

近 130 年来中亚干旱区典型流域 气温变化及其影响因子

姚俊强¹, 刘志辉^{1,2,3}, 杨 青⁴, 刘 洋¹, 李诚志², 胡文峰⁵

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046;

2. 新疆大学干旱生态环境研究所, 乌鲁木齐 830046;

3. 干旱半干旱区可持续发展国际研究中心, 乌鲁木齐 830046;

4. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002;

5. 兰州大学资源环境学院, 干旱区水循环与水资源研究中心, 兰州 730000)

摘要: 利用中亚干旱区5大主要典型流域代表性气象站点近130年逐月实测气温数据, 结合线性趋势、Mann-Kendall非参数检验和小波分析等方法, 研究了各流域气温的多时间尺度特征, 并探讨了引起气温变化的可能因素。研究发现, 在近130年来中亚干旱区各主要流域(除阿姆河外) 年均气温均呈上升趋势, 增温趋势高于全球和周边地区, 中亚干旱区气温对全球变化的响应比其他地区更加明显。20世纪80年代之后更加明显, 并表现出明显的多时间尺度周期振荡特征, 这主要是自然外强迫动力作用、气候系统内部变化和人类活动相互叠加的结果, 亚洲极涡强度减弱和面积缩小对主要流域气温变化的作用明显, 其次是北半球环状模(北极涛动) 和青藏高原的影响, 而CO₂引起的温室气体增温效应在中亚干旱区也不容忽视。气温表现出与布吕克纳周期(BC)、太平洋年代际涛动(PDO) 和准2~3年振荡周期(TBO) 等有关的显著周期, 可以证实中亚干旱区气温变化与大气环流、海温和太阳活动等密切相关。

关键词: 气温; 多时间尺度; 小波分析; 亚洲极涡; CO₂排放量; 中亚干旱区

DOI: 10.11821/dlxb201403001

在全球变化背景下, 全球气候系统正经历着剧烈的变化, 气候变暖已经成为一个不争的事实^[1]。近千年以来, 20世纪的升温最快, 近30年升温率在20世纪是最高的, 而21世纪初十年增温幅度更大^[2-3]。在全球变暖大背景下, 区域气温的年代际变化规律及归因是当前气候变化科学研究的热点问题。亚洲中部干旱区是全球最大的非地带性干旱区, 据研究, 近百年来气候变暖幅度是北半球的两倍多^[4], 气候系统异常敏感; 而中亚干旱区是其主体部分, 包括中亚五国及其周边区域, 由于深居内陆, 水资源短缺且分布极不均匀, 各主要大河流域集中了中亚主要的人口和城市, 而这些大河均为跨界国际河流, 上下游国家之间水资源纷争不断, 水资源矛盾突出。近几十年, 区域气候变暖导致水循环加快, 使得依靠山区冰雪融水补给的各主要河流流域水资源发生变化, 进而加剧了水资源纷争, 引起国家之间的摩擦, 影响区域稳定和国家安全^[5]。因此, 研究中亚干旱区各主要河流流域近百年来气温多时间尺度变化, 探讨自然和人为因素对其的影响, 这对进一步认识中亚干旱区气候变化规律, 保障生态安全和提高应对气候变化能力具有重要的意义, 为制定应对区

收稿日期: 2013-07-10; 修订日期: 2014-01-09

基金项目: 国家国际科技合作项目 (2010DFA92720-12); 国家科技支撑计划项目 (2012BAC23B01); 国家重点基础研究发展计划973项目 (2010CB951001); 教育部创新团队项目 (IRT1180) [Foundation: The International S&T Cooperation Program of China, No.2010DFA92720-12; The National Key Technology R&D Program of China, No.2012BAC23B01; National Basic Research Program of China (973 Program), No.2010CB951001; The Program for Innovative Research Team in University of China, No.IRT1180]

作者简介: 姚俊强, 男, 甘肃通渭人, 博士生, 研究方向为干旱区气候变化和水资源模拟。E-mail: yaojq1987@126.com

通讯作者: 刘志辉, E-mail: lzh@xju.edu.cn

域气候变化方案提供科学依据,而且对各国际河流水资源政治有重要的借鉴意义。

就整个亚洲中部干旱区而言,由于实测资料的缺乏,长时间序列的研究较少,大多都是利用替代资料。陈发虎等^[6-7]利用湖相沉积和孢粉等记录研究了该区域全新世气候变化,提出了“西风模式”,认为中亚干旱区在中晚全新世气候变化可能是受西风环流和北大西洋造成的。王劲松等^[8]利用插补延长的百年尺度气温序列研究了亚洲中部干旱半干旱区气温变化,研究发现中亚干旱区增温率比东部季风区、蒙古高原和塔里木干旱区较低。尚华明等^[9]利用树木年轮宽度资料重建了中亚干旱区东北部310年来初夏的温度变化序列,发现温度序列存在11年和准2年的变化周期。以上研究都是把干旱区作为一个整体来研究,而忽略了流域尺度的研究,而流域尺度恰恰是干旱区的精髓所在。在干旱区,“流域”承载了绝大部分的人口和社会经济活动,也遭到了最严重的破坏。由于区域开发程度和社会经济活动(如农业生产,工业排放等)强度的不同,人类活动对于温度的影响在不同流域可能会有差异。纵观20世纪,全球气温存在着明显的年代际变化,中亚干旱区各主要流域是否也有相应的年代际响应?引起区域增温的主要因素有哪些?针对这些问题,本文以中亚干旱区5大主要典型流域代表性气象站点近130年逐月实测气温数据,结合线性趋势、Mann-Kendall非参数检验和小波分析等方法,研究了各流域气温的多时间尺度特征,并探讨了引起气温变化的可能因素。

1 资料与方法

本文以亚洲中部干旱区为研究区域,主要包括中亚五国和周边一些区域,东部以中国国境线为界,西部以46.25°E为界,南北范围为35.25°~52.75°N,为亚洲中部干旱区的中心区域(图1)。中亚干旱区气候干燥,沙漠广布,绿洲依河流或山脉分布,常规气象观测站点稀少且长序列的站点资料有限,仅有的观测站点分布在沿河流而布的绿洲上,而在广布的沙漠戈壁区域没有气象观测。因此,本文选取有站点分布且时间序列较长的各主要流域为研究靶区,来研究中亚干旱区流域气候变化的事实。具体流域包括源于中亚天山山脉的锡尔河(Syr Darya River Basin)、阿姆河(Amu Darya River Basin)和伊犁河流域(Ili River Basin),源于阿尔泰山西南坡的额尔齐斯河流域(Irtysh River Basin)以及源于乌拉尔山脉东南坡乌拉尔河流域(Ural River Basin)。五大河流均为跨国境的国际河流,气温引起当地的水循环变化,影响着各国的地缘政治。

本文选取的各实测站点逐月气温资料主要来自荷兰的Royal Netherlands Meteorological Institute(RNMI),时间序列从19世纪80年代初到2011年,部分站点在前苏联解体前后停止观测。对数据资料进行严格质量控制,剔除了缺测大于5%的站点,并对部分缺测的月气温资料做了线性插值处理,保证了数据的精度和质量。然后考虑了各流域的地形地貌特征,选取的站点尽可能的覆盖了上中下游各单元,通过空间插值得到代表整个流域的气温变化序列(表1)。采用国际气象组织(WMO)推荐的1971-2000年的平均

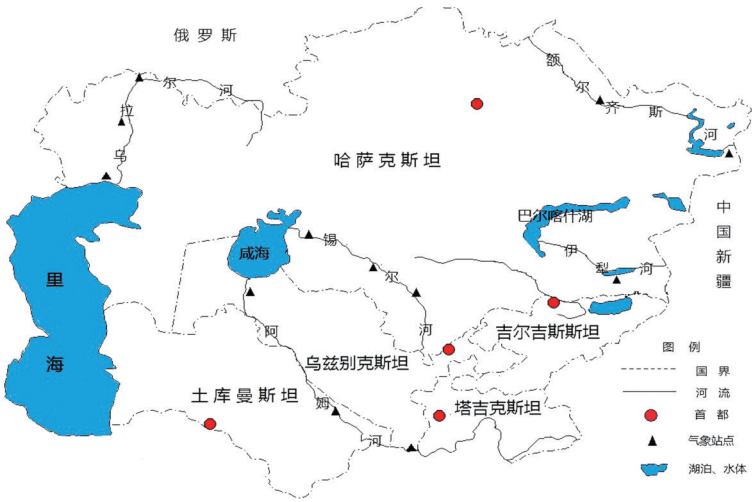


图1 中亚干旱区范围及河流
Fig. 1 Geographical location and rivers in the arid Central Asia

表 1 中亚干旱区主要流域代表站点信息

Tab. 1 Basin information of the meteorological station in Syr Darya Basin in the arid Central Asia

流域	WMO 站点号	站点名	纬度/°N	经度/°E	海拔/m	时间序列 (year)	气温均值/°C
锡尔河	35849	Kazalinsk	45.77	62.12	66	1881-2011	8.4
	38198	Turkestan	43.27	68.22	206	1882-2011	12.3
	38457	Tashkent	41.27	69.27	477	1881-2011	13.8
	38262	Chimbay	43.00	59.80	66	1900-2011	17.2
阿姆河	38687	Chardzhou	39.08	63.60	188	1895-1985	15.2
	38927	Termez	37.23	67.27	309	1927-2011	11.0
	36177	Semipalatinsk	50.35	80.25	195	1892-2011	3.4
额尔齐斯河	36665	Zaysanamsg	47.47	84.92	604	1925-1989	4.1
伊犁河	36870	Almata	43.23	76.93	847	1881-2011	8.7
	35700	Gur'ev, AS	47.02	51.85	-24	1883-2011	8.8
乌拉尔河	35406.1	Kalmykovo	49.05	51.87	1	1925-1989	6.9
	35108	Ural	51.25	51.40	31	1894-1978	4.6

值作为各个站点的标准气温均值。在计算流域气温变化特征时，根据流域内各站点标准气温均值得出该站点气温距平序列，然后对各站点距平序列进行平均处理，用以分析气温的阶段性变化特征。

为分析区域气温变化的影响因素，本文选取一系列对该区域密切相关的气候环流指数作为气温变化的驱动因子。其中，西风指数 (欧亚纬向环流指数，WCI)、西 (青) 藏高原指数 (TPI)、亚洲极涡面积指数 (APVAI)、亚洲极涡强度指数 (APVII)和北半球极涡中心位置 (NHPVCP) 等逐月环流指数来自中国气象局国家气候中心气候变化与预测研究室发布的 74 项环流指数数据集，时间序列为 1951-2011 年；北极涛动 (AOI)、南极涛动 (SOI)、北大西洋涛动 (NAOI) 和南亚夏季风指数 (SASMI) 等逐月指数来自中科院大气物理研究所李建平研究员的个人主页 (<http://ljp.lasg.ac.cn/>)，时间序列为 1880-2011 年；西伯利亚高压逐月指数 (SHI) 由国家气候中心的刘芸芸高工提供；年均 CO₂排放量来自世界银行数据中心 (<http://data.worldbank.org.cn/>)，选取全球 CO₂每年总排放量数据，时间序列为 1960-2009 年。

极涡是指位于对流层中、上层且中心在极区的大尺度气旋性环流系统，是北半球重要的环流系统，控制着泛极地半永久性活动中心和副极地短时间尺度的气旋活动，并对低层大气环流和中高纬天气气候有着重要影响^[22]。对中亚地区天气气候有重要影响的是亚洲极涡，亚洲极涡的经度范围是 60°E~150°E，在 500 hPa 月平均等压面上取接近于最大西风轴线的等高线为极涡南界^[22]。亚洲极涡面积的算法为：

$$S = \frac{R^2 \pi}{72} \sum_{i=1}^n (1 - \sin \varphi_i)$$

(1)

亚洲极涡强度的算法为：

$$I = \rho R^2 \Delta \varphi \Delta \lambda \sum_i \sum_j [H_0(M) - H_{i,j}] \cos \varphi_i$$

(2)

式中：S 是面积指数，I 是强度指数， φ_i 为极涡南界特征等高线以北格点的纬度；R 为地球半径， ρ 为空气密度， $\Delta \varphi = \Delta \lambda = \pi/72$ ， $H_0(M)$ 为极涡南界特征等高线值， $H_{i,j}$ 为极涡南界特征等高线以北各格点的高度值， i, j 为经度和纬度的格点数。

在时间序列分析中，有时域和频域两种基本形式。温度随着时间的变化，往往受多种因素的综合影响而呈现非平稳变化序列，具有多时间尺度特征。小波分析具有兼顾时—频两域的时频局域化特性的能力，能够获取该序列更加丰富的信息，可以更好的研究非平稳时间序列问题^[10-12]。复值小波连续变换分析是一种很好的多时间尺度周期分析方法，而气候要素变化的周期特征是深入理解气候变化过程和规律，进行气候预测的基础科学问题之一。因此，本文利用 Morlet 小波方法^[13-14]分析中亚干旱区近百年来气温变化的多时间尺度

变化特征。

2 结果与讨论

2.1 气温阶段性变化特征

把亚洲中部干旱区各主要大河流域作为一个整体, 经过平均计算得到整个区域流域的气温变化序列。研究发现近 130 年来区域年均气温呈现出上升的趋势, 年均气温的上升趋势为 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}^*$ (*表示通过了 95% 的显著性检验, 下同) (图 2)。为了便于比较, 选取 1960-2011 年的气温序列, 研究发现在近 50 年来中亚干旱区年均气温有明显的上升趋势, 变化趋势为 $0.47\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}^{**}$ (**表示通过了 99% 的显著性检验, 下同), 中亚干旱区气温倾向率远远高于全球地表平均气温变化趋势 ($0.13\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)^[15], 也高于区域以东的中国西北干旱区 ($0.34\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)^[16]。可以看出, 在全球变化背景下, 中亚干旱区气温对全球变化的响应比其他地区更加明显。对年均气温进行 11a 滑动平均处理, 得出气温变化的阶段性特征, 发现在 1881-2011 年间, 中亚干旱区气温经历了三个变化阶段: 低温期 (19 世纪 80 年代至 20 世纪初)、波动期 (20 世纪初至 20 世纪 70 年代末) 和高温期 (20 世纪 80 年代初至 21 世纪)。对气温各变化阶段进行分段线性拟合发现, 各阶段气温变化趋势差异较大, 依次为 $0.09\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $-0.04\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.48\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}^*$ 。除了线性趋势外, 还存在极端高温和低温的年份, 百年以来高温年均出现在 21 世纪, 如 2002 年比正常年份高出 $2.45\text{ }^{\circ}\text{C}$; 而诸如 1892、1894、

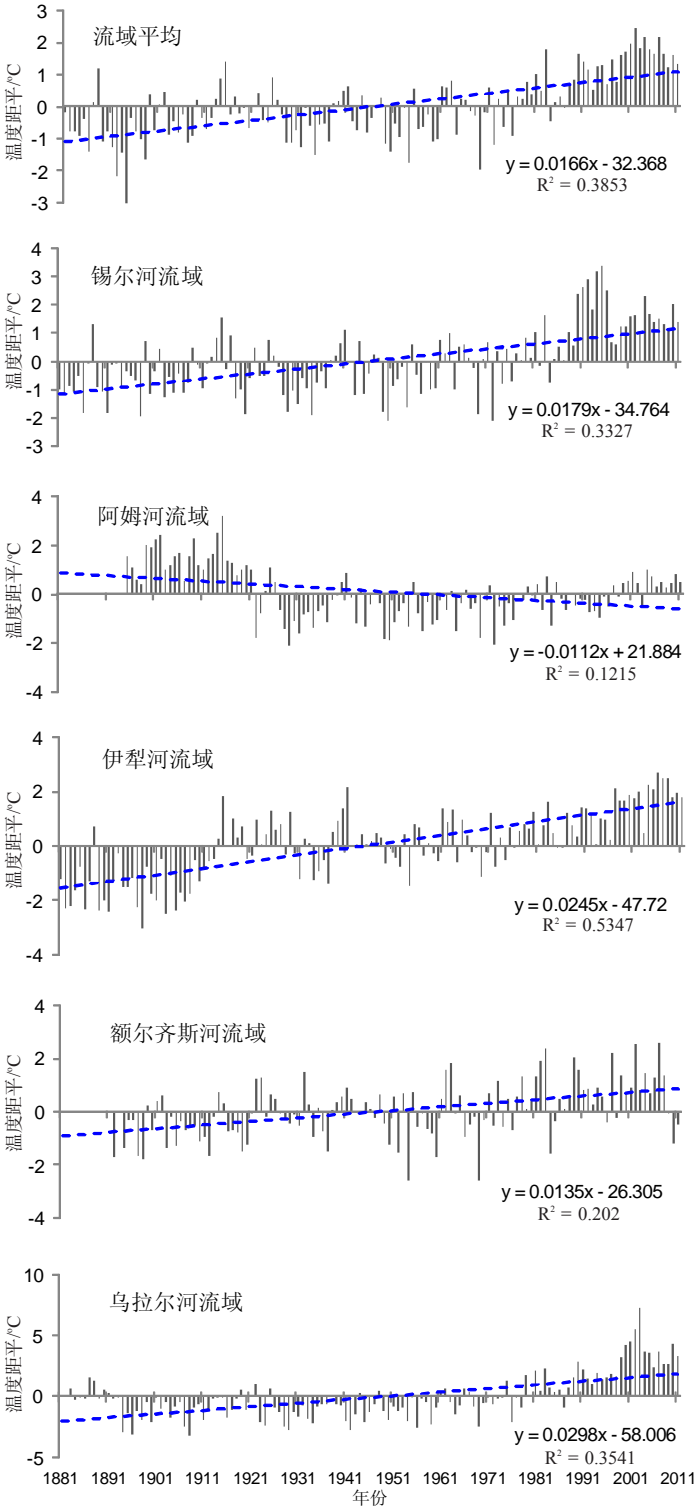


图2 中亚干旱区各流域气温距平变化 (蓝虚线表示变化趋势)
Fig. 2 The trends of the annual temperature anomaly in the basins of the arid Central Asia (Blue is the linear fitting)

1954 和 1969 年等年份为极端低温年,比正常年份低出 2~3℃。20 世纪全球气温存在明显的年代际变化^[17],如 20 世纪 10 年代和 70 年代的冷期与 20 世纪 40 年代的暖期,但在中亚干旱区不明显,与全球气温年代际变化不一致,如在 20 世纪 10 年代有回暖趋势,而 40 年代气温仍以负距平为主。

对中亚干旱区 5 条主要大河流域百年来气温分别研究发现,年均气温除了阿姆河流域有下降趋

势外 (-0.11℃/10a),其余各河流域均有上升趋势,其中伊犁河流域和乌拉尔河流域气温线性升高趋势最为显著,变化趋势分别为 0.24℃/10a*和 0.29℃/10a*;而锡尔河流域和额尔齐斯河流域温度也呈升高趋势(分别为 0.17℃/10a 和 0.13℃/10a),但没有通过显著性检验(图 2)。通过各主要流域年均气温 11a 滑动平均处理发现,在百年尺度中亚干旱区主要流域气温都呈现明显的阶段性特征(表 2),在 20 世纪 70 年代末 80 年代初期开始均有明显的气温回暖和高温趋势,其中乌拉尔河和伊犁河流域增温最为明显,均通过了 95% 的显著性检验,乌拉尔河流域相对增幅最大(2.33℃),增加趋势也最大(1.15℃/10a*),伊犁河流域增加趋势较大(0.53℃/10a*),增幅为 1.20℃;锡尔河流域也有明显的增温趋势(0.41℃/10a),增幅较大(1.28℃),但没有通过显著性检验;而阿姆河流域的增温幅度最小。在 20 世纪 80 年代之前的 100 年以低温为主,不同周期的波动性变化特征明显,伊犁河流域在 1910s 中期之前呈持续的低温特征,比正常温度低 1.48℃,是一个明显的冷期;而阿姆河流域恰恰相反,在 1910s 末期之前为高温期,高出正常年份 1.47℃,阶段性变化特征不同于其他流域。

2.2 多时间尺度特征分析

利用复值 Morlet 小波研究时间序列分析时,小波系数实部能够反映温度序列不同时间尺度的周期变化及在时间域中的分布,其变化趋势与信号的起伏是一致的,中心值的大小可以反映波动的振荡强度^[11],正值代表高温期(暖期),负值表示低温期(冷期)。而 Morlet 小波系数模表示不同时间尺度变化周期所对应的能量密度在时间域上的分布,反映了对应时间尺度的周期性强弱,模值的大小与周期显著性的强弱成正比。

中亚干旱区 5 条主要大河流域年均气温序列的复值 Morlet 小波变换实部及对应的模值能明显的反映出周期振荡及时间尺度特征(图 3)。我们以锡尔河流域(图 3a)和额尔齐斯河流域(图 3c)为例,来分析中亚干旱区典型流域气温多时间尺度特征。从图 3(a1、a2)和图 4 可以看出,锡尔河流域年均气温序列在 61 和 37a 左右的振荡周期最为明显,其次是 21 和 13a。其中,61a 时间尺度上的振荡是全域的,存在着 3 个明显的高温中心和 4 个低温中心,高温中心分别是 1910、1954 和 1988 年,低温中心分别是 1890、1930、1971 和 2007 年。37a 尺度上存在 5 个高温中心和 5 个低温中心,其中高温中心为 1893、1915、1942、1966 和 1993 年,低温中心为 1904、1930、1955、1977 和 2003 年;37a 时间尺度上的振荡

表 2 中亚干旱区各流域各时期气温的线性趋势
Tab. 2 The linear trends of annual temperature in the basins of the arid Central Asia in different periods

流域	变化时期	阶段性特征	距平 T/℃	倾向率 (℃/10a)
锡尔河流域	1881-1970s 中期	低温为主的波动期	-0.46	0.03
	1970s 末期-2011	高温期	1.28	0.41
	1895-1920s 初期	高温期	1.47	0.01
阿姆河流域	1920s 中期-1990s 中期	低温为主的波动期	-0.55	0.05
	1990s 末期-2011	回暖期	0.45	0.17
额尔齐斯河流域	1892-1970s 末期	波动期	-0.24	0.08
	1980s-2011	回暖期	0.79	0.01
伊犁河流域	1881-1910s 初期	低温期	-1.48	0.14
	1910s 中期-1970s 初期	波动期	0.17	-0.07
	1970s 中期-2011	高温期	1.20	0.53*
	1883-1890s 初期	温暖期	0.30	-0.22
乌拉尔河流域	1890s 中期-1970s 末期	低温期	-1.01	0.10
	1980s 初期-2011	高温期	2.33	1.15*

注: *表示通过了 95% 的显著性检验。

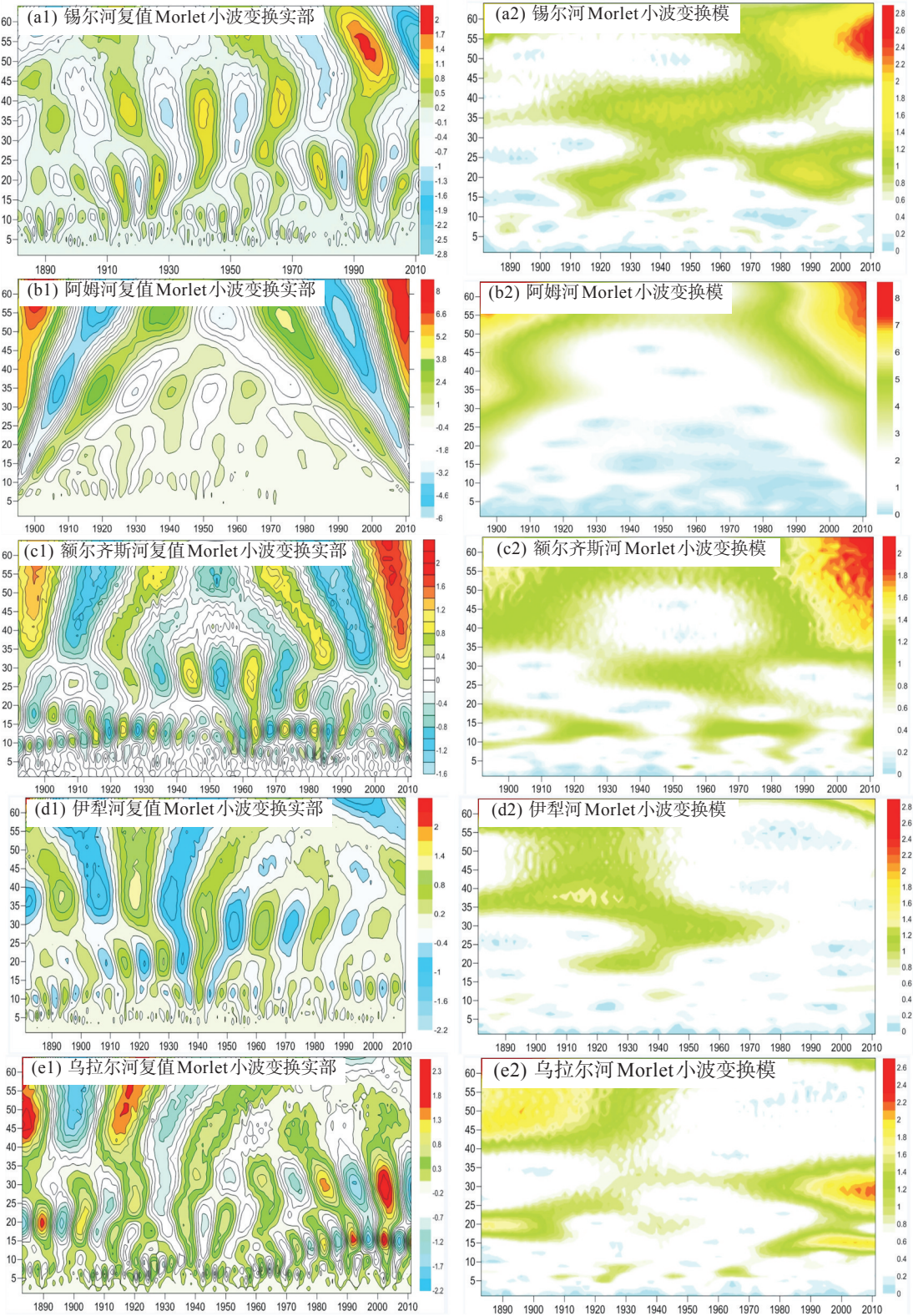


图3 中亚干旱区各流域气温多时间尺度小波分析
Fig. 3 The wavelet analysis of the basins of the arid Central Asia

在 20 世纪整个百年尺度时段内相对较强,其他时段较弱。21a 时间尺度的振荡在 20 世纪前 45 年和 1970s 之后的 30 年的振荡较强,而 13a 时间尺度的振荡在 1910s-1930s、1950s 和 1990s 之后的时段内振荡较强,其他时段较弱。此外,锡尔河流域年均气温还存在准 2~3a 的振荡周期。

额尔齐斯河是中亚干旱区唯一一条流往北冰洋的外流河,从流域特征来说有别于别的流域,在中亚各流域中具有特殊性,研究其气温变化多时间尺度特征,对于更加全面的认识中亚流域气温演变规律有重要意义。结合图 3(c1、c2) 和图 5,发现额尔齐斯河流域年均气温序列在 56 和 30a 左右的振荡周期最为明显,其次 13a。其中,56a 时间尺度上的振荡在整个研究时段内均较强,且存在着 3 个明显的高温中心和 3 个低温中心,高温中心分别是 1935、1970 和 2005 年,低温中心分别是 1916、1951 和 1988 年,流域气温变化的平均周期为 36a 左右,大约经历了 2 个周期的冷—暖变化。30a 振荡周期在 20 世纪整个百年尺度时段内相对较强,其他时段较弱,存在 6 个高温中心和 6 个低温中心,其中高温中心为 1908、1924、1943、1964、1983 和 2008 年,低温中心为 1900、1916、1935、1953、1972 和 1997 年;30a 时间尺度上流域气温变化的平均周期为 18.8a 左右,大约经历了 6 个周期的冷—暖转换期。而 13a 时间尺度的振荡在 1910s-1940s 初期、1950s 末期至 1990s 中期的时段内振荡较强,其他时段较弱,平均周期为 9a 左右,大约经历了 14 个周期的冷—暖变化。此外,额尔齐斯河流域年均气温也存在准 2~3a 的振荡周期。

2.3 不同流域气温变化的驱动机制

影响区域气候要素变化的因素很多,不同流域的主要因素也有所不同。综合起来,主要包括自然因素和人为因素两个方面,自然因素主要有

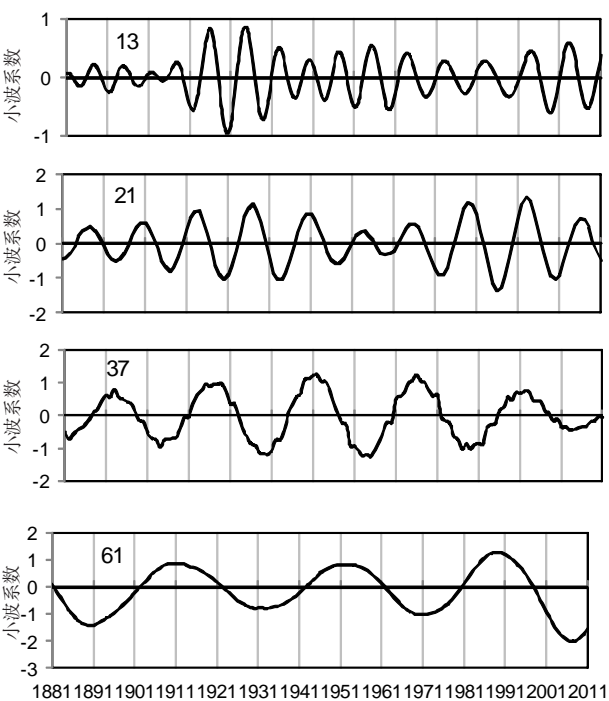


图4 锡尔河流域年气温变化主要时间尺度小波实部过程线
Fig. 4 The wavelet coefficient process curve of annual temperature in Syr Darya River Basin

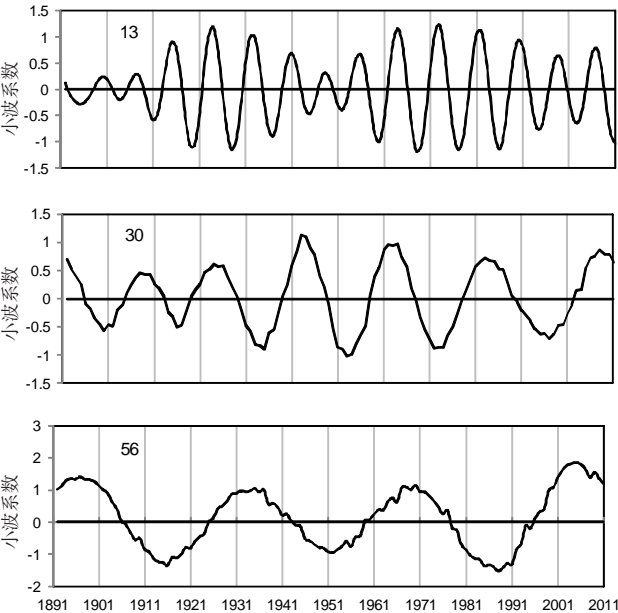


图5 额尔齐斯河流域年气温变化主要时间尺度小波实部过程线

Fig. 5 The wavelet coefficient process curve of annual temperature in Amu Darya River Basin

表3 中亚干旱区各流域气温和影响因子的相关分析

Tab. 3 Correlation analysis of the temperature and impact factor in the arid Central Asia

因子	WCI	SHI	AOI	NAOI	TPI	SOI	SASMI	APVAI	APVII	NHPVCP
锡尔河	0.204	0.092	0.355*	0.270	0.316*	-0.137	0.106	-0.505**	-0.268*	-0.339**
阿姆河	0.025	0.242	0.161	-0.068	0.303*	0.106	0.111	-0.546**	-0.386**	-0.196
伊犁河	0.124	0.170	0.342	0.144	0.484*	-0.072	0.079	-0.580**	-0.359**	-0.183
额尔齐斯河	0.349*	0.044	0.511**	0.368**	0.130	-0.090	0.148	-0.436**	-0.192	-0.222
乌拉尔河	0.136	0.006	0.416**	0.329*	0.414**	0.034	0.024	-0.670**	-0.410**	-0.305**

注：*表示通过了95%的显著性检验；**表示通过了99%的显著性检验。

自然外强迫作用和气候系统内部变化。这里主要讨论气候系统内部变化(控制风系和环流演变等)和地理位置、下垫面条件因素，过去对气候变化成因的大部分研究主要关注季风区，对于受西风控制的中亚干旱区的研究十分有限，Li和Chen等^[16]发现同样主要受西风控制的中国西北干旱区的气温变化主要受西伯利亚高压的影响，同时人类活动引起的CO₂排放也加速了这一过程。那么，影响中亚干旱区气温变化的因素有哪些呢？本文将从区域特征、大气环流、涛动指数及控制风系等方面进行了研究。利用各流域年均气温序列与各主要影响因素建立相关关系，研究年际尺度气温变化的驱动因子(表3)。我们发现，中亚干旱区5大主要流域年均气温与亚洲极涡面积呈显著负相关关系，相关系数为-0.436~-0.670不等，通过了99%的显著性检验。除额尔齐斯河流域外，其余流域气温均受青藏高原的影响，青藏高原大地形的热力和动力作用对大气环流和气候产生一定的影响，受到气象学家的广泛关注^[18-19]，青藏高原的热力性质差异变化对周边地区的温度产生重要的影响，主要表现为积雪面积和植被状况的变化。而对额尔齐斯河流域影响最大的是北极涛动(相关系数为0.515，通过99%显著性检验)，北极涛动对北半球大气环流以及冬、春季北半球近地面许多气候要素都有显著影响^[20]，Wu等^[21]研究表明北极涛动与欧亚大陆中高纬地区地面气温之间有显著的正相关，冬季北极涛动通过影响西伯利亚高压和东亚大槽来影响冬季风，进而对区域气温产生重要影响。

亚洲极涡面积和强度指数在近60年均表现出下降趋势，年代际变化明显。其中极涡面积指数在20世纪90年代之前以正距平为主，表明极涡面积偏大，而20世纪90年代中期开始有持续的负距平，表明极涡面积明显缩小；面积指数的线性变化趋势系数为-0.17/10a，通过了95%的显著性检验(图6)。而极涡强度和面积有很好的对应关系，即当极涡强度偏强时，则面积偏大；当极涡强度偏弱则面积偏小。极涡的变化与以极地和中高纬地区气压距平呈反相位分布为主要特征的北极涛动(AO)有密切的关系。北极涛动指数在近60年来也表现出上升的趋势^[23]，反映了北半球热带外地区由极区气压高而中高纬气压偏低逐渐转变为极区气压低而中高纬气压偏高。这种变化与亚洲极涡的强度减弱和面积缩小是一致的。

近60年来，中亚主要流域气温发生了明显的上升趋势。20世纪80年代以来，中亚主要5大流域的气温均呈正距平(图2)。发现有意思的一点是，在5大流域中，伊犁河流域和乌拉尔河流域的气温变化趋势最大(0.53和1.15℃/10a)且均通过了95%的显著性水平检验，而与亚洲极涡面积指数的负相关关系也最明显，相关系数分别为-0.58和-0.67；而气温变化趋势最小的流域，气温与亚洲极涡面积指数的负相关关系也最小，没有通过显著性水平检验。这表明，亚洲极涡强度和面积与中亚主要流域的气温有很好的关系，与极涡面积的关系更密切，20世纪80年代以来亚洲极涡强度减弱、面积缩小是导致中亚主要流域气温发生变化的一个可能原因。

气候变化的形成及影响机理非常复杂，除受自然环境和气候系统内部变化影响外，还受由人类活动引起的全球范围日益严重的温室效应以及城市化扩张带来的热岛效应的影响，这种影响在世界很多地方得到了验证。全球年均CO₂总排放量均呈上升趋势，在20

世纪 80 年代之后上升明显,进入 21 世纪后更加突出 (图 6), CO₂ 的温室气体增温效应是全球一体的,都参与到全球循环之中。20 世纪 80 年代之后中亚干旱区气温距平显著增加,这与全球 CO₂ 浓度变化是一致的。可以初步判断,在中亚干旱区近 50 年来,人类活动引起的 CO₂ 排放对区域升温有一定的贡献。由于缺乏前期的资料,无法判断整个研究时段 CO₂ 排放对区域气温变化的贡献。此外,除了人类活动引起的 CO₂ 排放对区域升温有贡献外,还有其他人为因素也会影响到气温变化,如土地利用和土地覆盖变化 (LUCC) 和城市热岛效应等^[1]。因此,对于人类和自然耦合系统对气候变化机制及成因还需进一步深入研究。

综合 2.2 节和图 3 对中亚干旱区各主要流域的振荡周期的研究发现,中亚干旱区各主要流域均存在准 2~3 年、准 11~13 年、准 20~22 年、准 35~37 年和准 56~61 年的振荡周期,这些振荡周期都与自然外强迫动力和气候系统内部变化相联系。其中,准 11~13 年和准 20~22 年与钱维宏等^[24]研究得出的千年全球平均气温变化周期一致,属于自然变化,是外强迫作用的结果,这些周期振荡与太阳活动有关,太阳辐射是温度最为直接的强迫因子,如人们熟知的准 11 年的太阳黑子活动周期和 22 年的黑子磁性倒转周期;准 35~37 年与瑞士的 Bruckner 在 1890 年提出的平均周期为 35 年的气候振动周期—布吕克纳周期 (Bruckner Cycle, 简称 BC) 相符,BC 周期在世界各地得到验证,如极光频率、严冬频率、尼罗河泛滥高度和树木年轮等^[25]。准 56~61 年的振荡周期与地球自转最大振幅 60 年周期和“拉马德雷现象”密切相关,“拉马德雷现象”在气象上被称为“太平洋年代际涛动” (PDO),与厄尔尼诺—南方涛动 (ENSO) 密切相关,PDO 在近百年尺度出现过 2 个完整的周期,“冷相位”

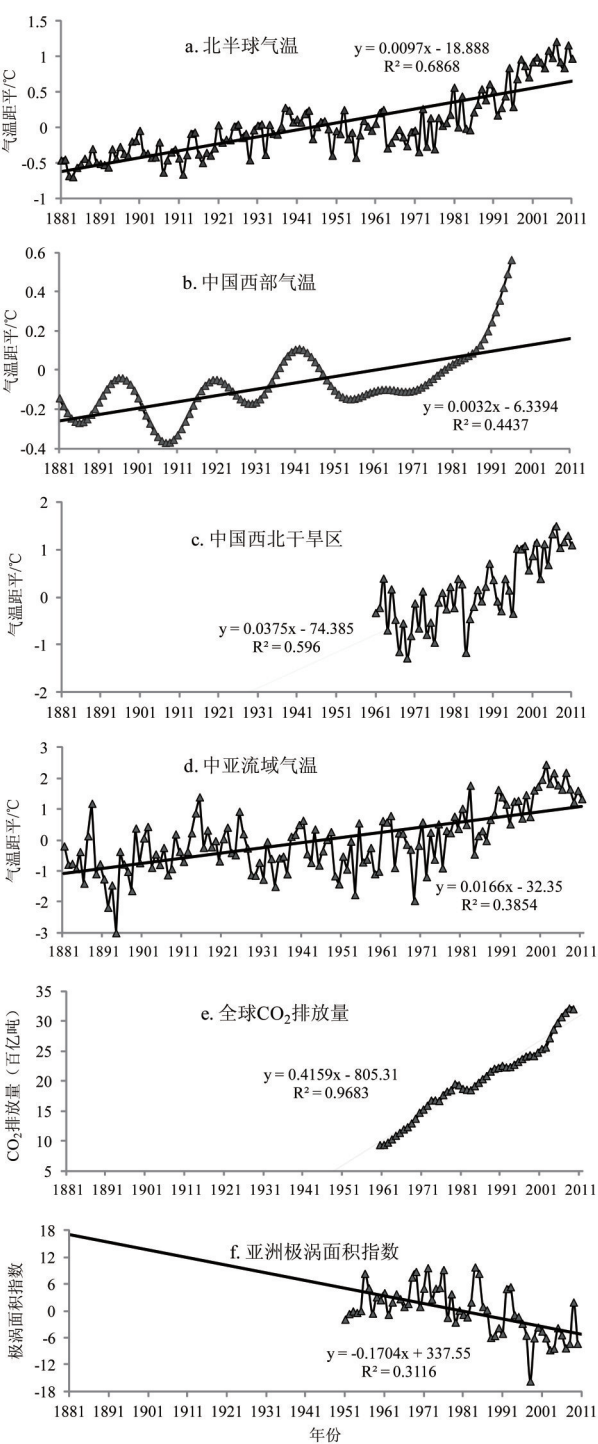


图 6 各区域气温变化比较及与二氧化碳排放和亚洲极涡面积指数的关系 (北半球和中国西部地区气温序列来源 NOAA: www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data)
Fig. 6 The change of the regional temperature and the relations of the CO₂ emissions and Central Asian vortices activity

发生于 1890-1924 年、1947-1976 年, 1925-1946 年和 1977 年至 90 年代后期为“暖相位”^[26-27]; 其中伊犁河流域气温变化与 PDO 一致性较高, 锡尔河、额尔齐斯河和乌拉尔河流域在 1890-1924 年和 1977 年之后的时段内也有很好的对应。准 2~3 年振荡周期 (TBO) 是大气环流年际变化的基本特征, TBO 在中亚干旱区降水变化中有显著表现^[28], 本文也证实了中亚干旱区气温也有显著的 TBO 基本周期, 进一步表明 TBO 在中亚干旱区气候变化研究中的重要性。

3 结 论

(1) 从以上分析可以看出, 在近 130 年来, 中亚干旱区各主要流域 (除阿姆河外) 年均气温均呈上升趋势, 20 世纪 80 年代之后更加明显, 中亚干旱区气温对全球变化的响应比其他地区更加明显。中亚干旱区各主要流域气温变化表现出明显的多时间尺度周期振荡特征, 这主要是自然外强迫动力作用与气候系统内部变化相互叠加的结果, 而在升温最剧烈的近 50 多年来, 人类活动引起的 CO₂ 的温室增温效应对中亚干旱区变暖有较大的贡献。而由于该区域所处的地理位置、高中低纬度环流和地形的影响, 认为极涡强度和面积对中亚干旱区主要流域气温变化的作用明显, 其次是北半球环状模 (北极涛动) 和青藏高原的影响。而小波分析反映出与 BC、PDO 和 TBO 等有关的显著周期, 可以证实中亚干旱区气温变化与大气环流、海温和太阳活动等密切相关。太阳活动无疑是自然因素, 但是大气环流、海温等并不能完全看成是自然因素, 因为它们受气候变化影响或控制的角色。

(2) 中亚干旱区流域气温变化与北半球、中国西部地区及西北干旱区相比, 具有同步增温的一致性, 同时也具有区域差异性。中亚干旱区流域增温趋势仅次于中国西北干旱区, 是对全球变化最为敏感的地区之一。工业革命后, 全球 CO₂ 排放量急剧增加, 而中亚各主要流域是前苏联主要重工业的集中区, 人类活动影响较大, 对气候增温有一定的贡献。但就各个流域而言, 增温趋势空间分布存在差异。相对而言, 额尔齐斯河流域属于北冰洋外流河水系, 与别的内流河不同, 受北极大气环流的影响较大, 如北极涛动; 而青藏高原大地形改变了亚洲大气环流, 也对西风环流起到阻挡和分流的作用, 发源于青藏高原及其帕米尔、天山等山系的河流受其的影响较大。此外, 阿姆河流域在 1895-1925 年间异常高温, 这可能与这一时期沙俄对这一地区的大肆开发和资源掠夺有关, 具体原因有待进一步研究。

(3) “流域尺度”的气候变化研究在干旱区具有特殊的意义。在全球变化背景下, 流域尺度气温变暖在全球各地得到证实。但流域尺度气候变化的形成及影响机理机制更加复杂, 加上气候模式模拟的不确定性, 使得对未来流域气候变化的预测工作更加困难。保护流域水和生态安全, 是全人类面临的重大课题, 而对流域历史观测资料的多尺度多方法解析是最基本、最可靠的工作。唯有对现有实测资料充分把握的基础上, 结合适度参数的气候模式, 才能更加准确的模拟气候变化, 进而来指导实践。

致谢: 中科院大气物理研究所李建平研究员提供 AOI、NAOI 逐月数据, 国家气候中心刘芸芸高工提供 SHI 逐月数据, 世界银行数据中心网站提供 CO₂ 排放量数据, NOAA 网站提供北半球和中国西部地区气温距平序列, 在此一并致谢。

参考文献 (References)

[1] IPCC. Summary for Policymakers of Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 4-6.

[2] Mann M E. Climate over the past two millennia. Annu. Rev. Earth Planet Sci., 2007, 35: 111-136.

- [3] Mann M E, Zhang Z H, Hughes M K et al. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2008, 105: 13252-13257.
- [4] Chen F H, Wang J S, Jin L Y et al. Rapid warming in mid-latitude central Asia for the past 100 years. *Front Earth Sci. China*, 2009, 3: 42-50.
- [5] Richard. Transboundary River: For China and Kazakhstan, no meet of the minds on water. *Science*, 2012, 337: 405-407.
- [6] Chen F H, Yu Z C et al. Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(3/4): 351-364.
- [7] Chen Fahu, Chen Jianhui, Huang Wei. A discussion on the westerly dominated climate model in mid-latitude Asia during the modern interglacial period. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(6): 23-32. [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. 地学前缘, 2009, 16(6): 23-32.]
- [8] Wang Jinsong, Chen Fahu, Zhang Qiang et al. Temperature variations in arid and semi-arid areas in middle part of Asia during the last 100 years. *Plateau Meteorology*, 2008, 27(5): 1035-1045. [王劲松, 陈发虎, 张强 等. 亚洲中部干旱半干旱区近 100 年来的气温变化研究. 高原气象, 2008, 27(5): 1035-1045.]
- [9] Shang Huaming, Wei Wenshou, Yuan Yujiang et al. Early summer temperature history in northeastern Kazakhstan during the last 310 years recorded by tree rings. *Journal of Mountain Science*, 2011, 29(4): 402-408. [尚华明, 魏文寿, 袁玉江 等. 哈萨克斯坦东北部 310 年来初夏温度变化的树轮记录. 山地学报, 2011, 29(4): 402-408.]
- [10] Wang Wwnsheng, Ding Jing, Li Yueqing. *Hydrological Wavelet Analysis*. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 64. [王文圣, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析. 北京: 化学工业出版社, 2005: 64.]
- [11] You Weihong. *Multiscale Diagnosis Analysis and Prediction of Climate Change: Several Methods of Research*. Beijing: China Meteorological Press, 1998: 9-20. [尤卫红. 气候变化的多尺度诊断分析和预测的多种技术方法研究. 北京: 气象出版社, 1998: 9-20.]
- [12] Wei Fengying. *Modern Climatic Statistical Diagnosis and Prediction Technology*. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2007. [魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 2 版. 北京: 气象出版社, 2007.]
- [13] Kumar P, Foufoula Geogiou E. Wavelet analysis for geophysical applications. *Reviews of Geophysics*, 1997, 35 (4): 385-412
- [14] Ding Wenrong, Zhou Yue, Lu Xixi. River sediment rate change rule study. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52 (Suppl.): 148-154. [丁文荣, 周跃, 吕喜玺. 河流输沙率变化规律研究. 科学通报, 2007, 52(增刊): 148-154.]
- [15] Brohan P, Kennedy J J, Harris I et al. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850. *J. Geophys. Res.*, 2006, 111: D12106, doi: 10.1029 /2005JD006548.
- [16] Li B, Chen Y, Shi X. Why does the temperature rise faster in the arid region of Northwest China? *J. Geophys. Res.*, 2012, 117: D16115, doi: 10.1029/2012JD 017953.
- [17] Qian W H, Lu B. Periodic oscillations in millennial global-mean temperature and their causes. *Chinese Sci. Bull.*, 2010, 55, doi: 10.1007/s11434-010-4204-2
- [18] Duan A M, Wu G X. Role of the Tibetan Plateau thermal forcing in the summer climate patterns over subtropical Asia. *Clim. Dyn.*, 2005, 24: 793-807.
- [19] Liu Xin, Li Weiping, Wu Guoxiong. Interannual variation of the diabatic heating over the Tibetan Plateau and the northern hemispheric circulation in summer. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, 60: 267-277. [刘新, 李伟平, 吴国雄. 夏季青藏高原加热和北半球环流年际变化的相关分析. 气象学报, 2002, 60: 267-277.]
- [20] Yu Yongqiang, Chen Wen. *Impacts of Ocean-Land-Atmosphere Interactions over the East Asian Monsoon Region on the Climate in China*. Beijing: China Meteorological Press, 2005. [俞永强, 陈文. 海—气相互作用对我国气候变化的影响. 北京: 气象出版社, 2005.]
- [21] Wu Bingyi, Wang Jia. Possible impacts of winter Arctic oscillation on Siberian High, the East Asian winter monsoon and sea-ice extent. *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, 19(2): 297 2 230.
- [22] Wang Zunya, Ding Yihui. Impacts of the long term change of the summer Asian polar vortex on the circulation system and the water vapor transport in East Asia. *Chinese J. Geophys.*, 2009, 52(1): 20-29. [王遵娅, 丁一汇. 夏季亚洲极涡的长期变化对东亚环流和水汽收支的影响. 地球物理学报, 2009, 52(1): 20-29.]
- [23] Wang Pengxiang, He Jinhai, Zheng Youfei et al. Interdecadal relationship between summer Arctic oscillation and aridity-wetness feature in Northwest China. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(5): 883-889. [王鹏祥, 何金海, 郑有飞 等. 夏季北极涛动与西北夏季干湿特征的年代际关系. 中国沙漠, 2007, 27(5): 883-889.]
- [24] Qian W H, Lu B. Periodic oscillations in millennial global-mean temperature and their causes. *Chinese Sci. Bull.*, 2010, 55, doi: 10.1007/s11434-010-4204-2.
- [25] <http://www.chazidian.com/cidian/905888/>.
- [26] Yang Donghong, Yang Debin, Yang Xuexiang. The influence of tides and earthquakes in global climate changes.

- Chinese J. Geophys., 2011, 54: 926-934. [杨冬红, 杨德彬, 杨学祥. 地震和潮汐对气候波动变化的影响. 地球物理学报, 2011, 54: 926-934.]
- [27] Yuan Junpeng, Cao Jie. Research on the northern annular mode cycle variation and mutation. Chinese J. Geophys., 2013, 56: 409-421. [袁俊鹏, 曹杰. 北半球环状模周期变化和突变研究. 地球物理学报, 2013, 56: 409-421.]
- [28] Huang Wei, Wu Xian, Chen Jianhui et al. Tropospheric biennial oscillations and abrupt changes of precipitation in the arid central Asia. Advances in Climate Change Research, 2012, 8(6): 448-455. [黄伟, 吴娴, 陈建徽 等. 中亚干旱区降水准两年周期振荡及突变特征. 气候变化研究进展, 2012, 8(6): 448-455.]

Temperature variability and its possible causes in the typical basins of the arid Central Asia in recent 130 years

YAO Junqiang¹, LIU Zhihui^{1,2,3}, YANG Qing⁴, LIU Yang¹, LI Chengzhi², HU Wenfeng⁵

(1. College of Resources and Environment, Key Laboratory of Oasis Ecology of Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Institute of Arid Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

3. International Center for Desert Affairs-Research on Sustainable Development in Arid and Semi-arid Lands, Urumqi 830046, China;

4. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China;

5. College of Resources and Environment, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Basin-scale is of the special significance to the climate change research in arid areas. In this study, data from five typical basins of the arid Central Asia are analyzed to investigate changes in annual temperature during the period of 1881-2011. The nonparametric Mann- Kendall test, wavelet analysis and the correlation analysis are used to identify trend, multiple time scale feature and their possible causes in the annual temperature. The results show that the average annual temperature had an increasing trend in the main basins (except Amu Darya Basin) of the arid Central Asia in the past 130 years. The rising rate is consistent with that of the northern hemisphere, much higher than that of the global average and surrounding region, suggesting that the arid Central Asia is more sensitive to climate change than other regions. Abrupt change point in annual temperature occurred around the year of 1986, and showed significant multi-time scale periodic oscillation, which is mainly due to the physical external force and internal climate-control system. The Central Asian vortexes' activity has a significant effect on annual temperature of the typical basins, followed by the northern annual mode cycle variation and the Tibetan Plateau, while the greenhouse effect caused by CO₂ gas emissions in the arid Central Asia can not be ignored. Temperatures show an aperiodic cycle which is related to the BC, PDO and TBO, and we can confirm that temperature in the arid Central Asia is closely related to the atmospheric circulation, sea surface temperature and solar activity.

Key words: temperature variability; multi-time scale; wavelet analysis; Central Asian vortexes activity; CO₂ emissions; Central Asia