

1901—2019 年上海合作组织国家气候时空变化特征

谢梦霞¹, 戈文艳^{1,2}, 胡亚鲜^{1,2}, 王飞^{1,2}, 韩剑桥^{1,2}, 李健³

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院
水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.济南市水利工程服务中心, 济南 250099)

摘 要:为了应对和缓解区域潜在气候变化情况,基于 1901—2019 年 Climatic Research Unit(CRU)长时序的月平均气温和逐月降雨量格点数据集,分别采用一元线性回归法、5 年滑动平均和 Pettitt 检验等方法分析了上合组织国家气温、降雨量的时空变化特征。结果表明:(1) 1901—2019 年年平均气温和降雨量整体均呈显著增加趋势,其变化趋势分别为 $0.142^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ($p<0.05$) 和 $2.395\text{ mm}/10\text{ a}$ ($p<0.05$),2000 年之后上升最为显著。(2) 气温变化具有显著的区域差异,由南向北随纬度升高变化速率逐渐加快,大部分区域小于 $0.2^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ($p<0.05$)。(3) 气候变化具有显著的季节性特征。各季节气温呈显著增加趋势,春季升温速率较快 ($0.2^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, $p<0.05$),夏季气温变化速率较慢 ($0.08^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, $p<0.05$);春季降雨量变化趋势大 ($0.75\text{ mm}/10\text{ a}$, $p<0.05$),夏季降雨量呈不显著的增加趋势 ($0.29\text{ mm}/10\text{ a}$)。(4) 上合组织气候突变遵循纬度分异规律,随纬度和海拔的升高突变时间推迟。综上,上合组织国家气候存在暖湿化趋势,春季气候变化趋势显著高于夏季,且随纬度升高,气温变化趋势逐渐加快。

关键词:气候变化; CRU 格点数据集; 时空变化特征; 上合组织

中图分类号:P467

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)02-0320-10

Spatiotemporal Characteristics of Climate Change in SCO Countries from 1901 to 2019

XIE Mengxia¹, GE Wenyan^{1,2}, HU Yaxian^{1,2}, WANG Fei^{1,2}, HAN Jianqiao^{1,2}, LI Jian³

(1.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100,
China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,
Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.Jinan Water Conservancy Engineering Service Center, Jinan 250099, China)

Abstract: In order to cope with and alleviate potential climate change in the region, it provides guidance for the high-quality development of the local ecological economy. The spatiotemporal variations of air temperature and rainfall in Shanghai Cooperation Organization (SCO) countries were analyzed based on the CRU grid datasets of monthly mean air temperature and rainfall from 1901 to 2019 by using methods of unary linear regression, 5-year moving average, the Pettitt test and other methods. The results showed that: (1) the annual average temperature and rainfall increased significantly from 1901 to 2019, with the change trend of $0.142^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ ($p<0.05$) and $2.395\text{ mm}/\text{decade}$ ($p<0.05$), respectively, and the most significant increase after 2000; (2) there were significant regional differences in the temperature change, which increased gradually from south to north along latitude, with rates $<0.2^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ in most regions ($p<0.05$); (3) climate factors exhibited significant seasonal characteristics; the temperature displayed significant increasing trends in each season; the temperature rise rate in spring was $0.2^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ ($p<0.05$), while the temperature change in summer was minimum ($0.08^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, $p<0.05$); the spring rainfall exhibited a significant increasing trend ($0.75\text{ mm}/10\text{ a}$, $p<0.05$), while the increasing trend of summer rainfall was insignificant (0.29

收稿日期:2020-12-18

修回日期:2021-03-01

资助项目:国家重点研发计划专题计划(2016YFC0501707);国家自然科学基金(41771558);陕西省水利水保科技项目(2017sbjk-01)

第一作者:谢梦霞(1997—),女,重庆忠县人,硕士研究生,研究方向为气候变化和流域综合管理。E-mail:1406134094@qq.com

通信作者:胡亚鲜(1986—),女,河南郑州人,博士,副研究员,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:huyaxian@nwfau.edu.cn

王飞(1971—),男,陕西卢县人,博士,研究员,博士生导师,主要从事水土保持环境效应评价与流域综合管理研究。E-mail:wafe@ms.iswc.ac.cn

mm/10 a); (4) climatic change points in the SCO followed the rule of latitude differentiation, and times of change points were postponed with the increase of latitude and altitude. In summary, the climate of the SCO countries presented the warming and humidification trend. The climate change trend in spring was significantly higher than that in summer, and the temperature change trend was gradually accelerating with the increase of latitude. These results can provide theoretical support for future climate prediction and regional climate change.

Keywords: climate change; CRU; spatiotemporal variations; SCO

全球气候在近百年来的暖湿化趋势日益突出,引起诸多学者的广泛关注。IPCC 第 5 次报告指出全球平均地表气温在 1880—2012 年期间上升了 0.85°C ^[1], 中国大陆地表年平均气温升高了 $0.5\sim 0.8^{\circ}\text{C}$ ^[2]。种种迹象表明全球气候呈现出变暖趋势,且 20 世纪 50 年代以来上升趋势更加显著。气候变化使得水资源的时空分布、循环及生态系统发生重大改变,由此引发洪涝、干旱和热浪等极端气候事件的数量和强度不断增加,造成巨大的经济损失^[3]。因此,气温和降雨量作为气候变化的重要指标,研究其时空变化特征对于量化气候变化对自然灾害的影响至关重要^[4]。

在全球尺度上,气候变化的区域性特征显著,在不同高度、不同纬度和海陆之间^[5]差异较大。Yu 等^[6]研究发现兴都库什喜马拉雅地区在 1901—2014 年大部分地区都经历了变暖趋势,尤其是青藏高原和巴基斯坦南部,年际降雨量以 $5.28\text{ mm}/10\text{ a}$ 的速度上升,而 1980 年中期以后,降雨量的增长更为迅速;段安民等^[7]指出,从 1998 年开始青藏高原的年际气温和降雨量呈加速增长趋势;黄秋霞等^[8]研究表明,中亚地区近 30 a 来年际平均气温和降雨量均为增加趋势,且具有较大的区域和季节性差异;Xu 等^[9]通过对亚洲气候变化趋势的研究发现高纬度地区的气温增速高于低纬度地区,降雨量总体上呈增加趋势;符淙斌等^[10]通过研究 70 年代全球地面气温变率的时空特征,发现亚欧大陆中部是全球三大气温变率中心之一。与全球其他地区相比,旱涝灾害和山地灾害频发区,如亚洲东部、南部和中亚内陆地区素来是全球气候变化的特殊区和敏感区^[11],也是诸多学者关注的重点区域。

受地形地势、大气和海洋环流的影响,上海合作组织横跨寒、温、热三带,区域内气候类型复杂多样,其中典型的季风气候和大陆性干旱气候占主导。此外,全球最大的非地带性干旱半干旱区也分布于此,水热资源时空分布严重失衡,内陆区水资源匮乏,是气候变化的敏感区,也是生态环境的脆弱区^[12]。因此,在全球变暖背景下,对上合组织气候变化进行监

测分析,可为当前跨国界复杂地形之间的生态环境保护、水资源的开发与利用、农牧业的生产和发展以及极端天气气候事件与灾害的防御等提供科学支撑,具有十分重要的理论和现实意义。基于此,本文基于 CRU 最新的网格点月平均气温和逐月降雨量格点数据集(CRU TS v4.04),运用线性回归趋势分析法和 Pettitt 突变检验方法,分析上合组织 1901—2019 年月平均气温和累积降雨量的长期变化趋势及空间分异规律,为应对和缓解区域潜在气候变化策略的制定提供理论依据。

1 研究区概况

上海合作组织,简称上合组织,位于亚欧大陆,经纬度范围为 $19^{\circ}65'\text{E}$ — $169^{\circ}70'\text{W}$ 和 $5^{\circ}55'\text{N}$ — $81^{\circ}85'\text{N}$, 包括 8 个成员国、4 个观察员国、6 个对话伙伴国。其中,成员国为中国、俄罗斯、印度、哈萨克斯坦、巴基斯坦、塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦、乌兹别克斯坦,观察员国有蒙古、阿富汗、白俄罗斯和伊朗,对话伙伴国包括柬埔寨、尼泊尔、斯里兰卡、土耳其、亚美尼亚、阿塞拜疆。受经纬跨度大,地势起伏剧烈的影响,该国家组织地形地势分布复杂,区域内高原、盆地、丘陵和沟壑纵横交错,海拔为 $-155\sim 8\,489\text{ m}$,地势总体上中部高,南北低。受季风环流、北极涛动和南方涛动的共同影响,区域内气候的纬向地带性和垂直地带性显著。降水和气温变化梯度较大。年降水量约为 470 mm ,从沙漠地区不到 50 mm 到山区迎风坡 $2\,000\text{ mm}$ 以上;整个区域的平均气温为 0.79°C ,空间差异性较大,极地和高山地区的年平均气温低于 0°C , 30°N 以南的区域,年平均气温大多在 10°C 以上。

2 数据源与研究方法

2.1 数据源

本文采用英国 East Anglia 大学提供的 1901—2019 年的 Climatic Research Unit(简称 CRU)全球地表逐月平均气温和累积降雨量格点数据(CRU TS v4.04)作为基础气象数据,空间分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ ^[13]。CRU 数据

集具有严格的时间均一性检验、尺度长、分辨率高等优点,故被广泛应用于气候变化研究中^[14-15]。为了研究上合组织长时间序列气温和降雨量的时空变化规律,本研究将气候资料细分为年际和季节性气象,其中季节划分依次为:春季 3—5 月,夏季 6—8 月,秋季 9—11 月,冬季 12—翌年 2 月^[16]。

2.2 研究方法

2.2.1 趋势分析 运用最小二乘法分析气温和降雨量的年际变化趋势。该方法是利用时间序列与年序数构建一元回归方程,根据计算出的指标系数得出变化的倾向性,同时将一元线性回归方程的斜率定义为气候的年际变化趋势率(slope)^[17]:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times c_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n c_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \sum_{i=1}^n i} \quad (1)$$

式中:slope 为气候与时间变量拟合的一元线性回归方程斜率; i 为时间变量,取值为 $1 \sim n$ 的整数; n 为研究时间段,本文为 119; c_i 为第 i 年的气温和降雨量资料。slope >0 表示气候随时间递增,slope <0 表示随时间递减,slope 绝对值越大,表明气候的变化速率越大。采用 t 检验法来检验变化趋势的显著性,本次研究选择在 0.05 显著性水平下对研究区域 119 a 来气温和降雨量的变化趋势进行显著性检验。

2.2.2 变异分析 本研究利用 Pettitt 来检验气候分区中气温和降雨量长时间序列的突变情况,既能判断出突变点的位置和数量,又能准确地判断出这些变点是否具有统计意义上的显著。Pettitt 检验在序列基础上定义统计量,最大值所对应时间为可能的突变时间,其统计量 $U_{t,n}$ 计算公式如下^[18]:

$$U_{t,n} = U_{t-1} + \sum_{j=1}^n \text{sgn}(X_t - X_j) \quad (t=2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: X_t, X_j 为假设检验的随机变量; n 为数据系列的时间长度,本文为 119; $U_{t,n}$ 为新序列,新序列是由第一个样本序列超过第 2 个样本序列次数的统计量组成。

若 t 满足:

$$K_t = \max_{1 \leq t \leq n} |U_{t,n}| \quad (4)$$

则 t 为出现突变的年份。

对应的显著性 p 可通过以下公式近似算出:

$$p = 2 \exp\left(-\frac{6K_t^2}{n^3 + n^2}\right) \quad (5)$$

当 $p \leq 0.05$ 时,检验出的突变点具有统计意义上的显著。

本文将上合组织区域划分为极地气候、北部森林气候、寒温带气候、高原山地气候、暖温带气候、亚热带气候、热带气候共 7 个气候区,对其进行变异分析。

3 结果与分析

3.1 时间变化特征

3.1.1 气温时间变化特征 图 1 为对年平均和季节平均气温进行 5 a 滑动平均和线性拟合得出的时间变化趋势分布图。1901—2019 年上合组织多年平均气温为 0.79°C ,119 a 的年平均气温呈显著上升趋势,增长率为 $0.14^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ 。根据异常值将平均气温分为 3 个变化阶段,1901—1938 年属于缓慢增长期,增长趋势为 $0.14^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ($p < 0.05$),1938—1969 年以 $0.16^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ 的速度呈显著下降趋势,1969 年之后整体增加速度较快,达到 $0.39^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ($p < 0.05$)。在研究时段内,上合组织年平均气温波动范围在 $-1 \sim 3^\circ\text{C}$,1969 年是 119 a 中最寒冷的一年,气温在 1984 年之后持续高涨。

在季节尺度上,春季平均气温为 0.76°C ,增长趋势最大($0.2^\circ\text{C}/10 \text{ a}$, $p < 0.05$),1953 年的异常高值将其分为两个增长阶段,1953 年之后以 $0.44^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ 的速度快速增加($p < 0.05$)。夏季平均气温为 16.4°C ,但变化趋势 $0.08^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ($p < 0.05$)是季节变化中最小的,1954—1992 年气温呈不显著下降趋势($-0.02^\circ\text{C}/10 \text{ a}$)。秋季平均气温为 1.4°C ,增长趋势为 $0.1^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ($p < 0.05$),1945—1972 年气温呈减少趋势(-0.161 a , $p > 0.05$)。冬季平均气温为 -15.4°C ,1969 年气温出现异常低值(-19.12°C),变化趋势为 $0.18^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ($p < 0.05$),1996 年之后气温以 $0.47^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ 的速度显著上升。

结果表明,上合组织气温变化趋势大小顺序为春季 $>$ 冬季 $>$ 年 $>$ 秋季 $>$ 夏季,气温增长速度大致经历由缓慢到高速增加这一过程,1940—1970 年气温呈显著下降趋势。

3.1.2 降雨量时间变化特征 1901—2019 年上合组织年平均降雨量在 430~510 mm 波动,整体呈显著上升趋势,增长速率为 $2.4 \text{ mm}/10 \text{ a}$ (图 2)。1961 年和 1986 年的异常值将年平均降雨量分为 3 个阶段。1961 年之前,属于快速增长期,降雨量增长速率为 $4.97 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ($p < 0.05$),但降雨量在 1961—1986 年期间以 $6.58 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ($p > 0.05$)的速度快速下降,而在 1986 年后以 $7.89 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 的速率显著上升。在研究期内,1930s 降雨量较少,1990s 属于多雨期,其中,1990 年降雨量最大(509.6 mm)。

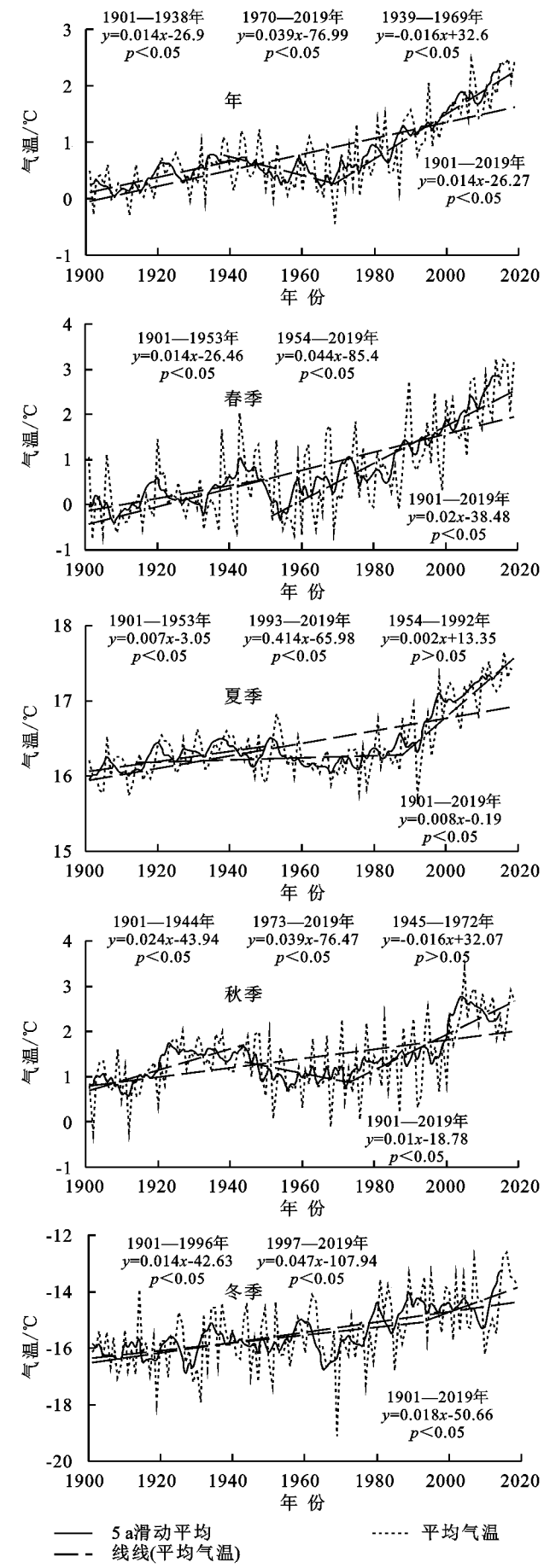


图1 1901—2019年气温变化

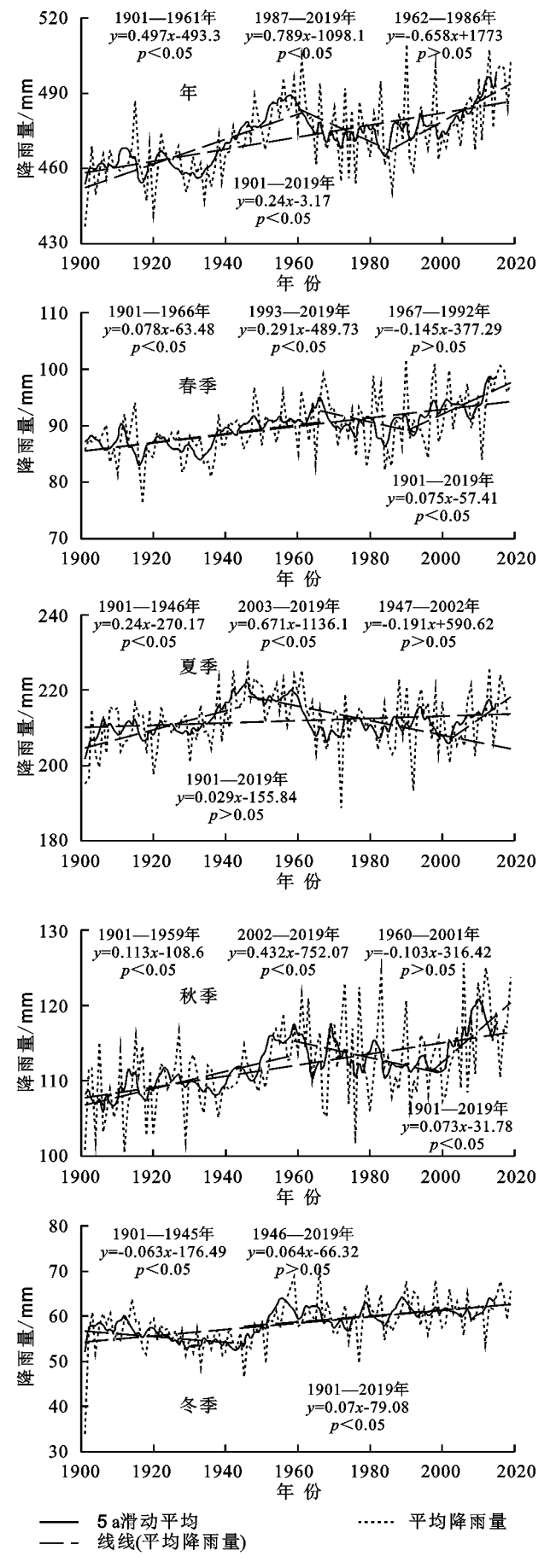


图2 1901—2019年降雨量变化

在季节上,春季平均降雨量为 90 mm,变化趋势为 $0.75 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ($p < 0.05$),1967—1992 年降雨量呈不显著减少趋势 ($-1.45 \text{ mm}/10 \text{ a}$)。夏季平均降雨量为 212 mm,整体以 $0.29 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ($p > 0.05$) 的速度上升,分阶段变化显著。1901—1943 年降雨量以 $2.5 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 的速度显著上升,1943—1992 年降雨量呈不显著减少趋势 ($-1.91 \text{ mm}/10 \text{ a}$),1992 年之后降雨量快速增加,增长速率为 $6.71 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ($p < 0.05$)。秋季平均降雨量为 112 mm,增长趋势为 $0.73 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ($p < 0.05$),1960—2001 年降雨量以 $1.03 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 的速率呈减少趋势 ($p > 0.05$)。冬季平均降雨量为 59 mm,变化速率为 $0.7 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ($p < 0.05$),1901—1945 年降雨量呈显著的下降趋势 ($-0.63 \text{ mm}/10 \text{ a}$),1945 年后以 $0.64 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 的速度上升 ($p < 0.05$)。

综上所述,降雨量总体变化趋势大小为年 > 春季 > 秋季 > 冬季 > 夏季,其变化趋势与气温变化表现一致。

3.2 空间变化特征

3.2.1 气温空间变化特征 1901—2019 年平均气温空间分布遵循纬度和高山垂直分异规律,由北向南气温逐渐上升。1901 年以来年平均气温呈增加趋势,其空间变化趋势差异性大(图 3)。以 30°N 为界,变化趋势由南向北递增。年气温变化趋势在 $-0.13 \sim 0.82^\circ\text{C}/10 \text{ a}$, $10^\circ\text{—}20^\circ\text{N}$ 的气温变化趋势小,变化速率在 $0.2 \sim 0.3^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ($p < 0.05$) 的分布范围最广, 20°N 以北地区的气温变化趋势集中在 $0.4 \sim 0.6^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ($p < 0.05$)。由表 1 可知,年平均气温除中国东南沿海变化趋势在 $0.1^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ 以下的小部分区域外,98.55% 的地区发生显著性变化。

与年平均气温变化趋势一致,81% 以上区域季节性气温发生显著变化,冬季升温趋势最快,夏季气温变化最小。春季,气温变化趋势为 $-0.05 \sim 0.35^\circ\text{C}/10 \text{ a}$,除中国东南沿海部分地区变化速率小于 $0.05^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ 的区域不显著外,其余 98.66% 的区域气温发生显著性变化。 30°N 以南地区的升温趋势小于 $0.15^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ($p < 0.05$),以北增温趋势大于 $0.2^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ($p < 0.05$)。夏季,90% 以上的区域发生显著变化,变化趋势主要集中在 $0.04 \sim 0.08^\circ\text{C}/10 \text{ a}$,其次是 $0.08 \sim 0.12^\circ\text{C}/10 \text{ a}$,内陆伊朗地区和北部俄罗斯东北地区的升温趋势高于 $0.16^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ($p < 0.05$)。秋季,变化趋势集中在 $0.06 \sim 0.12^\circ\text{C}/10 \text{ a}$,北极附近增温率达 $0.24^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ($p < 0.05$)。冬季, 20°N 以南地区的变化倾向率集中在 $0.06 \sim 0.12^\circ\text{C}/10 \text{ a}$,以北变化率在

$0.18 \sim 0.24^\circ\text{C}/10 \text{ a}$,俄罗斯东部少部分增温趋势达 $0.3^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ 以上 ($p < 0.05$)。

3.2.2 降雨量空间变化特征 1901—2019 年上合组织年平均和各季节平均降雨量由南向北、从东向西逐渐递减,遵循“从沿海到内陆、低纬到高纬降雨量逐渐递减”的空间变化规律。119 a 来年平均降雨量呈增加趋势,其空间变化差异显著(图 4)。变化趋势总体由西南向东北递增,变化趋势集中在 $0 \sim 0.6 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ($p > 0.05$),极少部分地区降雨量增加趋势在 $1.8 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 以上。结合表 2 可得,上合组织 119 a 来年降雨量变化趋势只有 30% 的地区呈显著性变化,主要位于西北地区。

降雨量各季节变化与年变化一致,表现出不显著的变化趋势,且各季节变化具有显著的区域特征。春季,变化趋势集中在 $0.5 \sim 1.5 \text{ mm}/10 \text{ a}$,青藏高原部分地区变化趋势在 $1.5 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 以上 ($p < 0.05$)。夏季,变化趋势集中在 $-10 \sim 1 \text{ mm}/10 \text{ a}$,多数地区的降雨量呈下降趋势 ($p > 0.05$)。秋季, $0 \sim 1 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 的变化范围最广, $10^\circ\text{—}20^\circ\text{N}$ 部分地区降雨量呈减少趋势,而北部俄罗斯部分地区则呈显著增加趋势。冬季,整体降雨量变化趋势在 $0 \sim 0.5 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 的居多,北部区域降雨量呈显著上升趋势,西南地区呈不显著下降趋势。

3.3 突变分析

3.3.1 气温突变分析 1901—2019 年,上合组织 7 个自然气候分区气温突变时间在 1980 年左右(图 5),与全球突变时间(1978 年)大体一致^[19],7 个自然气候分区均满足置信区间 (± 279.98 之外)要求。其中,寒温带气候区突变时间最早 1972 年 ($p < 0.05$),其次,暖温带、热带和亚热带气候区在 1976 年发生突变 ($p < 0.05$),极地和北部森林气候区在 1980 年发生突变 ($p < 0.05$),高原山地气候区突变时间最晚(1986 年, $p < 0.05$)。整体突变时间表现出由南向北,平原到高原逐渐推迟的变化规律。

3.3.2 降雨量突变分析 上合组织 119 a 来降雨量突变时间在 1930—1984 年(图 6),7 个自然气候区的突变顺序依次为:热带 > 北部森林 > 暖温带 > 寒温带 > 极地 > 亚热带 > 高原山地。低纬度和低海拔地区的降雨量突变时间早于高海拔地区,热带气候区从 1930 年开始发生 ($p < 0.05$),高原山地气候区则在 1984 年才发生突变 ($p < 0.05$),北部森林气候区 1941 年 ($p < 0.05$),暖温带气候区 1947 年 ($p > 0.05$),寒温带气候区 1951 年 ($p < 0.05$),极地气候区 1953 年 ($p < 0.05$),亚热带气候区 1961 年 ($p > 0.05$)。

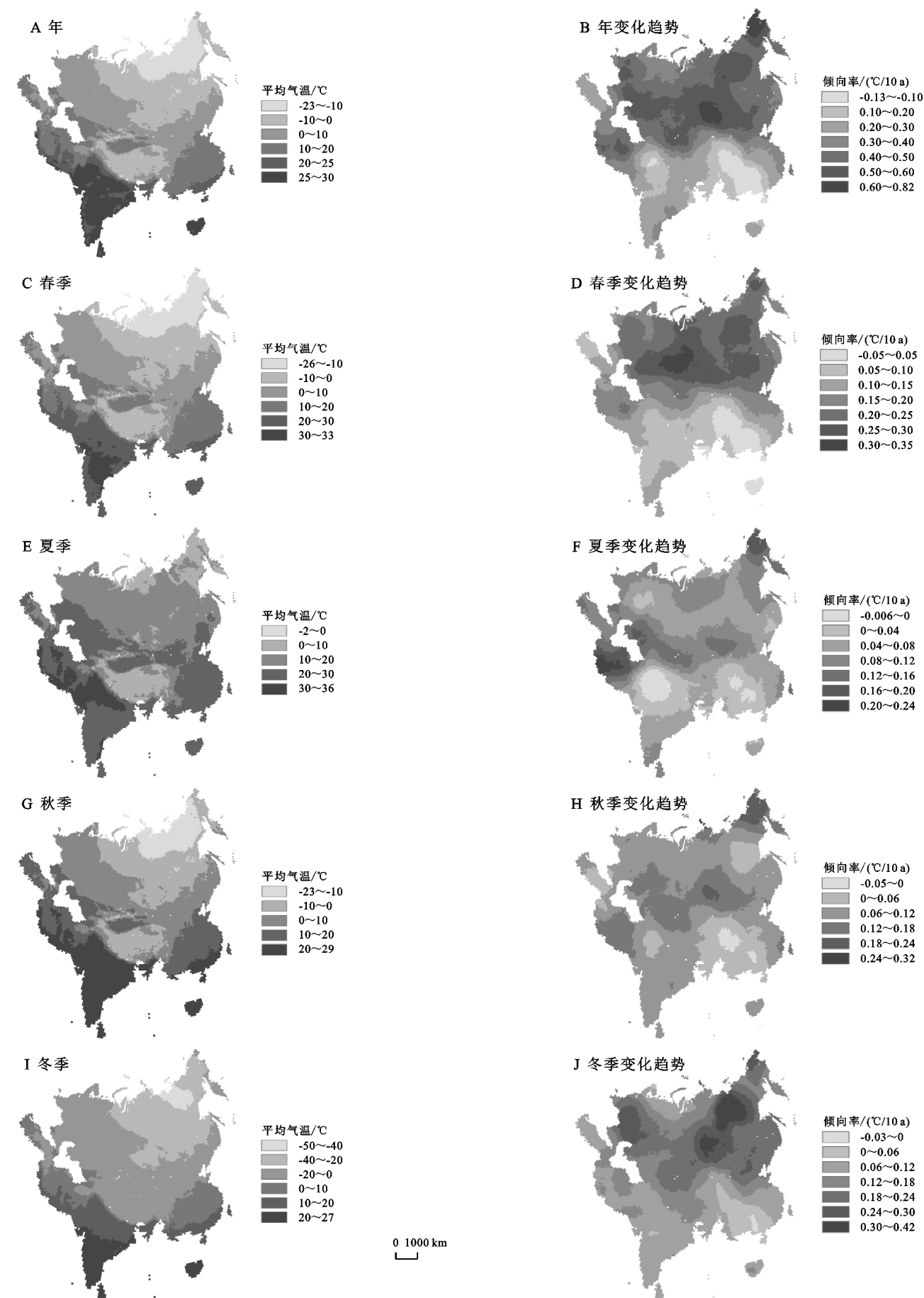


图 3 1901—2019 年气温空间变化分布

表 1 1901—2019 年气温变化显著性面积占比 %

显著性	年	春季	夏季	秋季	冬季
显著($p \leq 0.05$)	98.55	98.66	90.89	81.04	88.61
不显著($p > 0.05$)	1.45	1.34	9.11	18.96	11.39

4 讨论

在全球变暖的大背景下,上合组织 119 a 来年平均气温和降雨量表现出先增加后减少再增加这一变化过程,与北半球及全球气候变化总体呈现增加趋势一致^[19-20]。受工业化和城市化进程造成温室气体的过度排放及大气环流异常的共同影响,上合组织国家于 2000 年后表现出极端高温现象,且呈现出继续增长趋势,与吴成启等^[21]研究结果一致,但跟何金海等^[22]认为 2000 年以后全球和欧亚中高纬地区逐渐进入变暖减缓期的研究结果有悖。气温变暖已成为上合组织气候变化的主要特征,同时也存在负增长时期,如 1950—1970 年气温呈显著下降趋势,与张秀年等^[23]认为北半球陆地地面气温在 1950—1960 年代有一个较强降温过程的研究结果一致。

气温变化是自然因素和人类活动共同影响的结果。自工业革命以来,由于化石燃料的大量消耗,大气中二氧化碳的浓度大约升高了 100 mg/kg,增幅超过 40%,大气中二氧化碳浓度的改变被认为是近代气候变化的首要原因。其中,Ge 等^[24]研究表明 20 世纪以来全球气温正处于近 2 000 a 来气候变化中的第 4 个暖周期,且属于增长最快的时期。IPCC-AR5 证实了全球变暖主要受人为外在因素的推动,如土地不合理利用、城市扩张和温室气体的排放等影响,人类活动排放的温室气体是增温最主要的因素。上合组织气温变化与北极涛动(AO)息息相关^[25]。1901—1940 年,AO 处于正相时,极地气压下降,导致上合组织该时段气温出现小幅度的上升($p < 0.05$),而 1940—1970 年,AO 进入了负相时期,大气压力增加,大面积出现降温的现象($p < 0.05$)。1969 年受强烈冷空气的影响,亚欧国家多数地区的气温达到记录以来的最低值。北极和北部高纬度地区受子午热传导和雪/冰-反照率^[26]变化的影响,气温升温趋势显著高于低纬地区。中亚内陆地区,气候干旱、降水少、植被稀疏^[27],农耕经济的发展使得气温显著上升。同时,吴国雄等^[28]研究发现,青藏高原热力抬升作用引发的高原环流,深刻地影响着亚洲气候,增强了东亚地区的夏季风,而加剧了中亚地区的干旱。低纬度地区,经济相对发达,工业化和城市化发展快,对 1901—2019 年气温的上升起主要的贡献作用。

诸多研究表明^[29],在全球陆地和海洋区域的年降水和季节性降水模式中人为因素越发明显。1901—1960 年,降雨量显著增加主要是由水分汇聚的垂直动态分量^[30]和 EOF 模式引起。全球气候模式表明^[31],1960—1985 年温室气体浓度增加导致降水增加,但受人为过多排放气溶胶的影响,期间降水减少($p > 0.05$)。1985 年之后,降雨量量以 7.9 mm/10 a($p < 0.05$)的速度急剧增加,气溶胶排放的减少和气温的快速升高两者的贡献最大。119 a 来高纬度地区主要受火山爆发、工业活动中排放的硫酸盐气溶胶^[32]和温室气体的共同影响,降雨量变化速率显著高于低纬度地区。地形地势、蒸散发和降水再循环率^[33]对青藏高原上降水的显著变化起着重要贡献。

研究表明,全球在 20 世纪发生了 3 次比较明显的气温突变,在不同的地区和不同的时间结果不一致,季风区突变时间随纬度升高变晚,大陆性气候区整体由东向西突变较晚,高原山地区突变时间推迟^[34]。上合组织气候区气温的突变主要受人类活动和太阳辐射的影响,区域经济越发达,突变时间越早^[35]。气候系统内部变率、太阳辐射、火山活动、土地利用和温室气体等^[36]多种强迫因子均能引起降水剧烈突变。青藏高原人类干扰少,气温和降水突变时间晚且主要受全球工业化产生的温室气体的影响^[37]。

5 结论

(1) 1901—2019 年上合组织年平均气温和降雨量均呈显著上升趋势,变化趋势分别为 0.14℃/10 a 和 2.4 mm/10 a,均经历“增加—减少—增加”这一变化过程。1901—1938 年和 1969—2019 年期间气温位于暖期($p < 0.05$),1939—1968 年属于冷期($p < 0.05$)。降雨量在 1901—1961 年和 1986—2019 年属于湿润期($p < 0.05$),1962—1985 年处于干旱期($p > 0.05$)。特别是 2000 年后,气温和降雨量均呈快速增加阶段($p < 0.05$)。

(2) 气候变化区域性特征显著。年平均气温呈上升趋势($p < 0.05$),表现出纬度差异,以 20°N 为界,变化趋势由南向北递增,北部区域年变化趋势集中在 0.4~0.6℃/10 a($p < 0.05$),南部 0.2~0.3℃/10 a 的分布范围最广。降雨量年变化趋势主要集中在 0~0.6 mm/10 a,北部、干旱区的降雨量呈显著增加趋势,湿润地区的总降雨量无明显变化,降雨量整体空间分布上表现出不显著变化趋势。

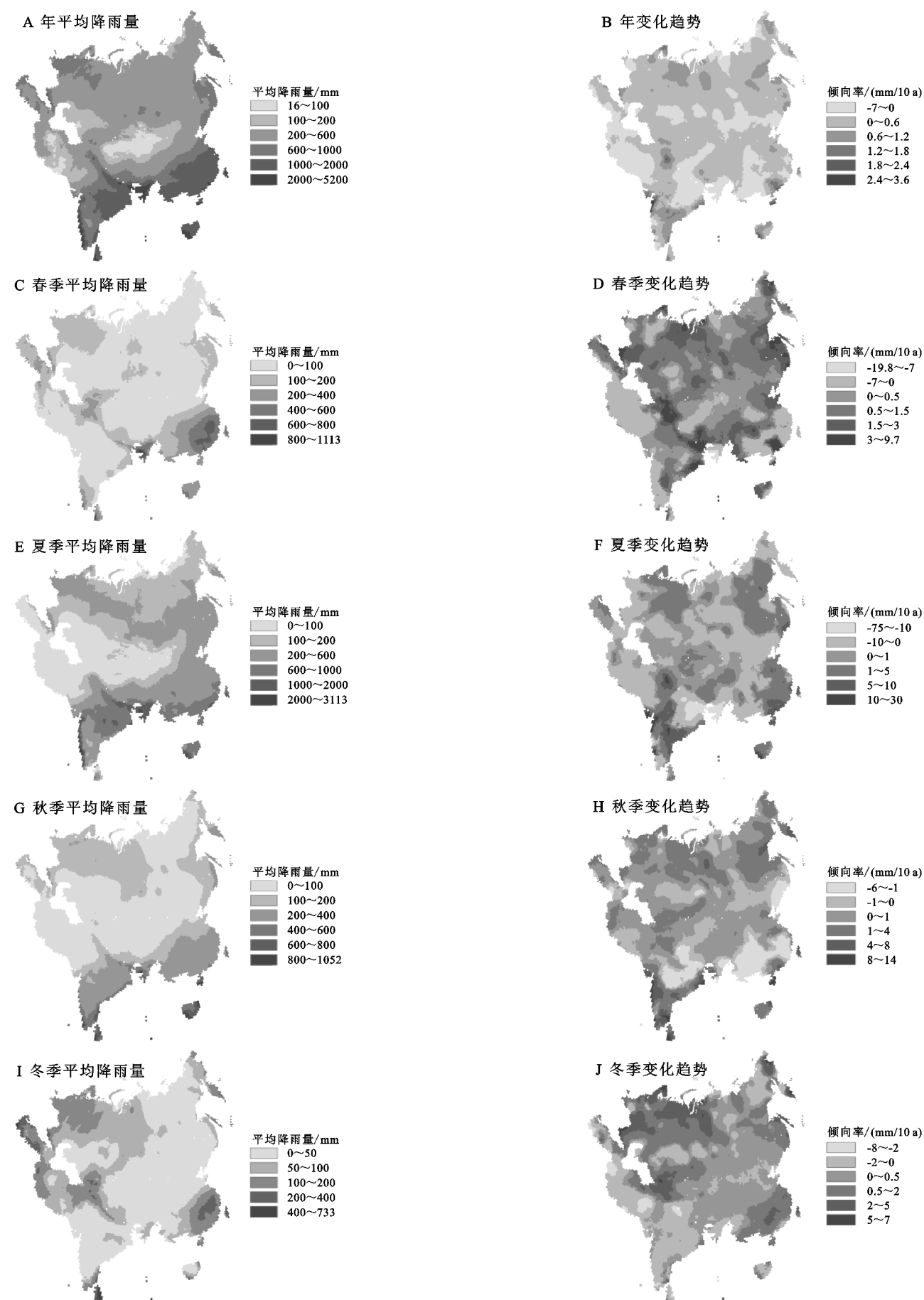


图 4 1901—2019 年降雨量空间变化分布

表 2 1901—2019 年降雨量变化显著性面积占比

	年	春季	夏季	秋季	冬季
显著 ($p \leq 0.05$)	30.05	33.5	18.46	27.69	44.84
不显著 ($p > 0.05$)	69.95	66.5	81.54	72.31	55.16

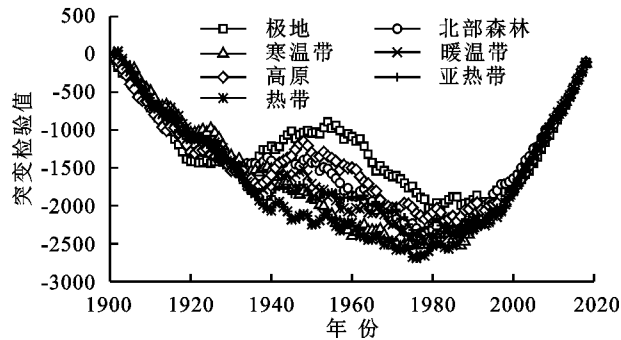


图 5 气温年际突变空间分布

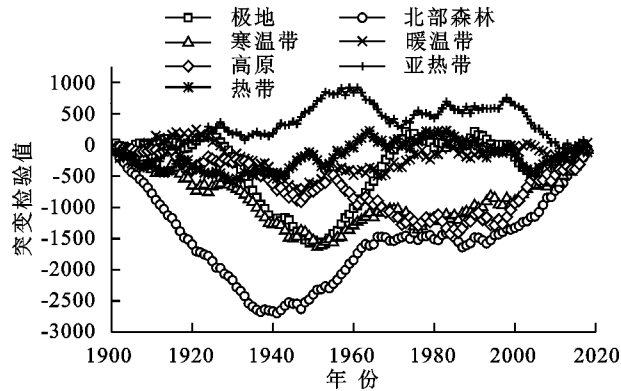


图 6 降雨量年际突变空间分布

(3) 气候变化具有显著的季节性特征。各季节气温呈显著增加趋势,春季升温速率较快($0.2^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, $p < 0.05$),夏季气温变化速率较慢($0.08^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, $p < 0.05$);春季降雨量变化趋势较大($0.75\text{ mm}/10\text{ a}$, $p < 0.05$),夏季降雨量变化趋势较小($0.29\text{ mm}/10\text{ a}$, $p > 0.05$)。

(4) 受人类活动和太阳辐射的影响,上合组织气候突变遵循纬度和高山垂直分异规律,随纬度、海拔的升高突变时间推迟。7 个气候区的气温突变时间顺序依次为:寒温带>热带>亚热带>暖温带>北部森林>极地>高原山地,降水突变时间顺序为:热带>北部森林>暖温带>寒温带>极地>亚热带>高原山地。

参考文献:

[1] Intergovernmental Panel on Climate Chang. Climate Change 2013: The Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

[2] 汪飞,洪林,吐尼亚孜·亚森,等.澜沧江流域气候时空变化规律[J].武汉大学学报:工学版,2020,53(5):394-403.

[3] Liao X L, Xu W, Zhang J L, et al. Global exposure to rainstorms and the contribution rates of climate change and population change[J]. Science of the Total Environment, 2019,663:644-653.

[4] Huang J P, Yu H P, Han D L, et al. Declines in global eco-

logical security under climate change[J]. Ecological Indicators, 2020,117. DOI:10.1016/j.ecolind.2020.106651.

[5] Pandey V P, Dhaubanjhar S, Bharati L, et al. Spatio-temporal distribution of water availability in Karnali-Mohana Basin, Western Nepal: Climate change impact assessment (Part-B) [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2020,29.DOI:10.1016/j.ejrh.2020.100691.

[6] Yu Y R, Guo Y R, Xiu B S, et al. Observed changes in surface air temperature and precipitation in the Hindu Kush Himalayan region over the last 100-plus years[J]. Advances in Climate Change Research, 2017,8(3):148-156.

[7] 段安民,肖志祥,吴国雄.1979—2014 年全球变暖背景下青藏高原气候变化特征[J].气候变化研究进展,2016,12(5):374-381.

[8] 黄秋霞,赵勇,何清.基于 CRU 数据的中亚地区气候特征[J].干旱区研究,2013,30(3):396-403.

[9] Xu Y, Zhou B T, Wu J, et al. Asian climate change under 1.5—4 $^{\circ}\text{C}$ warming targets[J]. Advances in Climate Change Research, 2017,8(2):99-107.

[10] 符淙斌,彭小侠,董洪年,等.七十年代全球地面气温的初步研究(二):七十年代全球地面气温的变率和主要变率中心影响的传播[J].大气科学,1982(4):63-70.

[11] 刘晓琼,孙曦亮,刘彦珍,等.基于 REOF-EEMD 的西南地区气候变化区域分异特征[J].地理研究,2020,39(5):1215-1232.

[12] Chao F L, Chi Z, Ge P L. Carbon stock and its responses to climate change in Central Asia [J]. Global Change Biology, 2015,21(5):1951-1967.

[13] Harris I, Osborn T J, Jones P, et al. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset[J]. Scientific Data, 2020,7(1):109. DOI:10.1038/s41597-020-0453-3.

[14] Petrova Y, Skakova A, Salnikov V, et al. Climate change in Kazakhstan during the past 70 years[J]. Quaternary International, 2015,358:77-82.

[15] Shi H Y, Li T J, Wei J H. Evaluation of the gridded CRU TS precipitation dataset with the point raingauge records over the Three-River Headwaters Region[J]. Journal of Hydrology, 2017,548:322-332.

[16] 孔锋,王一飞,吕丽莉,等.近百年来全球、大洲和区域尺度降雨时空变化诊断(1900—2010) [J].灾害学,2018,33(1):81-88,95.

[17] Zhang D J, Ge W Y, Zhang Y. Evaluating the vegetation restoration sustainability of ecological projects: A case study of Wuqi County in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,264. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.121751.

[18] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. Applied Statistics, 1979,28:126-135.

[19] 魏凤英,曹鸿兴.中国、北半球和全球的气温突变分析及其趋势预测研究[J].大气科学,1995,19(2):140-148.

[20] 魏璐瑶,陆玉麒.“一带一路”背景下全球气候变化的响应机制研究[J].生态经济,2019,35(12):153-158.

[21] 吴成启,唐登勇.近 50 年来全球变暖背景下青藏高原气温变化特征[J].水土保持研究,2017,24(6):262-266,272.

[22] 何金海,詹丰兴,祁莉,等.全球变暖减缓期陆地地表气温变化特征和 CMIP5 多模式的未来情景预估[J].大气科学,2016,40(1):33-45.

[23] 张秀年,严华生,郭世昌.“全球变暖”背景下的全球气温时空变化特征[J].热带气象学报,2004,20(5):561-570.

[24] Ge Q S, Zhang X Z, Hao Z X, et al. Rates of temperature change in China during the past 2000 years[J]. Science China, 2011,54(11):1627-1634.

[25] Panin G N, Solomonova I V, Vyruchalkina T Y. Climatic trends in the middle and high latitudes of the Northern Hemisphere[J]. Water Resources, 2009,36(6):718-730.

[26] Kong Y, Wang C H. Responses and changes in the permafrost and snow water equivalent in the Northern Hemisphere under a scenario of 1.5℃ warming[J]. Advances in Climate Change Research, 2017,8(4):235-244.

[27] 徐婷,邵华,张弛.近 32 a 中亚地区气温时空格局分析[J].干旱区地理:汉文版,2015,38(1):25-35.

[28] 吴国雄,刘屹岷,何编,等.青藏高原感热气泵影响亚洲夏季风的机制[J].大气科学,2018,42(3):488-504.

[29] Zhang X B, Zwiers F W, Hegerl G C, et al. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends[J]. Nature, 2007,448(7152):461-465.

[30] Huang X, Zhou T J, Zhang W X, et al. Northern Hemisphere land monsoon precipitation changes in the twentieth century revealed by multiple reanalysis datasets[J]. Climate Dynamics, 2019,53(11):7131-7149.

[31] Chiang J C H, Friman A R. Extratropical cooling, inter-hemispheric thermal gradients, and tropical climate change[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2012,40:383-412.

[32] Wan H, Zhang X B, Zwiers F, et al. Attributing northern high-latitude precipitation change over the period 1966—2005 to human influence[J]. Climate Dynamics, 2015,45:1713-1726.

[33] Li R L, Wang C H, Wu D. Changes in precipitation recycling over arid regions in the Northern Hemisphere[J]. Theoretical & Applied Climatology, 2018,131(4):489-502.

[34] 梁珑腾,马龙,刘廷玺,等.1951—2014 年中国北方地区季节气温突变与变暖停滞年份的时空变异性[J].自然资源学报,2018,33(12):2149-2166.

[35] Liu H T, Zhang X J, Li X D, et al. Climatic characteristics of temperature and precipitation in Hetian River Basin during 1954—2007[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2009,4:26-30.

[36] 邱雅惠.中国区域气候多尺度突变特征及成因分析[D].南京:南京师范大学,2019.

[37] 马晓波,胡泽勇.青藏高原 40 年来降水变化趋势及突变的分析[J].中国沙漠,2005,25(1):139-141.



(上接第 312 页)

[30] 刘洋,于恩涛,杨建军,等.西北干旱区 1960—2019 年实际蒸散发时空变化特征[J].水土保持研究,2021,28(6):75-80,89.

[31] 龙爱华,徐忠民,张志强.虚拟水理论方法与西北四省(区)虚拟水实证研究[J].地球科学进展,2004,19(4):577-584.

[32] 秦丽杰,靳英华,段佩利.吉林省西部玉米生产水足迹研究[J].地理科学,2012,32(8):1020-1025.

[33] 赵璐,赵作权.基于特征椭圆的中国经济空间分异研究[J].地理科学,2014,34(8):979-986.

[34] 赵宏波,余涤非,苗长虹,等.基于 POI 数据的郑州市文化设施的区位布局特征与影响因素研究[J].地理科学,2018,38(9):1525-1534.

[35] 任嘉敏,马延吉.东北地区工业污染时空格局演变研究[J].环境科学学报,2018,38(5):2108-2118.



(上接第 319 页)

[30] Wang C, Wang S, Fu B J, et al. Precipitation gradient determines the tradeoff between soil moisture and soil organic carbon, total nitrogen, and species richness in the Loess Plateau, China[J]. Science of the Total Environment, 2017,575:1538-1545.

[31] 黄麟,曹巍,吴丹,等.西藏高原生态系统服务时空格局及其变化特征[J].自然资源学报,2016,31(4):543-555.

[32] 张华国.试论新时期西藏“一江两河”农业生态流域资源开发和经济发展的生态环境问题及对策[J].西藏农业科技,2017,39(2):40-44.

[33] Niu Q, Liu L, Heng J, et al. A multi-index evaluation of drought characteristics in the Yarlung Zangbo River Basin of Tibetan Plateau, Southwest China[J]. Frontiers in Earth Science, 2020,8. DOI: 10.3389/feart.2020.00213.

[34] 拉珍,拉巴,陈涛,等.基于 TVDI 的西藏“一江两河”地区干旱监测研究[J].高原山地气象研究,2015,35(4):48-52.