化	面积百分比
≥ 0.0005	≥ 2.58	明显改善区	3.47%
≥ 0.0005	1.96~<2.58	中度改善区	6.46%
≥ 0.0005	-1.96~<1.96	轻微改善区	45.60%
-0.0005~<0.0005	-1.96~<1.96	稳定区	15.53%
<-0.0005	-1.96~<1.96	轻微退化区	26.34%
<-0.0005	-2.58~-<1.96	中度退化区	1.76%
<-0.0005	<-2.58	严重退化区	0.85%

退化区主要分布在北部地势起伏相对较大的地区、中部干热河谷两侧以及南部城镇地区。研究区北部和中部的严重退化区，年最大 EVI 介于 0.1~0.3，该区域气候干旱，地势陡峭，植被覆盖较低。南部退化区主要分布在城镇和耕种区，受人类活动影响较为严重。改善区分布最广，明显改善区主要分布在高寒草甸生态区中部、北部以及金沙江流域的东南部的部分耕种区，地势平缓区的改善更加显著。稳定区主要分布在常年无植被地区，包括裸岩砂砾，荒漠戈壁、河流湖泊以及城镇村庄等建设用地。整体上，金沙江流域植被改善南部强于北部，东部强于西部。

2.3 植被覆盖与气候因子之间的相关性分析

2.3.1 气候因子的年际变化特征

统计 2000~2015 年生长季内平均气温与累积降水量，得到金沙江流域 16 年来生长季内气温与降水的变化趋势(图 4)。金沙江流域各年生长季内的平均温度介于 7.72℃~8.84℃，气温变化总体呈现出增加的趋势，增速为 0.496℃/10a(图 4a)，多年平均气温为 8.285℃。降水量的变化趋势与气温有所不同，研究区近 16 年生长季内累积降水量呈微弱减少趋势，速率为 -18.237mm/10a(图 4b)。累积降水量在 530~652mm 之间波动，均值为 621.4mm。2006 年和 2011 年累计降水量明显低于多年平均值，这可能与 2006 年与 2011 年我国西南地区夏季出现大范围干旱事件有关^[31]。不同生态区气温和降水差异明显，气温和降水总体呈现东南高、西北低，由东南向西北逐渐递减的特点。

2.3.2 生长季内 EVI 与气候因子之间的关系

气温和降水是影响植被覆盖的主要自然因素^[32]。本文选取气温和降水来探讨金沙江流域植被覆盖的气候驱动力。以年为单位，计算各像元近 16 年 EVI 与生长季内均温、累积降水量的灰色关联系数和偏相关系数，同时叠加相同时空尺度 EVI 与气候的偏相关分析定性结果与灰色关联系数，从而得到基于像元的 EVI 变化的气候驱动系数，以自然间段分类法分类得到该研究区 EVI 变化驱动力空间分布图(图 5)，气候驱动力分区规则如表 2 所示(高于 0.65 的值为正向驱动，低于-0.65 的值为反向驱动)。

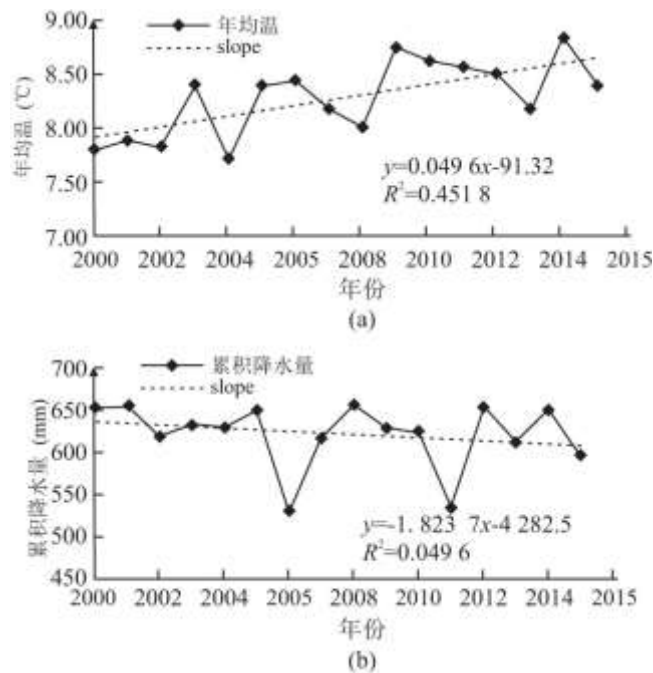


图 4(a)金沙江流域年均温、(b)累积降水量

金沙江流域生长季 EVI 变化受气温和降水驱动的区域分别占总面积的 32.627%和 28.265%,表明研究区植被覆盖主要受温度影响的区域要多于降水。EVI 受气温和降水正向驱动分别占总面积的 14.967%和 11.473%,而反向驱动所占比例分别为 7.061%和 6.193%,表明温度和降水促进植被生长的区域要远大于它们对植被生长起抑制作用的区域。在高寒草甸生态区中, EVI 受降水驱动的区域(11.778%)要高于 EVI 受温度驱动的区域(9.259%),且主要分布在东北部,表明半干旱地区植被覆盖主要受降水影响。其余 3 个生态区的 EVI 受温度驱动的区域要高于 EVI 受降水驱动的区域。EVI 受气温正向驱动的区域(20.634%)集中分布在高寒草甸生态区地势较为平缓的区域和常绿阔叶林生态区; EVI 受降水强正向驱动的区域(16.468%)集中分布在高寒草甸生态区、部分干热河谷两侧、农林复合生态区以及西南部地势较为平缓的耕种区。EVI 受气温反向驱动的区域(11.993%)主要分布在寒温带针叶林生态区和农林复合生态区,其植被类型主要为针叶林和多树的草原; EVI 受降水反向驱动的区域(11.796%)集中分布在半湿润和湿润区的低覆盖草地区和农林混合区。另外在半干旱地区, EVI 受温度驱动的区域主要分布在地势相对平缓的区域,而受降水驱动的区域主要分布在地势起伏度较大的区域。在半湿润和湿润区, EVI 受降水驱动的区域分布在海拔相对较低的区域,而受温度驱动的区域主要分布在海拔相对较高的区域。

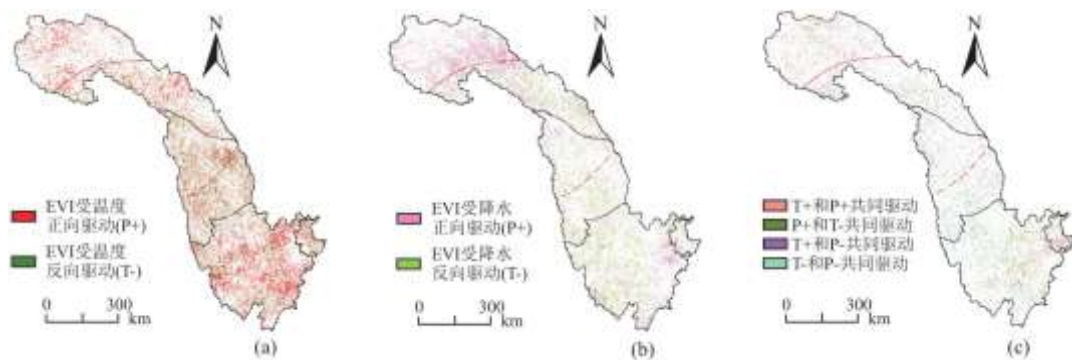


图 5 金沙江流域近 16 年生长季内 EVI 变化受温度驱动(a)、降水驱动(b)、共同驱动(c)的空间分布图

表 2 金沙江流域 EVI 变化的气候驱动力分区规则

EVI 变化的气候驱动因子	气候驱动分区规则	
	C_t	C_p
T^+	$C_t > 0.65$	
P^+		$C_p > 0.65$
T^-	$C_t < -0.65$	
P^-		$C_p < -0.65$
$T^+ \text{ and } P^+$	$C_t > 0.65$	$C_p > 0.65$
$T^+ \text{ and } P^-$	$C_t > 0.65$	$C_p < -0.65$
$T^- \text{ and } P^+$	$C_t < -0.65$	$C_p > 0.65$

2.3.3 EVI 与气候因子的时滞性分析

植被生长对气候响应存在时滞效应^[33],且对不同的气候因子存在不同的滞后性^[34]。本文分别从气温和降水两方面来探讨生长季内植被对气候因子的时滞性。在计算 EVI 与气候因子的时滞性时,以 4~10 月的 EVI 作为参考因子,分别以 4~10、3~9、2~8、1~7 月的气候因子作为比较因子进行灰色关联分析,从而得到 EVI 与气候因子的时滞性结果,各生态区内 EVI 与气候因子的时滞性统计结果见表 3。

生长季内植被对气温和降水存在滞后性,无明显时滞效应的区域主要分布在研究区北部、中部以及农林复合生态区。金沙江流域 EVI 对气温和降水存在 1~3 月左右滞后期的区域分别占总面积的 8.96%和 13.81%(1 个月)、6.90%和 1.97%(2 个月)、4.25%和 1.82%(3 个月),表明该区域植被对温度的响应整体上慢于降水。由于研究区的空间差异大,导致时滞性的空间差异明显, EVI 对气候因子的时滞性的空间分布如下图所示。

表 3 研究区 EVI 与气候因子的时滞性分区统计结果

生态分区	无显著时滞期(%)		1 个月时滞期(%)		2 个月时滞期(%)		3 个月时滞期(%)	
	A	B	A	B	A	B	A	B
I	38.02	36.65	0.04	1.40	0.00	0.00	0.00	0.01
II	22.62	22.73	1.65	2.01	0.86	0.51	0.44	0.32
III	16.85	20.61	7.27	10.40	6.04	1.45	3.80	1.49
IV	2.40	2.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

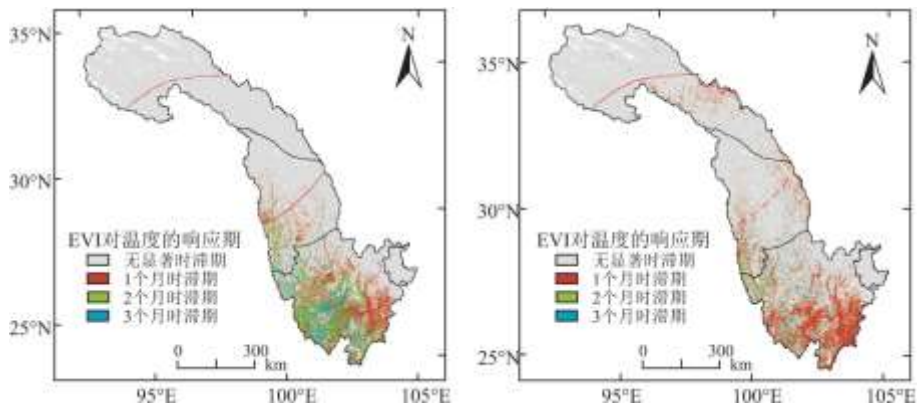


图 6(a)金沙江流域 2000~2015 年生长季内 EVI 对温度的滞后期和 EVI 对降水的滞后期、(b)滞后期空间分布

研究区植被对气候的响应由南向北逐渐变弱,时滞期逐渐变短。南部的时滞性强,中部和北部的时滞效应不明显。时滞期 1~3 月集中分布在海拔 3500m 以下的区域。耕地对气温存在 0~1 月左右的滞后期,主要分布在海拔相对较低的区域。草地对气温存在 0~2 月左右的滞后期,稀树草原、多树的草原和灌丛对气温存在 0~3 月左右的时滞期,混交林和针叶林对气温的时滞效应不明显。耕地对降水的滞后性不明显,草地、稀树草原和灌木林对降水均存在 0~1 月左右的滞后期,部分针叶林对降水存在 3 个月左右的滞后期,并随着纬度的升高,这种现象变得不明显。多树的草原和混交林对降水存在 0~2 月的时滞期。

3 讨论

3.1 金沙江流域近 16 年植被覆盖度变化趋势

在过去 16 年里,金沙江流域植被覆盖表现出缓慢增长的趋势(0.011/10a)。以往研究显示,在湿润和半湿润地区,植被覆盖变化趋势受海拔影响,低海拔地区的植被覆盖改善要比高海拔地区的更为显著^[17]。在我们的研究中发现,在湿润半湿润地区,无论是改善还是退化,低海拔的植被覆盖变化比高海拔区更为显著。在地势起伏度和坡度较大的地区,植被更容易发生退化现象。位于研究区北部地势起伏度较大的严重退化区和位于中部河谷两侧坡度较大的退化区,地势复杂,植被类型相对单一,生态环境承载力较差,植被退化所占的比例要高于植被改善的比例。在低海拔地区,植被变化更容易受到人类活动的影响。随着海拔和坡度的增加,植被受到人类活动的影响较小,而受到自然因素的影响更大^[17]。

3.2 植被覆盖变化与气候的相关性研究

在 2000~2015 年中,金沙江流域生长季表现出明显的变暖和干燥的趋势,这可以归因于全球变暖。随着生长期的延长和光合强度的增加,观察到植被在生长季显现出绿化现象^[35,36]。植被覆盖与气候之间的相关性不仅受气候类型的影响,还受植被种类和海拔高度的影响^[37~39]。部分研究表明,中国西南地区植被覆盖与温度之间的相关性强于降水^[40]。在金沙江流域中部和南部,植被与温度的相关性强于降水,而在北部的高寒草甸生态区,植被与降水的相关性要强于温度(图 5),表明在半湿润和湿润区,温度对植被的影响要高于降水,而在半干旱区,降水对植被的影响要高于温度,与前人研究一致^[41]。在北部地势相对平缓的水源区,地表径流等其他水分来源在一定程度上削弱了降水对植被的直接效应,使得植被对温度的敏感度高于降水;在半湿润和湿润区,低海拔的植被受降水的影响要高于温度,随着海拔的升高,温度对植被的影响要高于降水。这可能与半湿润和湿润区干热河谷分布有关。受焚风作用影响,该区域河谷区热量高,雨量少,山体中部及上部雨量逐渐增加、温度逐渐降低。

在半干旱地区,植被变化与温度呈不显著的负相关,而在湿润和半湿润区,植被覆盖与温度呈显著正相关,这与前人研究一致^[42]。然而,地形和植被类型会影响植被变化与气候之间的关系^[17]。在金沙江流域的半干旱区,EVI 与气温的相关性并不显著,但海拔和坡度会改变这种关系。在坡度较大的山地,EVI 与温度表现出显著负相关(图 5(a))。在没有充沛水源的地区,温度升高会增加蒸腾作用,从而抑制植被的生长^[43],这些地区的植被覆盖多呈退化趋势。随着坡度变小,EVI 与气温的负相关性变得不显著。而在地势相对平缓的水源区,EVI 与温度表现出显著正相关。该地区水源相对充足,温度升高会促进植被的光合作用,植被表现出明显的改善趋势。在半湿润和湿润区,由于降水充足,温度升高不会影响水的可用性,但会促进植被的光合作用。温度与 EVI 显著正相关的区域植被多表现为改善趋势。除针叶林外,温度与 EVI 的正相关程度随着海拔的升高逐渐变得显著。针叶林更适合在低温下生长,温度升高反而会抑制植被的生长,使得植被覆盖与温度呈负相关,这与 Qi 等^[17]研究一致。在研究区喀斯特地貌的南部,温度升高导致植被略有退化,这可能与喀斯特地区水土保持能力差,温度升高会加剧地表蒸腾作用有关^[44]。

研究表明,在半干旱地区,降水与植被呈正相关,而在半湿润和湿润地区,这种关系并不显著^[45],这与我们的研究基本一致。我们的研究还表明,降水减少是半干旱区植被退化的主要气候因素之一。在坡度较大的山区,EVI 与降水呈显著正相关,在没有其他可利用的水源时,半干旱区降水的减少会加剧植被的退化。在坡度较小的水源区,EVI 与降水的正相关性减弱,植被的退化趋势也逐渐减弱。在干热河谷区,降水与植被变化呈显著正相关,该区域气候相对干旱暖热,降水的减少是植被出现退化趋势气候原因之一。在部分农林混合区、耕种区和低覆盖度草地,植被变化与降水呈显著负相关,可能与该地区水土保持能力较差,降水的增加反而会造成植被轻微退化有关。

3.3 植被覆盖与气候的时滞性研究

一些研究表明了植被变化对气候存在时滞效应,区域特征和植被类型会影响植被对气候因子的响应^[42]。在半湿润和湿润区,同区域的植被对温度的响应要慢于降水(图 6),即降水对生长季植被的影响要快于温度。随着海拔升高,研究区植被对气候因子的响应逐渐加快,滞后期逐渐变短。这种现象也在中国广西也有发生^[46]。植被对气候的时滞性在半湿润区和湿润区表现更强,但植被类型会影响这种相关性^[47]。混交林和针叶林对温度的响应最快,其次是耕地,草原,稀树草原,多树草原和灌木。作物

对降水的响应最快，其次是草原，稀树草原和灌木，多树草原，混交林和针叶林。在海拔较低的地区，农业活动更为频繁，使得植被对水热的利用效率要高于海拔较高的地区。针叶林和混交林对温度的敏感强于降水，这可能是其对温度的响应快于降水的原因之一。了解植被对气候因子的时滞效应有助于人类对水热条件的充分利用。

3.4 研究不足

影响植被生长的因素很多。刘宪峰等人研究了三河源头地区 NDVI 与气候因子(温度, 降水和潜在蒸散量)之间的关系^[15]。我们仅讨论了 JRB 中植被覆盖度与气候因子(温度和降水)之间的 GRG, 这在本文中有一定的局限性。区域植被变化是气候与非气候因素相互作用的结果。穆少杰等人讨论了人类活动对人类活动对植被覆盖的影响^[14]。研究表明, 植被与气候之间的关系会随时间尺度的改变而存在差异^[17]。植被覆盖对气候因子的月响应同样会受到数据类型的影响。Xia 等人研究表明, 同一气象站 NDVI、EVI 与气候因子的相关系数不同, 并随着气象站发生变化^[48]。因此, 未来需要从气象因子种类、数据类型、气象站台的分布与数量等方面综合考虑植被覆盖对气候因子的响应关系。另外, 随着全球气候的变化, 极端事件出现的频率高, 持续时间长, 国内外不少学者关注和研究了极端事件对植被覆盖的影响^[49,50]。因此, 有必要进一步探讨植被覆盖度变化的归因。

4 结论

本文基于 MODIS-EVI 数据反演了金沙江流域 2000~2015 年植被覆盖状况, 并结合该时期的气温和降水数据, 从不同空间尺度上分析了近 16 年来该区域的植被覆盖变化情况及其驱动因素。得出如下结论:

(1) 金沙江流域植被覆盖具有明显的区域差异, 总体上呈现东南高、西北低, 由东南向西北逐渐递减的特点。其中, EVI 高值主要分布在高寒草甸生态区的东南部、常绿阔叶林生态区和农林复合区, 植被类型主要为草甸、林地和人工栽培植被; EVI 低值主要分布在金沙江源和中部的高山裸土裸岩区。

(2) 金沙江流域近 16 年来生长季植被覆盖呈上升趋势, EVI 增速为 0.011/10a。其中, 植被覆盖显著改善区和轻微改善区占总面积的 9.93%和 45.60%, 而植被覆盖显著退化区和轻微退化区占总面积的 2.61%和 26.34%。

(3) 金沙江流域植被覆盖受气温和降水影响的区域分别占总面积的 10.18%和 9.51%。气温影响植被变化的区域分布范围广, 降水影响植被覆盖变化的区域分布较为集中, 主要分布在干热河谷两侧或降水量相对较少的半干旱区; 二者共同影响植被覆盖变化的区域仅占总面积的 1.39%。

(4) 植被覆盖对不同气候因素的响应期不同。植被对温度的响应通常慢于降水, 特别是在半湿润和湿润区。海拔和植被类型会影响植被对气候的响应期。通常, 高海拔地区的植被对气候因素的响应要快于低海拔地区, 农作物和草地对气候的响应更快, 针叶林和混交林对温度的响应要快于降水。

参考文献:

- [1] 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 等. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系—基于 NOAA 时间序列数据分析[J]. 遥感学报, 1998(3):204-210.
- [2] 范娜, 谢高地, 张昌顺, 等. 2001 年至 2010 年澜沧江流域植被覆盖动态变化分析[J]. 资源科学, 2012, 34(7):1222-1231.
- [3] 赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. 回顾 IPCC30 年(1988-2018 年)[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(5):540-546.

-
- [4] ZHAO X, TAN K, ZHAO S. Changing climate affects vegetation growth in the arid region of the northwestern China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(10):946-952.
- [5] GU L J, LIANG S L, YI Q X, et al. Vegetation dynamics and responses to recent climate change in Xinjiang using leaf area index as an indicator[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 58:64-76.
- [6] LI Q, ZHANG C L, SHEN Y P, et al. Quantitative assessment of the relative roles of climate change and human activities in desertification processes on the Qinghai-Tibet Plateau based on net primary productivity[J]. *Catena*, 2016, 147:789-796.
- [7] JIANG L, GULI J, BAO A, et al. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia[J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 599-600:967-980.
- [8] WALTHER G R, POST E, CONVEY P, et al. Ecological responses to recent climate change[J]. *Nature (London)*, 2002, 416:389-395.
- [9] PARMESAN C. Ecological and evolutionary responses to recent climate change[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2006, 37(1):637-669.
- [10] LIU H Q, HUETE A. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33:457~465.
- [11] 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(1):26-32.
- [12] 叶琦, 赵萍, 孙静. 基于 MODIS/NDVI 与 EVI 的皖江流域植被覆盖比较分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(3):361-368.
- [13] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 等. 2000-2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化[J]. *生态学报*, 2013, 33(24):7798-7806.
- [14] 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.
- [15] LIU X F, ZHANG J S, ZHU X F, et al. Spatiotemporal changes in vegetation coverage and its driving factors in the Three-River Headwaters Region during 2000-2011[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(2):288-302.
- [16] 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 等. 2000-2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. *地理学报*, 2015, 70(5):705-716.
- [17] QI X Z, JIA J H, LIU H Y, et al. Relative importance of climate change and human activities for vegetation changes on China's silk road economic belt over multiple timescales[J]. *Catena*, 2019, 180:224-237.
- [18] 谭学瑞, 邓聚龙. 灰色关联分析: 多因素统计分析新方法[J]. *统计研究*, 1995, 12(3):46-48.
- [19] HE D, YI G H, ZHANG T B, et al. Temporal and spatial characteristics of EVI and its response to climatic factors

in recent 16 years based on grey relational analysis in inner mongolia autonomous Region,China[J].Remote Sensing, 2018,10(6):961.

[20]王鹤, 韩琳, 唐信英, 等. 金沙江流域植被覆盖时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(10):1191-1196.

[21]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.

[22]孙士型, 陈良华, 向永龙, 等. 金沙江流域面雨量的气候特征[J]. 高原山地气象研究, 2009(S1):7-10.

[23]LI Q, ZHANG C L, SHEN Y P, et al. Quantitative assessment of the relative roles of climate change and human activities in desertification processes on the Qinghai-Tibet Plateau based on net primary productivity[J]. Catena, 2016, 147:789-796.

[24]ROERINK G J, MENENTI M, VERHOEF W. Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 21(9):1911-1917.

[25]ZHANG X Q, SHAO J A, LUO H X. Spatial interpolation of air temperature with ANUSPLIN in Three Gorges reservoir area[J]. International Conference on Remote Sensing IEEE, 2011, 3465-3468.

[26]TUCKER C J, NEWCOMB W W, LOS S O, et al. Mean and inter-year variation of growing-season normalized difference vegetation index for the Sahel 1981-1989[J]. International Journal of Remote Sensing, 1991, 12(6):1133-1135.

[27]LUNETTA R S, KNIGHT J F, EDIRIWICKREMA J, et al. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 105(2):142-154.

[28]MILICH L, WEISS E. GAC NDVI interannual coefficient of variation (CoV) images:Ground truth sampling of the Sahel along north-south transects[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 21(2):235-260.

[29]SHEN C G, WANG Y Y, WEI Y G, et al. A lag analysis of R&D investment driving economic growth using grey relational model[R]. IEEE International Conference on Environmental Science and Information Application Technology, 2010, 61-64.

[30]YAO Z, WEI Z. Correlation analysis between vegetation fraction and vegetation indices in reclaimed forest:A case study in Pingshuo mining area[R]. IEEE International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications, 2016, 122-126.

[31]贾艳青, 张勃. 基于日 SPEI 的近 55a 西南地区极端干旱事件时空演变特征[J]. 地理科学, 2018, 38(3):474-483.

[32]南颖, 刘志锋, 董叶辉, 等. 2000~2008 年长白山地区植被覆盖变化对气候的响应研究[J]. 地理科学, 2010, 30(6):921-928.

[33]NEZLIN N P, KOSTIANOV A G, LI B L. Inter-annual variability and interaction of remote-sensed vegetation index and atmospheric precipitation in the Aral Sea region[J]. Journal of Arid Environments, 2005, 62(4):677-700.

-
- [34]GOWARD S N, PRINCE S D. Transient effects of climate on vegetation dynamics:Satellite observations[J]. Journal of Biogeography, 1995, 22:549-564.
- [35]DRAGONI D, SCHMID H P, CRAIG A, et al. Evidence of increased net ecosystem productivity associated with a longer vegetated season in a deciduous forest in south-central Indiana, USA[J]. Global Change Biology, 2011, 17(2):886-897.
- [36]RICHARDSON A D, BLACK T A, CIAIS P, et al. Influence of spring and autumn phenological transitions on forest ecosystem productivity[J]. Philosophical Transactions of The Royal Society B-Biological Sciences, 2010, 365(1555):3227-3246.
- [37]MOLNAR P, BOOS W R, BATTISTI D S. Orographic controls on climate and paleoclimate of asia:Thermal and mechanical roles for the tibetan plateau[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2010, 38(1):77-102.
- [38]HUANG K, ZHANG Y J, ZHU J T, et al. The influences of climate change and human activities on vegetation dynamics in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Remote Sensing, 2016, 8(10):876.
- [39]GU L J, LIANG S L, YI Q X, et al. Vegetation dynamics and responses to recent climate change in Xinjiang using leaf area index as an indicator[J]. Ecological Indicators, 2015, 58:64-76.
- [40]HOU W J, GAO J B, WU S H, et al. Interannual variations in growing-season NDVI and its correlation with climate variables in the southwestern Karst Region of China[J]. Remote Sensing, 2015, 7(9):11105-11124.
- [41]HUA W J, CHEN H S, ZHOU L M, et al. Observational quantification of climatic and Human influences on vegetation greening in China[J]. Remote Sensing, 2017, 9(5):425.
- [42]XU Y F, YANG J, CHEN Y N. NDVI-based vegetation responses to climate change in an arid area of China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 126(1-2):213-222.
- [43]HUANG S W, KONG J M. Assessing land degradation dynamics and distinguishing human-induced changes from climate factors in the Three-North shelter forest region of China[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2016, 5(9):158.
- [44]JIANG Z C, LIAN Y Q, QIN X Q. Rocky desertification in Southwest China:Impacts, causes, and restoration[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 132:1-12.
- [45]XIE B N, JIA X X, QIN Z F, et al. Vegetation dynamics and climate change on the Loess Plateau, China:1982-2011[J]. Regional Environmental Change, 2015, 16(6):1583-1594.
- [46]韦振锋, 任志远, 张翀. 气候因子与植被的时滞相关分析——以广西为例[J]. 生态环境学报, 2013, 22(11):1757-1762.
- [47]TIAN Y C, LIANG M Z. The NDVI characteristics of vegetation and its ten-day response to temperature and precipitation in beibu gulf coastal region[J]. Journal of natural resources, 2016, 31(3):488-502.

[48]XIA P, YONG G, JI W. Response Differences of MODIS-NDVI and MODIS-EVI to Climate Factors[J]. Journal of Resources and Ecology, 2018, 9(6) :673-680.

[49]HILKER T, LYAPUSTIN A I, TUCKER C J, et al. Vegetation dynamics and rainfall sensitivity of the Amazon[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2014, 111(45) :16041-16046.

[50]ZHOU L, TIAN Y, MYNENI R B. Widespread decline of Congo rainforest greenness in the past decade[J]. Nature, 2014, 509(7498) :86-90.