



论文

1979~2004 年中国大陆南方地区春季降水的年代际变化特征及其与欧亚大陆积雪的联系

左志燕*, 张人禾, 武炳义

中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

* E-mail: zyzuo@cma.gov.cn

收稿日期: 2011-06-16; 接受日期: 2011-09-06

国家重点基础研究发展计划(编号: 2007CB411505)、国家自然科学基金项目(批准号: 40921003)和中国气象科学研究院基本科研业务费重点项目(编号: 2010Z001)

摘要 本文研究了中国南方春季降水在 1979~2004 年期间的年代际变化特征, 结果表明无论在年际还是在年代际时间尺度上, 中国南方东南和西南地区降水都具有反相变化的特征, 并分别呈现出显著的减少趋势和增加趋势. 中国南方春季降水在 20 世纪 80 年代末出现了一次明显的年代际气候转型. 东南地区的春季降水明显减少, 降水量在 80 年代末以后比 80 年代末之前减少了 30%; 而西南地区的春季降水则明显增加, 80 年代末之后的降水量是 80 年代末之前的两倍. 伴随着这次年代际转型, 欧亚大陆西伯利亚上空对流层中低层位势高度增强, 对流层低层中国东部北风增强, 造成中国东部西南风减弱, 使得降水在东南地区减少, 西南地区增多. 中国南方春季降水在 20 世纪 80 年代末出现的年代际气候转型与欧亚大陆春季积雪的年代际转型有密切联系. 从 20 世纪 80 年代末开始欧亚大陆春季积雪明显减少, 与欧亚大陆春季积雪变化所伴随的大气环流变化, 是造成春季我国东南地区降水减少和西南地区降水增多的一个重要原因.

关键词

中国南方春季降水
年代际变化
年代际转型
欧亚大陆积雪

虽然我国大部分地区的春季降水绝对值远小于夏季, 但是春季降水的多少对我国农业非常重要. 1880~2002 年, 中国东部降水表现出明显的干湿交替出现的年代际变化^[1]. 近 50 年来我国中东部春季降水有明显减少的趋势^[2]. 南方降水有明显的年际和年代际变化特征, 其变化与中高纬大气环流关系密切. 如华南前汛期降水与东北冷涡关系密切, 在东北冷涡偏强的年份往往对应着华南前汛期降水的增多^[3]. 我国华南春季降水与北极极涡关系也很密切, 20 世纪 90 年代中后期及末期极涡位置偏向太平洋和大西洋, 对应着华南降水出现偏多^[4]. 有研究表明我国春季降

水异常主要受到副热带系统和中高纬大气环流系统的影响^[5]. 当前期 3 月阿留申低压加强, 北半球西风减弱时, 华南 4, 5 月的降水明显增多^[6].

我国南方春季降水同时受到陆地表面和海表面热状况的影响. 当春季东亚大陆温度增加和周边海洋表面温度减少时, 青藏高原东侧低压以及西太平洋副热带高压加强, 我国江南春季降水减少, 江淮流域降水增加^[7]. 我国长江以南的春季降水的年际变化与太平洋海温有密切关系. 当春季处于厄尔尼诺盛期时, 华南有显著的降水正异常^[8,9]. 近年来 El Niño 事件时间尺度的增加和 La Niña 事件时间尺度的减少

英文引用格式: Zuo Z Y, Zhang R H, Wu B Y. Inter-decadal variations of springtime rainfall over southern China mainland for 1979–2004 and its relationship with Eurasian snow. *Sci China Earth Sci*, 2011, doi: 10.1007/s11430-011-4337-4

使得我国华南地区5月份降水减少^[10]. 而青藏高原前冬春积雪偏多有利于我国华南前汛期的降水^[11]. 当青藏高原东部前冬积雪偏多时, 对应着我国春季江南降水的增加^[12]. 青藏高原春季植被近20年的增加导致我国长江以南降水减少^[13]. 欧亚大陆冬-春积雪异常与我国南方春-夏降水有密切关系. 当冬-春季西伯利亚积雪偏多时, 往往对应着我国东南地区春季降水的减少和夏季降水的增多^[14,15]. 另外, 更多的研究揭示了欧亚大陆积雪对我国夏季降水的重要作用^[16,17]. 如前所述, 前人很多研究关注了影响我国春季降水的外强迫因子和环流特征, 然而这些研究对春季降水的年代际变化特征研究较少. 研究表明, 我国夏季气候具有显著的年代际变化特征^[18], 那么我国南方春季降水在年代际尺度上是如何变化的? 这是本文将要讨论的问题.

1 资料和方法

文中利用国家气象信息中心提供的1979~2004年的595个台站观测的降水资料. 积雪资料为美国国家雪冰中心提供的雪水当量资料^[19]. 雪水当量反映的为积雪总水量, 同时包含了雪盖和雪深信息, 能较全面的体现积雪的作用. 风场和位势高度场的资料为美国国家环境预报中心(NCEP)第一代的月平均再分析资料. 文中采用了一元线性回归、相关、合成分析和奇异值分解(SVD)等统计方法.

2 中国南方春季降水的年代际变化

为了分析中国春季降水的年代际变化特征, 图1给出了根据595个台站观测降水值计算出的1979~2004年期间春季降水变化趋势. 从图1(a)可以看到, 中国东南地区、黄河流域、华北及东北大部分地区的春季降水有减少的趋势, 而长江流域、西南地区和青藏高原的降水增多. 另外还可看到, 春季降水变化趋势明显的区域主要位于我国长江以南地区, 而长江以南地区的降水长期变化趋势存在东、西反相的特征, 即东南地区的春季降水显著减少, 而西南地区的春季降水增加. 图1(b)给出了春季降水趋势变化显著性水平超过0.05(F检验)的站点分布图. 很明显, 变化趋势显著的地区主要位于长江以南地区. 其中西南地区和青藏高原中东部部分地区的春季降水显

著增加, 而东南地区春季降水显著减少, 长江以南春季降水的东、西反位相变化趋势很明显. 我们将东南地区(107.5°~120°E, 20°~27.5°N, 图1(b)中红色矩形区域)和西南地区(95°~102.5°E, 20°~30°N, 图1(b)中的蓝色矩形区域)春季降水趋势通过0.05信度检验的站点分别进行平均, 来表征东南和西南地区具有显著年代际变化的春季降水.

图2给出了两个地区的春季标准化降水的时间演变图. 可以看到, 东南和西南地区的降水变化基本相反, 两者的相关系数为-0.43, 显著性水平超过了0.05. 两个区域的春季降水除了具有明显的年际反相变化特征外, 还分别呈现出明显的减少趋势和增加趋势. 鉴于东南和西南地区的春季降水负相关关系显著, 且两者存在相反的变化趋势, 我们进一步将东南地区的标准化春季降水减去西南地区的标准化春

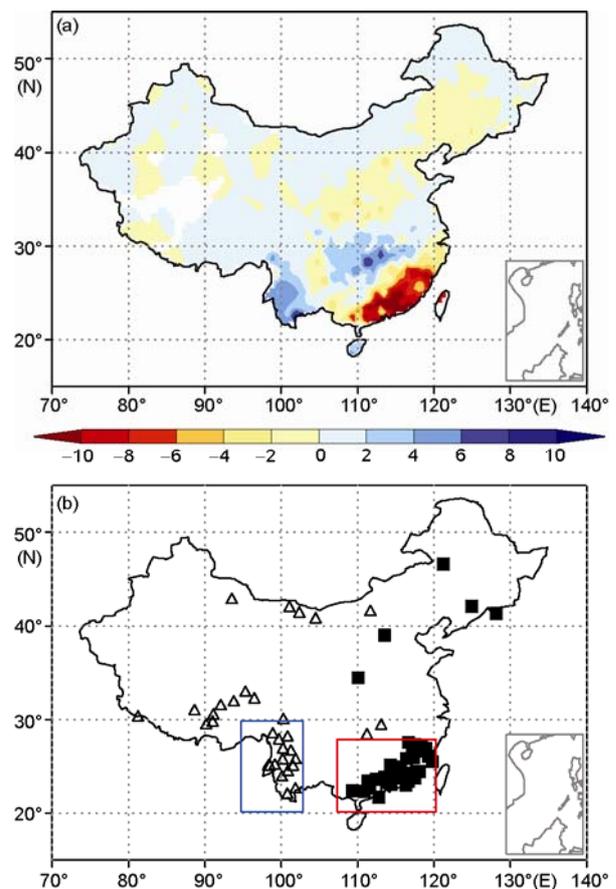


图1 1979~2004年期间春季中国降水的趋势图(a)和趋势变化显著性水平超过0.05的站点分布图(b)

黑色实心方块表示降水显著减少, 空心三角形表示降水显著增加

季降水作为南方春季降水指数, 来考察中国南方春季降水的年代际变化特征.

图 3 给出了标准化的中国南方春季降水指数随时间的演变曲线. 可以看到, 虽然南方春季降水指数有明显的年际变化特征, 但其在 20 世纪 80 年代末期开始从正异常变为负异常, 发生的年代际转型非常明显. 在 1979~1989 年期间, 除在 1985 年表现为负异常外, 中国南方春季降水指数在其他年份皆为正异常; 而在 1990~2004 年期间, 降水指数除在 1992 有较强的正异常及在 1993 和 1997 年有弱的正异常外, 其余 12 年皆表现为明显的负异常. 说明中国南方春季降水指数在 20 世纪 80 年代末期的年代际转型非常明显, 也即东南地区的春季降水显著减少和西南地区的春季降水显著增多. 张人禾等^[20]发现我国东部夏季降水在 20 世纪 80 年代末发生了一次年代际转型, 多雨带从长江中下游流域南移到我国长江以南地区, 这里的分析表明中国南方春季降水也在 80 年代末发生了年代际转型.

图 4 给出了 1990~2004 年与 1979~1989 年的春

季降水合成差值图. 可以看到, 两个时段春季降水合成差值通过信度检验的区域主要位于中国长江流域以南的东南和西南地区. 其中东南地区的春季降水在这两个时段的差值最大, 基本都在 100 mm 以上. 1979~2004 期间, 东南沿岸地区(105°E 以东, 30°N 以南)平均的春季累计降水量为 587.9 mm, 其降水量基本与夏季降水的量级相当, 在 1979~1989 年期间平均降水量为 677.3 mm, 而 1990~2004 年期间平均降水量减少为 487.6 mm, 两个时段降水差值达到 189.7 mm. 在西南地区(95°~105°E, 30°N 以南), 1979~1989 年期间平均降水量为 122.4 mm, 而 1990~2004 年期间平均降水量为 248.7 mm, 后 15 年的平均降水量比前 11 年增加了 126.3 mm, 基本上与西南地区 1979~2004 年期间平均的春季累计降水量(153 mm)量级相当. 可见虽然与东南地区相比较, 西南地区的春季降水在这两个时段的差值较小, 但是由于其绝对降水量相对较少, 其合成差值非常显著(显著性水平通过了 0.05). 总而言之, 与 1979~1989 年时段相比, 1990~2004 年期间中国东南地区的春季降水明显

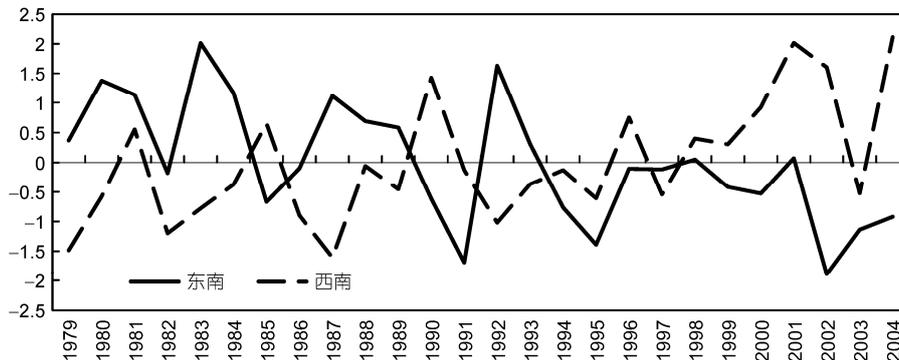


图 2 中国东南地区和西南地区的标准化春季累计降水量的时间演变图

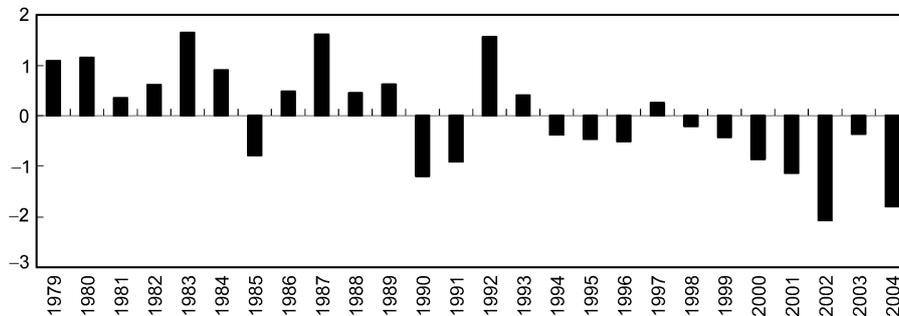


图 3 标准化中国南方春季降水指数随时间的演变曲线

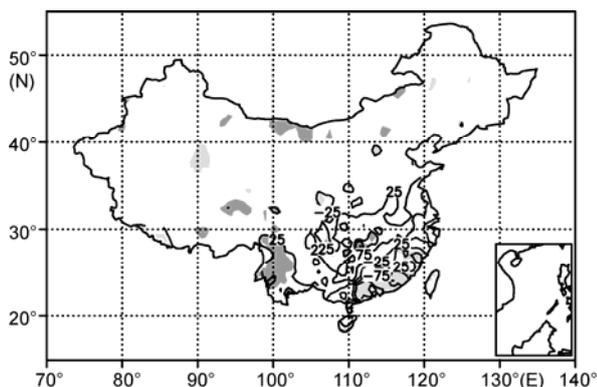


图4 1990~2004年与1979~1989年的春季降水差值图
等值线间隔为50 mm. 深(浅)色阴影部分表示正(负)合成差值显著性水平通过0.1

减少, 而西南地区的春季降水明显增多, 说明我国南方地区的春季降水存在显著的东、西反相的年代际变化特征.

为了说明图3所示的中国南方春季降水指数的年代际转型所对应的环流变化, 图5给出了500 hPa位势高度, 850 hPa位势高度和风场以及东南和西南地区的水汽收支在1990~2004年和1979~1989年期间的合成差值图. 从500 hPa位势高度的合成差值(图5(a))可看出, 与1979~1989年相比, 1990~2004年期间以贝加尔湖为中心的西伯利亚上空位势高度明显增强. 从850 hPa位势高度和风场的合成差值(图5(b))看到, 位势高度异常的分布特征与500 hPa几乎一致. 与西伯利亚位势高度正异常相对应, 以贝加尔湖为中心的亚洲大陆中高纬地区出现了一个大范围的异常反气旋系统, 该异常反气旋系统引起中纬度的低空西风急流减弱, 在我国东部形成异常偏北风, 使得我国东南沿岸有异常东北风出现, 不利于来自洋面的西南暖湿气流北上, 导致我国东南地区降水偏少. 而我国东部的异常东北风往西, 在青藏高原的高地形阻挡下, 有利于我国西南地区降水增加.

为了说明环流异常对水汽输送的影响, 在图5(c)中我们给出了垂直水汽通量积分的实际计算结果. 从东南地区四个方向(20°N, 27.5°N, 107.5°E, 120°E)的垂直水汽通量积分可以看到, 偏强的东北风使得从东北面进入东南地区的水汽通量有所增加, 但同时导致从西南面进入东南地区的水汽通量明显偏弱, 最终使得东南地区出现净的负垂直水汽通量积分(-1.2×10⁷ kg s⁻¹), 使得该区降水减少. 而在西南地区

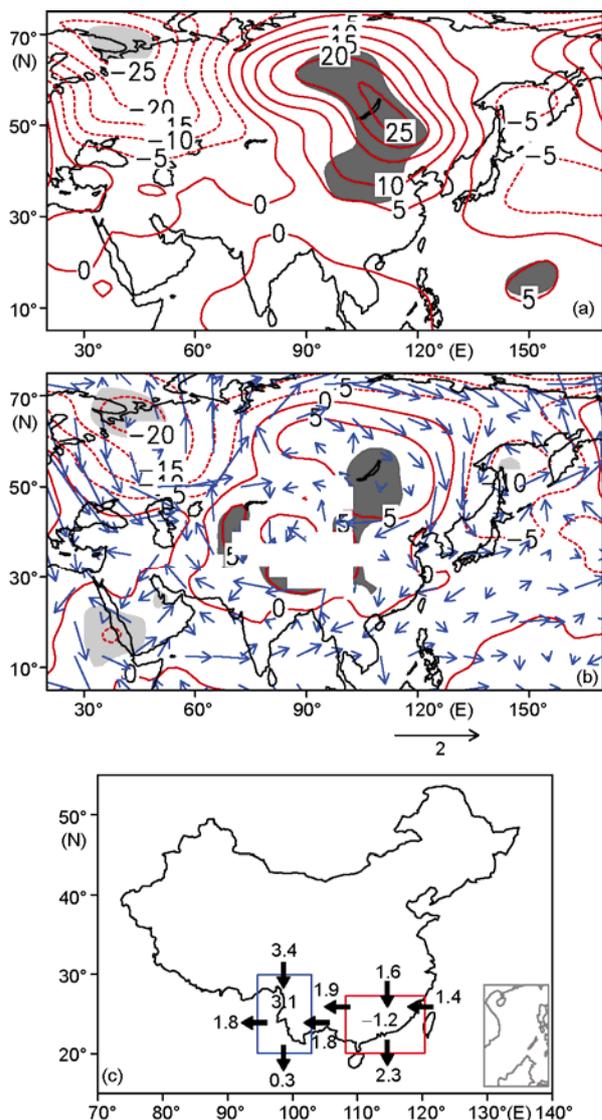


图5 1990~2004年与1979~1989年的春季500 hPa位势高度合成差值(a)和850 hPa位势高度场和水平风场(b)及垂直水汽通量积分(10⁷ kg s⁻¹)的合成差值图(c)

(a)和(b)中深(浅)色阴影部分表示正(负)位势高度合成差值显著性水平通过0.05

四个方向(20°N, 30°N, 95°E, 102.5°E)的垂直水汽通量积分可以看到, 偏强的东北风虽然略微减少了来自西南面的水汽输送, 但是由于青藏高原的高地形阻挡了东北风的继续西进, 使得来自东北面的太平洋的水汽在西南地区聚集, 从而导致西南地区出现净的正垂直水汽通量积分(3.1×10⁷ kg s⁻¹). 另外, 图1(a)表明长江流域附近有弱的降水增加趋势. 从图5(b)我们看到, 中高纬的异常反气旋导致的强大偏北

风, 使得东亚大槽异常南伸到我国江淮流域附近, 从而导致长江流域有弱的降水增加. 由此可知, 我国南方春季降水在 20 世纪 80 年代末的年代际转型与欧亚大陆中高纬的环流系统有密切的关系, 而欧亚大陆中高纬环流系统的异常与其下垫面积雪异常有密切关系^[21~25]. Wu 和 Kirtman^[14], Zuo 等^[26]的研究指出, 春季西伯利亚积雪偏多与北半球中高纬环流异常和我国春季降水有密切的关系, 以下我们将探讨欧亚大陆春季积雪与春季我国南方降水 20 世纪 80 年代末期转型的可能联系.

3 与欧亚大陆春季积雪的联系

图 6(a)给出了欧亚大陆雪水当量与中国南方春季降水指数的相关系数分布图, 可以看出, 我国南方春季降水与欧亚大陆大部分地区的春季积雪有显著的正相关关系, 而与青藏高原中东部有弱的负相关关系. 也就是说, 春季当欧亚大陆积雪偏多时, 对应着我国东南降水的偏多和西南降水的偏少, 反之亦然; 而春季青藏高原积雪与我国南方降水关系不明显. 1990~2004 年与 1979~1989 年两个时段的雪水当量合成差值(图 6(b))表明, 在欧亚大陆大部分地区雪水当量合成差值都通过 0.05 的信度检验. 也即对应着中国南方降水在 20 世纪 80 年代末期的年代际转型, 欧亚大陆积雪在 1990 年之前基本表现为正异常, 而 1990 年之后表现为负异常为主, 两者之间的统计关系在年代际尺度上非常明显.

事实上, 我国春季降水和欧亚大陆春季雪水当量的奇异值分解(SVD)的第一对模态也证实了上面的结论(图 7). 从图 7 可以看到, 除了青藏高原东部部分地区外, 欧亚大陆大部分地区雪水当量与中国东南地区的降水有显著的正相关关系, 与中国西南地区、青藏高原和内蒙古部分地区的降水负相关显著, 该模态的方差贡献为 31.5%. 进一步分析看到, 中国春季降水与欧亚大陆春季积雪相关显著的区域对应的正是图 4 中春季降水在 1990~2004 年和 1979~1989 年两个时段合成差值显著的地区. 说明欧亚大陆春季积雪与中国南方春季降水在 20 世纪 80 年代末出现的年代际转型有密切关系. 分析图 7(c)表明, 虽然两个场的时间系数有明显的年际变化, 但春季欧亚大陆积雪和我国东南春季降水都呈现显著的减少趋势, 既 1990 年之前以正距平为主, 1990 年以后以负距平

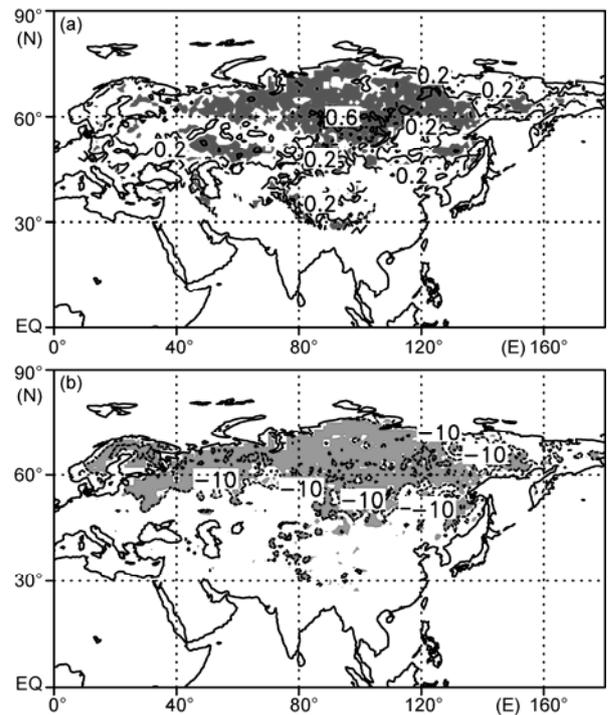


图 6 春季南方降水指数与欧亚大陆雪水当量相关系数分布图(a)和 1990~2004 年与 1979~1989 年的欧亚大陆雪水当量合成差值图(b)

(a)和(b)中阴影部分表示相关或合成差值显著性水平通过 0.05

为主. 说明这两个场的 SVD 第一模态体现了 80 年代末年代际转型的特征. 相关分析也表明南方春季降水指数与 SVD 第一对模态的左场(降水场)和右场(雪水当量场)的相关系数分别为 0.90 和 0.65, 都通过了 0.01 的信度检验, 说明 SVD 第一对模态的左场与南方降水指数的变化一致, 且与欧亚大陆大部分地区的春季雪水当量有密切关系. 也就是说, 随着 1990 年之后欧亚大陆雪水当量的减少, 对应着我国东南地区降水的减少, 西南地区和青藏高原降水的增多, 与前面的分析结论一致. SVD 第一对模态两个场相应的时间系数的相关系数为 0.81, 显著性水平超过了 0.01.

如前面所述, 中国南方春季降水和欧亚大陆积雪有显著的减少趋势, 并在 20 世纪 80 年代末出现了年代际转型, 为了进一步探讨春季欧亚大陆积雪与中国南方降水在年代际时间尺度上的关系, 我们将与南方降水正相关关系显著的西伯利亚地区(55°~70°N, 60°~120°E)的雪水当量进行区域平均, 相关分析表明该区域的雪水当量与 SVD 第一对模态中

右场(雪水当量场)相应的时间系数几乎一致, 两者的相关系数为 0.96. 图 8 给出了标准化的中国南方春季降水指数与西伯利亚雪水当量随时间的演变曲线. 可以看到, 偏多的西伯利亚积雪基本对应着我国东南降水的偏多和西南降水的偏少, 两者的相关系数为 0.62, 显著性水平超过了 0.01. 在 1979~1989 年之间, 除个别年份外, 南方降水指数和西伯利亚积雪基本为正异常; 而在 1990~2004 年期间, 南方降水指数

和西伯利亚积雪主要为负异常. 进一步对西伯利亚春季积雪和南方春季降水指数做 9 点滑动平均(数据两端采用 5 点滑动平均)以去掉年际信号, 发现去掉年际信号后两者的相关系数甚至达到了 0.91. 也即两者在年代际尺度上的变化特征基本一致.

为了说明欧亚大陆积雪减少对我国南方降水的影响, 图 9 给出了 500 和 850 hPa 位势高度场对西伯利亚雪水当量的相反数的一元线性回归场. 可以看

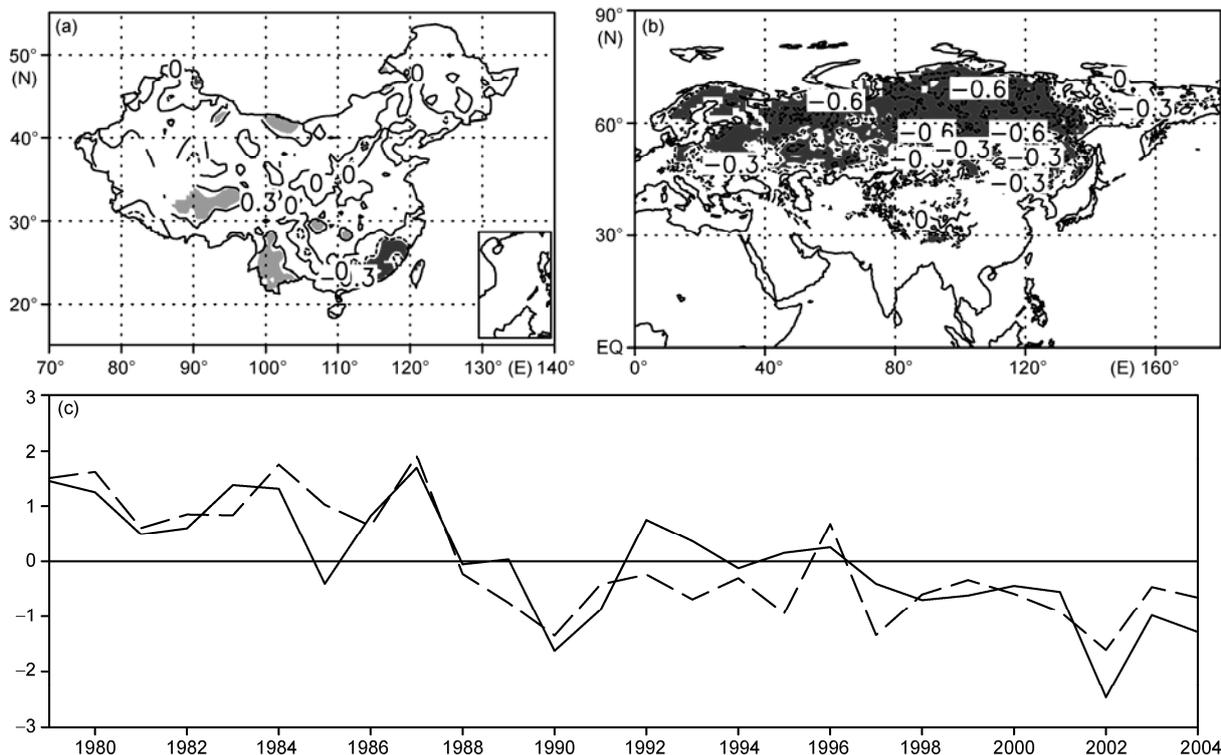


图 7 SVD 第一对模态的左场和右场异性相关空间分布图及相应的时间系数

(a) 左场; (b) 右场, 等值线间隔 0.3, 阴影部分为相关显著性水平超过 0.05. (c) 时间系数, 实线为左场对应的时间系数, 虚线为右场对应的时间系数

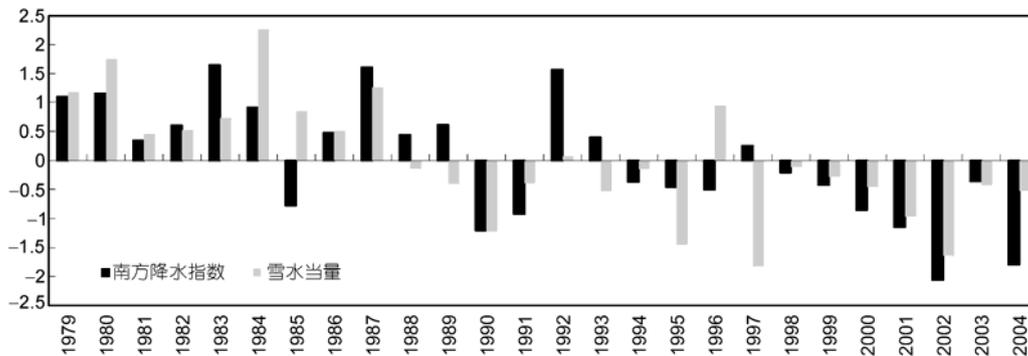


图 8 标准化的南方春季降水指数与西伯利亚(55°~70°N, 60°~120°E)雪水当量随时间的演变曲线

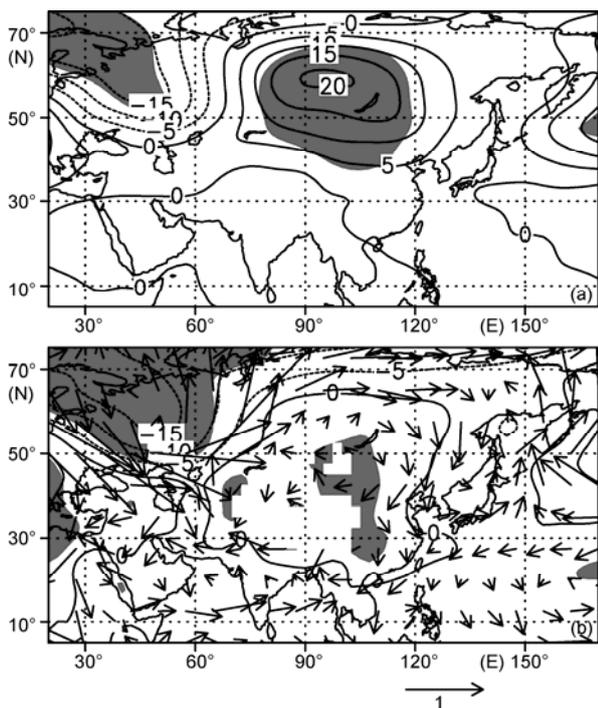


图9 500 hPa 位势高度(a)和 850 hPa 位势高度和水平风场对西伯利亚(55°~70°N, 60°~120°E)雪水当量的一元线性回归场(b)

(a)和(b)中阴影部分分别表示 500 和 850 hPa 位势高度对西伯利亚雪水当量的回归系数显著性水平通过 0.05

到, 对应着西伯利亚积雪的偏多, 西伯利亚附近出现一个异常高压. 500 hPa 位势高度异常分布(图 9(a))、850 hPa 位势高度和风场的异常分布(图 9(b))与图 5 所示的大气环流在 1990~2004 年和 1979~1989 年的合成差值场基本一致, 对应着以贝加尔湖为中心的大范围的正位势高度异常, 对流层低层的低空西风急流偏弱, 径向风异常强大, 在我国东部出现强大的异常偏北风, 其中东部沿岸表现为异常东北风, 不利于我国东南地区的降水; 同时该异常东北风往西在青藏高原的高地形下, 有利于我国西南地区的降水. 在此进一步说明了与我国南方春季降水年代际变化及与其在 20 世纪 80 年代末的转型相联系的环流异常与西伯利亚积雪关系密切.

关于欧亚大陆积雪对东亚气候影响的物理过程, Wu 等^[15]的研究表明, 欧亚大陆春季积雪异常可以在欧亚大陆上空的大气中激发出异常波列, 此波列可以影响到东亚气候. 图 9 中欧亚大陆西面以欧洲为中心的正位势高度异常和以贝加尔湖为中心的大范围

的正位势高度异常与 Wu 等^[15]所揭示的波列一致, 正是这个波列的体现. Zuo 等^[26]和 Wang 等^[27]也指出欧亚大陆积雪异常所引起的陆面过程异常可以引起大气 EP 通量的异常, 进而引起行星波异常, 造成了大气环流异常并影响东亚气候. 因此, 欧亚大陆积雪异常可以对东亚气候产生重要影响.

4 结论

本文利用 1979~2004 年期间中国台站降水观测资料, 指出了无论在年际时间尺度还是在年代际时间尺度上, 我国东南与西南地区春季降水之间都具有反相变化的特征. 并且东南和西南地区春季降水存在相反的变化趋势, 分别呈现出显著的减少趋势和增加趋势. 提出了中国南方地区春季降水在 20 世纪 80 年代末出现了显著的年代际转型. 1990~2004 年与 1979~1989 年两个时段中国春季降水的差值分布表明, 在中国长江流域以南的东南地区降水明显减少, 而西南降水明显增多. 其中东南地区的春季降水量在 20 世纪 80 年代末以后比 80 年代末之前减少了 30%; 而西南地区的春季降水在 80 年代末之后的降水量是 80 年代末之前的两倍. 对与 20 世纪 80 年代末春季降水年代际转型相联系的环流场分析表明, 与 1979~1989 年时段相比, 1990~2004 年时段内欧亚大陆大部分地区的 500 和 850 hPa 位势高度增强, 对流层低层 850 hPa 的中高纬度西风急流偏弱, 在我国东部形成异常强大的东北风, 不利于来自洋面的西南暖湿气流东进北上到我国东南地区, 我国东南地区失去水汽, 导致我国东南地区降水偏少. 而我国东部出现的异常东北风往西在青藏高原的高地形下, 有利于我国西南地区的降水增多. 说明中国南方地区春季降水在 20 世纪 80 年代末发生的年代际转型与欧亚大陆中高纬的环流系统关系密切, 欧亚大陆春季积雪异常通过在欧亚大陆中高纬大气中激发出异常波列^[15], 造成东亚气候异常.

中国南方春季降水与欧亚大陆春季雪水当量的相关分析表明, 中国南方春季降水的年代际转型与欧亚大陆春季积雪的显著减少有密切关系. 在 20 世纪 80 年代末, 欧亚大陆大部分地区的春季积雪出现明显减少趋势, 其与中国南方春季降水出现的年代际转型基本在同一时期. 两者的 SVD 第一对模态表明, 春季欧亚大陆积雪与中国东南地区的降水有显

著的正相关关系, 与西南地区的降水负相关关系明显. 西伯利亚积雪偏多所对应的 500 和 850 hPa 位势高度异常分布以及 850 hPa 风场的异常分布, 与 1990~2004 年和 1979~1989 年的合成差值场基本一致, 这进一步说明了由于欧亚大陆春季积雪在 20 世纪 80 年代末出现的年代际转型, 可能使得欧亚大陆中高

纬环流系统发生改变, 从而导致中国南方降水出现了类似的年代际转型.

本文是基于资料诊断分析, 揭示了降水和环流异常特征及其为欧亚大陆积雪所影响的可能物理机制. 我们将在下一步工作中从数值模拟的角度, 利用数值模式对此问题进行进一步深入研究.

致谢 感谢审稿专家提出的宝贵意见.

参考文献

- 1 王绍武, 龚道溢, 叶瑾林, 等. 1880 年以来中国东部四季降水量序列及其变率. 地理学报, 2000, 55: 281-293
- 2 强卫龙, 施能. 1948-2001 年全球陆地春季降水长期变化的时空特征. 南京气象学院学报, 2004, 27: 326-335
- 3 苗春生, 吴志伟, 何金海, 等. 近 50 年东北冷涡异常特征及其与前汛期华南降水的关系分析. 大气科学, 2006, 30: 1249-1256
- 4 张恒德, 高守亭, 张友妹. 北极涡年代际变化及其与我国春季降水的关系. 气候与环境研究, 2006, 11: 593-604
- 5 Wang H, Xue F, Zhou G. The spring monsoon in South China and its relationship to large-scale circulation features. *Adv Atmos Sci*, 2002, 19: 651-664
- 6 韩晋平, 王会军, 姜大勝. 耦合模式长期积分资料所揭示的华南春季降水及环流特征的年际变化. 气候与环境研究, 2006, 11: 194-202
- 7 赵平, 蒋品平, 周秀骥, 等. 春季东亚海-陆热力差异对我国东部西南风降水影响数值试验. 科学通报, 2009, 54: 2372-2378
- 8 Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China. *Adv Atmos Sci*, 1999, 16: 229-241
- 9 Zhang R H, Sumi A. Moisture circulation over East Asia during El Niño episode in northern winter, spring and autumn. *J Meteor Soc Japan*, 2002, 80: 213-227
- 10 Qiu Y, Cai W, Guo X G, et al. Dynamics of late spring rainfall reduction in recent decades over southeastern China. *J Clim*, 2009, 22: 2240-2247
- 11 蔡学湛. 青藏高原雪盖与东亚季风异常对华南前汛期降水的影响. 应用气象学报, 2001, 12: 358-367
- 12 钱永甫, 张艳, 郑益群. 青藏高原冬春积雪异常对中国春夏季降水的影响. 干旱气象, 2003, 21: 1-7
- 13 Wang Y X, Zhao P, Yu R C, et al. Inter-decadal variability of Tibetan spring vegetation and its associations with eastern China spring rainfall. *Int J Climatol*, 2010, 30: 856-865
- 14 Wu R, Kirtman B P. Observed relationship of spring and summer East Asian rainfall with winter and spring Eurasian snow. *J Clim*, 2007, 20: 1285-1304
- 15 Wu B Y, Yang K, Zhang R H. Eurasian snow cover variability and its association with summer rainfall in China. *Adv Atmos Sci*, 2009, 26: 31-44
- 16 Yang S, Xu L. Linkage between Eurasian winter snow cover and regional Chinese summer rainfall. *Int J Climatol*, 1994, 14: 739-750
- 17 Wu B Y, Zhang R H, Wang B, et al. On the association between spring Arctic sea ice concentration and Chinese summer rainfall. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L09501, doi: 10.1029/2009GL037299
- 18 Li C Y, He J H, Zhu J H. A Review of Decadal/Interdecadal Climate Variation Studies in China. *Adv Atmos Sci*, 2004, 21: 425-436
- 19 Armstrong R L, Brodzik M J. Northern Hemisphere EASE-grid weekly snow cover and sea ice extent version 3. Boulder: National Snow and Ice Data Center, 2005
- 20 张人禾, 武炳义, 赵平, 等. 中国东部夏季气候 20 世纪 80 年代后期的年代际转型及其可能成因. 气象学报, 2008, 66: 697-706
- 21 Watanabe M, Nitta T. Decadal change in the atmospheric circulation and associated surface climate variations in the northern hemisphere winter. *J Clim*, 1998, 12: 494-510, doi: 10.1175/1520-0442
- 22 Cohen J, Entekhabi D. Eurasian snow cover variability and Northern Hemisphere climate predictability. *Geophys Res Lett*, 1999, 26: 345-348
- 23 Corti S, Molteni F, Brankovic C. Predictability of snow depth anomalies over Eurasia and associated circulation patterns. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2000, 126: 241-262, doi: 10.1002/qj.49712656212

- 24 Gong G, Entekhabi D, Cohen J. Modeled northern hemisphere winter climate response to realistic Siberian snow anomalies. *J Clim*, 2003, 16: 3917–3931, doi: 10.1175/1520-0442
- 25 Gong G, Entekhabi D, Cohen J, et al. Sensitivity of atmospheric response to modeled snow anomaly characteristics. *J Geophys Res*, 2004, 109: D06107, doi: 10.1029/2003JD04160
- 26 Zuo Z Y, Zhang R H, Wu B Y, et al. Decadal variability in springtime snow over Eurasia: Relation with circulation and possible influence on springtime rainfall over China. *Int J Climatol*, 2011, doi: 10.1002/joc.2355
- 27 Wang L, Huang R, Gu L, et al. Interdecadal variations of the East Asian winter monsoon and their association with quasi-stationary planetary wave activity. *J Clim*, 2009, 22: 4860–4872