

潘攀, 祝亚丽, 王纪军. 2014. 近 50 年黄河流域气温变化特征及背景分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (4): 477–485, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13099. Pan Pan, Zhu Yali, Wang Jijun. 2014. Spatial-temporal variations of temperature and the cause analyses in the Yellow River valley during recent 50 years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (4): 477–485.

近 50 年黄河流域气温变化特征及背景分析

潘攀¹ 祝亚丽² 王纪军¹

¹ 河南省气候中心, 郑州 450003

² 中国科学院大气物理研究所竺可桢-南森国际研究中心, 北京 100029

摘 要 利用 1961~2010 年黄河流域 142 个气象观测站的资料, 详细分析了近 50 年黄河流域气温的时空分布和变化特征。黄河流域四季平均气温均呈现东部高、西部低、南部高、北部低的空间型态。对流域气温进行经验正交分解, 第一模态呈现全流域一致的增温形势, 上游增温幅度最大[$0.40\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$]; 第二模态表现为东西部反相变化; 第三模态为南北部反相变化。四季气温随时间变化均呈现上升趋势, 升温幅度冬季最大[$0.52\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$], 其次是春季[$0.30\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$], 秋季[$0.26\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$], 夏季[$0.14\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$]。进一步分析表明, 近 50 年来, 黄河流域的气温增暖除了全球变暖的影响, 可能还来自 1980 年代中期和 1990 年代后期两次年代际增暖的贡献, 这与东亚季风的两次年代际变化时间节点是一致的。

关键词 黄河流域 气温 气候变化 年代际变化

文章编号 1006-9585 (2014) 04-0477-09

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13099

Spatial-Temporal Variations of Temperature and the Cause Analyses in the Yellow River Valley during Recent 50 Years

PAN Pan¹, ZHU Yali², and WANG Jijun¹

¹ Climate Center of Henan Province, Zhengzhou 450003

² Nansen-Zhu International Research Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Spatial-temporal variations of temperature in the Yellow River valley were detailedly analysed by using 142 station observation data from 1961 to 2010. With respect to spatial distribution, the temperature increases from west to east and from north to south. Empirical orthogonal function (EOF) analysis reveals that the principal EOF mode is a consistent warming over the whole valley, with the strongest warming in the upper reaches of the Yellow River [$0.40\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$]. Secondly, the EOF mode shows opposite variations in the eastern and western regions. Thirdly, it shows opposite variations in the southern and northern regions. The warming rate is the highest in winter [$0.52\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$], and then spring [$0.30\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$], autumn [$0.26\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$], and summer [$0.14\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$]. Further analysis reveals that, in addition to the global warming impact, the warming in the Yellow River valley during recent 50 years can be attributed to large-scale interdecadal warming in the mid-1980s and the late 1990s. These two interdecadal warming events occurred synchronously with the interdecadal shifts of the East Asian monsoon.

Keywords Yellow River valley, Temperature, Climate change, Interdecadal change

收稿日期 2013-05-29 收到, 2013-09-18 收到修定稿

资助项目 中国气象局气候变化专项 CCSF2011-1, 国家重点基础研究发展计划项目 2010CB950304, 国家自然科学基金青年基金项目 41205054、41105073

作者简介 潘攀, 女, 1981 年出生, 硕士, 主要从事气候变化及影响方面的研究。E-mail: nlpan@163.com

1 引言

温度是全球气候变化研究中非常重要的基础要素,气温的变化不仅影响气候系统,同时影响农业、水资源、生态系统、人们的日常生活等。百年尺度上,中国的升温趋势与全球基本一致,1951~2009 年,中国陆地表面平均温度上升 1.38 °C,变暖速率为 0.23 °C (10 a)⁻¹ (《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会,2011)。和全球平均气温变化一致,近 100 年来中国的增温也主要发生在冬季和春季,而夏季却有微弱变凉的趋势 (唐国利和任国玉,2005)。科学家对近 50 年我国不同地域气温时空分布与变化特征等取得很多研究成果,如不同地域气温的时空分布及变化特征 (王凯等,2010; 元慧慧等,2012)、中国大陆极端气温事件的变化 (胡宜昌等,2007; 周雅清和任国玉,2010) 和气温与大气环流的关系 (龚道溢和王绍武,1999; 范可和刘辉,2013)。

黄河是中国第二大河,发源于青海巴彦柯拉山,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东等省份。黄河流域横贯中国东西,幅员辽阔,地形地貌差别很大。流域内气候大致可分为干旱、半干旱和半湿润气候,西部干旱,东部湿润。在气候变化和人类活动的双重影响下,黄河流域的气候特点也发生了明显改变。在以往的研究中 (祝青林等,2005; 徐宗学和张楠,2006; 邵晓梅等,2006,2007; 王春学和李栋梁,2012; 张善强,2012),对黄河流域水资源的研究较多,而有关黄河流域气温的气候变化特征研究较少,气温的变化对黄河流域径流、蒸发等水资源变化以及植被、生态系统都存在直接或间接的影响 (刘晓东等,2002; 杨胜天等,2002; 史忠海等,2006; 殷贺等,2009; 唐芳芳等,2012; 马雪宁等,2012a),冬季气温是影响黄河凌汛,开、封河的一个重要因子 (王文东等,2006),所以了解气温的变化有助于认识黄河流域多变的气候特征,并对黄河流域民众的生产生活提供科学指导。本文以气象站观测资料为基础,综合分析近 50 年来黄河流域气温的特征,为黄河流域气候变化影响研究提供科学依据。

2 资料与方法

2.1 资料

本文所用资料为 1961~2010 年黄河流域 142

个气象站点经质量控制后的逐日气温资料,由黄河流域各省份提供。考虑到地表气温观测中存在的非均一性问题 (Li and Yan, 2009),在选取站点时对涉及资料非均一性问题的站点进行了剔除。黄河流域 142 个气象站点中,上游气象观测站 52 个、中游 78 个、下游 12 个。黄河流域的边界数据来自水利部水电规划总院。

文中四季的划分:冬季 12 月至次年 2 月,春季 3~5 月,夏季 6~8 月,秋季 9~11 月。

2.2 方法

利用趋势系数 (魏凤英,2007) 计算和判断年、季平均气温的长期变化和显著性。

为了解气象要素的长期趋势变化,计算气象要素的时间序列与自然数数列之间的相关系数 (称为趋势系数),趋势系数 R 的计算公式为

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(t_i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}}, \quad (1)$$

其中, x 为平均气温 (年或季), t 为时间 (年份或序号), i 为样本的序列号 (取值为 1, 2, ..., 50), 样本数 $n=50$, $\bar{x}$ 表示气温的平均值, $\bar{t}$ 为时间的平均值。 R 值的符号反映气温增高或降低的变化趋势, $R>0$, 表示在计算时段内气温呈增温趋势, $R<0$, 表示呈降温趋势。其变化趋势的显著程度用相关系数检验法,确定趋势是显著的,还是随机振动。

3 结果与分析

3.1 四季平均气温的气候态分布

黄河流域四季平均气温的空间分布大致相似 (如图 1 所示),呈现西部低、东部高、北部低、南部高的分布特点。因黄河流域地域宽广,不同地域在同季节中气温差别较大。四个季节中,夏季气温差距最大,最高值与最低值间相差 19.5 °C,冬季差距为 17.1 °C。春、夏季,沿黄河流经方向,气温呈上升趋势:在黄河源区和青海一带气温略低,黄河上游的河套平原和中游的大部分地区气温升高,黄河中、下游一带气温最高。秋、冬季节,黄河中游的南北向气温梯度较大。冬季,河套北部地区是除黄河源区外气温最低的区域。

3.2 冬季气温分布的主模态分析

为了考察黄河流域气温的空间变化模态,对冬

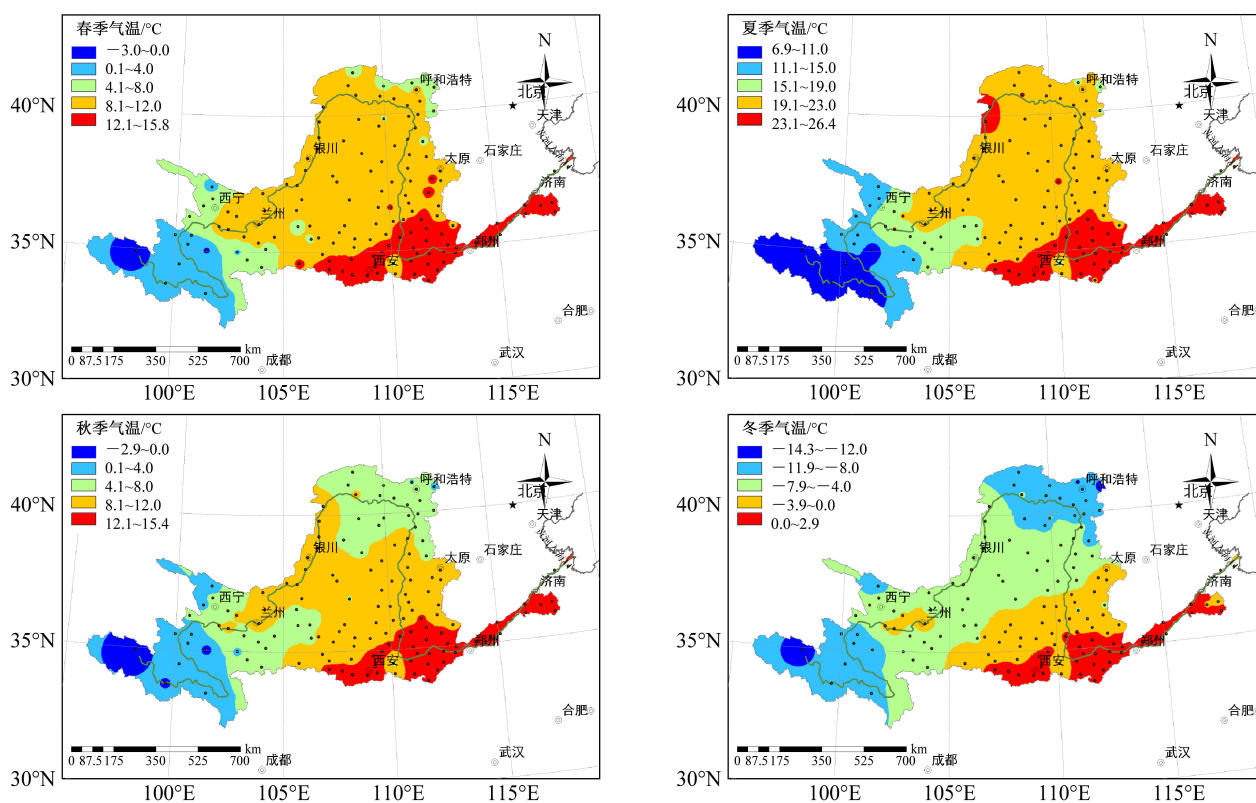


图1 黄河流域四季平均气温的气候态分布

Fig. 1 Seasonal mean temperature in the Yellow River valley

季气温进行经验正交函数 (Empirical Orthogonal Function, EOF) 分解 (图 2), 发现第一模态的空间型呈现全流域一致的气温增加趋势, 时间系数在 80 年代中后期由负变正, 具有很强的增暖趋势, 与东亚冬季风在 20 世纪 80 年代中后期的年代际变化时间是一致的。这一模态的解释方差达 78.7%, 且趋势值从北往南递减。第二模态的空间型表现为以河套中西部为界东西反相的变化特征, 说明在年际尺度上, 如果上、中游的气温为正距平, 则中、下游的气温多为负距平, 反之亦然, 第二模态解释方差为 7.6%。第三模态的空间型主要表现为南北反相的分布特征, 即黄河源区和河套以北的大部与河套以南区域变化相反。这种分布存在明显的年际变化特征, 且在 20 世纪 80 年代初以后, 该模态的年际变率较之前有所减小。第三模态的解释方差为 3.6%, 说明这种南北反相的年际变化也是冬季平均气温变化的一部分。对年平均的气温进行 EOF 分解, 结果与冬季气温类似 (图略)。

3.3 平均气温的时间变化特征

1961~2010 年黄河流域年平均气温为 9.0 °C (如图 3 所示), 随时间变化呈现上升趋势, 升温

速率为 $0.30\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ (10 a)}^{-1}$ (达到 99% 信度), 高于全国年平均气温的增温趋势 (唐国利等, 2009)。近 50 年黄河流域升温 1.5 °C 左右, 高于近百年全国平均的升温幅度 $0.78\pm0.27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

近 50 年黄河流域最暖的年份为 2006 年 (年平均气温为 10.3 °C), 次暖年为 1998 年 (年平均气温为 10.2 °C); 最冷的年份为 1984 年 (年平均气温为 7.9 °C), 次冷年为 1967 年和 1976 年 (年平均气温为 8.0 °C)。平均气温序列标准差为 0.6, 说明在这 50 年中黄河流域年平均气温的波动幅度较大, 气温最高年和最低年相差 2.4 °C。

黄河流域近 50 年气温的变化大致分两个阶段: 1) 20 世纪 60 年代至 80 年代中期, 黄河流域平均气温处于相对低值期 (气温在 8~9 °C 之间), 气温的年际变化明显, 年平均气温变化幅度在 1 °C 之间。60、70、80 年代的平均气温分别为 8.5 °C、8.7 °C、8.7 °C (表 1), 气温的年代际变化不明显。2) 20 世纪 80 年代中后期至 2010 年, 气温出现大幅上升 (气温最大值出现在 2006 年, 年平均气温达 10.3 °C), 且在 20 世纪 90 年代以后上升明显, 20 世纪后期黄河流域变暖可能是全球变暖的一部分

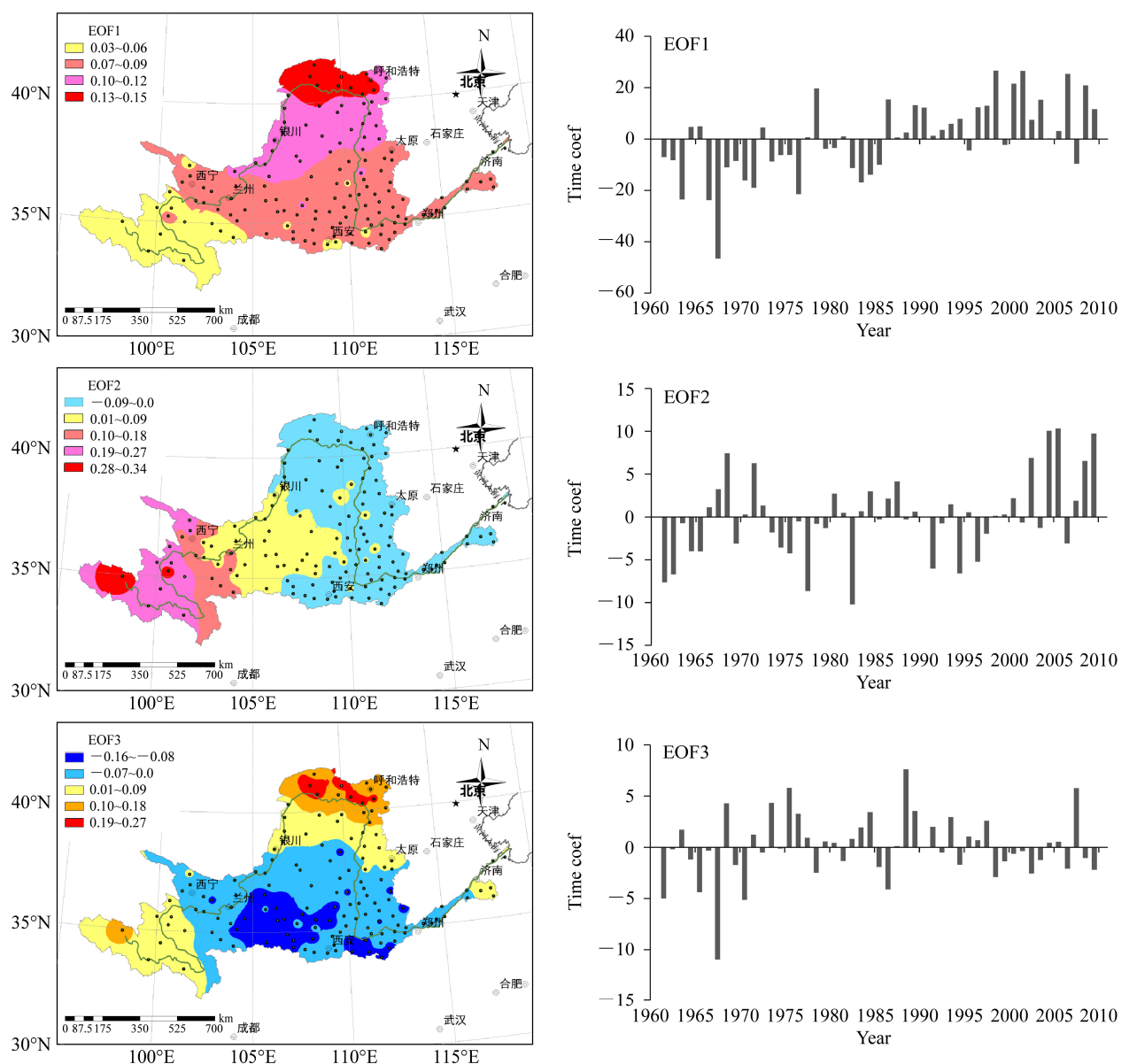


图2 黄河流域冬季平均气温的 EOF 模态
Fig. 2 Empirical Orthogonal Function (EOF) modes of winter temperature in the Yellow River valley

表 1 黄河流域 1961~2010 年各年代平均气温
Table 1 Decadal mean temperature in the Yellow River valley during 1961–2010

年代	流域	上游	中游	下游
1961~1970	8.5	5.0	10.2	13.3
1971~1980	8.7	5.3	10.3	13.2
1981~1990	8.7	5.4	10.2	13.3
1991~2000	9.3	6.0	10.8	13.9
2001~2010	9.7	6.6	11.1	14.1

（《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会，2011）。90 年代平均气温为 9.3 °C，较 80 年代增加 0.6 °C；21 世纪前 10 年仍保持升温趋势，平均气温

为 9.7 °C，较 70 和 80 年代增温 1 °C。马雪宁等（2012b）的研究也发现了一致的年代际变化信号。1961~2010 年上、中、下游的年平均气温分别为 5.7 °C、10.5 °C、13.6 °C，因所处纬度、地形及气候带的不同，中、下游气温较上游高。上、中、下游平均气温随时间均呈上升趋势，其中上游升温最快，升温速率达 0.40 °C (10 a)⁻¹，为黄河流域升温最大的区域；下游则相对略小，升温速率为 0.23 °C (10 a)⁻¹；中游为 0.25 °C (10 a)⁻¹。从表 2 可以看到，上、中、下游 1961~2010 年平均气温的趋势系数分别为 0.81、0.64、0.6，均达到 99%信

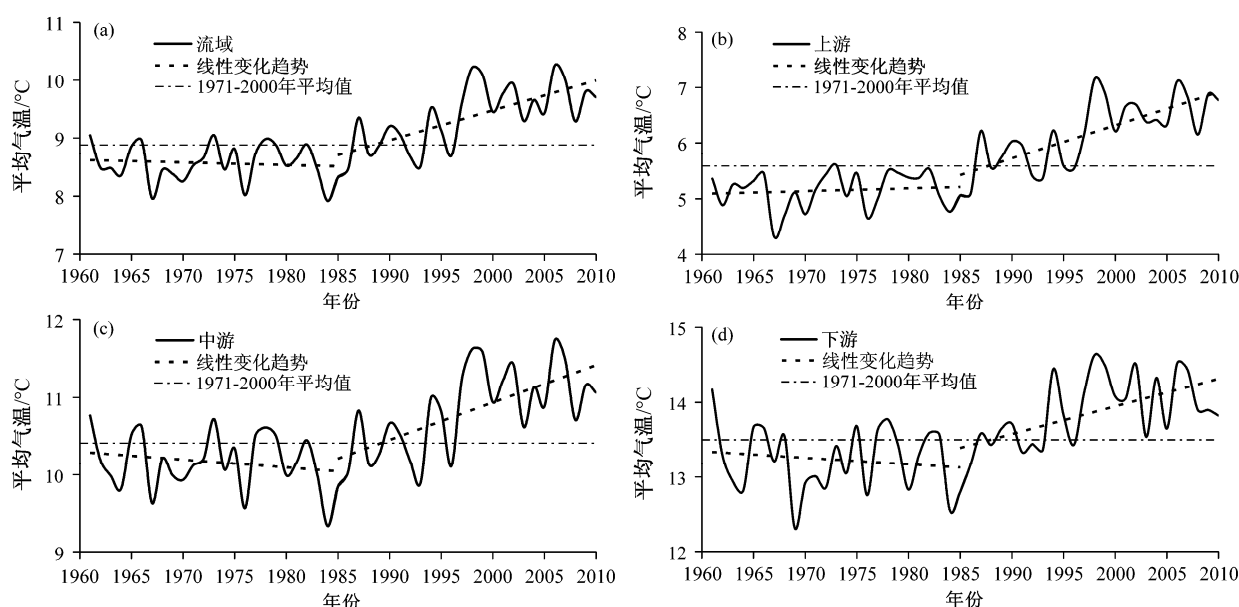


图3 黄河流域 1961~2010 年年平均气温的时间序列变化趋势
Fig. 3 Annual mean temperature in the Yellow River valley during 1961–2010

度标准。

表 2 黄河流域 1961~2010 年平均气温、趋势系数及其变化趋势

Table 2 Temperature, trend coefficient, and warming rate in the Yellow River valley during 1961–2010

	流域	上游	中游	下游
平均值/°C	9.0	5.7	10.5	13.6
趋势系数	0.73	0.81	0.64	0.6
变化速率/°C (10 a) ⁻¹	0.30	0.40	0.25	0.23

上、中、下游近 50 年气温的年际、年代际变化与流域总体相似但略有差异(图 3): 年平均气温均呈现增温的趋势, 且在 20 世纪 90 年代后升温更明显, 这与康丽华等(2006)研究相似。但在 20 世纪 60~80 年代不同流域气温的总体变化略有差异, 上游气温在该时段呈略增加趋势, 而中、下游气温随时间则呈略下降趋势, 但该时段的发展趋势都没有通过信度检验。

3.4 空间变化趋势分布

在黄河流域 50 年气温的空间趋势变化分布中(图 4), 整个流域气温均随时间显著升高, 增温趋势具有十分明显的空间一致性, 且稳定通过 99%信度检验。黄河上游、河套地区升温速率明显高于黄河中、下游: 上游的大部分地区增温速率为 0.4~0.7 °C (10 a)⁻¹, 其中青海大通站、内蒙古五原站增温速率均在 0.6 °C (10 a)⁻¹ 以上, 增温速率最大

的为青海同德站, 达 0.71 °C (10 a)⁻¹, 均通过 99%的信度检验。中、下游地区增温速率为 0.01~0.4 °C (10 a)⁻¹, 陕西、山西、河南交界的山区一带气温的增温速率略小, 在 0.2 °C (10 a)⁻¹ 以内, 个别地市未通过 95%的信度检验; 中、下游的其它地区增温速率一般在 0.2~0.4 °C (10 a)⁻¹, 均通过 95%的信度检验, 其中大部分地区通过 99%的信度检验。

3.5 四季气温的时空分布

1961~2010 年黄河流域春、夏、秋、冬四季的平均气温均呈现上升趋势, 与年平均气温的变化趋势相似, 四季气温在 20 世纪 90 年代中后期上升明显, 但不同季节的升温速率存在差异(图 5)。春、秋、冬季增温显著(达到 99%信度标准), 其中以冬季增温幅度最大, 升温速率为 0.52 °C (10 a)⁻¹, 这表明在年平均气温的增加中, 冬季增温的贡献最大; 春、秋季次之, 夏季最小(表 3), 这与近 50 年中国气候变化特征中对全国四季气温的研究结果是一致的(王遵娅等, 2004; 虞海燕等, 2011)。在春季, 2010 年又出现了过去十几年来的最低气温(9.7 °C), 低于 1971~2000 年多年平均值, 说明在全球变暖的背景下, 气温的年际变率可能增强(王遵娅等, 2004)。

四季平均气温的空间趋势分布图没有给出, 我们就其主要特点进行简要的描述。春季, 整个流域

表 3 黄河流域 1961~2010 年四季平均气温增加幅度
Table 3 The warming rate of seasonal temperature during 1961~2010 in the Yellow River valley $^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$

	流域	上游	中游	下游
春季	0.30**	0.32**	0.30**	0.26**
夏季	0.14*	0.30**	0.06	-0.01
秋季	0.26**	0.36**	0.21**	0.19**
冬季	0.52**	0.63**	0.45**	0.60**

*达到 95%信度标准, **达到 99%信度标准。

均呈现显著增温趋势。夏季气温的空间变化与春季差异明显,黄河上、中游气温呈增温趋势,而下游

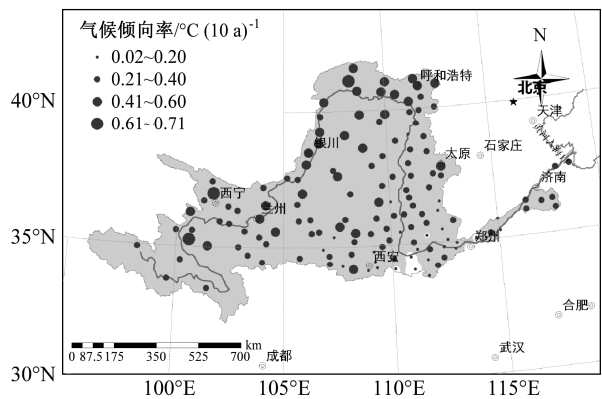


图 4 黄河流域 1961~2010 年平均气温气候趋势显著性检验及气候趋势值 (阴影区通过 95% 信度检验)
Fig. 4 Significance test of the temperature trend and trend values during 1961~2010 in the Yellow River valley (shadings are above 95 % confidence level)

气温增加不明显。上游仅青海、甘肃和内蒙古的部分地区通过 95%的信度检验;中游气温增幅略小,下游无明显增温或略有降温,均未通过信度检验。秋季,黄河源区和河套一带的升温趋势均通过 99%的信度检验;黄河中、下游增温幅度较上游小,大部分地区通过 95%的信度检验,局部未通过信度检验。冬季全流域呈现一致性的显著增温趋势,上游大部分地区增温速率超过 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$,青海、甘肃和内蒙古的局部升温速率超过 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$;中游和下游大部分地区增温速率约为 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$,均通过 99%信度检验。

另外,为了去除季节循环和年循环对趋势的可能贡献 (Zhao et al., 2011),计算趋势时 (图 3 和图 5),我们先将逐月数据进行距平处理,而后对其年和季节的序列进行气候趋势计算,与直接用气候平均值所得到的气候趋势是一致的 (图略)。

4 黄河流域气候增暖发生的大尺度背景

黄河流域近 50 年来的增暖,与全球变暖的信号是一致的。从图 5 可以看到,在 80 年代中期和 90 年代末期,黄河流域气温存在两次明显的增暖。深入分析可知,80 年代中期后的增暖主要是冬季增暖的贡献,90 年代末以来的增暖主要是春、夏季增

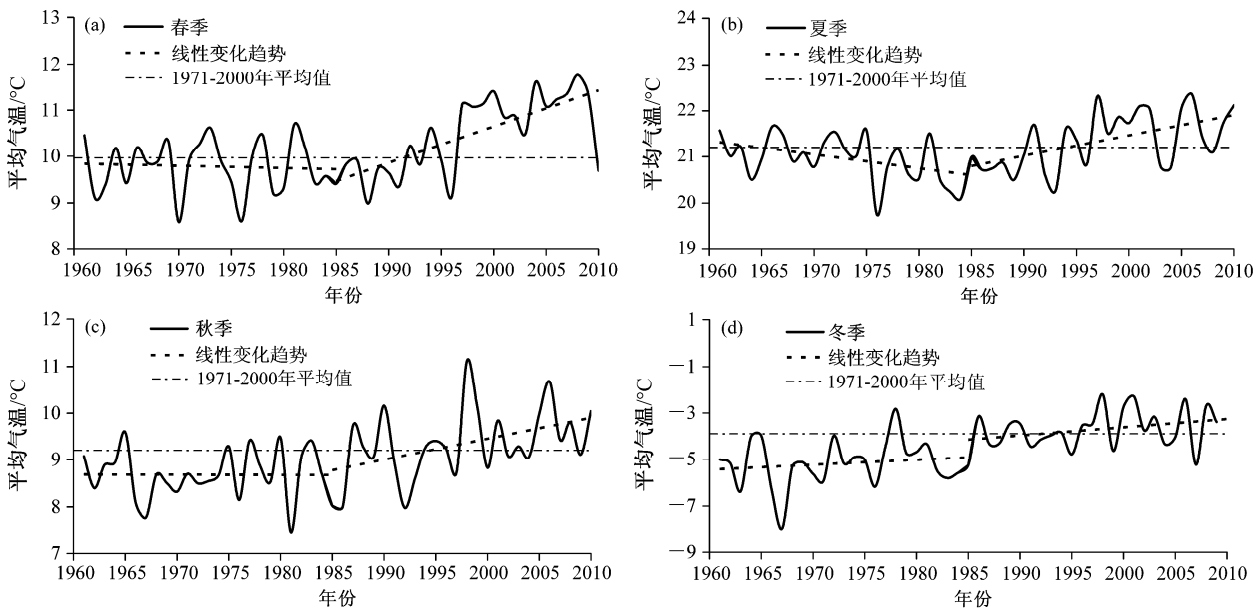


图 5 黄河流域 1961~2010 年四季平均气温的时间序列
Fig. 5 Time series of the seasonal mean temperature in the Yellow River valley during 1961~2010

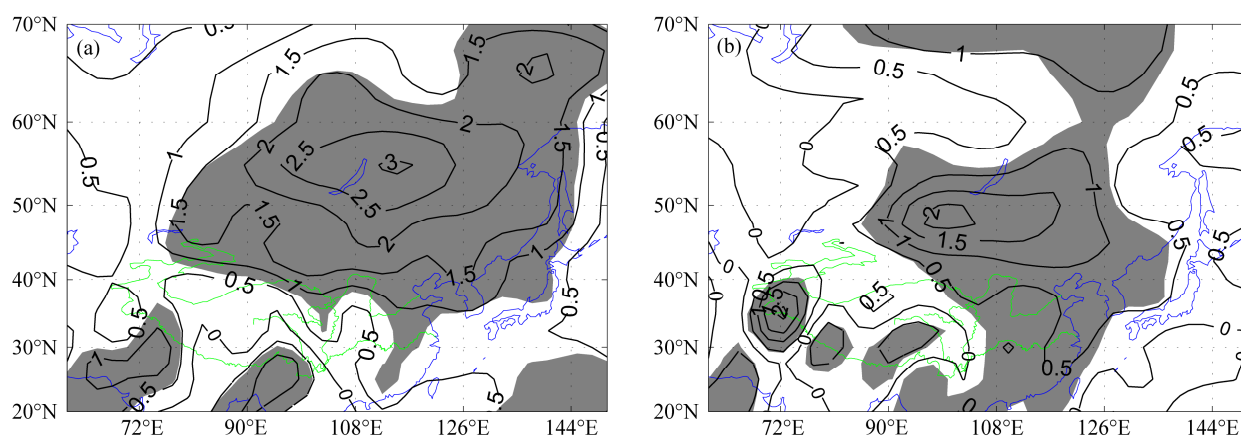


图6 (a) 1986~1995 年与 1961~1980 年冬季、(b) 1999~2010 年与 1986~1995 年夏季的 850 hPa 温度差值场(单位: °C, 阴影区通过 90% 信度检验)
Fig. 6 The differences of 850-hPa temperature (°C) between (a) 1986~1995 and 1961~1980 in winter and (b) 1999~2010 and 1986~1995 in summer (shadings are above 90% confidence level)

暖的贡献。图 6a 和 6b 分别是 1986~1995 年与 1961~1980 年冬季、1999~2010 年与 1986~1995 年夏季的 850 hPa 温度差值场,可以看出,黄河流域的这两次年代际尺度增暖并不是区域现象,而是在大范围年代际增暖的背景下发生的。这两次增暖的中心都发生在贝加尔湖上空。已有的研究揭示,80 年代中期,东亚冬季风发生显著减弱,导致东亚冬季显著变暖 (Wang et al., 2009),而 90 年代末期,东亚夏季气候发生显著变化,贝加尔上空及其南侧显著增温 (Zhu et al., 2011)。东亚季风的这两次年代际变化与黄河流域气温的年代际增暖有明显的联系。

5 结论与讨论

本文对 1961~2010 年黄河流域年平均气温的时空分布及其变化特征进行分析。黄河流域年平均气温呈西部低、东部高,北部低、南部高,上游低,中、下游高的分布特征。对冬季气温进行 EOF 分析的结果显示:第一模态为全流域一致的增温,可以解释 78.7% 的方差;第二模态为东、西部气温反相变化的分布特征,解释 7.6% 的方差,时间系数以年际一年代际尺度变率为主;第三模态为南、北部反相变化的分布特征,解释 3.6% 的方差,20 世纪 80 年代初以后该模态的变化幅度有所减小。年平均气温的 EOF 分析结果与冬季相似。

1961~2010 年整个流域的气温均随时间是显著 (达到 99% 信度标准) 升高的,升温趋势具有十分明显的空间一致性。流域年平均气温随时间变化

呈现上升趋势,升温速率为 $0.30\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ (10 a)}^{-1}$ (达到 99% 信度标准),高于全国年平均气温的增加速率。四季气温均呈增加趋势,升温速率冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季,均通过 95% 的信度检验。冬季是黄河流域气温升幅最大的季节,对年平均增温的贡献最大。在 20 世纪 60 年代至 80 年代中期,黄河流域平均气温相对稳定,20 世纪 80 年代中后期至 2010 年,气温出现大幅上升,尤其 20 世纪 90 年代以后,气温增加明显。

近几十年来黄河流域的增温趋势,除了全球变暖的原因,可能还主要是来自 80 年代中期和 90 年代末期东亚季风的两次年代际跃变的贡献。前一次变暖与 80 年代中后期东亚冬季风的年代际减弱导致的东亚地区冬季温度升高密切联系 (Wang et al., 2009),而后一次变暖可能与东亚夏季气候在 90 年代末期的年代际变化有关 (Zhu et al., 2011)。有关东亚季风年代际变化的深层物理机制目前还没有明确的定论,有待将来更深入的研究揭示。

HadCM2 模式模拟结果显示,中国区域在 21 世纪地面气温增量北方大于南方,内陆大于沿海,气温增量在秋、冬季较大,春、夏季较小 (许吟隆等, 2003)。在不同排放情景下,未来黄河流域气温仍以升高为主 (刘绿柳等, 2008; 刘吉峰等, 2011),增温幅度由东南向西北逐渐增大,黄河流域上游地区和河套地区增温幅度较大,下游地区增温幅度略小。气温升高将造成黄河流域冰川面积减少或消失,同时影响流域内水资源的收支平衡、农业生产与人民生活。为此,应采取积极的适应对策,从而更好的适应气候变暖。

参考文献 (References)

- 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 2011. 第二次气候变化国家评估报告 [M]. 北京: 科学出版社, 38–42. The Compilation Committee of Second National Assessment Report on Climate Change. 2011. Second National Assessment Report on Climate Change (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 38–42.
- 范可, 刘辉. 2013. 近百年东亚冬季气温及其大气环流变化型态 [J]. 大气科学, 37 (2): 383–394. Fan Ke, Liu Hui. 2013. Winter temperature over East Asia and atmospheric circulation patterns in the last 100 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 383–394.
- 龚道溢, 王绍武. 1999. 大气环流因子对北半球气温变化影响的研究 [J]. 地理研究, 18 (1): 31–38. Gong Daoyi, Wang Shaowu. 1999. Influence of atmospheric oscillations on Northern Hemispheric temperature [J]. Geographical Research (in Chinese), 18 (1): 31–38.
- 胡宜昌, 董文杰, 何勇. 2007. 21 世纪初极端天气气候事件研究进展 [J]. 地球科学进展, 22 (10): 1066–1075. Hu Yichang, Dong Wenjie, He Yong. 2007. Progress of the study of extreme weather and climate events at the beginning of the twenty first century [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 22 (10): 1066–1075.
- 康丽华, 陈文, 魏科. 2006. 我国冬季气温年代际变化及其与大气环流异常变化的关系 [J]. 气候与环境研究, 11 (3): 330–339. Kang Lihua, Chen Wen, Wei Ke. 2006. The interdecadal variation of winter temperature in China and its relation to the anomalies in atmospheric general circulation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (3): 330–339.
- Li Z, Yan Z W. 2009. Homogenized daily mean/maximum/minimum temperature series for China from 1960–2008 [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2 (4): 237–243.
- 刘吉峰, 王金花, 焦敏辉, 等. 2011. 全球气候变化背景下中国黄河流域的响应 [J]. 干旱区研究, 28 (5): 860–865. Liu Jifeng, Wang Jinhua, Jiao Minhui, et al. 2011. Response of water resources in the Yellow River basin to global climate change [J]. Arid Zone Research (in Chinese), 28 (5): 860–865.
- 刘绿柳, 刘兆飞, 徐宗学. 2008. 21 世纪黄河流域上中游地区气候变化趋势分析 [J]. 气候变化研究进展, 4 (3): 167–172. Liu Lülü, Liu Zhaoifei, Xu Zongxue. 2008. Trends of climate change for the upper-middle reaches of the Yellow River in the 21st century [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 4 (3): 167–172.
- 刘晓东, 安芷生, 方建刚, 等. 2002. 全球气候变暖条件下黄河流域降水的可能变化 [J]. 地理科学, 22 (5): 513–519. Liu Xiaodong, An Zhisheng, Fang Jiangang, et al. 2002. Possible variations of precipitation over the Yellow River valley under the global-warming conditions [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 22 (5): 513–519.
- 马雪宁, 张明军, 王圣杰, 等. 2012a. “蒸发悖论”在黄河流域的探讨 [J]. 地理学报, 67 (5): 645–656. Ma Xuening, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. 2012a. Evaporation paradox in the Yellow River basin [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 67 (5): 645–656.
- 马雪宁, 张明军, 黄小燕, 等. 2012b. 黄河上游流域近 49a 气候变化特征和未来变化趋势分析 [J]. 干旱区资源与环境, 26 (6): 17–23. Ma Xuening, Zhang Mingjun, Huang Xiaoyan, et al. 2012b. Characteristics of climate change and future trend in the upper Yellow River basin from 1960 to 2008 [J]. Journal of Arid Land Resource and Environment (in Chinese), 26 (6): 17–23.
- 邵晓梅, 许月卿, 严昌荣. 2006. 黄河流域降水序列变化的小波分析 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 42 (4): 505–508. Shao Xiaomei, Xu Yueqing, Yan Changrong. 2006. Wavelet analysis of rainfall variation in the Yellow River basin [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese), 42 (4): 505–508.
- 邵晓梅, 许月卿, 严昌荣. 2007. 黄河流域气候水分盈亏时空格局分析 [J]. 气候与环境研究, 12 (1): 74–80. Shao Xiaomei, Xu Yueqing, Yan Changrong. 2007. Analysis on the spatial and temporal structure of climatic water deficit in the Yellow River basin [J]. Climate and Environment Research (in Chinese), 12 (1): 74–80.
- 史忠海, 王国庆, 余辉, 等. 2006. 气温变化对黄河流域蒸发能力的影响 [J]. 河南气象, 1 (1): 31–32. Shi Zhonghai, Wang Guoqing, Yu Hui, et al. 2006. Impact of temperature change on potential evaporation in Yellow River basin [J]. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 1 (1): 31–32.
- 唐芳芳, 徐宗学, 左德鹏. 2012. 黄河上游流域气候变化对径流的影响 [J]. 资源科学, 34 (6): 1079–1088. Tang Fangfang, Xu Zongxue, Zuo Depeng. 2012. Response of runoff to climate change in the upper Yellow River basin [J]. Resource Science (in Chinese), 34 (6): 1079–1088.
- 唐国利, 任国玉. 2005. 近百年中国地表气温变化趋势的再分析 [J]. 气候与环境研究, 10 (4): 791–798. Tang Guoli, Ren Guoyu. 2005. Reanalysis of surface air temperature change of the last 100 years over China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (4): 791–798.
- 唐国利, 丁一汇, 王绍武, 等. 2009. 中国近百年温度曲线的对比分析 [J]. 气候变化研究进展, 5 (2): 71–78. Tang Guoli, Ding Yihui, Wang Shaowu, et al. 2009. Comparative analysis of the time series of surface air temperature over China for the last 100 years [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 5 (2): 71–78.
- 王春学, 李栋梁. 2012. 基于 MTM-SVD 方法的黄河流域夏季降水年际变化及其主要影响因子分析 [J]. 大气科学, 36 (4): 824–834. Wang Chunxue, Li Dongliang. 2012. Analysis of the interannual variation of the summer precipitation over the Yellow River basin and the effect factors based on MTM-SVD method [J]. Chinese Journal of Atmospheric (in Chinese), 36 (4): 823–834.
- 王凯, 陈正洪, 刘可群, 等. 2010. 华中区域 1960–2005 年平均最高、最低气温及气温日较差的变化特征 [J]. 气候与环境研究, 15 (4): 418–424. Wang Kai, Chen Zhenghong, Liu Kequn, et al. 2010. Variation characteristics of the mean maximum, minimum temperature, and diurnal range of temperature in Central China during 1960–2005 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (4): 418–424.
- 王文东, 张芳华, 康志明, 等. 2006. 黄河宁夏河段凌汛特征及成因分析 [J]. 气象, 32 (3): 32–38. Wang Wendong, Zhang Fanghua, Kang Zhiming, et al. 2006. Characteristics and causes of ice flood in Ningxia-Inner Mongolia section of the Yellow River valley [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 32 (3): 32–38.
- Wang L, Huang R H, Gu L, et al. 2009. Interdecadal variations of the East Asian winter monsoon and their association with quasi-stationary

- planetary wave activity [J]. *J. Climate*, 22 (18): 4860–4872.
- 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等. 2004. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析 [J]. *气象学报*, 62 (2): 228–236. Wang Zunya, Ding Yihui, He Jinhai, et al. 2004. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 62 (2): 228–236.
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 (第 2 版) [M]. 北京: 气象出版社, 296pp. Wei Fengying. 2007. *Diagnosis and Prediction of Modern Climate Statistics Techniques* (2nd edition) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 296pp.
- 许吟隆, 薛峰, 林一骅. 2003. 不同温室气体排放情景下中国 21 世纪地面气温和降水变化的模拟分析 [J]. *气候与环境研究*, 8 (2): 209–217. Xu Yinlong, Xue Feng, Lin Yihua. 2003. Changes of surface air temperature and precipitation in China during the 21st century simulated by HadCM2 under different greenhouse gas emission scenarios [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 8 (2): 209–217.
- 徐宗学, 张楠. 2006. 黄河流域近 50 年降水变化趋势分析 [J]. *地理研究*, 25 (1): 28–30. Xu Zongxue, Zhang Nan. 2006. Long-term trend of precipitation in the Yellow River basin during the past 50 years [J]. *Geographical Research* (in Chinese), 25 (1): 28–30.
- 杨胜天, 刘昌明, 孙睿. 2002. 近 20 年来黄河流域植被覆盖变化分析 [J]. *地理学报*, 57(6): 679–684. Yang Shengtian, Liu Changming, Sun Rui. 2002. The vegetation cover over last 20 years in Yellow River basin [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 57 (6): 679–684.
- 殷贺, 王仰麟, 彭建. 2009. 黄河中上游地区半个世纪降水与温度变化分析 [J]. *水土保持研究*, 16 (1): 69–73. Yin He, Wang Yanglin, Peng Jian. 2009. Variation analysis on precipitation and temperature in upper reach of Yellow River basin from 1956 to 2006 [J]. *Research of Soil and Water Conservation* (in Chinese), 16 (1): 69–73.
- 虞海燕, 刘树华, 赵娜, 等. 2011. 1951~2009 年中国不同区域气温和降水量变化特征 [J]. *气象与环境学报*, 27 (4): 1–11. Yu Haiyan, Liu Shuhua, Zhao Na, et al. 2011. Characteristics of air temperature and precipitation in different regions of China from 1951 to 2009 [J]. *Journal of Meteorology and Environment* (in Chinese), 27 (4): 1–11.
- 元慧慧, 李杰, 王彦磊, 等. 2012. 1951~2007 年南疆地区气温异常的时空变化特征 [J]. *气候与环境研究*, 17 (5): 541–548. Yuan Huihui, Li Jie, Wang Yanlei, et al. 2012. Spatio-temporal features of air temperature anomaly of South Xinjiang during 1951–2001 [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 17 (5): 514–548.
- 张善强. 2012. 黄河流域夏季降水与亚州季风的关系 [J]. *干旱区资源与环境*, 26 (8): 113–116. Zhang Shanqiang. 2012. Impact of the variation of Asian summer monsoon on summer precipitation in Yellow River valley [J]. *Journal of Arid Land Resource and Environment* (in Chinese), 26 (8): 113–116.
- Zhao T, Dai A G, Wang J H. 2011. Trends in tropospheric humidity from 1970–2008 over China from a homogenized radiosonde dataset [J]. *J. Climate*, 25: 4549–4567.
- 周雅清, 任国玉. 2010. 中国大陆 1956~2008 年极端气温事件变化特征分析 [J]. *气候与环境研究*, 15 (4): 405–417. Zhou Yaqing, Ren Guoyu. 2010. Variation characteristics of extreme temperature indices in mainland China during 1956–2008 [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 15 (4): 405–417.
- 祝青林, 张留柱, 于贵瑞, 等. 2005. 近 30 年黄河流域降水量的时空演变特征 [J]. *自然资源学报*, 20 (4): 478–481. Zhu Qinglin, Zhang Liuzhu, Yu Guirui, et al. 2005. The spatial and temporal variability characteristics of precipitation in the Yellow River basin of recent 30 years [J]. *Journal of Natural Resources* (in Chinese), 20 (4): 478–481.
- Zhu Y L, Wang H J, Zhou W, et al. 2011. Recent changes in the summer precipitation pattern in East China and the background circulation [J]. *Climate Dyn.*, 36: 1463–1473.