

气候变暖背景下中亚地区极端降水事件变化及其对植被覆盖的影响

陆晴¹, 刘根林¹, 闫冰², 焦琳琳³, 赵东升⁴

(1.东华理工大学 测绘工程学院, 南昌 330013; 2.江西省科学院 能源研究所, 南昌 330096; 3.华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063210; 4.中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要:为了解气候变暖背景下中亚地区极端降水事件的时空变化特征及其对植被覆盖的影响,基于 1982—2014 年 GLDAS 气象资料和 GIMMS NDVI 数据,采用线性趋势、滑动平均、M-K 非参数检验、相关分析等方法分析了中亚地区降水极值时空变化以及和 NDVI 之间的关系。结果表明:近 33 a 来,中亚地区生长季气温呈显著上升趋势,各极端降水指数和降水量均呈弱增加趋势。除持续干旱日数(CDD)外,其他极端降水指数在 1990s 发生了气候突变,进入 21 世纪以来,极端降水频度和强度较之前更大,降水更为集中。极端降水指数多年均值空间分布特征与降水量较为一致,表现为从西南到东北呈逐渐增加趋势,除 CDD 外,各极端降水指数呈显著增加趋势的区域范围大于降水量。生长季 NDVI 与 5 日最大降水量(RX_{5day})、降水强度(SDII)、中雨日数(R_{10})、大雨日数(R_{20})、极强降水量(R_{99p})呈极显著正相关($p < 0.01$),与 CDD 和生长季均温(TEMP)呈负相关($p > 0.05$),降水为中亚地区植被生长的主要控制因子。生长季 NDVI 与除 CDD 之外的各极端降水指数呈显著正相关的区域主要集中在降水量高值区。

关键词:气候变化; 极端降水指数; NDVI; 气温; 中亚地区

中图分类号:P46; Q948.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)04-0226-10

Variation of Extreme Precipitation Events and Their Impacts on Vegetation Coverage in Central Asia Under Climate Warming

LU Qing¹, LIU Genlin¹, YAN Bing², JIAO Linlin³, ZHAO Dongsheng⁴

(1.School of Geomatics, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2.Institute of Energy, Jiangxi Academy of Science, Nanchang 330096, China; 3.College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China; 4.Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: In order to understand the spatiotemporal variation characteristics of extreme precipitation events in Central Asia under the background of climate warming, based on the data of GLDAS and GIMMS NDVI from 1982 to 2014, linear trend, moving average, M-K non-parametric test and correlation analysis were used in this research. The results showed that the temperature of growing season in Central Asia has increased significantly in the past 33 years, and the precipitation and each extreme precipitation index in growing season were weakly increasing; in addition to the continuous dry days (CDD), other extreme precipitation indexes experienced a sudden change in the 1990s; since the beginning of the 21st century, the frequency and intensity of extreme precipitation have been greater than before, and precipitation has become more concentrated; the spatial distribution characteristics of the average extreme precipitation index were consistent with the precipitation, which showed a gradual increasing trend from southwest to northeast; except for CDD, the area of the extreme precipitation index showing a significant increase trend was larger than that of the precipitation; the mean NDVI value in the growing season was significantly positively corre-

收稿日期:2020-06-04

修回日期:2020-09-15

资助项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA20020202);江西省科学院重点项目(2018-YZD2-07);东华理工大学博士启动资助项目(DHKB2017150)

第一作者:陆晴(1986—),女,江西高安人,讲师,博士,主要从事气候变化及土地生态效应研究。E-mail:luqing_0920@126.com

通信作者:赵东升(1978—),男,黑龙江肇源人,副研究员,博士,硕士生导师,主要从事气候变化的影响及其适应研究。E-mail:zhaods@igsnrr.ac.cn

lated with the extreme precipitation indexes other than CDD, which was extremely significantly positively correlated with maximum precipitation for 5 consecutive days (RX_{5day}), precipitation intensity (SDII), number of heavy precipitation days (R_{10}), number of very heavy precipitation days (R_{20}), extremely wet days (R_{99p}) ($p < 0.01$), and was negatively correlated with CDD and the average temperature of the growing season (TEMP). Precipitation is the main control factor for vegetation growth in Central Asia. The regions where NDVI and the extreme precipitation indexes other than CDD were significantly positively correlated mainly concentrated in areas with high precipitation.

Keywords: climate change; extreme precipitation index; NDVI; temperature; Central Asia

当前,全球气候变化以气候变暖为主要特征,1880—2012年,全球平均地表温度升高了 0.85°C ,特别是近半个世纪以来,升温速率约为1880年以来的两倍^[1-2]。相关研究表明,全球气候变暖及其导致的水循环改变将加剧极端气候事件发生的频率和强度^[3-4],并将进一步对自然生态系统和人类社会环境产生重大影响^[5-7]。近期在全球发生的极端气候事件对植被生长的影响研究有助于预估植被对气候极值变化的弹性和敏感性^[8]。在未来气候变化下,极端气候事件将进一步对各生态系统产生重要影响。

归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)经常用于表征植被覆盖、生长状况和监测植被动态变化^[9],以及气候变化对植被影响等方面的研究^[10]。气温和降水通常被认为是植被分布的最重要影响因子^[11],与气候平均态相比,极端气候对植被覆盖的影响具有敏感度高、破坏性强、地域差异性更突出等特点^[12]。Li等^[13]研究了内蒙古6个子区对极端气候指数的响应,结果显示,NDVI与极端降水和极端低温的变化趋势一致,与极端高温则相反。Liu等^[14]基于GIMMS NDVI数据分析了全球植被变化及其对极端气候的响应,表明在亚马逊及半干旱、半湿润地区植被动态变化最为显著,对极端降水事件更为敏感。

在湿润的温带或寒温带地区,气温是植被生长的主要限制因子,而在干旱半干旱地区或者干湿季差异较明显地区,则降水对植被活动具有显著的胁迫性^[13,15-16]。中亚地区地处干旱半干旱地带,地形结构和气候状况的相互作用形成了该地区较为复杂的景观格局,生态系统极其脆弱,对气候变化响应非常敏感^[17-18]。中亚地区近130 a增温幅度达 $0.073^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ^[19],降水在1980s急剧增加,气候变化导致中亚地区NDVI呈上升趋势,灌丛分布面积增加^[20]。Zhang等^[21]指出,中亚地区极端降水指数除持续干旱日数(CDD)外,均呈显著增加趋势,特别是在东部山地和丘陵区。Xu等^[22]研究表明中亚地区水是区域植被变化的主要气候驱动因素,夏季干旱事件导致大量植被退化,其中草原对水分胁迫

最为敏感。可见,对中亚地区的气温、降水、极端气候变化及其对植被生长的影响已有研究,该地区植被生长对降水敏感程度较高,而生长季极端降水对中亚地区植被覆盖影响研究较缺乏。

本文利用线性趋势法、Mann-Kendall非参数检验、相关分析等方法,揭示1982—2014年中亚地区生长季极端降水事件、NDVI时空变化特征以及二者之间的相关性,以期能够加深了解全球极端气候事件长期变化的地区差异性及其对植被覆盖对极端气候事件变化响应的区域性,可以为干旱半干旱地区水资源管理、自然灾害的预防和减缓以及未来气候变化预测提供帮助,有利于区域生态保护和经济发展。

1 研究区概况

中亚地区(35.1° — 55.5°N , 46.4° — 87.4°E)包括5国,分别为哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦、土库曼斯坦和塔吉克斯坦。中亚地区地处亚欧大陆腹地,远离海洋,为干旱、半干旱气候,是北半球温带面积最大的干旱区^[23]。地势东南高、西北低,东部山区最大海拔高度超过 $7\ 000\text{ m}$ ^[16],属于典型的山盆结构。受地势差异影响,中亚地区生态系统类型包括山地、绿洲和荒漠,对全球气候变化响应具有一定的特殊性和复杂性,主要土地利用类型为草原、裸地或低植被覆盖地、开放灌丛等。

中亚地区降水主要依赖于大西洋湿润气团,年际变化格局不同于亚洲季风区^[24]。受极地急流和阿拉伯海气流扰动影响,季节降水具有一定的不确定性,再者,绿洲湿岛效应和副热带急流北移效应共同作用形成了中亚地区的复杂气候变化格局。1982—2014年中亚地区多年月NDVI、降水、气温均值变化特征见图1,中亚地区气温1—12月呈现先增大后减小趋势,7月达到最大值,为 23.5°C ;降水在月度分配上波动较大,最大值和最小值分别发生在4月(28.5 mm)和9月(11.4 mm),春季降水量约占全年总降水量的32%,总体表现为雨热不同期。植被生长主要分布在4—10月,集中分布在5—9月,NDVI值在6月达到

最大(0.33), 2月最小(0.10)。

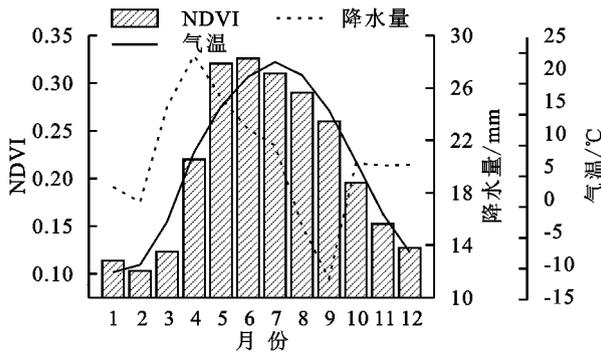


图 1 1982—2014 年中亚地区多年月 NDVI、降水、气温均值变化特征

2 数据来源和研究方法

2.1 数据来源及预处理

2.1.1 气候数据 本文采用的日均温和日降水气候数据为全球陆面数据同化系统(Global Land Data Assimilation System)提供的 GLDAS-2.0 版本数据集,空间分辨率 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,时间分辨率 1 d,时间长度序列为 1982—2014 年^[25-26]。

2.1.2 NDVI 数据 本文使用的 NDVI 数据为 Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS)提供的时间序列为 1982—2014 年的 GIMMS

NDVI 3g.v1.0 数据集,是 GIMMS NDVI 3g 数据的升级产品,在 3 g 数据集基础上进行了降噪处理。时间分辨率 15 d,空间分辨率 $0.083^{\circ} \times 0.083^{\circ}$,数据为 nc 格式,每个 nc4 文件包含 6 个月 NDVI 数据,共 12 景(https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/3_g.v1/)。

为进一步消除大气气溶胶、云、阴影、太阳高度角等对数据的影响^[27],采用最大合成法 MVC(maximum Value Composites)生成月尺度 NDVI 值。本文生长季为 4—10 月^[11],将生长季各月 NDVI 求平均获得每年生长季 NDVI 均值。1982—2014 年生长季 NDVI 求平均,获得多年生长季 NDVI 均值栅格数据,为排除非植被因素的影响,剔除 NDVI 小于 0.05 的像元^[28],得到中亚地区的植被覆盖区域。

2.2 研究方法

2.2.1 极端降水指数定义与计算 世界气象组织工作组的气候变化检测和指数专家组(ETCCDI)试图通过确定一套极端气候指数来促进对极端气候的分析,这些气候指数对温度和降水统计数据进行了全面概述,尤其侧重于极端方面^[29]。到目前为止,这些极端气候指数已被研究者广泛使用,不仅适用于全球研究^[30],也适用于区域研究^[31-33]。本文采用了其中 10 个极端降水指数(表 1)。

表 1 极端降水指数的定义

缩写	极端降水指数	定义	单位
RX _{1day}	1 日最大降水量	生长季内最大 1 日降水量	mm
RX _{5day}	5 日最大降水量	生长季内连续 5 日最大降水量	mm
PRCP _{TOT}	总降水量	生长季内湿润日的总降水量(日降水量 ≥ 1.0 mm)	mm
SDII	降水强度	生长季内降水量与降水日数(日降水量 ≥ 1.0 mm)比值	mm/d
R ₁₀	中雨日数	生长季内日降水量(PRCP) ≥ 10 mm 的日数	d
R ₂₀	大雨日数	生长季内日降水量(PRCP) ≥ 20 mm 的日数	d
CDD	持续干旱日数	生长季内日降水量 < 1.0 mm 持续天数的最大值	d
CWD	持续湿润日数	生长季内日降水量 ≥ 1.0 mm 持续天数的最大值	d
R _{95p}	强降水量	生长季内日降水量 $> 95\%$ 分位值的总降水量	mm
R _{99p}	极强降水量	生长季内日降水量 $> 99\%$ 分位值的总降水量	mm

2.2.2 变化趋势及相关分析计算方法 为了解近 33 a 中亚地区生长季气温、降水量、极端降水以及 NDVI 的变化趋势,采用线性回归方法计算了各指标的变化速率。利用 Mann-Kendall 非参数检验方法分析了中亚地区生长季气温、降水量、极端降水、NDVI 在时间序列上的突变现象。基于 SPSS 23.0 和 MATLAB 2017b 软件,采用相关分析方法,分析时间、空间上中亚地区各极端降水指数和植被覆盖的相互关系。

3 结果与分析

3.1 生长季气温变化特征

1982—2014 年中亚地区多年生长季均温在空间上表现为从东北到西南逐渐增温趋势(图 2A),最大

值达 24.79°C ,高温区域主要分布在土库曼斯坦地区,属于典型的温带荒漠气候;低温区主要分布在高海拔山地和丘陵区,包括天山一带、阿尔泰山区域及哈萨克丘陵。中亚地区增温显著,升温幅度达 $0.43^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ($p < 0.001$)(图 2B)。通过 M-K 非参数检验方法,中亚地区生长季均温在 2003 年发生突变,2003 年以前生长季气温上升趋势较为缓慢($0.21^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$),2003 年之后为较快增温时期($0.53^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)。近 33 a 来,中亚地区生长季气温变化速率表现出一定的空间差异(图 2C),约 85% 的区域呈现显著增温趋势($p < 0.05$,显著性分布见图 2D),主要分布在中亚地区的西南部。最大增温速率达 $0.69^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ($p < 0.01$),分布在哈萨克斯坦的西部地区。

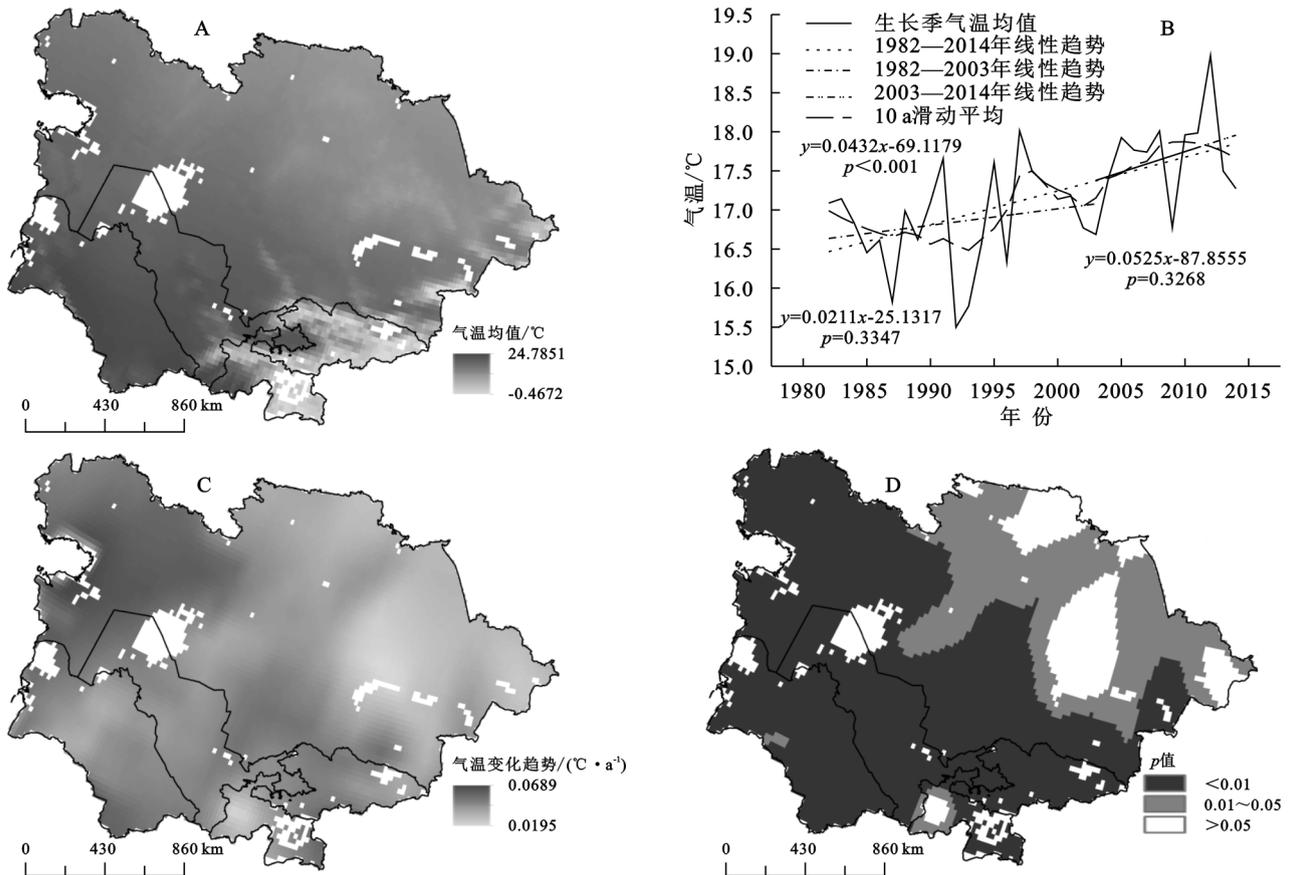


图2 1982—2014年中亚地区生长季气温时空变化特征

3.2 生长季降水极值变化特征

3.2.1 生长季降水量变化特征 中亚地区多年生长季降水量均值从西南到东北呈现逐渐增加趋势(图3A),西南部地区最小值仅为29.87 mm,最大值分布在阿尔泰山地区,达422.3 mm。近33 a,中亚地区生长季降水量均值为142.0 mm,多年来呈波动变化态势,变化速率仅为2.3 mm/10 a($p>0.05$);通过10 a滑动平均曲线可知(图3B),中亚地区生长季降水量在1982—1990年、1997—2002年、2008—2014年呈现增加趋势,在1990—1997年、2002—2008年为减少趋势。图3C显示,近33 a中亚地区大部分地区降水量呈增加趋势,约占总面积的71.8%,最大增加速率达20.5 mm/10 a,但通过显著性分析发现(图3D),仅有小部分地区生长季降水量呈显著增加趋势。

3.2.2 生长季极端降水事件时间变化 1982—2014年中亚地区生长季各极端降水指数多年均值及变化速率见表2,各指数数值多年来均呈增加趋势,但变化趋势不显著。1日最大降水量(RX_{1day})在2003年发生突变,2003年之后增量更为明显,而5日最大降水量(RX_{5day})突变年份发生在1998年,1998年之后均值更大但存在减小趋势,变化速率为 -0.32 mm/10 a。总降水量($PRCP_{TOT}$)和降水强度($SDII$)的突变年份也出现在1998年,突变年份之后时间段内降水总量和强度均值较之突

变年份之前均有增加,分别增加了约10,0.3 mm;突变年份之后降水总量和强度变化速率均呈减小趋势。中雨日数(R_{10})多年均值约为3 d,在1998年突变前后速率均为减少趋势,1998年后均值较大;大雨日数(R_{20})变化可分为3个阶段:1982—1998年、1999—2007年和2008—2014年,均值分别为0.513,0.646,0.604 d,1999—2007年均值最大,但在该阶段内存在减小趋势,变化速率为 -0.23 d/10 a。持续干旱日数(CDD)的多年均值为50 d,而持续湿润日数(CWD)仅为2.88 d,且CDD的增加速率大于CWD;CDD不存在突变点,CWD在1993年发生突变,突变后均值和变化速率较突变前均变小,表明中亚地区持续干旱时间更长,降水更为集中。强降水量(R_{95p})和极强降水量(R_{99p})的突变年份均发生在1999年,后期强降水量均值更大,但是变化趋势呈逐渐降低。

综合来看,大部分极端降水指数在20世纪90年代产生突变,且大多数发生在1998年和1999年,表明极端降水事件在20世纪末前后有较大变化,具体表现为表征降水总量、降水强度的指数在21世纪来多年均值大于20世纪,但是表征降水日数的CWD多年均值则为变小,说明21世纪以来中亚地区生长季降水更为集中。21世纪以来,虽然降水总量和降水强度更大,但是变化速率总体呈逐渐减小趋势。

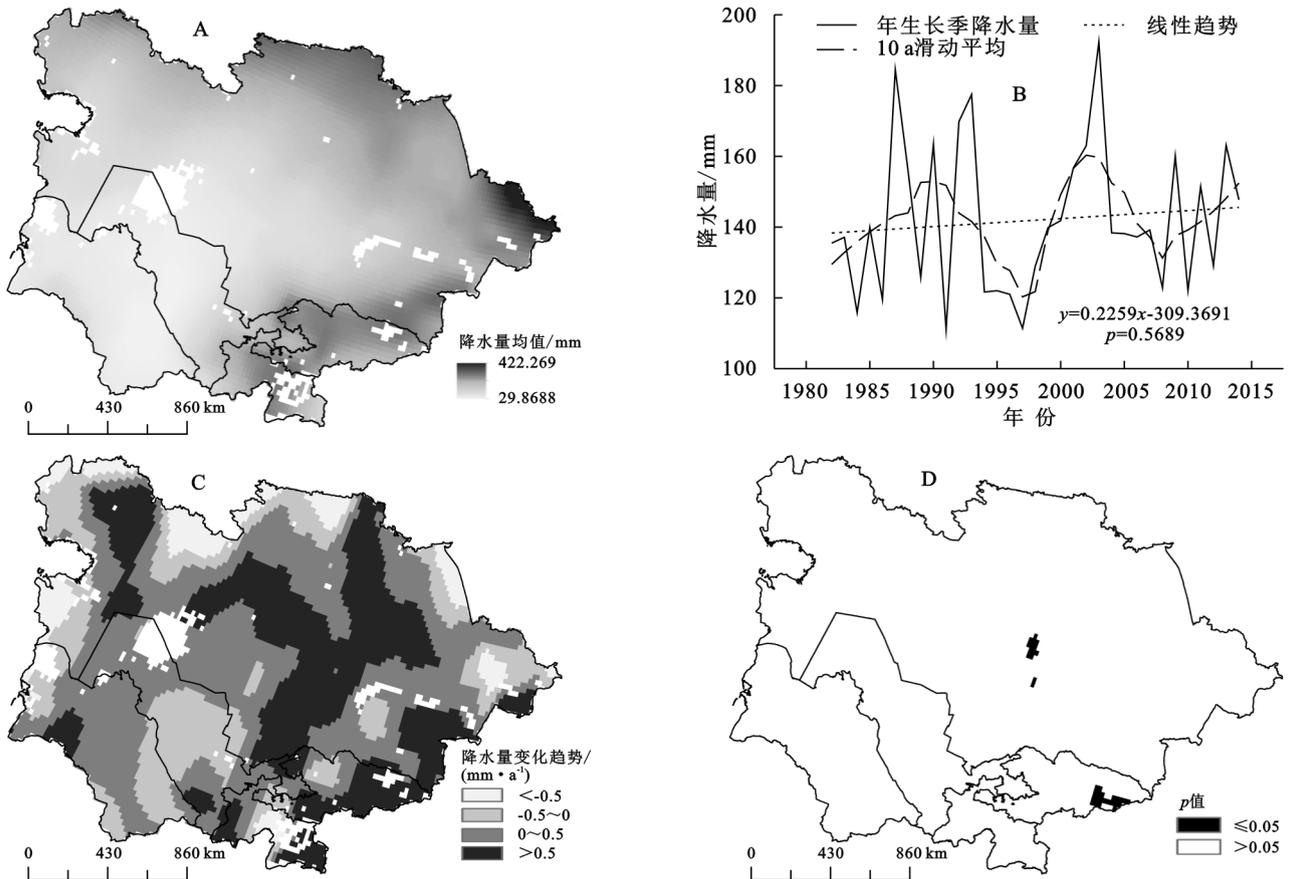


图 3 1982—2014 年中亚地区生长季降水量时空变化特征

表 2 1982—2014 年中亚地区生长季极端降水事件时间变化特征

极端降水指标	多年均值	变化趋势	突变年份	时段	均值	变化趋势
RX _{1day}	18.785 mm	0.085 mm/a	2003	1982—2003	18.603 mm	0.186 mm/a
				2004—2014	19.148 mm	0.220 mm/a
RX _{5day}	26.423 mm	0.098 mm/a	1998	1982—1998	25.433 mm	0.066 mm/a
				1999—2014	27.225 mm	-0.032 mm/a
PRCPTOT	126.40 mm	0.346 mm/a	1998	1982—1998	121.806 mm	-0.407 mm/a
				1999—2014	131.284 mm	-0.256 mm/a
SDII	4.675 mm/d	0.013 mm/(d·a)	1998	1982—1998	4.547 mm/d	0.010 mm/(d·a)
				1999—2014	4.812 mm/d	-0.006 mm/(d·a)
R ₁₀	2.880 d	0.016 d/a	1998	1982—1998	2.695 d	-0.001 d/a
				1999—2014	3.077 d	-0.012 d/a
R ₂₀	0.569 d	0.005 d/a	2007	1982—1998	0.513 d	0.005 d/a
				1999—2007	0.646 d	-0.023 d/a
				2008—2014	0.604 d	0.036 d/a
CDD	50.299 d	0.002 d/a	—	—	—	—
				—	—	—
CWD	2.882 d	0.0004 d/a	1993	1982—1993	2.965 d	0.051 d/a
				1994—2014	2.834 d	0.014 d/a
R _{95p}	86.803 mm	0.284 mm/a	1999	1982—1999	83.601 mm	-0.022 mm/a
				2000—2014	90.646 mm	-0.320 mm/a
R _{99p}	31.623 mm	0.130 mm/a	1999	1982—1999	30.267 mm	0.049 mm/a
				2000—2014	33.250 mm	-0.129 mm/a

注：“—”代表未发现。

3.2.3 生长季极端降水事件空间变化 1982—2014 年中亚地区生长季极端降水指数除 CDD 外,各指数的多年均值空间分布特征与多年生长季降水量均值

较为一致,哈萨克斯坦北部行政边缘地带、天山一带地区和阿尔泰山区域的值较大。近 33 a 来,极端降水指数变化速率空间分布特征见图 4, RX_{1day} 和

RX_{5day} 空间异质性较强,最大增加速率分别为0.65, 0.82 mm/a,分布在天山一带的南端地区,主要在哈萨克斯坦局部地区呈显著增加趋势。 $PRCP_{TOT}$ 在天山一带呈增加趋势,最大值为2.0 mm/a,但是在降水量较多的哈萨克斯坦北部行政边缘地带和阿尔泰山地区 $PRCP_{TOT}$ 呈减小态势,但未通过0.05的显著性水平检验; $SDII$ 增加速率的高值区主要分布在温度较高而降水较少的干旱荒漠灌丛区,最大增加速率为0.11 mm/(d·a),通过0.05显著性水平检验的区域面积大于其他极端降水指数,表明中亚地区多地降水更为集中,日降水量更强。 R_{10} 和 R_{20} 增加速率的高值区主要分布西伯利亚平原、哈萨克丘陵和天山一带地区,表明这些区域中雨和大雨日数增加,但是在哈萨克斯坦西北部的降水量高值区则为减小趋势。 CDD 在乌兹别克斯坦地区增加速率最大,达2.0 d/a,干旱荒漠灌丛区持续干旱天数增加; CWD 变化速率的空间异质性较强,呈增加和减少趋势的区域面积相当,在降水量高值区表现为减少趋势。图4I—J显示, R_{99p} 的增加速率明显大于 R_{95p} ,主要分布在哈萨克斯坦地区和中亚地区的东南部,在哈萨克斯坦中部部分地区通过0.05的显著性水平检验,表明降水量的强度变得更大。与降水量的变化速率空间分布相比,除 CDD 之外,各极端降水指数呈增加趋势的范围更大,且通过0.05显著性水平检验的区域更广。

3.3 NDVI变化特征及其对极端降水事件的响应

3.3.1 生长季NDVI变化特征 1982—2014年中亚地区生长季NDVI均值空间分布特征与生长季降水量多年均值较为一致(图5A),由西南到东北呈逐渐增加趋势,均值超过0.4的区域主要分布在哈萨克斯坦北部行政界线边缘、天山一带地区以及阿尔泰山区域,面积约占中亚地区总面积的59%。中亚地区生长季NDVI多年均值为0.276,从时间变化特征来看(图5B),变化不明显,呈略微下降趋势;通过10 a滑动平均曲线可知,1982—1990年植被覆盖呈显著增加趋势(0.026/10 a, $p < 0.05$),1991—2003年为稳定期,2003年之后变为较快减少时期(-0.027/10 a, $p > 0.05$),最大值出现在1993年,其值为0.293;经过M-K检验发现,近33 a来生长季NDVI均值变化无显著突变点。

近33 a来,中亚地区生长季NDVI变化速率空间分布如图5C所示,增加速率高值区主要分布在中亚地区的东南部和东部地区,地属天山、阿尔泰山及哈萨克丘陵区域一带,年最大增加速率达0.02($p < 0.05$);呈显著减小速率的区域主要分布中亚地区的中西部和北部地区,前者为干旱荒漠灌丛区,后者为半干旱草原区,年最大减小速率为-0.015($p < 0.05$)。结合气

温、降水均值和变化速率可知,生长季NDVI增加速率高值区出现在气温低、降水量多的区域,而低值区则在增温显著、降水量少的区域。

3.3.2 生长季极端降水事件对植被覆盖的影响 中亚地区生长季极端降水指数、生长季均温(TEMP)与NDVI进行相关分析,得到相关系数见表3。极端降水指数除 CDD 外均与生长季NDVI呈显著正相关,相关系数均超过0.4,特别是 RX_{5day} , $SDII$, R_{10} , R_{20} , R_{99p} ,与NDVI的关系为极显著正相关($p < 0.01$),表明表征降水频度和降水强度的极端降水事件对植被覆盖的影响更为强烈。 CDD 和生长季均温(TEMP)与NDVI之间的关系为负相关($p > 0.05$),但是通过偏相关分析可知, CDD ,TEMP与NDVI之间为显著负相关,相关系数分别为-0.429,-0.477($p < 0.05$),表明持续干旱和升温作用会降低中亚地区植被的覆盖度。

1982—2014年中亚地区生长季NDVI与各极端降水指数之间通过显著检验($p < 0.05$)的相关系数空间分布特征见图6。 RX_{1day} , RX_{5day} 与NDVI的相关系数在空间分布上较为一致(图6A—B),但是 RX_{5day} 与NDVI呈正相关的区域面积更大(约占总面积84.4%),特别在西伯利亚平原和哈萨克丘陵部分区域呈显著正相关($p < 0.05$),最大相关系数为0.75, RX_{1day} 与NDVI的最大相关系数为0.69。 $PRCP_{TOT}$ 与NDVI呈正相关的分布范围大(图6C),约占中亚地区总面积的90%,最大相关系数为0.81,在哈萨克斯坦北部行政区划线边缘、阿尔泰山以及天山一带地区, $PRCP_{TOT}$ 与NDVI呈显著正相关($p < 0.05$); $SDII$ 与NDVI相关系数的空间分布(图6D)与 RX_{1day} , RX_{5day} 较一致,最大相关系数为0.75,通过0.05显著性水平检验的区域主要分布在哈萨克斯坦北部及天山一带南端地区。 R_{10} , R_{20} 与NDVI呈正相关的区域面积分别占总面积的85.6%,77.9%(图6E—F), R_{10} 与NDVI的相关性通过0.05显著水平检验的区域主要分布在哈萨克斯坦北部及天山一带地区,而 R_{20} 则分布较为零散。 CDD 与NDVI之间的相关关系主要为负相关(图6G),约占中亚地区总面积的59.2%,最大负相关系数为0.65($p < 0.05$),分布在哈萨克斯坦的图尔盖高原; CWD 与NDVI相关系数的空间分布异质性较大(图6H),正相关系数高值区主要分布在阿尔泰山区域($p < 0.05$)。 R_{95p} , R_{99p} 与NDVI呈正相关的相关系数在空间分布上较为一致(图6I—J),主要分布在天山一带、哈萨克丘陵及哈萨克斯坦北部的边缘地区, R_{95p} , R_{99p} 与NDVI呈显著正相关的区域分别占总面积的22.5%,17.3%。

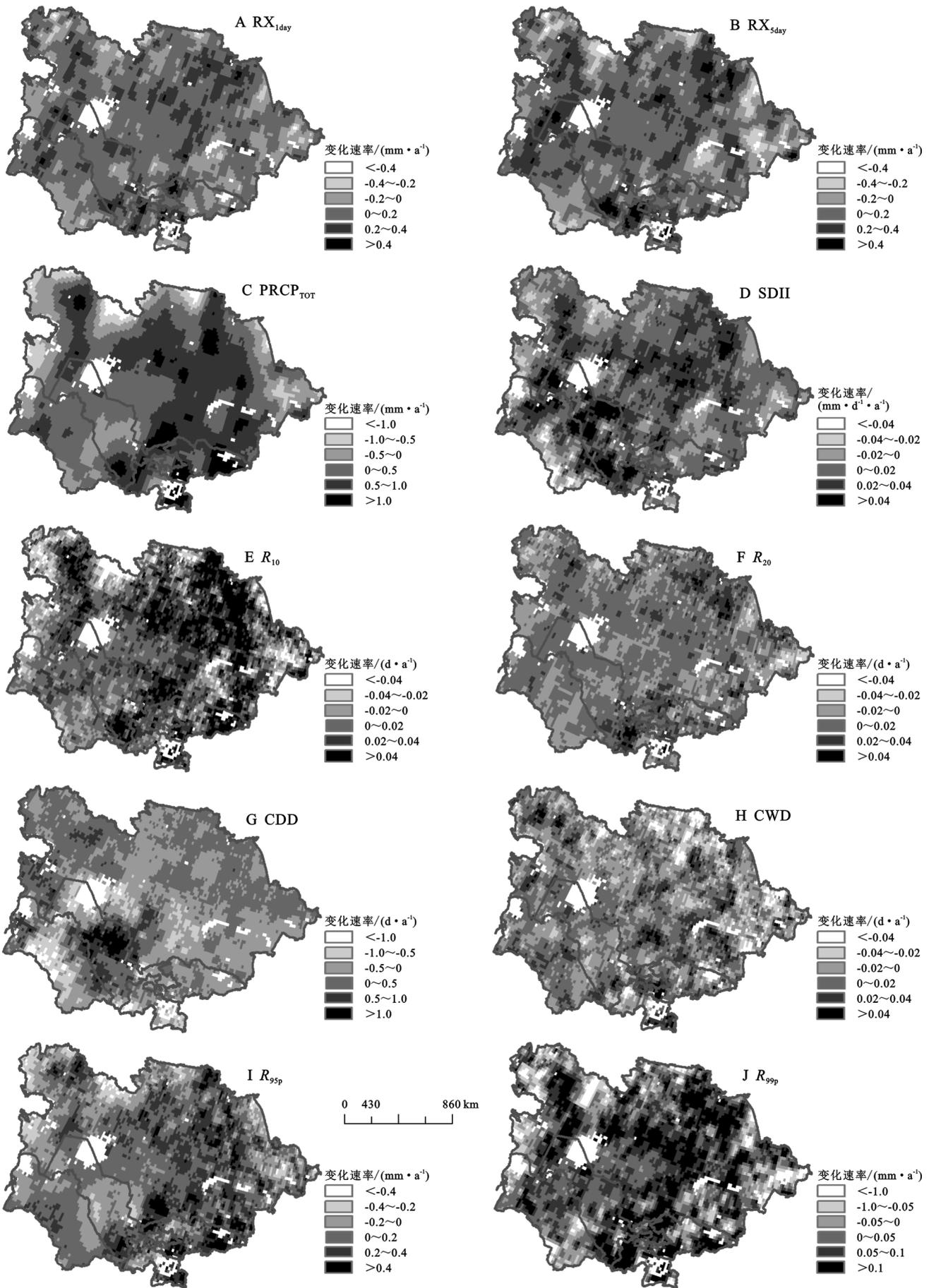


图 4 1982—2014 年中亚地区生长季极端降水事件变化速率的空间分布特征

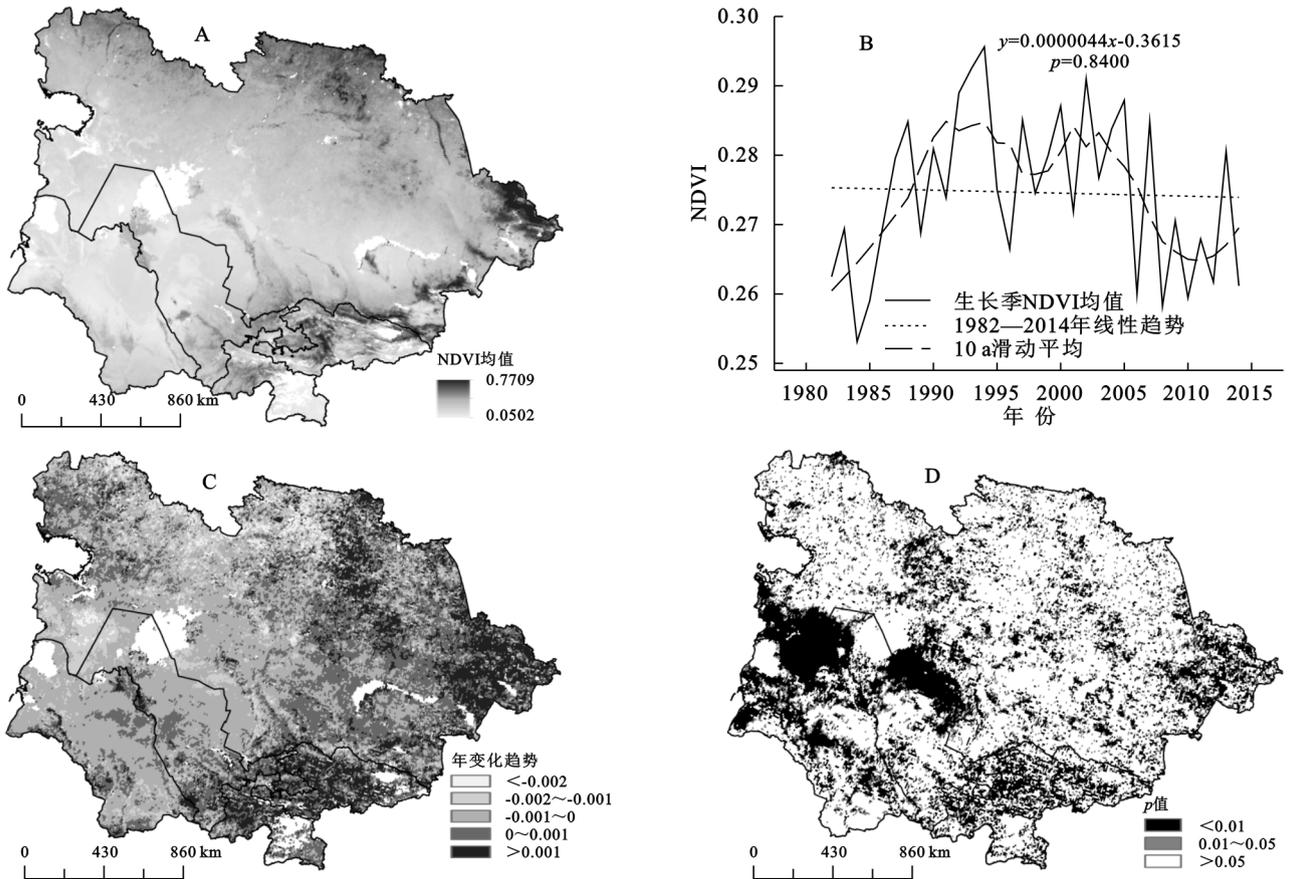


图 5 1982—2014 年中亚地区生长季 NDVI 时空变化特征

表 3 1982—2014 年中亚地区生长季 NDVI 与极端降水事件在时间尺度上的相关系数

极端降水指数	相关系数	p 值	极端降水指数	相关系数	p 值
RX _{1day}	0.444 *	0.010	CDD	-0.049	0.785
RX _{5day}	0.490 **	0.004	CWD	0.413 *	0.017
PRCP _{TOT}	0.410 *	0.018	R _{95p}	0.437 *	0.011
SDII	0.495 **	0.003	R _{99p}	0.457 **	0.007
R ₁₀	0.471 **	0.006	TEMP	-0.288	0.104
R ₂₀	0.493 **	0.004			

注: * 和 ** 分别代表通过 95% 和 99% 置信度检验; TEMP 为生长季均温。

4 讨论

全球正在经历以气候变暖为主要特征的气候变化, 中亚气温变化在 20 世纪 80 年代初期发生突变^[19], 出现较大增温趋势, 1982—2014 年中亚地区生长季气温的变化速率为 0.43°C/10 a, 与 Hu 等^[34]的研究结果较为一致, 显著高于北半球陆地(0.3°C/10 a)和周边地区的升温速率。中亚地区降水量在 1960s 之后变化不显著^[21], 本研究结果与之较为一致, 降水量呈略微增加趋势($p > 0.05$)。极端降水事件呈增加趋势, 大部分极端降水指数在 1990s 出现突变点, 自 21

世纪以来, 量值相较于 20 世纪 80, 90 年代更大, 与 Li 等^[20]的研究结果一致, 而 Zhang 等^[21]研究发现极端降水事件在 1957 年发生突变; 空间分布上, Zhang 等^[21]研究结果表明东部高山和丘陵区降水量和极端降水指数呈显著增加趋势, 中部荒漠区则减缓, 但是本研究发现中亚地区中部增加更为显著, 研究结果差异可能由研究时段及年内时长不同导致。

长期的植被生长取决于降水的连续性和一致性较多, 因此极端降水事件会在一定程度上影响植被生长。本研究分析了 1982—2014 年中亚地区生长季气温、各极端降水指数与 NDVI 之间的相关关系, 通过相关分析可知, 中亚地区植被覆盖与除代表干旱的 CDD 之外的其他极端降水指数均呈显著正相关, 特别是与 RX_{5day}, SDII, R₁₀, R₂₀, R_{99p} 呈极显著正相关, 与生长季均温相关较弱, 表明 NDVI 对降水变化响应的敏感性较高, 高温、干旱事件对中亚地区植被生长产生抑制作用。殷刚^[16]、韩其飞^[35]等的研究结果也表明, 中亚地区植被覆盖与降水的相关性较高, 而与气温关系则较弱, 结果显示在中亚地区降水是植被生长的主要限制因子。

中亚地区生长季 NDVI 在 1980s 呈显著上升趋势, 1990s 为较为稳定期, 研究结果与 Mohammad 等^[28]的较为一致, 而进入 21 世纪之后为较快下降

期^[35],这可能是因为除 CDD 外,各极端降水指数在进入 21 世纪前后发生突变,突变后各极端降水指数的变化速率减小,特别是与 NDVI 呈极显著正相关的 RX_{5day} , $SDII$, R_{20} , R_{99p} , 这 4 个极端降水指数的变化速率在突变点之前为增加趋势,之后则为减少趋势,表现为强度增强,而频次减少。自 21 世纪以来,中亚地区生长季降水量变化不显著,而 NDVI 呈减少趋势,说明极端降水事件的减少对中亚地区植被的生长起到抑制作用。进入 21 世纪后,半干旱草原地区的生长季 NDVI 减小更为突出^[16],在气候变暖背

景下,年潜在蒸散量远大于年降水量^[36-37],半干旱生态系统对水文气候变化的敏感性最高,超过了干旱和潮湿的生态系统,这一结果证明了半干旱生态系统在极端气候条件下的脆弱性以及未来特大干旱事件可能丧失的生态系统弹性^[38]。通过各极端降水指数与 NDVI 相关系数及显著性水平的空间分布可知,呈显著正相关的区域主要分布在降水高值区,且与生长季降水量与 NDVI 相关系数分布图较为一致^[16], Li 等^[13]研究也表明荒漠草原和草原荒漠植被对极端气候事件的敏感性较低。

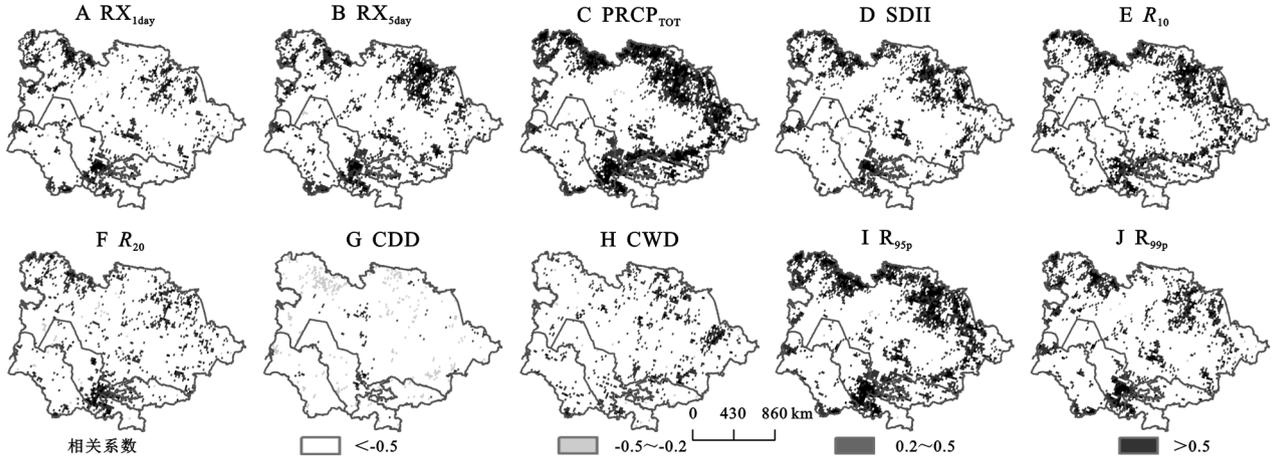


图 6 1982—2014 年中亚地区生长季 NDVI 与极端降水各指数之间通过显著检验相关系数的空间分布特征

本研究分析了中亚地区生长季极端降水事件的时空变化特征及其对生长季 NDVI 的影响,虽然在干旱半干旱地区,降水是植被生长的主要影响气候因子^[39],但是极端气温事件在一定程度上会促进或抑制植被生长,特别是春季气温影响更为强烈^[28],因此,需要进一步分析中亚地区极端气温事件变化特征以及不同季节植被覆盖对极端气候事件的响应。

5 结论

(1) 近 33 a 来,在中亚地区生长季均温显著上升背景下,生长季降水量及各极端降水指数呈略微上升趋势。除 CDD 外,其他极端降水指数都发生了气候突变,大部分集中在 1998 年和 1999 年,进入 21 世纪以来,极端降水总量和强度较之前均增大,但持续湿润时长变小,降水发生的风险概率更大。

(2) 生长季极端降水指数空间分布特征与降水量较为一致,表现为从西南到东北逐渐增加,高值区分布在哈萨克斯坦北部行政区划线边缘以及东部阿尔泰山、天山等高山丘陵区。大部分地区的生长季降水量呈增加趋势,所占面积超过中亚地区总面积的 70%;除 CDD 外,各极端降水指数呈增加趋势的区域比降水量更大,且通过 0.05 显著性水平检验的范围更广,呈显著增加趋势的区域主要集中在哈萨克斯坦中部地区。

(3) 近 33 a 来,中亚地区生长季 NDVI 变化速率呈略微下降趋势,多年均值空间分布与生长季降水量较为一致,增加速率高值区为低温高降水量地区,减少速率高值区则为干旱显著增温地区。通过相关分析表明,除 CDD 外,中亚地区生长季 NDVI 与各极端降水指数均呈显著正相关 ($p < 0.05$),特别是 RX_{5day} , $SDII$, R_{10} , R_{20} , R_{99p} , 为极显著正相关 ($p < 0.01$),即极端事件越强,影响作用越大;偏相关分析结果显示,生长季 NDVI 与 CDD 和 TEMP 为显著负相关 ($p < 0.05$),持续干旱和升温作用对植被生长产生抑制作用。

(4) 生长季 NDVI 与各极端降水指数相关系数的空间分布特征显示,除 CDD 外,相关系数高值区主要分布哈萨克斯坦北部行政区划线边缘地区以及哈萨克丘陵、阿尔泰山和天山一带的高海拔地区,这些区域也是降水量高值区,表明在降水量高值区,极端降水事件对植被生长起促进作用。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 秦大河,Thomas Stocker,259 名作者和 TSU(驻伯尔尼和北京).IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J].气候变化研究进展,2014,10(1):1-6.

- [3] 朱大运,熊康宁,肖华.贵州省极端气温时空变化特征分析[J].资源科学,2018,40(8):1672-1683.
- [4] Fernandez-Gimenez M E, Batkhisig B, Batbuyan B. Cross-boundary and cross-level dynamics increase vulnerability to severe winter disasters (dzud) in Mongolia [J]. *Global Environmental Change*, 2012,22(4):836-851.
- [5] Min S K, Son S W, Seo K H, et al. Changes in weather and climate extremes over Korea and possible causes: A review [J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2015,51(2):103-121.
- [6] 柏会子,肖登攀,刘剑锋,等.1965—2014年华北地区极端气候事件与农业气象灾害时空格局研究[J].地理与地理信息科学,2018,34(5):105-111.
- [7] Wang R, Cherkauer K, Bowling L. Corn response to climate stress detected with satellite-based NDVI time series[J]. *Remote Sensing*, 2016,8(4).DOI: 10.3390/rs8040269.
- [8] Tan Z Q, Tao H, Jiang J H, et al. Influences of climate extremes on NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) in the Poyang Lake Basin, China [J]. *Wetlands*, 2015,35(6):1033-1042.
- [9] Li X H, Lei S G, Cheng W, et al. Spatio-temporal dynamics of vegetation in Jungar Banner of China during 2000—2017 [J]. *Journal of Arid Land*, 2019,11(6):837-854.
- [10] Chu H S, Venevsky S, Wu C, et al. NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015 [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,650:2051-2062.
- [11] Zhou L M, Tucker C J, Kaufmann R K, et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001,106(D17):20069-20083.
- [12] Lloret F, Escudero A, Iriondo J M, et al. Extreme climatic events and vegetation: The role of stabilizing processes [J]. *Global Change Biology*, 2012,18(3):797-805.
- [13] Li C L, Wang J, Hu R C, et al. Relationship between vegetation change and extreme climate indices on the Inner Mongolia Plateau, China, from 1982 to 2013 [J]. *Ecological Indicators*, 2018,89:101-109.
- [14] Liu G, Liu H Y, Yin Y. Global patterns of NDVI-indicated vegetation extremes and their sensitivity to climate extremes [J]. *Environmental Research Letters*, 2013,8(2). DOI:10.1088/1748-9236/8/2/025009.
- [15] 王晓利,侯西勇.1982—2014年中国沿海地区归一化植被指数(NDVI)变化及其对极端气候的响应[J].地理研究,2019,38(4):69-83.
- [16] 殷刚,孟现勇,王浩,等.1982—2012年中亚地区植被时空变化特征及其与气候变化的相关分析[J].生态学报,2017,37(9):3149-3163.
- [17] 陈发虎,黄伟,靳立亚,等.全球变暖背景下中亚干旱区降水变化特征及其空间差异[J].中国科学:地球科学,2011,41(11):1647-1657.
- [18] 朱士华,艳燕,邵华,等.1980—2014年中亚地区植被净初级生产力对气候和CO₂变化的响应[J].自然资源学报,2017,32(11):1844-1856.
- [19] 沈伟峰,缪启龙,魏铁鑫,等.中亚地区近130多年温度变化特征[J].干旱气象,2013,31(1):32-36.
- [20] Li Z, Chen Y L, Li W H, et al. Potential impacts of climate change on vegetation dynamics in Central Asia [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015,120(24):12345-12356.
- [21] Zhang M, Chen Y L, Shen Y J, et al. Changes of precipitation extremes in arid Central Asia [J]. *Quaternary International*, 2017,436:16-27.
- [22] Xu H J, Wang X P, Zhang X X. Decreased vegetation growth in response to summer drought in Central Asia from 2000 to 2012 [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016,52:390-402.
- [23] 胡汝骥,姜逢清,王亚俊,等.中亚(五国)干旱生态环境特征[J].干旱区研究,2014,31(1):1-12.
- [24] Chen F H, Wang J S, Jin L Y, et al. Rapid warming in mid-latitude central Asia for the past 100 years [J]. *Frontiers of Earth Science in China*, 2009,3(1):42-50.
- [25] Li B, Beaudoin H, Rodell M, et al. GLDAS Catchment Land Surface Model L4 daily 0.25°×0.25° degree V2.0 [Z]. Greenbelt, Maryland, USA: Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (Ges Disc), 2018.
- [26] Houser P R. Land data assimilation systems [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2004,85(3):381-394.
- [27] Piao S L, Wang X H, Ciais P, et al. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006 [J]. *Global Change Biology*, 2011,17(10):3228-3239.
- [28] Mohammad A, Wang X H, Xu X T, et al. Drought and spring cooling induced recent decrease in vegetation growth in Inner Asia [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013,178/179:21-30.
- [29] Sillmann J, Kharin V V, Zhang X, et al. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013,118(4):1716-1733.
- [30] Sillmann J, Kharin V V, Zwiers F W, et al. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013,118(6):2473-2493.