

李建平, 李艳杰, 冯娟. 2011. 与西澳州西南部冬季降水相联系的大气环流特征分析 [J]. 大气科学, 35 (5): 801–817. Li Jianping, LI Yanjie, Feng Juan. 2011. The characteristics of atmospheric circulation associated with austral winter rainfall in southwest Western Australia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (5): 801–817.

与西澳州西南部冬季降水相联系的大气环流特征分析

李建平¹ 李艳杰^{1,2} 冯娟^{1,3}

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

摘 要 西澳大利亚州西南部 (SWWA) 是西澳大利亚州首府 Perth 的所在地, 也是西澳州政治、经济、文化、教育和旅游的中心。自 20 世纪中期以来, SWWA 地区雨季降水持续减少。本文利用近 60 年的观测及再分析数据, 分析了已知的影响澳大利亚降水的热带海洋模态: 厄尔尼诺—南方涛动 (ENSO)、印度洋偶极子 (IOD) 和 ENSO Modoki (EM) 对 SWWA 地区降水的影响, 发现它们均不能解释 SWWA 地区前冬 (5~7 月) (全文季节均指南半球) 和后冬 (8~10 月) 降水的长期变化趋势。特别地澄清了南半球环状模 (SAM) 对 SWWA 地区冬季降水的影响, 揭示了前人所指出的两者之间的显著关系是由于极端事件造成的。这表明, 已知的影响澳大利亚降水的气候模态并不能解释 SWWA 地区冬季降水的长期变化趋势。通过对 SWWA 地区降水、大尺度大气环流的动力、热力结构和季节循环特征的分析, 发现其表现出类似季风环流的特征, 也即干湿季节的交替出现、风向的季节性反转和明显的海陆热力差异。基于此提出了 SWWA 地区类季风环流 (SWAC) 的概念, 并分析了其与 SWWA 地区冬季降水之间的关系, 指出 SWAC 环流的减弱是 SWWA 地区降水减少的可能原因。

关键词 西澳州西南部类季风环流 季风 厄尔尼诺—南方涛动 降水 南半球环状模 印度洋偶极子

文章编号 1006-9895 (2011) 05-0801-17

中图分类号 P434

文献标识码 A

The Characteristics of Atmospheric Circulation Associated with Austral Winter Rainfall in Southwest Western Australia

LI Jianping¹, LI Yanjie^{1,2}, and FENG Juan^{1,3}

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

Abstract Southwest Western Australia (SWWA) locates in the southwest corner of Western Australia. Its capital, Perth, is not only the political, economic, cultural, educational, and tourism center of Western Australia, but also the wine region and wheat belt of Western Australia. The observed rainy season precipitation over SWWA has significantly declined since the 1950s. The reduction in austral winter rainfall resulted in an even sharper fall in the stream flow in southwestern Australia and heavily impacted the water resources in the state. Based on the observation data and reanalysis datasets in recent 6 decades, the variability and circulation features influencing the SWWA

收稿日期 2010-10-08, 2011-01-25 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2010CB950400, 国家自然科学基金资助项目 41030961

作者简介 李建平, 男, 1969 年出生, 博士, 研究员, 主要从事气候动力学与可预报性、季风、环状模动力学及其影响等方面的研究。
E-mail: ljp@lasg.iap.ac.cn

austral winter rainfall (SWR) are investigated. The impacts of the known modes, which may have impacts on the Australian rainfall, El Niño-Southern Oscillation (ENSO), Indian Ocean Dipole (IOD), ENSO Modoki (EM), and Southern Hemisphere Annular Mode (SAM) on the SWR are analyzed. It is found that they all cannot explain the long term rainfall variation of the SWR in neither early (May to July, MJJ) nor late (August to October, ASO) austral winter. Particularly, the reported significant inverse relationship between the SAM and SWR is caused by an extreme year. Based on the investigation on rainfall distribution over SWWA, seasonal march of the circulation features, dynamical and thermal structures of the atmospheric circulation, and thermal contrast between land and sea over wider southwest Australia, the authors find that the circulation over SWWA shows strong seasonality, and exhibits monsoonal characteristics, that is, alternate wet and dry seasons, seasonal reversal of prevailing winds, and an evident land-sea thermal contrast. Taking account of these monsoonal characteristics, the authors propose the concept of monsoon-like southwest Australian circulation (SWAC), and discuss the relationship between the SWAC and the SWR. The result indicates that the variability of SWAC contributes to the variation of SWR, whose weakening is a possible reason for the SWR decreasing.

Key words monsoon-like Australian circulation, monsoon, ENSO, precipitation, Southern Hemisphere Annular Mode, Indian Ocean dipole

1 引言

伴随着 20 世纪下半叶的持续增暖, 全球陆地大部分地区存在着干旱化的趋势, 非洲大陆 (Katz, 1978)、欧亚大陆 (Lloyd-Hughes and Saunders, 2002)、俄罗斯远东 (Rodwell and Hoskins, 1996)、中国华北 (张庆云和陈烈庭, 1991; 张庆云, 1999; 陆日宇, 2002; 吴志伟等, 2006; 黄刚, 2006; Ding et al., 2007)、北美 (Diaz, 1983) 以及澳大利亚大陆的东北部 (Li et al., 2011)、西南部 (IOCI, 2002) 都是干旱化显著的地区。自 20 世纪 70 年代以来, 热带和副热带地区的干旱更频繁、更持久、更严重, 影响范围也不断扩大。因此, 对于干旱的现状分析、成因探讨以及未来趋势预测成了许多研究的焦点问题。

澳大利亚西南部 (SWWA) [(30°S, 115°E) 和 (35°S, 120°E) 连线的西南部 (如图 6 所示)] 雨季出现在冬季 (5~10 月, 文中的季节均以南半球为准), 其降水在过去七百年一直较为稳定, 年际变化不超过年降水总量的 10%, 而在近 50 年其降水持续减少, 雨季降水总量减少了将近 20%, 降水的减少导致内陆地表径流量减少了近 50% (IOCI, 2002)。而降水的减少正好处于全球变暖的大背景之下, 因此 SWWA 地区是全球气候变化的一个缩影。深入研究 SWWA 地区的干旱现状、成因及未来趋势, 不仅有利于进一步认识 SWWA 地区的气候, 为相关的政府决策提供科学指导, 而且更为重要的是将有助于我们更加深入理解全球变化对于区

域气候的影响, 为其它相似地区的气候变化研究提供参考和帮助。

对于影响 SWWA 地区降水的环流系统, 前人已经做了许多研究。Pittock and Allan (1990) 的研究指出 SWWA 地区的降水主要是受大尺度大气—海洋环流型的共同影响, 而不只是局地海岸的 Leeuwin 海流的影响。SWWA 地区冬季的环流型主要包括高纬度的冷空气爆发, 源于印度洋和南大洋的低压系统, 以及由于持续的副热带高压所伴随的相对比较干的状态 (Simmonds and Richter, 2000), 这些环流型直接影响着 SWWA 地区盛行风的方向和强度变化 (Sturman and Tapper, 1996)。IOCI (2002) 指出 SWWA 地区降水的季节变化与 SWWA 地区行星风系的季节变化密切相关。同时, England et al. (2006) 的研究则指出 SWWA 地区的冬季降水减少是与大尺度环流的变化相联系的。综合以上, 可以看到 SWWA 地区的降水变化是与大尺度环流型的变化紧密联系在一起的。

另一方面, 南半球中高纬最主要的天气气候变率模态为南半球环状模 (SAM) (Gong and Wang, 1999; Thompson and Wallace, 2000), 它也是南半球中高纬大气环流变动的一个很好的指示因子。自 20 世纪 60 年代后期开始, SAM 表现出很强的上升趋势 (Marshall, 2003; Visbeck, 2009)。鉴于此, SAM 的变化对区域降水的影响受到了广泛的关注。有研究指出 SWWA 地区降水的减少与 SAM 的长期上升趋势有关 (Ansell et al., 2000; Cai and Watterson, 2002; Meneghini et al., 2007)。然而,

Hendon et al. (2007) 的研究则指出 SAM 并不能影响 SWWA 地区冬季降水的变化。以上结果表明: SAM 的变化能否影响 SWWA 地区的冬季降水, 仍然存在争议。

其他已知的影响澳大利亚降水的气候模态, 如厄尔尼诺—南方涛动 (ENSO)、印度洋偶极子 (IOD) 和 ENSO Modoki (EM) (Ashok et al., 2007) 也有可能影响 SWWA 地区的降水变化。例如, SWWA 在 20 世纪 70 年代前冬降水的减少伴随着相似的大气气压的突然增加和南方涛动指数 (SOI) 的减小 (Allan and Haylock, 1993), 但是并没有工作细致讨论 ENSO 与 SWWA 前冬降水之间的关系。同时, Ashok et al. (2003) 指出 IOD 与澳大利亚西部的降水间存在显著的负相关关系, 但是其研究季节是 IOD 的成熟期 (6~9 月), 而非 SWWA 地区降水变化最显著的季节。另外, Eng-land et al. (2006) 指出的 IOD 与 SWWA 降水之间的反位相关系是基于年平均降水的结果而不是冬季。相似的, Weng et al. (2007) 指出 EM 主要发生在 20 世纪 70 年代后期, 虽然研究了 EM 对于澳大利亚冬季和夏季降水和温度的影响, 但是关注的区域主要在北部, 澳大利亚南部基本没有涉及。以上表明, 已知的一些气候模态 (如 IOD、ENSO 和 EM) 是否可以影响 SWWA 地区冬季降水变化缺少完整、细致的讨论。那么, 这些已知的影响澳大利亚降水的气候模态是否对 SWWA 地区冬季降水的变化有一定贡献?

本文的主要目的在于讨论已知的主要影响澳大利亚降水、气候变化的气候模态是否可以影响 SWWA 地区的降水变化。如果不能, SWWA 地区的降水变化与怎样的环流系统相联系, 此环流系统又表现出怎样的特征? 与 SWWA 地区的冬季降水之间存在怎样的联系?

2 资料和方法

本文使用的数据包括: NCEP/NCAR 再分析数据集 (Kalnay et al., 1996), 水平分辨率为 2.5° (纬度) $\times 2.5^\circ$ (经度); 降水数据为由澳大利亚气象局所提供的水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的格点资料; 海温资料为 NOAA 提供的水平分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$ 的逐月海表温度 (IERSST) (Smith and Reynolds, 2004)。为了验证结果的可靠性, 利用 ERA-40 再

分析资料 (Uppala et al., 2005) 对基于 NCEP/NCAR 的结果进行了对比分析。考虑到 NCEP/NCAR 和 ERA-40 两种资料的长度, 选取 1961~2000 时段的 40 年作为气候平均态。选取 Niño3 区的海温异常作为 ENSO 事件的表征指数。印度洋偶极子指数 (IODI) 和 EM 指数 (EMI) 的计算分别参照 Saji et al. (1999) 和 Ashok et al. (2007) 的定义。

SAM 指数 (SAMI) 选用 40°S 和 70°S 标准化的纬向平均逐月海平面气压 (SLP) 之差 (Nan and Li, 2003)。为了验证结果的可信度, 分别引入了 20°S 以南 SLP 经验正交函数 (EOF) 分解所对应的第一时间序列定义的 SAM 指数 (简称 SAMI_EOF), 以及两组基于观测站点数据得到的 SAM 指数: SAMI_M (时段为 1957~2006) (Marshall, 2003) 与 SAMI_V (时段为 1948~2005) (Visbeck, 2009), 对结果做进一步的检验。文中所使用的 SAMI 与 SAMI_EOF 之间相关系数为 0.96 (1948~2006 年), 表明不同的 SAM 指数定义不会影响本文的结论。另外, 两组基于站点的 SAM 指数与文中使用的 SAMI 的相关系数分别为 0.79 (SAMI 与 SAMI_M, 1957~2006 年) 和 0.67 (SAMI 与 SAMI_V, 1948~2005 年), 均通过了 0.001 的显著性水平检验, 表明基于文中使用的 SAMI 得到的结果是合理可信的。

季风指数采用 Li and Zeng (2002, 2003)、李建平和曾庆存 (2005) 所定义的动态标准化季节变率指数。对于给定的高度层和格点位置 (i, j) , 对于第 n 年的第 m 月, 其具体形式如下:

$$\delta_{nm}(i, j) = \frac{\| \mathbf{V}_1(i, j) - \mathbf{V}_{nm}(i, j) \|}{\| \mathbf{V}(i, j) \|} - 2,$$

其中, $\mathbf{V}_1(i, j)$ (单位: m/s) 是 1 月气候平均的风矢量 (1968 年到 1996 年的平均, 作为参考态), $\mathbf{V}_{nm}(i, j)$ (单位: m/s) 是第 n 年的第 m 月格点 (i, j) 上的月平均风矢量。 $\mathbf{V}(i, j)$ (单位: m/s) 是格点位置 (i, j) 上的 1 月和 7 月气候平均 (1968 年到 1996 年的平均) 风矢量的平均。量 A 的范数:

$$\| A \| = \left(\iint_S | A |^2 dS \right)^{1/2},$$

式中, S 代表所计算的区域。实际计算中用 5 点公式计算范数的近似值, 即在点 (i, j)

$$\| A_{i,j} \| \approx \Delta s [(| A_{i-1,j}^2 | + 4 | A_{i,j}^2 | + | A_{i+1,j}^2 |) \cdot$$

$\cos\varphi_j + |A_{i,j-1}^2| \cos\varphi_{j-1} + |A_{i,j+1}^2| \cos\varphi_{j+1} \big]^{1/2}$,
其中, φ_j 是点 (i, j) 所在的纬度, $\Delta s = a \Delta\varphi \Delta\lambda / 4$, a 是地球平均半径, $\Delta\varphi$ 和 $\Delta\lambda$ 分别代表经向、纬向方向上的分辨率, 单位是弧度。得到了逐点 (i, j) 上的 $\delta_{nm}(i, j)$ 的值, 则第 n 年 第 m 月的季风指数 (I_{nm}) 可以通过对指定季风区域做平均得到: $I_{nm} = \{(\delta_{nm}(i, j)), \{\cdot\}$ 表示在特定高度层对季风区域的 $\delta_{nm}(i, j)$ 做平均。

使用的主要统计方法有: 相关分析、合成分析和线性回归。另外, 为了进一步确定 SAM 和 SWWA 冬季降水之间的关系, 采用了 21 年滑动相关的方法。在讨论年代际变化的时候, 采用高斯 7 点滤波, 低通部分作为年代际变化的分量而高通部分认为是年际变化分量。考虑到滤波会影响序列的自由度和显著性检验, 采用 Davis (1976) 所提出的有效自由度检验的方法对有效自由度 (N) 进行了订正, 具体方法如下:

$$N = M/T,$$
$$T = \sum_{\tau=0}^K C_{xx}(\tau) C_{yy}(\tau),$$

其中, $C_{xx}(\tau)$ 和 $C_{yy}(\tau)$ 分别为序列 $x_i (i = 1, 2, \dots, M)$ 和 $y_i (i = 1, 2, \dots, M)$ 滞后尺度为 τ 时的自相关系数。 K 对应的最大整数为 $M/2$ 。

3 热带海洋模态对于 SWWA 地区降水的影响

鉴于 SWWA 地区降水的变化特征, 其前冬降水显著减少 (线性趋势为 -1.08 mm/a), 而后冬降水则略有增加 (线性趋势为 0.04 mm/a)。为了较为细致的分析 ENSO、IOD 和 EM 对于 SWWA 地区降水的影响, 将整个冬半年分为: 前冬 (5~7

月) 和后冬 (8~10 月)。另外, 考虑到 1979 年之后分析数据中才引入了卫星观测, 而之前已有研究指出 1979 年之前南半球再分析资料的可靠性较差 (Kistler et al., 2001)。在分析中将整个研究时段以 1979 年为界划分为两段讨论。

3.1 ENSO 与 SWWA 地区降水的关系

图 1 给出了强、弱 Niño3 指数年所对应的澳大利亚降水的异常分布, 可以看到, ENSO 对于澳大利亚前冬降水的影响较小。对于 SWWA 地区来说, 仅有很小区域表现为显著的负异常。相对于前冬, ENSO 对于澳大利亚后冬降水的影响较明显, 但是显著影响区域主要集中在澳大利亚的东部, 并不是西部。对于时段 1979~2006 年, ENSO 对 SWWA 地区后冬降水存在显著的影响。同时, 如果取区域平均的 SWWA 地区的降水序列与 Niño3 指数求相关 (见表 1), 可以看到两者除了在整个时段 (1948~2006 年) 的前冬和子时段 (1979~2006 年) 的后冬存在显著负相关以外, 在别的季节和时段并无显著联系。这说明 ENSO 对于 SWWA 地区前冬和后冬降水的影响是有限的, 并不能解释 SWWA 地区降水的长期变化趋势。

3.2 IOD 与 SWWA 地区降水的关系

图 2 给出了 IOD 异常所对应的澳大利亚前冬和后冬降水异常的空间分布。可以看到, IOD 对于澳大利亚前冬降水的影响较小, 影响主要集中在后冬。1979 年之前, IOD 对于澳大利亚后冬降水的影响主要集中在中部和东南部, 表现为显著的负异常; 1979 年之后, 显著负异常区域略有东移, 并且对 SWWA 地区的降水也表现出显著的影响。区域平均的 SWWA 地区降水序列与 IODI 的相关分析表明 (表 1), 发现两者在 1979 年之后的后冬表现

表 1 澳大利亚西南部地区 (SWWA) 降水序列 (SWR) 与南半球环状模指数 (SAMI)、Niño3 指数、印度洋偶极子指数 (IODI) 和 ENSO Modoki 指数 (EMI) 之间的相关系数

Table 1 Correlations between raw (detrended) time series of the southwest Western Australian (SWWA) rainfall and various indices in early and late winter seasons, respectively. The significant correlations at the 0.05 level are marked in bold

	1948~2006 年降水序列		1948~1978 年降水序列		1979~2006 年降水序列	
	5~7 月	8~10 月	5~7 月	8~10 月	5~7 月	8~10 月
Niño 3 指数	-0.28 (-0.24)	-0.20(-0.21)	-0.20(-0.12)	-0.10(-0.14)	-0.27(-0.29)	-0.41 (-0.42)
IODI	-0.06(-0.11)	-0.17(-0.17)	-0.09(-0.05)	0.01(-0.07)	-0.16(-0.18)	-0.59 (-0.61)
EMI	-0.02(-0.06)	-0.21(-0.21)	0.01(-0.07)	-0.08(-0.18)	-0.14(-0.12)	-0.45 (-0.53)
SAMI	-0.36 (-0.25)	-0.18(-0.22)	-0.26(-0.16)	-0.34(-0.39)	-0.28(-0.25)	0.13(0.09)

注: 括号里的数字表示去掉了线性趋势之后的相关系数; 黑体表示通过了 0.05 显著性检验。

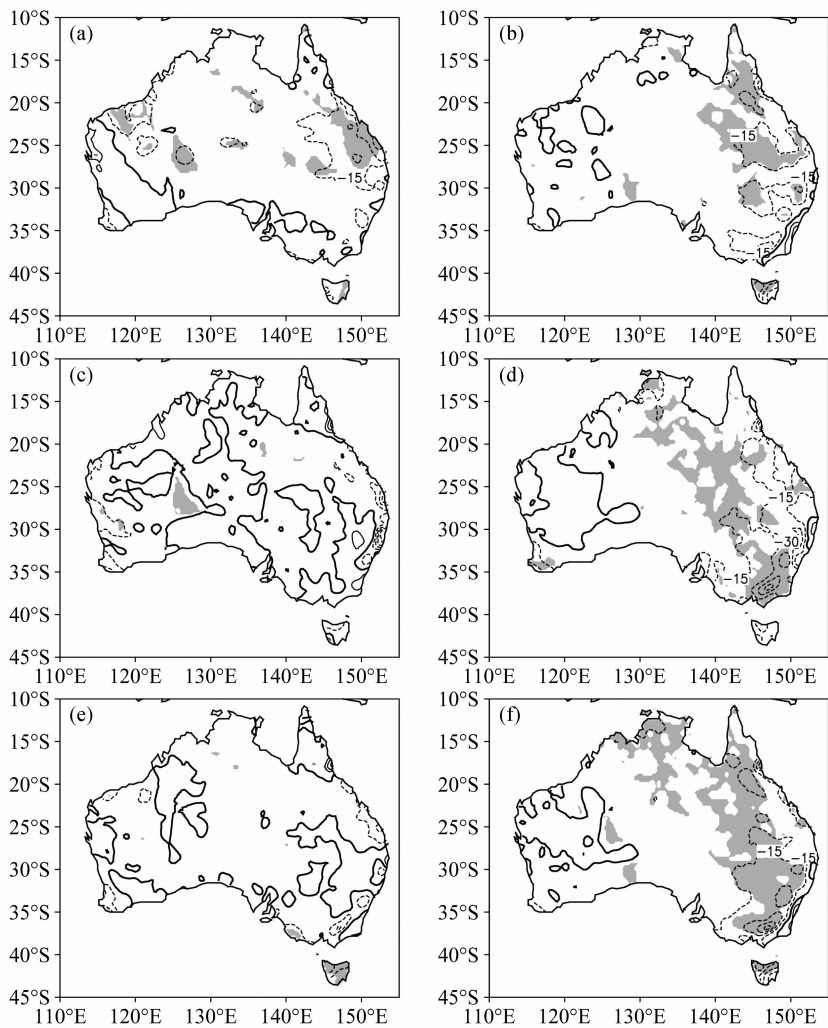


图 1 强、弱 Niño3 指数年所对应的澳大利亚 (a、c、e) 前冬 (5~7 月) 和 (b、d、f) 后冬 (8~10 月) 降水在各时段的合成差 (单位: mm/月); (a、b) 1948~1978 年; (c、d) 1979~2006 年; (e、f) 1948~2006 年。阴影表示通过 0.05 显著性检验的区域

Fig. 1 The composite differences of the rainfall distribution in Australia between the high and low Niño 3 index years during (a, c, e) early winter and (b, d, f) late winter (units; mm/month): (a, b) 1948 - 1978; (c, d) 1979 - 2006; (e, f) 1948 - 2006. The shaded areas indicate the differences are significant at the 0.05 level

出显著的负相关,而在别的季节和时段并无显著联系。这表明,IOD 对于 SWWA 地区冬半年降水的影响主要表现在 1979 年之后的后冬,而对于前冬无论是在哪个时段均没有显著影响,因此 IOD 并不能解释 SWWA 地区降水的长期变化趋势。

3.3 EM 与 SWWA 地区降水的关系

Ashok et al. (2007) 研究表明,EM 是热带太平洋 SST 独立于 ENSO 的主要模态。在典型的 El Niño Modoki 年,不同于 El Niño 年,在中太平洋为异常的暖海温,而西太平洋和东太平洋则为异常的冷海温。与此相联系,形成了两个异常的 Walk-

er 环流,上升支均位于中太平洋,而下沉支则分别位于东太平洋和西太平洋。EM 事件可以影响太平洋沿岸国家的气候异常。

图 3 分别给出了正、负 EM 年所对应的澳大利亚前冬和后冬降水的异常分布。前冬,EM 的影响主要在东澳;而后冬,1979 年之前 EM 可以影响除了西南部之外澳大利亚的大部分区域;1979 年之后,影响则主要集中在澳大利亚东部,SWWA 的部分区域表现出显著的负异常。从表 1 可以看到,EMI 和 SWWA 降水仅在 1979~2006 年时段的后冬显著相关。也即 EM 对于 SWWA 地区降水的影响

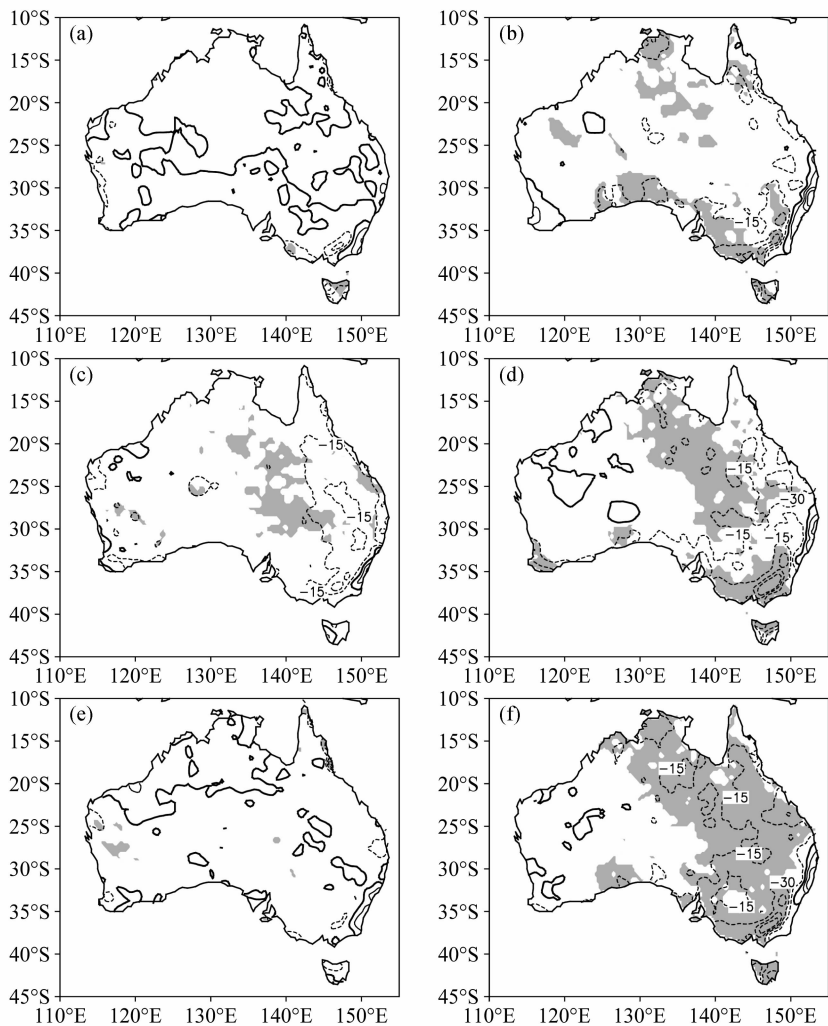


图 2 同图 1, 但为印度洋偶极子指数 (IODI) 异常所对应的澳大利亚降水的异常分布

Fig. 2 As in Fig. 1, but for the composite differences between the high and low Indian Ocean dipole index (IODI) years

响主要表现在 1979 年之后的后冬, 而对于前冬则没有显著影响。

以上结果表明, ENSO、IOD 和 EM 对于 SWWA 地区前冬和后冬降水的影响基本上表现在后冬, 并且主要集中在 1979 年之后。因此, 无论是 ENSO、IOD, 还是 EM 均不能解释 SWWA 地区降水的长期变率。另一方面, SWWA 地区的前冬与后冬降水间有很大不同, 尤其是后冬降水在 1979 年之后同时受 ENSO、IOD 和 EM 的影响; 而它们对 SWWA 地区的前冬降水却没有显著影响。这在一定程度上说明, 对于 SWWA 地区而言, 影响前冬和后冬降水的因子是不尽相同的, 特别是在 1979 年之后; 同时也表明, SWWA 地区的后冬降水较前冬降水来说更为复杂, 受多个系统的共同影响。

4 SAM 与 SWWA 地区降水的关系

从表 1 可以看到, 在 1948~2006 年, SAM 与 SWWA 降水最强的联系出现在前冬, 相关系数为 -0.36 。之前的研究大多集中在 6~8 月, 为了和前人的结果可以相互比较, 同时我们发现 6~8 月也是 SAM 和 SWWA 降水在各个季节中相关性最强的时段。因此, 此节中将选取冬季 (6~8 月) 进行讨论。

图 4a 给出了 SAMI 和 SWWA 降水在 6~8 月的标准化时间序列, 它们之间的相关系数为 -0.41 , 表明近几十年 SWWA 地区冬季降水的减少伴随着 SAM 的增强。为了检验 SAM 和 SWWA 冬季降水之间的关系是否稳定, 对其做 21 年滑动

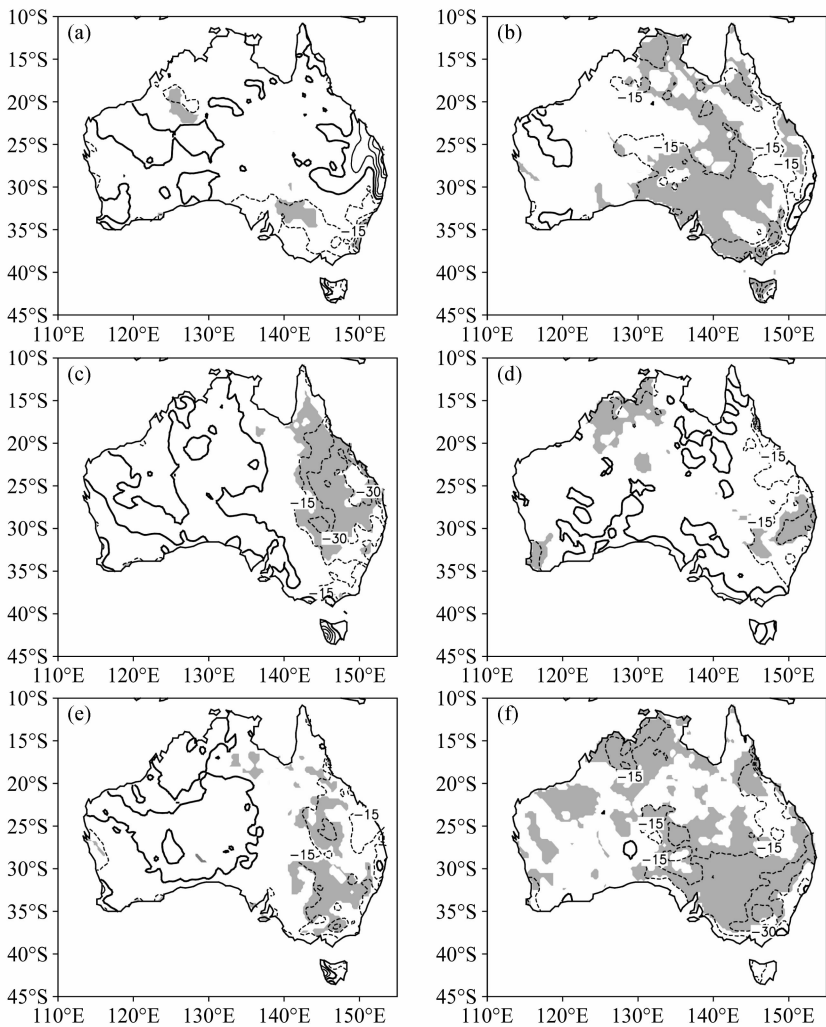


图3 同图1，但为 ENSO Modoki index (EMI) 异常所对应的澳大利亚降水的异常分布
Fig. 3 As in Fig. 1, but for the composite differences between the high and low ENSO Modoki index (EMI) years

相关(图4b)。可以看到SAM和SWWA冬季降水在1975年(21年滑动相关的中间年)之前基本表现为显著的负相关,但是在1975年时两者的关系突然减弱,不再显著。

为了分析SAM和SWWA冬季降水之间关系减弱的可能原因,图5给出了两者的散点图分布。可以看到,SAM正、负位相对SWWA地区冬季降水的影响是不对称的。当SAM处于负位相的时候,两者表现出显著的反相关关系,相关系数为 -0.48 ,通过了 0.05 的显著性检验;相反的,当SAM处于正位相的时候,两者间不存在显著联系,相关系数仅为 -0.02 。另外,图5的左上角存在一个极值事件(对应着1964年)。在这一年中,SAMI的值为 -4.69 (相当于SAMI平均标准差的 -3

倍);而对应的这一年SWWA地区的冬季降水为 540 mm (气候平均的SWWA地区的冬季降水为 300 mm ,即1964年的降水相当于气候平均的 1.8 倍)。表明在1964年,SAM与SWWA地区冬季降水表现出了完全相反的对对应关系,对应着近60年来最湿的冬季和最弱的SAM(图4a)。扣除1964年之后,在SAM负位相时,两者的相关系数仅为 -0.18 (不再显著)。这表明SAM和SWWA冬季降水在SAM负位相间的显著负相关关系是由于极端年——1964年所造成的。

进一步,我们将整个分析时段以1964年为界,分为两段:在时段1948~1964年,SAMI与SWWA冬季降水间的相关系数为 -0.50 ;然而在时段1948~1963年中,仅为 -0.11 ;相似的,在时段

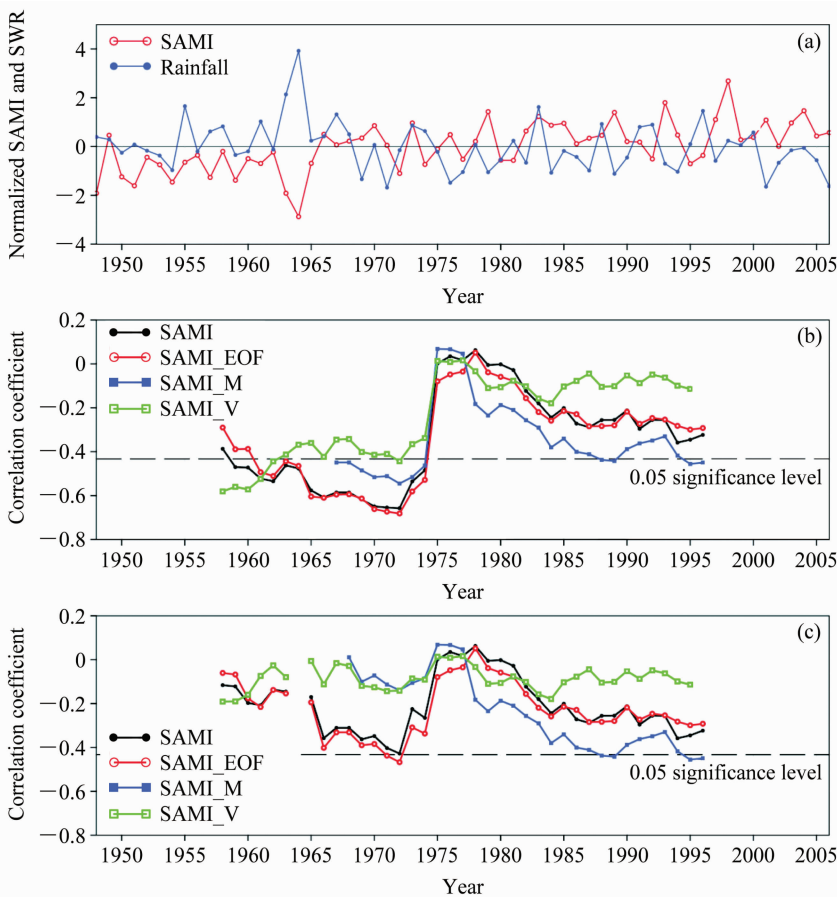


图 4 (a)南半球环状模指数 (SAMI) 与 SWWA 冬季 (6~8 月) 降水 (SWR) 的标准化时间序列; (b) 21 年滑动相关结果 (SWR 分别与 SAMI、SAMI_EOF、SAMI_M、SAMI_V); (c) 同 b 图, 但为扣除了 1964 年的结果

Fig. 4 (a) Normalized time series of the winter Southern Hemisphere Annular Mode (SAM) index (SAMI) and SWWA winter (June – August) rainfall (SWR); (b) times series of correlation coefficients using a 21-year sliding window between the SWR and each of winter SAMI, SAMI_EOF, SAMI_M, and SAMI_V; (c) as in (b), but excluding the extreme year 1964

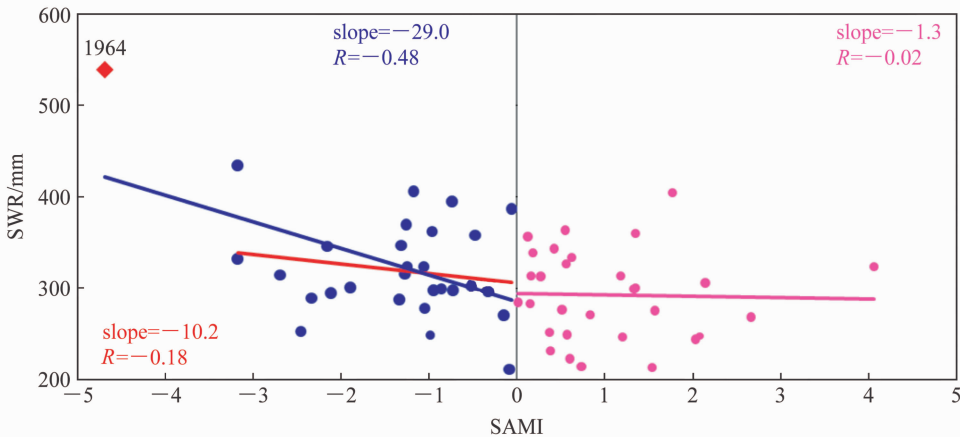


图 5 SAMI 与 SWR 的散点分布。红、紫线: 利用最小二乘拟合的负、正 SAM 位相时 SAM 指数与 SWR 的线性关系; R 和 slope: 对应的系数和相关系数; 左上角的红点: 极端年——1964 年; 红线: 没有包括 1964 年极端事件的拟合线; 蓝线: 包括 1964 年极端事件的拟合线

Fig. 5 Scatter plot of the winter SAMI against SWR. Red and purple lines are linear fittings for data of negative and positive SAM phases, respectively, for which the correlation (R) and regression (slope) coefficients are shown. For the negative SAM phase, the red outlier (minimum SAMI in 1964) is not included in the linear fitting shown by the red line, but is included in the linear fit for the negative SAM phase (blue line)

表 2 SAMI、SAMI_EOF、SAMI_V、SAMI_M 与 SWR 在 JJA 时段的相关系数以及 1964 年的协方差占对应时段总协方差的比率 (括号内)

Table 2 Simultaneous correlation coefficients and the ratio of covariance in 1964 to the total covariance in the corresponding period (in parentheses) between the SWR and each of the SAMI, SAMI_EOF, SAMI_M, and SAMI_V

	—1964 年	—1963 年	1964 年—	1965 年—	整个研究时段
SAMI & SWR	−0.50 (83%)	−0.11	−0.44 (73%)	−0.17	−0.41 (47%)
SAMI_EOF & SWR	−0.39(92%)	−0.02	−0.44 (70%)	−0.19	−0.39 (43%)
SAMI_V & SWR	−0.65 (73%)	−0.30	−0.28(87%)	−0.04	−0.28 (68%)
SAMI_M & SWR	−0.71(90%)	0.08	−0.46 (73%)	−0.17	−0.45 (64%)

注：(1) “一年”：表示从开始到此年并包括此年的时段；“年—”：表示从此年到结束并包括此年的时段；(2) 黑体表示通过 0.05 显著性检验。

1964~2006 年中，两者的相关系数为−0.43，而在 1965~2006 年时段中，则为−0.16（表 2）。以上结果表明，SAM 和 SWWA 冬季降水之间的显著关系是由于极端年 1964 所造成的。其次，从 1964 年两者的协方差贡献（表 2）可以看到，1964 年 SAM 和 SWWA 冬季降水的协方差贡献在两个子时段 1948~1964 年和 1964~2006 年中均超过了 70%，而对于整个时段来说，也几乎占到了一半左右（47%）。这进一步证明了 1964 年对于 SAM 和 SWWA 冬季降水间关系的巨大贡献。

另外，不同的 SAM 指数与 SWWA 地区降水的关系在去除了极端年 1964 之后，同样不再显著（表 2）。这说明基于 NCEP/NCAR 再分析资料的结果与观测资料得到的结果是一致的。至此，SAM 和 SWWA 降水之间的关系在 1975 年发生突然减弱的原因显而易见，当采用 21 年滑动相关的时候，中间年 1975 正好对应着时段 1965~1985 年，也即是第一个 1964 年被排除在相关时段之外所对应的时间。为了验证这个结论，我们给出了去掉 1964 年的 21 年滑动相关结果（见图 4c）。可以看到，SAMI 和 SWWA 冬季降水之间的关系在整个时段基本没有通过 0.05 的显著性检验，表明 SAM 和 SWWA 地区冬季降水之间的显著关系是由于极端年——1964 年所造成的。同时，SAMI_M、SAMI_V 与 SWWA 冬季降水之间的关系与基于 NCEP/NCAR 再分析资料得到的结果完全吻合（图 4b、c），说明 SAM 和 SWWA 降水关系是由 1964 年所支配的结论可以被观测数据进一步证实。

排除了 1964 年的 SAMI 与 SWWA 冬季降水的空间相关分布（见图 6）。对于时段 1948~1964 年和 1964~2006 年，SAM 和 SWWA 地区冬季降水表现出相似的显著相关特征（图 6a、b）；但是在

扣除了 1964 年之后，对于时段 1948~1963 年与 1965~2006 年，显著的统计相关区域全部消失（图 6c、d）。进一步表明，SAM 和 SWWA 冬季降水之间的显著统计相关性是由于极端年——1964 年所主导的。

上述讨论表明，SAM 对于 SWWA 区域的降水不存在显著影响。那么，SWWA 地区的冬季降水变化与怎样的环流异常相联系？图 7 给出了用 SWWA 冬季降水回归的 SLP 场的异常分布。在 1948~1964 年时段中，从澳大利亚西南向东延伸到 150°E 的广大区域均表现为显著的负异常，而在 50°S 以南的高纬度则为显著的正异常（120°E~150°E），代表负的 SAM 位相，表明在包含极端事件 1964 年的时候，SWWA 地区冬季降水与 SAM 之间存在负相关关系。然而，在扣除了 1964 年之后（图 7c），位于中纬度的负 SLP 异常显著减弱，范围也有所缩小；同时，处于高纬度的显著 SLP 正异常则基本消失。对于时段 1964~2006 年和 1965~2006 年，可以得到相似的结果。表明去除了 1964 年之后，SWWA 冬季降水与 SAM 之间没有显著的联系。但是对比包括和不包括 1964 年极端年的结果，可以发现 SWWA 冬季降水始终与中纬度经向范围 100°E~145°E 内的 SLP 异常相联系。表明 SWWA 地区冬季降水的变化可能更多地与临近南印度洋与澳大利亚的环流系统相联系（Feng et al., 2010）。

以上分析表明，SAM 对于 SWWA 冬季降水变率并没有显著影响。前人研究中指出的 SAM 和 SWWA 地区冬季降水的反位相关系是由于极端年——1964 所造成的。当移除 1964 年的影响后，SAM 和 SWWA 冬季降水之间的关系不再显著。表明 SAM 并不能解释 SWWA 地区冬季降水的变化。同时也表明 SWWA 冬季降水异常更多的与澳

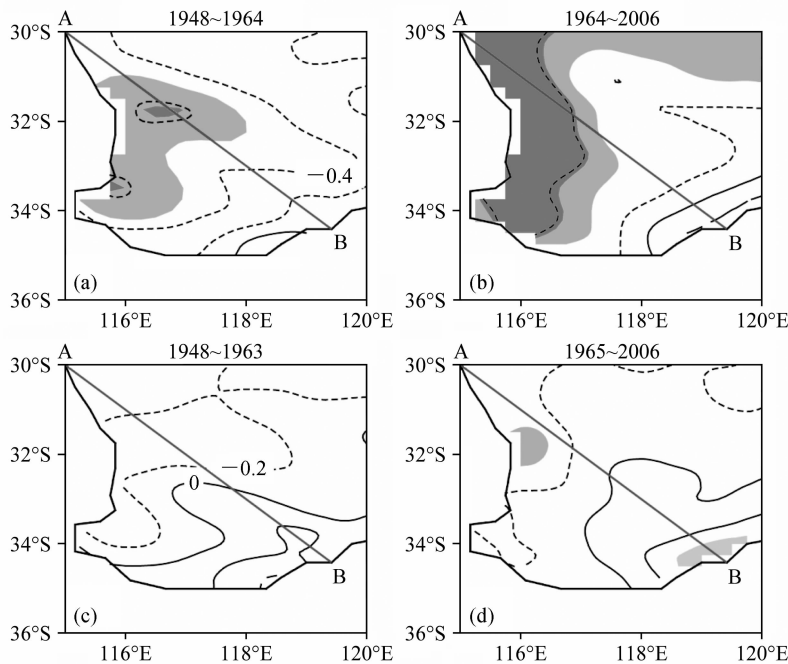


图 6 SAMI 与 SWR 相关的空间分布: (a) 1948~1964 年; (b) 1964~2006 年; (c) 1948~1963 年; (d) 1965~2006 年。阴影为通过 0.05 显著性检验的区域; 线段 AB 的西南部表示 SWWA 区域

Fig. 6 The spatial distribution of the correlation between the winter SAMI and SWR during (a) 1948 – 1964, (b) 1964 – 2006, (c) 1948 – 1963, and (d) 1965 – 2006. The shaded areas indicate significant at the 0.05 level. The SWWA area lies southwest of line AB

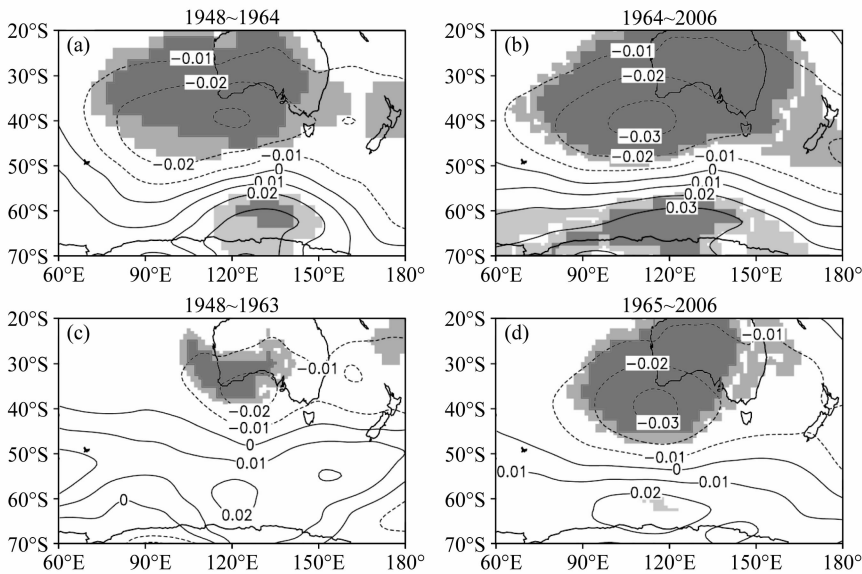


图 7 同图 6, 但为 SWR 回归的 SLP 场的分布 (单位: Pa)

Fig. 7 As in Fig. 6, but for the regression patterns of simultaneous SLP with respect to SWR (units: Pa)

大利亚及其邻近印度洋的区域环流的变化相联系。

5 SWWA 地区环流的特征分析

从以上讨论可以看到, 已知的可能影响澳大利

亚降水的气候模态 (ENSO、IOD、EM 和 SAM) 均不能解释 SWWA 地区冬季降水的长期变化趋势, 而 SWWA 地区的冬季降水更多地与区域环流的变化相联系。那么, 此环流具有怎样的特殊性, 表现

出怎样的特征？事实上，李建平和曾庆存（2005）的研究中早已指出，SWWA 地区处于副热带季风的影响之下，那么 SWWA 区域的环流是否表现出季风环流的特征，有怎样的特殊性？

SWWA 处于中纬度地区，气候主要受由季节推进所引起的副热带高压由北到南的位置移动所影响。在夏季，副热带高压向南移动，并于 1 月或者 2 月到达最南端位置。秋季的时候，副热带高压则逐渐向北移动并于冬季到达最北端，基本上位于 SWWA 以北（Gentilli, 1972）。SWWA 的降水表现出很强的季节性，大部分降水出现在冬季，而夏季降水则很少（IOCI, 2002）。因此，以下将分别从干、湿季节的交替出现、风向的季节性反转和显著的海陆热力差异三个方面来论证影响 SWWA 地区降水的类季风环流——西南澳类季风环流（monsoon-like southwest Australian circulation, SWAC）的存在性。

5.1 干湿季节对比

图 8 给出了澳大利亚大陆冬半年降水占全年总降水量的比率。可以看到对于 SWWA 地区来说，冬半年的降水可以占到全年降水的 70% 以上，对于某些沿海区域，甚至可以达到 80% 以上（Wright, 1997），也即西澳州西南部与北澳热带季风区一样，降水表现出强的季节依赖性。图 9 给出了 SWWA 地区降水的逐月分布，可以看到 SWWA 地区的降水主要集中在 5~10 月。从 5 月开始，降水量突然增加，于 7 月达到最大值，之后逐渐减少，到了 10 月，降水又低于年平均值。从降水距平的空间分布可以看到，冬季的时候（图 10b），25°S 以北为负距平，最大值位于 SWWA 地区，而最小值位于澳大利亚北部沿岸。从南向北，SWWA 地区的降水迅速减少，降水异常的“0”线在西澳州呈西北—东南走向，基本平行于 SWWA 地区的分界线；夏季的情形与冬季正好相反（图 10a）。以上分析表明：SWWA 区域的降水呈现出明显的季节性。SWWA 区域干湿季节的交替出现是西南澳类季风环流 SWAC 存在的第一个必不可少的要素。

5.2 风向的季节性反转

图 11 给出了气候平均下的 1 月和 7 月 925 hPa 的环流形势。可以看到，SWWA 区域 1 月和 7 月风向的变化可以超过 120°，而其邻近海域的 1 月和 7 月的风向变化也大于 90°。1 月的时候（夏季，图

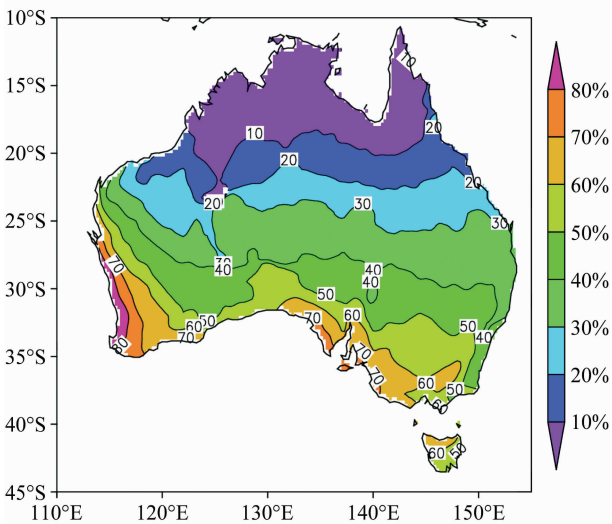


图 8 澳大利亚冬半年（5~10 月）的降水总量占全年总降水量的比率
Fig. 8 The percentage of the winter half year (May to Oct) rainfall to the mean annual rainfall

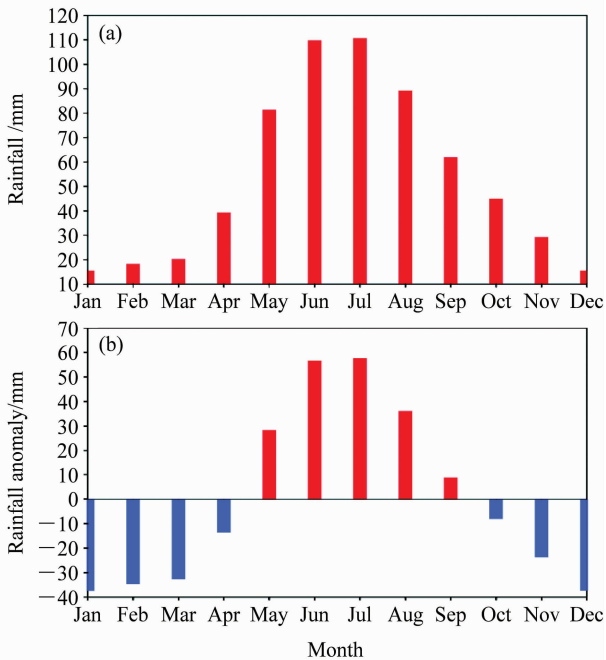


图 9 1948~2006 年平均的 SWWA 地区的逐月降水序列（单位：mm）：（a）原始序列；（b）减去年平均的距平序列
Fig. 9 Seasonal variation of (a) rainfall over SWWA averaged from 1948 to 2006 and (b) its departure from the annual mean

11a)，存在一个以（32°S，85°E）为中心的反气旋性环流，整个 SWWA 区域为东南风控制，SWWA 区域的副高脊线位于 35°S 以南；而 7 月（冬季，图 11b）的时候，则表现为相反的环流形势。副高脊

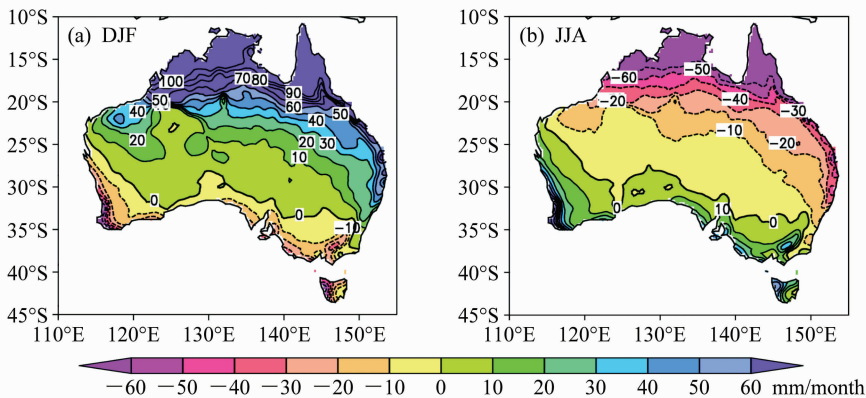


图 10 澳大利亚 (a) 夏季和 (b) 冬季降水距平的空间分布 (夏季/冬季平均降水减去年平均降水) (单位: mm/月)
Fig. 10 The climatology rainfall departure in Australia for (a) summer (DJF) and (b) winter (summer/winter rainfall minus the annual mean rainfall)

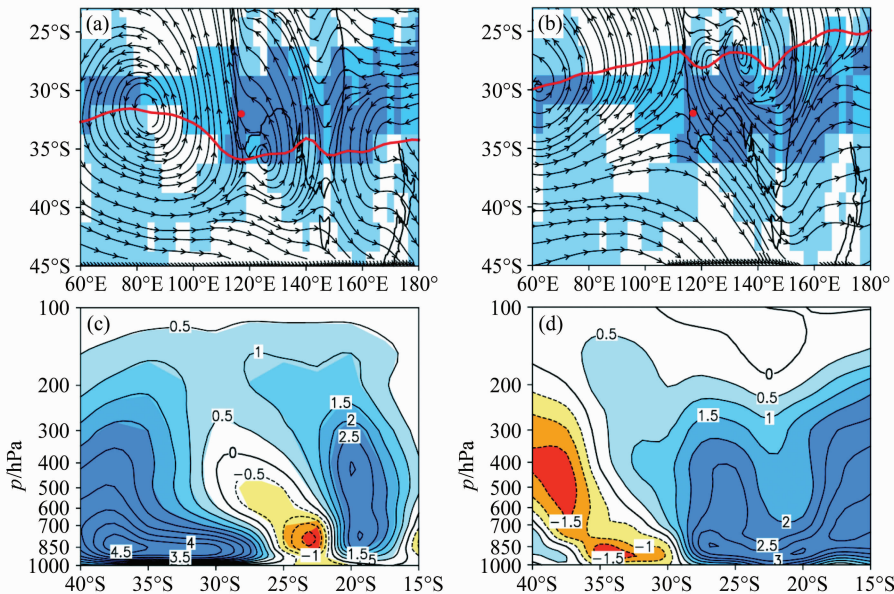


图 11 澳大利亚地区气候平均的 (a) 1 月和 (b) 7 月对流层中层 (925 hPa) 的水平环流 (红线: 副高脊线所在的位置; 红点: 西澳州首府 Perth 所在地; 阴影: 1 月和 7 月的风向变化至少超过 90° 的区域); 气候平均的 (c) 1 月和 (d) 7 月垂直速度的纬度—高度剖面 (纬向平均范围为 112.5°E~117.5°E)
Fig. 11 The climatology stream lines at 925 hPa for (a) Jan and (b) Jul in Australia (red lines; the ridge lines of the subtropical high; red dot; the location of Perth; shadings; areas with the wind directions at least shifting 90° from Jan to Jul); latitude-pressure cross sections of the vertical velocity (averaged over 112.5°E~117.5°E) for (c) Jan and (d) Jul

线北进到了 30°S 以北, 相伴随的 SWWA 地区盛行西北风。伴随着季节推进, SWWA 地区的垂直环流也表现出很明显的反转, 1 月的时候 SWWA 地区为强的下沉运动 (图 11c), 而 7 月则为上升 (图 11d)。

为了更清晰地观察 SWWA 区域环流的季节循环特征, 给出了 SWWA 区域平均的纬向风、经向风、垂直速度、纬向水汽输送、气温和对流层高低

层纬向风垂直切变的年循环 (图 12)。图 12 表明两套再分析资料的结果基本是一致的。很明显, 纬向风、经向风、垂直速度和纬向水汽输送在季节循环中均呈现出反向的变化特征。1 月的时候, SWWA 受东风、南风、强的下沉气流、高气温和弱的纬向风切变的影响, 表现为干、热的夏季; 而 7 月的时候, 由于高压系统的北移, SWWA 地区处于西风、北风、上升气流、低气温和强的垂直纬向风切变的

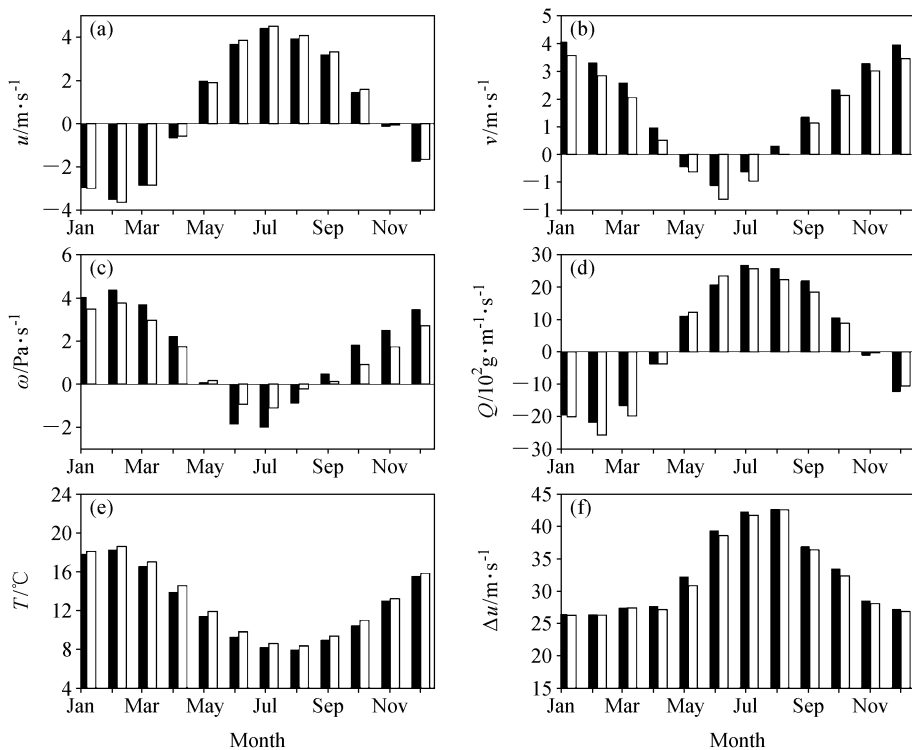


图 12 (35°S~30°S, 112.5°E~117.5°E) 区域平均的对流层低层 925 hPa (a) 纬向风、(b) 经向风、(c) 垂直速度、(d) 纬向的水汽输送、(e) 气温以及 (f) 对流层高 (200 hPa)、低 (925 hPa) 层纬向风垂直切变的年循环。黑、白直方图：ERA-40、NCEP-NCAR 的结果
Fig. 12 The annual cycles of (a) zonal wind, (b) meridional wind, (c) vertical velocity, (d) zonal vapor transportation, and (e) air temperature at 925 hPa, and (f) the vertical shear of zonal wind between 200 hPa and 925 hPa averaged over region (35°S–30°S, 112.5°E–117.5°E). The filled and blank bars are based on ERA-40 and NCEP/NCAR reanalysis data, respectively

影响之下，迎来了凉爽而湿润的冬季。结合 SWWA 地区逐月降水的分布（图 9）和盛行风的变化（图 12a、b），可以发现 5 月降水的增加伴随着西风 and 北风的出现，也即从热带和南印度洋来的信号的出现伴随着 SWWA 雨季的来临。

以上分析表明，SWWA 地区的环流系统表现出很强的季节性。冬、夏季的环流表现出很明显的差别，随着季节推进，近地层的风向发生反转，对应着环流场的变化 SWWA 的冬、夏季表现出了截然相反的气候特征，这从另一个方面证实了西南澳类季风环流 SWAC 的存在性。

5.3 海陆热力差异

以上的分析表明 SWWA 区域的降水分布和环流特征均表现出很强的季节性。基于 SWWA 区域的大尺度环流变化，选择区域 (35°S~25°S, 70°E~130°E) 作为讨论地表温度 (SAT) 和海表温度 (SST) 及其差异季节特征的区域。从图 13 可以看到，区域平均的 SAT 表现出很强的季节变率：最

大值处于 1 月，可以超过 25℃；最小值处于 7 月大概为 12℃左右。相对于强的 SAT 季节变化，SST 的变化则较为稳定，振幅较小，分别于 2 月和 9 月达到最大值 21.9℃和最小值 16.9℃。海陆热力差异同样表现出很强的季节循环，夏季 (DJF) 的时候为正，但是小于 4℃。随着时间推移，差异减小，并于 4 月转为负值，于 6 月达到了最小值 -5.0℃。接着海陆热力差异逐渐增大，于 10 月转正，正好对应着 SWWA 区域雨季的结束时间。海陆热力差异之间的变化并不仅仅表现在量级上，而且也表现在温度梯度的方向上。1 月的时候，温度梯度指向海洋，伴随着东风；而在 7 月，温度梯度则指向陆地伴随着能带来降水的西风 (IOCI, 2002)。强的海陆热力差异及随着季节循环反转的海陆温度梯度是西南澳类季风环流 SWAC 存在的第三个证据。

综上所述，SWWA 地区的气候呈现出很强的季节变化，主要表现为干湿季节的交替出现、风向的季节性反转和强的海陆热力差异。这些特征类似

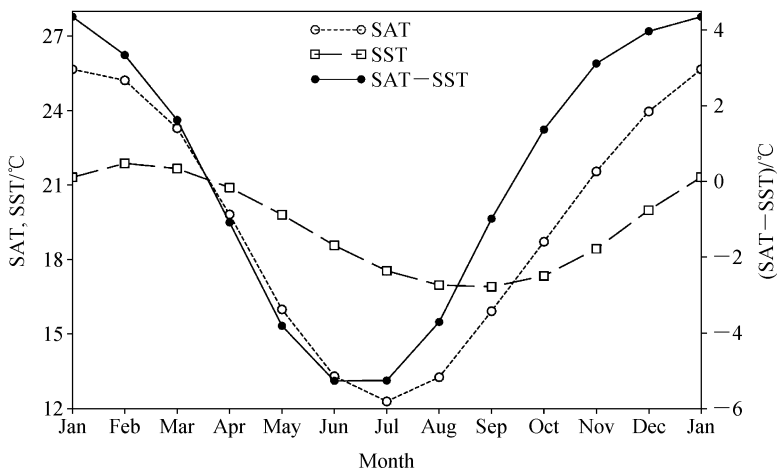


图 13 (35°S~25°S, 70°E~130°E) 区域平均的海表温度 (SST, 单位: °C)、地表温度 (SAT, 单位: °C) 及其差异 (SAT-SST) 的时间演化
Fig. 13 The time series of surface air temperature (SAT) and sea surface temperature (SST) and their difference (SAT-SST) averaged over region (35°S-25°S, 70°E-130°E)

于季风环流的特点(陶诗言和陈隆勋, 1957; Webster et al., 1998)。除了 SWWA 地区的雨季为冬季和不同的降水背景(热带季风区域主要表现为对流性降水而 SWWA 则不是)有别于经典的热带季风系统。以上的分析表明, SWWA 地区存在一个类似季风系统的大尺度环流系统 (SWAC), 因此利用季风的观点和概念和刻画此类季风环流 SWAC 的特征、变率和强度是合理的。

6 西南澳类季风环流与 SWWA 地区降水的关系

利用上述的季风指数定义, 根据以上讨论选取区域 (35°S~25°S, 100°E~145°E) 作为 SWAC 环流的计算区域, 则可以得到 SWAC 环流强度指数 (SWACI)。图 14 给出了 SWACI 与澳大利亚前冬和后冬降水相关的空间分布。图 14a、c 为年代际尺度上的结果, 图 14b、d 为年际尺度上的结果。在前冬的年际时间尺度上, SWWA 区域处于 SWAC 显著的影响下。除了 SWWA 地区以外, 澳大利亚的东南部以及塔斯马尼亚也处于显著相关下。这表明 SWAC 对于这些区域的前冬降水有正的影响。当 SWAC 强的时候, SWWA、澳大利亚东南部、塔斯马尼亚对应着多雨, 反之亦然。在年代际时间尺度上, SWWA 地区的降水与 SWAC 也表现为显著的正相关, 并且相比于年际尺度范围有所增强。而位于澳大利亚东南部、塔斯马尼亚的正相关显著区域则消失了。表明 SWWA 地区前冬降

水的年际、年代际变化均受 SWAC 的影响, 而 SWAC 只能影响澳大利亚东南部、塔斯马尼亚岛冬季降水的年际变化, 并不能影响这些地区冬季降水的年代际变化。后冬时, 年代际尺度的结果相比于年际尺度的结果, 除了澳大利亚东南部的显著相关区域消失以外, SWWA 地区的相关区域也大大减小。这从一定程度上表明, SWWA 地区后冬降水的年代际变化更为复杂, 受多个系统的共同影响。

7 小结和讨论

本文从 SWWA 地区冬季降水减少这一现象入手, 讨论了已知的影响澳大利亚降水的气候模态对 SWWA 地区雨季降水变化的影响。结果表明, ENSO、IOD、EM 和 SAM 均不能解释 SWWA 地区降水的变化。ENSO、IOD 和 EM 对于 SWWA 降水的影响主要表现在时段 1979~2006 年的后冬。这一方面可能与 1976/1977 年的热带大气海洋普遍存在的年代际变化有关, 另一方面, 也说明 SWWA 地区的前冬降水与后冬降水是有区别的, 后冬降水更加复杂, 同时受到多个系统影响的。

另外, 我们的结果表明前人研究中所指出的 SAM 与 SWWA 降水之间的反位相关关系主要反映了极端年——1964 年的作用。当扣除了 1964 极端年的影响之后, SAM 与 SWWA 冬季降水之间并不存在显著关系。这一结果被观测资料进一步证实。与此同时, Jones et al. (2009) 的研究表明 SAM 在 1964 年表现为半球尺度的信号, 并且指出这与前

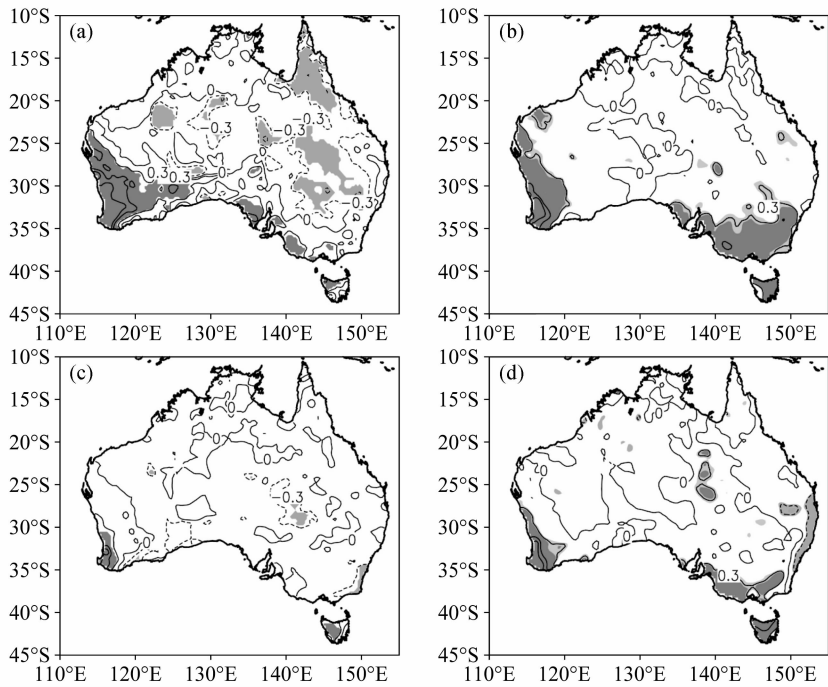


图 14 SWACI 与澳大利亚 (a、b) 前冬和 (c、d) 后冬降水在 (a、c) 年代际和 (b、d) 年际时间尺度上的相关分布。阴影表示通过 0.05 显著性检验的区域

Fig. 14 The correlation distribution between the SWAC index and Australian (a, b) early and (c, d) late winter rainfall on (a, c) interannual and (b, d) interdecadal time scales. The shaded areas indicate the correlation is significant at the 0.05 level

一年印度尼西亚阿贡火山的爆发有关 (Angell, 1988), 进一步说明了 1964 年的特殊性。

最后, 通过对澳大利亚西南区域的环流动力、热力特征, SWWA 区域降水分布以及邻近海域海陆热力差异的分析, 发现 SWWA 地区的环流表现出类似季风环流的特征, 即: 干湿季节的交替出现、盛行风向的季节性反转以及强的海陆热力差异。基于以上分析, 提出了西南澳类季风环流的概念, 并且指出了此环流的强弱与 SWWA 地区前冬、后冬降水的年际和年代际变化均有非常紧密的联系。这为研究 SWWA 地区气候和降水变化提供了一个新的视角, 同时也丰富了全球季风系统的概念。那么, 位于副热带地区的 SWAC 有哪些特征, 它有怎样的时空变率? 并且其与经典的副热带季风——东亚季风相比有何异同之处? 另外, 它与其它的影响澳大利亚降水变化的已知气候模态之间存在着怎样的联系和相互作用? 这些问题都值得进一步的深入研究, 将是下一步的工作。

参考文献 (References)

Allan R J, Haylock M R. 1993. Circulation features associated with

the winter rainfall decrease in southwestern Australia [J]. J. Climate, 6: 1356 – 1367.

Ansell T J, Reason C J C, Smith I N, et al. 2000. Evidence for decadal variability in southern Australian rainfall and relationships with regional pressure and sea surface temperature [J]. Int. J. Climatol., 20: 1113 – 1129.

Angell J K. 1988. Variations and trends in tropospheric and stratospheric global temperatures, 1958 – 87 [J]. J. Climate, 1: 1296 – 1313.

Ashok K, Guan Z Y, Yamagata T. 2003. Influence of the Indian Ocean dipole on the Australian winter rainfall [J]. Geophys. Res. Lett., 30 (15): 1821, doi: 10.1029/2003GL017926.

Ashok K, Behera S K, Rao S A, et al. 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection [J]. J. Geophys. Res., 112, C11007, doi: 10.1029/2006JC003798.

Cai W J, Watterson I G. 2002. Modes of interannual variability of the Southern Hemisphere circulation simulated by the CSIRO climate model [J]. J. Climate, 15: 1159 – 1174.

Davis R E. 1976. Predictability of sea surface temperature and sea level pressure anomalies over the North Pacific Ocean [J]. J. Phys. Oceanogr. 6: 249 – 266.

Diaz H F. 1983. Drought in the United States, some aspects of major dry and wet periods in the contiguous United States, 1895 – 1981 [J]. J. Climate Appl. Meteor., 22: 3 – 16.

Ding Y H, Ren G Y, Zhao Z C, et al. 2007. Detection, causes, and

- projection of climate change over China: An overview of recent progress [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 24 (6): 954–971.
- England M H, Ummenhofer C C, Santoso A. 2006. Interannual rainfall extremes over southwest Western Australia linked to Indian Ocean climate variability [J]. *J. Climate*, 19: 1948–1969.
- Feng J, Li J P, Li Y. 2010. A monsoon-like southwest Australian circulation and its relation with rainfall in southwest Western Australia [J]. *J. Climate*, 23: 1334–1353.
- Gentili J. 1972. *Australian Climate Patterns* [M]. Thomas Nelson, Melbourne, 285pp.
- Gong D Y, Wang S W. 1999. Definition of Antarctic oscillation index [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26 (4): 459–462.
- Hendon H H, Thompson D W J, Wheeler M C. 2007. Australian rainfall and surface temperature variations associated with the Southern Hemisphere annular mode [J]. *J. Climate*, 20: 2452–2467.
- 黄刚. 2006. 与华北干旱相关联的全球尺度气候变化现象 [J]. *气候与环境研究*, 11 (3): 270–279. Huang G. 2006. Global climate change phenomenon associated with the droughts in North China [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 11 (3): 270–279.
- Indian Ocean Climate Initiative (IOCI). 2002. *Climate variability and change in Southwest Western Australia* [R]. Perth, 34pp.
- Jones J M, Fogt R L, Widmann M, et al. 2009. Historical SAM variability. Part I: Century-length seasonal reconstructions [J]. *J. Climate*, 22: 5319–5345.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437–471.
- Katz R W. 1978. Persistence of subtropical African droughts [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 106: 1017–1021.
- Kistler R, Kalnay E, Collins W, et al. 2001. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82: 247–267.
- Li J P, Zeng Q C. 2002. A unified monsoon index [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (8): 1274, doi: 10.1029/2001GL013874.
- Li J P, Zeng Q C. 2003. A new monsoon index and the geographical distribution of the global monsoons [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 20: 299–302.
- 李建平, 曾庆存. 2005. 一个新的季风指数及其年际变化和与雨量的关系 [J]. *气候与环境研究*, 10 (3): 351–365. Li J P, Zeng Q C. 2005. A new monsoon index, its interannual variability and relation with monsoon precipitation [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 10 (3): 351–365.
- Li J P, Feng J, Li Y. 2011. A possible cause of decreasing summer rainfall in northeast Australia [J]. *Int. J. Climatol.* 31, doi: 10.1002/joc.2328
- Lloyd-Hughes B, Saunders M A. 2002. A drought climatology for Europe [J]. *Int. J. Climatol.*, 22: 1571–1592.
- 陆日宇. 2002. 华北汛期降水量变化中年代际和年际尺度的分离 [J]. *大气科学*, 26 (5): 611–624. Lu R Y. 2002. Separation of interannual and interdecadal variations of rainfall in North China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 26 (5): 611–624.
- Marshall G J. 2003. Trends in the Southern Annular Mode from observations and reanalyses [J]. *J. Climate*, 16: 4134–4143.
- Meneghini B, Simmonds I, Smith I N. 2007. Association between Australian rainfall and the Southern Annular Mode [J]. *Int. J. Climatol.*, 27: 109–121.
- Nan S L, Li J P. 2003. The relationship between summer precipitation in the Yangtze River valley and the boreal spring Southern Hemisphere annular mode [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30, 2266, doi: 10.1029/2003GL018381.
- Pittock A B, Allan R. 1990. The greenhouse effect: Regional implications for Western Australia, 1st Interim report 1989–1990 [R]. Environment Protection Authority Rep., 65pp.
- Rodwell M J, Hoskins B J. 1996. Monsoons and the dynamics of deserts [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 122B: 1385–1404.
- Saji N J, Goswami B N, Viayachandran P N, et al. 1999. A dipole mode in the tropical Indian Ocean [J]. *Nature*, 401: 360–363.
- Simmonds I, Richter T. 2000. Synoptic comparison of cold events in winter and summer in Melbourne and Perth [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 67: 19–32.
- Smith T M, Reynolds R W. 2004. Improved extended reconstruction of SST (1854–1997) [J]. *J. Climate*, 17: 2466–2477.
- Sturman A, Tapper N. 1996. *The Weather and Climate of Australia and New Zealand* [M]. Oxford University Press, 476pp.
- 陶诗言, 陈隆勋. 1957. 夏季亚洲大陆上空大气环流结构 [J]. *气象学报*, 28: 234–247. Tao S Y, Chen L X. 1957. The atmospheric circulation patterns over the Asian continent during the summer time [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 28: 234–247.
- Thompson D W J, Wallace J M. 2000. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability [J]. *J. Climate*, 13: 1000–1016.
- Uppala S M, Kallberg P W, Simmons A J, et al. 2005. The ERA-40 re-analysis [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131: 2961–3012.
- Visbeck M. 2009. A station-based southern annular mode index from 1884 to 2005 [J]. *J. Climate*, 22: 940–950.
- Webster P J, Magaña V O, Palmer T N, et al. 1998. Monsoons: processes, predictability, and the prospects for prediction [J]. *J. Climate*, 103: 14451–14510.
- Weng H Y, Ashok K, Behera S K, et al. 2007. Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific rim during boreal summer [J]. *Climate Dyn.*, 29: 113–129.
- Wright W J. 1997. Tropical–extratropical cloudbands and Australian rainfall: I. Climatology [J]. *Int. J. Climatol.*, 17: 807–829.
- 吴志伟, 江志红, 何金海. 2006. 近 50 年华南前汛期降水、江淮梅雨和华北雨季旱涝特征对比分析 [J]. *大气科学*, 30 (3): 391–401. Wu Z W, Jiang Z H, He J H. 2006. The comparison anal-

ysis of flood and drought features among the first flood period in South China, Meiyu period in the Yangtze River and the Huaihe River valleys and rainy season in North China in the last 50 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (3): 391–401.

张庆云, 陈烈庭. 1991. 近 30 年来中国气候的干湿变化 [J]. 大气科学, 15 (5): 72–81. Zhang Q Y, Chen L T. 1991. Variations of dryness and wetness in China during 1951–1980 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 15 (5): 72–81.

张庆云. 1999. 1880 年以来华北降水及水资源的变化 [J]. 高原气象, 18 (4): 486–495. Zhang Q Y. 1999. The variations of the precipitation and water resources in North China since 1880 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (4): 486–495.