

文章编号: 2096-1618(2022)05-0592-09

# 中亚降水和气温的时空演变特征

严 谨, 赵 勇

(成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225)

**摘要:**为提升对中亚地区区域气候变化规律的认识,利用 1936–2018 年的 CRU 逐月降水和气温资料,采用一元线性回归和 11 年滑动平均等统计方法,将中亚划分为 4 个区域,分析不同区域中亚降水和气温的时空演变特征。结果表明:(1)中亚的气温和降水在春季和冬季年际变率最大,前者的大值区位于哈萨克斯坦的北部,后者的大值区位于帕米尔高原及邻近区域。(2)中亚不同区域各季节气温均呈显著增暖趋势,尤其春季和冬季的高纬度地区,降水变化呈现明显的区域差异,降水增加主要体现在春季和冬季的高纬度地区(Ⅱ区和Ⅲ区)和夏季的帕米尔高原和天山一带(Ⅰ区)。(3)过去 83 年,中亚各区域主要经历了 3~4 个气候类型,近 20 余年,主要体现为暖-干型和暖-湿型。各区域春季和冬季降水对气温增暖响应一致性较好,均为暖-湿型,秋季中亚中纬度地区(Ⅰ区和Ⅳ区)降水和气温一致变化,而高纬度地区(Ⅱ区和Ⅲ区)气温和降水相反变化,为暖-干型。

**关键词:**大气科学;气候变化;中亚;气温;降水;时空特征;气候类型

**中图分类号:**P467

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2022.05.016

## 0 引言

IPCC 第 5 次评估报告指出,全球大部分地区呈显著增暖趋势,且未来百年将继续变暖<sup>[1]</sup>。降水的变化却表现出较大的区域差异,全球陆地 54.3% 的区域呈增加趋势,45.7% 的区域呈减少趋势<sup>[2]</sup>。2000 年以前,东半球降水减少,西半球降水增加<sup>[3]</sup>。降水在北半球的纬向分布上呈低纬多、高纬少的特征,而南半球高纬地区的降水充沛,降水的纬向分布呈双峰型特征<sup>[4]</sup>。全球主要干旱区降水减少,而湿润区降水在增加,极端降水事件也变得更加频繁<sup>[5-7]</sup>。在 20 世纪中期以后,全球降水量在亚洲、非洲和南极洲呈减少趋势,在北美北部和南美南部呈增加趋势<sup>[8-9]</sup>。由于降水的区域差异,导致在全球变暖背景下,全球陆地区域气候类型主要存在“暖干”和“暖湿”两种演变趋势。

干旱区因其生态环境脆弱的特殊性,对全球气候变化的响应更加敏感,而降水是制约干旱区经济活动的关键因子<sup>[10]</sup>。全球主要干旱区近百年来呈明显的变干趋势,干旱灾害的发生频率变高<sup>[11]</sup>。干旱区内的降水分布很不均匀,呈现出干旱的地方更加干旱,湿润的地方更加湿润的特点<sup>[12]</sup>。部分地区气温上升的同时降水也增多,水汽输送增加,总降水量以及极端降水量加剧增长,蒸散量增加,水循环加快<sup>[13-15]</sup>。而有些区域气温上升明显,降水呈减少趋势,干旱区面积增加<sup>[16-18]</sup>。

中亚干旱区增温主要体现在冬春两季<sup>[19]</sup>,天山山区在全球升温滞缓背景下气温处于高位态波动状态,

加大了水循环的不稳定性<sup>[20]</sup>。中亚的中部以及西南部相比其他地区在 20 世纪末有更加显著的增温过程<sup>[21]</sup>。中亚地区的降水受西风环流控制,在各个时间尺度上均存在着不同于季风区的降水模式——“西风模式”<sup>[22]</sup>。虽然中亚干旱区降水近几十年来整体呈增加趋势,但存在明显时空和年际变化差异<sup>[23]</sup>。如中国的新疆地区自 1987 年以来,气候由“暖干”向“暖湿”转型<sup>[24]</sup>。受 ENSO 的影响,中亚降水除了年际变化特征也表现出季节性差异<sup>[25]</sup>,有别于全球其他干旱区“干旱的地方更加干旱,湿润的地方更加湿润”的结论<sup>[26]</sup>。以往针对中亚气候特征和气候类型演变的研究,更集中在单一因子或单一区域,鉴于该地区不同区域主要气候因子变化的差异性,有必要分区域分析,得出各区域不同季节主要气候因子和气候类型的演变特征,提升对该区域气候变化规律的认识。

## 1 资料与方法

本文使用的气温和降水数据均由英国东英吉利大学(East Anglia)气候研究中心(climatic research unit, CRU)提供,本研究使用的版本为 CRU TSv4.0,时间覆盖 1901–2018 年,空间分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ,被广泛运用于气候变化研究中<sup>[27-28]</sup>。已有研究对中亚区域数据的时间尺度适用性做了检验,认为 1930 年之后的 CRU 资料可靠性更高<sup>[29]</sup>,因此本文主要分析 1936–2018 年。春季 3–5 月,夏季 6–8 月,秋季 9–11 月,冬季 12 月至次年的 1–2 月。

中亚包括哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、土库曼斯坦、乌兹别克斯坦 5 个国家,约占全球干

收稿日期:2021-10-08

基金项目:国家重点研发计划专项资助项目(2018YFC1507103);国家自然科学基金资助项目(41875102);四川省科技计划资助项目(2020JDJQ0050)

旱区面积的 1/3<sup>[30-31]</sup>,是世界上最大的内陆干旱区。如图 1(a) 所示,中亚地区地势东南高,西北低,有高原、盆地、平原、丘陵和山地等多种地形地貌,植被分布

有明显的空间分异性<sup>[32-33]</sup>。图 1(b) 给出了中亚的年降水分布,中亚降水和地形分布基本一致,帕米尔高原及周边地区是降水大值区。

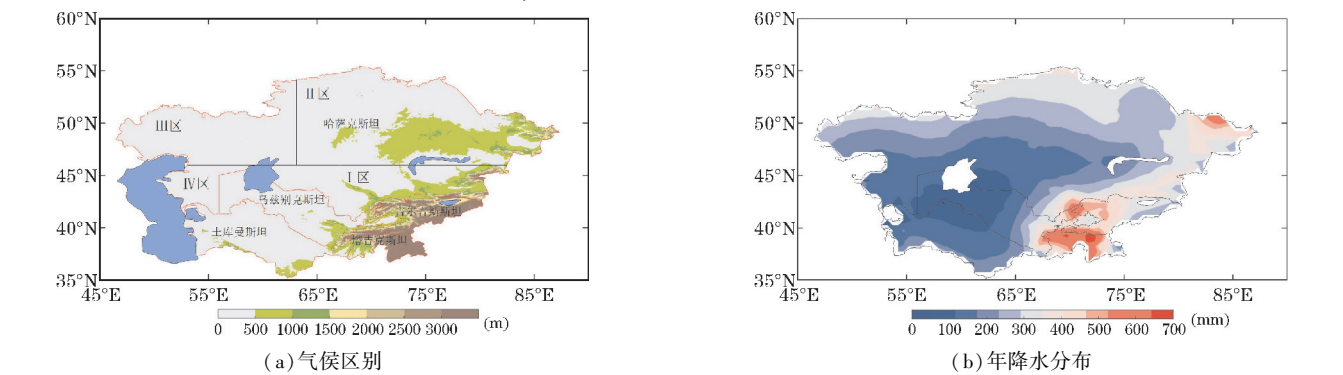


图 1 中亚气候区划及年降水分布

为客观描述中亚地区年降水量的空间分布规律,图 2 给出了 EOF 前 4 个模态特征向量空间分布情况。由图可见,模态 1 的方差贡献率达 42.1%,可以表征中亚地区降水空间分布的主要类型,中亚降水呈整体变化,大值区位于帕米尔高原和天山山脉一带,表明该区域的降水变化率最大。模态 2 的方差贡献率为 17.4%,主要反映中亚降水南北方向的差异性。模态 3 的方差贡献率为 8.9%,主要反映中亚降水东西方向的差异性。模态 4 的方差贡献率为 5.1%,主要反映中亚降水在模态 2 南北差异的基础上,又体现东西变化。综上可见。中亚降水在空间分布规律上体现出东西和南北方向上的差异性。本文基于已有研究对中亚气候

区域的划分<sup>[29]</sup>,结合图 2 的分析结果,将中亚划分为如下 4 个子区域(图 1a), I 区:67°E ~ 东部国界线,南部国界线 ~ 46°N, II 区:63°E ~ 东部国界线,46°N ~ 北部国界线, III 区:西部国界线 ~ 63°E,46°N ~ 北部国界线, IV 区:西部国界线 ~ 67°E,南部国界线 ~ 46°N。I 区主要包括了帕米尔高原和天山山区,地貌以山地和盆地为主, II 区位于哈萨克斯坦东北部,地貌以丘陵和盆地为主, III 区位于哈萨克斯坦西北部,地形以平原为主, IV 区包含了土库曼斯坦、乌兹别克斯坦和哈萨克斯坦部分地区,地貌以沙漠为主。

本文利用一元线性回归、滑动平均等方法对气温及降水资料做进一步的分析。

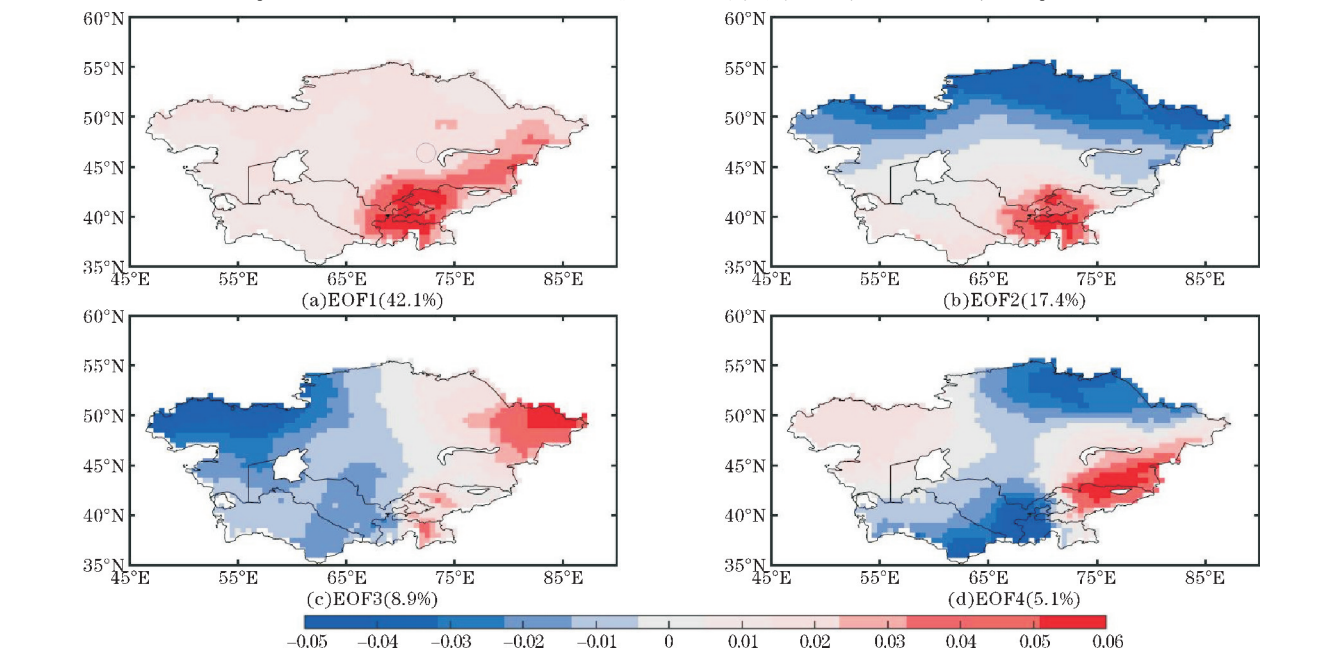


图 2 中亚降水 EOF 分析

2 结果分析

2.1 中亚降水和气温的年际变率特征

为揭示中亚地区 1936–2018 年气温的年际变化

幅度,图 3 给出了各季节气温的均方差分布。由图 3(a) 可见,春季气温均方差为 1.4℃ ~ 3.2℃,其中春季气温均方差的大值区主要集中在哈萨克斯坦的北部,均方差可达到 3.2℃,说明该地区气温的年变化幅度较大。帕米尔高原和卡拉库姆沙漠,均方差约为

1.4℃,气温的年变化幅度相对较小。相比春季的气温均方差,夏季气温均方差的数值大幅度减少,为0.4℃~1.8℃,均方差的大值区主要位于哈萨克斯坦的高纬度区域,低值区仍集中在帕米尔高原及周边地区(图3b)。秋季气温均方差的分布与夏季类似,但

整体均方差数值有所减小(图3c),说明秋季气温的年际变化幅度较小。冬季气温均方差为1℃~2.8℃,与春季相似,大值区主要集中在哈萨克斯坦的东北部,从高纬度到低纬度地区均方差依次减小,小值区位于帕米尔高原一带(图3d)。

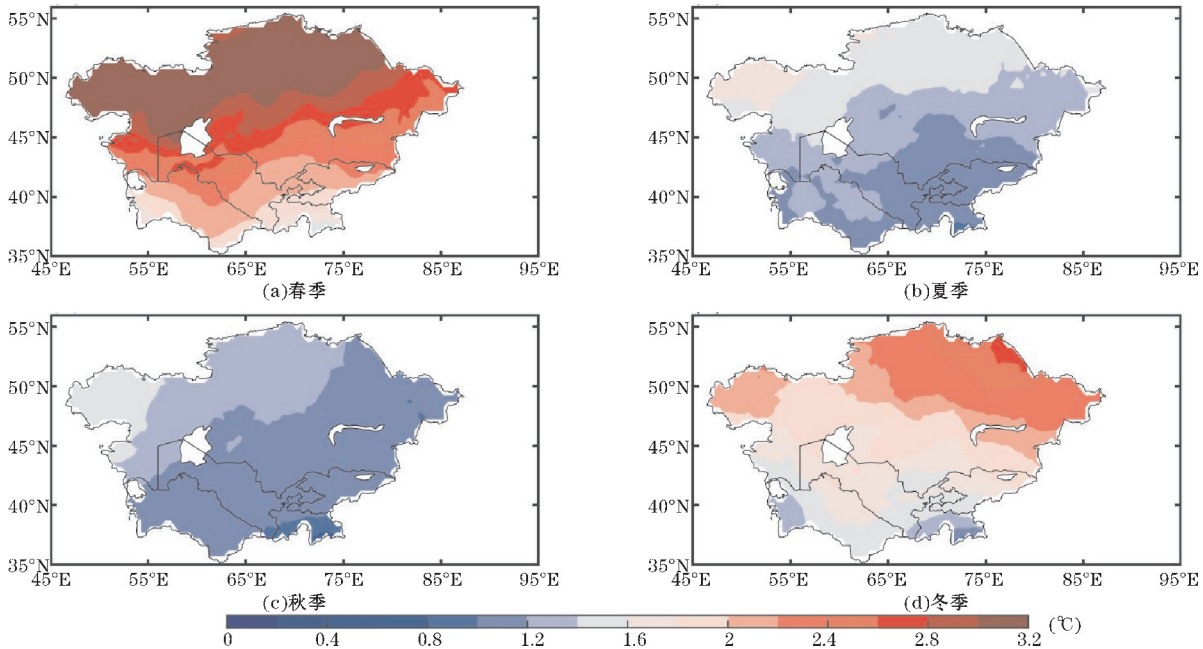


图 3 中亚 1936–2018 年气温均方差分布

图 4 给出了中亚四季降水的均方差分布。由图 4(a)可见,春季降水均方差的大值区主要位于塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦,其次为乌兹别克斯坦和土库曼斯坦的东南部,说明上述地区春季降水的年际变化幅度相对较大,哈萨克斯坦整体的降水均方差最小,说明该区域降水年际变化幅度最小。夏季降水均方差的大值区主要位于天山山区和哈萨克斯坦的东北部,上

述区域也是夏季降水的大值区,中亚西部的土库曼斯坦和乌兹别克斯坦,降水均方差最小(图4b)。秋季降水的均方差均比较小,中亚西部沙漠秋季降水的年际变化差异最小,大值区位于帕米尔高原一带(图4c)。冬季降水均方差的大值区位于帕米尔高原和哈萨克斯坦东部的部分地区,里海的东部地区均方差最小(图4d)。

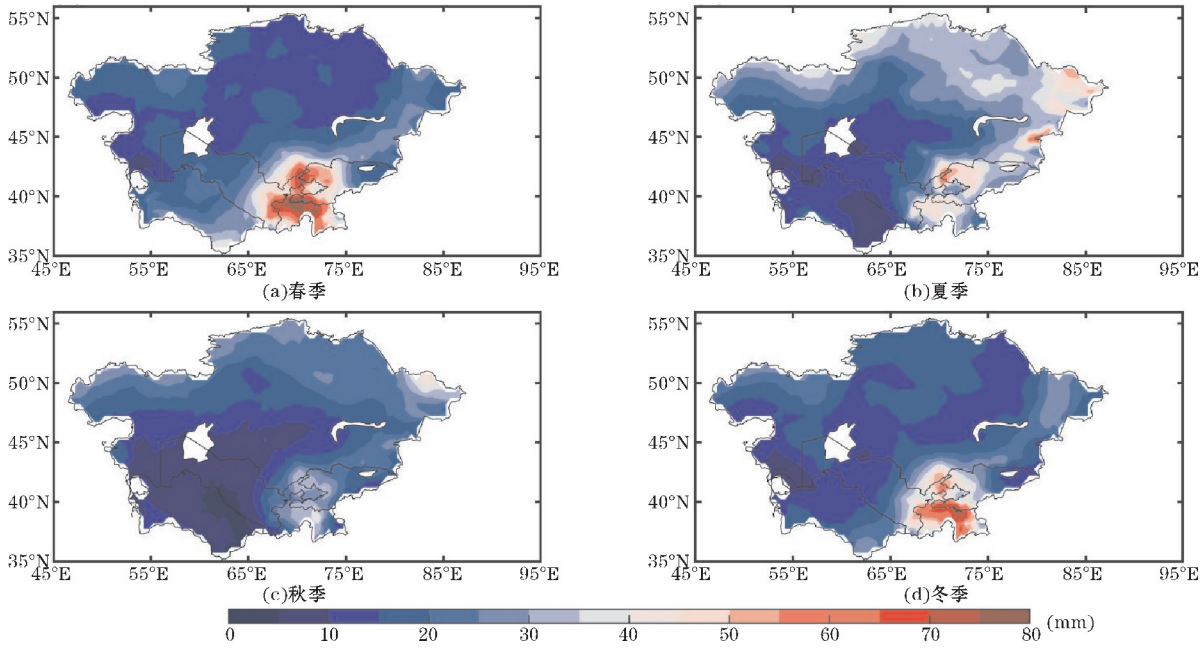


图 4 中亚 1936–2018 年降水均方差分布



## 2.2 中亚降水和气温的趋势变化

过去 100 年,全球大部分地区均呈显著增暖趋势,中亚干旱区气温如何变化呢? 图 5 为中亚各区域气温变化趋势,由图可见,各区域不同季节气温均呈增暖趋势,且能通过 95% 的信度检验,说明是显著增暖过程。中亚春季气温呈显著增暖趋势,哈萨克斯坦的东北地区,是中亚过去 80 年春季气温增加最为迅速的区域,增暖幅度达到  $0.4 \sim 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ,增暖幅度从高纬度向低纬度地区递减,土库曼斯坦和乌兹别克斯坦东南部是增暖幅度最小的区域,约为  $0.1 \sim 0.2 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。中亚夏季气温也呈整体增暖趋势,但是增暖幅度小于春季,

中亚西部,包括哈萨克斯坦西部、土库曼斯坦和乌兹别克斯坦是增暖幅度最大的区域,约为  $0.2 \sim 0.3 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ,其余地区增暖幅度在  $0.1 \sim 0.2 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$  (图 5b)。秋季增暖幅度相对最小,仅哈萨克斯坦部分地区增暖幅度在  $0.2 \sim 0.3 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ,其余地区均在  $0.1 \sim 0.2 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$  (图 5c)。冬季气温增加幅度较秋季大幅增加,哈萨克斯坦毗邻中国新疆的东部地区增暖幅度可达  $0.4 \sim 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ,其余大部分地区增暖幅度在  $0.3 \sim 0.4 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ,中亚西南部增暖幅度最小,约为  $0.2 \sim 0.3 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$  (图 5d)。由上可见,中亚各季节气温均呈增暖趋势,春季和冬季尤其显著,这和已有研究一致<sup>[19]</sup>。

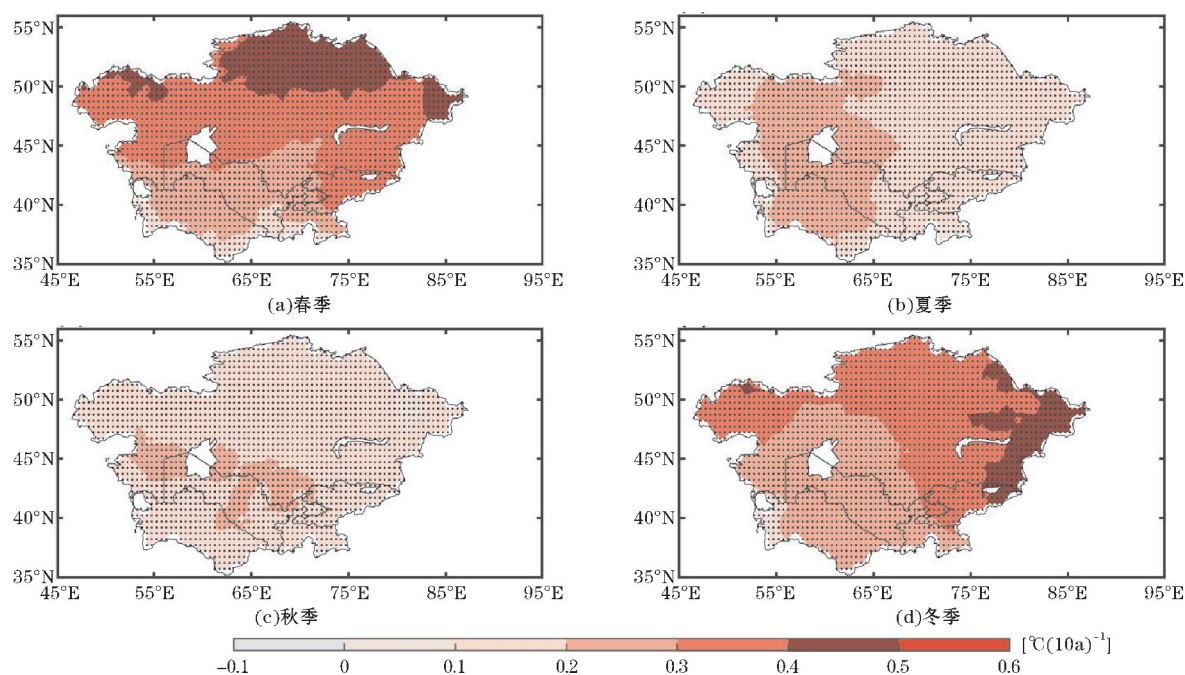


图 5 中亚 1936–2018 年气温趋势分布

由上述分析可见,中亚各季节气温虽然均呈增暖趋势,但是不同区域还是存在较大差异,图 6 给出了中亚地区各季节气温线性变化趋势。I 区春季气温平均增暖幅度为  $0.3 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ,20 世纪 50 年代至 70 年代中期,是该区域春季最冷的时期,平均温度在  $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  以下,90 年代后期至今,是最暖时期,平均温度在  $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  以上。II 区春季气温增暖幅度达到  $0.41 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ,是中亚春季气温增暖最快的区域,20 世纪 50 和 60 年代是该区域春季最冷的时期,90 年代中后期至今,是最暖的时期。III 区春季气温增暖幅度为  $0.39 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ,仅次于 II 区,20 世纪 50 年代至 70 年代中期,是该区域春季最冷的时期,90 年代中期至今,是最暖的时期。IV 区春季气温增暖幅度为  $0.27 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ,是中亚春季气温增暖最慢的区域,增

温幅度比 II 区低  $0.14 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。总体来看,中亚高纬度地区增温幅度要快于低纬度地区,东部要快于西部。夏季 I 区气温增暖幅度为  $0.15 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ,远低于春季,20 世纪 50 年代,为该区域夏季最冷时期,90 年代中后期至今,为最暖时期。II 区夏季气温增暖幅度与 I 区相近,为  $0.16 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ,较春季减小  $0.25 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ,20 世纪 40 年代中后期至 50 年代,平均气温相对最低。III 区夏季气温增暖幅度为  $0.21 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ,远低于春季增温幅度,20 世纪 40 年代,为该区域夏季最冷的时期,近 10 年为最暖的时期。IV 区夏季气温增暖幅度相对最快,为  $0.22 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ,高于其他 3 个区域,但是差异幅度较春季小。秋季气温增暖幅度较夏季进一步减小, I 区和 II 区秋季气温增暖幅度相对较小为  $0.17 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$  和

0.15 ℃·(10a)<sup>-1</sup>。Ⅲ区为0.18 ℃·(10a)<sup>-1</sup>，Ⅳ区秋季气温增暖相对快一些，但仅为0.19 ℃·(10a)<sup>-1</sup>。中亚冬季气温增幅迅速增加，Ⅰ区和Ⅱ区冬季气温的增暖幅度为0.34 ℃·(10a)<sup>-1</sup>和0.37 ℃·(10a)<sup>-1</sup>，约为秋季增暖幅度的2倍。Ⅲ区冬季气温增暖幅度略小一些，为0.32 ℃·(10a)<sup>-1</sup>，约为秋季的2倍。Ⅳ区冬季气温的增暖幅度为0.24 ℃·(10a)<sup>-1</sup>，是中亚冬季气温增暖

最慢的区域。综上可见，在气候变暖背景下，中亚的气温均呈增暖趋势，在各个季节都是显著的，其中春季增暖最为迅速，其次为冬季，再次为夏季，秋季最慢。冬季和春季，高纬度地区增暖幅度要更快一些，夏季和秋季，中亚西南部的土库曼斯坦和乌兹别克斯坦，气温增暖幅度相对要更快一些。

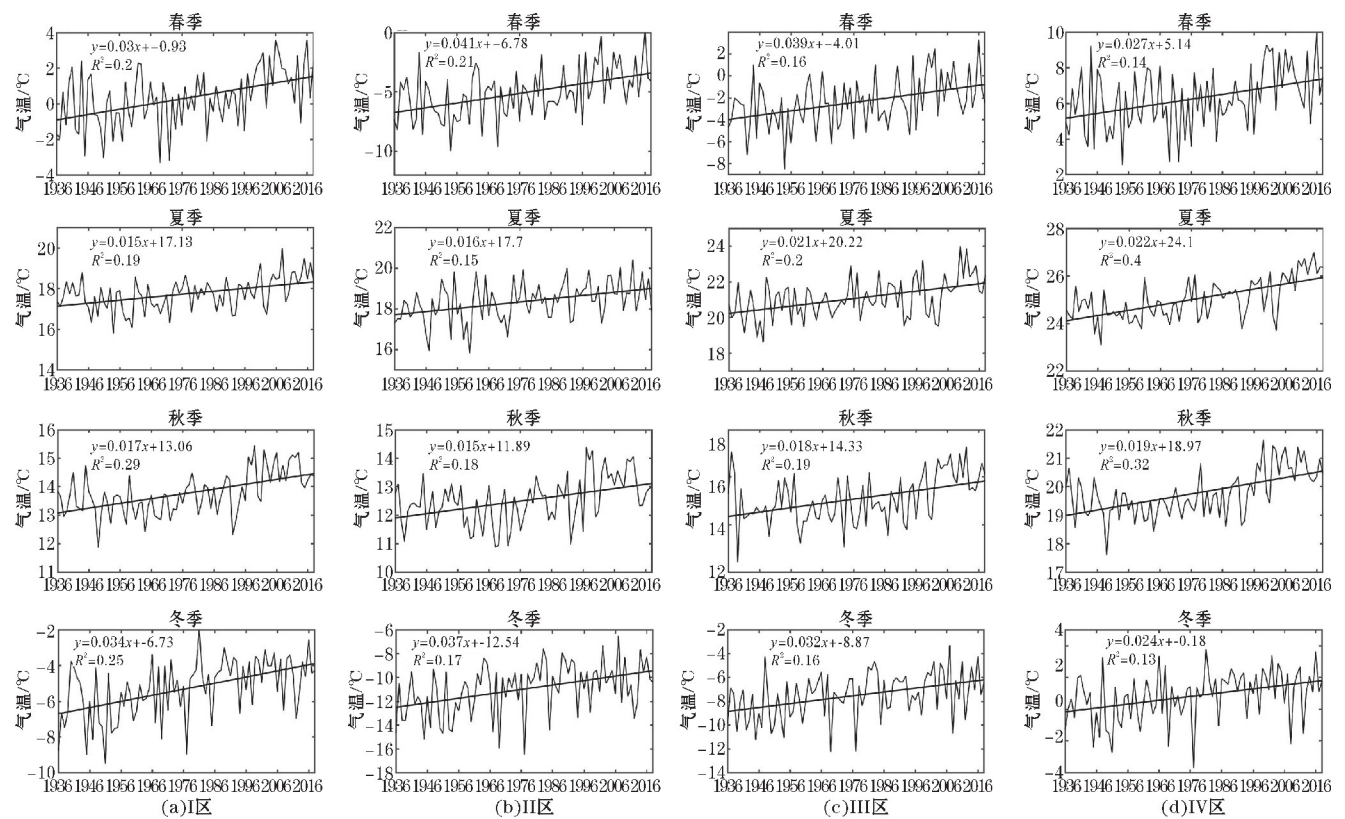


图 6 中亚各区域 4 个季节平均气温的线性趋势变化

图 7 为中亚各季节降水的空间趋势分布。由图 7 (a) 可见，春季降水增加主要集中在哈萨克斯坦北部的高纬度地区，此外，天山山脉和帕米尔高原等地区，春季降水也呈显著增加趋势，中亚西南部呈微弱的减少趋势，但并不显著。夏季降水显著增加区域主要位于帕米尔高原和哈萨克斯坦的西南部，但是哈萨克斯坦的西北部和土库曼斯坦等地区，降水呈微弱的减少趋势(图 7b)。秋季降水的增加区域主要位于天山山脉西部及邻近地区，哈萨克斯坦的北部降水整体呈减少趋势，西北部尤其显著，中亚西南部秋季降水呈微弱的增加趋势(图 7c)。冬季降水增加区域最为广泛，整个中亚地区的降水均呈显著增加趋势，塔吉克斯坦尤其显著(图 7d)。具体来看，由图 8 可见，Ⅰ区春季降水呈增加趋势，增加幅度为1.58 mm·(10a)<sup>-1</sup>，20 世纪 50 年代至 70 年代，是降水最多的时期，70 年代中期至

90 年代中期，是降水最少的时期。Ⅱ区春季降水也呈增加趋势，增加幅度为1.35 mm·(10a)<sup>-1</sup>与Ⅰ区类似，20 世纪 80 年代中期至 90 年代中期，是降水最少的时期。Ⅲ区春季降水的增加趋势最为显著，增加幅度为1.71 mm·(10a)<sup>-1</sup>。Ⅳ区春季降水的增加趋势最弱，增加幅度为0.36 mm·(10a)<sup>-1</sup>。Ⅰ区夏季降水呈增加趋势，增加幅度为0.9 mm·(10a)<sup>-1</sup>，但并不显著，其他几个区域降水也成微弱增加趋势。中亚秋季降水没有明显的线性趋势，Ⅰ区和Ⅳ区呈微弱增加趋势，Ⅱ区和Ⅲ区秋季降水呈微弱减少趋势。中亚冬季降水呈显著增加趋势，各个区域降水都增加，其中Ⅰ区和Ⅱ区增加最多，增加幅度大于2mm·(10a)<sup>-1</sup>。综上可见，降水并非和气温一样，各季节整体呈增加趋势，表现出明显的区域特征，降水增加主要体现在冬季，其次为春季，夏季和秋季相对最少，与气温增暖显著季节一致。



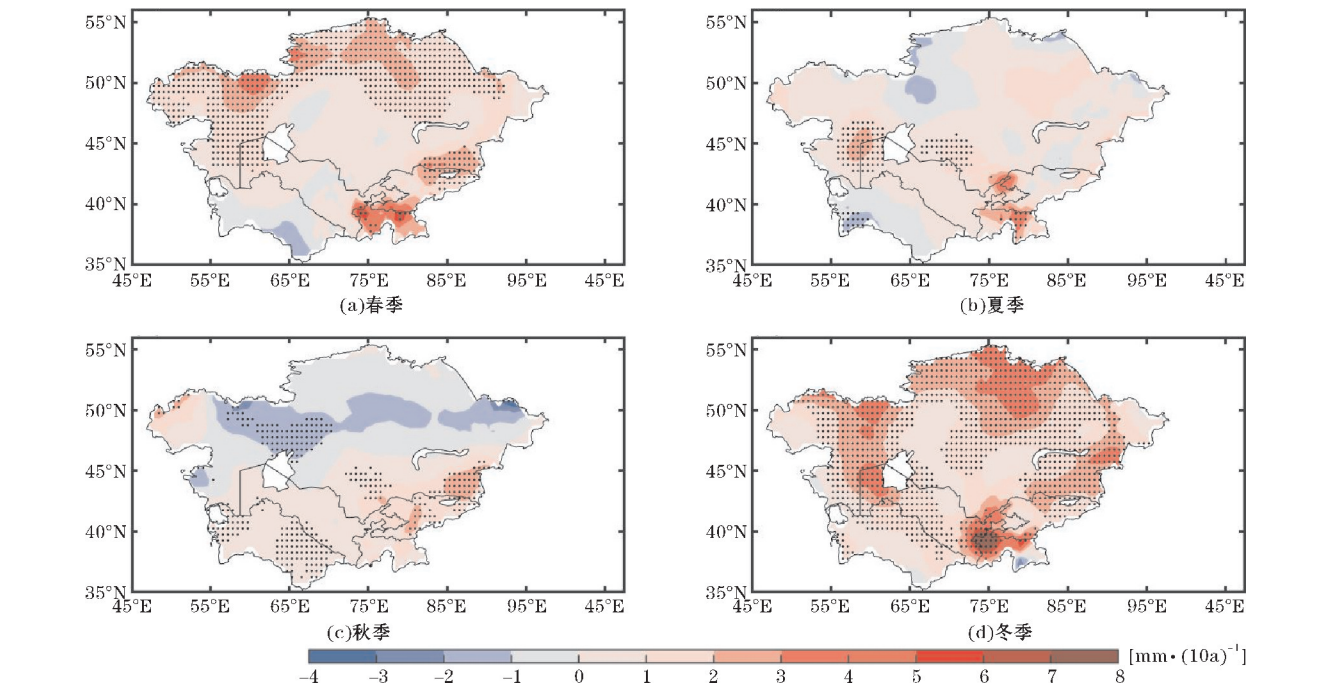


图7 中亚1936–2018年降水趋势分布(打点区域表示通过95%信度检验)

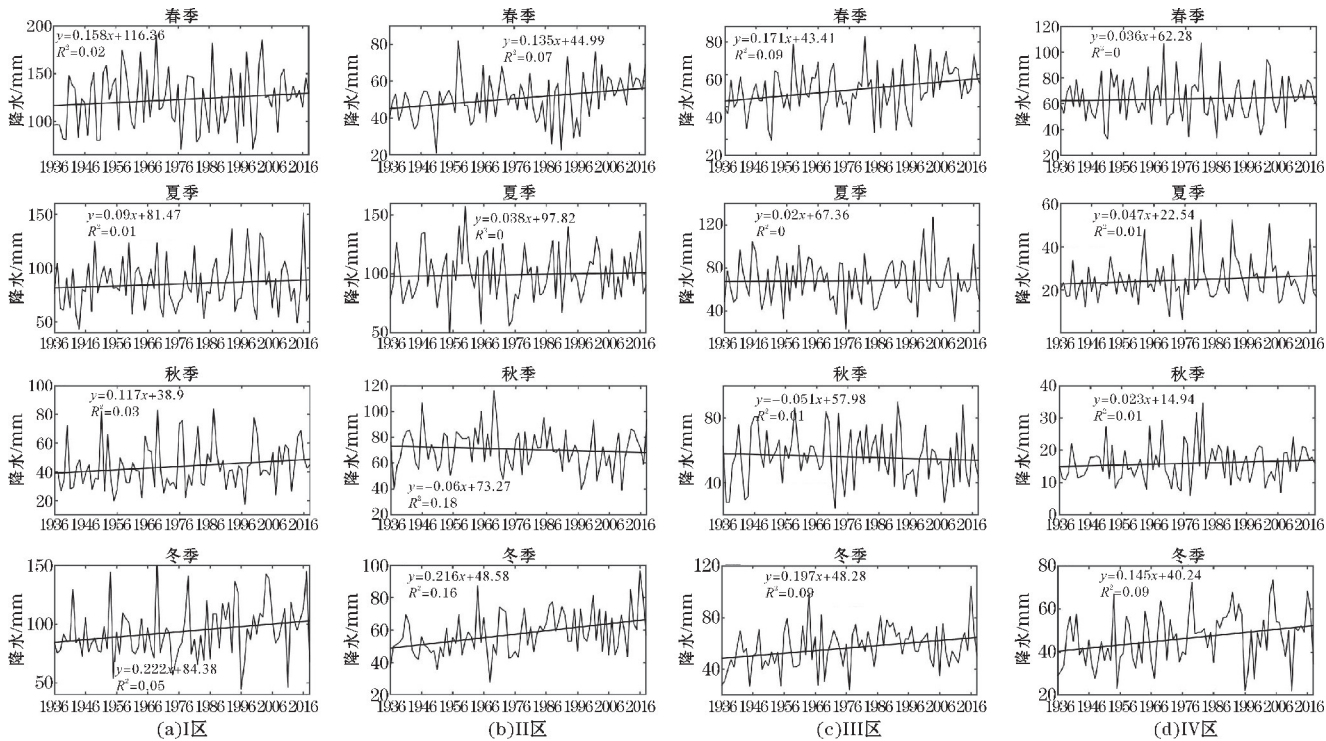


图8 中亚各区域四季平均降水的线性趋势变化

2.3 中亚各区域气候类型的演变特征

综合考虑气温和降水异常,可以将气候划分为暖湿、暖干、冷湿和冷干四种类型,不同气候类型的出现,对区域生活生产活动,具有重要的影响。为揭示近80多年来中亚各个区域气候类型演变的规律,图9给出了中亚各个区域四季降水和气温的11 a滑动平均图。由图9可见,春季I区气候主要经历了4个类型,1941–1950年,降水偏少,气温偏低,气候呈冷干型;1951–

1977年,气温偏低,但是降水偏多,气候呈冷湿型;1977–1993年,气温偏低同时降水偏少,气候呈冷干型;1993–2013年,是气温最高的时期,同时降水也处于正位相,气候属于暖湿型。II区春季气候经历了4个类型,1941–1953年,气温偏低,降水也偏少,气候呈冷干型;1953–1978年,气温持续偏低但降水增加,气候呈冷湿型;1978–1996年,气温偏暖,降水偏少,气候进入暖干期;1996–2013年,降水偏多,气温偏暖,气候呈暖湿型。III区春季气候主要经历了4个类型,1941–

1955 年, 气温偏冷, 降水偏少, 属于典型的冷干型; 1955–1968 年, 气温偏冷, 但降水偏多, 经历了短暂的冷湿期; 1968–1993 年, 降水整体偏少, 气温也偏冷, 又进入冷干期; 1993–2013 年, 气温进入暖位相, 降水也偏多, 气候进入暖湿期。Ⅳ区春季气候主要经历了 4

个类型, 1941–1953 年, 气温偏低, 降水偏少, 气候属于冷干型; 1953–1984 年, 气温依然偏低, 但是降水偏多, 气候进入冷湿期; 1984–1998 年, 降水和气温呈小幅波动变化, 气候类型不明显; 1998–2013 年气温偏暖, 降水也微弱偏多, 气候呈暖湿型。

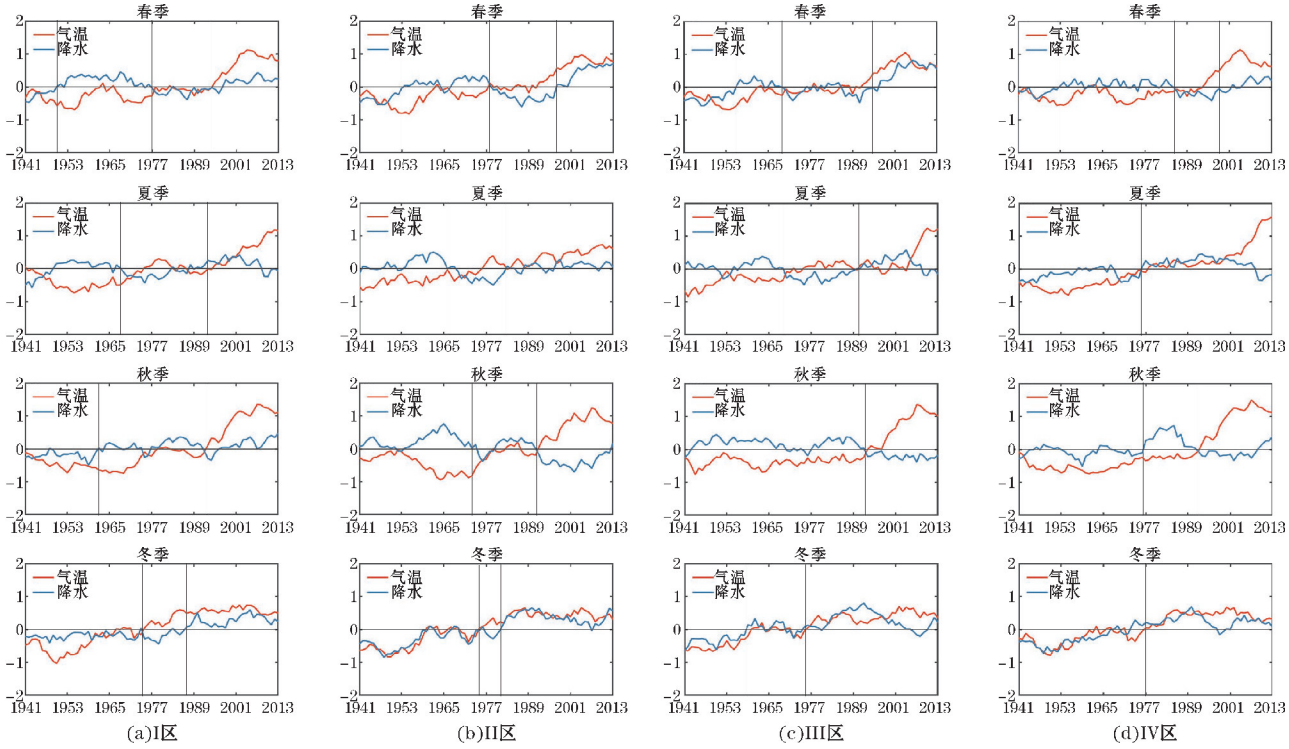


图9 中亚各区域四季降水和气温的 11 年滑动平均

夏季 I 区气候主要经历了 3 个类型, 1949–1967 年, 气温偏低, 降水偏多, 属于典型的冷湿型; 1967–1992 年, 降水和气温呈小幅波动变化, 气候类型不明显; 1992–2013 年, 气温偏暖, 降水偏多, 进入暖湿期。Ⅱ区夏季气候经历了 3 个类型, 1941–1966 年, 气温偏冷, 降水偏多, 属于典型的冷湿型; 1966–1982 年, 降水一直偏少, 气温由偏低向偏暖转变, 气候进入暖干期; 1982–2013 年, 气温偏暖, 降水偏多, 气候转为暖湿型。Ⅲ区夏季气候主要经历了 3 个类型, 1941–1968 年, 气温偏低, 降水偏多, 气候呈冷湿型; 1968–1990 年气温偏暖, 降水偏少, 气候进入暖干期; 1990–2013 年, 是气温最高的时期, 且降水偏多, 气候呈暖湿型。Ⅳ区夏季气候主要经历了 2 个类型, 1941–1976 年, 气温一直偏低, 降水由偏少向偏多转变, 气候主要呈冷干型; 1976–2013 年, 是气温最高的时期, 降水先偏多后偏少, 气候由暖湿型向暖干型过渡。

秋季 I 区气候主要经历了 3 个类型, 1941–1962 年, 气温偏低且降水偏少, 属于典型的冷干型; 1962–1992 年, 气温偏冷, 降水偏多, 进入冷湿期; 1992–2013 年, 是气温最高的时期, 且降水依然偏多, 气候呈暖干型。Ⅱ区秋季气候经历了 3 个类型, 1941–1973 年, 气温偏低, 降水偏多, 气候呈冷湿型。1973–1991 年, 降水和气温呈小幅波动变化, 气候类型不明显; 1991–

2013 年, 气温依然偏高, 但降水偏少, 气候呈暖干型。Ⅲ区秋季气候主要经历了 2 个类型, 1941–1991 年, 气温偏冷, 降水偏多, 属于典型的冷湿型; 1991–2013 年, 是气温最暖的时期, 但降水偏少, 气候呈暖干型。Ⅳ区秋季气候经历了 3 个类型, 1941–1976 年, 气温偏低, 降水偏少, 属于典型的冷干型; 1976–1991 年, 气温依然偏低, 但降水偏多, 气候呈冷湿型; 1991–2013 年, 是气温最暖的时期, 但降水偏少, 气候进入暖干期。

冬季 I 区气候经历了 3 个类型, 1941–1975 年, 气温偏低, 降水偏少, 属于典型的冷干型; 1975–1987 年, 降水依然偏少, 气温进入暖位相, 气候进入暖干期; 1987–2013 年, 气温偏暖, 降水偏多, 气候呈暖湿型。Ⅱ区冬季气候经历了 3 个类型, 1941–1975 年, 气温偏低, 降水偏少, 气候为冷干型; 1975–1980 年降水和气温呈小幅波动变化, 气候类型不明显; 1980–2013 年, 气温偏暖, 降水偏多, 气候进入暖湿期。Ⅲ区冬季气候经历了 3 个类型, 1941–1958 年, 气温偏低, 降水偏少, 属于典型的冷干型; 1958–1976 年, 降水和气温呈小幅波动变化, 气候类型不明显; 1976–2013 年, 气温偏暖, 降水偏多, 气候转为暖湿型。Ⅳ区冬季气候经历了 2 个类型, 1941–1977 年, 气温偏低, 降水偏少, 气候为冷干型; 1977–2013 年, 降水偏多, 气温偏暖, 气候进入暖湿期。



### 3 结论

本文基于1936–2018年CRU逐月降水和气温数据,分析了中亚地区气温和降水的变化特征,并将中亚划分为4个区域,讨论了各区域降水和气温的线性趋势以及气候类型的演变特征。主要结论如下:

(1)春季和冬季是中亚地区气温年际变率最大的季节,春季气温年际变率的大值区主要位于Ⅱ区和Ⅲ区哈萨克斯坦的北部区域,冬季主要位于Ⅰ区和Ⅱ区的东部地区。春季和冬季也是中亚地区降水年际变率最大的季节,大值区主要位于Ⅰ区帕米尔高原及天山山脉的周边地区,Ⅳ区乌兹别克斯坦和土库曼斯坦,各季节降水年际变率均较小。中亚地区各季节气温均呈增暖趋势,春季Ⅱ区哈萨克斯坦北部和天山北部,是增暖幅度最大的区域,夏季Ⅳ区里海和咸海周边地区增暖幅度相对较大,秋季气温增加最为缓慢,Ⅰ区和Ⅱ区的东部地区是冬季增暖最快的区域。春季和冬季,增暖主要体现在高纬度地区,夏季和秋季,增暖主要集中在里海和咸海周边地区。降水存在明显的区域性差异,春季Ⅱ区哈萨克斯坦北部的降水显著增加,夏季Ⅰ区帕米尔高原的降水显著增加,Ⅳ区里海南部地区的降水显著减少,秋季Ⅰ区哈萨克斯坦东南部的降水显著增加,而Ⅱ区和Ⅲ区哈萨克斯坦北部的降水显著减少,冬季降水基本整体增加,尤其是Ⅰ区的帕米尔高原和Ⅱ区哈萨克斯坦的高纬度地区。

(2)过去80余年,中亚各区域气候类型基本演变了3~4个过程,冬春两季降水对气温增加有较好的一致性响应。20世纪90年代后,春季高纬度地区即Ⅱ区和Ⅲ区,呈明显的暖-湿型,中纬度的土库曼斯坦和乌兹别克斯坦降水增加没有高纬度地区迅速。夏季中亚各区域降水对气温的响应基本一致,气候整体由暖-湿型向暖-干型转变。秋季仅Ⅰ区帕米尔高原一带,降水对气温增加有较好的一致性响应,体现为暖-湿型,高纬度地区则相反,气温升高,降水变化很小或者呈减少趋势,呈暖-干型,Ⅳ区的土库曼斯坦和乌兹别克斯坦,由暖-干型向暖-湿型转变。冬季中亚各区域降水对气温响应一致,近20余年气候均呈暖-湿型。说明春季和冬季降水对气温增加响应一致性较好,均为暖-湿型,秋季中亚中纬度地区降水和气温一致变化,而高纬度地区相反变化。

### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [M/OL]. Cambridge: Cambridge University Press, in press. 2013-09-30.
- [2] 施晓晖,徐祥德. 1951–2002 年全球陆地气温和降水的年代际趋势转折特征[J]. 自然科学进展, 2008, 18(9): 1016–1026.
- [3] 徐保梁,杨庆,马柱国. 全球不同空间尺度陆地年降水的年代尺度变化特征[J]. 大气科学, 2017, 41(3): 593–602.
- [4] 施能,陈绿文,封国林,等. 1920–2000 年全球陆地降水气候特征与变化[J]. 高原气象, 2004, 23(4): 435–443.
- [5] 周雅蔓,赵勇,刘晶. 我国新疆北部地区夏季极端降水事件的特征分析[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2): 598–608.
- [6] 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.
- [7] Yao J Q, Chen Y N, Zhao Y, et al. Response of vegetation NDVI to climatic extremes in the arid region of Central Asia: a case study in Xinjiang, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2018, 131(3): 1503–1515.
- [8] 施能,黄先香,杨扬. 1948–2000 年全球陆地年降水量场趋势变化的时空特征[J]. 大气科学, 2003, 27(6): 971–982.
- [9] 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.
- [10] 卢函,杜德斌,桂钦昌,等. 跨界水冲突、合作与全球水政治关系时空演化[J]. 资源科学, 2020, 42(6): 1162–1174.
- [11] 李新周,刘晓东,马柱国. 近百年来全球主要干旱区的干旱化特征分析[J]. 干旱区研究, 2004, 21(2): 97–103.
- [12] Hu Z Y, Chen X, Chen D L, et al. “Dry gets drier, wet gets wetter”: A case study over the arid regions of central Asia[J]. International Journal of Climatology, 2018, 39(2): 1072–1091.
- [13] 徐栋,李若麟,王澄海. 全球变暖背景下亚非典型干旱区降水变化及其与水汽输送的关系研究[J]. 气候与环境研究, 2016, 21(6): 737–748.
- [14] Yao J Q, Chen Y N, Chen J, et al. Intensification of extreme precipitation in arid Central Asia[J]. Journal of Hydrology, 2021, 598: 125760.
- [15] Yao J Q, Chen Y N, Zhao Y, et al. Climatic and associated atmospheric water cycle changes over the Xinjiang, China [J]. Journal of Hydrology, 2020, 585: 124823.
- [16] Yin G, Hu Z Y, Chen X, et al. Vegetation dynamics and its response to climate change in Central Asia [J]. Journal of Arid Land, 2016, 8(3): 375–388.
- [17] 黄建平,李明霞,刘玉芝,等. 干旱半干旱区气候变化研究综述[J]. 气候变化研究进展,



- 2013,9(1):9-14.
- [18] Cao D,Zhang J H,Yan H,et al. Regional assessment of climate potential productivity of terrestrial ecosystems and its responses to climate change over China from 1980-2018 [J]. IEEE Access, 2020,8:11138-11151.
- [19] Hu Z Y,Zhang C,Hu Q,et al. Temperature Changes in Central Asia from 1979 to 2011 Based on Multiple Datasets [J]. Journal of Climate, 2014,27(3):1143-1167.
- [20] 陈亚宁,李稚,方功焕,等. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究[J]. 地理学报,2017,72(1):18-26.
- [21] 徐婷,邵华,张弛. 近32a中亚地区气温时空格局分析[J]. 干旱区地理,2015,38(1):25-35.
- [22] 陈发虎,陈建徽,黄伟. 中纬度亚洲现代间冰期气候变化的“西风模式”讨论[J]. 地学前缘,2009,16(6):23-32.
- [23] Hu Z Y,Zhou Q M,Chen X,et al. Variations and changes of annual precipitation in Central Asia over the last century [J]. International Journal of Climatology,2017,37(1):157-170.
- [24] Shi Y F,Shen Y P,Kang E,et al. Recent and future climate change in northwest China [J]. Climatic Chang,2007,80:379-393.
- [25] Chen X,Wang S S,Hu Z Y,et al. Spatiotemporal characteristics of seasonal precipitation and their relationships with ENSO in Central Asia during 1901-2013 [J]. Journal of Geographical Sciences. 2018,28(9):1341-1368.
- [26] 胡增运,胡汝骥,周启鸣,等. 亚洲中部干旱区干湿时空变化特征[J]. 干旱区研究,2018,35(2):260-268.
- [27] 黄秋霞,赵勇,何清. 基于CRU资料的中亚地区气候特征[J]. 干旱区研究,2013,30(3):396-403.
- [28] Xu H M,Taylor R G,Kingston D G,et al. Hydrological modeling of river Xiangxi using SWAT2005: A comparison of model parameterizations using station and gridded meteorological observations [J]. Quat Int,2010,226:54-59.
- [29] 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.
- [30] 胡汝骥,姜逢清,王亚俊,等. 中亚(五国)干旱生态地理环境特征[J]. 干旱区研究,2014,31(1):1-12.
- [31] 徐利岗,杜厉,姚海娇,等. 中亚干旱区降水时空变化特征及趋势分析[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(11):121-127.
- [32] 王伟,阿里木·赛买提,吉力力·阿不都外力. 基于地理探测器模型的中亚NDVI时空变化特征及其驱动因子分析[J]. 国土资源遥感,2011,31(4).
- [33] 陈曦,姜逢清,王亚俊,等. 亚洲中部干旱区生态地理格局研究[J]. 干旱区研究,2013,30(3):385-390.

## Spatial Evolution Characteristics of Precipitation and Air Temperature over Central Asia

YAN Jin, ZHAO Yong

(College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** In order to improve the understanding of the regional climate change law over Central Asia, the Central Asia is divided into four sub-regions, and the temporal and spatial evolution characteristics of precipitation and temperature over Central Asia are analyzed by using statistical methods such as linear regression and 11-year moving average over Central Asia from 1936 to 2018, and based on the CRU monthly precipitation and temperature data. The results show that (1) the interannual variability of air temperature and precipitation in spring and winter are the largest over central Asia, and the maximum values of the former (latter) are located in the northern parts of Kazakhstan (Pamir Plateau and its adjacent areas). (2) The air temperature over whole Central Asia shows significant warming trends in different season and sub-region, especially in the high latitudes in spring and winter. There are obvious regional differences in precipitation changes, and the increase of precipitation is mainly concentrated on the high latitude regions (sub-regions II and III) between spring and winter and the Pamir Plateau and Tianshan Mountains (sub-region I) in summer. (3) During the past 83 years, the regional climate over Central Asia has experienced 3-4 types, and for recent two decades the climate mainly belongs to warm-dry type and warm-wet type. In spring and winter, the precipitation is well corresponded to the warming of air temperature over various region of Central Asia in different season, which all present warm-wet type. In the Autumn, precipitation and air temperature in the middle latitudes of Central Asia (sub-region I and IV) show similar change, but they show contrary changes in the high latitudes of Central Asia (sub-region II and III), which present warm-dry type.

**Keywords:** atmospheric science; climate change; Central Asia; air temperature; precipitation; temporal and spatial evolution; climatic type