

黄河流域极端气候事件时空变化规律

慎璐璐¹, 杨艳芬¹, 吴晶², 白磊³

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,
陕西 杨凌 712100; 2.兰州中心气象台, 兰州 730020; 3.海南大学 生态与环境学院, 海口 570228)

摘要:为分析黄河流域极端气温和极端降水的变化规律特征,利用黄河流域 284 个气象站点 1969—2018 年逐日最高气温、最低气温和降水量观测数据,采用国际通用的极端气候事件指数,以水系为空间单元分析了极端气候指数的时空变化特征。结果表明:空间尺度上,最高气温、最低气温、夏天日数和生长期长度呈东南高西北低的特征,日平均温差、霜冻、结冰日数呈相反特征;除连续无雨日数外,其余极端降水指数均呈东南高、西北低的格局。时间尺度上,表征极端高温事件的最高气温、最低气温、夏天日数、生长期长度、暖夜、暖昼日数呈上升趋势,极端低温事件指数如霜冻、结冰、冷夜、冷昼日数呈下降趋势,研究区内 7 个水系的极端气温指数变化趋势相一致,甘宁、内蒙和黄河上游水系趋势较显著;极端降水指数除连续无雨日数外均呈上升趋势,显著上升的站点主要集中于陕北和黄河上游水系。黄河流域气温整体均呈上升趋势,极端降水指数变化特征空间差异性较大。

关键词:极端气温; 极端降水; 时空变化; 黄河流域

中图分类号:P467

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)02-0231-12

Spatial and Temporal Variation Characteristics of Extreme Climate Events in the Yellow River Basin

SHEN Lulu¹, YANG Yanfen¹, WU Jing², BAI Lei³

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou 730020, China; 3.College of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: Under the background of abnormal climate change, it is of great practical significance to study the temporal and spatial characteristics of extreme precipitation and temperature. The temporal and spatial variation characteristics of extreme climate events in the Yellow River Basin and its sub-regions were analyzed by using the international extreme climate event index based on the data of 284 meteorological stations from 1969 to 2018. The results show that: on the spatial scale, extreme maximum/minimum temperature, summer days and growing season length were greater in southeast and less in northwest of the Yellow River Basin, but the distribution of diurnal temperature range, frost days and ice days showed opposite trends; the high value area of warm spell duration indicator and cold spell duration indicator were located in the NSH (Northern Shaanxi) river system and IM (Inner Mongolia) river system, the low value area was located in the WH (Western Henan) river system; the spatial distribution of cool nights, warm nights, cool days and warm days were relatively uniform with small regional differences. Except for consecutive dry days, other extreme precipitation indices showed decreasing trends from southeast to northwest. On the temporal scale, the extreme temperature events such as extreme highest/lowest temperature, summer days, growing season length, warm days and warm nights showed increasing trends; all the indexes of the extreme low-temperature events such as frost days, ice days, cold nights and cold days presented the decreasing trends. The trend of extreme temperature index of seven sub-regions in the study area was consistent, and the stations with

收稿日期:2021-04-16

修回日期:2021-04-22

资助项目:国家重点研发计划项目“黄土高原区域生态系统演变规律和维持机制研究”(2016YFC0501603)

第一作者:慎璐璐(1997—),女,河南新密人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀与水文模拟。E-mail:shenlluu@163.com

通信作者:杨艳芬(1984—),女,宁夏银川人,助理研究员,主要从事土壤侵蚀与水文模拟研究。E-mail:yfyang@ms.iswec.ac.cn

significant increase were mainly located in GN (Gansu and Ningxia) river system, IM river system and UYR (Upper stream of Yellow River) river system. Except for consecutive dry days, other extreme precipitation indices showed increasing trends. The stations with significant increase were mainly located in the UYR river system and NSH river system, and the NSH river system showed the most obvious increase trend. The stations with decreasing trend mainly distributed in the WR (Weihe River) river system and WH river system, but the decreasing trend was not significant. The stations where consecutive dry days decreased significantly and consecutive wet days increased significantly mainly concentrated in the UYR river system. On the whole, the temperature in the Yellow River Basin showed a rising trend, and the variation characteristics of extreme precipitation index showed the great spatial difference.

Keywords: extreme temperature; extreme precipitation; temporal and spatial distribution; Yellow River Basin

气候变化是 21 世纪各国面临的重大问题,在气候异常变化背景下,极端气候事件的发生越来越频繁,极端气候事件比气候平均状况强度更强,破坏性更大,给人类社会造成了重大的经济损失^[1-2],引起广泛关注。在全球众多地区如加拿大^[3]、中美洲和南美洲^[4]、东南亚及南太平洋地区^[5]的极端气候研究均显示冷昼、冷夜数呈不断减少趋势,暖昼、暖夜数则显著增加。Frich 等^[6]研究发现,除部分地区存在一定差异外,1950—2000 年全球范围内极端最高温度和极端最低温度差值呈显著减小趋势。我国华北^[7]、西北^[8]、西南^[9]地区的极端气候研究均发现,极端最高和最低气温均呈上升趋势,且上升幅度存在显著不对称性和区域性,季节差异也较明显,华北地区极端降水事件呈减小趋势,西北地区极端降水事件微弱增加,西南地区降水总量呈减小趋势,但降水强度有所增加。对长江流域^[10]和珠江流域^[11]极端气候事件的研究结果表明,两流域均呈明显的变暖趋势,长江流域冷指数变暖幅度大于暖指数,夜指数变暖幅度大于昼指数,珠江流域极端气温事件变化趋势具有区域尺度上的显著性和一致性,极端降水事件区域差异大。

在黄河流域极端气候方面,陈效述等^[12]指出 1961—2005 年黄河流域极端低温和极端高温天数分别呈减少和增加趋势,年极端强降水总量存在明显的区域差异,干旱天数减少;张克新等^[13]也发现 1960—2017 年黄河流域极端高温天气日数显著增多,极端低温天气日数显著减少;吴灿等^[14]指出黄河流域 1963—2013 年极端冷指数呈减少趋势,极端暖指数呈上升趋势,且极端气温指数的冷暖、昼夜均表现出显著的不对称性;贺振等^[15]研究 1960—2012 年黄河流域极端降水时空变化,发现极端降水频数在流域西部和北部地区具有增加态势,极端降水量在流域西部、北部和西安周边地区呈不断增加趋势,极端降水比率整体呈增加趋势;赵翠平等^[16]研究了 1957—2008 年黄河流域极端降水指数在年和季节尺度上的

时空变化特征,发现极端降水指数总体呈非显著下降趋势,且黄河流域降水量呈逐年减小趋势,极端降水指数的变化存在时空差异。尽管已有学者从不同角度对黄河流域的极端温度和降水事件进行研究,但缺乏针对极端气温和降水的综合研究,并且研究黄河流域不同分区极端气候变化事件的相对较少。

黄河流域水少沙多,水沙异源,水资源条件先天不足,受大气环流和季风环流影响的情况比较复杂,同时流域幅员辽阔,山脉众多,东西高差悬殊,各区地貌差异也较大,黄河流域的极端气候事件可能带来极端水文事件及其他事件的变化,影响工农业生产和城市化发展^[17]。本文将黄河流域划分为黄河上游水系、甘宁水系、内蒙水系、陕北水系、渭河水系、汾河水系、豫西水系 7 个水系,以此为空间单元分析黄河流域 1969—2018 年极端气温和极端降水的变化趋势及区域差异,为黄河流域发展提供气候变化背景依据,因地制宜应对气候变化和极端气候事件。

1 研究区概况

黄河流域(96°—119°E, 32°—42°N)横贯我国中北部,流域面积约 $7.5 \times 10^6 \text{ km}^2$,主干道全长约 5 464 km,黄河为中国第二大河,流经青海、四川、甘肃、陕西、山西、河南、山东、宁夏回族自治区和内蒙古自治区 9 个省区^[14]。流域气候类型复杂,整体为西部干旱,东部湿润,可分为干旱、半干旱、半湿润 3 个气候区。降水多集中在 6—10 月,大暴雨多发生在 7—8 月,降水量年内分布不均,多年平均降水量为 466 mm,年均气温为 $-4 \sim 14^\circ\text{C}$ ^[16]。

2 数据与指标

本研究采用黄河流域 284 个气象观测站点(图 1) 1969—2018 年逐日最高气温、最低气温和降水量数据,数据来源于中国气象科学数据共享服务网,经过严格的质量控制,确保数据时间序列的连续性及准确

性,各站点在研究区内均匀分布,能够较好地代表研究区整体的气候变化情况。极端气候指数选择由国际气候诊断与指数专家组(ETCCDMI)确定的“气候变化检测与指标”,这些指数由日气温和日降水数据计算而得,具有弱极端性、噪声低、显著性强等特点,已被广泛应用在极端气候事件的分析研究中^[18-19],本文根据研究区域的气候特点,选取13个极端气温指数和10个极端降水指数,各极端气候指数的具体定义见表1,在此基础上分析黄河流域极端气候事件的时空演变规律。极端气候指数的计算采用基于R语言的RClimDex 1.0软件^[20]。

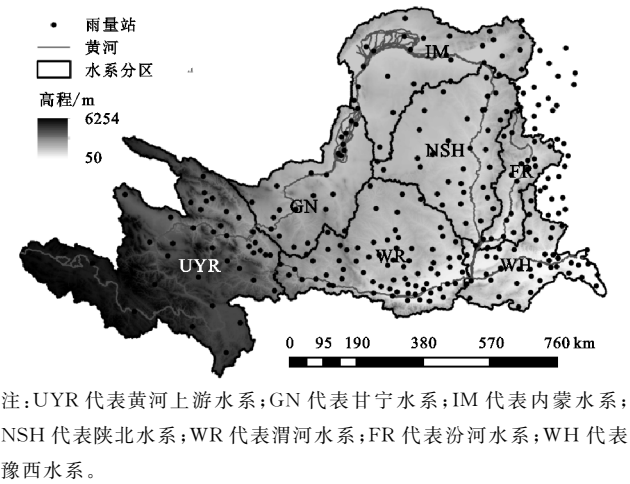


图1 研究区域高程、气象站位置和水系分区

3 结果与分析

3.1 极端气温的空间分布特征

空间分布上(图2),黄河流域最高气温TX_x和最低气温TN_n呈东南高西北低的分布特征,日平均温差DTR呈相反分布,具有明显的地域差异。黄河流域北部TN_n明显低于南部,TN_n的高值区主要集中于豫西水系和渭河水系南部,低值区主要分布于内蒙水系,大多低于-21℃,均值低至-25.6℃。TX_x的高值区主要集中在豫西、汾河和渭河水系南部,其中豫西和汾河水系均值分别为37.6,36.8℃,低值区主要集中在黄河上游水系,均值为28℃。日平均温差DTR的空间分布整体呈东南低西北高的特征,内蒙和黄河上游水系的DTR最大,均值分别为13.3,13.9℃,豫西和渭河水系最小,为10.8,11.2℃。根据TN_n和DTR的拟合关系,随着TN_n的增加,DTR呈减小趋势($y = -0.2222x + 8.1804, R^2 = 0.82$),即最低气温较高的区域,温差小,最低气温较低的区域,温差大。暖日持续日数WSDI和冷日持续日数CSDI分别为1.6~9 d和0.4~4.7 d,CSDI短于WSDI。豫西水系WSDI和CSDI都较短,均值分别为3.1,1.5 d。陕北和内蒙水系的WSDI(5.1,4.7 d)和CSDI(2.2,2.1 d)都较长。渭河水系的WSDI较长(5.2 d),CSDI较短(1.7 d),甘宁水系呈相反趋势。黄河上游WSDI相对较短,为3.7 d。

表1 极端气温、降水事件指标与定义

类型	代码(单位)	名称	定义
极端气温指数	FD(d)	霜冻日数	日最低气温<0℃的日数
	ID(d)	结冰日数	日最高气温<0℃的日数
	TX _x (℃)	最高气温	年、月的最高气温的最大值
	TN _n (℃)	最低气温	年、月的最低气温的最小值
	TN10p(d)	冷夜日数	日最低气温<10%分位数的日数
	TX10p(d)	冷昼日数	日最高气温<10%分位数的日数
	TN90p(d)	暖夜日数	日最低气温>90%分位数的日数
	TX90p(d)	暖昼日数	日最高气温>90%分位数的日数
	WSDI(d)	暖日持续日数	至少连续6 d日最高气温>90%分位数的日数
	CSDI(d)	冷日持续日数	至少连续6 d日最高气温<10%分位数的日数
	SU(d)	夏天日数	日最高气温>25℃的天数
	GSL(d)	生长期长度	至少6日平均日平均气温>5℃的初日与<5℃的终日间的日数
	DTR(℃)	日平均温差	日温差的平均值
极端降水指数	PRCPTOT(mm)	年降水总量	一年中日降水量≥1 mm的降水总和
	SDII(mm/d)	降水强度	年降水量与降水日数的比值
	CDD(d)	连续无雨日数	最长连续无降水日数
	CWD(d)	连续有雨日数	最长连续降水日数
	R25(d)	大雨日数	日降水量≥25 mm的日数
	R10(d)	中雨日数	日降水量≥10 mm的日数
	Rx1day(mm)	日最大降水量	一年中最大日降水量
	Rx5day(mm)	5日最大降水量	一年中连续5日的最大降水量
	R95p(mm)	强降水量	日降水量>95%分位值的总降水量
	R99p(mm)	极强降水量	日降水量>99%分位值的总降水量

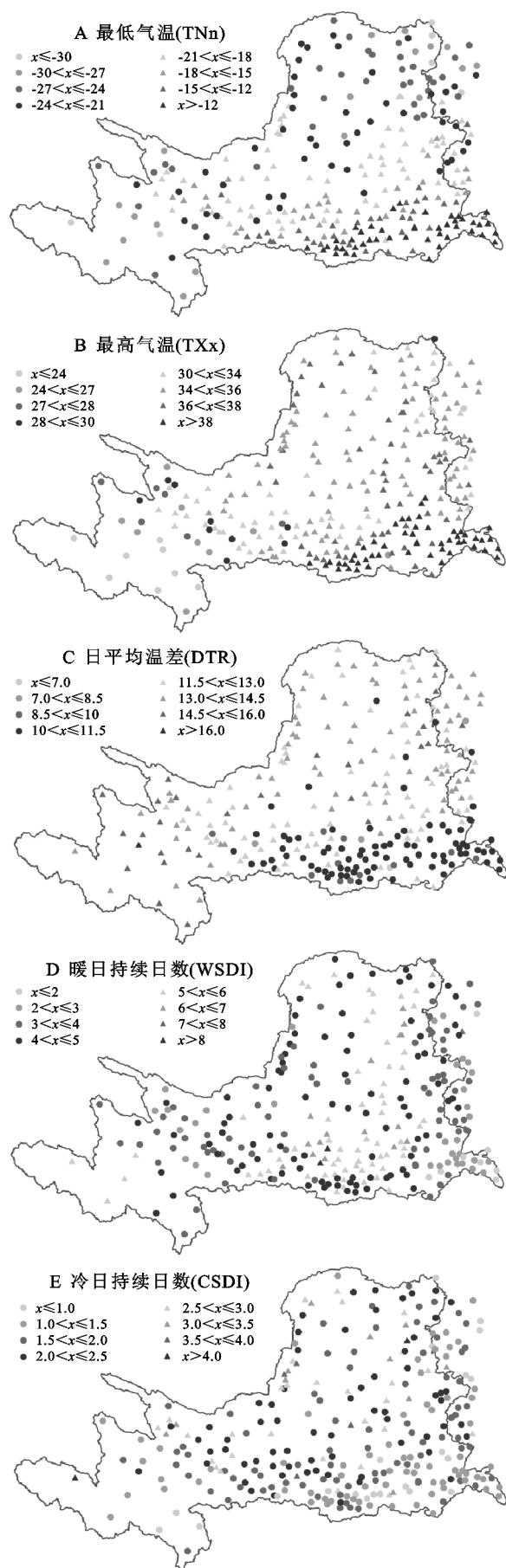


图2 1969—2018年黄河流域最低气温、最高气温、日平均温差、暖日持续日数和冷日持续日数空间分布

整体上,夏天日数SU呈南高北低、东高西低的分布特征(图3A),最大值主要集中在汾河和豫西水系,分别为122,129 d,最小值出现在黄河上游水系,为24.1 d,其他水系为88.3~103 d。生长期长度GSL为218~296 d,由西北向东南逐渐增多,豫西水系最长(275 d),黄河上游最短(192 d)。根据拟合关系,GSL与SU呈正相关($y = 0.3004x + 200.01$, $R^2 = 0.7146$)。霜冻日数FD呈东南低西北高的分布特征,黄河上游水系FD长达195 d,豫西、渭河、汾河水系FD均低于140 d,低值区主要集中在豫西水系,为94 d。结冰日数ID内蒙水系最长(64.6 d),陕北水系次之(38.4 d),豫西水系最短(9.8 d)。根据FD与SU,GSL的拟合关系,FD和SU呈反比($y = -0.819x + 219.82$, $R^2 = 0.7288$),与GSL也呈反比,且相关性更密切($y = -1.1951x + 423.26$, $R^2 = 0.996$)。冷夜、暖夜、冷昼、暖昼日数的空间分布较为均匀,地域差异很小,范围分别在8.4~11.3 d,8.5~11.4 d,7.9~10.7 d,9.3~23.3 d,均值分别在8.9~9.6 d,10.3~10.8 d,9.7~10 d,10.1~11.4 d。

3.2 极端气温的时间变化特征

时间尺度上,1969—2018年黄河流域最高气温、最低气温、暖日持续日数整体呈增加趋势,日平均温差、冷日持续日数呈减少趋势,各水系极端气温指数的变化趋势与整个黄河流域相似,但存在一定的空间差异(图4)。黄河流域内96%站点的TXx增加幅度大多为0~1.25℃/10 a,显著上升的站点主要分布在黄河上游、甘宁、汾河水系以及渭河水系南部,上升幅度为0.25~0.75℃/10 a,黄河上游水系增速最快,均值为0.5℃/10 a,豫西水系增速最慢,均值为0.2℃/10 a。83%站点的TNn呈增加趋势,其中52.9%呈显著增加,黄河上游水系TNn增速最快,均值为0.7℃/10 a,陕北和渭河水系平均增速分别为0.3℃/10 a和0.4℃/10 a,增速最慢,陕北水系南部部分站点呈微弱下降趋势。59.3%站点的DTR呈下降趋势,比升高的站点略多,显著上升的站点主要分布于陕北水系和渭河水系,平均上升速率为0.3,0.2℃/10 a,内蒙水系下降速率最快,均值为-0.3℃/10 a,其他水系为-0.2℃/10 a。DTR受TXx和TNn的共同影响,陕北和渭河水系部分站点TNn呈下降趋势可能是导致DTR显著上升的原因,对陕北地区极端气温指数变化的其他研究中也发现部分站点DTR显著上升^[21]。98.4%站点的WSDI呈增加趋势,其中51.8%显著增加,渭河和甘宁水系增速最大,均值为1.6 d/10 a,豫西水系增速最慢,为0.6 d/10 a。94.9%站点的CSDI呈下降趋势,其中55%显著减少,分布于各个水系,内蒙水系减少速度最快

(-1.1 d/10 a),黄河上游次之(-0.9 d/10 a),豫西水系最慢(-0.6 d/10 a)。

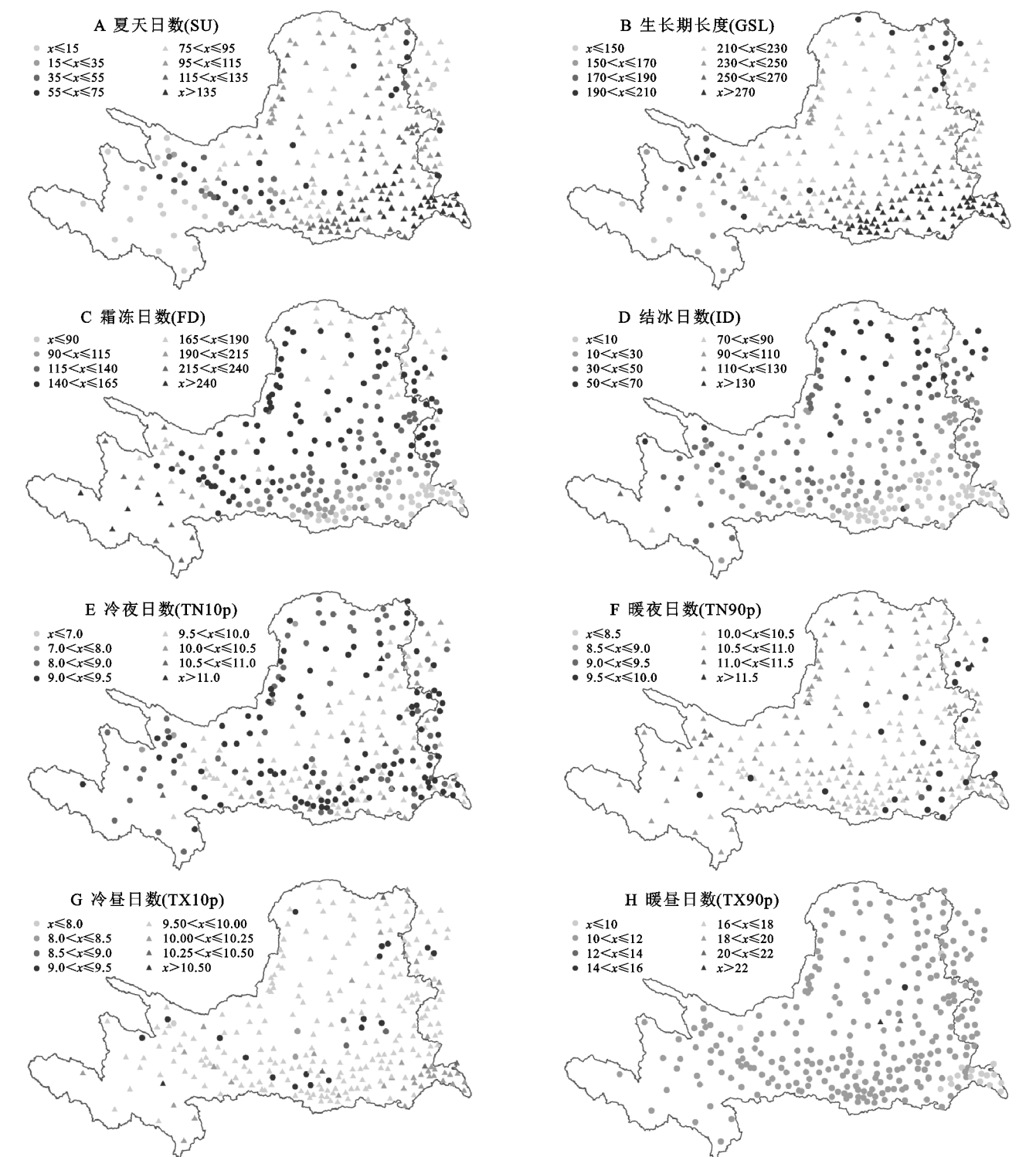
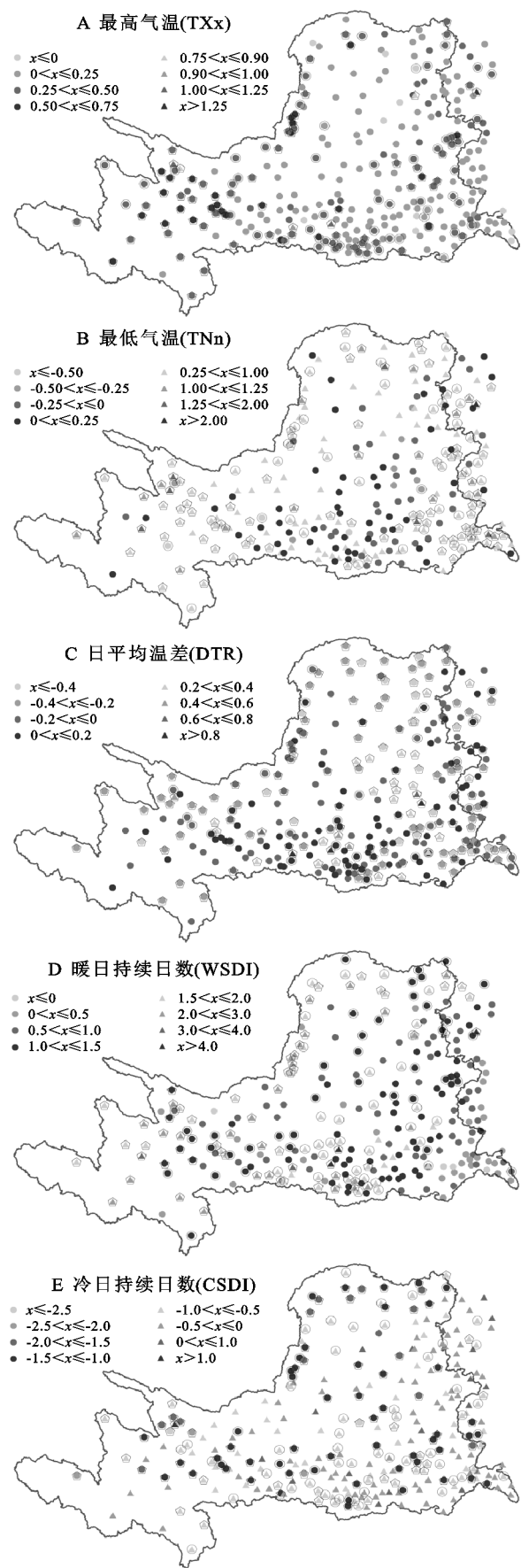


图3 1969—2018年黄河流域夏天日数、生长期长度、霜冻日数、结冰日数、冷夜日数、暖夜日数、冷昼日数和暖昼日数空间分布

各水系夏天日数、生长期长度、暖昼、暖夜日数呈明显增加趋势,霜冻、结冰、冷昼、冷夜日数呈明显下降趋势,与黄河流域变化趋势一致(图5)。甘宁和内蒙水系SU均值分别为4.9、4.5 d/10 a,增速最大,黄河上游、汾河和豫西水系较小,最小为3 d/10 a。甘宁水系GSL均值为5.6 d/10 a,增速最大,渭河和汾河水系为5.4 d/10 a,内蒙水系最小,为4.1 d/10 a。豫西水系FD下降速度最大,均值为 -5.7 d/10 a,黄河上游和内蒙水系为 -5.5 、 -5.4 d/10 a,渭河和陕北水系最小,分别为 -4.4 、 -3.5 d/10 a。汾河水系南部、渭河水系南部、豫西水系ID下降幅度为 $-2 \sim 0$ d/10 a,明显低于其他水系,陕北水系、内蒙水系、黄河上游水系ID下降幅度较大,均值分别为 -3.6 、 -3.5 、 -3.4 d/10 a。



注:○为通过 0.05 显著性水平,◇为通过 0.01 显著性水平,下同。

图 4 1969—2018 年黄河流域最高气温、最低气温、日平均温差、暖日持续日数、冷日持续日数变化趋势

内蒙和黄河上游水系的 TN10p 减少速率最快,为 $-2.7 \text{ d}/10 \text{ a}$,渭河和陕北水系最慢,为 $-1.7, -1.6 \text{ d}/10 \text{ a}$ 。黄河上游、甘宁、内蒙、陕北水系的 TX10p 减少速率最快,均值为 $-1.4 \sim -1.5 \text{ d}/10 \text{ a}$,豫西水系最慢,为 $-0.9 \text{ d}/10 \text{ a}$ 。甘宁和黄河上游水系 TN90p 和 TX90p 增加最快,最大值分别为 $3.1, 2.3 \text{ d}/10 \text{ a}$,陕北水系 TN90p 增速最慢,为 $1.9 \text{ d}/10 \text{ a}$,豫西水系 TX90p 增速最慢,为 $1.3 \text{ d}/10 \text{ a}$ 。整体上,黄河流域西北部的黄河上游水系和甘宁水系 TN10p, TX10p, TN90p, TX90p 减少或增加趋势均最为显著,渭河、陕北和豫西水系 TN10p, TX10p, TN90p, TX90p 虽有所减少或增加,但变化趋势相对黄河流域其他水系较小。

3.3 极端降水的空间分布特征

空间分布上,黄河流域年降水总量、降水强度、最长连续有雨日数、中雨日数、大雨日数均呈从东南向西北递减的空间分布特征,最长连续无雨日数由东南向西北递增(图 6)。黄河流域年降水总量 PRCP-TOT 在 $130 \sim 778 \text{ mm}$,东南部的豫西和渭河水系多年平均降水量分别为 $574, 514 \text{ mm}$,西北部的甘宁和内蒙水系降水量仅为 $247, 266 \text{ mm}$ 。降水强度 SDII 为 $4.4 \sim 12.2 \text{ mm}/\text{d}$,豫西水系最大,为 $8.8 \sim 12.2 \text{ mm}$,均值为 $10 \text{ mm}/\text{d}$,黄河上游和甘宁水系最小,均值分别为 $6, 6.2 \text{ mm}/\text{d}$,SDII 的高值区和低值区的分布与 PRCP-TOT 的空间分布相似,说明降水总量与降水强度可能存在一定的相关关系。内蒙和甘宁水系最长连续无雨日数 CDD 达 97 d ,豫西和渭河水系为 $56, 58 \text{ d}$ 。黄河上游的最长连续有雨日数 CWD 较长,为 $3.8 \sim 9.4 \text{ d}$,均值为 5.7 d ,内蒙和甘宁水系最短,分别为 $3.4, 3.7 \text{ d}$ 。中雨日数 R10 的高值区主要集中在豫西和渭河水系,最高值为 17.8 d ,低值区主要集中在甘宁、内蒙水系,分别为 $7, 8 \text{ d}$ 。大雨日数 R25 的高值区和低值区与中雨日数有相似的空间分布,高值区主要集中在豫西水系,为 5.3 d ,低值区主要集中在甘宁、内蒙、黄河上游水系,最低值为 1.1 d 。黄河流域所有水系内中雨日数均多于大雨日数。

根据黄河流域极端降水指数的相关关系可以得出,CDD,CWD 与 PRCP-TOT 分别呈负相关($y = -6.7606x + 928.52, R^2 = 0.9107$)和正相关关系($y = 113.98x - 107.09, R^2 = 0.6508$),前者与降水量的关系更为密切。R10,R25 均与 PRCP-TOT 呈正相关关系($y = 30.183x + 32.255, R^2 = 0.9894$ 和 $y = 66.166x + 224.85, R^2 = 0.7006$),前者与降水量的关系更为密切。

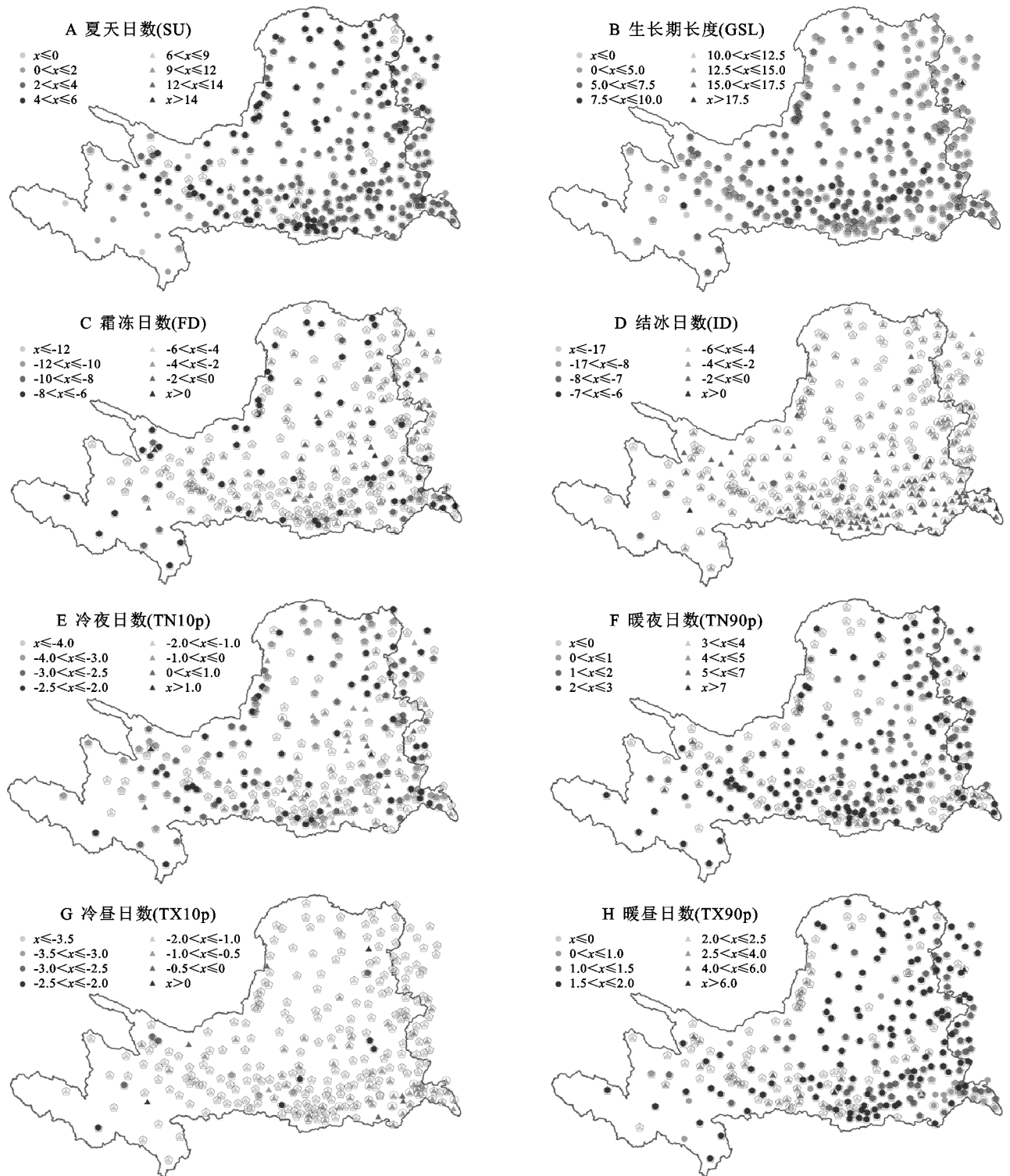


图 5 1969—2018 年黄河流域夏天日数、生长期长度、霜冻日数、结冰日数、冷夜日数、暖夜日数、冷昼日数、暖昼日数变化趋势

日最大降水量 $Rx1day$ 、连续 5 日最大降水量 $Rx5day$ 、强降水量 $R95p$ 、极强降水量 $R99p$ 均呈现出从东南向西北递减的趋势(图 7),高值区均集中于豫西水系, $Rx1day$ 为 48.7~93.2 mm,均值为 64.7 mm; $Rx5day$ 为 79~131.3 mm,均值为 101 mm; $R95p$ 为 106~216 mm,均值为 149 mm; $R99p$ 为 30~75.8 mm,均值为 47.5 mm。甘宁、内蒙和黄河上游水系

$Rx1day$ 较为接近且相对较小,均值分别为 31.4, 32.3, 38.5 mm, $Rx5day$ 分别为 54.9, 47.1, 56.6 mm;甘宁、内蒙水系 $R95p$ 较为接近,为 57.8, 67.1 mm, $R99p$ 为 18.5, 21.4 mm。强降水量和极强降水量与多年平均降水量之间均呈显著的正相关关系($y = 3.6441x + 46.347$, $R^2 = 0.9424$ 和 $y = 11.098x + 65.523$, $R^2 = 0.9001$),且前者与降水量关系更为密切。

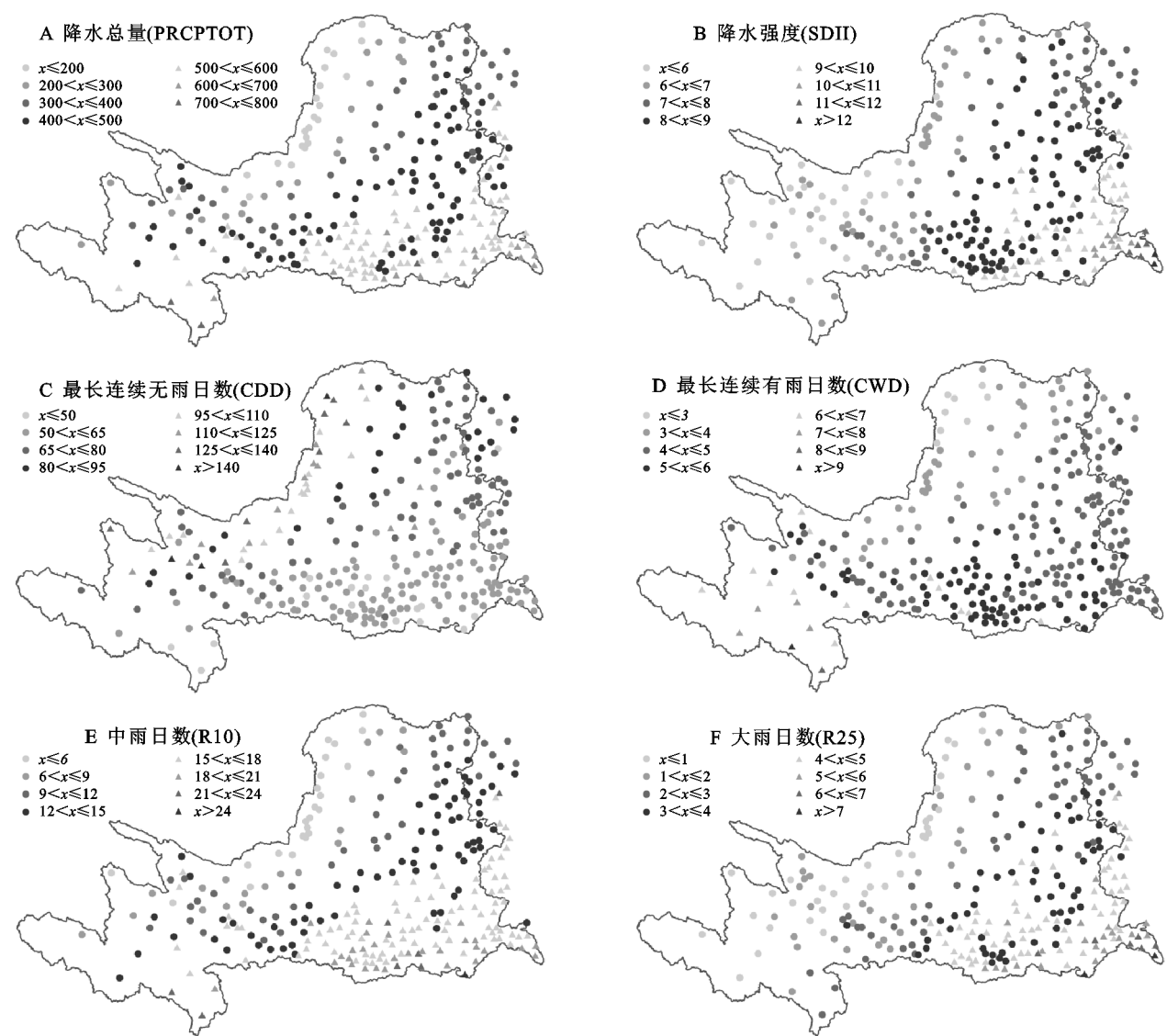


图 6 1969—2018 年黄河流域降水总量、降水强度、最长连续无雨日数、最长连续有雨日数、中雨日数、大雨日数空间分布

3.4 极端降水的时间变化特征

时间尺度上,除最长连续无雨日数外,1969—2018 年黄河流域极端降水指标整体均呈增加趋势,但各水系存在一定的空间差异(图 8)。81% 站点的 PRCPTOT 呈上升趋势,其中 13.7% 在 95% 检验水平上显著上升,主要分布于陕北和黄河上游水系,上升速率为 13~35 mm/10 a,陕北水系的上升速率比黄河上游高 1.1~3.4 mm/10 a,下降的站点主要分布于渭河和豫西水系,速率为 -11~0 mm/10 a,趋势不显著。76.7% 站点的 SDII 呈上升趋势,其中 10.3% 显著上升,速率为 0.2~0.5 mm/10 a,主要分布于陕北水系,下降的站点主要分布于渭河和豫西水系,下降速率大多在 -0.2~0 mm/10 a,趋势不显著。58.1% 站点的 CDD 呈下降的趋势,在各个水系均有分布,极少数(6.8%)呈显著下降,幅度为 -4~0 d/10 a,一半分布于黄河上游水系。58.5% 的站点 CWD 呈上升趋势,其中仅有 4 个站点呈显著上升,3 个分布于黄

河上游。CDD 显著下降和 CWD 显著上升的站点均主要集中在黄河上游水系,表明该区域降水更加均匀。76.3% 站点的 R10 呈上升趋势,其中 12.4% 显著上升,幅度为 0.5~1.1 d/10 a,主要分布于黄河上游和陕北水系。下降的站点主要集中于渭河、汾河和豫西水系,幅度在 -0.5~0 d/10 a,趋势均不显著。70.8% 站点的 R25 呈上升趋势,其中 12.6% 显著上升,幅度为 0.3~0.6 d/10 a,主要分布于陕北水系,陕北和汾河水系下降的站点较少。

Rx1day 和 Rx5day 总体上以增加为主(图 9A—B),站点数分别占总数的 68.4%,66%,其中显著上升的站点分别占 10.4%,7.2%,分布较为分散,没有明显特征。R95p 和 R99p 大多呈增加的趋势(图 9C—D),分别占 73.9%,64.4%,显著上升占 15%,10.4%,R95p 的增加幅度略大,为 5~17 mm/10 a,R99p 增幅为 5~13 mm/10 a,主要分布于黄河上游、陕北和渭河水系,其中陕北水系增幅最大,下降趋势的站点均不显著,分布较

为分散,在陕北水系分布较少。陕北水系 R10, R25, R95p 和 R99p 均表现出显著的增加趋势,与 SDII 变化趋势相吻合,说明陕北地区强降水逐渐增加,降水趋于极端化,与李双双等^[22]的研究结果一致。

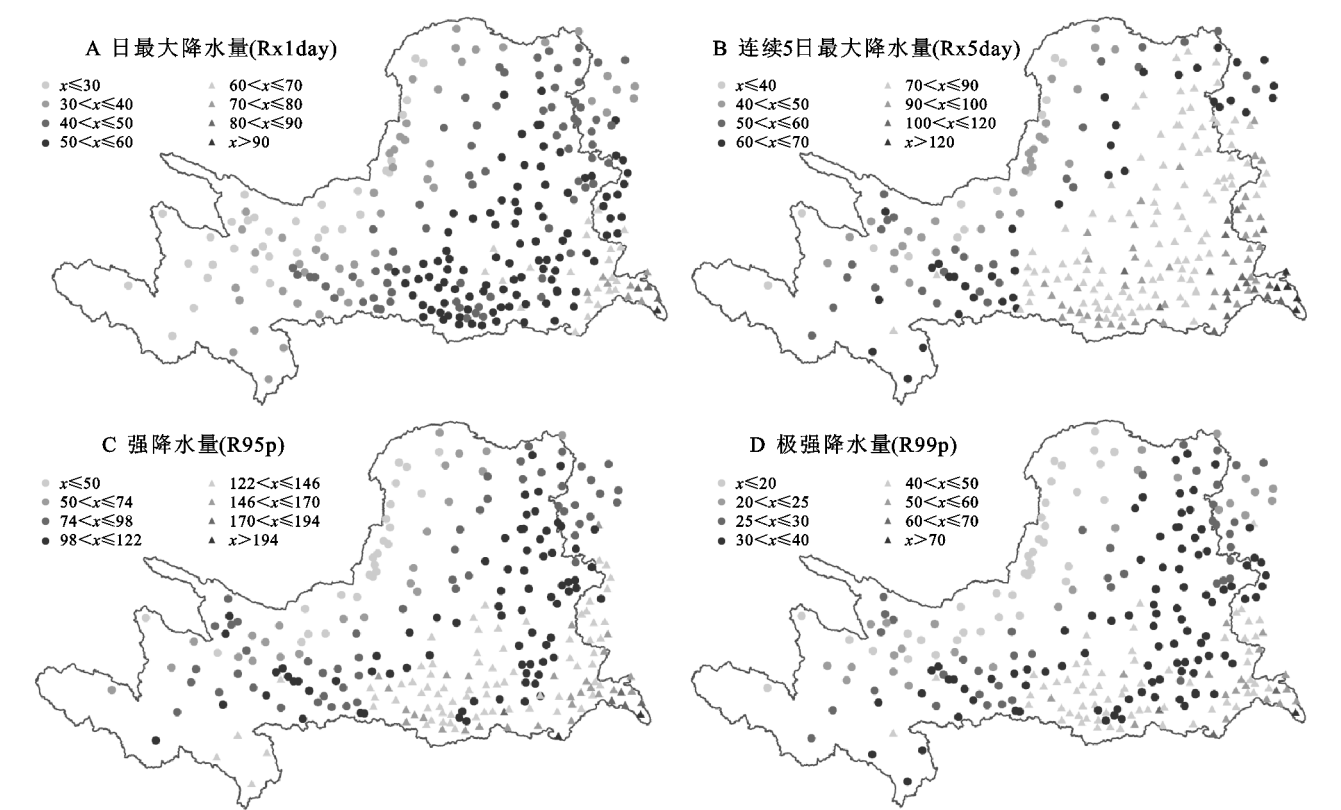


图 7 1969—2018 年黄河流域日最大降水量、连续 5 日最大降水量、强降水量、极强降水量空间分布

4 讨论与结论

4.1 讨论

对黄河流域近 50 a 极端气候事件的时空变化特征研究发现,黄河流域极端最高气温和极端最低气温整体呈增加趋势,极端气温暖指数明显上升,冷指数明显下降,表明黄河流域气温总体呈上升趋势,气温变化与全球变暖趋势一致。极端气温指数变化具有区域差异,流域西北部的甘宁、内蒙和黄河上游水系极端气温指数变化幅度较豫西水系、渭河水系大,增温趋势更明显,与刘吉峰等^[23]部分研究结果一致,表明黄河流域气温变化的区域性差异较大,空间分布为“北高南低”,可能是由于流域西北部分布有山地、高原,海拔较高,对温度变化更为敏感。Liang 等^[24]将黄河流域划分为高海拔地区、西北干旱半干旱地区和东部季风区研究极端气温的变化特征,发现高海拔地区和西北干旱半干旱地区的极端气温指数变化幅度大于东部季风区,北半球副热带高压和北半球极涡这两个主要的大尺度大气环流会显著影响黄河流域的气温变化。日平均温差显著增加的站点主要分布于陕北水系和渭河水系,其他对陕北地区和渭河流域极端气温变化的研究也有相似结论^[25],陕北和渭河水系部分

站点最低气温下降可能是导致日平均温差上升的原因,除最高温度和最低温度外,降水量、日照时数、风速、温室气体排放等也会影响日平均温差^[26]。

除连续无雨日数外,黄河流域内极端降水指标整体均呈增加趋势,Dong 等^[27]研究发现 1960—2017 年黄河流域降水强度、强降水事件(中雨日数、大雨日数)、强降水量和极强降水量呈增加趋势,流域上游连续无雨日数呈减少趋势,与本文部分研究结果一致,Liang 等^[28]发现黄河流域东部季风区极端降水指数呈负趋势,干旱半干旱地区和高海拔地区呈正趋势。极端降水指标趋势变化表现出明显的空间差异性,陕北水系降水量和降水强度呈显著增加趋势,与李双双等^[22]的研究结果一致,表明陕北地区气候呈现暖湿化,半干旱界线向西北方向移动。降水的变化受极端气温的影响,极端温度的升高会导致极端降水事件的发生^[29],黄河上游水系极端气温指标和极端降水指标的变化均较显著,连续无雨日数的显著下降和连续有雨日数的显著上升也说明了黄河上游地区降水量逐渐均衡化,与 Wang 等^[30]部分研究结果相符。

黄河流域极端气候时空变化受地形地貌、大气环流、全球气候环境的共同影响,变化趋势具有明显的

时空差异,本文仅对近 50 a 极端气温和极端降水的变化总趋势和区域特征进行分析研究,对发生极端气

候事件的驱动因素还需进一步研究,进而提出更全面的应对极端气候变化的措施。

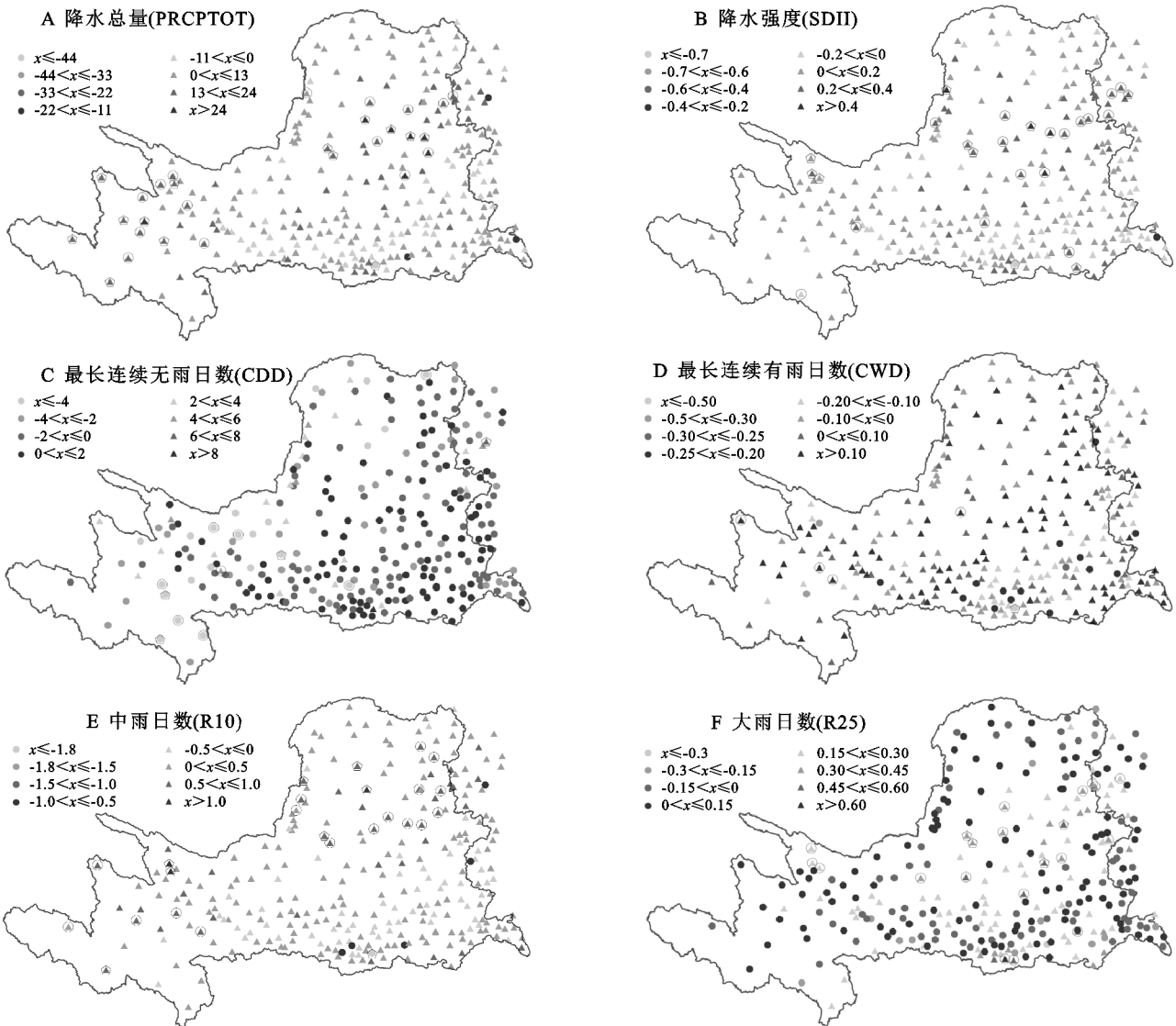


图 8 1969—2018 年黄河流域降水总量、降水强度、最长连续无雨日数、最长连续有雨日数、中雨日数、大雨日数变化趋势

4.2 结论

(1) 空间分布上,黄河流域最低气温、最高气温、夏天日数和生长期长度整体上呈东南高西北低的分布特征,高值区主要集中于渭河、汾河和豫西水系,低值区主要集中于黄河上游水系和内蒙水系,日平均温差、霜冻日数和结冰日数呈相反的分布特征;暖日持续日数和冷日持续日数的高值区主要集中在陕北和内蒙水系,低值区主要集中在豫西水系,渭河水系暖日持续日数较长,冷日持续日数较短,甘宁水系呈相反趋势;冷夜日数、暖夜日数、冷昼日数和暖昼日数空间分布较均匀,区域差异很小。

(2) 时间尺度上,黄河流域最低气温、最高气温、暖日持续日数、夏天日数、生长期长度、暖夜日数、暖昼日数呈增加趋势,冷日持续日数、霜冻日数、结冰日

数、冷夜日数、冷昼日数呈减少趋势,各水系极端气温指数变化趋势与黄河流域相似,但存在一定的空间差异,黄河上游和甘宁水系冷夜日数、冷昼日数、暖夜日数、暖昼日数减少或增加趋势均最显著,黄河上游水系最低气温和最高气温增速最大,甘宁水系暖日持续日数、夏天日数和生长期长度增速最大,内蒙水系日平均温差、冷日持续日数和结冰日数下降速度最大,日平均温差显著上升的站点主要分布于陕北水系和渭河水系。

(3) 黄河流域极端降水指数年降水总量、降水强度、中雨日数、大雨日数、日最大降水量、5 日最大降水量、强降水量、极强降水量均呈从东南向西北递减的空间分布特征,高值区主要集中于豫西水系,低值区主要集中在甘宁、内蒙和黄河上游水系,具有明显

的空间差异性;连续有雨日数的最大值集中于黄河上游水系,最小值集中于甘宁和内蒙水系;连续无雨日数呈从东南向西北递增的趋势,甘宁和内蒙水系较长,豫西和渭河水系较短。

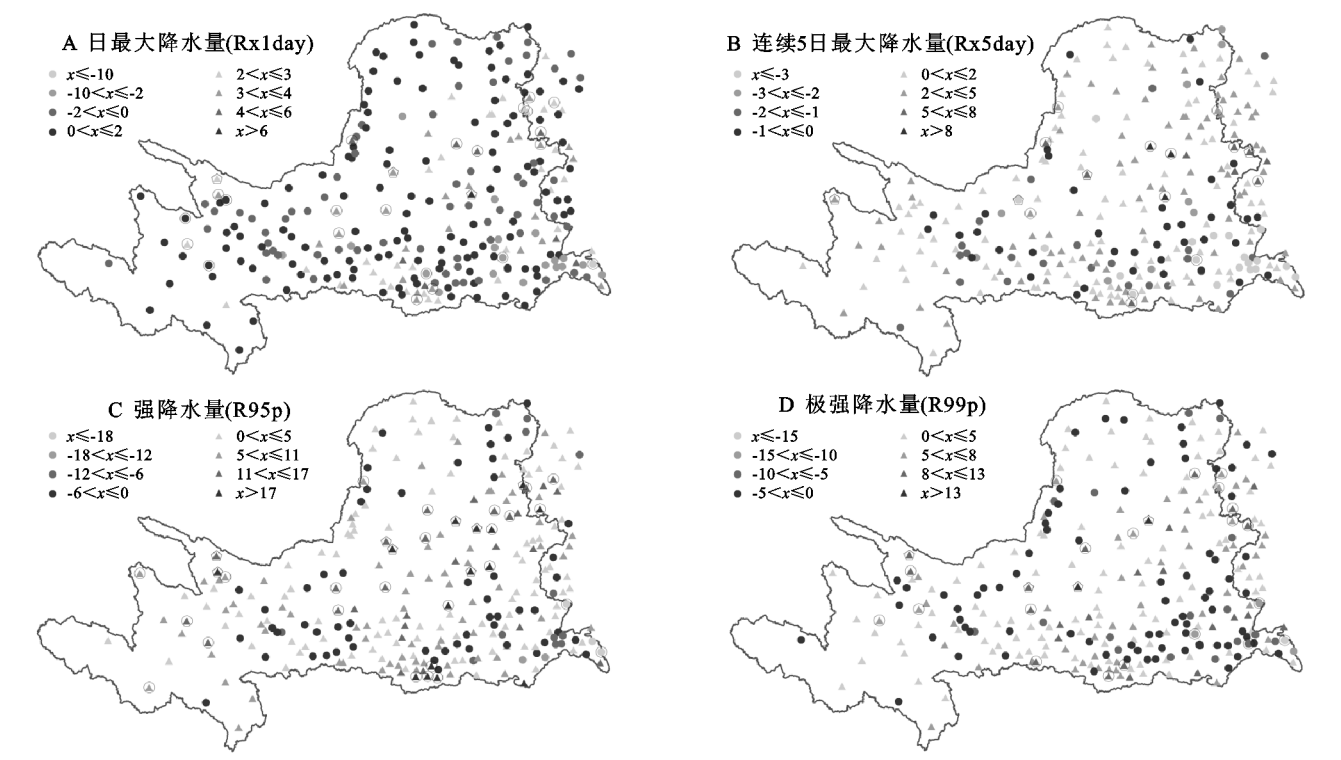


图 9 1969—2018 年黄河流域日最大降水量、连续 5 日最大降水量、强降水量、极强降水量变化趋势

(4) 除连续无雨日数外,黄河流域内站点的极端降水指标大多数均呈增加趋势,显著上升的站点主要集中于黄河上游水系和陕北水系,陕北水系增加趋势最显著,呈下降趋势的站点主要分布于渭河和豫西水系,且趋势均不显著;连续无雨日数显著下降和连续有雨日数显著上升的站点均主要集中在黄河上游水系。

参考文献:

[1] 胡宜昌,董文杰,何勇.21 世纪初极端天气气候事件研究进展[J].地球科学进展,2007,22(10):1066-1075.

[2] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [R]. New York: Cambridge University Press,2007.

[3] Vincent L A, Mekis É. Changes in daily and extreme temperature and precipitation indices for Canada over the twentieth century[J]. Atmosphere-Ocean, 2006,44(2):177-193.

[4] Aguilar E, Peterson T C, Obando P R, et al. Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961—2003[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2005, 110(D23).DOI:10.1029/2005JD006119.

[5] Manton M J, Della-Marta P M, Haylock M R, et al. Trends 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.

[6] Frich P, Alexander L V, Della-Marta P, et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century [J]. Climate Research, 2002,19(3):193-212.

[7] 王冀,蒋大凯,张英娟.华北地区极端气候事件的时空变化规律分析[J].中国农业气象,2012,33(2):166-173.

[8] 齐月,陈海燕,房世波,等.1961—2010 年西北地区极端气候事件变化特征[J].干旱气象,2015,33(6):963-969.

[9] 刘琳,徐宗学.西南 5 省市极端气候指数时空分布规律研究[J].长江流域资源与环境,2014,23(2):294-301.

[10] 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.

[11] 黄强,陈子荣.全球变暖背景下珠江流域极端气温与降水事件时空变化的区域研究[J].地球科学进展,2014, 29(8):956-967.

[12] 陈效述,刘立,尉杨平.1961—2005 年黄河流域极端气候事件变化趋势[J].人民黄河,2011,33(5):3-5,149.

[13] 张克新,董小刚,廖空太,等.1960—2017 年黄河流域极端气温的季节变化特征及其与 ENSO 的相关性分析[J].水土保持研究,2020,27(2):185-192.

[14] 吴灿,赵景波,王格慧.黄河流域极端气温指数的气候演变特征分析[J].中国农业气象,2015,36(5):525-535.

[15] 贺振,贺俊平.1960—2012 年黄河流域极端降水时空变化[J].资源科学,2014,36(3):490-501.

[16] 赵翠平,陈岩,王卫光,等.黄河流域近 50 a 极端降水指数的时空变化[J].人民黄河,2015,37(1):18-22.

[17] 孙扬波,孙凤,刘吉峰,等.黄河流域应对气候变化的需

- 求分析[J].人民黄河,2009,31(4):16-18,124.
- [18] You Q, Kang S, Aguilar E, et al. Changes in daily climate extremes in China and their connection to the large scale atmospheric circulation during 1961—2003 [J]. *Climate Dynamics*, 2011,36(11/12):2399-2417.
- [19] Soltani M, Laux P, Kunstmann H, et al. Assessment of climate variations in temperature and precipitation extreme events over Iran[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016,126(3):775-795.
- [20] Zhang X, Yang F. RCLim Dex(1.0) user manual[Z]. Ontario Canada:Climate Research Branch Environment Canada Downsview, 2004.
- [21] 王钰,冯起.陕北地区 1960—2013 年极端气温指数[J]. 中国沙漠,2016,36(4):1097-1105.
- [22] 李双双,孔锋,韩鹭,等.陕北黄土高原区极端降水时空变化特征及其影响因素[J].地理研究,2020,39(1):140-151.
- [23] 刘吉峰,王金花,焦敏辉,等.全球气候变化背景下中国黄河流域的响应[J].干旱区研究,2011,28(5):860-865.
- [24] Liang K, Bai P, Li J, et al. Variability of temperature extremes in the Yellow River basin during 1961—2011 [J]. *Quaternary International*, 2014,336(26):52-64.
- [25] 姬霖,段克勤.1960—2017 年渭河流域极端气温变化及其对区域增暖的响应[J].地理科学,2020,40(3):466-477.
- [26] 曹言,王杰,柴素盈,等.1970—2014 年云南省气温日较差变化特征及影响因子[J].水土保持研究,2018,25(6):100-108.
- [27] Dong X G, Zhang S T, Zhou J J, et al. Magnitude and Frequency of Temperature and Precipitation Extremes and the Associated Atmospheric Circulation Patterns in the Yellow River Basin (1960—2017), China [J]. *Water*, 2019,11(11).DOI10.3390/w11112334.
- [28] Liang K, Liu S, Bai P, et al. The Yellow River basin becomes wetter or drier: The case as indicated by mean precipitation and extremes during 1961—2012[J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2015,119(3/4):701-722.
- [29] 曹晴,郝振纯,傅晓洁,等.1960—2017 年中国极端气候要素时空变化分析[J].人民黄河,2020,42(2):11-17.
- [30] Wang W G, Shao Q X, Yang T, et al. Changes in daily temperature and precipitation extremes in the Yellow River Basin, China[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2013,27(2):401-421.

~~~~~  
(上接第 220 页)

- [23] Martens B, Miralles D G, Lievens H, et al. GLEAM v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture[J]. *Geoscientific Model Development*, 2017, 10(5):1903-1925.
- [24] Rodríguez-Rodríguez D, Bomhard B. Mapping direct human influence on the world's mountain areas [J]. *Mountain Research & Development*, 2012,32(2):197-202.
- [25] Yan J, Jia S, Lv A, et al. Water resources assessment of China's transboundary river basins using a machine learning approach [J]. *Water Resources Research*, 2019,55(1):632-655.
- [26] Breiman L. Random forests[J]. *Machine Learning*, 2001,45(1):5-32.
- [27] 周梦甜,李军,朱康文,等.近 15 a 新疆不同类型植被 NDVI 时空动态变化及对气候变化的响应[J].干旱区地理,2015,38(4):779-787.
- [28] 施雅凤,沈永平,李栋梁,等.中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J].第四纪研究,2003,23(2):152-164.
- [29] 赵鹏,陈桃,王茜,等.气候变化和人类活动对新疆草地生态系统 NPP 影响的定量分析[J].中国科学院大学学报,2020,37(1):51-62.
- [30] 张强,肖风劲,牛海山,等.我国北方植被指数对土壤湿度的敏感性分析[J].生态学杂志,2005,24(7):715-718.

~~~~~  
(上接第 230 页)

- [17] Chadwick O A, Matson P A. Carbon cycling and soil carbon storage in mesic to Wet Hawaiian Montane Forests[J]. *Ecology*, 2001,82(11):3182-3196.
- [18] 孙海燕,万书波,李林,等.贺兰山西坡不同海拔梯度土壤活性有机碳分布特征及影响因子[J].水土保持学报,2014,28(4):194-199.
- [19] 刘洋洋,王倩,杨悦,等.2000—2013 年中国植被碳利用效率(CUE)时空变化及其与气象因素的关系[J].水土保持研究,2019,26(5):278-286.
- [20] 杨佩国.基于土壤水分分布式动态模型的沙质荒漠化地区生产力估算[D].北京:中国农业大学,2004.
- [21] 张俊佩.贵州石漠化地区主要造林树种耐旱特性及适应性评价[D].北京:中国林业科学研究院,2009.
- [22] 聂莹莹.阳坡—阴坡生境梯度上植物群落物种多样性和地上生物量的变化特点[D].兰州:兰州大学,2010.
- [23] 刘旻霞,刘洋洋,陈世伟,等.青藏高原东缘高寒草甸坡向梯度上植物光合生理特征研究[J].土壤与作物,2015,4(3):10-18.
- [24] 刘旻霞.亚高寒草甸不同坡向植物光合生理和叶片形态差异[J].生态学报,2017,37(24):8526-8536.