

高文华,李开封,崔豫.1960~2014年河南极端气温事件时空演变分析[J].地理科学,2017,37(8):1259-1269.[Gao Wenhua, Li Kaifeng, Cui Yu. Temporal and Spatial Variation of Extreme Temperature Events in Henan Province During 1960-2014. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(8): 1259-1269.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2017.08.017

1960~2014年河南极端气温事件时空演变分析

高文华¹,李开封^{1,2},崔豫¹

(1.河南大学环境与规划学院,河南 开封 475004;2.中国地质科学院年轻沉积物年代学与水文环境变化重点实验室,河北 石家庄 050061)

摘要:基于河南1960~2014年18个气象台站逐日最高温、最低温、平均气温实测数据,采用线性趋势、相关分析等方法,根据选取的16个极端气温指数,分析了河南省极端气温变化趋势和空间差异,探讨了极端气温指数的影响因素以及与该区气候变化的关系。结果表明:① 河南近55 a来日最高气温的极小值、最低气温的极大/小值、暖昼/夜日数、夏季日数、热夜日数、暖持续日数、生物生长季呈现增大/加趋势;日最高气温的极大值、冷昼/夜日数、冰/霜冻日数、冷持续日数和气温日较差呈现减小/少趋势。② 极端最低气温的变暖主要发生在黄淮海平原区、豫西南南阳盆地以及豫南桐柏山-大别山山地丘陵区;而极端最高气温的变暖则主要发生在豫西山丘陵区。③ 与中国其他地区相比,河南极端气温近55 a的变化速率较慢,低温出现的日数显著减少;但近20 a来大部分极端气温指数的变化速率均提高了2倍多,表明该区极端气温进入了加速变化阶段。④ 相关分析表明河南极端气温指数变化可以指示该区气候变化,且地形条件是该区极端气温空间变化的控制因素。

关键词:气候变化;极端气温;时空变化;河南

中图分类号:P467 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0690(2017)08-1259-11

全球变暖背景下,温度升高直接影响着气候极端事件的发生,并造成高温干旱和暴雨洪涝等自然灾害频率增多、强度加剧^[1]。这种具有突发性、破坏性和难以预测性的极端气候事件频繁发生将严重影响区域的农业生产、经济生活、人身安全及生态环境等,甚至对区域可持续发展将造成巨大影响^[2]。IPCC第五次评估报告指出:1880~2012年,全球海陆表面平均温度呈线性上升趋势,升高了0.85℃,而2003~2012年平均温度则比1850~1990年升高了0.78℃;同时研究发现:大部分陆地上的冷昼和冷夜呈偏暖或偏少,而暖昼和暖夜呈偏暖或更加频繁的趋势^[3-5]。因此,极端气候事件,尤其是极端气温事件越来越引起公众和研究人员的关注。

国内外相关领域学者已从不同角度探讨了极端气温事件的时空变化特征。北美学者研究

指出极端低温事件发生的频率和霜冻日数呈减少趋势^[1,6-8]。对东南亚和南太平洋地区的暖日和暖夜以及冷日和冷夜分析发现,1961年以来该区暖日、暖夜显著增多,冷日、冷夜则减少^[9,10]。特别是在20世纪后期逐年的极端最高温与极端最低温的差距在显著减小^[11,12]。中国气候变化国家评估报告也指出:近50 a,中国年均地表温度以0.22℃/10a的速度升高了1.1℃^[13]。通过对中国整个区域极端气温时空变化分析显示:极端气温事件在中国存在区域差异^[14];北方干旱半干旱地区最低温度发生的频率显著减少,最近10 a最高气温呈现显著增加趋势^[15];对于华东地区而言,在中南和西南部高温日数较多,而在其东部沿海和北部则较少^[16]。

河南省是中国重要的农业生产基地。极端气温事件的频繁发生必然对该区的农业生产和社会经济发展造成重大影响。已有学者研究了河南省

收稿日期:2016-09-19;**修订日期:**2016-12-07

基金项目:国家自然科学基金项目(41501214)、中国地质科学院水文地质环境地质研究所联合开放基金项目(KF201509)、河南大学引进博士科研启动基金项目(B2014242,B2015075)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (41501214); Open Foundation of the Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences (KF201509); Scientific Research Foundation for the Introduction of Doctor in Henan University (B2014242, B2015075).]

作者简介:高文华(1985-),女,山西阳泉人,博士,研究方向:全球气候变化、沉积动力学中的示踪方法。E-mail:gaowenhua@henu.edu.cn

气温变化特征,发现存在季节差异,对于不同区域而言,也呈现不同变化趋势^[17]。对于极端气温事件而言,因研究站点较少,区域较小^[18-22],且研究指标较少^[23,24]等因素导致对河南省整体的极端气温事件变化特征认识尚不透彻。因此,本研究基于河南1960~2014年逐日最高温、最低温和平均气温实测资料,采用世界气象组织推荐的16个极端气温指标,结合线性趋势分析、相关分析等方法,研究该区极端气温事件的时空演变特征,同时探讨了极端气温指数的影响因素以及与该区气候变化的关系,以期对河南农业生产、灾害预警和气候变化研究等提供理论依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源

为保证数据的完整性和连续性,本文依据连续性和最长时间原则,选取了河南省18个气象站点(图1)1960~2014年逐日最高温、最低温和平均气温数据,其数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/site/index.html>)。该数据采用气候界限值检查、台站极值检查、内部一致性检查3种质量控制方法,具有很好的科学性和准确性。在计算极端气温指数之前,利用RClimDex软件对所获取的资料进行异常值和错误值筛选,日最高气温是否小于最低气温等检验,以保证结果的可信度。经过检测,数据质量良好,对于个别数据存在缺失值,本研究通过空间插值的方法来进行进一步提取确定,因此,对研究结果并没有造成影响。

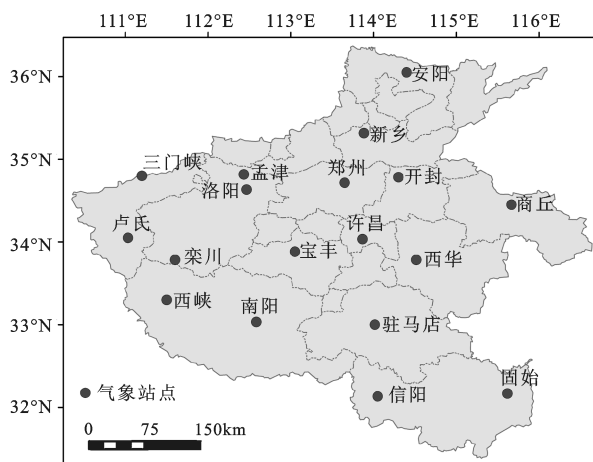


图1 河南省气象站点分布

Fig.1 Distribution of meteorological stations in Henan Province

1.2 研究方法

基于世界气象组织气候委员会,气候变化和可预测性计划,海洋学和海洋气象学联合技术委员会推荐的“气候变化监测和指标”气温指数^[25,26],研究组最后确定了16个极端气温指数(表1),反应极端气候不同方面的变化。并将这些指数分为4类:极值指数、绝对指数、相对指数及其它指数;通过RClimDex软件分别计算了18个站点1960~2014年的16个极端气温指数;采用一元线性趋势分析、相关分析等方法对极端气温指数的时空变化特征进行分析。

极端气温指数的变化趋势采用一元线性回归表示,即:

$$Y = a_1 t + a_0 \quad (1)$$

式中: Y 表示极端气温指数, t 表示时间(1960~2014年); a_0 表示回归常数; a_1 为回归系数,可用最小二乘法求得,表示变量 Y 的趋势倾向,反映了其上升或下降的速率,用于定量分析极端气温指数的变化趋势^[27]。另外,线性相关是否显著,可以用 t 检验来对 r 进行显著性检验^[28]。统计量:

$$t = \sqrt{n-2} \times \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \quad (2)$$

上式遵从自由度 $r=n-2$ 的 t 分布,给出显著性水平,若和 $t > t_\alpha$ (t_α 表示 t 分布表中相应的临界值)表明相关系数显著,否则相关系数不显著。另外,本文还采用了统计相关分析法用于确定极端气温指数与平均气温,以及极端气温指数与地理位置(经度、纬度和海拔)的关系。假设 R 表示要素 X 和 Y 之间的相关系数,且两样本量均为 N ,那么 R 的绝对值越大表示两者之间的关系越密切,其表达式如下^[29]:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中, \bar{x} 和 \bar{y} 是 X 和 Y 的平均值。当 $R > 0$,表示 X 和 Y 存在正相关关系;当 $R < 0$,表示 X 和 Y 存在负相关关系;且 R 绝对值越大,表示 X 和 Y 的相关关系越强。线性趋势分析以及相关分析均在Sigmaplot软件以及SPSS软件中操作完成。

2 结果与分析

2.1 年代际变化

河南极端气温指数年代际变化趋势(表2)显

表1 极端气温指数及定义
Table 1 Definitions of temperature indices

分类	缩写	极端气温指数	定义	单位
相对指数	TX10p	冷昼日数	最高气温小于10%分位值的天数	d
	TN10p	冷夜日数	最低气温小于10%分位值的天数	d
	TX90p	暖昼日数	最高气温大于90%分位值的天数	d
	TN90p	暖夜日数	最低气温大于90%分位值的天数	d
绝对指数	ID0	冰冻日数	年内日最高温度低于0℃的天数	d
	FD0	霜冻日数	年内日最低温度低于0℃的天数	d
	SU25	夏季日数	年内日最低气温大于25℃的日数	d
	TR20	热夜日数	年内日最低气温大于20℃的日数	d
极值指数	TXx	日最高气温的极大值	年内每月日最高气温的最大值	℃
	TXn	日最高气温的极小值	年内每月日最高气温的最小值	℃
	TNx	日最低气温的极大值	年内每月日最低气温的最大值	℃
	TNn	日最低气温的极小值	年内每月日最低气温的最小值	℃
其它指数	WSDI	暖持续日数	连续6 d最高温在90%分位值日数	d
	CSDI	冷持续日数	连续6 d最低温在10%分位值日数	d
	GSL	生物生长季	年内首先出现平均气温至少连续6 d高于5℃的总日数及7月1日后平均气温至少连续6 d低于5℃的总日数	d
	DTR	气温日较差	年内日最高气温与最低气温的差值	℃

表2 河南极端气温指数年际变化趋势及与其他区域对比
Table 2 Comparison between the linear trends in extreme temperature indices in Henan and other regions

指数 (/10a)	河南		豫南 ^[20]	中国沿海 ^[30]	黄河流域 ^[31]	长江流域 ^[26]	中国 ^[32]
	1960~2014年	1990~2014年	1958~2013年	1960~2013年	1963~2013年	1962~2011年	1961~2008年
TX10p	-0.84	-2.11	-0.55 [*]	-0.70 ^{**}	-1.06 ^{***}	-0.84 [*]	-0.47
TN10p	-2.82 ^{***}	-4.77 ^{***}	-4.06 [*]	-2.19 ^{***}	-1.93 ^{***}	-2.78 ^{***}	-2.06 [*]
TX90p	0.22	2.01	0.07 ^{**}	1.31 ^{***}	1.56 ^{***}	2.24 ^{***}	0.62
TN90p	3.65 ^{***}	7.65 ^{***}	7.35 ^{**}	2.24 ^{***}	2.22 ^{***}	2.86 ^{***}	1.75 [*]
ID0	-0.49	0.37	-0.36 ^{**}	/	-2.4 ^{***}	-0.48 ^{***}	/
FD0	-3.93 ^{***}	-4.94	-3.78 ^{**}	/	-3.36 ^{***}	-3.29 ^{***}	-3.73
SU25	1.83 [*]	4.28	2.35 ^{**}	2.27 ^{**}	2.66 ^{***}	2.93 ^{***}	1.18
TR20	2.36 ^{***}	5.87 ^{**}	2.81 ^{**}	3.25 ^{***}	1.56 [*]	1.8 ^{***}	/
TXx	-0.12	0.69 ^{**}	-0.13 [*]	0.12 [*]	0.18 [*]	0.16 [*]	0.07
TXn	0.20	0.18	/	0.21 [*]	0.27 [*]	0.32 ^{**}	0.35 [*]
TNx	0.13 [*]	0.42 ^{**}	/	0.20 ^{***}	0.25 ^{***}	0.19 ^{***}	0.21 [*]
TNn	0.41 ^{**}	1.00 [*]	0.62 ^{**}	0.40 ^{***}	0.40 [*]	0.47 ^{***}	0.63 [*]
WSDI	0.25	0.96	/	/	1.48 ^{***}	0.83 ^{***}	/
CSDI	-0.24	-0.28	/	/	-1.12 ^{***}	-0.67 ^{**}	/
GSL	2.54 [*]	3.64	/	/	3.47 ^{***}	2.30 ^{**}	3.04
DTR	-0.18 ^{***}	-0.36 ^{**}	/	-0.12 ^{***}	-0.09 [*]	-0.07 [*]	-0.18 [*]

注: *、**、***分别表示通过置信度为95%、99%和99.9%的显著性检验。

示:相对指数TX10p、TN10p总体呈下降趋势,速率分别为-0.84 d/10a和-2.82 d/10a;TX90p和TN90p则分别以0.22 d/10a和3.65 d/10a的速度升高。绝对指数ID0、FD0平均每10 a分别下降了0.49 d和3.93 d;SU25和TR20则平均每10 a分别上升1.83和2.36 d。极值指数TXn、TNx和TNn分

别以 0.20、0.13 和 0.41℃/10 a 的速率上升;然而,极值指数中 TXx 却以 -0.12℃/10a 的速率下降。其它指数 WSDI 和 GSL 平均每 10 a 分别上升 0.25 d 和 2.54 d;CSDI 和 DTR 则以 -0.24 d/10 a 和 -0.18℃/10 a 的速率下降。以上指数中 TN10p、TN90p、FD0、TNn、TR20 和 DTR 均通过了置信度为 99% 以上的显著性检验;SU25、TNx 和 GSL 通过了置信度为 95% 的显著性检验。相比于 1960~2014 年, TX10p、TN10p、TX90p、TN90p、FD0、SU25、TR20、TNx、TNn、WSDI、GSL 和 DTR 在近 20 a (1990~2014 年) 的变化速率则更大(表 2), 平均速率增大 2 倍多, 最大甚至增加了 9 倍(TX90p);ID0 和 TXx 年代际趋势在近 20 a 则发生了相反变化, 上升速率分别为 0.37 d/10a 和 0.69℃/10a。

2.2 空间变化

1960~2014 年河南极端气温相对指数变化趋势的空间分布(图 2)显示: TN10p 均呈现出下降趋势, 且通过了置信度为 95% 的显著性检验(栾川除外);下降较大的区域分布在河南北部和中东部,

速率 > -3 d/10 a; 除南阳(-4.53 d/10a)和固始(-3.23 d/10a)外, 河南西部与南部地区的 TN10p 均在 -1~-3 d/10a 之间变化。TN90p 指数均呈上升趋势, 变化幅度同样以北部和中东部地区速率较高, 南部及西南部地区速率较低; 大部分站点均通过了置信度为 95% 的显著性检验。TX10p 指数整体呈下降趋势, 速率在 -0.22~-1.3 d/10a 之间, 少数站点通过置信度为 95% 的显著性检验。TX90p 指数在西部和南部地区呈上升趋势; 中东部和北部地区表现为下降趋势, 下降速率多在 -0.5~-1 d/10a 之间变化。

绝对指数空间分布(图 3)结果显示: FD0 呈下降趋势, 以北部、东部以及南部下降速率较快, > -4 d/10a; 西部及中部下降幅度较小; 除洛阳、栾川外, 均通过置信度为 95% 的显著性检验。ID0 指数同样呈下降趋势, 其速率多在 -1.37~-0.37 d/10a 之间变化, 50% 的站点通过置信度为 95% 的显著性检验。SU25 呈上升趋势, 其中西部、南部地区的上升速率较快, 速率约 2 d/10a, 北部地区的上升速率为 0.5~1 d/10a; 30% 的站点通过置信度为 95% 的显著

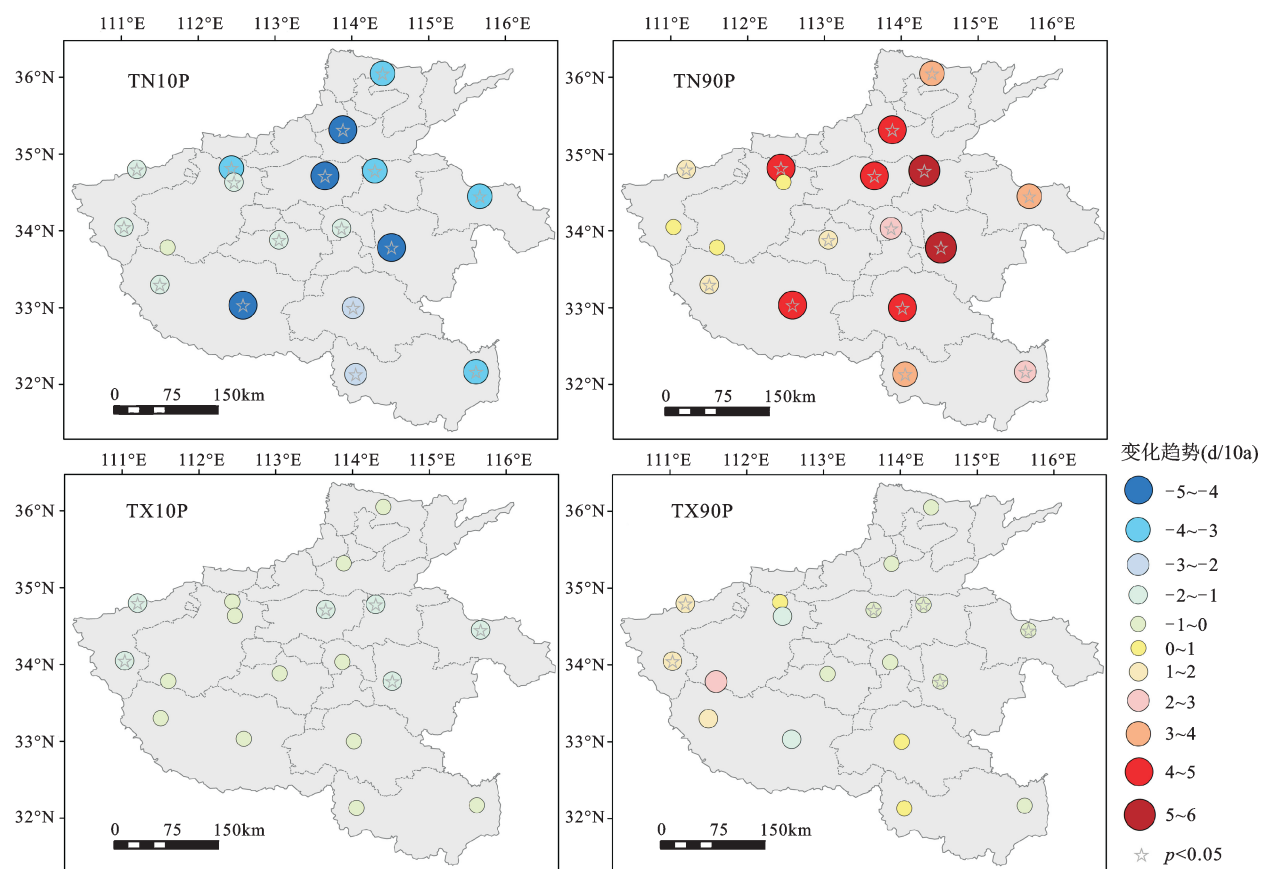


图2 1960~2014年河南极端气温相对指数变化趋势的空间变化

Fig.2 Spatial distribution of change trends in percentile indices of extreme temperature in Henan, 1960-2014

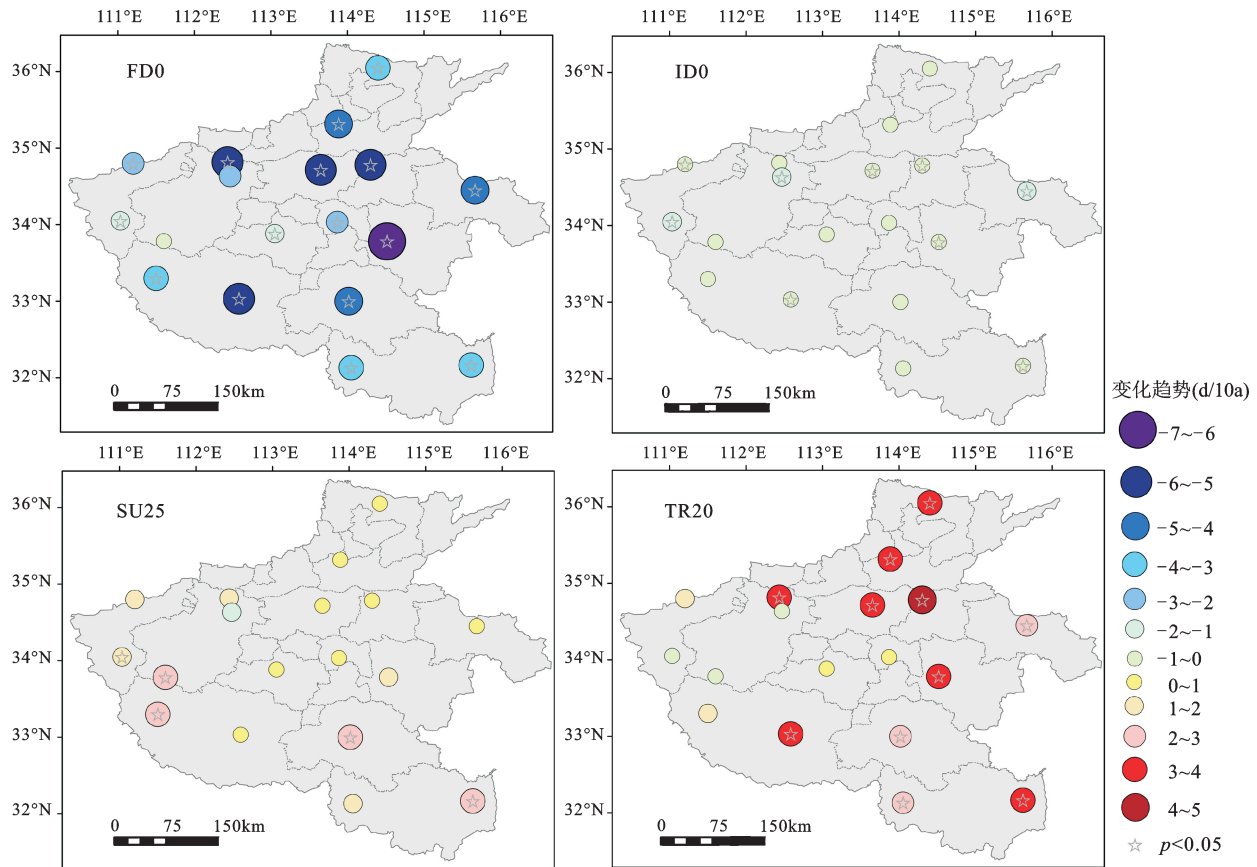


图3 1960~2014年河南极端气温绝对指数变化趋势的空间变化

Fig.3 Spatial distribution of change trends in absolute indices of extreme temperature in Henan Province, 1960-2014

性检验。TR20指数在东部、北部及南部地区呈上升趋势,且速率较快;西部则呈下降趋势;超过60%的站点通过置信度为95%的显著性检验。

极值指数的空间分布(图4)结果显示:TNn指数呈上升趋势,变化速率为0.07~0.97℃/10a,80%的站点通过了置信度为95%的显著性检验;上升速率较快的站点分布在河南北部、东部和南部。TNx指数的变化速率为-0.33~0.25℃/10a,表现为西部呈下降,其他地区呈上升趋势;60%的站点通过置信度为95%的显著性检验。TXn指数呈上升趋势,速率为0.11~0.52℃/10a,70%的站点通过置信度为95%的显著性检验。除三门峡(0.06℃/10a)和栾川(0.13℃/10a)外,TXx指数在河南其他地区呈下降趋势,速率为-0.58~0℃/10a;少数站点通过置信度为95%的显著性检验。

其它指数变化趋势空间分布(图5)结果显示:CSDI指数呈下降趋势(-0.03~-1.24 d/10a),50%的站点通过置信度为95%的显著性检验。WSDI指数在河南北部和西部地区呈上升趋势,在中部和

南部地区呈下降趋势,速率为-0.72~0.83 d/10a。GSL指数除洛阳(-1.38 d/10a)外,整体呈显著上升趋势,多数站点变化速率>2 d/10a,40%的站点通过置信度为95%的显著性检验。DTR指数在卢氏和栾川站呈上升趋势,速率为0.1℃/10a,其余站呈下降趋势,速率为-0.2℃/10a;超过60%的站点通过置信度为95%的显著性检验。

2.3 区域差异

为更透彻地了解河南极端气温空间变化,根据地形将其分成5大区域(表3):中东部和北部黄淮海平原区(安阳、新乡、郑州、开封、商丘、许昌、西华、驻马店、固始)、豫西黄土丘陵区(洛阳、三门峡)、豫西山丘陵区(卢氏、栾川、西峡、孟津、宝丰)、豫西南南阳盆地(南阳)和豫南桐柏山-大别山山地丘陵区(信阳)。结果显示:极端气温指数TN10p、FD0、TNn、TN90p、TR20、TNx、GSL在黄淮海平原区、南阳盆地以及桐柏山-大别山山地丘陵区的变化幅度较大,豫西黄土丘陵和山地丘陵区的变化幅度较小;其它指数(TX10p、TX90p、

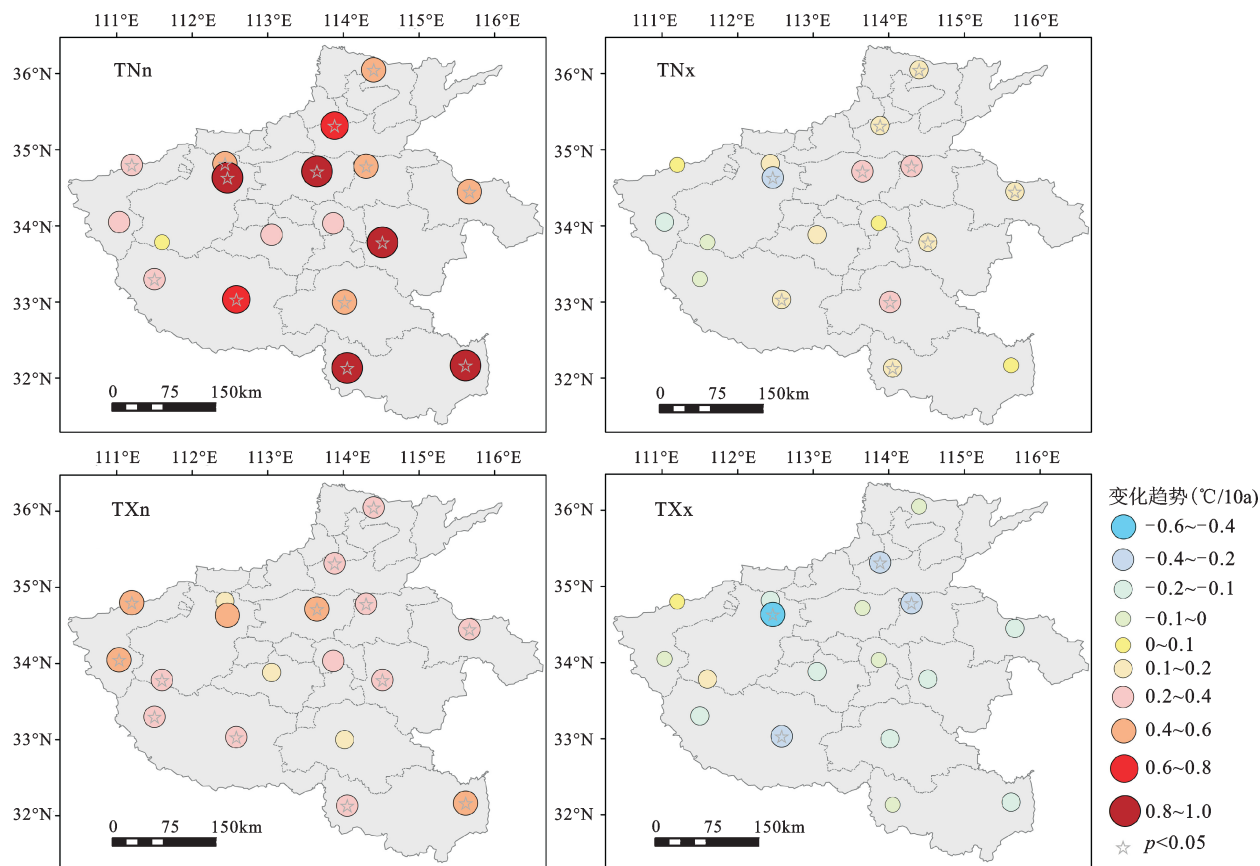


图4 1960~2014河南极端气温极值指数变化趋势的空间变化

Fig.4 Distribution of change trends in extremal indices of extreme temperature in Henan Province, 1960-2014

ID0、SU25、WSDI)则在豫西山地丘陵区变化幅度较高,在其他区域变化不大。表明极端最低气温的变暖事实主要发生在黄淮海平原、南阳盆地以及桐柏山-大别山的山地丘陵区;而极端最高气温的变暖事实主要发生在豫西山地丘陵区。

2.4 极端气温指数对河南气候变化的指示关系

为进一步了解河南极端气温指数与该区气候变化的指示关系,研究将极端气温指标与平均气温进行了相关性统计分析(表4)。结果显示,大部分极端气温指数与平均气温存在显著相关。除TXx和ID0外,其余所有极端指数与平均气温的相关系数均通过了置信度为99%的显著性水平检验,且多数相关系数 >0.6 ,说明河南地区极端气温与区域气候变暖存在良好的相关性,表明该区极端气温变化可以很好的指示气候变化状况。

3 讨论

表2中展示了河南与其他地区(豫南、中国沿海地区、黄河流域、长江流域、中国)极端气温指数

的对比结果。近50多年来,河南省部分极端气温指数的变化显著低于豫南地区极端气温变化指数,如TN10p、TN90p、SU25、TR20、TNn;表明这些指数在豫南的变化幅度要高于河南地区整体的变化。本文区域差异的研究中同样有相似发现。

与中国其他地区相比,河南极端气温指数TX90p、SU25、TR20的变化速率显著低于沿海地区,TN90p的变化速率显著高于中国沿海地区。TN10p、TN90p、FD0、TR20、DTR在河南的变化速率高于黄河流域,剩余指数的变化速率均低于黄河流域相应指数的变化。同样,河南TX90p、SU25、WSDI、CSDI指数显著低于长江流域,而TN90p、FD0、TR20、DTR指数显著高于长江流域。与中国大陆极端气温指数相比,河南TX10p、TN10p、TN90p、FD0、SU25高于中国大陆极端气温指数的变化速率,而TXn、TNx、TNn略低于中国大陆的变化速率。由此表明,与其他地区相比,河南TN10p、TN90p、FD0的变化速率明显较快,而TXx、TXn、TNx、TNn的变化速率却低于其他地

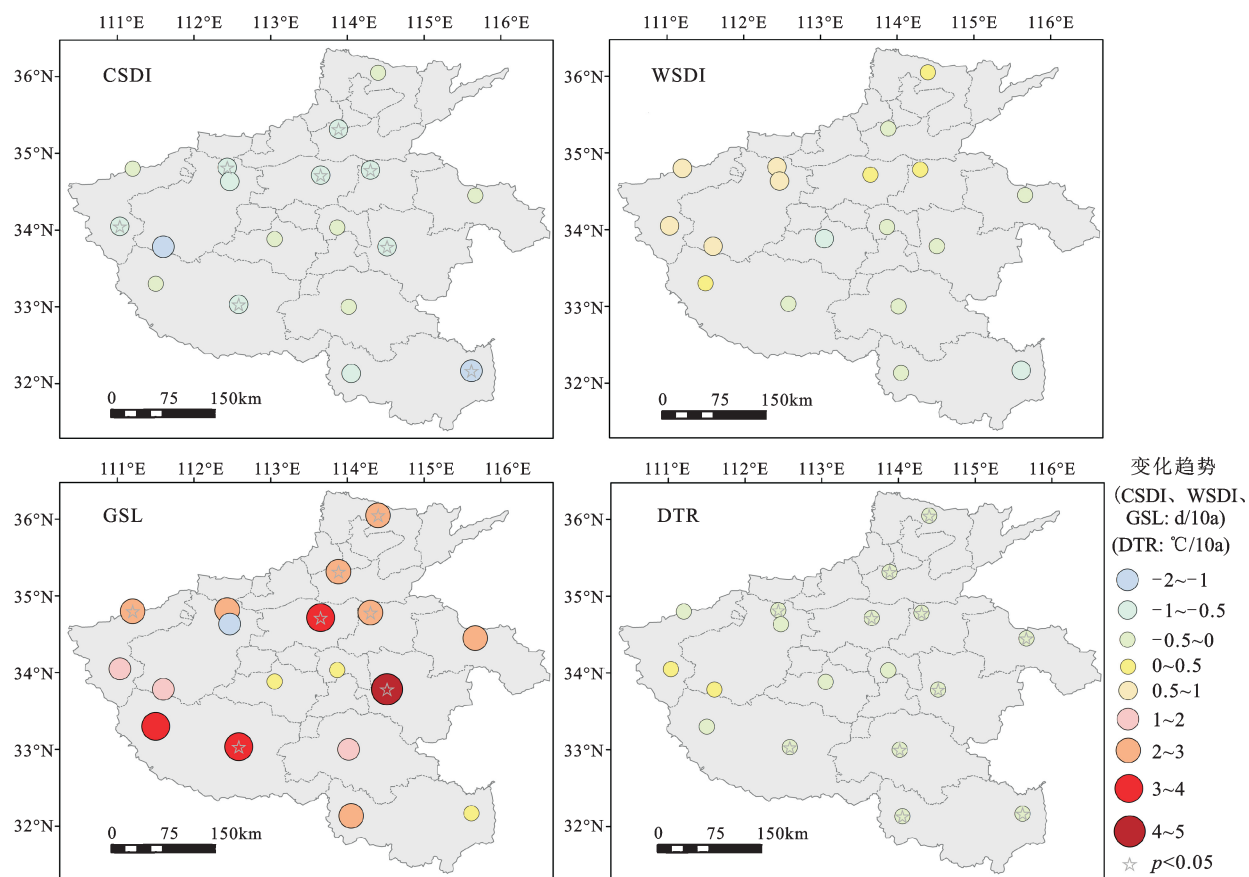


图5 1960~2014年河南北端气温其它指数变化趋势的空间变化

Fig.5 Spatial distribution of change trends in other indices of extreme temperature in Henan Province, 1960-2014

表3 1960~2014年河南不同区域极端气温均值(℃或d)与变化幅度(℃/10a或d/10a)

Table 3 The averages (°C or d) and change ranges (°C/10a or d/10a) of temperature extremes in the five sub-regions in Henan Province, 1960-2014

	黄淮海平原区		豫西黄土丘陵区		豫西山地丘陵区		南阳盆地		桐柏山-大别山山地丘陵区	
	均值	变化幅度	均值	变化幅度	均值	变化幅度	均值	变化幅度	均值	变化幅度
TN10p	19.01	-3.60*	16.19	-0.93*	18.61	-1.87*	18.96	-4.35*	19.31	-2.48*
TN90p	20.87	4.58*	18.36	2.16*	19.04	1.87*	21.27	5.60*	21.54	3.77*
TX10p	20.00	-0.95	16.89	-0.46	19.21	-1.05	20.90	-0.96	20.80	-0.11
TX90p	20.11	-0.42	18.21	1.80*	19.17	1.38*	19.99	-0.77	20.39	0.50
FD0	76.63	-4.74*	79.60	-2.35*	84.29	-2.78*	66.64	-5.70*	51.11	-3.05*
ID0	5.20	-0.48	5.37	-0.34	5.70	-0.62	3.11	-0.40*	4.00	-0.21*
SU25	144	1.61*	139	0.44	131	2.79*	143	1.85	143	2.28*
TR20	78.05	3.43*	70.65	0.31	52.64	0.77	82.22	3.57	89.95	2.14*
TNn	-10.46	0.49*	-9.99	0.20	-10.71	0.23	-9.08	0.49*	-8.73	0.62*
TNx	27.37	0.20*	27.05	-0.06	25.34	0.01	27.14	0.25*	28.53	0.28*
TXn	-2.00	0.18	-2.36	0.10	-2.53	0.25	-1.14	0.27	-1.94	0.20
TXx	38.50	-0.15	39.19	-0.11	37.85	-0.01	37.99	-0.14	37.38	0.01
CSDI	1.66	-0.32	1.59	0.13	1.76	-0.31	1.58	-0.21	2.80	0.10
DTR	10.12	-0.27*	10.15	-0.12*	10.87	0.00*	9.82	-0.32*	8.87	-0.17*
GSL	287	2.78*	285	1.28*	290	2.31*	299	4.44*	312	2.20*
WSDI	2.35	0.02*	3.55	0.80*	3.40	0.87*	3.44	0.11*	2.58	0.03*

注:*表示通过置信度为95%的显著性水平检验。

表4 1960~2014年河南地区极端气温指数与平均气温相关系数

Table 4 Correlation coefficients between annual mean temperature and extreme temperature indices in Henan, 1960-2014

平均气温	TN10p	TN90p	TX10p	TX90p	FD0	ID0	SU25	TR20
	-0.76**	0.79**	-0.73**	0.62**	-0.79**	-0.35**	0.70**	0.70**
平均气温	TNn	TNx	TXn	TXx	CSDI	DTR	GSL	WSDI
	0.52**	0.37**	0.38**	0.22	-0.46**	0.12	0.65**	0.46**

注:**表示通过置信度为99%的显著性水平检验。

区;说明河南地区极端高温和极端低温近55 a的变化速率较慢,但低温出现的日数却显著减少。

此外,近20 a的极端气温年代际变化显示,河南TX10p、TN10p、TX90p、TN90p、FD0、SU25、TR20、TXx、TNx、TNn、DTR的变化速率均显著高于中国沿海地区、黄河流域、长江流域和中国大陆;表明河南近20 a来极端气温进入了加速变化时期。

根据前文极端气温指数的区域差异分析,河南极端气温指数变暖幅度平原站最高,其次是山间盆地站,最后是山地丘陵区;表明地形变化对于河南极端气温变化的影响较大。而河南地形由西向东的变化主要表现为山地丘陵-盆地-平原,其位置变化与经纬度和海拔高度极其相关。基于此,研究探讨了经纬度与海拔高度对于极端气温指数的影响(表5)。结果显示, TX90p、TN10p、FD0、WSDI和DTR与站点海拔呈显著正相关,与经度呈显著负相关;表明海拔越高,越靠近河南西部,极端指数值变化越大。TN90p、TR20和TNn与海拔呈显著负相关,与经度显著正相关;表明海拔越低,越靠近河南东部,极端指数值变化越大。极端指数与经纬度以及海拔高度变化的相关性也进一步验证了地形对该区极端气温空间变化的控制影响。此外,也进一步解释了极端最低气温的变暖事实主要发生在黄淮海平原,南阳盆地以及桐柏山-大别山的山地丘陵区;而极端最高气温的变暖事实主要发生在豫西山地丘陵区的现象。其他学者针对极端气温指数影响因素的分析也发现地形对极端气温指数的影响,同样表明平原站极端气温指数的变暖幅度最大,其次为山间盆地站、山谷站和山峰站^[33,34],与本文的研究结果相一致,进一步验证了地形对区域极端气温指数变化的影响。此外,热岛效应的存在引起城市站与乡村站极端气温指数变化幅度也存在差异^[35],以及大尺度大气环流对极端气温变化影响,人类温室气体的

表5 河南地区极端气温指数变化趋势与地理位置的相关系数

Table 5 Correlation coefficient between the linear trends in extreme temperature indices and geographical parameters in Henan

	纬度	经度	海拔		纬度	经度	海拔
TX10p	-0.43	-0.10	-0.11	TXx	-0.11	-0.20	0.51*
TX90p	-0.11	-0.66**	0.88**	TXn	-0.02	-0.14	0.18
TN10p	-0.11	-0.51*	0.55*	TNx	0.02	0.54*	-0.43
TN90p	0.10	0.56*	-0.57*	TNn	-0.16	0.47*	-0.60**
SU25	-0.45	-0.23	0.45	WSDI	0.44	-0.74**	0.73**
ID0	-0.23	-0.09	-0.02	CSDI	0.12	-0.03	-0.29
TR20	0.09	0.64**	-0.63**	DTR	-0.15	-0.65**	0.77**
FD0	-0.13	-0.47*	0.61**	GSL	0.07	0.06	-0.01

注:**表示通过置信度为99%的显著性水平检验;*表示通过了置信度为95%的显著性水平检验。

排放^[36]以及云量的变化^[37]等都与极端气温有着密切联系,其中的复杂作用机制还有待于以后更深层次的研究和探讨。

4 结论

1) 时间尺度上,河南近55 a来极端冷指数的线性变化均呈现下降趋势,极端暖指数的线性变化呈现上升趋势。空间分布和区域差异上,极端最低气温的变暖事实主要发生在黄淮海平原区、南阳盆地以及桐柏山-大别山丘陵区;而极端最高气温的变暖事实主要发生在豫西山地丘陵区。

2) 与中国其他地区相比,河南近55 a来极端气温指数的变化速率较慢,低温出现的日数显著减少;但近20 a来,河南极端气温指数的变化速率显著高于其他地区2倍多,表明河南极端气温指数自20世纪90年代之后进入了加速变化阶段。

3) 河南极端气温指数的变化可以很好地指示该区气候变化的状况;而地形条件是控制该区极端气温指数空间变化的主要因素。其它因素对于该区极端气温的影响需要更深入的研究和探讨。

参考文献(References):

- [1] 汪宝龙, 张明军, 魏军林, 等. 西北地区近50a气温和降水极端事件的变化特征[J]. 自然资源学报, 2012, 27(10): 1720-1733. [Wang Baolong, Zhang Mingjun, Wei Junlin et al. The change in extreme events of temperature and precipitation over north-west China in recent 50 years. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(10): 1720-1733.]
- [2] 贾文雄. 近50年来祁连山及河西走廊极端气温的季节变化特征[J]. 地理科学, 2012, 32(11): 1377-1383. [Jia Wenxiong. Seasonal characteristics of extreme temperature changes in Qilian Mountains and Hexi Corridor during last fifty years. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(11): 1377-1383.]
- [3] 沈永平, 王国亚. IPCC第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068-1076. [Shen Yongping, Wang Guoya. Key findings and assessment results of IPCC WGI fifth assessment report. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(5): 1068-1076.]
- [4] 李红英, 高振荣, 王胜, 等. 近60a河西走廊极端气温的变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(1): 1-9. [Li Hongying, Gao Zhenrong, Wang Sheng et al. Extreme temperature variation of Hexi Corridor in recent 60 years. *Arid Land Geography*, 2015, 38(1): 1-9.]
- [5] 赵雪雁, 雒丽, 王亚茹, 等. 1963-2012年青藏高原东缘极端气温变化特征及趋势[J]. 资源科学, 2014, 36(10): 2113-2122. [Zhao Xueyan, Luo Li, Wang Yaru et al. Extreme temperature events in Eastern Edge of the Qinghai-Tibet Plateau from 1963 to 2012. *Resources Science*, 2014, 36(10): 2113-2122.]
- [6] Easterling D R, Evans J L, Groisman P Y et al. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81(3): 417-425.
- [7] Karl T R, Kulda G, Razuvayev V N et al. Global warming: Evidence for asymmetric diurnal temperature change[J]. *Geophysical Research Letters*, 1991, 18: 2253-2256.
- [8] Bonsal B R, Zhang X, Vincent L A et al. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada[J]. *Journal of Climate*, 2001, 14(9): 1959-1976.
- [9] Manton M J, Della-Marta P M, Haylock M R et al. Trend in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific: 1961-1998[J]. *International Journal of Climatology*, 2001, 21(3): 269-284.
- [10] 申红艳, 马明亮, 王冀, 等. 青海省极端气温事件的气候变化特征研究[J]. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1371-1379. [Shen Hongyan, Ma Mingliang, Wang Ji et al. Variation characteristics of extreme air temperature events in Qinghai province. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(6): 1371-1379.]
- [11] Frich P, Alexander L V, Della-Marta P et al. Observed coherent change in climatic extremes during the second half of the 20th Century[J]. *Climate Research*, 2002, 19(3): 193-212.
- [12] 张立伟, 宋春英, 延军平. 秦岭南北年极端气温的时空变化趋势研究[J]. 地理科学, 2011, 31(8): 1007-1011. [Zhang Liwei, Song Chunying, Yan Junping. Spatio-temporal trends of annual extreme temperature in northern and southern Qinling Mountains. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(8): 1007-1011.]
- [13] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8. [Ding Yihui, Ren Guoyu, Dan Guangyu et al. China's National assessment report on climate change(I): climate change in China and the future trend. *Advance of Climate Change Research*, 2006, 2(1): 3-8.]
- [14] 任福民, 翟盘茂. 1951-1990年中国极端气温变化分析[J]. 大气科学, 1998, 22(2): 217-227. [Ren Fumin, Zhai Panmao. Study on changes of China's extreme temperatures during 1951-1990. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1998, 22(2): 217-227.]
- [15] 马柱国, 符淙斌, 任小波, 等. 中国北方年极端温度的变化趋势与区域增暖的联系[J]. 地理学报, 2003, 58: 11-20. [Ma Z G, Fu C B, Ren X B et al. Trend of annual extreme temperature and its relationship to regional warming in northern China. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58: 11-20.]
- [16] 史军, 丁一汇, 崔林丽. 华东极端高温气候特征及成因分析[J]. 大气科学, 2009, 33(2): 347-358. [Shi Jun, Ding Yihui, Cui Linli. Climatic characteristics of extreme maximum temperature in east China and its causes. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2009, 33(2): 347-358.]
- [17] 郭瑜. 河南省近49年来降水和气温变化特征研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2012. [Guo Yu. Variations of temperature and precipitation in Henan province in past 49 years Zhengzhou: Henan: Zhengzhou University, 2012.]
- [18] 马晓华, 赵景波. 河南信阳市近62年来极端气温变化特征及周期分析[J]. 地球环境学报, 2013, 4(6): 1496-1505. [Ma Xiaohua, Zhao Jingbo. Characteristics and periodicity of extreme temperature in recent 62 years in Xinyang, Henan Province. *Journal of Earth Environment*, 2013, 4(6): 1496-1505.]
- [19] 梅新建, 孙菀, 魏慧娟, 等. 驻马店极端气温分析[J]. 气象与环境科学, 2007, 30(z1): 98-101. [Mei Xinjian, Sun Wan, Wei Huijuan et al. Analysis of extreme temperature in zhumadian. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2007, 30(z1): 98-101.]
- [20] 马晓华, 赵景波. 1958-2013年豫南地区极端气温变化特征及周期分析[J]. 资源科学, 2014, 36(9): 1825-1833. [Ma Xiaohua, Zhao Jingbo. Analysis on characteristics of extreme temperature change and cycle of southern Henan from 1958 to 2013. *Resources Science*, 2014, 36(9): 1825-1833.]
- [21] 吴燕锋, 巴特尔·巴克, 阿斯姑力·托合提, 等. 1958-2012年郑州市极端气温和极端气温事件年际变化特征[J]. 中国农学通报, 2014, (23): 259-265. [Wu Yanfeng, Bateer B, Asiguli T T et al. The variation of extreme temperature and extreme weather events from 1958 to 2012 in Zhengzhou. *Chinese Agricultural*

- Science Bulletin, 2014, (23): 259-265.]
- [22] 孙立业, 宋子岭, 贺伟光, 等. 开封市近半个世纪极端气温变化趋势的小波分析[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版, 2009, 28(z1): 178-180. [Sun Liye, Song Ziling, He Weiguang et al. Wavelet analysis of extreme air temperature change characteristic in recent 50 a in kaifeng city. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science Edition), 2009, 28(z1): 178-180.]
- [23] 王丽. 河南省1961-2011年极端气温和极端气温事件的时空变化特征[J]. 气象与环境科学, 2013, 36(2): 31-36. [Wang Li. Temporal and spatial variation characteristics of extreme temperature and extreme temperature events in 1961-2011 in Henan province. Meteorological and Environmental Sciences, 2013, 36(2): 31-36.]
- [24] 余卫东, 柳俊高, 常军, 等. 1957-2005年河南省降水和温度极端事件变化[J]. 气候变化研究进展, 2008, (2): 78-83. [Yu Weidong, Liu Jungao, Chang Jun et al. Changes in extreme temperature and precipitation in Henan province during 1957-2005. Advances in Climate Change Research. 2008, (2): 78-83.]
- [25] 杜军, 路红亚, 建军. 1961-2010年西藏极端气温事件的时空变化[J]. 地理学报, 2013, 68(9): 1269-1280. [Du Jun, Lu Hongya, Jian Jun. Variations of extreme air temperature events over Tibet from 1961 to 2010. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(9): 1269-1280.]
- [26] 王琼, 张明军, 王圣杰, 等. 1962-2011年长江流域极端气温事件分析[J]. 地理学报, 2013, 68(5): 611-625. [Wang Qiong, Zhang Mingjun, Wang Shengjie et al. Extreme temperature events in Yangtze River Basin during 1962-2011. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(5): 611-625.]
- [27] 张明军, 汪宝龙, 魏军林, 等. 近50年宁夏极端气温事件的变化研究[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(4): 152-160. [Zhang Mingjun, Wang Baolong, Wei Junlin et al. Extreme event changes of air temperature in Ningxia in recent 50 years. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(4): 152-160.]
- [28] 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[J]. 资源科学, 2015, 37(4): 710-722. [Zhang Wancheng, Zheng Jianmeng, Ma Tao et al. Temporal and spatial distribution and variation of extreme temperatures in Yunnan Province from 1961 to 2012. Resources Science, 2015, 37(4): 710-722.]
- [29] 张宁. 中国极端气温和降水趋势变化研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2007. [Zhang Ning. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2007.]
- [30] 黄小燕, 王小平, 王劲松, 等. 1960-2013年中国沿海极端气温事件变化特征[J]. 地理科学, 2016, (4): 612-620. [Huang Xiaoyan, Wang Xiaoping, Wang Jinsong et al. Variation of extreme temperature events in coastal region of China in 1960-2013. Scientia Geographica Sinica, 2016, (4): 612-620.]
- [31] 赵安周, 刘宪锋, 朱秀芳, 等. 1965-2013年黄土高原地区极端气温趋势变化及空间差异[J]. 地理研究, 2016, 35(4): 639-652. [Zhao Anzhou, Liu Xianfeng, Zhu Xiufang et al. Trend variations and spatial difference of extreme air temperature events in the Loess Plateau from 1965 to 2013. Geographical Research, 2016, 35(4): 639-652.]
- [32] You Q L, Kang S C, Aguilar E et al. Changes in daily climate extremes in China and its connection to the large scale atmospheric circulation during 1961-2003. Climate Dynamics, 2011, 36(11-12): 2399-2417.
- [33] Li Zongxing, He Yuanqing, Theakstone W H et al. Altitude dependency of trends of daily climate extremes in southwestern China, 1961-2008[J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(3): 416-430.
- [34] Pepin N C, Seidel D J. A global comparison of surface and free-air temperatures at high elevations[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(D3): 480-496.
- [35] Griffiths G M, Chambers L E, Haylock M R et al. Change in mean temperature as a predictor of extreme temperature change in the Asia-Pacific region[J]. International Journal of Climatology, 2010, 25(10): 1301-1330.
- [36] Zhao M, Pitman A. The impact of land covers change and increasing carbon dioxide on the extreme and frequency of maximum temperature and convection precipitation. Geophysical Research Letters, 2002, 29(6), doi: 10.1029/2001GL013476.
- [37] You Q L, Kang S C, Aguilar E et al. Changes in daily climate extremes in the eastern and central Tibetan Plateau during 1961-2005. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2008, 113(D7):1639-1647.

Temporal and Spatial Variation of Extreme Temperature Events in Henan Province During 1960-2014

Gao Wenhua¹, Li Kaifeng^{1,2}, Cui Yu¹

(1. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China; 2. Key Laboratory of Quaternary Chronology and Hydro-Environment Evolution, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, Hebei, China)

Abstract: Based on the daily temperature (average, maximum and minimum) data of 18 meteorological stations from 1960 to 2014 in Henan province, the variation trends and spatial differences of 16 extreme temperature indices are analyzed by using the linear regression and correlation analysis methods. Besides, the influence factors of the extreme temperature indices and the relationship between extreme temperature indices and climate change are also discussed. The results are as follows: 1) In the last 55 years, coldest day (TXn), warmest night (TNx), coldest night (TNn), warm days (TX90P), warm nights (TN90P), summer days (SU25), tropical nights (TR20), warm spell duration days (WSDI) and growing season length (GSL) indicate statistically significant increasing trends. Whereas, warmest day (TXx), cool days (TX10P), cool nights (TN10P), ice days (ID0), frost days (FD0), cold spell duration days (CSDI) and diurnal temperature range (DTR) have significantly decreasing trends. 2) In terms of spatial variations, the extreme cold temperature increase in the Huang-Huai-Hai Plain, Nanyang Basin and the hilly area of Tongbai-Dabie mountainous area. Meanwhile, the increase of extreme warm temperature has mainly occurred in the western mountainous and hilly region of Henan Province. 3) Compared to other areas of China, the change rate of extreme temperature in Henan is slowly, in last 55 a, the cold days have significantly decreased. However, the change rate of extreme temperature of last 20 a has increased more than two times than last 55 a, this shows that the change rate of extreme temperature in Henan is accelerating. 4) Based on the correlation results, the variation of extreme temperature in Henan could indicate the climate change in this area. Besides, the topographic condition is the dominant factor for the spatial variations of the extreme temperature in Henan.

Key words: climate change; extreme temperature; temporal and spatial variation; Henan Province