

文章编号: 1008-2786-(2018)2-229-10

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000318

## 滇西南地区 NDVI 变化及其对不同时间 尺度干湿变化的响应

赵平伟, 李宏波, 郭 萍, 杨 文

(云南省临沧市气象局, 云南 临沧 677099)

**摘 要:** 利用 2001—2013 年 MODIS/NDVI 归一化植被指数时间序列, 采用变异系数、一元线性趋势变化等多项指标, 结合 SPEI 指数和 DEM 分级数据提取不同高程地区的 NDVI 变化信息, 分析滇西南地区不同海拔梯度 NDVI 时空变化规律及对不同时间尺度干湿变化的响应, 结果表明: (1) 研究区不同海拔梯度四季和年 NDVI 波动变化较小, NDVI 变化趋势随海拔梯度变化存在一定的差异性, 但总体上升趋势明显, 四季和年 NDVI 改善区域占研究区 46.9% ~ 74.0%。(2) 各海拔梯度 NDVI 变化百分率多集中在 -10% ~ 10% 范围; 以 1500 m 为界, 变化百分率超过 (小于) 10% (-10%) 的区域在高于 (低于) 1500 m 的 3 个海拔梯度上。(3) 各海拔梯度 NDVI 与 2 ~ 8 个月时间尺度 SPEI 指数相关性最为密切, 表明研究区 NDVI 对降水及蒸散发导致的水分盈亏的响应具有滞后效应和累积效应; 1—5 月及春、冬季 NDVI 对 SPEI 指数的响应较强, 7—9 月和夏季 NDVI 与 SPEI 指数呈负相关。(4) 2 个典型干旱年中, NDVI 负距平像元主要分布在 1000 ~ 1750 m 的 3 个海拔梯度上, 受干旱影响较小的植被集中于 NDVI  $\geq 0.6$  的高植被区。

**关键词:** 滇西南地区; 不同海拔梯度; MODIS/NDVI; SPEI

**中图分类号:** P461.7

**文献标志码:** A

气候是植被变化的重要驱动因子, 而植被是联结土壤、大气和水分等要素的自然纽带, 对气候的变化有很好的响应, 起到了气候变化指示器作用<sup>[1]</sup>, 归一化植被指数 (Normal Different Vegetation Index, NDVI) 作为植被生长状态及植被空间分布密度最佳指示因子<sup>[2]</sup>, 不少学者从不同角度将其与气候因子之间的关系、敏感性及其变化进行研究, 指出气温和降水是影响地表植被动态的两个重要气候要素<sup>[3-7]</sup>, 植被 NDVI 对气温和降水的响应具有显著的类型差异<sup>[8-9]</sup>和时滞效应<sup>[10-11]</sup>, 并探讨这种关系产生的机制机理及其生态效应<sup>[12-13]</sup>。以上对于 NDVI 与气候因子相关性的研究主要集中表现在空间分异、时间变化两大内容, 气候因子多局限在降水量和温度上, 研究也多从不同植被类型或不同的气候区域来进行, 针对不同海拔梯度 NDVI 对干湿变

化特别是对不同时间尺度干湿变化响应的研究报道并不多见。

滇西南地区拥有我国最大面积的热带雨林。较多学者对滇西南植被的分析研究多从群落结构、群落学特征以及树种的多样性等方面展开<sup>[14-18]</sup>, 研究范围和对象也仅局限于滇西南地区西双版纳的热带雨林。进入 21 世纪以来, 云南出现了多次严重的气象干旱, 如 2005 年春季异常干旱、2009—2013 年持续连旱。鉴于此, 本文以 MODIS NDVI 数据集和 DEM 数据为数据源, 采用既综合考虑了蒸散发和降水对干湿的影响, 亦能在不同时间尺度上对西南地区干湿变化有较好评估和检测的标准化降水蒸散指数 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)<sup>[19-21]</sup> 作为干湿指标, 对 2001—2013 年滇西南地区不同海拔梯度 NDVI 时空变化及其对不

**收稿日期** (Received date): 2016-06-01; **改回日期** (Accepted date): 2017-11-10

**基金项目** (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (41165004); 云南省气象局预报员专项项目 (YB201215)。[National Natural Science Foundation of China (41165004); Special Project for Forecasters of Yunnan Meteorological Bureau (YB201215).]

**作者简介** (Biography): 赵平伟 (1983-), 男, 云南临沧人, 工程师, 主要研究方向: 气象环境。[ZHAO Pingwei (1983-), male, born in Lincang, engineer, research on meteorological environment.] E-mail: 7203956@qq.com

同时间尺度干湿变化的响应展开分析,试图回答如下问题:①干旱频发的气候环境下,研究区不同海拔梯度 NDVI 呈什么样的趋势变化,生态环境状况变好还是变差? ②研究区不同海拔梯度不同月、季 NDVI 对不同时间尺度干湿变化如何响应? ③典型干旱年中受干旱影响明显的 NDVI 主要集中于哪些海拔梯度,不同干旱年 NDVI 影响区域是否具有—致性?

1 研究区域概况

本文以地理气候特点为依据,根据中国气象地理区划国家标准划定滇西南地区。研究区包括德宏、保山、临沧、普洱、西双版纳 5 个州(市),所占国土面积为 11.9 万 km<sup>2</sup>,约占云南省国土面积的 1/3。滇西南地区距孟加拉湾 600 多千米,西北临青藏高原,处于东亚季风和西南季风共同影响区,其气候特征主要表现为:立体型气候明显,年温差较小而日温差较大,干湿季分明,干季(11 月—次年 4 月)降水量占年降水量的 13.9%,雨季(5—10 月)降水量占年降水量的 86.1%。境内海拔总体呈西北高,东南低,海拔高差达 3560 m,加之大小河流纵横切割,地形错综复杂,生境极为多样(图 1)。独特的气候特征和复杂的地理环境造成区内植被类型众多,特征各异,在分布上的交错、镶嵌现象极为普遍,与四周国内外有关

地区间植被的连接和过度现象也极为多样。

2 数据及研究方法

2.1 气象数据

本文所用资料为滇西南地区 30 个气象站 1961—2013 年逐月降水和逐月平均气温资料。30 个气象站点海拔高度分布在 582~1655 m(表 1)。

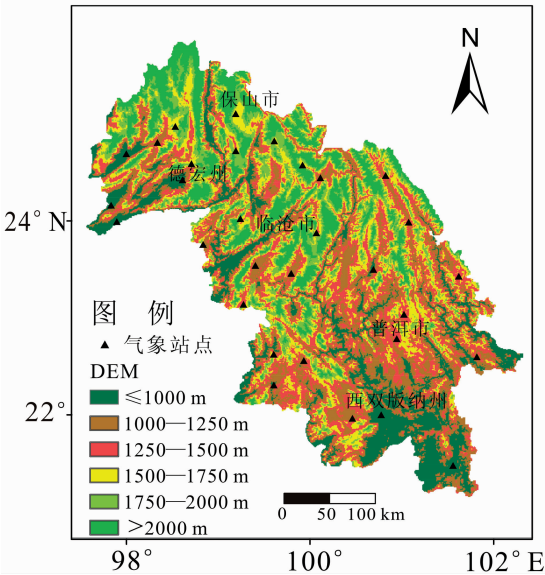


图 1 研究区概况示意图  
Fig. 1 Schematic map of the study area

表 1 研究区气象站点经纬度及其海拔高度

Tab. 1 Research on the longitude, latitude and altitudes of the meteorological stations in the study area

站点	经度/°N	纬度/°E	海拔高度/ m	站点	经度/°N	纬度/°E	海拔高度/ m
景洪	99.82	23.47	582.2	江城	99.82	23.47	1120.5
勐腊	99.93	22.56	633.2	西盟	99.93	22.56	1155
瑞丽	99.4	23.54	762.9	景东	99.4	23.54	1162.3
盈江	101.12	23.99	826.7	勐海	101.12	23.99	1176.3
景谷	100.14	24.45	913.2	沧源	100.14	24.45	1278.3
潞西	101.86	22.59	913.8	思茅	101.86	22.59	1302.1
孟连	99.59	22.65	945	墨江	99.59	22.65	1314.6
陇川	100.86	24.44	959.1	宁洱	100.86	24.44	1336
镇康	100.45	21.95	995.3	临翔	100.45	21.95	1502.4
梁河	99.26	23.16	1012.9	龙陵	99.26	23.16	1528
双江	100.96	22.79	1044.1	凤庆	100.96	22.79	1569
澜沧	101.68	23.43	1054.8	永德	101.68	23.43	1606.2
耿马	101.05	23.03	1104.9	昌宁	101.05	23.03	1650.6
镇源	100.09	23.88	1105.4	隆阳	100.09	23.88	1652.2
云县	98.69	24.6	1108.6	腾冲	98.69	24.6	1654.6

2.2 NDVI 数据

采用的 NDVI 数据来源于美国国家航空航天局 (NASA) 的 EOS/MODIS (TERRA 卫星) 提供的 2001—2013 年的 MOD13A3 级 NDVI 归一化植被指数数据,时间分辨率为月,空间分辨率为 1 km,运用 MRT 软件结合 JAVA 编程对获取的 NDVI 数据进行批量拼接和投影转换,将正弦曲线投影 (Sinusoidal) 转换为 WGS-84 地理坐标,进而利用研究区的矢量边界对投影转换后的 NDVI 数据进行裁剪,获得滇西南地区 2001—2013 年的逐月 NDVI 数据,采用算术平均法计算得到春 (3—5 月)、夏 (6—8 月)、秋 (9—11 月)、冬 (12—次年 2 月) 季和年 (1—12 月) NDVI,以消除极端月份的影响。

2.3 DEM 数据

本文使用的 DEM 数据为 NASA 网站第 2 版的 Aster G-DEM 数据,空间分辨率约为 30 m,将其重采样为与 NDVI 植被数据相一致的 1 km 空间分辨率,以保证二者空间属性的一致性,鉴于云南植被分布的特点及其地带规律性<sup>[22]</sup>,对重采样后的滇西南地区 DEM 数据进行分级,分级标准为:≤1000 m、(1000, 1250 m]、(1250, 1500 m]、(1500, 1750 m]、(1750, 2000 m]、>2000 m,不同高程面积分别占研究区国土面积的 15%、19%、21%、18%、13%、14%。

2.4 研究方法

为了更好地了解研究区植被年平均和季节平均 NDVI 的年际变化特征,分别对不同海拔梯度的春、夏、秋、冬四季和年 NDVI 值与年份进行最小二乘法回归分析,得到回归方程的斜率,以此表征不同海拔梯度 NDVI 变化趋势;变化趋势显著性检验采用 F 检验,根据显著性检验结果将变化趋势分为 3 个等级:极显著增加、减少 ( $P \leq 0.01$ ),显著增加、减少 ( $P$

$\leq 0.05$ ),增加、减少但不显著 ( $P > 0.05$ );采用直线斜率/平均值  $\times 12 \times 100$  得到各像元 NDVI 变化率 (%)<sup>[23]</sup>;利用变异系数来反映研究区植被变化的相对波动程度;通过研究区 30 个站点逐月降水量和平均气温数据计算得出各站点不同时间尺度 SPEI 值,SPEI 指数的具体计算步骤参见文献[24],其中潜在蒸散发的计算采用 Thornthwaite 方法<sup>[25]</sup>,以 30 个站点 SPEI 值的算术平均值表征滇西南地区的干湿状况,SPEI 值正 (负) 越大 (小),表示湿润 (干旱) 程度越重;采用不同月、季的 NDVI 与同期不同时间尺度的 SPEI 值的 Person 相关系数来表征植被变化对干湿变化的响应。

3 滇西南地区 NDVI 时空变化特征

3.1 不同海拔梯度 NDVI 时间变化特征

表 2 为 2001—2013 年滇西南地区四季和年不同海拔梯度 NDVI 年际变化。从表 2 可看出,13 a 中,滇西南地区春季和秋季 6 个海拔梯度 NDVI 多表现为上升趋势,其线性趋势为 0.01 ~ 0.04/10a;夏季除大于 2000 m 海拔梯度上的 NDVI 呈 -0.01/10a 的线性趋势变化外,其余海拔梯度 NDVI 无明显变化趋势;冬季 (1500, 1750 m]、(1750, 2000 m] 2 个海拔梯度 NDVI 线性趋势为 0.01/10a,其余海拔梯度 NDVI 无明显变化趋势;年 6 个海拔梯度中,小于 1250 m 上的 2 个海拔梯度 NDVI 无明显变化趋势,其余海拔梯度 NDVI 以 0.01 ~ 0.02/10a 线性趋势变化。整体来看,研究区春、夏、秋、冬季和年 NDVI 值线性变化趋势分别为 0.02、0.0、0.02、0.01、0.01/10a。

表 2 2001—2013 年研究区四季和年不同海拔梯度和区域整体 NDVI 年际变化  
Tab.2 The four-season and yearly NDVI changes at the various altitude gradients from 2001—2013 in the study area

	海拔梯度						区域整体
	≤1000 m	(1000,1250 m]	(1250,1500 m]	(1500,1750 m]	(1750,2000 m]	>2000 m	
春季	0.01	0	0.01	0.03	0.04 *	0.02	0.02
夏季	0	0	0	0	0	-0.01	0
秋季	0.01 *	0.01 *	0.02 **	0.03 **	0.03 **	0.04 *	0.02 **
冬季	0	0	0	0.01	0.01	0	0.01
年	0	0	0.01	0.01 *	0.02 **	0.01	0.01 *

\*\* 表示线性趋势通过了 F 检验 0.01 水平置信度,\* 表示线性趋势通过了 F 检验 0.05 水平置信度

### 3.2 不同海拔梯度 NDVI 空间变化特征

通过对滇西南地区各像元 NDVI 变化百分率、变化趋势显著性水平和变异系数进行分析。从图 2 可以看出,滇西南大部地区年 NDVI 变化百分率大于 0%,年 NDVI 显著减少和极显著减少像元面积小于显著增加和极显著增加的像元面积。NDVI 增加区域中,显著增加和极显著增加的范围在整个研究区均有分布,并不集中。进一步统计发现,13 a 中不同海拔梯度年 NDVI 变化百分率大于 0% 的像元面积均超过所在海拔梯度面积的 1/2,其中 (1500, 1750 m] 和 (1750, 2000 m] 2 个梯度超过其海拔梯度面积的 70%。各海拔梯度中,40.2% ~ 57.2% 的像元面积年 NDVI 变化百分率在 (0, 10%] 这一等级,随后变化百分率所占面积大小按 [-10, 0%), (10, 20%], [-20, -10%), > 20%, < -20% 依次减少,减幅随变化百分率等级的增加(减小)而变小。从显著性水平结果分析来看,各海拔梯度变化趋势中增加但不显著的像元面积为 30.1% ~ 46.6%。显著增加和极显著增加的像元面积之和占所在海拔梯度(从低到高)面积的 24.9%、18.7%、23.0%、27.3%、28.2%、18.4%。显著减少和极显著减少的像元面积之和占所在海拔梯度的面积较小,仅为 2.7% ~ 12.3%。从变异程度来看,各海拔梯度各像元 NDVI 波动较小,各海拔梯度中 64% ~ 80% 的像元变异系数小于 0.1,变异系数大于 0.2 的像元不到 0.4%。

从四季各海拔梯度 NDVI 空间变化(图略)来看,不同海拔梯度(从低到高)中,春季 NDVI 呈增加趋势的像元面积分别占所在梯度面积的 57.0%、

50.7%、62.1%、74.4%、79.4%、68.5%;夏季 NDVI 呈增加趋势的像元面积分别为 43.9%、46.5%、49.2%、48.6%、48.3%、43.4%;秋季 NDVI 呈增加趋势的像元面积分别为 62.9%、64.6%、73.0%、80.2%、83.9%、83.4%;冬季 NDVI 呈增加趋势的像元面积分别为 52.8%、48.4%、55.5%、62.4%、65.6%、52.1%。和年 NDVI 变化一样,四季各海拔梯度 NDVI 像元变化百分率也集中在 (0, 10%]、[-10, 0%) 两个等级,变化百分率大于 10% 的区域集中在海拔大于 1500 m 的 3 个梯度上,小于 -10% 的区域则集中在其余 3 个海拔梯度上。从显著性水平结果分析来看,四季各海拔梯度 NDVI 呈显著增加与极显著增加像元面积之和大小排序为:秋季 (22.1% ~ 37.3%)、冬季 (18.2% ~ 35.7%)、春季 (8.7% ~ 20.0%)、夏季 (1.6% ~ 6.7%)。同一海拔梯度春、秋、冬 3 个季节显著增加与极显著增加区域面积之和明显大于显著减少与极显著减少区域面积之和,夏季两者面积基本持平。四季 NDVI 呈显著增加(减少)和极显著增加(减少)的区域分布和年 NDVI 一样,也贯穿于整个研究区,并不连片存在,这也说明研究区植被活动具有较强的复杂性。13 a 中,四季各海拔梯度 NDVI 变化波动小,98% 以上的像元 NDVI 变异系数小于 0.2,同一海拔梯度中夏季 NDVI 波动程度较其余 3 个季节高。整体上看,四季及年中,滇西南地区春、秋、冬季和年 NDVI 改善(变化趋势大于零)的区域过半,分别为 64.5%、74.0%、55.8%、62.2%,夏季 NDVI 改善区域仅为 46.9%,改善区主要分布在高于在 1500 m 的海拔上;趋于恶化(变化趋势小于零)的植被面积

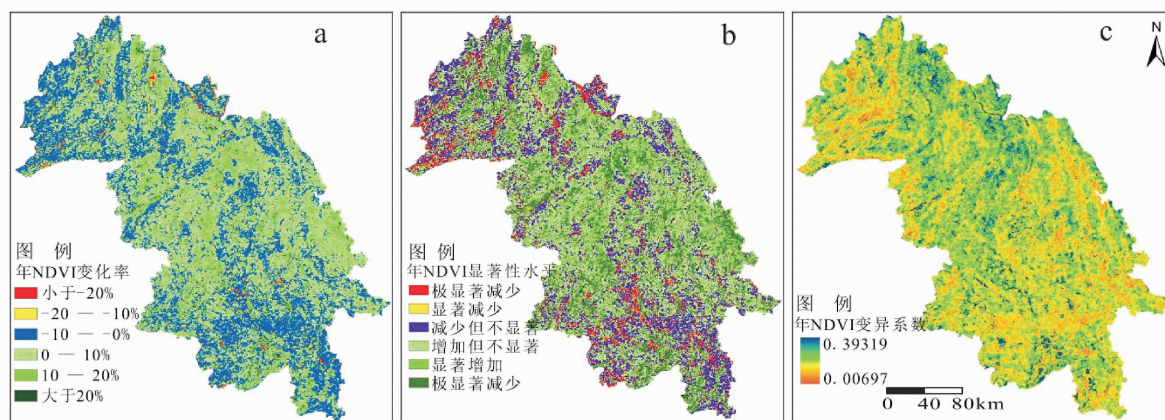


图 2 2001—2013 年研究区年 NDVI 变化百分率(a, %)、趋势变化显著性水平(b)及变异系数(c)的空间分布

Fig. 2 Spatial pattern of change rates for NDVI(a, %), NDVI significance level(b) and its coefficient of Variation (c) in study area during 2001—2013



占研究区总面积的 34.6%、51.9%、24.5%、43.0%、36.2%。春、夏、秋、冬季和年 NDVI 显著改善(变化趋势为显著增加和极显著增加)的区域面积分别占研究区总面积的 14.4%、4.4%、29.0%、25.8%、23.3%;显著恶化(变化趋势为显著减少和极显著减少)的植被面积占研究区总面积的 3.5%、4.5%、5.3%、16.2%、7.3%,主要分布在海拔低于 1500 m 的 3 个梯度上。NDVI 无变化的区域约占各海拔梯度面积的 1%。

4 滇西南地区 NDVI 对干湿变化的响应

4.1 SPEI 时序变化

图 3 为滇西南地区 1961—2013 年 1~12 个月

时间尺度的 SPEI 指数干湿演变状况,图 3 显示,SPEI 指数判定出比较典型的干旱年份有 1978—1979 年、1987—1989 年、2003—2005 年、2009—2013 年,能够较客观地表达出滇西南地区 21 世纪以来干旱频发的气候特点。

4.2 NDVI 与不同时间尺度 SPEI 的相关性分析

鉴于研究所用气象数据站点海拔均在 1750 m 以下,故我们以 30 个站点 SPEI 值的算术平均值来表征研究区干湿状况,重点分析干湿变化与研究区 ≤1750 m 海拔梯度下 NDVI 的相关性,以此考查滇西南地区 NDVI 对不同时间尺度气候干湿变化的响应。表 3 为研究区 ≤1750 m 海拔梯度下的月、季 NDVI 与不同时间尺度的 SPEI 指数相关性分析表,通过表 3 可得,各月 NDVI 与 SPEI 指数的相关性存

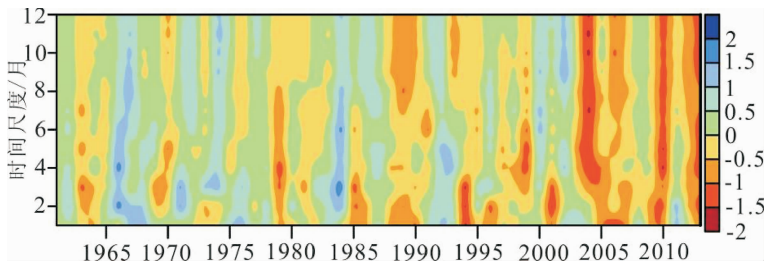


图 3 1961—2013 年研究区 SPEI 指数时间序列演变

Fig. 3 Evolution of time series of SPEI from 1961—2013 in the study area

表 3 研究区 1750 m 以下海拔高度月、季 NDVI 与不同时间尺度 SPEI 指数的相关系数

Tab. 3 The monthly and yearly NDVI with the correlation coefficients of SPEI at the different time scales for the regions below the altitude of 1750 m

时间	时间尺度/月											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1 月	0.47	0.53	0.74 **	0.70 **	0.53	0.46	0.58 *	0.56 *	0.37	0.30	0.31	0.30
2 月	0.18	0.40	0.45	0.65 *	0.64 *	0.55	0.51	0.66 *	0.66 *	0.49	0.44	0.46
3 月	0.26	0.39	0.45	0.56 *	0.65 *	0.58 *	0.46	0.5	0.54	0.40	0.21	0.23
4 月	0.64 *	0.59 *	0.71 **	0.70 **	0.73 **	0.76 **	0.74 **	0.54	0.52	0.48	0.36	0.17
5 月	0.52	0.55	0.55	0.6 *	0.64 *	0.61 *	0.61 *	0.57 *	0.46	0.37	0.44	0.38
6 月	0.49	0.37	0.33	0.32	0.32	0.28	0.34	0.29	0.1	0.03	0.18	0.09
7 月	-0.14	-0.07	-0.22	-0.34	-0.3	-0.36	-0.38	-0.37	-0.3	-0.12	0.02	0.04
8 月	0.59 *	0.23	-0.21	-0.48	-0.47	-0.46	-0.45	-0.45	-0.47	-0.39	-0.31	-0.32
9 月	0.12	0.43	0.52	0.04	-0.18	-0.06	-0.08	-0.1	-0.1	-0.13	-0.15	-0.21
10 月	0.59 *	0.52	0.49	0.61 *	0.64 *	0.39	0.28	0.33	0.33	0.32	0.31	0.29
11 月	0.09	0.28	0.27	0.26	0.35	0.32	0.1	0.02	0.09	0.06	0.09	0.08
12 月	0.23	0.59 *	0.48	0.43	0.37	0.39	0.45	0.22	0.13	0.21	0.18	0.2
春季	0.57 *	0.62 *	0.64 *	0.65 *	0.69 **	0.9 **	0.61 *	0.52	0.47	0.43	0.32	0.22
夏季	-0.52	-0.57 *	-0.56 *	-0.56 *	-0.58 *	-0.59 *	-0.59 *	-0.58 *	-0.52	-0.44	-0.35	-0.27
秋季	0.19	0.27	0.37	0.38	0.23	0.08	0.02	0.02	0.02	0.01	-0.06	-0.03
冬季	0.38	0.61 *	0.72 **	0.7 **	0.64 *	0.62 *	0.64 *	0.59 *	0.49	0.41	0.4	0.42

\*\* 表示  $P < 0.01$ , \* 表示  $P < 0.05$

在明显差异,其中相关性较高的月份集中在1—5月,相关性较为密切的 SPEI 指数时间尺度为2~8个月,降水较多的6—9月研究区 NDVI 与 SPEI 指数相关性较低,且大多月份与不同时间尺度的 SPEI 指数基本为负相关。滇西南地区受季风气候制约,雨季一般于5月中、下旬开始,10月上旬结束,干季内各月雨量远少于潜在蒸散量。这种干、雨季节过于分明的特点致使各月 NDVI 与不同时间尺度 SPEI 指数的相关性存在显著差异:随着5月中、下旬雨季的开始,水分逐渐满足植被的需求,加上雨热同期的有利气候条件使得植被快速生长,故雨季开始之初的5月 NDVI 与 SPEI 指数相关性密切;但随着前期雨量的积累和6—9月雨量颇丰(期间平均月雨量245 mm),充足的水分不再是植被生长的限制因子,相反6—9月因雨日较多(期间平均月雨日23 d)致使光照不足(期间平均月日照时数123 h),一定程度上影响植被光合作用,抑制其生长,使得研究区7—9月 NDVI 与不同时间尺度的 SPEI 指数大都表现出弱的负相关;雨季虽于10月上旬结束,但干季前期(10月中旬—12月)植被因有良好和潮湿的土壤条件配合,生长并未受到明显影响,致使研究区10—12月 NDVI 与不同时间尺度的 SPEI 指数相关性不强;进入11月后月降雨量逐步减少,1—4月(期间平均月雨量31 mm)土壤水分明显不足,加上期间干燥少雨,日照时间较长(期间平均月日照时数224 h),潜在蒸散量大于降雨量,缺水干旱对植物生长的抑制作用占主导,这样造成研究区1—4月 NDVI 与不同时间尺度的 SPEI 指数呈较密切的正相关关系。

研究区 $\leq 1750$  m海拔梯度下 NDVI 与不同时间尺度的 SPEI 指数的相关性差异在季节上表现得更为明显,其中2~7个月时间尺度上 SPEI 与春、冬季的 NDVI 相关系数均在0.6以上;秋季 NDVI 与不同时间尺度的 SPEI 指数呈弱的正相关关系;而夏季 NDVI 与不同时间尺度的 SPEI 指数呈负相关关系。可见,在季 NDVI 与不同时间尺度 SPEI 指数相关性的分析上,得到的结果与各季节相应月 NDVI 与同期不同时间尺度 SPEI 指数之间存在的相关性较为一致。此外,在不同月份和季节响应最强的 SPEI 指数对应的时间尺度具有一定的差异,但基本在3个月尺度以上。总体上,研究区不同月、季 NDVI 对 SPEI 指数的响应充分体现了不同时间段上植被对水热的需求及水热变化对植被生长的影响。

不同海拔梯度月、季 NDVI 与研究区不同时间

尺度 SPEI 指数的相关性表现基本一致,在此不再赘述。不同之处主要为:①在最强相关时间尺度上,不同海拔梯度月、季 NDVI 与区域平均 NDVI 相比大多同步,但在部分月、季上存在 $\pm 1$ 个月的差异,这主要是因为研究区植被类型因海拔梯度存在不同,而不同类型植被生长对干湿变化的响应是存有差异的<sup>[25]</sup>。②不同海拔梯度中同一月、季 NDVI 与同一时间尺度 SPEI 指数的相关性存在较大差异,但整体表现为1000~1500 m 2个海拔梯度上的相关系数要明显大于其余4个海拔梯度,这可能因为用于研究的30个气象站点中有1/2的站点海拔分布在1000—1500 m 范围,导致 SPEI 指数值与这2个海拔梯度上的植被生长表现出较高的相关性。③研究区中(1750,2000 m]、 $> 2000$  m 2个海拔梯度上月、季 NDVI 与 SPEI 指数的相关性较低,应归因于用于计算 SPEI 指数的气象数据的站点均分布在1750 m 海拔以下,使用研究区 SPEI 指数平均值表示的干湿变化虽能在一定程度上反映出研究区2个高海拔梯度不同时间段 NDVI 对水热的需求及水热变化对植被生长的影响,但并不能较好地干干湿变化对 NDVI 的影响程度体现出来。④ $\leq 1000$  m 海拔梯度上的部分月、季(2月、冬、春季) NDVI 与不同时间尺度 SPEI 指数的相关性较低,这主要因为研究区耕地、农田大多集中于 $\leq 1000$  m 海拔梯度<sup>[26]</sup>,此海拔梯度上的 NDVI 变化因掺杂人类活动的干预,研究结果并未真实反映出 NDVI 与气候干湿变化的相关性。通过对逐年各月份 NDVI 空间分布进一步的分析,我们发现, $\leq 1000$  m 海拔梯度上耕地、农田和城市周边 NDVI 随时间变化与该海拔梯度上其余区域 NDVI 变化是存有一定差异的,这主要是农作物与森林植被的物候变化特征存在的不同造成的。此外,降水稀少的1—4月里,同一月份2005年、2010—2013年这样的干旱年耕地、农田和城市周边 NDVI 较2001—2002年、2004年这样的降水丰年波动变化有所增大,但波动程度较该海拔梯度其余区域仍明显要小,这主要归因于在农作物少雨需水期,一些有条件的区域实施了人工灌溉等措施导致的结果。

#### 4.3 不同海拔梯度 NDVI 对干旱的适应分析

为分析不同海拔梯度 NDVI 抵御干旱能力的强弱,我们选取对干湿变化最为敏感的1—4月为研究时段,同时,考虑到 NDVI 对降水及蒸散发导致的水分盈亏的响应具有累积效应,我们以与1—4月 NDVI 响应最强的 SPEI 指数对应时间尺度下的

SPEI 值为判定标准,及 3 个月时间尺度的 1 月 SPEI 值,该值为上一年 11、12 月和当年 1 月 3 个月的降水量进行累加,分布拟合并标准化的结果。4 个月时间尺度的 2 月 SPEI 值,5 个月时间尺度的 3 月 SPEI 值,6 个月时间尺度的 4 月 SPEI 值作为第 1 干旱年和第 2 干旱年的划定标准,对典型干旱年 1—4 月 NDVI 和研究区 2001—2013 年平均 1—4 月 NDVI 进行对比。选取 2 个干旱年的目的是通过查看 2 个干旱年中 NDVI 正负距平像元区域是否统一,以更好确定易受和不易受干旱影响植被的分布区域。需要指出的是,因 SPEI 指数的计算考虑了热量因子对潜在蒸散发的贡献对研究区干湿造成的影响,故选取的典型干旱年中 1—4 月中的个别月份对应时间尺度下的累加降水量并不为 2001—2013 年中累加降水量最小值的前两位。所选择的 1—4 月典型干旱年份如表 4。

通过对典型干旱年 1—4 月 NDVI 和研究时段

平均 1—4 月 NDVI 的对比结果进行定量统计,我们发现,平均月 NDVI 要高于典型干旱年月 NDVI。对比 2 个干旱年中 NDVI 正负距平像元共同区域在不同海拔梯度上的分布(表 5),发现 2 个典型干旱年 1—4 月 NDVI 负距平像元中,有 63.1 ~ 74.7% 的区域一致,说明了研究区受干旱影响的植被区域是相对集中的,而这些区域主要分布在 1000 ~ 1750 m 的 3 个海拔梯度上。NDVI 正距平像元中,仅有 11.8% ~ 31.6% 的区域重合,这些区域在各海拔梯度上的分布因月份不同差异明显。但进一步的分析表明,NDVI 正距平像元中 52.8% ~ 74.3% 的像元集中在同月平均 NDVI ≥ 0.6 的高植被区域,这些区域主要分布于研究区西北部的德宏州、东南部的普洱市和热带雨林集中的西双版纳州(图略)。此外,1—4 月中的大多月正距平像元重合区域主要集中在耕地、农田分布较多的 ≤ 1000 m 海拔梯度上,这也从另一角度佐证了人们对区域气候变化具有一定的适应力。

表 4 研究区 1—4 月典型干旱年份选取

Tab. 4 Selection on the typical drought years from Jan ~ April in the study area

第 1 干旱年				第 2 干旱年			1981—2010 年同期 降水气候值/mm
年份	SPEI 值	累加降水量/mm	年份	SPEI 值	累加降水量/mm		
1 月	2001	-1.3	26.4	2010	-1.1	42.0	89.3
2 月	2010	-1.3	45.0	2005	-1.2	44.0	112.7
3 月	2004	-1.6	53.0	2010	-1.2	81.4	140.6
4 月	2001	-1.7	83.9	2013	-1.4	126.1	200.0

表 5 2 个典型干旱年 NDVI 正负距平像元比率及正负距平像元重合区占正负距平像元平均面积  
在不同海拔梯度上的比率分布(%)

Tab. 5 The ratio of the NDVI positive and negative anomaly pixels and the ratio of the overlapping area of the positive anomaly pixels to the average area of the positive anomaly pixels at the various altitude gradients for two typical drought years(%)

	1 月		2 月		3 月		4 月	
	第 1 旱年	第 2 旱年	第 1 旱年	第 2 旱年	第 1 旱年	第 2 旱年	第 1 旱年	第 2 旱年
正距平像元比率	24.4	20	17.6	42.8	31	28.8	29.8	37.9
负距平像元比率	75.5	79.9	82.3	57.1	69	71.1	70.2	62
正/负距平像元重 合区占正/负距平像元 平均面积的比率	11.8/74.7		14.9/63.1		23.3/67.2		31.6/65.0	
正/负距平像元重合区 在不同海拔 (从低到高) 上的比率分布	39.9/10.8		19.1/15.0		7.8/16.7		29.5/10.3	
	13.2/19.7		15.7/20.1		11.5/23.0		26.3/18.5	
	15.9/22.7		23.4/20.7		13.9/23.4		19.2/21.6	
	11.7/20.2		16.0/18.0		16.4/17.4		11.7/19.4	
	5.6/14.8		11.6/13.6		17.3/10.8		5.7/15.1	
	13.8/11.8		14.2/12.6		33.1/8.7		7.6/15.1	

## 5 结论与讨论

### 5.1 结论

(1) 四季和年中, 滇西南地区大多时段里大于 1500 m 的 3 个海拔梯度 NDVI 较其余 3 个海拔梯度上升趋势明显。整体来看研究区四季和年 NDVI 趋势变化为  $(0.0 \sim 0.02)/10a$ 。

(2) 2001—2013 年, 滇西南地区不同海拔梯度各像元 NDVI 变化百分率存在一定差异, 但主要集中在  $-10\% \sim 10\%$  范围; 以 1500 m 为界, 变化百分率超过 (低于)  $10\%$  ( $-10\%$ ) 的区域在大于 (低于) 1500 m 的 3 个海拔梯度上。除夏季外, 其余 3 季和年研究区 NDVI 改善区域超过 1/2。

(3) 滇西南地区 1750 m 海拔下的 NDVI 与 1—5 月和春、冬季 SPEI 指数呈较强的正相关, 而与夏季和 7—9 月 SPEI 指数表现出负相关; NDVI 变化受 2—8 个月累积时间的水分盈亏影响较大。因人类活动因素和所使用气象数据的特殊性, 使得不同海拔梯度月、季 NDVI 与 SPEI 指数相关性不尽相同。

(4) 与研究时段同期 NDVI 平均值相比, 选取的 2 个典型干旱年 1—4 月 NDVI 负距平像元大都集中在 1000 ~ 1750 m 海拔范围。NDVI 正距平重合区比率较小, 主要集中在 NDVI 平均值  $\geq 0.6$  的高值区。

### 5.2 讨论

本研究表明, 进入 21 世纪以来, 干旱频发的气候环境下, 滇西南地区四季和年各像元 NDVI 波动较小, 整体上升趋势明显, 大多季节和年不乏显著增长和极显著增长区域, 这主要是 21 世纪以来云南天保工程、城乡绿化、陡坡地生态治理等生态工程有效实施及人类活动正向影响的结果。选取的 2 个典型干旱年 1—4 月 NDVI 负距平像元集中于 1000 ~ 1750 m 海拔范围, 同时研究时段上的大多时段 NDVI 变化趋势表明 1000 ~ 1750 m 海拔范围植被改善明显, 这说明研究区 1000 ~ 1750 m 上的植被虽有所改善, 但相比其余海拔梯度上的植被更易受气候变化的影响。如果未来干旱事件的强度和频次增加, 研究区 1000 ~ 1750 m 植被较其余海拔上的植被将面临更大的风险和胁迫。在降水稀少的月和季节, 耕地、农田较为集中的  $\leq 1000$  m 海拔梯度上 NDVI 与不同时间尺度 SPEI 指数的相关性较低, 且 2 个典型干旱年 1—4 月中的大多月正距平像元重合区域集中于此, 这说明人类活动已成为  $\leq 1000$  m 海拔上植被变化的主要驱动因子, 人类对区域气候

变化具有一定的适应力。但是, 植被变化是人类活动和气候等自然因子长期共同作用的结果, 在今后的研究中应将人类活动对植被的干扰强度进行独立分析; 同时应纳入除海拔外的坡度、坡向等地形因素来综合考虑研究区地形复杂性对植被时空变化的影响进行深入分析, 以取得新的研究进展。

### 参考文献 (References)

- [1] THUILLER W. Climate change threats to plant diversity in Europe [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2005, **102** (23): 8245–8250.
- [2] 张学霞, 葛全胜, 郑景云. 近 50 年北京植被对全球变暖的响应及其时效—基于遥感数据和物候资料的分析 [J]. *生态学杂志*, 2005, **27** (1): 123–130. [ZHANG Xuexia, GE Quansheng, ZHENG Jingyun. Impacts and lags of global warming on vegetation in Beijing for the last 50 years based on remotely sensed data and phenological information [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, **27** (1): 123–130.]
- [3] 温刚, 符淙斌. 中国东部季风区植被物候季节变化对气候响应的大尺度特征: 多年平均结果 [J]. *大气科学*, 2000, **24** (5): 676–682. [WEN Gang, FU Congbin. Large scale features of the seasonal phenological responses to the monsoon climate in east China: multi-year average results [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2000, **24** (5): 676–682.]
- [4] 陈怀亮, 徐祥德, 杜子璇, 等. 黄淮海地区植被活动对气候变化的响应特征 [J]. *应用气象学报*, 2009, **20** (5): 513–520. [CHEN Xuegang, XUN Dexiang, DU Zixuan, et al. Vegetation activity responses to climate change in the Huang-Huai-Hai area based on GIMMS NDVI dataset [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, **20** (5): 513–520.]
- [5] OMUTO C T, VARGAS R R, ALIM M S, et al. Mixed-effects modelling of time series NDVI-rainfall relationship for detecting human-induced loss of vegetation cover in drylands [J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, **74** (11): 1552–1563.
- [6] ZHANG Xueyan, HU Yunfeng, ZHUANG Dafang, et al. NDVI spatial pattern and its differentiation on the Mongolian Plateau [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, **19** (4): 403–415.
- [7] KILESHYE ONEMA J M, Taibenu A. NDVI rainfall relationship in the Semliki watershed of the equatorial Nile [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2009, **31** (13/16): 711–721.
- [8] 张远东, 张笑鹤, 刘世荣. 西南地区不同植被类型归一化植被指数与气候因子的相关分析 [J]. *应用生态学报*, 2011, **22** (2): 323–330. [ZHANG Yuandong, ZHANG Xionghe, LIU Shirong. Correlation analysis on normalized difference vegetation index (NDVI) of different vegetation and climatic factors in Southwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22** (2): 323–330.]
- [9] 张月丛, 赵志强, 李双成. 基于 SPOT NDVI 的华北北部地表植被覆盖变化趋势 [J]. *地理研究*, 2008, **27** (4): 745–754. [ZHANG Yuecong, ZHAO Zhiqiang, LI Shuangcheng, et al. Indicating variation of surface vegetation cover using SPOT NDVI in the northern part of North China [J]. *Geographical Research*, 2008, **27**



- (4):745-754.]
- [10] 李霞,李晓兵,陈云浩,等. 中国北方草原植被对气象因子的时滞响应[J]. 植物生态学报,2007,31(6):1054-1062. [LI Xia, LI Xiaobing, CHEN Yunhao, et al. Temporal responses of vegetation to climate variables in temperate steppe of Northern China[J]. Journal of Plant Ecology,2007,31(6):1054-1062.]
- [11] 崔林丽,史军. 中国华东及其周边地区 NDVI 对气温和降水的月际响应特征[J]. 自然资源学报,2011,26(12):2121-2129. [CUI Linli, SHI Jun. Inter-monthly response characteristics of NDVI to the variation of temperature and precipitation in East China and its surrounding areas[J]. Journal of Natural Resources, 2011,26(12):2121-2129.]
- [12] 王青霞,吕世华,鲍艳,等. 青藏高原不同时间尺度植被变化特征及其与气候因子的关系分析[J]. 高原气象,2014,33(2):301-312. [WANG Qingxia, LU Shihua, BAO Yan, et al. Characteristics of vegetation change and its relationship with climate factors in different time-scales on Qinghai-Xizang plateau[J]. Plateau Meteorology, 2014,33(2):301-312.]
- [13] 胡光印,董治宝,逯军峰,等. 黄河源区沙漠化及其景观格局的变化[J]. 生态学报,2011,31(14):3872-3881. [HU Guangyin, DONG Zhibao, LU Junfeng, et al. Desertification and change of landscape pattern in the source region of yellow river[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011,31(14):3872-3881.]
- [14] 严玉平,沙丽清,曹敏. 西双版纳热带季节雨林优势树种树干呼吸特征[J]. 植物生态学报,2008,32(1):23-30. [YAN Yuping, SHA Liqing, CAO Min. Stem respiration rates of dominant tree species in a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, Yunnan, Southwest China[J]. Journal of Plant Ecology, 2008,32(1):23-30.]
- [15] 吕晓涛,唐建维,何有才,等. 西双版纳热带季节雨林的生物量及其分配特征[J]. 植物生态学报,2007,31(1):11-22. [Lü Xiaotao, TANG Jianwei, HE Youcai, et al. Biomass and its allocation in tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, Southwest China[J]. Journal of Plant Ecology, 2007,31(1):11-22.]
- [16] 朱华,许再富,王洪,等. 西双版纳片断热带雨林 30 多年来植物种类组成及种群结构的变化[J]. 云南植物研究,2001,23(4):415-427. [ZHU Hua, XU Zaifu, WANG Hong, et al. Over 30-year changes of floristic composition and population structure from an isolated fragment of tropical rain forest in Xishuangbanna[J]. Acta Botanica Yunnanica, 2001,23(4):415-427.]
- [17] 朱华. 论滇南西双版纳的森林植被分类[J]. 云南植物研究, 2007,29(4):377-387. [ZHU Hua. On the classification of forest vegetation in Xishuangbanna, Southern Yunnan[J]. Acta Botanica Yunnanica, 2007,29(4):377-387.]
- [18] 兰国玉,胡跃华,曹敏,等. 西双版纳热带森林动态监测样地—树种组成与空间分布格局[J]. 植物生态学报,2008,32(2):287-298. [LAN Guoyu, HU Yuehua, CAO Min, et al. Establishment of Xishuangbanna tropical forest dynamics plot: species compositions and spatial distribution patterns[J]. Journal of Plant Ecology, 2008,32(2):287-298.]
- [19] 王林,陈文. 标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析[J]. 高原气象,2014,33(2):423-431. [WANG Lin, CHEN Wen. Applicability of analysis of standardized precipitation evapotranspiration index in drought monitoring in China [J]. Plateau Meteorology, 2014,33(2):423-431.]
- [20] 熊光洁,张博凯,李崇银,等. 基于 SPEI 的中国西南地区 1961—2012 年干旱变化特征分析[J]. 气候变化研究进展,2013,9(3):192-198. [XIONG Guangjie, ZHANG Bokai, LI Chongyin Y, et al. Characteristics of drought variations in southwest China in 1961—2012 based on SPEI [J]. Advances in Climate Change Research, 2013,9(3):192-198.]
- [21] 熊光洁,王式功,李崇银,等. 三种干旱指数对西南地区适用性分析[J]. 高原气象,2014,33(3):686-696. [XIONG Guangjie, WANG Shigong, LI Chongyin, et al. Analysis of applicability of three drought indices for drought events in southwest China[J]. Plateau Meteorology, 2014,33(3):686-696.]
- [22] 姜汉桥. 云南植被分布的特点及其地带规律性(续)[J]. 云南植物研究,1980,2(2):142-151. [JIANG Hanqiao. Distributional features and zonal regularity of vegetation in Yunnan [J]. Acta Botanica Yunnanica, 1980,2(2):142-151.]
- [23] 李运刚,何大明. 红河流域 NDVI 时空变化及其与气候因子的关系[J]. 山地学报,2009,27(3):333-340. [LI Yungang, HE Daming. The spatial and temporal variation of NDVI and its relationships to the climate's factors in red river basin[J]. Mountain Research, 2009,27(3):333-340.]
- [24] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERIA S, LOPEZ-MORENO J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2009,23(7):1696-1718.
- [25] THORNTHWAITE C W. An approach toward a rational classification of climate[J]. Geographical Review, 1948, 38(1):55-94.
- [26] 冉有华,李新,卢玲. 基于多源数据融合方法的中国 1 km 土地覆盖分类制图[J]. 地球科学进展,2009,24(2):192-203. [RAN Youhua, LI Xin, LU Ling. China land cover classification at 1 km spatial resolution based on a multi-source data fusion approach[J]. Advances in Earth Science, 2009,24(2):192-203.]

## Changes in NDVI and Its Response to Changes in Dry and Wet Weather at Different Time Scales in the Southwestern Yunnan, China

ZHAO pingwei, LI Hongbo, GUO Ping, YANG Wen

(Lincang Meteorological Bureau of Yunnan Province, Lincang 677099, Yunnan, China)

**Abstract:** Based on the MODIS/NDVI normalized vegetation index time series from 2001 to 2013, a variety of indexes including variation coefficient and one-way linear trend change were used to extract the NDVI change information in different elevation areas based on the SPEI index and DEM classification data, and analyzed the spatial and temporal variation of NDVI at altitudes in the southwestern Yunnan region and its response to changes in dry and wet weather at different time scales. The results showed that: (1) The fluctuations of seasonal and annual NDVI at different altitudes in the study area were small, and there was a certain difference in the change trend of NDVI with elevation gradients, but the overall upward trend was obvious. Four seasons and annual NDVI improvement areas accounted for 46.9% ~ 74.0% of the study area. (2) The percentage change of NDVI for each elevation gradient was mostly concentrated in the -10 to 10% range; with 1500 m as threshold, the area where the percentage of change exceeded (less than) 10% (-10%) focused on three altitude gradients with higher than (less than) 1500 m. (3) NDVI at each elevation was most closely related to the 2—8 month time scale SPEI index, indicating that the NDVI in the study area had a hysteresis effect and a cumulative effect on the response to precipitation and evapotranspiration caused by precipitation; From January to May, and in spring as well as winter, the NDVI response to SPEI was stronger and the NDVI was negatively correlated with SPEI index in July-September and summer. (4) In the two typical drought years, NDVI negative anomaly pixels were mainly distributed in three altitude gradients from 1000 to 1750 m. Vegetation that was less affected by drought concentrated on NDVI  $\geq 0.6$  Vegetation area.

**Key words:** southwestern Yunnan; different elevation gradient; MODIS/NDVI; SPEI