

刘辉, 范可. 2014. 欧亚季节环流气候平均态和气候变率: 20CR 再分析资料在欧亚及中国东部地区的评估 [J]. 大气科学, 38 (3): 469–483, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13182. Liu Hui, Fan Ke. 2014. Eurasia seasonal circulation climatology and variability: Evaluation of 20CR reanalysis data in Eurasia and East China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (3): 469–483.

# 欧亚季节环流气候平均态和气候变率: 20CR 再分析 资料在欧亚及中国东部地区的评估

刘辉<sup>1,2</sup> 范可<sup>1</sup>

1 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

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 本文评估了美国国家大气海洋局 (NOAA) 新发布的 20 世纪再分析资料 (20CR) 对欧亚季节环流气候平均态和气候变率及中国东部气温降水的刻画能力。结果表明: 20CR 再分析资料对欧亚地区四季环流气候平均态刻画能力与 NCEP2 资料的相比, 均呈现北部中高纬度系统性偏高, 南部中低纬度系统性偏低的特点, 导致描绘的东亚冬季风偏弱, 夏季风偏强。这可能与 20CR 资料在极地海岸地区海冰资料处理时产生的差错有关。与中国东部的站点资料对比则显示 20CR 对我国东部气温的刻画偏低, 而对降水的刻画偏高, 站点相关性气温好于降水, 东南沿海地区优于内陆地区。平均场和空间相关场结合来看, 秋季气温和降水 20CR 与站点观测资料吻合最好。20CR 资料较好地刻画近百年北半球冬夏季的气候指数 (北极涛动、北大西洋涛动、北太平洋涛动、东亚冬季风、阿留申低压等) 的年际变率及年代际变化特征, 很好地刻画了阿留申低压 1970 年代末的年代际增强, 西伯利亚高压 1970 年代末的下降和 1990 年后的上升趋势及北太平洋涛动、北大西洋涛动和北极涛动指数 1970 年代末期由负位相到正位相的年代际转变。

**关键词** 20CR 再分析资料 欧亚气候平均态 气候变率 年代际变化 中国东部

**文章编号** 1006-9895(2014)03-0469-15

**中图分类号** P468

**文献标识码** A

**doi:**10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13182

## Eurasia Seasonal Circulation Climatology and Variability: Evaluation of 20CR Reanalysis Data in Eurasia and East China

LIU Hui<sup>1,2</sup> and FAN Ke<sup>1</sup>

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

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract** This study evaluates the characterization capabilities of seasonal Eurasia climatology and climate variability of the newly released twentieth century reanalysis (20CR) data by the U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration. The results shows that in the Eurasia area, the 20CR data exhibited higher values in the northern high latitudes and lower values in the southern low latitudes than those recorded by version II of the National Centers for Environmental Prediction reanalysis data, resulting in weaker winter monsoon and a stronger summer monsoon circulations. This may be partly attributed to the handling of specified sea-ice concentration in the polar coastal area in the 20CR data. Comparison with the station observation data of eastern China indicates that the 20CR data represents

收稿日期 2013-05-27, 2013-12-02 收修定稿

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项 XDA05090426, 全球变化研究国家重大科学研究计划 2010CB950304, 中国科学院知识创新工程重要方向项目青年人才类 KZCX2-YW-QN202

作者简介 刘辉, 女, 1987 年出生, 博士研究生, 主要从事气候变化研究。E-mail: liuh@mail.iap.ac.cn

lower air temperature and a higher precipitation in the four seasons whereas the correlation of temperature between 20CR reanalysis data and the station observation is higher than that of precipitation. In addition, the variability of temperature and precipitation over the southeastern coastal area were captured better than those of the inland areas in 20CR reanalysis data. In particular, the highest consistency of the temporal–spatial feature of autumn temperature and precipitation in eastern China was between 20CR data and station observations. Major climate variability indices such as Arctic oscillation (AO), North Atlantic oscillation (NAO), North Pacific oscillation (NPO), Aleutian low, Siberian high, East Asian summer monsoon, East Asian winter monsoon, and Southern oscillation (SO) recorded during the last hundred years have also been evaluated in 20CR reanalysis data. The 20CR reanalysis data and the Hadley Centre sea level pressure dataset both showed the decadal change characteristics that the winter Aleutian low deepened during the late of 1970s, whereas the Siberian high weakened during the same period and intensified in the 1990s. In addition, negative phases of winter AO, NAO, and NPO transferred to positive phases during the late 1970s.

**Keywords** 20CR reanalysis data, Eurasian climatology, Climate variability, Decadal change, East China

## 1 引言

随着资料同化技术和数值预报模式的不断发展，再分析资料已经广泛应用于现代气候研究的各个方面，成为模式验证、气候变率及长期变化趋势诊断的有力工具。因此这种经过同化加工的再分析资料能在多大程度上真实描述大气的三维状态就成了气象工作者们十分关心的问题。再分析资料的质量问题主要受两个方面影响，首先受预报模式及资料同化分析系统的影响，如 NCEP/NCAR 联合发布的第一套再分析资料（NCEP1）中，由于其同化分析系统出现解码错误，致使东亚地区的海平面气压在 1967 年之前出现了系统性偏低的现象（徐影和丁一汇，2001；Yang et al., 2002；Wu et al., 2005；赵天保和符淙斌，2009）。其次，所同化的观测资料的不均一性也可能导致再分析资料中出现虚假变化趋势（Marshall, 2002; Marshall, 2003; Hodges et al., 2003; Bromwich and Fogt, 2004）。如欧洲中期数值预报中心（ECMWF）的近 45 年再分析资料（ERA40）计算的全球年平均总动能，在 1970 年代前后，随着卫星资料的引进有一个明显的上升趋势，而在考虑了卫星资料的出现的敏感性试验中，这种上升趋势就会大大减弱（Bengtsson et al., 2004）。然而无论 NCEP1 资料还是 ERA40 资料，其时间自 20 世纪中后期开始，其覆盖范围都较短，无法满足研究百年尺度年代际气候变化的要求。

近年，美国国家大气海洋局（NOAA）利用最先进的同化资料并结合观测资料，提供了一套从地面到高空 20 世纪大气再分析资料（20th Century Reanalysis Version 2, 20CR）。这套资料不但时间跨度长（1871~2010 年），且为避免观测系统变更和资料内部不协调所带来的虚假趋势，它仅同化地面

和海平面的气压数据，用观测的月平均海表面温度和海冰作为下边界驱动条件（Compo et al., 2011）。20CR 资料在长期气候变化趋势的研究中已经有了广泛应用，但有些结果也受到质疑。20CR 资料计算的纬向平均降水量与蒸发量之差与 20 世纪气候模式描绘的结果有显著差异（Compo et al., 2011）；其气温和降水资料在美国中部也出现不连续性（Ferguson and Villarini, 2012）；关于东北部大西洋风暴 20CR 资料得出的结果与观测结果在 20 世纪前半叶呈相反趋势（Krueger et al., 2012）。这些结果表明 20CR 资料还存在一定的缺陷，因此有必要在使用前对 20CR 资料进行评估。宋丰飞和周天军（2012）对 20CR 资料在东亚季风区做了质量评估，指出尽管 20CR 资料对东亚夏季气候态和年际变率的刻画与此前公布的其他再分析资料有较高的一致性，但其未能再现 1970s 末期东亚夏季风年代际减弱的信号，说明在年代际尺度上可靠性较低。Fan and Liu (2013) 对 20CR 资料在南半球大气环流的描述能力上也做了评估，指出在 1979~2010 年间，20CR 资料刻画的南半球的气候态、遥相关模态及越赤道气流与对比资料有较高的一致性。但 1920 年代之前 20CR 资料与观测资料差异明显。

由于观测站点的相对较少，再分析资料在欧亚地区的可信度要弱于北半球其他地区，而为了能在欧亚地区更合理的使用这套新的再分析资料，有必要对其描绘的欧亚季节环流气候平均态和气候变率做一个完整的评估。本文选取 NCEP/NCAR 联合完成的 NCEP2 再分析资料作为对照资料，主要因为它是采用改进的预报模式和同化系统，修正了 NCEP1 中的人为误差，被认为是一种校正的较好的全球再分析资料，也是应用较为广泛的再分析资料之一。本文首先从四个季节气候平均态的角度对比

20CR 与 NCEP2 再分析资料季节演变的异同。并在此基础上分别对 20CR 的 2 m 气温和降水资料与中国站点的气温和降水资料进行了四季气候平均态的对比, 进一步验证 20CR 再分析资料在中国东部地区的可信性。其次, 通过与 Hadley 气候中心的百年海平面气压场 (SLP) 资料做对比, 考察了北半球主要气候指数在近百年的年际及年代际变率的刻画能力。

## 2 资料介绍及方法

20CR 再分析资料是美国大气海洋局 (NOAA) 最新发布的一套综合性全球大气环流数据, 时间覆盖范围从 1871 年到 2010 年, 水平分辨率为  $2^\circ \times 2^\circ$ 。作为参照的 NCEP2 (Kanamitsu et al., 2002) 再分析资料时间覆盖范围为 1979 年至今, 分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。取两套资料 1979~2010 年相应变量的月平均数据, 在做比较前, 首先将 NCEP2 再分析资料对应变量水平方向上用双线性插值到  $2^\circ \times 2^\circ$ 。

在做 20CR 再分析资料与中国站点资料的对比时, 选取 20CR 的 2 m 气温和降水资料, 均为高斯格点分布, 全球共  $192 \times 94$  格点。将其降速率转换为季节降水总量, 同样取 1979 年 1 月~2010 年 12 月 32 年的资料。站台资料是同期的中国 160 台站月平均温度和降水总量的观测资料。对比之前将格点资料用双线性插值方法插值到站点, 得到中国 160 个站台的 20CR 资料, 由于对比区域选为  $105^\circ\text{E}$  以东的中国东部地区, 地形起伏不明显, 因此插值过程中没有考虑地形因素。

此外, 为了检验百年尺度海平面气压, 本文还用到英国 Hadley 中心提供的 HadSLPv2 全球海平面气压月平均数据, 该数据完全以海平面气压的观测资料为基础, 水平分辨率为  $5^\circ \times 5^\circ$ , 选用时间段为 1871~2010 年 (Allan and Ansell, 2006)。

分析 20CR 与 NCEP2 两套再分析资料的差异场时, 均为 20CR 减去 NCEP2; 分析 20CR 资料与中国东部站点资料的差异场时, 均为 20CR 资料减去站点资料。

## 3 气候平均态的季节对比

### 3.1 海平面气压场 (SLP) 的四季对比

图 1 为 20CR 与 NCEP2 再分析资料海平面气压 (SLP) 的四季气候平均态及其差异的空间对比。如图 1a、b 所示, 冬季欧亚大陆上存在一强大

的反气旋环流, 即西伯利亚高压 (SH)。海洋上则对应为一较强的气旋性低压, 即阿留申低压 (AL)。结合差异场 (图 1c) 可以看出, 20CR 的 SH 位置偏北, 导致欧亚大陆  $45^\circ\text{N}$  以北及中国东北地区 20CR 的 SLP 都显著偏高。中国西南部、青藏高原、印度半岛则显著偏低。AL 没有显著的位置和强度差异。结合 850 hPa 风场的差异 (图 1c), 欧亚大陆  $45^\circ\text{N}$  以南是显著的气旋性差值环流, 东亚沿岸盛行偏南风异常, 说明 20CR 刻画的东亚冬季风比 NCEP2 弱。选取 ( $20^\circ\text{N} \sim 40^\circ\text{N}$ ,  $110^\circ\text{E} \sim 125^\circ\text{E}$ ) 范围加权平均的 850 hPa 经向风为冬季风指数 (Yang et al., 2002), 定量计算可知 1979~2010 年时段 20CR 资料所计算的冬季风比 NCEP2 的计算结果高 0.507 m/s。因冬季风符号为负值, 说明 20CR 的冬季风更弱。春季时 (图 1d、e) 随着欧亚大陆和西太平洋海陆热力差异的减小, 大陆上的反气旋和海洋上的气旋都相应变弱。SH 西撤到内陆地区, 亚洲低压在印度半岛附近开始形成。AL 向西北转移其范围则延伸到大陆, 夏威夷高压渐渐增强。结合差异场 (图 1f) 可以看出, 20CR 所刻画的西伯利亚高压和亚洲低压在春季更强一些, 表现为大陆上  $45^\circ\text{N}$  以北, 我国东北华北及日本海地区大范围正距平, 青藏高原及南亚次大陆印度半岛地区呈现显著负距平。海洋上北太平洋地区两套资料的差异不明显,  $15^\circ\text{N}$  以南的热带太平洋地区 20CR 的气压场偏低。从夏季 SLP 平均场 (图 1g、h) 可以看出, 海洋上为一个强大的夏威夷高压, 欧亚大陆上呈现热低压, 另一低压中心在印度半岛附近。我国东北有一气旋性低压。结合差值场 (图 1i), 20CR 资料在  $45^\circ\text{N}$  以南,  $120^\circ\text{E}$  以西的欧亚大陆地区为显著负距平, 在  $45^\circ\text{N}$  以北,  $120^\circ\text{E}$  以东的欧亚大陆为显著正距平, 海洋上  $20^\circ\text{N}$  以南的热带太平洋地区为显著负距平,  $20^\circ\text{N}$  以北的北太平洋地区差异不明显。这说明 20CR 所刻画的亚洲低压偏强, 东北低涡偏弱, 夏威夷高压两套资料差异不大。结合 850 hPa 风场的差异 (图 1j, 箭头), 可看出我国东南华北地区都有显著的南风异常, 说明 20CR 描绘的夏季风要强于 NCEP2。选取 ( $20^\circ\text{N} \sim 40^\circ\text{N}$ ,  $110^\circ\text{E} \sim 125^\circ\text{E}$ ) 范围加权平均的 850 hPa 经向风为夏季风指数 (Wang, 2002), 定量计算可知 1979~2010 时段 20CR 资料所计算的夏季风比 NCEP2 的计算结果高 0.933 m/s。秋季时 (图 1k、l) 亚欧大陆上西伯利亚高压开始形成, 海洋上阿留申低压变

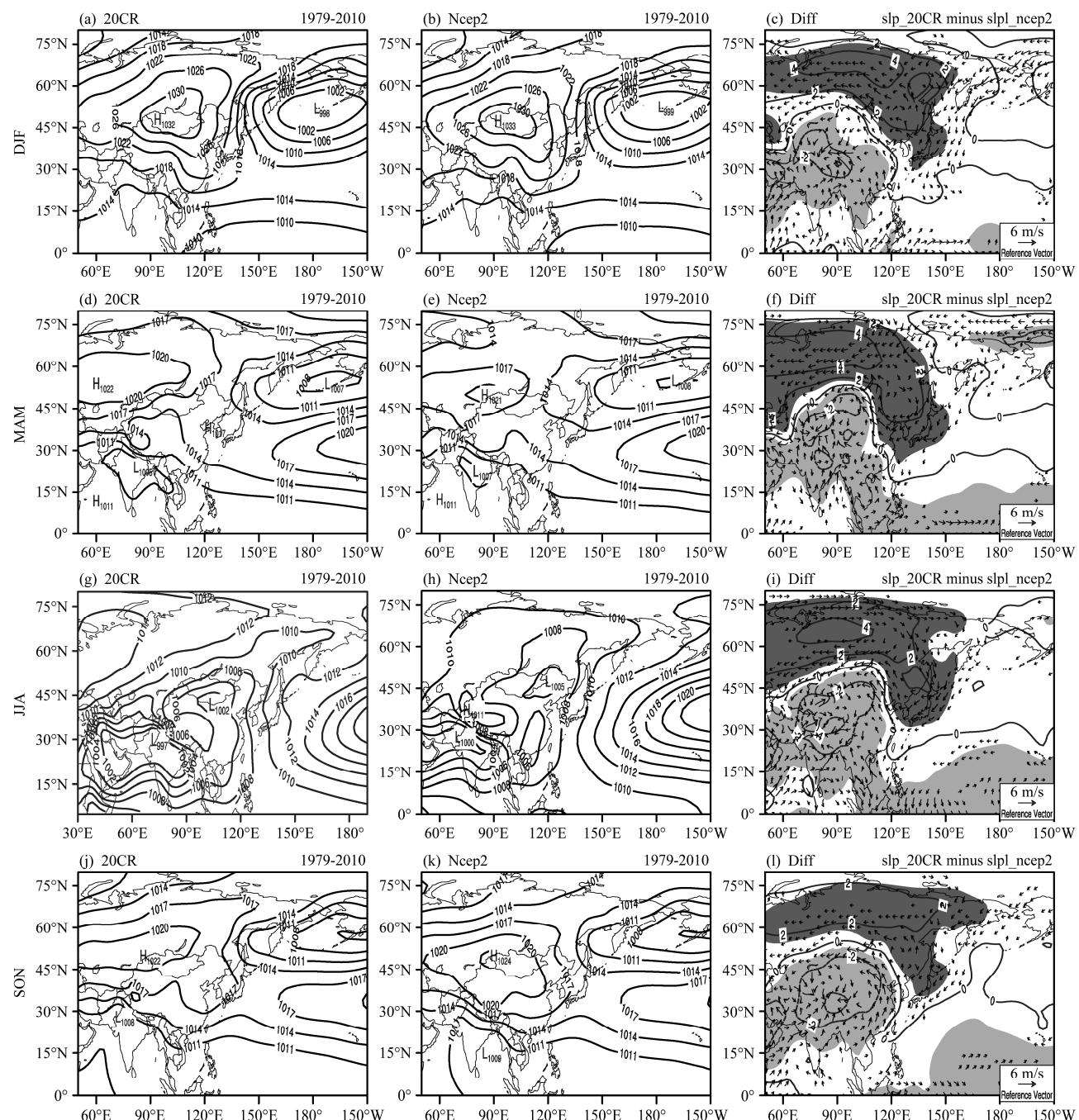


图1 SLP场冬、春、夏、秋季节(由上至下排列)1979~2010年的气候平均态(左20CR, 中NCEP2)及各季SLP场(右图, 等值线, 单位:hPa)和850 hPa风场(右图, 箭头, 单位:m/s)两套资料的差异场(均为20CR减去NCEP2)。阴影为SLP差异通过了显著性0.05检验的区域(深色为正, 浅色为负); 850 hPa风场差异小于1 m/s的已经略去

Fig. 1 Climatology of seasonal evolution of SLP during 1979 to 2010 (left row: 20CR, middle row: NCEP2) and the differences (20CR minus NCEP2) of seasonal SLP field (right row, contour, units: hPa) and seasonal wind at 850 hPa (right row, arrow, units: m/s). Regions where SLP differences are statistically significant at the 0.05 level according to the Student's *t* test are shaded (dark: positive, light: negative); the wind differences with magnitudes less than 1 m/s at 850 hPa are omitted. DJF: Dec–Jan–Feb; MAM: Mar–Apr–May; JJA: Jun–Jul–Aug; SON: Sep–Oct–Nov

强范围扩大, 夏威夷高压变弱并向东南撤退, 差异场上45°N以南的亚欧大陆地区负距平, 以北正距平, 850 hPa风场上显示我国西南华北地区偏南风异常。

### 3.2 500 hPa 高度场(H500)的四季对比

图2为20CR与NCEP2再分析资料500 hPa高度场(H500)的四季气候平均态及其差异的空间对比。冬季时(图2a、b)鄂霍茨克海附近存在一明

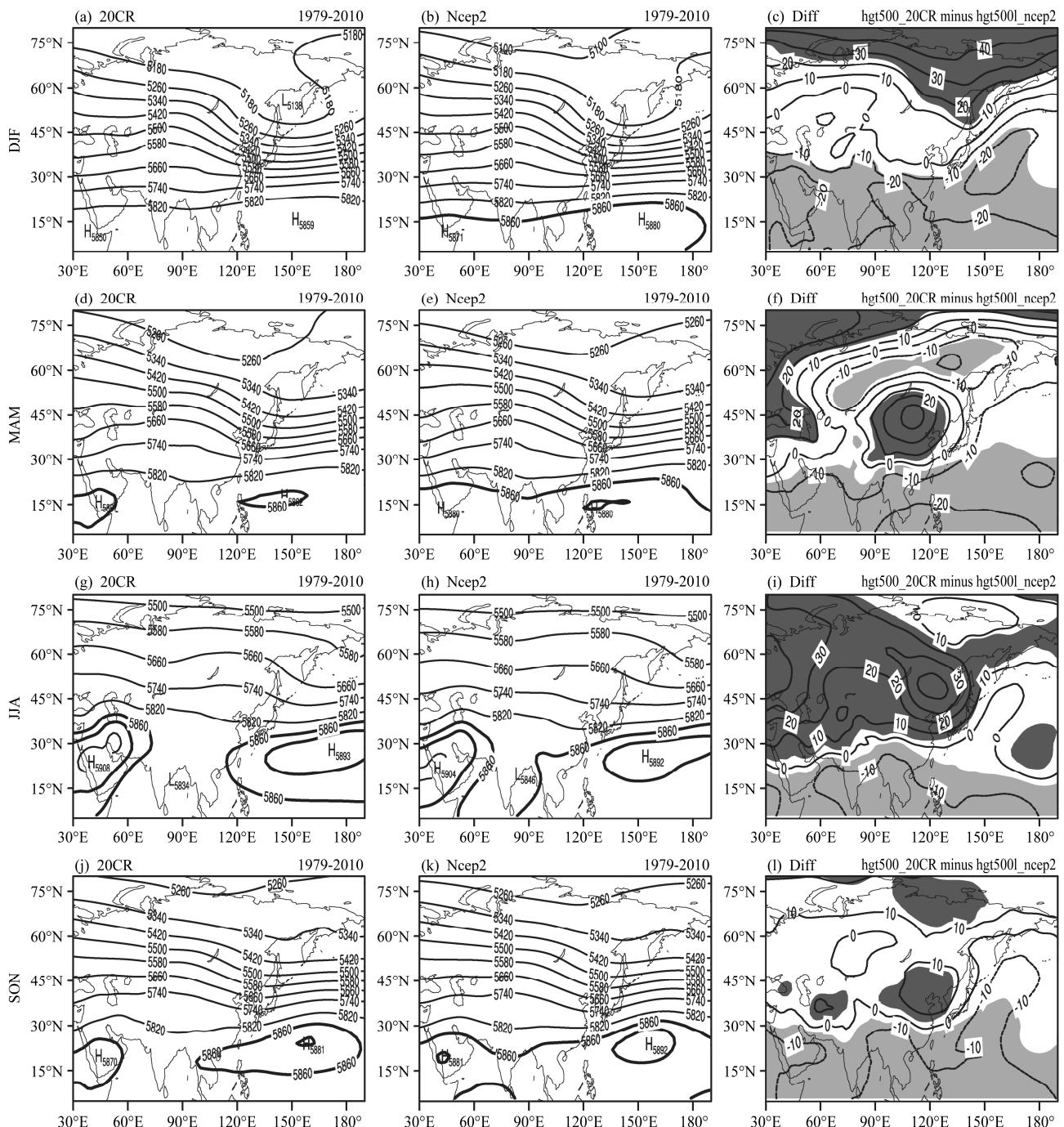


图2 H500 场冬、春、夏、秋季节(由上至下排列)1979~2010年的气候平均态(左20CR, 中NCEP2)及各季H500场(右图, 单位:m)两套资料的差异场(均为20CR减去NCEP2)。差异场中阴影为差异通过了显著性0.05检验的区域(深色为正, 浅色为负)。粗实线分别为5860和5880 m等位势高度线

Fig. 2 Climatology of seasonal evolution of 500-hPa height (H500) fields during 1979 to 2010 (left row: 20CR, middle row: NCEP2) and the differences (20CR minus NCEP2) of seasonal H500 fields (right row, units: m). Regions where H500 differences are statistically significant at the 0.05 level according to the Student's *t* test are shaded (dark: positive, light: negative). The thick solid lines represent 5860-m and 5880-m geopotential height

显的东亚大槽, 贝加尔湖地区和乌拉尔山附近分别有一弱脊, 在20CR资料场中(图2a)西太平洋副高不明显, NCEP2资料场(图2b)副高位于20°N以南, 脊线大约在10°N左右, 处于一年中最南的

位置。差异场中(图2c), 60°N以北显著正距平, 40°N以南的大陆及海洋上为显著的负距平。鄂霍茨克海处显著正距平。可看出20CR的资料所描绘的东亚大槽偏弱, 极涡也明显偏弱, 贝加尔湖高压脊

和乌拉尔山高压脊都略强，副高明显偏弱。春季时（图 2d、e、f）亚欧大陆上的槽脊系统都相应减弱且东移，副高的位置北移，脊线大概在  $15^{\circ}\text{N}$ 。差异场中我国东北、华北、及蒙古地区上空存在一反气旋差值环流， $20^{\circ}\text{N}$  以南负异常显著。夏季时（图 2g、h、i）东亚大槽已东移入海，贝加尔湖出现一浅槽，伊朗高压和北太平洋副高都十分明显，两个高压的中心值 20CR 都要略高于 NCEP2，副高的脊线位置大约在  $30^{\circ}\text{N}$ 。差异场中（图 2i） $20^{\circ}\text{N}$  以北的欧亚大陆大范围的显著正距平，我国东北地区为正距平中心， $20^{\circ}\text{N}$  的印度洋，南亚次大陆及热带太平洋上空为显著负距平。对比平均态，可知 20CR 所描绘的伊朗高压要略强于 NCEP2 的结果，且位置偏北。副高 5880 和 5860 线的西伸端点较 NCEP2 的结果更偏西。 $90^{\circ}\text{E}$  附近的贝湖槽偏弱。秋季（图 2j、k、l）伊朗高压和太平洋副高都有所减弱，脊线位置南撤到  $20^{\circ}\text{N}$  左右，中心最高值 NCEP2 略高于 20CR，亚欧大陆上鄂霍茨克海沿岸东亚大槽开始形成。结合差异场，可以看到 20CR 的资料  $30^{\circ}\text{N}$  以南大范围负距平，说明 20CR 所刻画的秋季副高比 NCEP2，明显偏低。

### 3.3 200 hPa 纬向风场（U200）的四季对比

图 3 为 200 hPa 纬向风的四季平均态及差异对比图。可看出高空西风急流的位置和强度随季节变化有很大差异。冬季最强位置最南，急流中心在日本上空，中心风速最大达  $70 \text{ m/s}$  以上，急流中心位置约在  $30^{\circ}\text{N}$ ，夏季时日本急流最弱位置最北，东移到北太平洋。另一西风急流中心出现我国新疆上空，中心风速仅  $30 \text{ m/s}$  以上，急流中心位置约在  $42^{\circ}\text{N}$  左右。从四季的差异场（图 3c、f、i、l）可以看出，以  $45^{\circ}\text{N}$  为界，以北为正距平，以南为负距平，分别以贝加尔湖和我国南部地区为正负距平中心。其中春季差异值最大，夏秋季其次，冬季差异值及显著性范围都较小。同时注意到急流中心位置处均无显著性差异，说明两套资料对西风急流强度和位置的刻画比较一致。同时，由于  $45^{\circ}\text{N}$  以北的正异常和  $45^{\circ}\text{N}$  以南的负异常在高度场上会体现为一个反气旋高度异常，南亚高压在夏季时最为明显，其脊线位置大概位于  $20^{\circ}\text{N}$ ， $45^{\circ}\text{N}$  附近的反气旋异常意味着 20CR 资料所刻画的南亚高压位置要更偏北，这点从 200 hPa 高度场的差值场也可以看出（图略）。

总体来看，1979~2010 年期间，欧亚地区 20CR

资料的 SLP、H500、U200 的四季气候平均态与 NCEP2 资料的相比，呈现北部中高纬度系统性偏高，南部中低纬度偏系统性低的特点，这可能与 20CR 资料在极地海岸地区海冰资料处理时产生的差错有关（Compo et al., 2011）。这种北正南负的异常会导致其在描述东亚气候时相比 NCEP2 资料冬季风偏强，夏季风偏弱。

## 4 与中国站点资料的比对

一般来说，相对于高空再分析产品来说，再分析地表气温与降水资料的可信度相对较低，因此有必要对 20CR 的地表气温与降水资料与我国站点器测资料相对比进行评估。图 4、图 5 分别为四季 20CR 插值结果与中国站点气温和降水资料的差值对比，菱形圈出的为差异通过 0.05 显著性检验的站点，即存在显著差异的站点。图 6、图 7 分别为四季 20CR 插值结果与中国站点气温和降水的空间相关，红色点为通过 0.05 显著性相关检验的站点，蓝色点为非显著相关站点及负相关站点。时间范围均为 1979~2010 年。由于  $105^{\circ}\text{E}$  以西的地区地形变化较大，站点也较少，我们只选取  $105^{\circ}\text{E}$  以东的区域进行比较。

从温度的四季差异图（图 4）可以看出，冬春季 20CR 的气温资料都偏低，夏季  $35^{\circ}\text{N}$  以北的北方地区大部分偏高，南方地区则偏低。秋季中部偏高东北西南及东南温度偏低。四个季节相比较，冬季无显著差异的站点相对较多，多集中在华北、华南地区。冬季华南地区气温平均差值较小，大多在  $2^{\circ}\text{C}$  以内，东北地区差异较大。夏季时则东北地区差异较小，南方地区差异相对较大，但大多差异温度在  $4^{\circ}\text{C}$  以内。

图 5 为降水的四季差异结果，比较季节降水总量，可以看出 20CR 刻画的降水在四季都普遍偏高。冬季的差异最为明显，只有南部沿海少数几个站点无显著差异。夏秋季无显著差异的站点较多，集中在山东半岛及我国东南部地区。降水无显著差异的站点数明显多于气温的，这可能是由于降水的变率比较大，方差比较大，导致多年平均的差异易通过检验。

图 6 是 20CR 再分析  $2 \text{ m}$  气温资料与观测气温资料的相关系数 ( $r$ ) 的空间分布特征，红色的为相关性通过 0.05 信度检验的站点。由图可见四季中再分析资料与大部分站点资料显著相关，但相关系数达到 0.9 以上的站点很少，总体来看，相关性东部

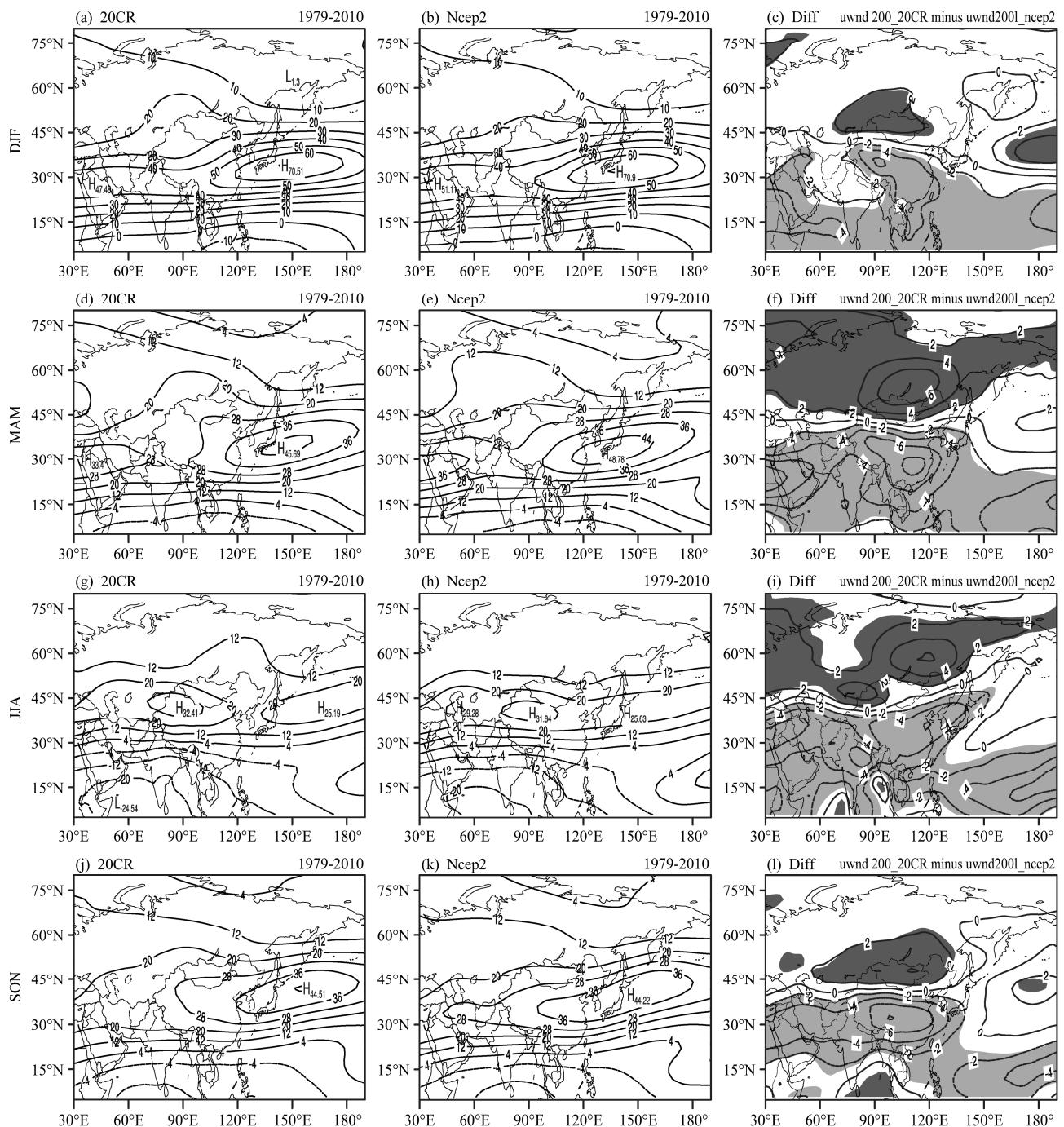


图3 200 hPa纬向风冬、春、夏、秋季节(由上至下排列)1979~2010年的气候平均态(左20CR, 中NCEP2)及各季U200(右图, 单位: m/s)。差异场中阴影为差异通过了显著性0.05检验的区域(深色为正, 浅色为负。)

Fig. 3 Climatology of seasonal evolution of 200-hPa zonal wind (U200) fields during 1979 to 2010 (left row: 20CR, middle row: NCEP2) and the differences (20CR minus NCEP2) of seasonal U200 fields (right row, units: m/s). Regions where U200 differences are statistically significant at the 0.05 level according to the Student's *t* test are shaded (dark: positive, light: negative)

沿海及东北地区要好于内陆地区, 秋季的相关性为四季中最好的。

图7为20CR再分析降水资料与器测降水资料的相关系数的空间分布特征。可以看出降水的相关

性要明显低于气温的相关性, 不显著相关的站点增多, 甚至个别站点出现负相关。同样东南沿海地区的相关性要好于内陆地区, 春秋季的相关性好于冬夏季。

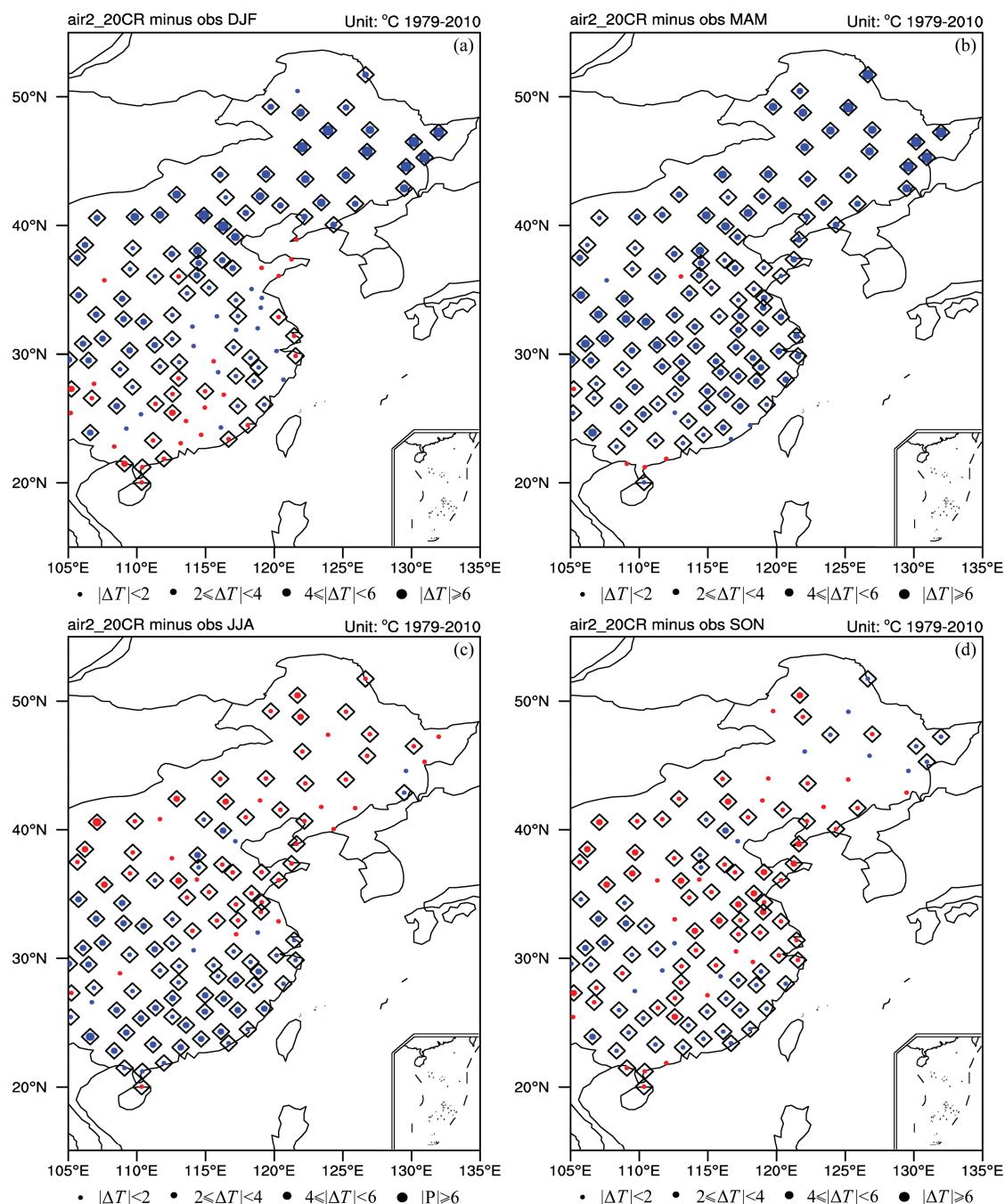


图 4 中国 105°E 以东地区 1979~2010 年 (a) 冬、(b) 春、(c) 夏、(d) 秋季节 20CR 气温插值结果与站点气温的差值。红色为正, 蓝色为负; 菱形圈出的为差异未通过了显著性 0.05 检验的站点

Fig. 4 The seasonal air temperature differences between 20CR data (interpolated results) and station observations in the area east of 105°E in China: (a) Winter, (b) spring, (c) summer, (d) autumn. Red (blue) dots: positive (negative) values; diamond circles represent the stations where the differences are not statistically significant at the 0.05 level according to the Student's t test

## 5 气候变率的比较

选取英国 Hadley 中心的海平面气压场和 20CR 的海平面气压场作对比, 考察北半球主要气候指数的年际和年代际变率 (图 8、图 9)。图 8 为冬季的气候指数, 分别为西伯利亚高压指数 ( $SHI = SLP_{40^{\circ}N \sim 65^{\circ}N}$ ,

$80^{\circ}E \sim 120^{\circ}E$ )、阿留申低压指数 ( $ALI = SLP_{45^{\circ}N \sim 65^{\circ}N}, 160^{\circ}E \sim 160^{\circ}W$ )、东亚冬季风指数  $EAWMI$  (郭其蕴, 1994)、北大西洋涛动指数 ( $NAOI = SLP_{25^{\circ}N \sim 40^{\circ}N}, 10^{\circ}W \sim 5^{\circ}0W - SLP_{50^{\circ}N \sim 65^{\circ}N}, 10^{\circ}W \sim 50^{\circ}W$ )、北太平洋涛动指数 ( $NPOI = SLP_{25^{\circ}N \sim 40^{\circ}N}, 130^{\circ}E \sim 170^{\circ}E - SLP_{50^{\circ}N \sim 65^{\circ}N}, 130^{\circ}E \sim 170^{\circ}E$ )、南方涛动指数 ( $SOI = SLP_{17^{\circ}S}, 148^{\circ}W - SLP_{12^{\circ}S}, 131^{\circ}E$ ) 和北极

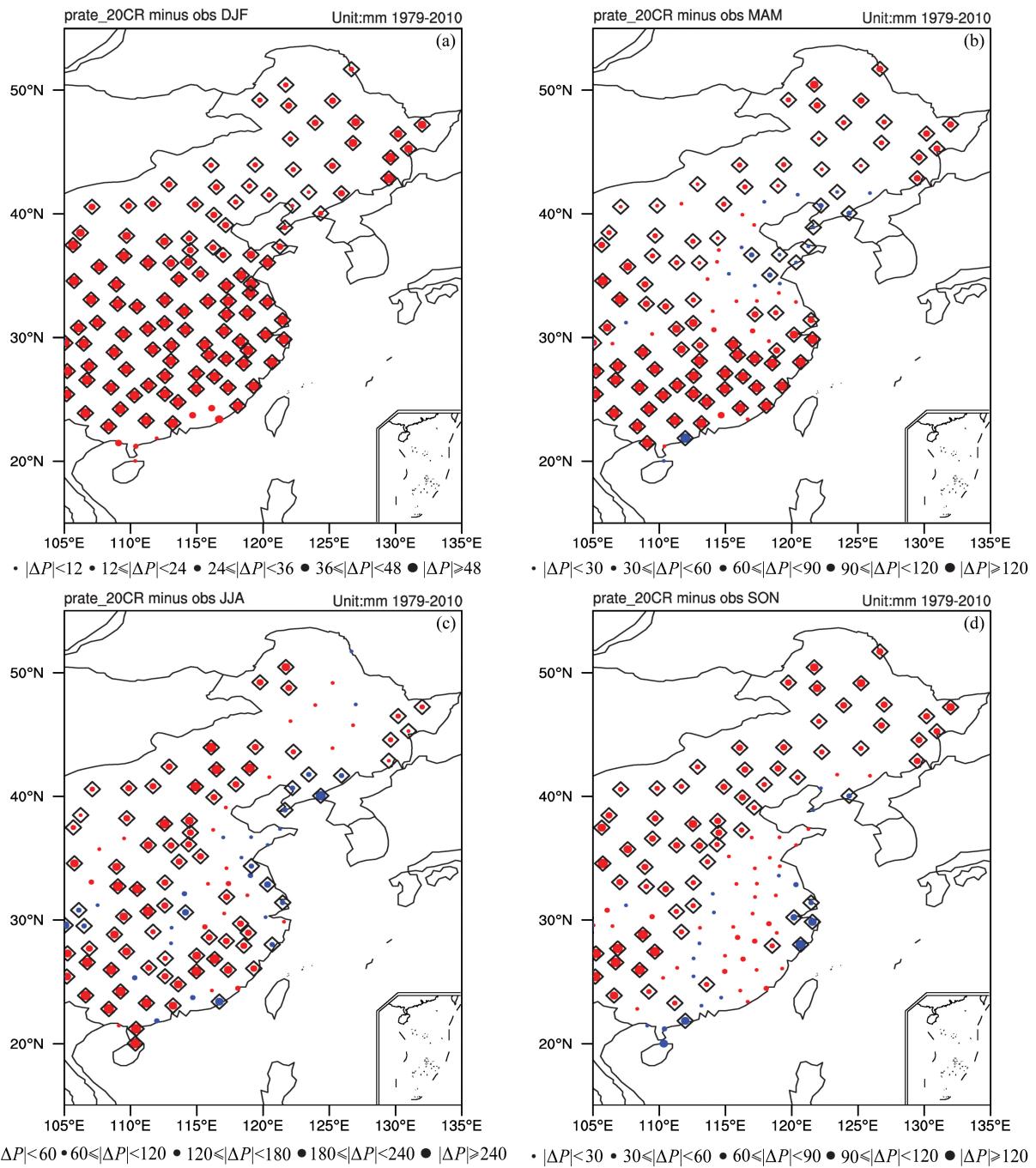


图5 中国105°E以东地区1979~2010年冬(a)、春(b)、夏(c)、秋(d)季节20CR降水插值结果与站点降水的差值。红色为正，蓝色为负；菱形圈出的为差异未通过了显著性0.05检验的站点

Fig. 5 The seasonal precipitation differences between 20CR data (interpolated results) and station observations in the area east of 105°E in China: (a) Winter, (b) spring, (c) summer, (d) autumn. Red (blue) dots: positive (negative) values; diamond circles represent the stations where the differences are not statistically significant at the 0.05 level according to the Student's *t* test

涛动指数(AOI, 20°N以北SLP场EOF第一模态的时间系数)。其中指数的计算公式中下标为区域的都表示所选取的SLP区域的加权平均。红线为20CR资料的结果, 蓝线为HadSLP的结果, 黑线为HadSLP结果的9年滤波曲线。右上角分别为1871~1920年和1921~2010年两套资料原始序列

指数的相关系数。图9为夏季的气候指数, 分别为东亚夏季风指数(郭其蕴, 1983)、夏季NAO(Greatbatch and Rong, 2006)、NPO、SO指数, 其中NPOI、SOI两个指数与冬季时计算方法相同。所有指数均进行了标准化处理。东亚冬夏季风指数采用郭其蕴(1983, 1994)的计算方法, 具体为取10°~

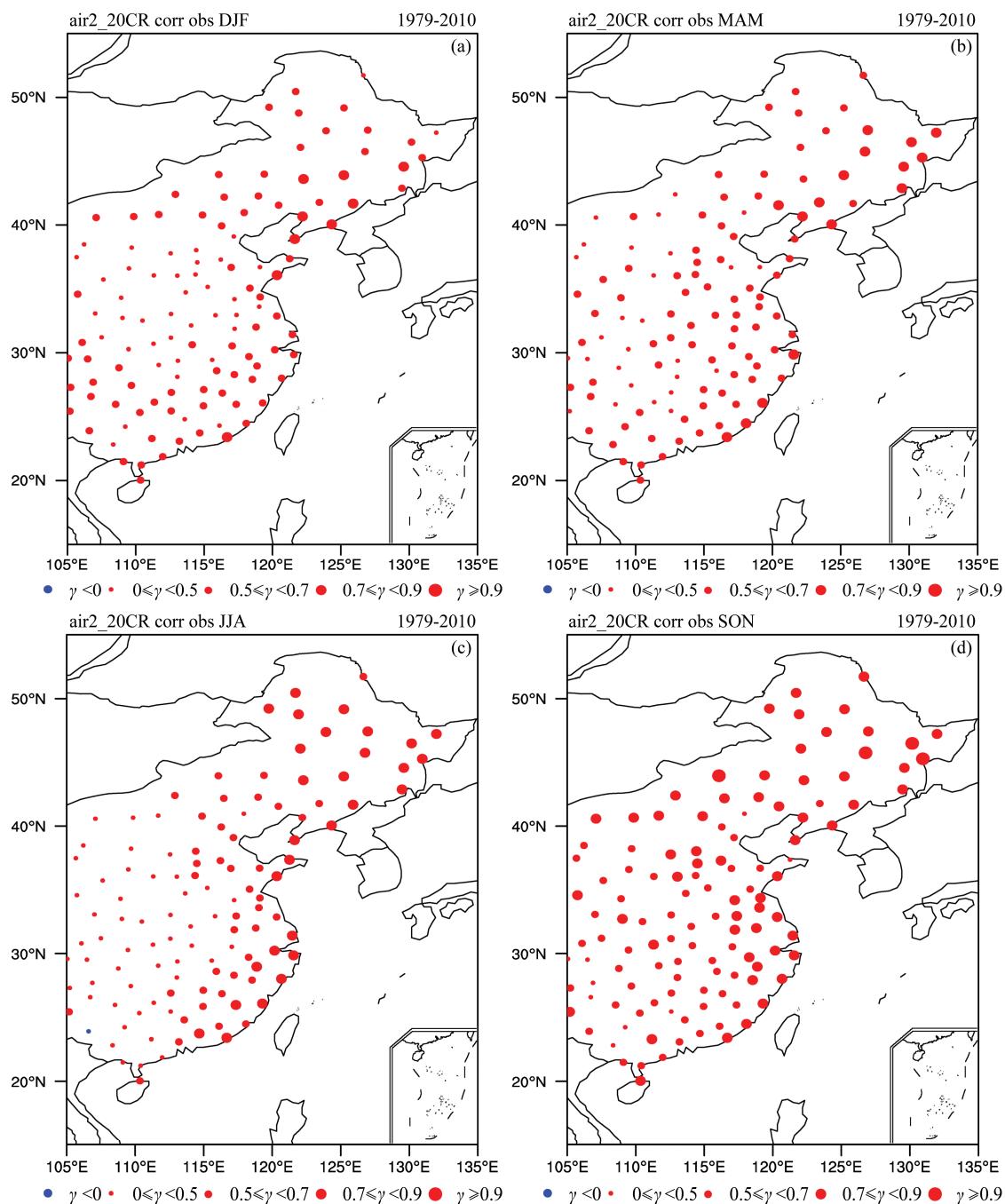


图 6 中国 105°E 以东地区 1979~2010 年 (a) 冬、(b) 春、(c) 夏、(d) 秋季节 20CR 气温插值结果与站点气温的空间相关。红色为相关性通过了显著性 0.05 检验的站点

Fig. 6 The seasonal spatial correlation of air temperature between 20CR data (interpolated results) and station observations in the area east of 105°E in China: (a) Winter, (b) spring, (c) summer, (d) autumn. Red dots are the stations where the correlation is statistically significant at the 0.05 level according to the Student's *t* test

50°N 范围内 (每 10 度), 110°~160°E 之间的气压差小于 (大于) 或等于  $-5$  hPa ( $5$  hPa) 的所有数值之和, 再把各年的值与气候平均态求比值, 作为夏季风 (冬季风) 指数。

从各气候指数的相关系统来看, 20CR 资料的结果与 HadSLPv2 的结果有很高的一致性, 几乎全

部通过了 0.01 的显著性检验。1920 前的 50 年学生 *t* 检验 99% 和 95% 的置信水平分别为 0.28 和 0.36, 1920 年后的 90 年为 0.21 和 0.27。1920 年前的夏季 NPO 指数 (图 9c) 相关性略低, 但也通过了 0.05 的显著性检验。同时对比 1920 年前后的相关系数, 可以看到尽管 1920 年后的序列有 90 年, 长于 1920

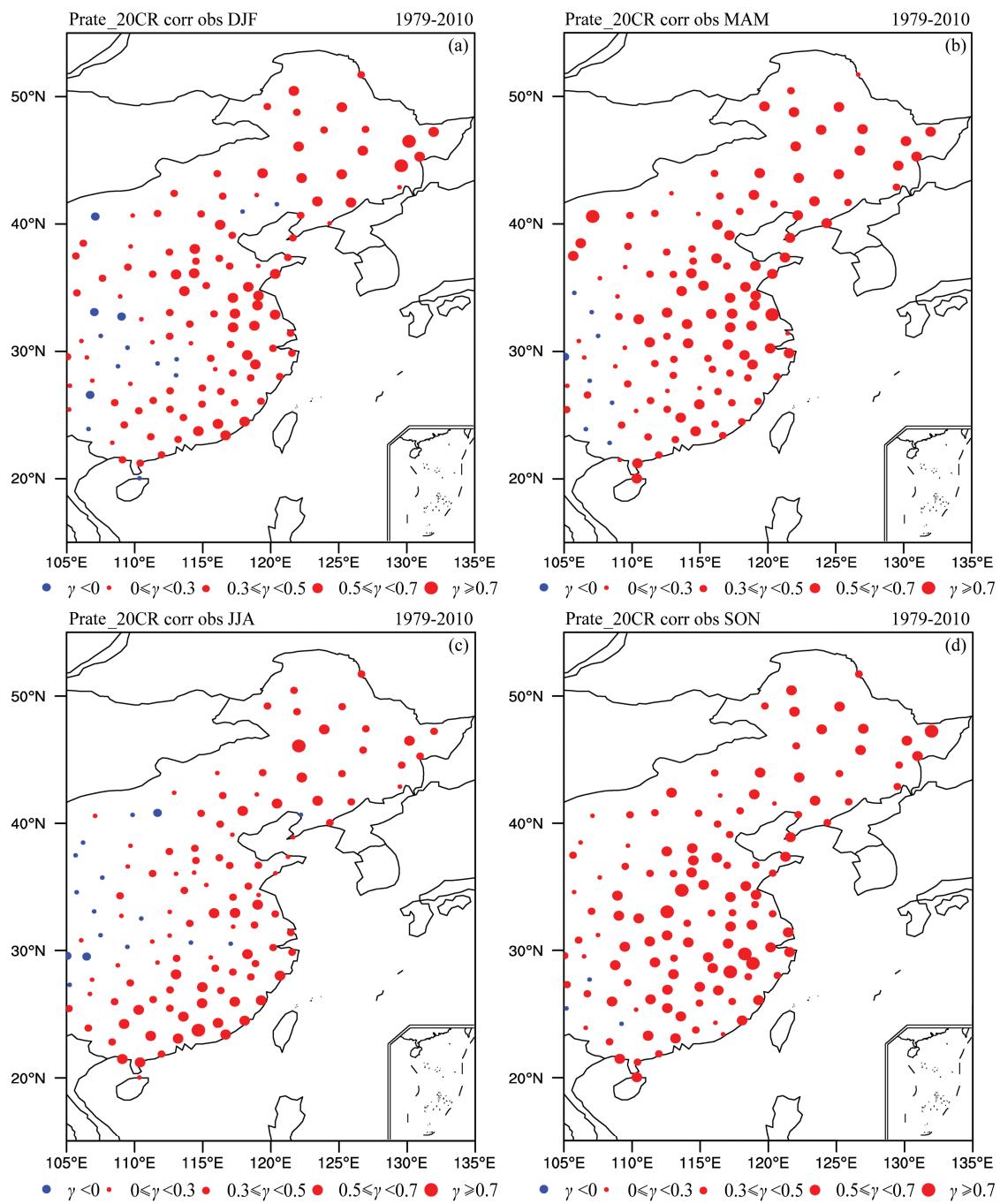


图 7 中国 105°E 以东地区 1979~2010 年 (a) 冬、(b) 春、(c) 夏、(d) 秋季节 20CR 气温插值结果与站点气温的空间相关。红色为相关性通过了显著性 0.05 检验的站点

Fig. 7 The seasonal spatial correlation of precipitation between 20CR (interpolated results) and station observations in the area east of 105°E in China: (a) Winter, (b) spring, (c) summer, (d) autumn. Red dots are the stations where the correlation is statistically significant at the 0.05 level according to the Student's *t* test

年前的 50 年, 但 1920 年后两套资料的相关系数反而更高, 说明 1920 年后两套资料的一致性要远强于 1920 年前的, 这从图中也可以直观看出, 到 20 世纪后半叶, 随着观测站点的增多, 特别是到了 1970 年代之后卫星资料的引入, 指数的相关性更有明显提高。

观察冬夏季各指数的近百年序列, 可以看到明

显的年际和年代际振荡, 地球气候系统作为一个整体, 大气涛动和大气活动中心的变化不仅会影响局地气候, 还可通过遥相关产生非局地的影响。因此关注各气候指数的百年序列对研究近百年的气候变化有很好的指示作用。

冬季各指数中西伯利亚高压是影响我国北方大部分地区冬季气温的重要气候因子, 在近百年

中, 其变化趋势呈现低(约1871~1920年)、高(约1921~1980年)、低(1981~2010年)的年代际震荡(图8a, 黑线)。与中国区域近百年冬季气温的三个主要冷暖期基本一致(范可和刘辉, 2013)。

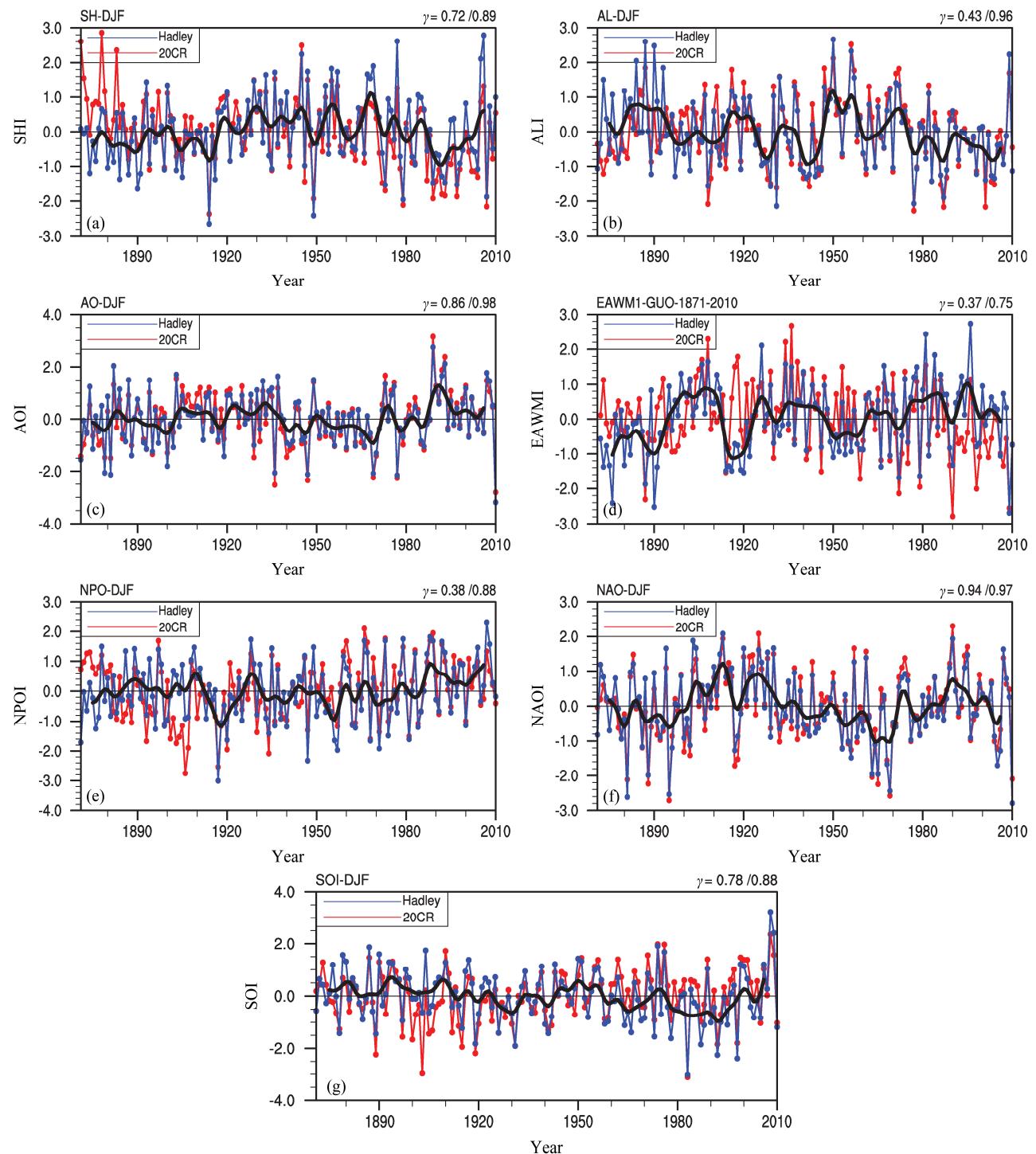


图8 20CR(红)和HadSLP(蓝)所计算的1871~2010年冬季(a) SHI、(b) ALI、(c) AOI、(d) EAWMI、(e) NPOI、(f) NAOI和(g) SOI 7种气候指数的原始序列和HadSLP资料的9年滤波序列(黑)。右上角分别为1871~1920年和1921~2010年两套资料原始序列指数组数

Fig. 8 Time series of seven winter climate indexes which are (a) SHI, (b) ALI, (c) AOI, (d) EAWMI, (e) NPOI, (f) NAOI, and (g) SOI during 1871–2010 derived from 20CR (red) and HadSLP (blue) data and the nine-year smoothing indexes for HadSLP data (black). The correlation coefficients of the original sequence indexes for 1871–1920 and 1921–2010 respectively are at the upper right corner

同时也很好的刻画出西伯利亚高压1970年代末, 全球变暖背景下的下降趋势(Panagiotopoulos et al., 2005)和1990年后由于北极海冰减少等因素导致的上升趋势(Wu et al., 2011), 西伯利亚高压90年

后与极地环流联系更为密切(范可和刘辉, 2013)。从图 8b 可以看出, 两套资料所刻画的 AL 指数在 1920 年后有非常高的致性(相关系数达 0.96), 1980 年以来 AL 指数有明显的年代际下降, 反映了阿留申低压的加深, 这与前人的研究结果一致(Trenberth and Hurrell, 1994; Rodionov et al., 2007)。本文按照郭其蕴(1994)定义冬季风指数(图 8d), 用海陆气压差作为指标, 主要反映冬季风在大陆东岸向南扩展的程度, 与长江上游、华南和东部沿海的 U 形地带的气温密切相关。1980 年代中国南方气温略有下降, 可以用冬季风指数在 1980 年代后有所加强来解释。同时注意到 1980 年代后 20CR 描绘的冬季风指数略低于 HadSLPv2 资料。需要指出的是, 若用西伯利亚高压或东亚大槽为指标所定义冬季风指数(琚建华 et al., 2004), 则指数主要与中国北方及中部大范围地区的气温密切相关, 在 1980 年代后为年代际减弱的趋势, 最近研究表明东亚东季风指数在 1980 年代后与 ENSO 的关系减弱(Wang and He, 2012)。AO、NAO、NPO(图 8c、e、f)这三个大气涛动联系紧密, 往往有着一致的变化或滞后相关(Delworth et

al., 2000; 孙建奇和王会军, 2005; Yuan and Sun, 2009; 赵南和王启伟, 2010), 如图中可以看出三个指数在 1920 年、1970 年附近都出现了较低的负位相, 且 1980 年代都出现上升趋势, 而在 1990 年代又开始下降。三个指数 1990 年代的下降是我国及欧洲出现寒冬暴雪事件的关键因子(Wang et al., 2007; Cohen et al., 2010; Seager et al., 2010; Liu et al., 2012)。南方涛动表明东太平洋和印度洋的气压变化有东西向跷跷板式震荡特征, 其年代际变化主要反映了热带大气环流年代际变化。SOI 指数(图 8g)近百年来两套资料比较一致, 1980 年代后长时间位于负距平, 近年来指数又有明显回升。

夏季各指数两套资料的相关性都整体低于冬季的。夏季风指数(图 9a)有明显的年代际变化, 值得注意的是 20CR 资料在 1950~1980 年间描绘的夏季风略低于 HadSLPv2, 而在 1980 年代后又略高, 因此从 20CR 资料不能很好地描绘 1970 年代末东亚夏季风的减弱(Wang, 2001)。这是可能是由于 20CR 资料不能很好地刻画出对流层中上层的年代际变冷引起的(宋丰飞和周天军, 2012)。夏季 NAO 指数近百年来经历了两正两负的四个年代际

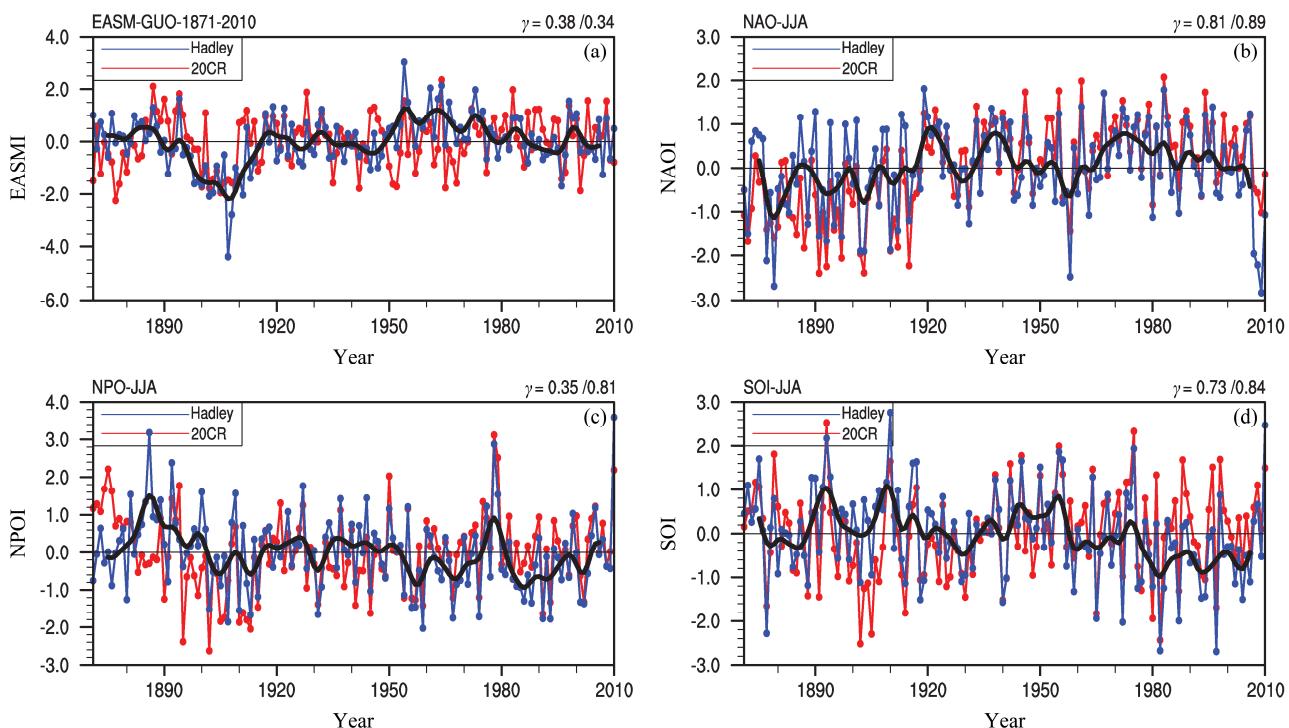


图 9 20CR(红)和 HadSLP(蓝)所计算的 1871~2010 年夏季(a)EASMI、(b)NAOI、(c)NPOI 和(d)SOI4 种气候指数的原始序列和 HadSLP 资料的 9 年滤波序列(黑)。右上角分别为 1871~1920 年和 1921~2010 年两套资料原始序列指数的相关系数

Fig. 9 Time series of four summer climate indexes which are (a) EASMI, (b) NAOI, (c) NPOI, and (d) SOI during 1871–2010 derived from 20CR (red) and HadSLP (blue) data and the nine-year smoothing indexes for HadSLP data (black). The correlation coefficients of the original sequence indexes for 1871–1920 and 1921–2010 respectively are at the upper right corner

的变化(图9b)。1871~1920年和1940~1960年处于负距平,而1920~1940年和1960~2000年处于正距平。根据Greatbatch and Rong(2006)的研究,1960年之后持续较高的正距平仅是夏季NAO内部低频振荡特征引起的。但1990年代末期,SNAO指数有一个很明显的下降,这可能是导致地中海地区近些年干旱的原因之一,其突变的原因很可能与温室气体排放有关(Sun et al., 2008; Sun and Wang, 2012; Bladé et al., 2012)。夏季NPO和SOI指数(图9c、d)在1970年代末都出现一个急剧的下降趋势,此后长期处在负距平,近年来又有所回升。这可能与1970年代末北半球夏季大气环流的突变有关(Chang et al., 2000; Mantua and Hare, 2002)。同时注意到夏季SOI指数在1970年代之后,20CR资料的结果要高于HadSLP的结果,而夏季SOI指数又和南亚夏季风关系紧密,因此20CR资料描绘南亚夏季风的能力还有待考察。

## 6 结论与讨论

本文首先对比分析了欧亚地区20CR与NCEP2再分析资料的冬、春、夏、秋四季的气候平均态及其差异场,并将20CR的气温和降水资料插值到中国站点上与中国台站资料进行了对比。最后在百年尺度上与HadSLPv2资料进行指数对比,得出以下结论:

(1) 冬季时,相比NCEP2资料,20CR资料所刻画的极涡偏弱,东亚大槽偏弱偏西,海平面气压场上西伯利亚高压位置偏北,我国冬季风偏弱。夏季时,相比NCEP2资料,20CR资料描绘的南亚高压偏北,副高西伸点偏东且副高偏弱,伊朗高压略强且位置偏北。海平面气压场上亚洲低压更强,东北低涡较弱,夏季风偏强。欧亚地区20CR资料的SLP、H500、U200的四季气候平均态与NCEP2资料的相比,均呈现北部中高纬度系统性偏高,南部中低纬度偏系统性低的特点,这可能与20CR资料在极地海岸地区海冰资料处理时产生的差错有关。

(2) 与中国东部站点资料的比对显示,20CR再分析资料与我国站点资料存在一些差异。总体来说,对气温的刻画能力偏低,而对降水的刻画能力偏高,与站点气温的相关性好于与站点降水的相关性,东南沿海地区优于内陆地区。平均场和空间相关场结合来看,秋季气温和降水20CR与站点观测值吻合最好。注意到最近有作者发展了一些中国区域的高分辨率格点观测资料(Xu et al., 2009; 吴佳和高学杰,

2013),这些资料能更好地检验模式资料在中国地区的适用性,在未来的工作中将予以使用。

(3) 20CR资料较好地刻画近百年北半球冬、夏季的气候指数北极涛动、北大西洋涛动、北太平洋涛动、东亚冬季风、阿留申低压等的变率特征,很好地刻画了阿留申低压1970年代末的年代际增强,西伯利亚高压1970年代末的下降和1990年后的上升趋势,及北太平洋涛动、北大西洋涛动和北极涛动指数1970年代末期由负位相到正位相的年代际转变和1990年代的变化,但不能再现1970年代末东亚夏季风的减弱。

## 参考文献(References)

- Allan R, Ansell T. 2006. A new globally complete monthly historical mean sea level pressure data set (HadSLP2): 1850–2004 [J]. *J. Climate*, 19: 5816–5842.
- Bengtsson L, Hodges K, Hagemann S. 2004. Sensitivity of the ERA-40 reanalysis to the observing system: Determination of the global atmospheric circulation from reduced observations [J]. *Tellus*, 56A: 456–471.
- Bladé I, Liebmann B, Fortuny D, et al. 2012. Observed and simulated impacts of the summer NAO in Europe: Implications for projected drying in the Mediterranean region [J]. *Climate Dyn.*, 39: 709–727.
- Bromwich D, Fogt R. 2004. Strong trends in skill of the ERA-40 and NCEP/NCAR reanalyses in the high and midlatitudes of the Southern Hemisphere, 1958–2001 [J]. *J. Climate*, 17: 4603–4619.
- Chang C P, Zhang Y S, Li T. 2000. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part I: Roles of the subtropical ridge [J]. *J. Climate*, 13 (24): 4310–4325.
- Cohen J, Foster J, Barlow M, et al. 2010. Winter 2009–2010: A case study of an extreme Arctic Oscillation event [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37 (17), doi: 10.1029/2010GL044256.
- Compo G P, Whitaker J S, Sardeshmukh P D, et al. 2011. The twentieth century reanalysis project [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137 (654): 1–28.
- Delworth T L, Dixon K W. 2000. Implications of the recent trend in the Arctic/North Atlantic Oscillation for the North Atlantic thermohaline circulation [J]. *J. Climate*, 13 (21): 3721–3727.
- 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.
- Fan K, Liu H. 2013. Evaluation of atmospheric circulation in the Southern Hemisphere in 20CRv2 [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 6 (5): 337–342.
- Ferguson C R, Villarini G. 2012. Detecting inhomogeneities in the twentieth century reanalysis over the central United States [J]. *J. Geophys. Res.*, 117 (D5): doi:10.1029/2011JD016988.
- Greatbatch R J, Rong P P. 2006. Discrepancies between different Northern Hemisphere summer atmospheric data products [J]. *J. Climate*, 19 (7): 1261–1273.

- 郭其蕴. 1983. 东亚夏季风强度指数及其变化的分析 [J]. 地理学报, 38 (3): 207–217. Guo Qiyun. 1983. The summer monsoon intensity index in East Asia and its variation [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 38 (3): 207–217.
- 郭其蕴. 1994. 东亚冬季风的变化与中国气温异常的关系 [J]. 应用气象学报, 5 (2): 218–225. Guo Qiyun. 1994. Relationship between the variation of East Asian winter monsoon and temperature anomalies in China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 5 (2): 218–225.
- Hodges K I, Hoskins B J, Boyle J, et al. 2003. A comparison of recent reanalysis datasets using objective feature tracking: Storm tracks and tropical easterly waves [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 131: 2012–2037.
- 琚建华, 任菊章, 吕俊梅. 2004. 北极涛动年代际变化对东亚北部冬季气温增暖的影响 [J]. 高原气象, 2 (4): 429–434. Ju Jianhua, Ren Juzhang, Lü Junmei. 2004. Effect of interdecadal variation of arctic oscillation on temperature increasing in north of East Asian winter [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 23 (4): 429–434.
- Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al. 2002. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83: 1631–1643.
- Krueger O, Schenk F, Feser F, et al. 2012. Inconsistencies between long-term trends in storminess derived from the 20CR reanalysis and observations [J]. *J. Climate*, 26: 868–874.
- Liu J, Curry J A, Wang H, et al. 2012. Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109 (11): 4074–4079.
- Mantua N J, Hare S R. 2002. The Pacific decadal oscillation [J]. *J. Oceanography*, 58 (1): 35–44.
- Marshall G J. 2002. Trends in Antarctic geopotential height and temperature: A comparison between radiosonde and NCEP/NCAR reanalysis data [J]. *J. Climate*, 15: 659–674.
- Marshall G J. 2003. Trends in the Southern Annular Mode from observations and reanalysis [J]. *J. Climate*, 16: 4134–4143.
- Panagiotopoulos F, Shahgedanova M, Hannachi A, et al. 2005. Observed trends and teleconnections of the Siberian high: A recently declining center of action [J]. *J. Climate*, 18 (9): 1411–1422.
- Rodionov S N, Bond N A, Overland J E. 2007. The Aleutian low, storm tracks, and winter climate variability in the Bering Sea [J]. *Deep Sea Res. Part II*, 54 (23): 2560–2577.
- Seager R, Kushnir Y, Nakamura J, et al. 2010. Northern Hemisphere winter snow anomalies: ENSO, NAO and the winter of 2009/10 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37 (14), doi:10.1029/2010GL043830.
- 宋丰飞, 周天军. 2012. 20CR 再分析资料在东亚夏季风区的质量评估 [J]. 大气科学, 36 (6): 1207–1222. Song Fengfei, Zhou Tianjun. 2012. Reliability of the 20CR reanalysis data in measuring the East Asian summer monsoon variability [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36 (6): 1207–1222.
- Sun J Q, Wang H J. 2012. Changes of the connection between the summer North Atlantic Oscillation and the East Asian summer rainfall [J]. *J. Geophys. Res.*, 117 (D8), doi:10.1029/2012JD017482.
- 孙建奇, 王会军. 2005. 北极涛动与太平洋年代际振荡的关系 [J]. 科学通报, 50 (15): 1648–1653. Sun Jianqi, Wang Huijun. 2005. Relationship between Arctic oscillation and Pacific decadal oscillation on decadal timescale [J]. *Chinese Science Bulletin*, 51 (1): 75–79.
- Sun J Q, Wang H, Yuan W. 2008. Decadal variations of the relationship between the summer North Atlantic Oscillation and middle East Asian air temperature [J]. *J. Geophys. Res.*, 113 (D15), doi: 10.1029/2007JD009626.
- Trenberth K E. 1990. Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 71 (7): 988–993.
- Trenberth K E, Hurrell J. 1994. Decadal atmosphere–ocean variations in the Pacific [J]. *Climate Dyn.*, 9 (6): 303–319.
- Wang H J. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 18 (3): 376–386.
- Wang H J. 2002. The instability of the East Asian summer monsoon–ENSO relations [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 19 (1): 1–11.
- Wang H J, He S P. 2012. Weakening relationship between East Asian winter monsoon and ENSO after mid-1970s [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 57 (27): 3535–3540.
- Wang L, Chen W, Huang R H. 2007. Changes in the variability of North Pacific Oscillation around 1975/1976 and its relationship with East Asian winter climate [J]. *J. Geophys. Res.*, 112 (D11), doi:10.1029/2006JD008054.
- Wu B Y, Su J Z, Zhang R H. 2011. Effects of autumn–winter Arctic sea ice on winter Siberian high [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 56 (30): 3220–3228.
- 吴佳, 高学杰. 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比 [J]. 地球物理学报, 56 (4): 1102–1111. Wu Jia, Gao Xuejie. 2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56 (4): 1102–1111.
- Wu R G, Kinter J L, Kirtman B P. 2005. Discrepancy of interdecadal changes in the Asian region among the NCEP–NCAR reanalysis, objective analyses, and observations [J]. *J. Climate*, 18: 3048–3067.
- 徐影, 丁一汇. 2001. 美国 NCEP/NCAR 近 50 年全球再分析资料在我国气候变化研究中可信度的初步分析 [J]. 应用气象学报, 12 (3): 337–347. Xu Ying, Ding Yihui. 2001. Confidence analysis of NCEP /NCAR 50-year global reanalyzed data in climate change research in China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 12 (3): 337–347.
- Xu Y, Gao X J, Shen Y, et al. 2009. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 26 (4): 763–772.
- Yang S, Lau K, Kim K. 2002. Variations of the East Asian jet stream and Asian–Pacific–American winter climate anomalies [J]. *J. Climate*, 15: 306–325.
- Yuan W, Sun J Q. 2009. Enhancement of the summer North Atlantic Oscillation influence on Northern Hemisphere air temperature [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 26(6): 1209–1214.
- 赵南, 王启祐. 2010. 一个观察北极涛动与北大西洋涛动关系的典型案例 [J]. 气象学报, 68: 847–854. Zhao Nan, Wang Qiyi. 2010. A typical case for observation of the relationship between the Arctic Oscillation and the North Atlantic Oscillation [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 68: 847–854.
- 赵天保, 符淙斌. 2009. 应用探空观测资料评估几类再分析资料在中国区域的适用性 [J]. 大气科学, 33 (3): 634–648. Zhao Tianbao, Fu Congbin. 2009. Applicability evaluation for several reanalysis datasets using the upper-air observations over China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 33 (3): 634–648.