

doi: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20201103

· 研究报告 ·

1960—2015年云南省极端气候指数变化特征研究*

徐用兵^{1,2}, 雷秋良^{1,2}*, 周脚根³, 张亦涛⁴, 武淑霞^{1,2},
翟丽梅^{1,2}, 王洪媛^{1,2}, 李影¹, 刘宏斌^{1,2}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 农业农村部面源污染控制重点实验室, 北京 100081;
3. 淮阴师范学院城市与环境学院, 江苏淮安 223399; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要 [目的] 基于1960—2015年的云南省31个气象站点逐日平均气温、最高气温、最低气温和降水量等数据, 研究极端气候指数的时空变化, 为降低云南省自然灾害对农业生产的影响, 以及制定应对气候风险的策略提供依据。[方法] 采用国际气候诊断与指数小组(ETCDD-MI)定义的极端气候指标, 运用线性趋势法和克里金插值法等对其进行分析。[结果] 7个气温指数中, 夏季日数、冷昼日数和寒潮持续指数呈下降趋势, 霜冻日数、月极端最高气温、月极端最低气温和暖夜日数呈上升的趋势。空间变异分析显示夏季日数、月极端最高气温和月极端最低气温由南向北递减, 暖夜日数、冷昼日数和寒潮持续指数表现为东高西低。7个极端气温指数的变化趋势中, 霜冻日数和冷昼日数的变化趋势与海拔高度呈显著的负相关关系, 月极端最高气温的趋势与海拔高度呈极显著的正相关关系。6个降水指数中, 日最大降水量、连续干旱日数和极强降水量呈上升的趋势, 大雨日数、连续湿日数和年总降水量呈下降的趋势。日最大降水量和大雨日数由南向北递减, 连续湿日数和年总降水量由西南向东北递减, 连续干旱日数高值中心主要位于云南的中部和东部, 极强降水量主要集中在德宏州和保山市。云南省的极端强降水由西南向东北递减。6个极端降水指数的变化趋势与海拔的相关性均未达到显著水平。[结论] 这些极端气候变化特征表明云南省有变干和变暖的趋势, 农业生产应采取适应性对策。

关键词 极端气温 极端降水 变化趋势 空间变异 海拔

中图分类号:S166 文献标识码:A 文章编号:1005-9121[2020]11015-13

0 引言

全球气候变化已成为世界共同面对的问题, 国际社会早已认识到气候变化及其影响的严重性, 如何减轻和适应气候变化的不利影响日益引起人们的重视^[1]。联合国政府间气候变化委员会第5次评估报告指出, 1880—2012年全球地表的平均温度上升了0.85℃, 且升温速率加快^[2], 1951—2014年我国变暖趋势为0.25℃/10年^[3], 1961—2008年云南省增温速率达0.14℃/10年^[4]。全球变暖加速了水分循环, 导致极端气候事件发生频率加大^[5]; 极端暖事件和极端强降水事件在绝大部分陆地地区呈增多的特征^[6-7]。伴随着全球变暖, 我国近年来出现了一些罕见的高温、干旱和强降水事件, 产生了一系列气候极端值^[8]。

1951年以来我国平均最高气温和最低温度均呈明显上升, 尤其是20世纪80年代以来, 平均气温不

收稿日期: 2019-03-08

作者简介: 徐用兵(1994—), 男, 湖北十堰人, 硕士生。研究方向: 面源污染

*通讯作者: 雷秋良(1975—), 男, 河南驻马店人, 研究员。研究方向: 农业面源污染模型模拟、数字土壤制图。Email: leiqiliang@caas.cn

*资助项目: 国家自然科学基金项目“高原农业洱海流域农田氮素径流损失模拟研究”(31572208); 公益性行业(农业)科研专项“典型流域主要农业源污染物入湖负荷及防控技术研究与示范”(201303089); 国家重点研发计划项目“北方水稻化肥农药减施技术集成研究与示范”(2018YFD0200200)

断上升，高温日数（日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ ）呈波浪式地逐渐增多^[8]。高温事件发生频率、强度和影响范围也都不断增加，而与低温相关的极端事件强度和发生频率则有所减少。20世纪90年代以后，最高气温迅速提升，高温纪录屡屡被打破。极端强降水日数和降水强度总体也均呈增加趋势，但区域间差异很大：东北东部、华北和西南的极端强降水日数呈减少趋势，西部的大部地区、长江中下游和华南部分地区则呈增加趋势^[9]；全国暴雨日数略有增加，但区域间差异大，淮河以南多数地区呈增加趋势，淮河以北则呈减少趋势^[10]。刘琳等^[11]分析了西南5省市极端气候指数时空分布规律，发现西南5省的最大日降水量和强降水量均有增加，气温有变暖的趋势。Li等^[12]发现青藏高原横断山只有4项降水指标与海拔呈显著的统计关系，而在云贵高原并不具有显著性。王晓等^[13]分析了近50年云南省的极端气温指数，发现了极端气温呈上升的趋势。夏范燕等^[14]分析了近50年内滇西北的极端气候变化，发现滇西北地区近50年来气温总体呈上升趋势，异常极端高温连续日数增加，霜冻日数减少；连续干、湿日数增加，降水集中的季节性更明显。这些研究成果表明我国极端气候事件存在较大的区域空间分异性。因此在不同区域尺度上理解极端气候指数的变化特征，对于采取气候变化的适应性对策具有重要价值。

目前，国内诸多学者从全国以及西南地区等较大尺度对极端气候事件进行研究，也有对云南省以及滇西北的极端降水或极端气温变化特征的研究，但缺少关于云南省的极端气候指数时空变化特征的分析以及其线性趋势与海拔效应的相关性分析，文章以云南省为例，拟深化此方面研究。云南省地处高原，海拔高差悬殊，除了南北方向上水平气候带的差异外，从低到高又有垂直方向上不同垂直气候带的差异。随着海拔高度的变化，气温和降水等要素变化也很大。1961年以来云南年均气温呈不断上升的趋势，其中升温率 $0.15^{\circ}\text{C}/10$ 年，50年内年均气温上升了 0.74°C ；年降水量呈逐年下降的趋势，年际间变异较大，50年内年降水量减少了39mm，减少速率为 $8\text{mm}/10$ 年；极端温度事件也呈增强增多的趋势，极端高温（热）事件不断增加，且强度增大，而在气候变暖的背景下，极端低温事件也明显增加^[15]。云南省是农业大省，极端气候事件对农业生产以及人民的生产生活带来巨大的损失，截止2010年3月12日，严重干旱造成全省780万人、486万头大牲畜饮水困难；全省秋冬播农作物和林果因旱受灾面积 278.87万hm^2 ；水田缺水、旱地缺墒 71.93万hm^2 ，牧区受旱 1.06万hm^2 ^[16]。因此，研究云南省近几十年的极端气候事件的变化规律，对当地的农业发展以及人民的生活具有一定的参考价值。

该文通过1960—2015年云南省31个站点的逐日最高气温、最低气温、平均气温及降水量计算极端气候指数。根据该文的研究情况，从国际气候诊断与指数小组发布的27个极端气候指数选取13个极端气候指数进行分析，研究其变化特征，研究结果可为应对极端气候、保障农业生产以及人民生活提供科学支撑。

1 数据与方法

1.1 研究区域概况

云南地处中国西南边陲，位于东经 $97^{\circ}31' \sim 106^{\circ}11'$ ，北纬 $21^{\circ}8' \sim 29^{\circ}15'$ ，国土总面积 39.41万km^2 。云南省属于山地高原地形，北部是青藏高原南延部分，海拔 $3000 \sim 4000\text{m}$ ，中部、东部海拔大都在 $1500 \sim 2000\text{m}$ ，南部和西南边境海拔在 $800 \sim 1000\text{m}$ ，个别地区 500m 以下，地势呈西北高、东南低，自北向南呈阶梯状逐级下降。云南气候基本属于亚热带高原季风型，立体气候特点显著，类型众多、年温差小、日温差大、干湿季节分明、气温随地势高低垂直变化异常明显。滇西北属寒带型气候，长冬无夏，春秋较短；滇东和滇中属温带型气候，四季如春，遇雨成冬；滇南、滇西南属低热河谷区，有一部分在北回归线以南，进入热带范围，长夏无冬，一雨成秋。全省平均气温，最热（7月）月均温在 $19 \sim 22^{\circ}\text{C}$ 之间，最冷（1月）月均温在 $6 \sim 8^{\circ}\text{C}$ 以上，年温差一般只有 $10 \sim 12^{\circ}\text{C}$ 。全省降水在季节上和地域上的分配极不均匀。干湿季节分明，湿季为5~10月，集中了85%的降雨量；干季为11月至次年4月，降水量只占全年的15%。

1.2 数据来源

该文采用由中国气象局国家气象中心提供1960—2015年云南省32个站点的逐日最高气温、最低气

温、平均气温、降水量及海拔高度资料, 对数据进行质量控制处理, 消除数据记录缺失的影响, 最后选取31个站点的数据(图1)。

1.3 研究方法

该文采用国际气候诊断与指数小组(ETCDD-MI)提供的极端降水和气温事件的相关指标, 这些指标已经被应用到很多国家和地区的研究^[17-22]。采用ClimDex软件^[23]计算云南省27个极端气候指数(<http://cccmr.seos.uvic.ca/ETCCDMI/>), 从中选取13个主要和温度降水有关的极端气候指标分析云南省的极端气候变化趋势(表1)。采用ArcGIS技术(Kriging插值法)对极端气候指数的时空分布特征进行分析, 运用SPSS进行相关性比较。

2 结果与分析

2.1 极端气温指数的时空变化

2.1.1 极端气温指数的年际变化

1960—2015年云南省的极端气温指数的年际变化趋势各不相同(图2), 显著性检验计量值的变化范围为-6.38~6.46(表2)。霜冻日数呈下降的趋势, 变化率为-0.06d/10年(图2a); 夏季日数呈上升



图1 云南省气象站点分布

表1 极端气候指数名称及其释义

	符号	气候指标	定义
与气温相关的极端气候指数(ET)	FD (d)	霜冻日数 Frost days	每年日最低气温 $TN_{ij} < 0^{\circ}\text{C}$ 的天数(其中 i 代表天, j 代表年, 以下相同)
	SU (d)	夏季日数	每年日最高气温 $TX_{ij} > 25^{\circ}\text{C}$ 的天数
	TXx (°C)	月极端最高气温	每月日最高气温的最大值
	TNn (°C)	月极端最低气温	每月日最低气温的最小值
	TX10p (%)	冷昼日数	日最高气温 $TX_{ij} <$ 历史同期第10%分位值的日数的百分比
	TN90p (%)	暖夜日数	日最低气温 $TN_{ij} >$ 历史同期第90%分位值的日数的百分比
	CSDI (d)	寒潮持续指数	每年至少连续6d日最低气温 $TN_{ij} <$ 历史同期第10%分位值的日数
与降水相关的极端气候指数(EP)	Rx1day (mm)	日最大降水量	每月最大1日降水量($\max(RR_{ij})$, RR_{ij} 为 j 时段内第 i 天的日降雨量, 以下相同)
	R20mm (d)	大雨日数	日降水量 $RR_{ij} \geq 20\text{mm}$ 的日数
	CDD (d)	连续干旱日数	日降水量 $RR_{ij} < 1\text{mm}$ 的最大连续日数
	CWD (d)	连续湿日数	日降水量 $RR_{ij} \geq 1\text{mm}$ 的最大连续日数
	R99pTOT (mm)	极强降水量	日降水量大于基准期内(1961—1990年)第99%分位值的总降水量
	PRCPTOT (mm)	年总降水量	每年全部雨(雪)日降水量(RR_{ij})之和

表2 云南省极端气温指数的M-K检验统计量值

极端气温指数	检验统计量Z	变化速率	变化趋势
霜冻日数(FD)	-6.38	-0.06d/10年	↓
夏季日数(SU)	4.07	1.67d/10年	↑
月极端最高气温(TXx)	4.91	0.22°C/10年	↑
月极端最低气温(TNn)	6.46	0.24°C/10年	↑
暖夜日数(TN90p)	6.23	2.26%/10年	↑
冷昼日数(TX10p)	-3.66	-0.32%/10年	↓
寒潮持续指数(CSDI)	-4.36	-0.27d/10年	↓

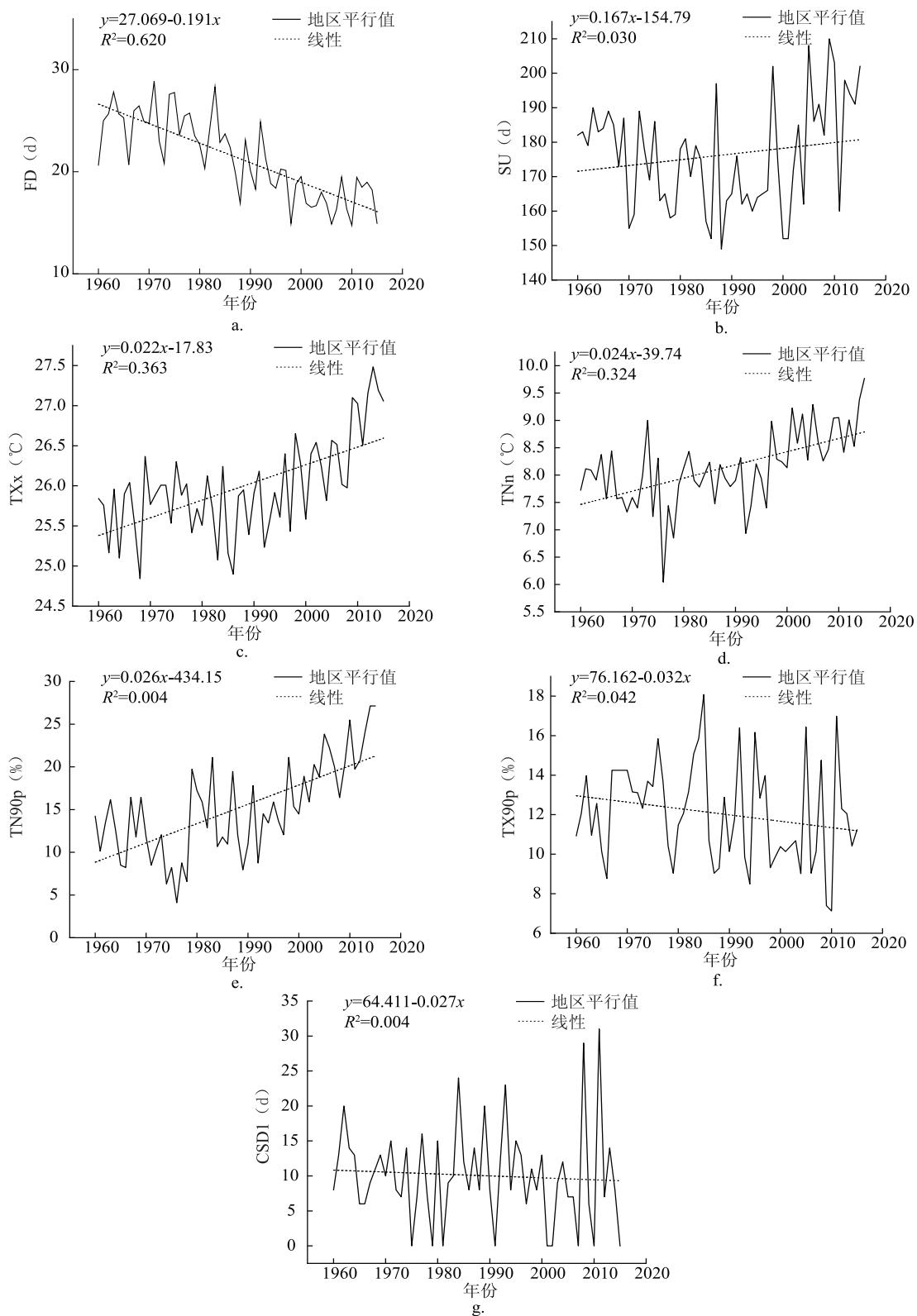


图 2 1960—2015 年云南省极端气温指数的变化趋势

注: FD: 霜冻日数; SU: 夏季日数; TX_x: 月极端最高气温; TN_n: 月极端最低气温; TX10p: 冷夜日数; TN90p: 暖夜日数; CSDI: 寒潮持续指数

的趋势,变化率是 $1.67\text{d}/10\text{年}$ (图2b);月极端最高气温呈上升的趋势,变化率为 $0.22^\circ\text{C}/10\text{年}$ (图2c);月极端最低气温也呈上升的趋势,变化率为 $0.24^\circ\text{C}/10\text{年}$ (图2d);暖夜日数呈上升的趋势,变化趋势为 $2.26\text{d}/10\text{年}$ (图2e);冷昼日数呈减少的趋势,变化率为 $-0.32\%/10\text{年}$ (图2f);寒潮持续指数呈减少的趋势,变化率为 $-0.27\text{d}/10\text{年}$ (图2g)。霜冻日数、冷昼日数和寒潮持续指数的减少,夏季日数、月极端最高气温、月极端最低气温的上升,预示着云南省有变暖的趋势,气温升高,将对农业生产产生重要的影响。暖夜日数、霜冻日数、夏季日数、月极端最高气温、月极端最低气温、冷昼日数和寒潮持续指数的变化趋势均通过了0.01的置信区间,极端气温指数的趋势发生极显著的变化。

2.1.2 极端气温指数的空间变化

云南省的极端气温指数空间变化明显(图3)。霜冻日数的范围在 $0\sim174\text{d}$;霜冻日数高值中心位于滇西北的迪庆州,从北到南呈减少的趋势,云南省气候温暖,大部分区域的霜冻日数在 $0\sim40\text{d}$,处于极低的水平(图3a)。夏季日数的高值中心主要分布在西双版纳州、普洱市的西南、临沧市的南部和德宏州的瑞丽市等;低值中心主要分布在滇西北的迪庆州、丽江市、大理州的北部地区和怒江州;夏季日数的范围在 $0\sim315\text{d}$,由西南向东北呈递减(图3b)。暖夜日数的范围在 $12.45\%\sim17.61\%$,高值中心位于文山州的东部;低值中心主要分布于迪庆州、丽江市、大理州东北区域和楚雄州的北部等,由南到北呈递减(图3c)。冷昼日数的范围在 $8.5\%\sim17.95\%$,高值中心同样位于文山州的东部;除文山州、红河州、曲靖市以及昭通市外的大部分区域的冷日指数都处于较低的水平,其分布由东向西递减(图3d)。寒潮持续指数的范围在 $6.63\sim9.39\text{d}$,其高值中心分布于昭通市的西南、曲靖市的北部、文山州、红河州的东南部和西双版纳州的南部;低值中心位于丽江市的西南、大理州、保山市和玉溪市的东北、昆明市的南部;其分布呈四周高,中间低(图3e)。月极端最高气温的分布范围在 $17.02\sim34.93^\circ\text{C}$,其高值中心位于西双版纳州、玉溪市的南部、普洱市的西南和红河州的西南等,高值中心主要分布滇南地区,滇中有少量分布;低值中心主要分布于迪庆州和丽江市的北部(图3f)。月极端最低气温的分布范围在 $-5.67\sim15.22^\circ\text{C}$,高值中心主要分布于西双版纳州、红河州的西南、普洱市的大部、临沧市的西南和德宏州的西南等;低值中心位于迪庆州的北部和丽江市北部;月极端最低气温指数由南到北呈递减。云南大多区域气候温暖,极端冷指数主要分布在滇西北,极端暖指数主要分布于滇西南,极端气温指数高值大多集中于东部和南部。综合而言,极端温度指数的区域格局与云南省的地形地势具有密切关系,高海拔地区与低温相关的极端气温指数相对较高,当地农业生产应采取积极的应对措施。

2.2 极端降水指数的时空变化

2.2.1 极端降水指数的年际变化

1960—2015年云南省的6个极端降水指数的年际变化趋势不尽相同(图4)。日最大降水量呈上升的趋势,变化率为 $0.08\text{mm}/10\text{年}$ (图4a)。大雨日数量呈下降的趋势,变化率为 $-0.28\text{mm}/10\text{年}$ (图4b)。连续干旱日数呈上升趋势,变化率为 $1.78\text{d}/10\text{年}$ (图4c)。连续湿日数呈下降的趋势,变化率为 $-0.17\text{d}/10\text{年}$ (图4d)。极强降水量呈上升的趋势,变化率为 $2.7\text{mm}/10\text{年}$ (图4e)。年总降水量呈下降的趋势,变化率为 $-22.40\text{mm}/10\text{年}$ (图4f)。云南省降水量在减少,极端降水频率在不断增加,尤其是连续干旱日数的增加,连续湿日数的减少,导致干旱的风险在增加,农业生产将会遇到更多的灾害,应及时做好防减措施。连续湿日数通过了0.01置信区间,连续干旱日数通过了0.05置信区间,极强降水量和年降水总量通过了0.1置信区间,大雨日数和日最大降水量未通过显著性检验(表3)。

2.2.2 极端降水指数的空间变化

云南省6个极端降水指数的空间分布差异较大(图5)。大部分区域连续湿日数的范围在 $6.84\sim13.27\text{d}$,高值中心位于普洱市的南部、临沧市的西南、德宏州、保山市的西部,由西南向东北呈现递减(图5a)。连续干旱日数的范围在 $35\sim53\text{d}$,高值分布在昭通市的西南、曲靖市和昆明市的北部、楚雄州的东北等;低值中心主要位于红河州的东南、文山州大部等(图5b)。日最大降水量范围在 $14.19\sim25.91\text{mm}$,高值中心主要位于红河州和普洱市的南部、西双版纳州的中南部等;低值中心主要位于昭通

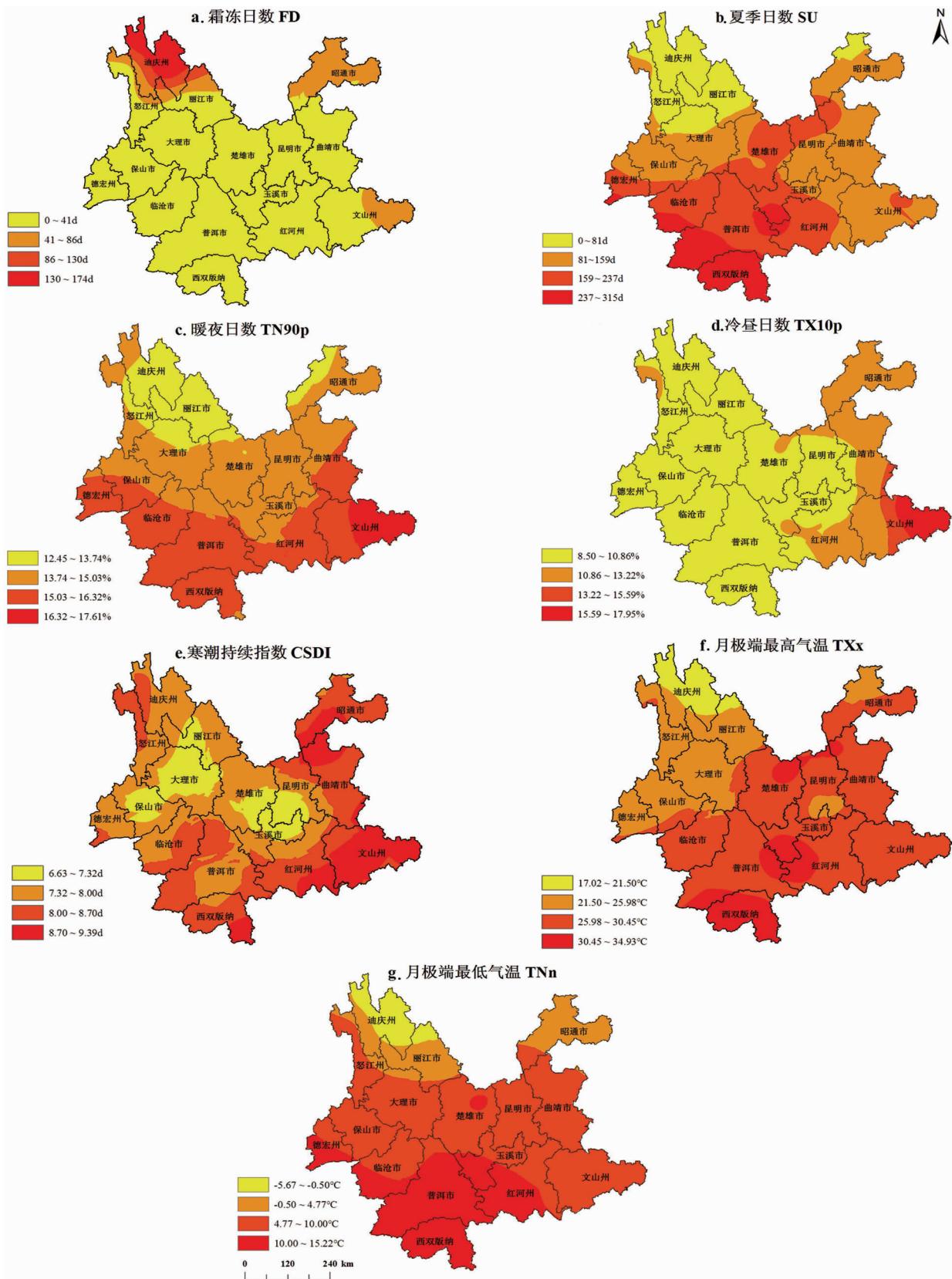


图 3 云南省 7 个极端气温指数的空间分布

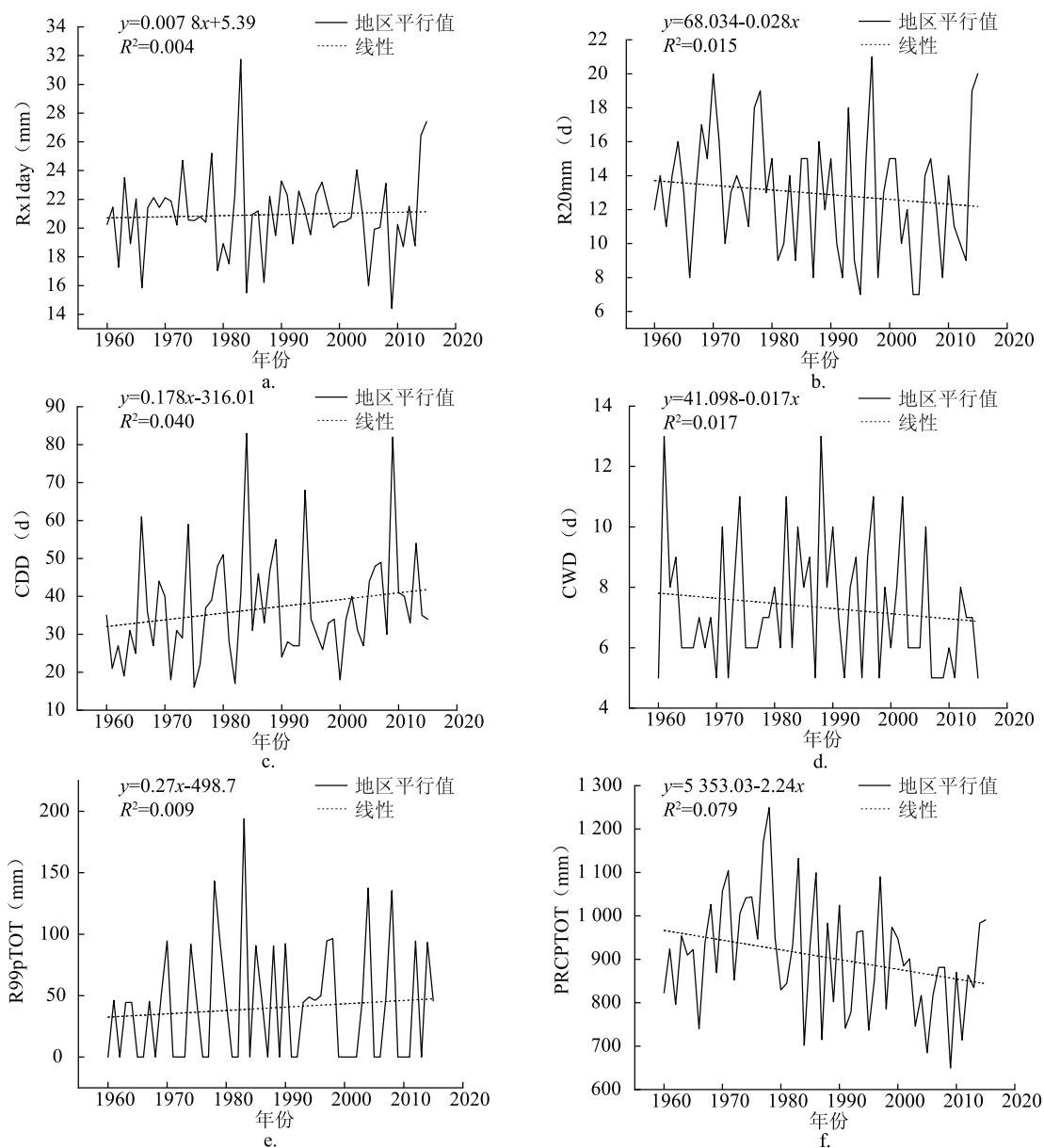


图4 1960—2015年云南省极端降水指数的变化趋势

注: Rx1day: 日最大降水量; R20mm: 大雨日数; CDD: 连续干旱日数; CWD: 连续湿日数; R99pTOT: 极强降水量; PRCPTOT: 年总降水量

表3 云南省极端降水指数的M-K检验统计量值

极端气温指数	检验统计量 Z	变化速率	变化趋势
日最大降水量 (Rx1day)	1.21	0.08mm/10年	↑
大雨日数 (R20mm)	-0.41	-0.28d/10年	↓
连续干旱日数 (CDD)	1.88	1.78d/10年	↑
连续湿日数 (CWD)	-3.18	-0.17d/10年	↓
极强降水量 (R99pTOT)	1.48	2.7mm/10年	↑
年总降水量 PRCPTOT	-1.50	-22.4mm/10年	↓

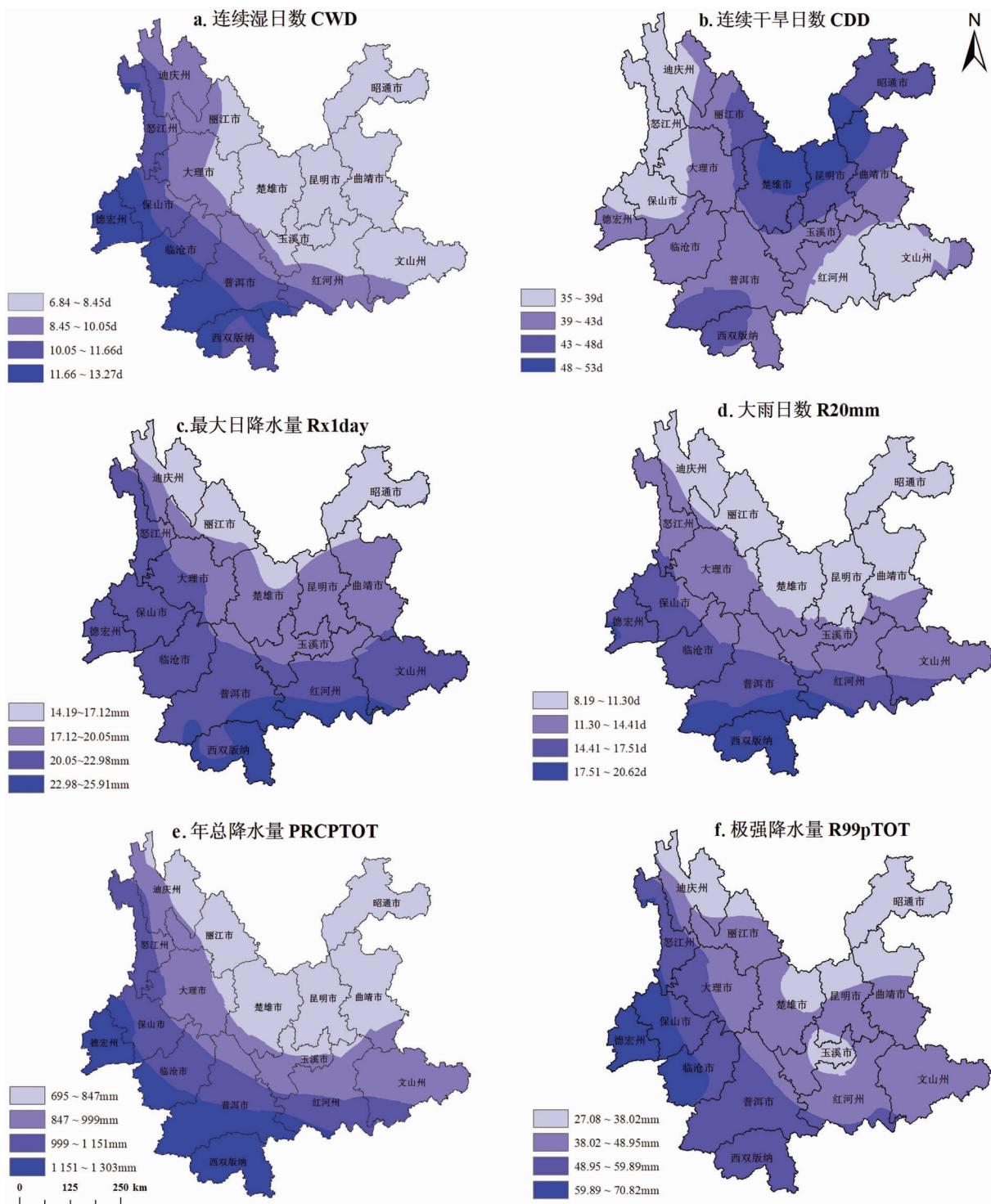


图 5 云南省 6 个极端降水指数的空间分布

市、楚雄市的东北、丽江市的中东部和迪庆州的北部；由南到北呈递减的趋势（图 5c）。大雨日数范围在 8.19 ~ 20.62d，高值中心位于西双版纳州和普洱市的南部等；低值中心位于昭通市、曲靖市大部、昆明市、楚雄州、丽江市和迪庆州，由南向北呈递减（图 5d）。极强降水量范围在 27.08 ~ 70.82mm，高值中心位于德宏州、保山市的西部、临沧市的中南部等；低值中心位于昭通市的全部、昆明市、曲靖市、迪庆

州和丽江市的北部、楚雄州的东北等;由西南到东北呈递减(图5e)。年降水总量范围在695~1 303 mm,高值中心位于西双版纳州、普洱市和临沧市的南部、德宏州、保山市的西部;低值中心位于昭通市、曲靖市的大部、昆明市、楚雄州、丽江市的大部、迪庆州的北部等;由西南向东北呈现递减(图5f)。云南省的降水呈南多北少,西多东少,极端降水指数高值大多集中于西部以及南部区域,洪涝和干旱的风险也相应较高,这些区域要积极做好防范。

2.3 极端气候指数趋势幅度与海拔高度之间的关系

鉴于云南省的极端气候变化的复杂多样性,各区域之间的差异较大,探究海拔与各极端气候指数之间的关系,有很重要的意义。云南省各个极端气候指数的趋势差异较大(表2),因此采用变化速率的绝对值,研究其与海拔之间的关系。

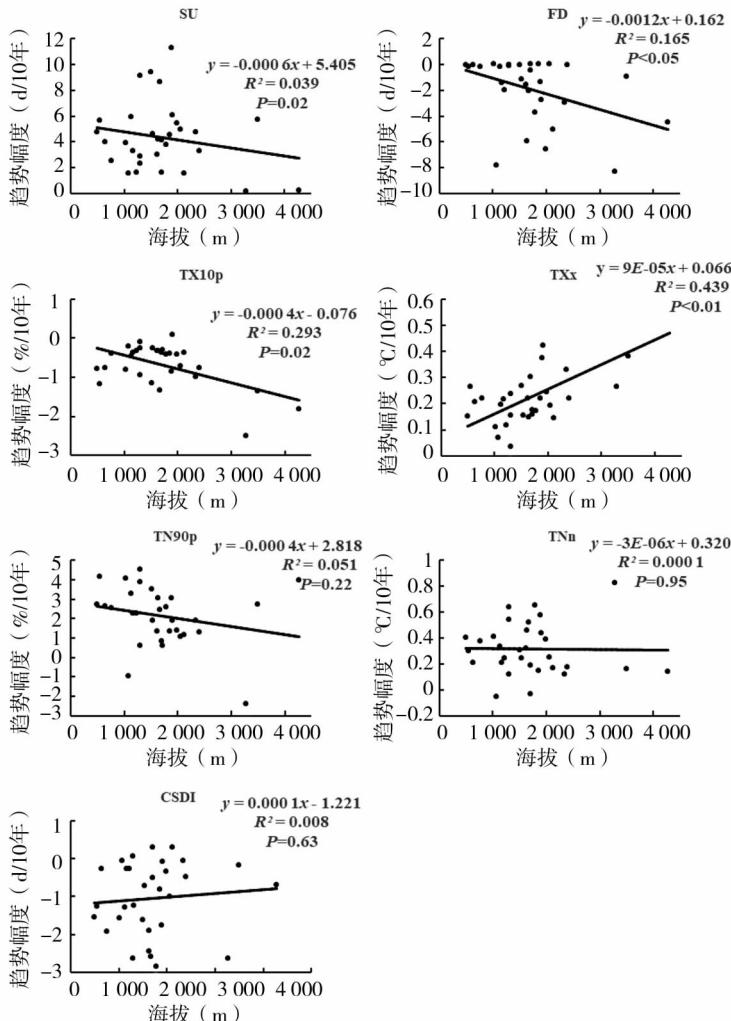


图6 7个极端气温指数趋势与海拔之间的关系,P为统计显著性计量值

注: FD: 霜冻日数; SU: 夏季日数; TXx: 月极端最高气温; TNn: 月极端最低气温; TX10p: 冷昼日数; TN90p: 暖夜日数; CSDI: 寒潮持续指数

2.3.1 极端气温指数趋势幅度与海拔高度之间的关系

霜冻日数和冷昼日数趋势幅度与海拔高度呈显著的负相关关系(图6),夏季日数、暖夜日数、冷昼夜数和月极端最低气温的线性趋势随海拔的升高而减小,尤其是冷昼夜数最明显;月极端最高气温趋势幅度与海拔高度呈极显著的正相关关系,寒潮持续指数的线性趋势随海拔的升高而增加。极端低温相关的指

数随海拔的变化趋势比极端高温相关的指数随海拔的变化趋势更明显，不包括月极端最低气温、月极端最高气温和寒潮持续指数。

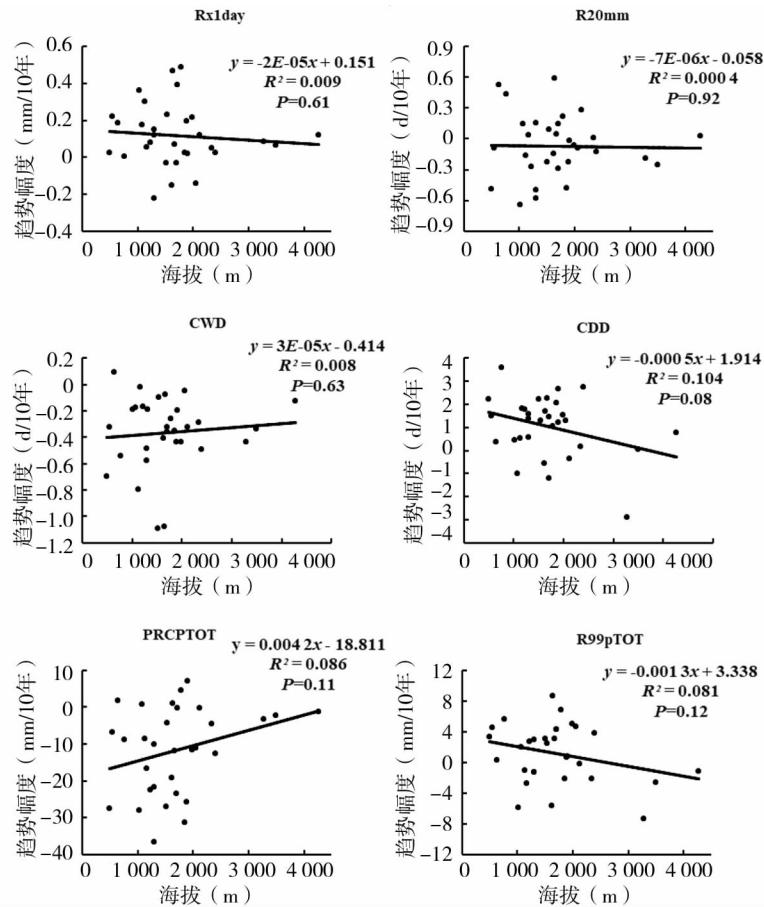


图 7 6 个极端降水指数趋势与海拔之间的关系，P 为统计显著性计量值

注：Rx1day：日最大降水量；R20mm：大雨日数；CDD：连续干旱日数；CWD：连续湿日数；R99pTOT：极强降水量；PRCPTOT：年总降水量

霜冻日数、夏季日数、暖夜日数和冷昼日数的线性趋势的最大负平距趋势出现在海拔 3 000 ~ 3 500m，随海拔的升高而减少，在海拔较高的地方趋势最大。月极端最低气温的变化趋势的最大负平距趋势出现在海拔 1 000 ~ 1 500m，在海拔较低的区域趋势最大。月极端最高气温变化趋势的最大正平距趋势出现在海拔 4 000 ~ 4 500m，在海拔较高的地方趋势最大。寒潮持续指数变化趋势的最大正平距趋势出现在海拔 2 000 ~ 2 500m，在海拔较低的区域趋势最大。这说明高海拔区域温度上升的更加明显，在农业生产上应该更加注意防范。

2.3.2 极端降水指数趋势幅度与海拔高度之间的关系

6 个极端降水指数趋势幅度与海拔的相关性均未达到显著水平（图 7）。大雨日数、日最大降水量、连续干旱日数和强极降水量的变化趋势随海拔的升高而减小，尤其是连续干旱日数和强降水量更明显。连续湿日数和年降水总量的变化趋势随海拔的升高而增加，年降水总量增加得更加明显。

大雨日数、日最大降水量和年降水总量变化趋势的最大负平距趋势出现在海拔 1 000 ~ 1 500m 的区域；连续干旱日数和极强降水量变化趋势的最大负平距趋势出现在海拔 3 000 ~ 3 500m 的区域，在海拔较高的地方趋势最大。连续湿日数变化趋势的最大正平距趋势出现在海拔 500 ~ 1 000m 的区域，年降水总量变化趋势的最大负平距趋势出现在海拔 1 500 ~ 2 000m。这些特征表明高海拔区域降水量在减少，对高海

拔区域农业生产产生新的挑战。

3 结论与讨论

3.1 讨论

20世纪50年代初以来全球地表平均气温升高幅度为 $0.12^{\circ}\text{C}/10\text{年}$, 我国在过去几十年变暖趋势为 $0.25^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ ^[3], 云南省的极端暖气温指数(SU、TN90p)呈现了上升的趋势, 极端冷气温指数(FD、TX10p、CSDI)呈现了下降的趋势, 这其中不包括TNn和TXx, 两者均呈现上升的趋势, 这与西南地区的四川省和贵州省的变化趋势类似^[24,27], 说明了云南省近50年也有变暖的趋势。云南省的月极端最低气温的线性趋势是 $0.24^{\circ}\text{C}/10\text{年}$, 低于西南5省近50年的 $0.309^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ ^[11], 月极端最高气温的线性趋势是 $0.22^{\circ}\text{C}/10\text{年}$, 远远高于西南5省近50年的均值 $0.035^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ ^[11], 与云南省整体的海拔较高有一定的关系。云南省得月极端气温与月极端最高气温均呈上升的趋势, 且低温的升温速率要高于高温的升温速率, 这与张万诚等^[25]在1961—2012年云南省极端气温时空演变规律研究中得出的结论一致。部分极端暖气温指数(SU、TN90p)的变化趋势大小要高于极端冷气温指数(FD、TX10p), 与西南地区结论相反^[12], 这可能与云南省复杂的地形以及选取站点之间差异有关。云南省的极端降水在1960—2015年总体上呈现了上升的趋势。Wang等^[26]分析了1961—2001年中国年度和季节平均总降水量和极端降水事件的变化情况, 指出年极端降水在西南、西北和东部地区有增加的趋势, 云南省的极端降水主要位于滇南地区, 尤其是西双版纳和普洱市的南部。1960—2015年云南的连续干旱日数呈上升趋势, 连续湿日数呈下降的趋势, 说明云南的干旱有增加的趋势, 不利于农业生产, 这与程建刚等^[28]近50年云南区域气候变化特征分析中的结论较一致。云南省的极端高温呈现南高北低, 由南到北递减, 极端低温则相反; 极端强降水呈南多北少, 极端高温的分布状况与极端降水较为接近, 主要集中在滇南地区, 这与罗燕等^[29]云南近50年极端气温及降水事件变化特征与区域气候变暖的关系中有类似的结论。有 $5/7$ 的气温指数的线性趋势随海拔的升高而降低, $2/3$ 的降水指数的线性趋势随海拔的升高而减小, 随着海拔的升高、气温降低, 极端气候的变化趋势有所降低, 这与LI等^[12]1961—2008年中国西南地区极端气候变化幅度的海拔效应中的相关结论较一致。连续干旱日数在增加, 连续湿日数在减少, 夏季日数在增加, 霜冻日数在减少, 揭示了云南省有变干变暖的趋势。气候变暖后, 云南主要作物品种的布局也将发生变化。一方面某些地区目前推广的农作物品种可能不适合变化后的气候条件, 需要适时培育新品种。另一方面农业种植制度的改变也对传统的农业措施提出了挑战, 许多不适应新形势的耕作制度将会带来农业成本的提高和农业风险的增大。气候变暖使高海拔、高纬度地区热量资源改善, 促进了作物种植结构调整, 当前的种植制度发生改变。这为云南多熟种植制度的增加和冬季农业开发带来了机遇。旱涝的加剧可能引发灾害和土地退化, 对粮食产量和安全造成威胁^[15]。

3.2 结论

(1) 7个极端气温指数中, 霜冻日数(FD)、冷昼日数(TX10p)和寒潮持续指数(CSDI)呈下降趋势, 夏季日数(SU)、月极端最高气温(TXx)、月极端最低气温(TNn)和暖夜日数(TN90p)均呈上升趋势。霜冻日数(FD)的高值中心主要位于滇西北地区的迪庆州, 其余大部分地区都在处在较低的范围。夏季日数(SU)的高值中心主要位于西双版纳州、普洱市和临沧市, 低值中心位于迪庆州、丽江市、大理州和怒江州, 由南向北递减。月极端最高气温(TXx)和月极端最低气温(TNn)的低值中心均位于迪庆州, 高值中心位于滇西南地区, 由南向北递减。暖夜日数(TN90p)、冷昼日数(TX10p)和寒潮持续指数(CSDI)的分布则大致呈东高西低。总体上云南的极端气温事件有增多趋势、气温有变暖的趋势; 在东部和南部地区极端气温天气风险更大。

(2) 日最大降水量(Rx1day)、连续干旱日数(CDD)和极强降水量(R95pTOT)呈上升趋势, 大雨日数(R20mm)、连续湿日数(CWD)和年降水总量(PRCPTOT)呈下降趋势, 但日最大降水量(Rx1day)和大雨日数(R20mm)的变化趋势并不明显。云南省的降水总量在减少, 极端降水总体的频率

在增加。日最大降水量 (Rx1day) 和大雨日数 (R20mm) 由南向北呈递减, 连续湿日数 (CWD) 和年降水总量 (PRCPTOT) 由西南向东北呈递减, 连续干旱日数 (CDD) 高值中心主要位于滇东和滇中, 滇西和滇东南低, 强降水量主要集中在德宏州和保山市。云南省的降水呈南多北少, 西多东少, 极端强降水量呈由西南向东北递减。云南省的降水总量在减少, 极端降水总体的频率在增加; 连续干旱日数在减少, 而连续湿日数在增加, 揭示了云南在变干; 中部和东部地区干旱的风险更大, 南部区域洪涝风险更大。

(3) 7 个极端气温指数中, 霜冻日数 (FD) 和冷昼日数 (TX10p) 趋势幅度与海拔高度呈显著的负相关关系, 月极端最高气温 (Tx) 趋势幅度与海拔高度呈极显著的正相关关系。6 个极端降水指数趋势幅度与海拔的相关性均未达到显著水平。随着海拔升高, 冷极端气温指数的趋势幅度减小, 月极端最高气温的趋势幅度增大, 降水指数的趋势幅度变化不明显。

参考文献

- [1] 李虎, 邱建军, 王立刚, 等. 适应气候变化: 中国农业面临的新挑战. 中国农业资源与区划, 2012, 33 (6): 23–28.
- [2] 秦大河, Stocker T. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论. 气候变化研究进展, 2014, 10 (1): 1–6.
- [3] 任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 中国气温变化研究最新进展. 气候与环境研究, 2005, 10 (4): 701–716.
- [4] 段旭, 陶云. 云南近 50 年来的气候变化. 热带气象学报, 2012, 28 (2): 243–250.
- [5] 林而达, 许吟隆, 蒋金荷, 等. 气候变化国家评估报告 (II): 气候变化的影响与适应. 气候变化研究进展, 2006, 2 (2): 51–56.
- [6] 秦大河, 张建云, 宋连春, 等. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理与适应国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2015.
- [7] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. IPCC, 2013: Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [8] 张德二. 全球变暖和极端气候事件之我见. 自然杂志, 2010, 32 (4): 213–216.
- [9] Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. Journal of Climate, 2005, 18: 1096–1108.
- [10] 陈峪, 陈鲜艳, 任国玉. 中国主要河流流域极端强降水变化特征. 气候变化研究进展, 2010, 6 (4): 265–269.
- [11] 刘琳, 徐宗学. 西南 5 省市极端气候指数时空分布规律研究. 长江流域资源与环境, 2013, 23 (2): 295–301.
- [12] Li Z X, He Y Q, Wilfred H. Theakstone, et al. Altitude dependency of trends of daily climate extremes in southwestern China, 1961–2008. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22 (3): 416–430.
- [13] 王晓, 李佳秀, 石红彦, 等. 1960—2011 年云南省极端气温事件的时空分布及趋势预测. 资源科学, 2014, 36 (9): 1816–1824.
- [14] 夏范燕, 吴巩胜, 李丽, 等. 近 50 年内滇西北极端气候变化. 云南师范大学学报 (自然科学版), 2014, 34 (3): 64–69.
- [15] 程建刚, 王学锋, 龙红, 等. 气候变化对云南主要行业的影响. 云南师范大学学报 (哲学社会科学版), 2010, 42 (3): 1–20.
- [16] 龙红, 朱勇, 王学锋, 等. 云南农业应对气候变化的适应性对策分析. 云南农业科技 (哲学社会科学版), 2010 (4): 6–9.
- [17] unkasevic M, Tosic I, Vujovic D. Variability and probability of annual and extreme precipitation over Serbia and Montenegro. Theoretical and Applied Climatology, 2004, 79: 1–2.
- [18] Rahimzadeh F, Asgari A, Fattahi E. Variability of extreme temperature and precipitation in Iran during recent decades. International Journal of Climatology, 2009, 29 (3): 329–343.
- [19] Malinovic – Milicevic S, Radovanovic M M, Stanojevic G, et al. Recent changes in Serbian climate extreme indices from 1961 to 2010. Theoretical & Applied Climatology, 2016, 124 (3): 1–10.
- [20] Karl T R, Nicholls N, Uhazi A. CLIVAR/UCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes; workshop summary. Climatic Change, 2003, 42: 3–7.
- [21] Guo E L, Zhang J Q, Wang Y F, et al. Spatiotemporal variations of extreme climate events in Northeast China during 1960–2014. Ecological Indicators, 2019, 96: 669–683.
- [22] Peterson T C. Climate Change Indices. WMO Bulletin, 2005, 54 (2): 83–86.
- [23] Zhang X, Yang F. RClimDex (1.0) user manual. Canada: Climate Research Branch Environment Canada Downsview, 2004: 16–23.
- [24] 黄维, 杨春友, 张和喜, 等. 贵州省极端气候时空演变分析. 人民长江, 2017, 48 (S1): 109–114, 159.
- [25] 张万诚, 郑建萌, 马涛, 等. 1961—2012 年云南省极端气温时空演变规律研究. 资源科学, 2015 (4): 710–722.
- [26] Wang Y, Zhou L. Observed trends in extreme precipitation events in China during 1961–2001 and the associated changes in large-scale circulation. Geophysical Research Letters, 2005, 32 (17).
- [27] 孙晨, 程志刚, 毛晓亮, 等. 近 44 年四川地区极端气候变化趋势及特征分析. 兰州大学学报, 2017, 53 (1): 120–126.
- [28] 程建刚, 解明恩. 近 50 年云南区域气候变化特征分析. 地理科学进展, 2008, 27 (5): 19–26.

[29] 罗燕, 田永丽, 戴敏, 等. 云南近50年极端气温及降水事件变化特征与区域气候变暖的关系. 云南大学学报, 2015, 37 (6): 870-877.

STUDY ON THE CHANGE CHARACTERISTICS OF EXTREME CLIMATE INDICES FROM 1960 TO 2015 IN YUNNAN PROVINCE, CHINA *

Xu Yongbing^{1,2}, Lei Qiuliang^{1,2*}, Zhou Jiaogen³, Zhang Yitao⁴, Wu Shuxia^{1,2}, Zhai Limei^{1,2}, Wang Hongyuan^{1,2}, Li Ying¹, Liu Hongbin^{1,2}

- (1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;
2. Key Laboratory of Non-point Pollution Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China;
3. School of Urban and Environmental Science, Huaiyin Normal University, Huai'an 223399, Jiangsu, China;
4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract Daily data for average temperatures, maximum and minimum temperatures and precipitation, observed at 31 meteorological stations in the Yunnan province from 1960 to 2015, were used to study the changes in extreme climate index. The study employed regression analysis and Kriging methods, and adopted the indices of extreme climate defined by the CCI/CLIVAR/JCOMM expert team on climate change detection and indices. Results showed that the number of sunny days, the cold day index and the cold wave duration index all showed a downward trend from 1960 to 2015, while the number of frost days, warmest days, coldest days and warm nights all showed an upward trend. Spatial variation analysis found that the numbers of sunny days, warmest days and coldest days showed a decreasing trend from the southern to the northern areas of the province, while the warm night index, cold day index and cold wave duration index were higher in the east and lower in the north. Among the seven extreme temperature indices, the number of frost days and the cold day index were found to be significantly and negatively correlated with altitude, but the warmest day index was significantly and positively correlated with altitude. Among the six precipitation indices, the daily maximum precipitation, the number of consecutive dry days and the amount of heavy precipitation showed an upward trend, while the heavy precipitation days, the maximum consecutive wet days and the annual amount of precipitation showed a downward trend. As for spatial distribution, the daily maximum precipitation and the heavy precipitation index showed decreasing trends from the southern to the northern parts of the province, while the number of consecutive wet days and annual precipitation showed a decreasing trend from southwest to northeast. The areas with the highest values for the maximum number of continuous dry days were mainly located in the central and eastern parts of the province and strong precipitation was mainly concentrated in Dehong and Baoshan, in the western part of the province. The distribution of extremely heavy precipitation in the Yunnan province decreased from southwest to northeast. The six extreme precipitation indices showed no significant correlation with altitude. These change characteristics for the extreme climate indices from 1960 to 2015 showed that the Yunnan province tended to be warmer and dryer over time, suggesting that the agricultural production industry should consider adaptive countermeasures.

Keywords extreme temperature; extreme precipitation; variation trend; spatial variation; elevation