

轿子山国家级自然保护区气候变化特征及对 NDVI 的影响

任钊潼¹, 程清平^{1,2,3}, 金韩宇¹, 张宏英¹, 王 平⁴

(1.西南林业大学地理与生态旅游学院,昆明 650224;2.西南生态文明研究中心,昆明 650224;
3.中国科学院西北生态环境与资源研究院玉龙雪山冰冻圈与可持续发展国家(云南省)科学野外观测研究站,
兰州 730000;4.云南师范大学地理学部,昆明 650500)

摘要: 轿子山国家级自然保护区保存有最完整的滇中高原植被与生境,是气候敏感性热点地区之一。采用一元线性回归、Pettitt 突变检验、Spearman 相关系数等方法识别 1961—2019 年气候要素和极端气候指数变化特征,1999—2016 年归一化植被指数(NDVI)时空变化趋势特征及对极端气候指数的响应,旨在辨识轿子山植被变化特征及对极端气候变化的动态响应,以期为保护区的气候风险评估提供参考依据。结果表明:(1)全球变暖下,1961—2019 年气候要素(平均气温、日照时间、风速、雾日)变化趋势显著,垂直温度带组合动态变化,2017—2019 年基带由南亚热带转为北热带;(2)整体来看,1961—2019 年极端气温指数变化率和突变点较极端降水指数显著;(3)1999—2016 年 NDVI 增速随海拔升高降低,以海拔 2 736, 3 236 m 为界,NDVI 增长速率的变化率表现为“高一低一高”;(4)NDVI_{mean}、NDVI_{max}、NDVI_{min} 对极端气温指数的相关性总体上强于极端降水指数,对暖指数、降水强度指数、极端降水日指数响应最为敏感;(5)如果(极端)气候变化超过植被耐受阈值,则可能抑制植被生长。鉴于未来气候变化的不确定性,有必要进一步识别极端气候变化对保护区 NDVI 的影响,加强保护区极端气候风险预警、监测和管控。

关键词: 气候变化; NDVI; 轿子山; 国家级自然保护区

中图分类号: K903 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)04-0168-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2022.04.022

Climate Change Characteristics of Jiaozishan National Nature Reserve and Its Impact on NDVI

REN Yitong¹, CHENG Qingping^{1,2,3}, JIN Hanyu¹, ZHANG Hongying¹, WANG Ping⁴

(1.College of Geography and Ecotourism, Southwest Forestry University, Kunming 650224;
2.Southwest Ecological Civilization Research Center, Kunming 650224; 3.Yulong Snow Mountain Cryosphere and Sustainable Development National (Yunnan) Scientific Field Observation and Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000; 4.Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500)

Abstract: Jiaozishan National Nature Reserve preserves the most complete vegetation and habitat of the central Yunnan Plateau, and is one of the hot spots with climate sensitivity. Univariate linear regression, Pettitt mutation test and Spearman correlation and other methods were used to analyze the change characteristics of climate elements and the extreme climate index from 1961 to 2019 in this area, as well as the temporal and spatial change trend characteristics of NDVI and its response to extreme climate index from 1999 to 2016. The aim was to study the climate change characteristics and the dynamic response of vegetation in Jiaozi Mountain, providing a reference for climate risk management in the reserve. The results showed that: (1) Global warming led to a significant change in the climate elements (average temperature, sunshine hours, wind speed and foggy day) from 1961 to 2019. The vertical temperature zones changed dynamically, and the baseband changed from a south subtropical zone to a north tropical zone in 2017—2019. (2) On the whole, the change rate and abrupt change point of the extreme temperature index from 1961 to 2019 were more significant than those of the extreme precipitation index. (3) From 1999 to 2016, the growth rate of NDVI decreased with the increasing of altitude. Taking the altitude of 2 736 m and 3 236 m as the boundary, the change rate of NDVI growth rate showed the trend of “high-low-high”. (4) The correlation of NDVI_{mean},

收稿日期:2022-01-06
资助项目:云南省应用基础研究计划青年项目(202201AU070064);西南林业大学高层次人才启动项目(112105);中国科学院 A 类战略性先导科技专项(XDA19040504);云南省创新团队项目(202005AE160017)
第一作者:任钊潼(1998—),女,硕士研究生,主要从事极端气候事件及其响应机制研究。E-mail:pzhrenyt@163.com
通信作者:程清平(1987—),男,博士,硕士生导师,主要从事极端气候事件及其响应机制研究。E-mail:qpchengtyli@foxmail.com

NDVI_{max} and NDVI_{min} to extreme temperature index was stronger than that to extreme precipitation index, and NDVI_{mean}, NDVI_{max}, NDVI_{min} were most sensitive to warm index, precipitation intensity index and extreme precipitation day index. (5) If (extreme) climate change exceeds the vegetation tolerance threshold, vegetation growth might be inhibited. In view of the uncertainty of future climate change, it is necessary to further identify the impact of extreme climate change on NDVI in the reserve and strengthen the early warning, monitoring and control of extreme climate risk in the reserve.

Keywords: climate change; NDVI; Jiaozi Mountain; national nature reserve

保护区在减少栖息地损失和维持物种的可持续方面发挥着至关重要的作用,气候变化和人为压力已对保护区生物多样性构成巨大威胁^[1-2]。已有研究指出,在气候变化下,江西武夷山^[3-4]、河北大海陀^[5]、吉林长白山^[6]、宁夏贺兰山^[7]、西藏羌塘^[8]、西藏雅鲁藏布大峡谷^[9]和甘肃祁连山^[10-12]等保护区 NDVI 对气温、降水响应敏感,除气候影响外,张玉琴等^[4]、李娟等^[11]、付健新等^[13]指出地形地貌因子(坡度、坡向)亦会影响 NDVI 变化趋势。已有研究主要侧重于平均气温、降水对保护区 NDVI 的影响。近年来,极端气候事件呈增加、增强、持续时间延长的态势^[14],将可能显著影响区域植被动态变化,保护区气候变化风险与日俱增^[15]。因此,势必需要进一步揭示保护区 NDVI 对极端气候变化的响应。当前,中国气候脆弱性较高的保护区主要分布在西南地区 and 青藏高原的部分地区,尤其是云南气候变化风险更高^[1]。轿子山国家级自然保护区(简称轿子山)位于滇中高原,作为我国少有的高山保护区之一,保存有代表性的滇中高原植被与生境垂直带谱,对气候变化尤为敏感,识别极端气候事件对保护区植被的影响特征,可为保护区气候风险评估和监测预警提供参考依据^[1-2,15-16]。

基于此,本研究利用保护区所在的东川区与禄劝彝族苗族自治县(禄劝县)20 世纪 50—80 年代气候要素资料和 1961—2019 年逐日气候要素数据集、2017—2019 年保护区周边自动气象站逐时气温、降水要素数据集、1999—2016 年 1 km 月尺度归一化植被指数集(NDVI),围绕 2 个问题展开研究:(1)气候(极端)要素和温度带垂直组合随时间如何变化?(2)保护区 NDVI 如何响应极端气候变化?

1 研究区概况

轿子山国家级自然保护区(102.80°—102.98°E, 26.00°—26.20°N)位于东川区与禄劝县交汇处,分为轿子山片区和普渡河片区,总面积 16 456 hm²(图 1)。山势南北延伸,主峰为雪岭(4 344.1 m),该峰是青藏高原以东海拔最高的山地,也是北半球该纬度带上最高山地之一。轿子山位于北亚热带半湿润气候区,水分和热量条件垂直分异显著,夏季受热带海洋气团控制多云雨,冬季受热带大陆气团控制少降水^[17]。区域属森林生态系统类型自然保护区,主要保护对象为以攀枝花苏铁、须弥红豆杉、林麝等为代表的珍稀濒危野生动植物资源及其栖息环境,分布有我国面积最大的高山柏林和海拔最低的高山松林。

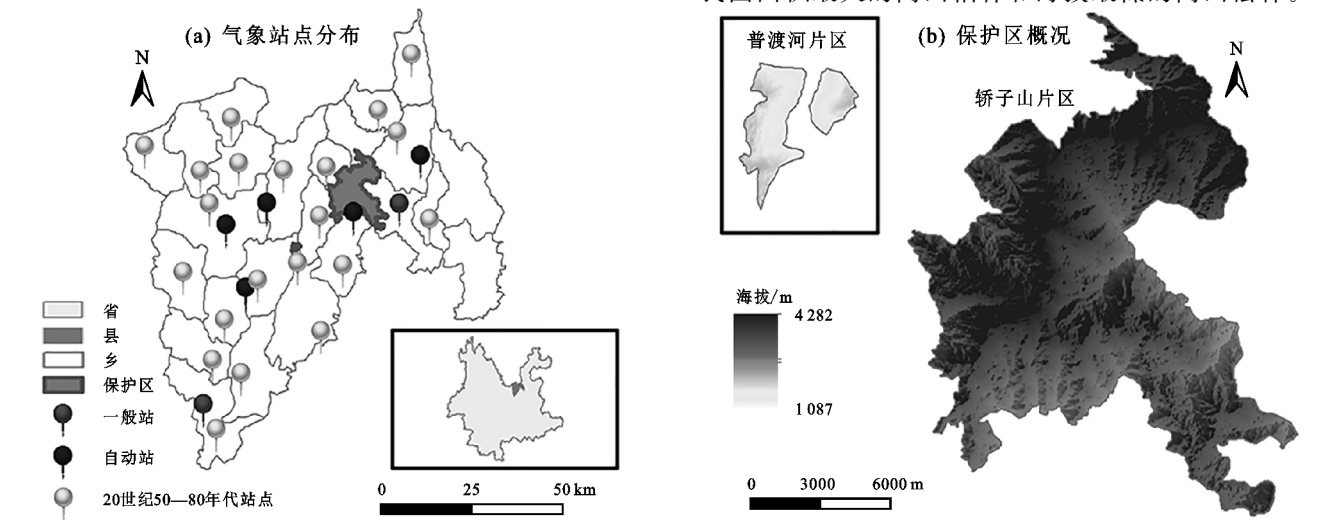


图 1 站点分布与研究区概况

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

东川区和禄劝县气象数据资料均由东川区和禄劝

县气象局提供,所搜集气象数据资料见文献^[18-21]。1 km 月尺度归一化植被指数(NDVI,1999—2016 年)来自于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.>

resdc.cn),30 m 数字高程模型(DEM)来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/search>)。

2.2 研究方法

采用一元线性回归^[22]、Pettitt 非参数法^[23] 分析气候要素、极端气候指数、NDVI 趋势特征。通过 Arcgis 10.5 反距离权重插值 20 世纪 50—80 年代、2017—2019 年平均气温、年降水量的栅格并利用等值线工具分别提取等温线与等降水量线。对 DEM(30 m)进行栅格重分类,划分间隔为 500 m,将保护区划分为 4 个海拔带,统计不同海拔带内栅格值,用以研究不同海拔带 NDVI 变化特征。此外,为探究植被对极端气候事件的响应,将 NDVI 与极端气候指数进行 Spearman 相关分析^[24]。

2.2.1 极端气候指数 结合保护区气候特征,从 ETC-CDI 定义的极端指数中选取 14 个表征极端气温指数和 9 个表征极端降水指数,定义见 http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml。采用 R ClimDex 软件^[25] 计算东川、禄劝站极端气温/降水指数。

2.2.2 温度带划分 参考郑景云等^[26] 和王宇^[27] 温

度带划分标准,探讨全球变暖下轿子山垂直方向温度带的动态变化,各指标分类见表 1。以日平均气温稳定 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温日数作为主要指标,能够准确辨别山地地区热量地域分异^[26,28]。落雪站(可代表轿子山高海拔地区气候状况)历史 1 月平均气温为 $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,7 月平均气温为 $11.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,由此可知,1 月平均气温和 7 月平均气温并不是轿子山地区主要限制因子。故本文以日平气均温 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 持续日为主要指标,以 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温为参考指标,1 月平均气温与 7 月平均气温为辅助指标划分轿子山温度带。

对于垂直温度带的划分,2017—2019 年研究区有 5 个自动气象站和 2 个国家站的气象数据可用,其中东川和禄劝站在 2 个时段均有,且最低点均是东川站,尽管前后站点不同,但在空间上均比较接近,因而可用于揭示 2017—2019 年相对于 20 世纪 50—80 年代垂直温度带的变化。依据表 2 推算轿子山每隔 100 m 高度下的 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温日数、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温、1 月平均气温以及 7 月平均气温,并以此进行温度带识别划分。

表 1 云南温度带划分标准^[26-27]

温度带	$\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温日数/d	$\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温/ $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}^{-1})$	1 月平均气温/ $^{\circ}\text{C}$	7 月平均气温/ $^{\circ}\text{C}$
北热带	365	7500~8000	>13	—
南亚热带	285~365	5000~7500	9~10 至 13~15	—
中亚热带	225~285	4000~5000	4~10	—
北亚热带	210~225	3500~4500	0~4	—
暖温带	170~210	3200~3400 至 4500~4800	-12~-6 至 0	—
中温带	100~170	1600 至 3200~3400	-30 至 -12~-6	—
寒温带	<100	<1600	<-30	—
高原亚寒带	<50	—	-18 至 -10~-12	<11

表 2 轿子山国家级自然保护区 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温日数、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温、1 月平均气温、7 月平均气温垂直递减率

年代	要素	一元线性回归方程	R^2
20 世纪 50—90 年代	$\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温日数	$y=-0.12x+474.46$	0.99
	$\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温	$y=-2.98x+10103$	0.99
	1 月平均气温	$y=-0.56\times 10^{-2}x+18.84$	0.96
	7 月平均气温	$y=-0.65\times 10^{-2}x+32.88$	0.98
	$\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温日数	$y=-0.14x+491.66$	0.92
2017—2019 年	$\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温	$y=-3.91x+11932$	0.96
	1 月平均气温	$y=-0.54\times 10^{-2}x+19.40$	0.88
	7 月平均气温	$y=-0.73\times 10^{-2}x+34.43$	0.98

3 结果与分析

3.1 区域气候

3.1.1 气候要素时间变化趋势 从图 2 可以看出,轿子山年平均气温显著升高,年日照时间、年平均风速、年雾日呈显著降低态势,年降水量、年平均相对湿度趋于缓慢降低。从显著突变点来看,年雾日、年日照时间突变年相对提早,年平均气温、年平均风速较为滞后,年平均相对湿度突变年最为滞后。

3.1.2 平均气温空间变化特征 由图 3a~图 3f 可知,20 世纪 50—80 年代轿子山年平均气温、1 月平均气温、7 月平均气温总体分布呈南高北低、西高东低趋势。轿子山西部、北部等温线分布较为密集,表明温差大,可能与轿子山地形关系密切。相较于 20 世纪 50—80 年代,2017—2019 年年平均气温、1 月平均气温、7 月平均气温表现为北高南低、东高西低趋势。等温线分布特征均表现为东密西疏,可能是由

于 2017—2019 所使用的部分站点与 20 世纪 50—80 年代不同而对平均气温空间分布格局产生影响。总体来看,轿子山平均气温变化具有海拔依赖性的特

点,且各局部地区平均气温趋于上升。从平均气温变幅来看,轿子山西部(地势较高)气温增幅小于轿子山东部(地势较低)。

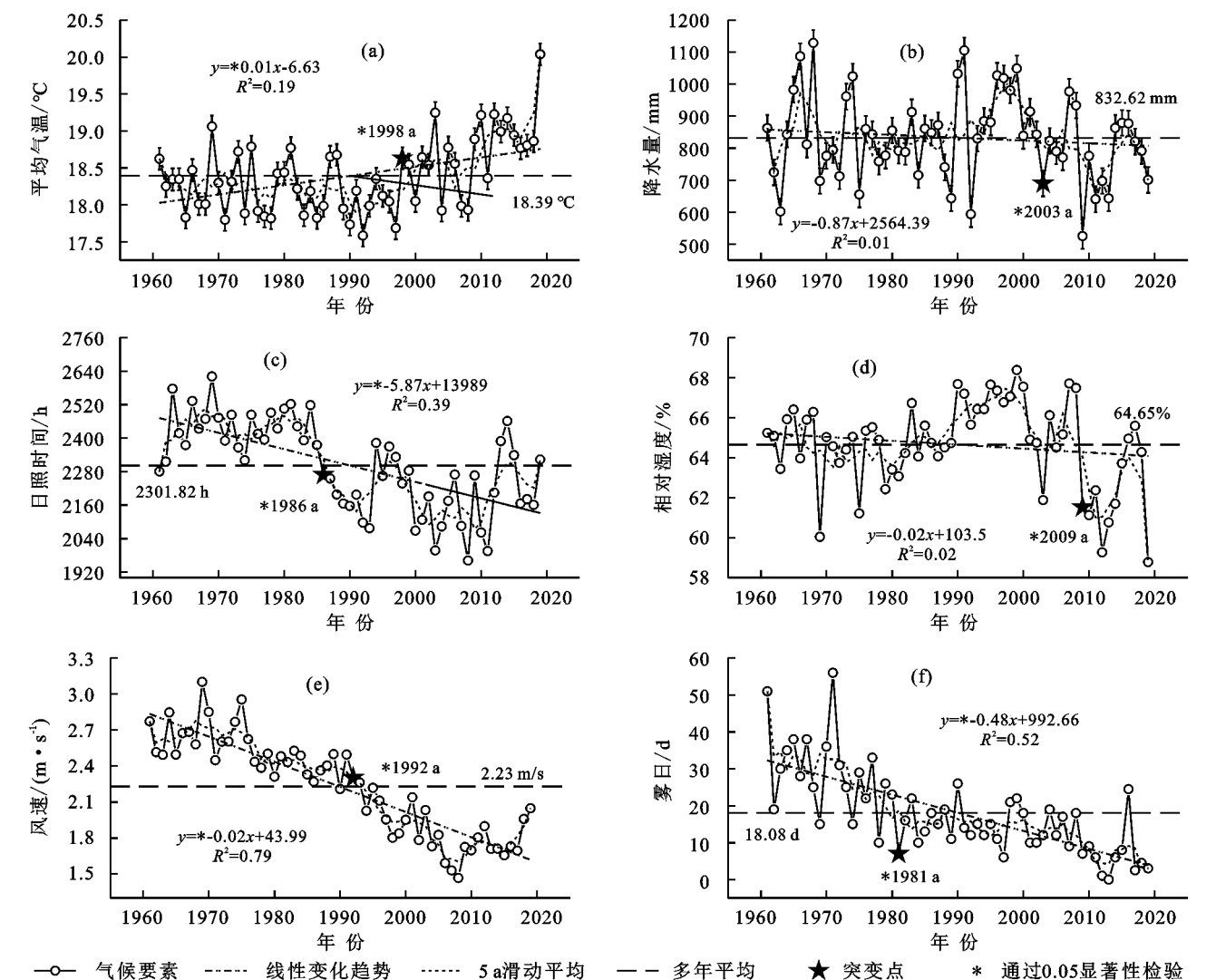


图 2 1961—2019 年轿子山国家级自然保护区气候要素年际变化

3.1.3 年降水量空间变化特征 由图 3g~图 3h 可知,轿子山年降水量空间分布特征为西多东少。20 世纪 50—80 年代,轿子山西部等降水量线分布较为密集,向东等降水量线分布逐渐稀疏,即年降水量的空间差异向东逐渐减小。由于 20 世纪 50—80 年代部分站点终止使用,2017—2019 年所使用的站点数量以及站点地理参数上的不同可能对等降水量线的分布产生影响,但不会造成最终结论偏差,因此仍有研究意义。基于此,相较于 20 世纪 50—80 年代,2017—2019 年等降水量线表现为东密西疏,即年降水量的空间差异东大西小,轿子山除西南角、东北角年降水量趋于减少外,大部分地区呈增加态势,西南区域变幅最大。

3.2 温度带划分

从图 4 可以看出,20 世纪 50—80 年代,轿子山垂直温度带依次为南亚热带、中亚热带、北亚热带、暖温带、中温带、山地寒温带和山地亚寒带。相较于 20

世纪 50—90 年代,2017—2019 年轿子山基带温度带为北热带,南亚热带下界随之抬升 200 m,中亚热带上界降低约 100 m,北亚热带、暖温带、中温带、山地寒温带、山地亚寒带下界下降约 100~300 m。

3.3 极端气温与降水事件分析

3.3.1 极端气温 由图 5 可知,东川站暖指数(除 TXx)趋于增长,冷指数(除 TXn、TNn)趋于下降,且仅 TN10p 通过 0.05 显著检验。突变点通过 0.05 显著性检验的极端气温指数中,暖指数多于冷指数,TXx 突变相对提早(1974 年),TNx、SU25、TX90p、TN10p 突变相对同步(2008—2010 年)。禄劝站暖指数均趋于上升,以 TXx、TNx、SU25、TR20、TX90p、TN90p、WSDI 最为显著,冷指数(除 TNn)呈下降态势,以 TNn、FD0、TN10p、CSDI 最为显著。突变点通过 0.05 显著性检验的极端气温指数中,暖指数多于冷指数,冷指数(1989—2000 年)突变相对同步性强于暖指数(1991—2005 年)。

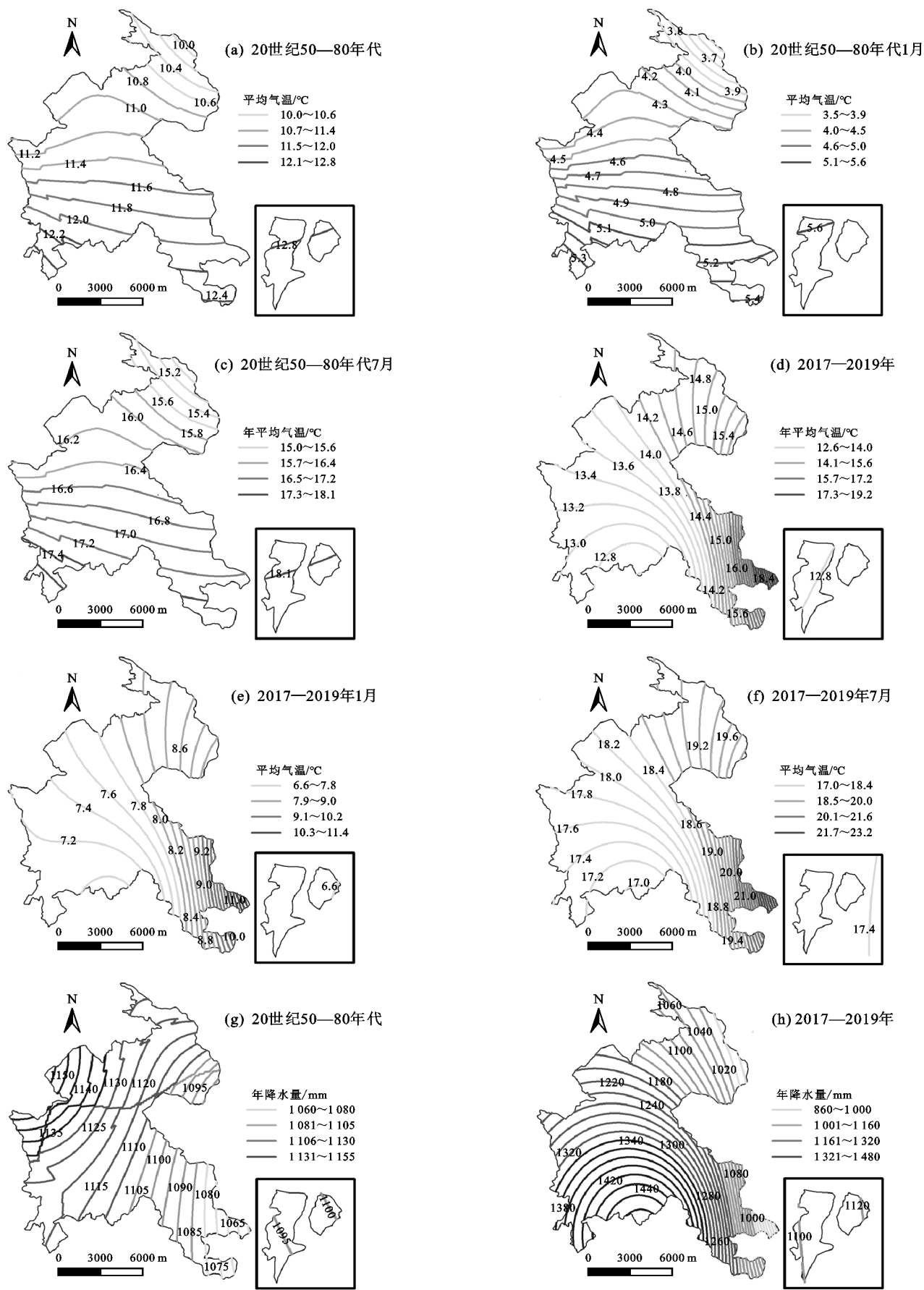


图3 20世纪50—80年代与2017—2019年轿子山国家级自然保护区平均气温、年降水量分布

3.3.2 极端降水 由图6可知,东川站强度指数、极端降水量指数(R95p除外)趋于不显著增长,极端降水日指

数(R10 mm除外)趋于不显著降低,极端干旱日指数趋于轻微下降,未有极端降水指数突变点通过显著性检

验。禄劝站强度指数趋于不显著增长,极端降水量指数(除 R99p)、极端降水日指数趋于不显著降低,极端干旱日指数趋于轻微上升。仅 RX1 与 R99p 存在显著突变且均为 1984 年。综上,东川、禄劝站降雨强度均有所增强,极端降水日趋于减少,东川站极端降水量趋于缓慢增加,禄劝站趋于缓慢减少。

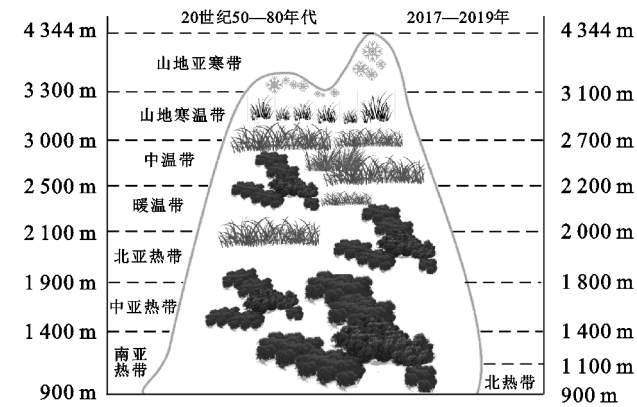


图 4 20 世纪 50—80 年代与 2017—2019 年轿子山国家级自然保护区温度带

3.4 NDVI 时空特征以及对极端气候指数的响应

3.4.1 NDVI 时空特征 由图 7 可知,不同海拔范围内 NDVI 均趋于显著增长,NDVI 增速随海拔升高减小。1 736~3 236 m 海拔带 NDVI 值为 0.6~0.8,3 236~3 736 m 海拔带内 NDVI 值范围为 0.4~1.0。2003 年以前,海拔 1 736~2 236,2 236~2 736 m 区域内 NDVI 值为 0.6~0.8,并且稳定不变,2 736~3 236,3 236~3 736 m 海拔带内分别约有 11.86%,10.77% 的栅格 NDVI 值降低。2003 年—2010 年,4 个海拔带(从低到高)分别有约 33.33%,16.67%,11.86%,4.62% 的栅格 NDVI 值增长,2010—2012 年又存在不同程度的 NDVI 值下降。2012—2016 年,各海拔带分别有约 33.33%,50.00%,53.34%,28.41% 的栅格 NDVI 值趋于增长。

3.4.2 NDVI 对极端气候事件的响应 图 8 为东川站和禄劝站极端气候指数与轿子山年平均 NDVI ($NDVI_{mean}$)、年最大 NDVI ($NDVI_{max}$)、年最小 NDVI ($NDVI_{min}$) 的 Spearman 相关。 $NDVI_{mean}$ 、 $NDVI_{max}$ 与暖/冷指数多呈正/负相关,且 $NDVI_{max}$ 与暖指数中的 TXx(东川)、SU25(禄劝)、TR20 呈显著正相关,与冷指数中的 TX10p(东川)呈显著负相关。 $NDVI_{min}$ 与暖/冷指数多呈负/正相关,与其中的 WSDI(东川)、TNx 呈显著负相关。

总体来看,3 个 NDVI 指数与极端降水指数相关性偏弱,仅 $NDVI_{mean}$ 与 RX1(禄劝), $NDVI_{max}$ 与 R25 mm(东川)呈显著正相关,即降雨强度、极端降雨日数分别对 $NDVI_{mean}$ 、 $NDVI_{max}$ 升高存在促进作用。

4 讨论

4.1 气候变化特征

从表 3 可以看出,多数山地保护区仅研究气温、降水 2 个气候要素:气温趋于升高或降低,降水除轿

子山外均趋于增加。本研究表明,轿子山年日照时间、年平均风速、年雾日趋于显著降低。此外,平均气温与降水量等值线分布未考虑地形影响,其插值结果可能存在一定的偏差(图 3)。轿子山暖指数、降水强度指数趋于增长,冷指数、极端降水日指数趋于下降,与 Shao 等^[30]的研究结论一致。此外,张善红等^[28]和 Guan 等^[31]分别发现,秦岭地区和青藏高原温度带(气候带)正向高海拔攀升,本研究表明,轿子山同样存在该现象,即基带温度带由南亚热带转为北热带,原南亚热带整体高度抬升。

4.2 NDVI 趋势的海拔差异

轿子山海拔 1 736~2 236,2 236~2 736,2 736~3 236,3 236~3 736 m 区域内 NDVI 斜率分别为 7.28×10^{-3} , 5.85×10^{-3} , 5.28×10^{-3} , $3.75 \times 10^{-3} a^{-1}$,表明随海拔升高,NDVI 增速减缓。Tao 等^[32]研究表明,西南地区不同海拔带 NDVI 均趋于增长,且增速随海拔升高而上升,以海拔 1 200~3 500 m 范围内 NDVI 增速的垂直变化率最高,每 1 000 m 升高 0.06%/a; Jiang 等^[33]研究发现,西南地区海拔<3 400 m,NDVI 显著增长,3 400 m 以上 NDVI 先增后降不一致;而 Li 等^[9]研究表明,雅鲁藏布江大峡谷保护区 NDVI 增速随海拔升高显著降低,海拔≤3 000 m、NDVI 增速为 0.05/10~0.08/10 a、海拔>3 000 m、NDVI 增速为 0.01/10~0.03/10 a。上述差异可能与研究区域大小和海拔带划分标准不同有关。

除海拔作用外,张玉琴等^[4]、李娟等^[11]、付建新等^[13]、魏建瑛等^[34]研究指出,坡度、坡向不同,区域内 NDVI 趋势变化也会出现差异。因此,NDVI 趋势变化受海拔作用外,坡度、坡向可能也有所影响。

4.3 NDVI 与极端气候指数相关

气温通过影响植物的碳素同化和消耗过程,从而控制植被生长,同时也通过调节区域蒸散过程控制土壤水分影响植被生长;降水则通过调控土壤水分间接影响植被变化^[35-38]。本研究发现,轿子山极端气温指数与 $NDVI_{mean}$ 、 $NDVI_{max}$ 、 $NDVI_{min}$ 的相关性整体强于极端降水指数,与 Shao 等^[30]的研究结果西南地区极端气温指数对 NDVI、LAI、GPP 的贡献率大于极端降水指数一致。进一步来看, $NDVI_{max}$ 对极端暖指数 TXx、TR20、SU25 呈显著正相关,而 $NDVI_{min}$ 与暖指数 TNx、WSDI 呈显著负相关,表明 NDVI 对夜间和白昼气温响应存在显著差异,这与 Peng 等^[39]的研究结论昼夜升温存在对 NDVI 的非同步性作用一致。极端降水指数中,仅强度指数中的 RX1、极端降水日指数中 R25 mm 分别与 $NDVI_{mean}$ 、 $NDVI_{max}$ 呈显著正相关,表明降水强度、大雨日数对 NDVI 影响较大。然而, $NDVI_{min}$ 与极端降水指数均未通过显著性检验,表明极端降雨指数对 $NDVI_{min}$ 的影响不明显。

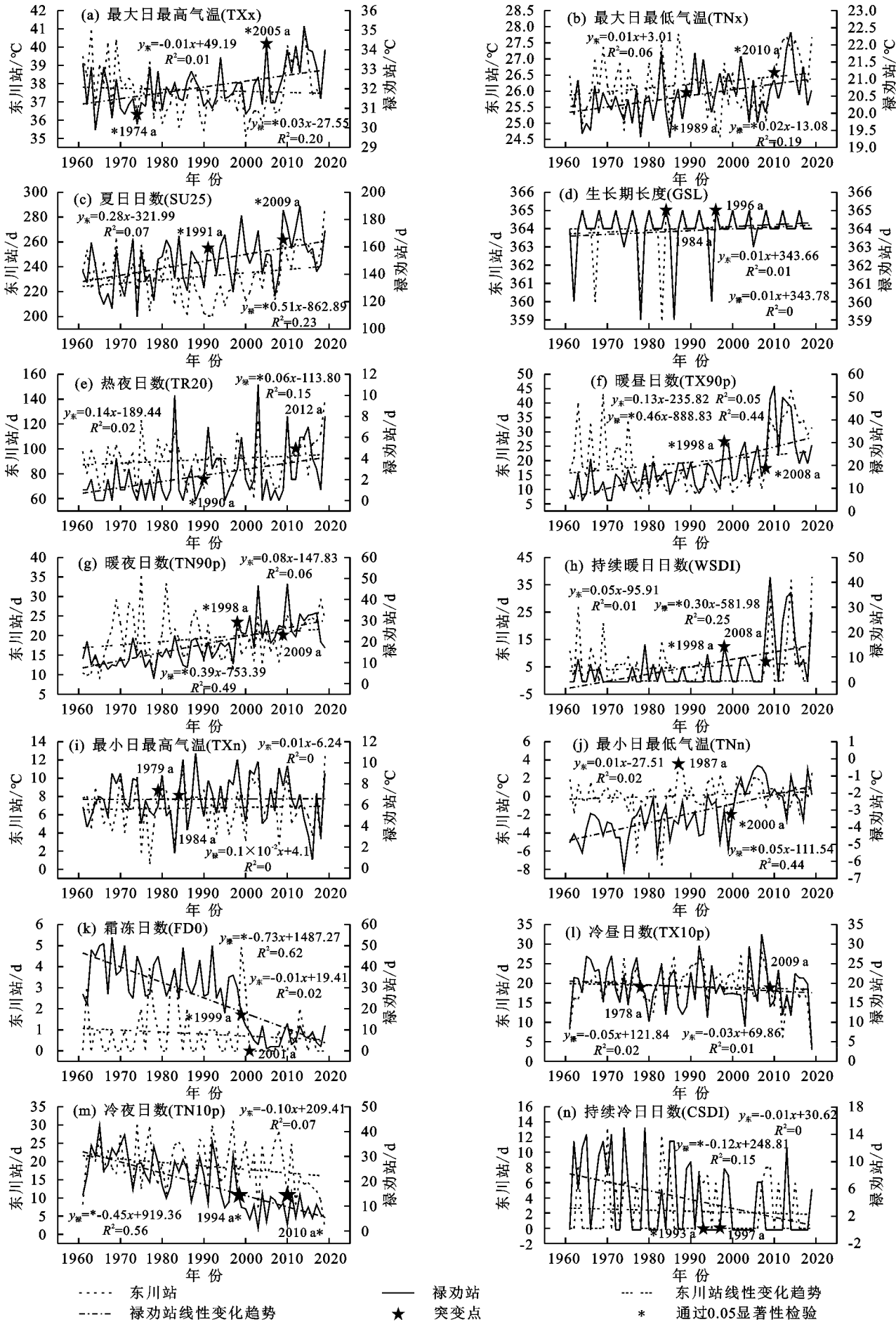


图 5 1961—2019 年轿子山国家级自然保护区东川、禄劝站极端暖、冷指数年际变化

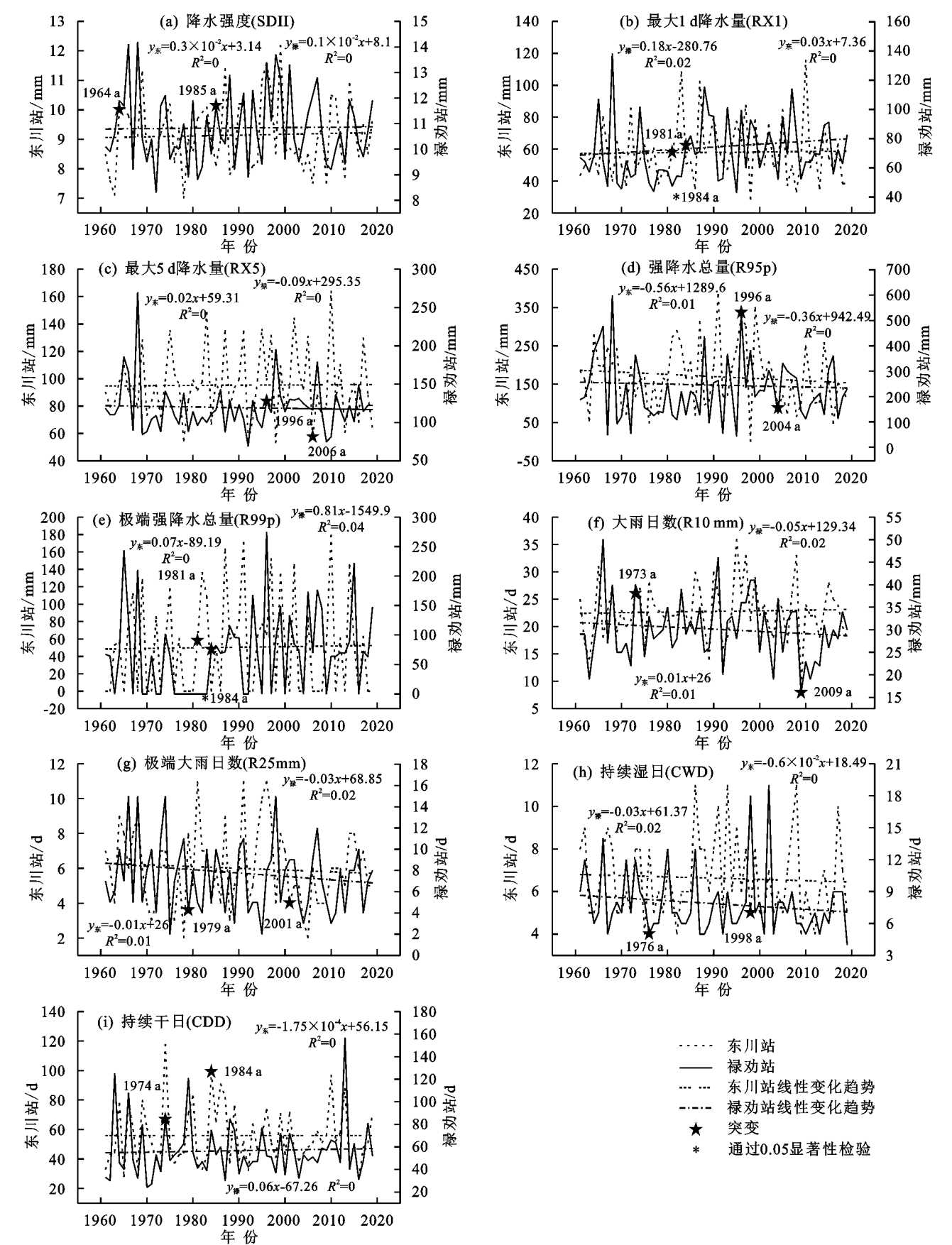


图6 1961—2019年轿子山国家级自然保护区东川、禄劝站极端降水指数年际变化

Jiang 等^[33]、Yin 等^[40]、Wei 等^[41] 分别揭示了西南地区、横断山区、澜沧江流域不同植被类型 NDVI 在不同海拔带对平均气温/极端气温、降水/极端降水存在显著不同的海拔依赖性变化。因此,若轿子山不同海拔下可用气象站更多(如落雪、雪山等站持续监测或现自动站监测气象序列更长),可进一步揭示轿

子山不同海拔带不同植被类型对不同海拔带极端气候指数的响应。

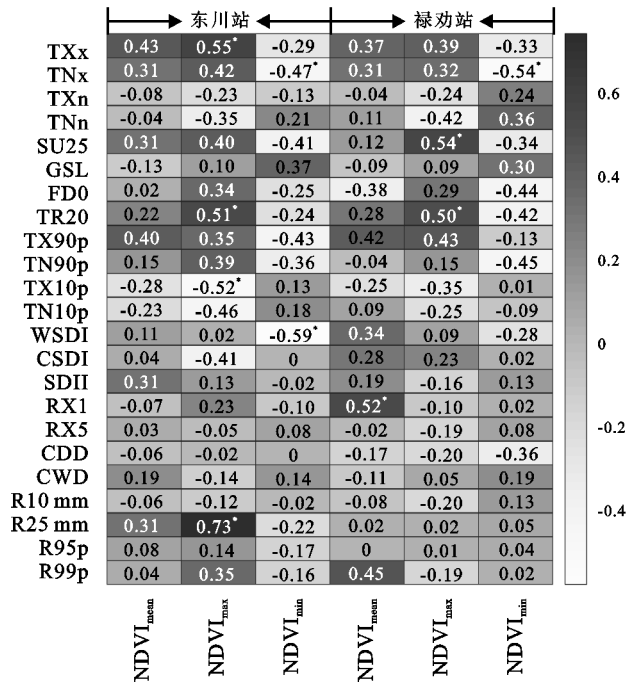
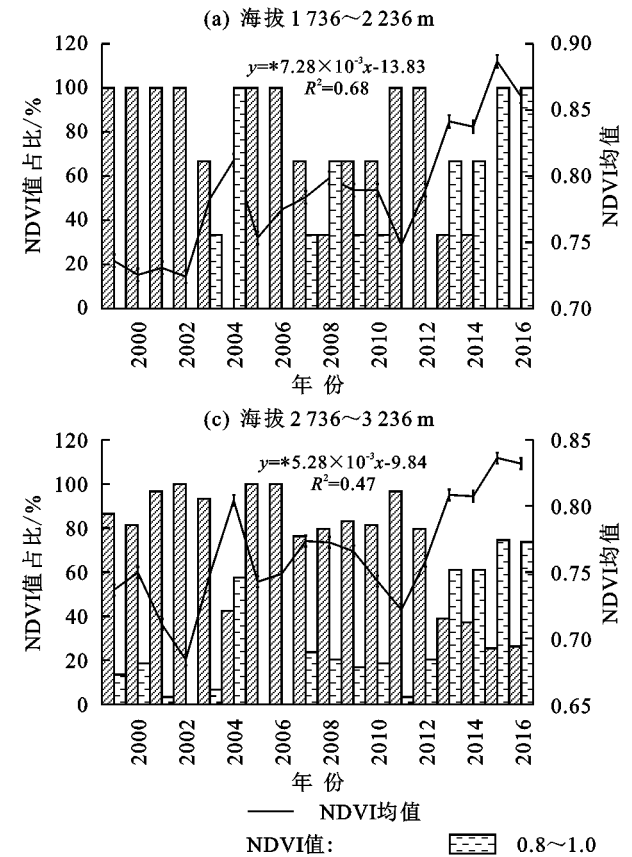


图 7 1999—2016 年轿子山国家级自然保护区不同海拔带 NDVI 趋势变化以及值结构



注：* 表通过 0.05 显著性检验。

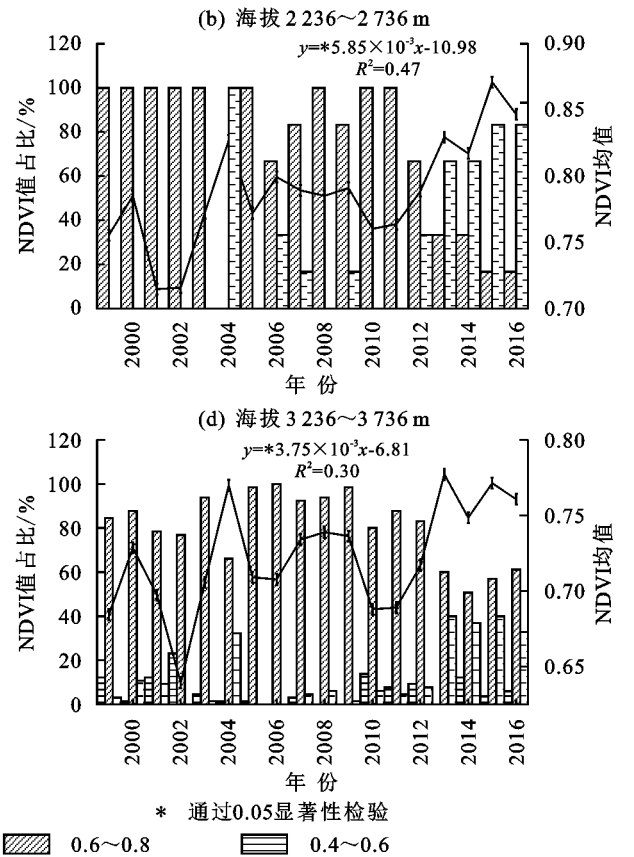
图 8 1999—2016 年轿子山国家级自然保护区 NDVI 与极端气温指数、极端降水指数的 Spearman 相关系数

5 结论

(1)轿子山年平均气温(0.13℃/10a)趋于显著升高,年日照时间(−58.73h/10a)、年平均风速(−0.21

气候变化已对中国西南气候脆弱性地区的生物多样性构成巨大威胁,保护区气候风险阈值的精确识别是气候风险评估与管理的基础^[1-2,15]。目前,我国自然保护区建设与管理的主要技术标准尚未纳入气候变化风险调查与管控的相关内容,缺乏成熟的极端气候变化风险评价和监测预警等技术,未来可设立自然保护区适应气候变化的专项资金,以加强自然保护区应对气候变化风险的管控能力建设^[15]。

表 3 国家级山地自然保护区气候要素趋势比较						
保护区	气温/ (℃·a ⁻¹)	降水/ (mm·a ⁻¹)	日照时间/ (h·a ⁻¹)	相对湿度/ (%·a ⁻¹)	风速/ (m·s ⁻¹ ·a ⁻¹)	雾日/ (d·a ⁻¹)
武夷山 ^[3-4]	0.03	16.95	—	—	—	—
大海陀 ^[5]	极显著上升	略有增加	—	—	—	—
长白山 ^[6]	0.03	5.54	—	—	—	—
贺兰山 ^[7]	−0.01	2.77	—	—	—	—
羌塘 ^[8,29]	−0.27	1.58	2.76	−0.03	−0.03	—
祁连山 ^[10]	下降	增加	—	下降	—	—
轿子山	0.01	−0.87	−5.87	−0.02	−0.02	−0.26



* 通过0.05显著性检验

(m·s)/10a)和年雾日(−4.8d/10a)均显著下降。

(2)20世纪50—80年代、2017—2019年轿子山基带温度带分别为南亚热带、北热带,相较于20世纪

50—80 年代,2017—2019 年南亚热带攀升。

(3)1999—2016 年,海拔 1 736~2 236(0.07/10 a), 2 236~2 736(0.06/10 a),2 736~3 236(0.05/10 a), 3 236~3 736 m(0.04/10 a)的区域 NDVI 均趋于显著增长,但增幅随海拔升高而减小。

(4)NDVI 对暖指数、降水强度指数、极端降水日指数响应更为敏感,白昼气温升高促进/抑制 $NDVI_{max}/NDVI_{min}$ 增长,夜间气温升高对 $NDVI_{min}$ 产生较大影响。

参考文献:

[1] Shrestha N, Xu X, Meng J, et al. Vulnerabilities of protected lands in the face of climate and human footprint changes[J]. Nature Communications,2021,12:e1632.

[2] Gray C, Hill S, Newbold T, et al. Local biodiversity is higher inside than outside terrestrial protected areas worldwide[J].Nature Communications,2016,7:e12306.

[3] 安德帅,徐丹丹,濮毅涵,等.2000—2019 年武夷山亚高山草甸对气候因子的响应及其时滞效应[J].应用生态学报,2021,32(12):4195-4202.

[4] 张玉琴,李丽纯,彭继达,等.武夷山国家自然保护区 NDVI 对坡度的响应[J].生态环境学报,2020,29(7):1310-1317.

[5] 宋超,余琦殷,邢韶华,等.近 30 年河北大海陀自然保护区山地草甸植被(NDVI)变化及其对气候的响应[J].生态学报,2018,38(7):2547-2556.

[6] 张园,袁凤辉,王安志,等.2001—2018 年长白山自然保护区生长季 NDVI 变化特征及其对气候变化的响应[J].应用生态学报,2020,31(4):1213-1222.

[7] 李婷婷,马超,郭增长.2004—2015 年贺兰山自然保护区植被 NPP 时空变化与气候响应[J].水土保持研究,2020,27(6):254-261.

[8] 杜军,牛晓俊,袁雷,等.1971—2017 年羌塘国家级自然保护区陆地生态环境变化[J].冰川冻土,2020,42(3):1017-1026.

[9] Li H D, Jiang J, Chen B, et al. Pattern of NDVI-based vegetation greening along an altitudinal gradient in the eastern Himalayas and its response to global warming[J].Environmental Monitoring and Assessment,2016,188:e186.

[10] 肖云飞,陈文业,王斌杰,等.祁连山国家级自然保护区土地利用时空变化及与气候因子关系研究[J].草地学报,2021,29(9):2049-2057.

[11] 李娟,龚纯伟.祁连山国家公园植被覆盖变化地形分异效应[J].水土保持通报,2021,41(3):228-237.

[12] Ma Y R, Guan Q Y, Sun Y F, et al. Three-dimensional dynamic characteristics of vegetation and its response to climatic factors in the Qilian Mountains[J]. Catena,2022,208:e105694.

[13] 付建新,曹广超,郭文炯.1998—2017 年祁连山南坡不同海拔、坡度和坡向生长季 NDVI 变化及其与气象因子的关系[J].应用生态学报,2020,31(4):1203-1212.

[14] IPCC. Climate Change 2021: The physical science basis[R]. Cambridge: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,2021.

[15] 李海东,沈渭寿,刘海月,等.我国自然保护区应对气候变化风险现状、问题与对策[J].世界林业研究,2015,28(5):68-72.

[16] 尹云鹤,马丹阳,邓浩宇,等.中国北方干湿过渡区生态系统生产力的气候变化风险评估[J].地理学报,2021,76(7):1605-1617.

[17] 苏骅,王平.轿子山国家级自然保护区垂直气候分区研究[J].林业调查规划,2020,45(6):59-62,68.

[18] 东川市气象台.东川气候手册[M].云南 东川:东川市气象台,1977.

[19] 杨仲荣,敖天元,赵雍明.云南省东川市气象志[M].东川:东川市气象处,1987.

[20] 东川市气象处.东川市农业气候资源及农业气候区划[M].东川:东川市气象处,1987.

[21] 李兴尧,李克纯,曾艳,等.禄劝彝族苗族自治县气象志[M].云南:云南人民出版社,1997.

[22] 周旗,张海宁,任源鑫.1961—2016 年渭河流域极端降水事件研究[J].地理科学,2020,40(5):833-841.

[23] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J].Journal of the Royal Statistical Society, Series C,1979,28:126-135.

[24] Kruskal W H. Ordinal measures of association[J]. Journal of the American Statistical Association,1958,53(284):814-861.

[25] Zhang X B, Yang F. RCLimDex(1.0), User manual[Z]. Canada: ClimDex Research Branch Environment,2004.

[26] 郑景云,尹云鹤,李炳元.中国气候区划新方案[J].地理学报,2010,65(1):3-12.

[27] 王宇.云南山地气候[M].昆明:云南科技出版社,2005.

[28] 张善红,白红英,齐贵增,等.1960—2019 年秦岭气候带界限的变化研究[J].自然资源学报,2021,36(10):2491-2506.

[29] 杜军,周刊社,袁雷.1971—2018 年西藏羌塘国家级自然保护区地表湿润指数的变化趋势[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(4):13-23.

[30] Shao H, Zhang Y D, Gu F X, et al. Impacts of climate extremes on ecosystem metrics in southwest China[J]. Science of the Total Environment,2021,776:e145979.

[31] Guan Y, Cui W, Liu J, et al. Observed changes of Köppen climate zones based on high-resolution data sets in the Qinghai-Tibet Plateau[J].Geophysical Research Letters,2021,48(23):e2021GL096159.

[13] Xin Y, Lu N, Jiang H, et al. Performance of ERA5 reanalysis precipitation products in the Guangdong-Hong Kong-Macao greater Bay Area, China[J].*Journal of Hydrology*,2021,602:e126791.

[14] Lu M, Xu Y P, Shan N, et al. Effect of urbanisation on extreme precipitation based on nonstationary models in the Yangtze River Delta metropolitan region[J].*Science of the Total Environment*,2019,673:64-73.

[15] 杨秀芹,耿文杰.淮河流域 TRMM 多源卫星降水产品精度评估[J].*水电能源科学*,2016,34(7):1-5.

[16] 程诗悦,秦伟,郭乾坤,等.近 50 年我国极端降水时空变化特征综述[J].*中国水土保持科学*,2019,17(3):155-161.

[17] Jiao D L, Xu N N, Yang F, et al. Evaluation of spatial-temporal variation performance of ERA5 precipitation data in China[J].*Scientific Reports*,2021,11(1):e17956.

[18] Tarek M, Brissette F, Arsenault R. Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modelling over North America[J].*Hydrology and Earth System Sciences*,2020,24(5):2527-2544.

[19] Zandler H, Haag I, Samimi C. Evaluation needs and temporal performance differences of gridded precipitation products in peripheral mountain regions[J].*Scientific Reports*,2019,9:e15118.

[20] Skok G, Zagar N, Honzak L, et al. Precipitation inter-comparison of a set of satellite- and raingauge-derived datasets, ERA Interim reanalysis, and a single WRF regional climate simulation over Europe and the North Atlantic [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016,123(1/2):217-232.

[21] Ebert E E, Janowiak J E, Kidd C. Comparison of near-real-time precipitation estimates from satellite observations and numerical models[J].*Bulletin of the American Meteorological Society*,2007,88(1):47-64.

[22] Gottschalck J, Meng J, Rodell M, et al. Analysis of multiple precipitation products and preliminary assessment of their impact on global land data assimilation system land surface states[J].*Journal of Hydrometeorology*,2005,6(5):573-598.

[23] Yu C, Hu D Y, Liu M Q, et al. Spatio-temporal accuracy evaluation of three high-resolution satellite precipitation products in China area [J]. *Atmospheric Research*,2020,241:e104925.

[24] Zhang L, Li X, Cao Y P, et al. Evaluation and integration of the top-down and bottom-up satellite precipitation products over mainland China [J]. *Journal of Hydrology*,2020,581:e124456.

(上接第 177 页)

[32] Tao J, Xu T Q, Dong J W, et al. Elevation-dependent effects of climate change on vegetation greenness in the high mountains of southwest China during 1982—2013 [J].*International Journal of Climatology*,2018,38(4):2029-2038.

[33] Jiang S S, Chen X, Smettem K, et al. Climate and land use influences on changing spatiotemporal patterns of mountain vegetation cover in southwest China[J].*Ecological Indicators*,2021,121:e107193.

[34] 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.

[35] Tan J, Piao S, Chen A, et al. Seasonally different response of photosynthetic activity to daytime and night-time warming in the Northern Hemisphere[J].*Global Change Biology*,2015,21(1):377-387.

[36] 葛非凡,毛克彪,蒋跃林,等.华东地区夏季极端高温特征及其对植被的影响[J].*中国农业气象*,2017,38(1):42-51.

[37] 王海军,靳晓华,李海龙,等.基于 GIS 和 RS 的中国西北 NDVI 变化特征及其与气候变化的耦合性[J].*农业工程学报*,2010,26(11):194-203.

[38] 高滢,孙虎,徐崑尧,等.陕西省植被覆盖时空变化及其对极端气候的响应[J].*生态学报*,2022,42(3):1022-1033.

[39] Peng S, Piao S, Ciais P, et al. Asymmetric effects of daytime and night-time warming on Northern Hemisphere vegetation[J].*Nature*,2013,501:88-92.

[40] Yin L, Dai E F, Zheng D, et al. What drives the vegetation dynamics in the Hengduan Mountain region, southwest China: Climate change or human activity? [J].*Ecological Indicators*,2020,112:e106013.

[41] Wei O Y, Wan X Y, Xu Y, et al. Vertical difference of climate change impacts on vegetation at temporal-spatial scales in the upper stream of the Mekong River Basin[J].*Science of the Total Environment*,2020,701:e134782.