

姜大膀, 苏明峰, 魏荣庆, 等. 2009. 新疆气候的干湿变化及其趋势预估 [J]. 大气科学, 33 (1): 90-98. Jiang Dabang, Su Mingfeng, Wei Rongqing, et al. 2009. Variation and projection of drought and wet conditions in Xinjiang [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (1): 90-98.

新疆气候的干湿变化及其趋势预估

姜大膀¹ 苏明峰^{1, 3} 魏荣庆² 刘宝²

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 新疆气象局, 乌鲁木齐 830002

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 利用新疆气象局提供的 90 个气象台站的连续观测记录, 计算了 1961~2003 年新疆地区年平均和季节平均自适应 Palmer 干旱指数的气候态及其变化趋势, 表明新疆地区气候就平均态而言整体上属于正常的气候条件, 研究时段内年平均和季节平均气候以湿润化趋势为主要变化特征, 定性的分析显示地表气温的持续上升倾向于引起干旱化, 而降水的增加则有利于气候的湿润化趋势。在 SRES A2 温室气体和气溶胶排放情景下, 21 世纪 90 年代新疆地区地表气温的升高会导致干旱化的发生, 而降水的增加则有利于湿润化, 在二者的联合作用下, 新疆地区的干湿状况可能将发生一定程度的变化。

关键词 Palmer 干旱指数 新疆 变化 预估

文章编号 1006-9895 (2009) 01-0090-09

中图分类号 P462

文献标识码 A

Variation and Projection of Drought and Wet Conditions in Xinjiang

JIANG Dabang¹, SU Mingfeng^{1, 3}, WEI Rongqing², and LIU Bao²

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

2 Xinjiang Meteorological Bureau, Ürümqi 830002

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Based on the continuous observation data at the 90 meteorological sites in Xinjiang, a self-calibrating Palmer drought severity index (PDSI) is firstly used to investigate the annual and seasonal variation of drought and wet conditions in the region during 1961-2003. During the concerned period, Xinjiang is characterized by normal climate condition, and both annual and seasonal mean climates are prone to become wetter as a whole. Qualitative analysis reveals that the recorded surface warming tends to induce drought, whereas increased precipitation is favorable for wetness. Under the SRES A2 emission scenario for atmospheric greenhouse gasses and aerosols, projected surface warming tends to induce drought, whereas increased precipitation tends to induce wetness in the 2090s. Taking into account the above two factors together, the PDSI indicates that drought and wet conditions in Xinjiang alter to some extent in the 2090s.

Key words Palmer drought severity index, Xinjiang, variation, projection

收稿日期 2007-06-18, 2007-09-28 收修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 KZCX3-SW-229、KZCX2-YW-205, 国家科技支撑计划项目课题 2007BAC03A01, 国家自然科学基金资助项目 40505017

作者简介 姜大膀, 男, 1974 年出生, 研究员, 主要从事古气候模拟和东亚气候变化研究。E-mail: jiangdb@mail.iap.ac.cn

1 引言

气候变化对农业生产、淡水资源、能源供给、生态系统有着直接的影响, 与我们赖以生存的地表环境条件息息相关, 已经成为地球科学领域最重要的科学问题之一。地处东亚季风气候区, 气候变化对以农业为主要产业之一的中国社会的影响尤为突出, 气象灾害在一般年份造成的经济损失要占到国民经济生产总值的 3%~6%, 其中干旱与雨涝两种气候灾害最为严重, 约占气象灾害总损失的 78% (黄荣辉, 1999)。因此, 中国气候干湿状况的时空演变及其未来变化趋势的预估, 是当前及今后一段时间内亟待深入研究的一项科学课题。

在中国气候的干湿变化研究领域, 相关学者近年来已经开展了一些工作, 如揭示了华北地区 (卫捷等, 2003a, 2003b)、北方干旱、半干旱区 (李新周等, 2004; 王菱等, 2004; 马柱国, 2005; 马柱国等, 2005, 2006a)、中国区域 (Qian et al., 2001; Zou et al., 2005) 气候干湿变化的一些主要特征, 以及中国气候干湿变率和 ENSO、太平洋年代际振荡的相关关系 (苏明峰等, 2006; 马柱国等, 2006b)。然而, 以上工作多是在中国气象局整编的相对较少台站资料的基础上完成的, 中、西部地区空间站点的相对稀疏极大地限制了我们对于上述地区气候干湿状况变化的认识, 特别是在新疆地区。现阶段, 利用更高空间分辨率的观测资料针对西部特定地区开展相关研究是十分必要的, 尤其是考虑到我国目前正在进行的西部大开发经济发展战略。

近年来, 施雅风等 (2002, 2003) 通过地表气温升高、降水量、冰川消融量和径流量连续多年增加、内陆湖泊水位显著上升、洪水灾害增加、植被有所改善和沙尘暴日数锐减一系列气候变化事实, 指出新疆地区气候于 1987 年突然向暖、湿型转型, 进而提出了西北气候自暖干向暖湿转型的假说, 并依据相关古气候记录推测其可能为世纪尺度的气候变化。为此, 我们基于新疆气象局整编的新疆地区 109 个观测台站的气象观测资料, 通过分析其中 90 个台站 1961~2003 年的连续观测记录, 研究并分析了新疆地区气候的干湿变化特征。与此同时, 利用政府间气候变化专门委员会 (简称 IPCC) 提供的 7 个全球大气-海洋耦合模式的集合模拟结果, 预估了全球持续变暖背景下新疆地区气候干湿状况

的未来变化趋势, 以期为我国针对气候与环境未来变化的科学评估提供依据。

2 资料和分析方法

所用数据包括新疆地区 109 个气象台站的原始观测资料, 综合考虑不同台站观测记录的起始年份和连续性问题, 我们首先选取了 1961~2003 年作为研究时段, 而后整理出其中 90 个台站的月平均地表气温和降水资料。关于台站的具体空间分布情况, 可见本文相关图形。另外, 本文还用到 IPCC 资料分发中心提供的 SRES A2 温室气体和气溶胶排放情景下 (Nakićenović et al., 2000) 7 个全球大气-海洋耦合模式的数值模拟结果, 它们分别是日本气候系统研究中心与国家环境研究所的 CCSR、加拿大气候模拟和分析中心的 CGCM2、澳大利亚科学和工业研究组织的 CSIRO_Mk2、美国流体动力学实验室的 GFDL、英国哈德莱气候预测与研究中心的 HadCM3、德国马普气象研究所的 ECHAM4/OPYC3 以及美国国家大气研究中心的 NCAR-PCM。关于模式资料的信息可参阅相关网站 (http://cera-www.dkrz.de/IPCC_DDC/index.html)。

目前, 关于气候干湿变化的研究方法很多, 相对应的干湿级别指数的定义也趋向于多元化。其中, Palmer (1965) 综合考虑了地表气温和降水对于地表干湿状况的影响, 提出了一个用于监测和分析气候干湿状况的指数, 即 Palmer 干旱指数 (简称 PDSI 指数), 并已在全球范围内得到普遍采用。但是, 由于在求解土壤湿度的水分平衡方程过程中涉及到的几个参数是根据美国几个台站的观测数据经验求得的, 因此在实际应用传统 PDSI 指数的过程中, 通常需要调整计算公式中的上述参数, 这就极大限制了在较大空间尺度上开展气候干湿变化分析及其在不同地区进行相互比较的研究。针对这一问题, Wells et al. (2004) 近期在 Palmer (1965) 的基础上, 提出了自适应 PDSI 指数, 其中的核心工作就是使得传统 PDSI 指数计算过程中的经验参数完全由给定地区的气候条件自主产生, 这就克服了传统指标的地域限制问题, 并已经在美国国家农业决策支撑系统中得到应用。本文中的相关分析工作就是基于自适应 PDSI 指数展开的, PDSI 指数不同数值的干湿等级状况见表 1, 具体物理过程和参数化方案细节参阅 Wells et al. (2004)。

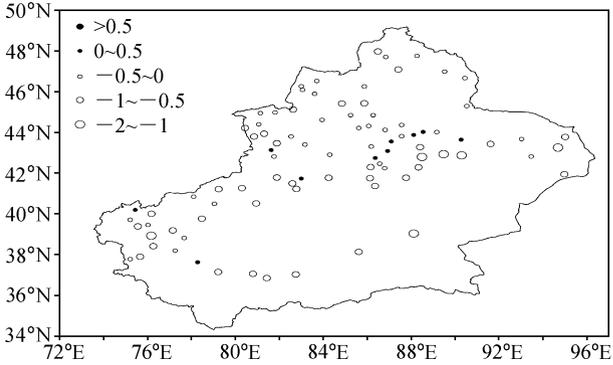


图1 1961~2003年新疆地区年平均PDSI指数气候态的空间分布

Fig. 1 Climatology of annual mean Palmer drought severity index (PDSI) in Xinjiang during 1961–2003

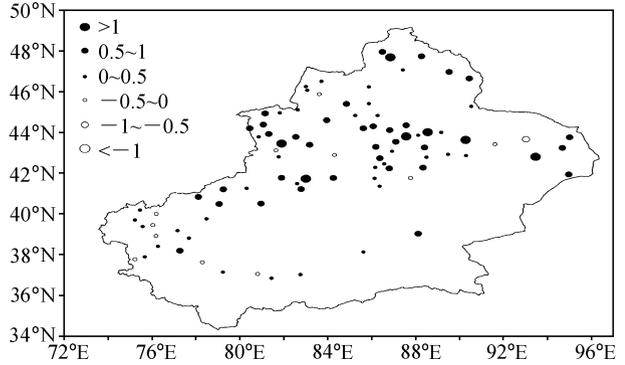


图2 1961~2003年新疆地区年平均PDSI指数变化趋势的空间分布 [单位: (10 a)⁻¹]

Fig. 2 Trend of annual mean PDSI in Xinjiang during 1961–2003 [units: (10 a)⁻¹]

表1 Palmer干旱指数等级划分

Table 1 Classification of the PDSI values

指数值	等级	指数值	等级
≥4.00	极端湿润	-1.99~-1.00	轻微干旱
3.00~3.99	严重湿润	-2.99~-2.00	中等干旱
2.00~2.99	中等湿润	-3.99~-3.00	严重干旱
1.00~1.99	轻微湿润	≤-4.00	极端干旱
0.99~-0.99	正常		

3 新疆气候干湿状况及其变化趋势

首先,计算了新疆地区1961~2003年年平均PDSI指数空间分布的整体状况(图1),表明除新疆东南局部地区为轻微干旱区以外,新疆大部分地区处在正常的气候条件下(-1<PDSI<1),而且这种空间分布特征贯穿一年四季,随季节变化幅度很小(图略)。相应的年平均PDSI指数变化趋势分布图(图2)则表明,1961~2003年三塘湖地区 and 新疆西南部边缘局部地区PDSI指数呈现减小趋势,而新疆其他绝大部分地区PDSI指数增大。对应表1中的PDSI干湿指数分布等级状况可见,总体来说,1961~2003年期间新疆地区年平均气候在变湿,尽管变湿的趋势就地域分布而言还存在着不同程度的差别。进一步的研究表明,同时间段内季节平均PDSI指数变化趋势的地域分布状况基本上与年平均PDSI指数保持一致,而且变化趋势的幅度在各季节间的差别也相对较小(图略),这就充分说明新疆地区气候变湿的特征存在着季节上的一致性。

由以上的分析可见,1961~2003年新疆地区的年平均和季节平均PDSI指数总体上均处于增大的趋势,那么随之而来的关键问题就是新疆地区PDSI指数增大的原因是什么?如前面所述,文中用于计算自适应PDSI指数的气候要素为地表气温和降水,因此上述二要素的单独变化应该可以用来初步探讨PDSI指数的变化情况。首先,针对新疆地区90个台站观测地表气温的统计分析显示,在20世纪全球持续变暖的气候背景下,新疆地区地表气温表现为明显的上升趋势,而且增温趋势在高纬度地区相对来说要更为显著(图3)。在其他环境条件保持不变的情况下,地表气温的升高会增加地表水分的蒸发,直接降低土壤中的净含水量,从而会导致地表气候向干旱化的方向发展。鉴于上述认识,我们在保持降水不变的情况下,进一步计算了PDSI指数的变化趋势情况。图4揭示,1961~2003年单独地表气温的变化导致年平均PDSI指数的显著减小趋势,换言之,地表气温的持续升高倾向于导致新疆地区气候的干旱化,而且通过对比可以发现,地表气温升高所引起的PDSI指数减小在新疆北部地区的强升温区表现得更为明显。此外,针对不同季节平均PDSI指数的计算同样也表明,1961~2003年单独地表气温的变化趋向于导致新疆地区更为干旱化的季节性平均气候的发生,而且这种由地表气温变化所引起的季节平均气候的干旱化趋势在各个季节间的空间分布较为一致,均在高纬度地区表现得更为显著。

为了进一步探讨新疆地区PDSI指数增大的原

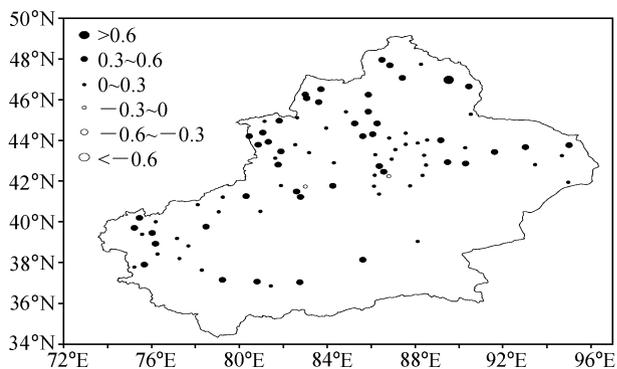


图 3 1961~2003 年新疆地区年平均地表气温的变化趋势 [单位: $^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$]

Fig. 3 Trend of annual mean surface air temperature in Xinjiang during 1961 - 2003 [units: $^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$]

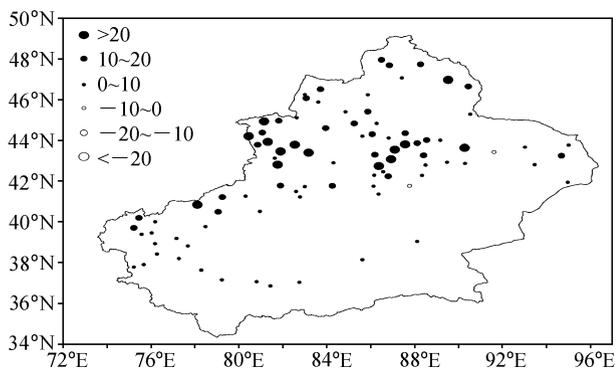


图 5 1961~2003 年新疆地区年平均降水的变化趋势 [单位: $\%/(10\text{ a})$]

Fig. 5 Trend of annual mean precipitation in Xinjiang during 1961 - 2003 [units: $\%/(10\text{ a})$]

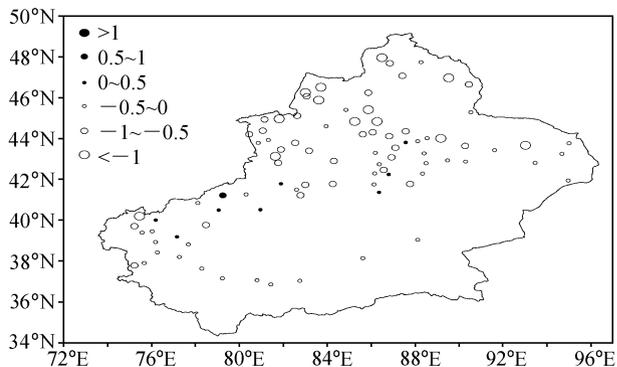


图 4 1961~2003 年新疆地区在降水保持不变的条件下地表气温驱动下的年平均 PDSI 指数变化趋势分布图 [单位: $(10\text{ a})^{-1}$]

Fig. 4 Trend of annual mean PDSI driven only by surface air temperature in Xinjiang during 1961 - 2003 [units: $(10\text{ a})^{-1}$]

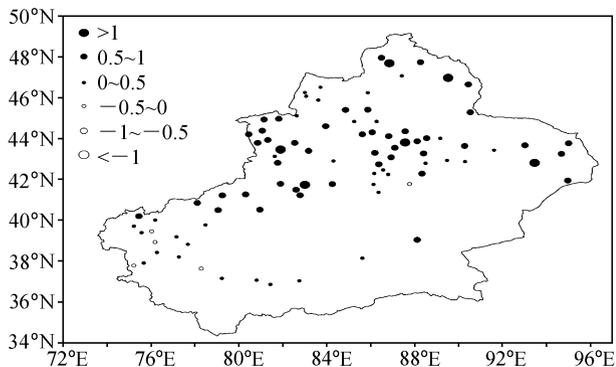


图 6 1961~2003 年新疆地区在地表气温保持不变的条件下降水驱动下的年平均 PDSI 指数变化趋势分布图 [单位: $(10\text{ a})^{-1}$]

Fig. 6 Trend of annual mean PDSI driven only by precipitation in Xinjiang during 1961 - 2003 [units: $(10\text{ a})^{-1}$]

因, 本文计算了 1961~2003 年新疆地区年平均降水的变化趋势情况。图 5 清楚地显示新疆地区年平均降水处于持续增加的状态中, 特别是在新疆的整个中部至北部地区。针对各个季节的单独计算表明, 尽管季节平均降水的变化趋势在各个季节之间存在一定程度的差别, 但就新疆地区的整体变化而言, 季节平均降水在各个季节均表现为增加的趋势。类似于敏感性数值试验, 本文在保持地表气温不变的情况下, 利用单独的降水变化来驱动 PDSI 指数计算模块, 进而可以初步了解降水在 PDSI 指数变化中的角色。由图 6 可见, 1961~2003 年年平均降水引起了新疆地区 PDSI 指数的增大, 对应着湿润化趋势, 而且针对各个季节 PDSI 指数的计算结果同样支持这一结论。这在物理过程层面上不难理解, 因为在其他气候、环境条件保持不变的情况

下, 尽管牵扯到诸多复杂的地表水文过程, 但降水的增加通常会在一定程度上导致土壤净水分的相对增加, 地表气候会相应地趋向湿润化。至此可见, 1961~2003 年新疆地区 PDSI 指数增大可以归因于同期降水的增加, 为此, 现阶段十分有必要就降水增加的原因、机理开展资料分析和数值模拟研究工作, 相关结果对于评估新疆地区气候与环境未来演化趋势可能会很关键。

此外, 本文还分别统计了发生极端、严重干旱和湿润事件的站点数变化情况, 以此来初步了解 1961~2003 年新疆整个地区相对极端气候条件的演化趋势。图 7 揭示, 由地表气温和降水共同作用所引起的极端、严重干旱事件的站点数存在明显的年际变化, 并于 1987 年从此前的高位相跳跃到一个相对较低的位相上 (尽管在 1997~2001 年段内

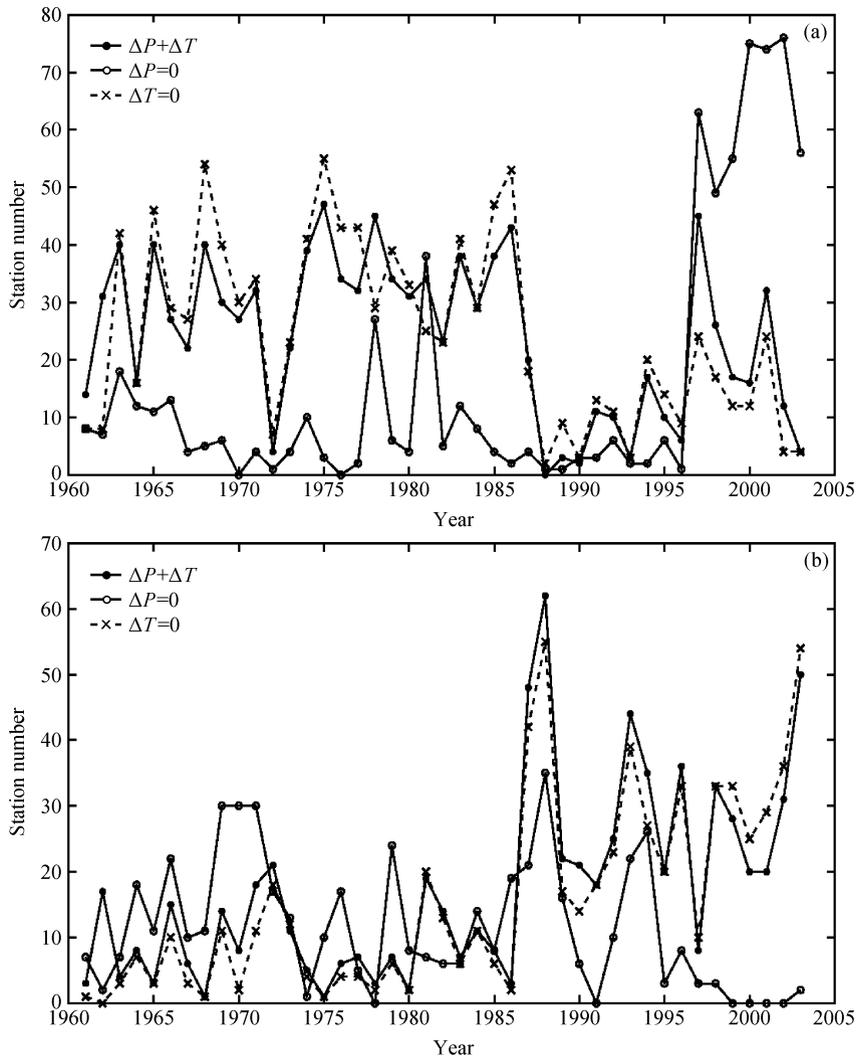


图7 1961~2003年新疆地区分别由地表气温 ($\Delta P=0$)、降水 ($\Delta T=0$)、以及二者共同变化 ($\Delta T+\Delta P$) 所引起的极端、严重干旱 (a, PDSI<-3) 和湿润 (b, PDSI>3) 事件的站点数变化曲线

Fig. 7 Time series of the numbers of the station with extreme or severe (a) drought (PDSI<-3) and (b) wet (PDSI>3) conditions as induced by change in surface air temperature ($\Delta P=0$), precipitation ($\Delta T=0$), and both the variables ($\Delta T+\Delta P$), respectively

有所增大); 与此相对, 发生极端、严重湿润事件的站点数却从1987年以前的低位相转到了高位相上。敏感性试验的结果则表明, 单独地表气温的作用趋向于导致新疆地区发生极端、严重干旱气候事件站点数的增加, 降水的作用则恰好相反; 另一方面, 单独降水的变化会导致发生极端、严重湿润气候事件站点数的增加, 而地表气温的作用则与此相反, 尤其体现在1995年之后。

应该说明, 本文采用的自适应 PDSI 指数是由地表气温和降水的共同变化联合决定的, 二个气象要素共同作用下的 PDSI 指数变化决不是二者单独作用效果的简单线性叠加, 因为计算模块中的物理

方程不是简单的线性关系, 其中涉及到复杂的非线性物理过程。因此, 上述针对地表气温和降水作用的讨论适用于从定性角度来初步了解 1961~2003 年新疆气候湿润化趋势的成因。

4 新疆气候干湿状况预估

当前, 人类活动影响下的全球平均气候正在变暖已是不争的事实, 科研人员正在利用气候系统模式在预估的一系列温室气体和气溶胶排放情景下通过大规模数值试验来模拟气候的未来变化场景 (IPCC, 2007)。在相应的学科领域, 我国学者近年来也已经开展了一些工作, 探讨了在全球持续变暖

背景下中国气候的未来变化趋势 (Guo et al., 2001; Gao et al., 2001, 2002; Bueh et al., 2003; 高学杰等, 2003; 徐影等, 2003; 赵宗慈等, 2003, 姜大膀等, 2004a, 2004b; 许吟隆等, 2006)。然而, 至今关于气候预估的研究工作基本上都局限在地表气温和降水的单独变化上, 尚未有研究从定量的角度有针对性地调查全球变暖场景下中国气候的干湿状况变化, 特别是针对诸如新疆这样的区域尺度气候变化问题。

鉴于此, 本文首先整理了 SRES A2 温室气体和气溶胶排放情景下 7 个全球大气-海洋耦合模式的数值试验结果, 然后分别计算了各个模式试验中

2091~2100 年月平均地表气温和降水气候态相对于模式自身 1961~1990 年气候态的差值场, 而后将上述 7 个模式的差值场分别线性插值到统一的水平分辩率上, 最终通过算术加权平均产生 7 个模式的集合预估结果。本文选择多模式集合结果的原因是因为就当代东亚区域年平均和季节平均地表气温和降水气候态而言, 上述 7 个模式的集合结果总体上要优于任何一个单独模式的结果 (Jiang et al., 2005), 相应的集合预估结果也就相对更具可信度, 这种多模式集合的研究方法目前在全球变化研究领域已经得到广泛采用 (IPCC, 2007)。

在上述前处理的基础上, 我们将 7 个气候模式

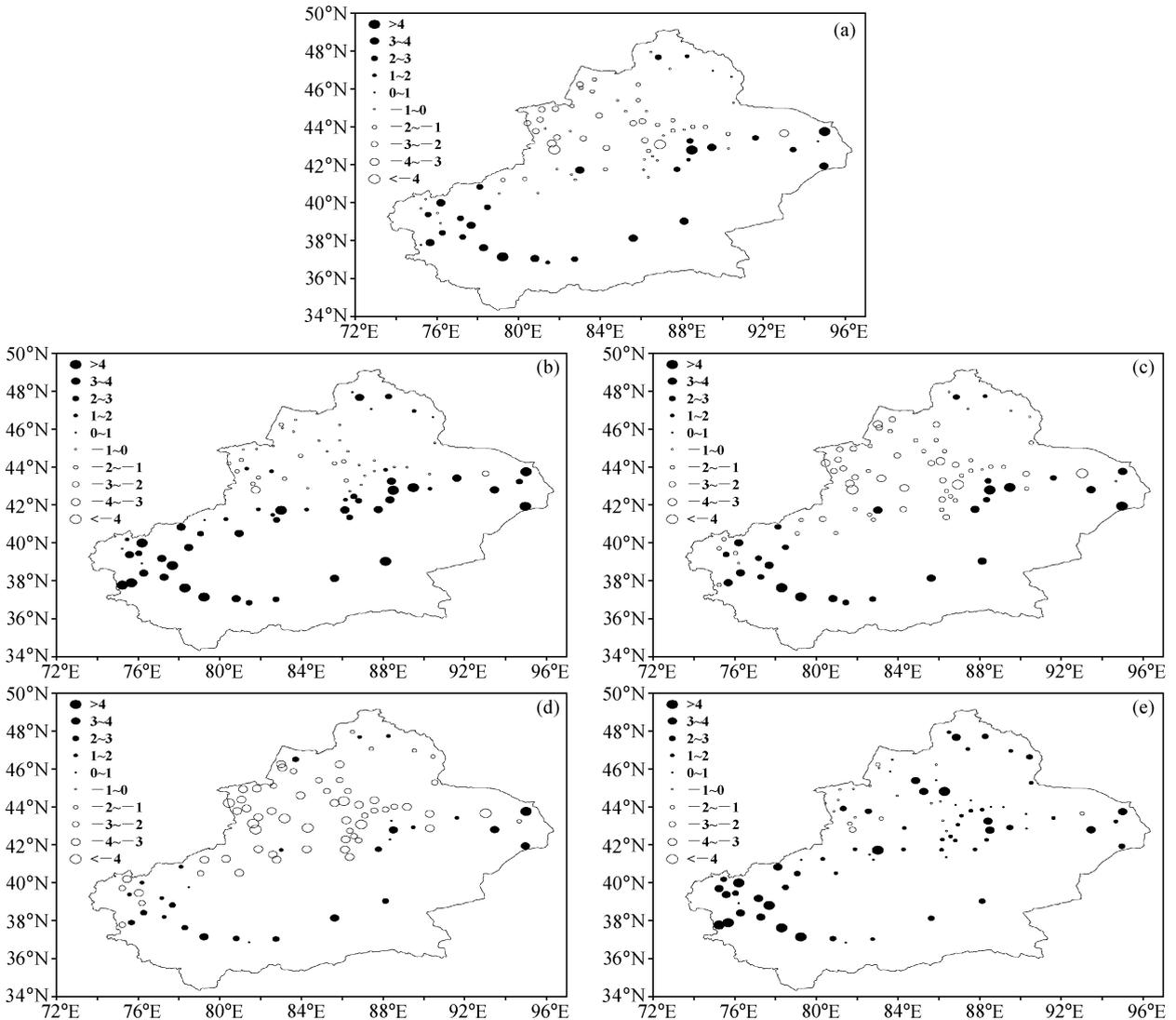


图 8 2091~2100 年新疆地区 (a) 年平均和 (b~e) 季节平均 PDSI 指数气候态的空间分布: (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季; (e) 冬季
Fig. 8 Climatology of (a) annual, (b) spring, (c) summer, (d) autumn, and (e) winter mean PDSI in Xinjiang in the 2090s

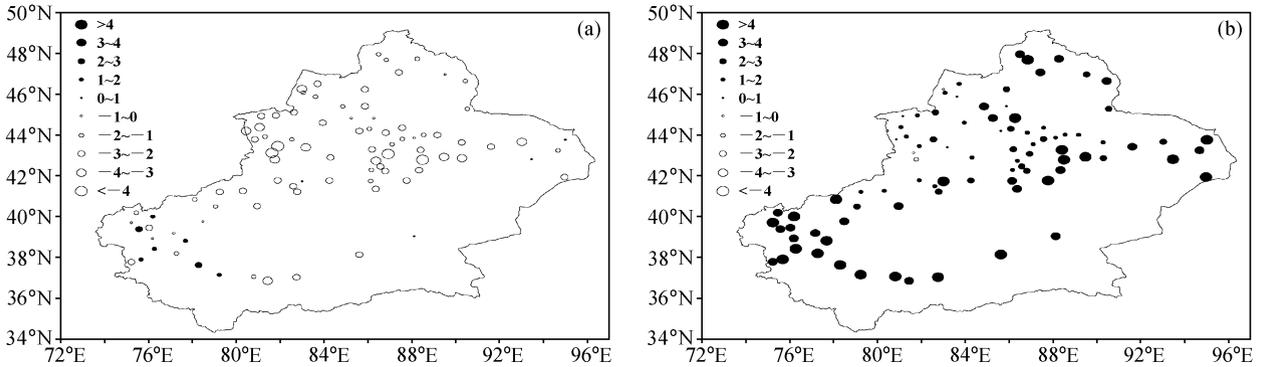


图9 地表气温 (a) 和降水 (b) 驱动下的 2091~2100 年新疆地区年平均 PDSI 指数气候态的空间分布

Fig. 9 Climatology of annual mean PDSI in Xinjiang in the 2090s as driven by (a) surface air temperature and (b) precipitation, respectively

的集合预估结果在新疆地区插值到 90 个观测台站的经纬度坐标上, 然后再叠加到原有的 1961~2003 年月平均地表气温和降水气候态上, 从而通过驱动 PDSI 指数计算模块产生了 21 世纪 90 年代新疆地区年平均和季节平均 PDSI 指数的空间分布状况 (图 8)。对照 1961~2003 年年平均 PDSI 指数分布图 (图 1) 可以发现, 在 SRES A2 温室气体和气溶胶排放情景下, 21 世纪 90 年代新疆地区气候干湿分布状况发生了很大变化。具体来说, 新疆地区在约 $44^{\circ}\text{N}\sim 47^{\circ}\text{N}$ 范围内 (除东部局部地区以外) 的年平均气候将由目前的正常状况 ($-1 < \text{PDSI} < 1$) 演变为干旱区 ($\text{PDSI} < -1$); 相对上述干旱区的南北两侧则变为相对湿润区 ($\text{PDSI} > 1$), 特别是在新疆南部地区, 气候将可能处于非常湿润的状态。季节性平均 PDSI 指数的空间分布则展现出一定程度的变化幅度, 其中, 冬季除三塘湖和昭苏地区为轻微或中度干旱区以外, 新疆其他地区均表现为相对湿润区; 秋季则大体上呈现出南湿北干的空间分布格局, 且北部干旱区的面积相对要更大一些; 相对而言, 春季和夏季气候整体干湿状况与年平均状况相仿。

与此同时, 我们也用 7 个模式的集合地表气温和降水差值场分别驱动 PDSI 指数计算模块, 目的在于检测二者对于新疆地区气候干湿状况未来变化趋势的相对贡献, 进而可以初步定性地了解其成因。图 9 表明, 全球变暖背景下年平均地表气温的升高总体上趋向于导致新疆地区气候的干旱化, 而年平均降水的增加则会使得新疆地区的气候向相对湿润化的方向发展。针对不同季节的敏感性试验同样支持了这一结果。

5 结论

首先基于 90 个气象台站的观测资料分析了 1961~2003 年新疆地区年平均和季节平均气候干湿状况及其变化趋势, 并在此基础上利用 7 个气候模式的集合数值模拟结果对 21 世纪 90 年代气候干湿状况情景进行了预估, 主要结论是:

(1) 1961~2003 年, 新疆地区气候就平均状态而言为正常的气候条件, 整个时段内年平均和季节平均气候以湿润化发展趋势为主要变化特征, 降水增加是主要诱因。

(2) 在 SRES A2 温室气体和气溶胶排放情景下, 21 世纪 90 年代新疆地区的干湿状况由于气候变化而发生了一定程度的变化。

需要说明的是, 在气候变化预估领域, 用于驱动气候系统模式的大气温室气体和气溶胶排放情景是根据人类社会诸多领域的不同发展模式而提前预估的, 本文所选用的 SRES A2 温室气体和气溶胶排放情景是其中相对较高的 (Nakićenović et al., 2000; IPCC, 2007)。鉴于人类社会发展的复杂性, 相应的排放情景也就存在着一定程度的不确定性。但目前比较确定的一点是, 如果世界仍然维持目前的生活方式、能源消费结构, 大气中温室气体和气溶胶浓度将会持续增加的定性结论应该是可以接受的。作为问题的另一个方面, 尽管气候系统模式还远未完善, 但是基于生物地球化学等物理过程建立起来的大规模数值计算方程组已经表现出了较强的气候模拟能力, 它们对于过去和当代气候诸多方面的合理模拟, 使得我们有理由在一定程度上借鉴它们对于气候未来变化情景的预估结果, 至少

在定性的角度上应该具有很高的可信度。

另外, 地表干湿平衡状况由很多生物地球化学过程共同决定, 其中牵扯到了许多气候因子及其之间复杂的相互作用。受限于现有的认知程度, 本文仅从地表气温和降水的变化上开展了初步的研究, 尚未触及全球变暖情景下其他重要相关过程对于新疆地区气候干湿状况的可能影响, 如冰川加速消融 (IPCC, 2007) 导致的径流增加、潜在植被变化 (Jiang, 2008) 导致的土壤水分平衡过程变化等。此外, 东亚地区地形复杂, 使用较高分辨率的区域气候模式来开展相关工作可能是很必要的 (高学杰等, 2006)。因此, 本文针对新疆地区气候干湿状况发展趋势的研究更多地需要从定性的角度去理解。

致谢 政府间气候变化专门委员会资料分发中心提供了模式资料, 冯锦明博士整理了观测资料, 两位评审专家提出了宝贵的修改建议, 在此一并致谢。

参考文献 (References)

Bueh Cholaw, Cubasch U, Lin Yonghui, et al. 2003. The change of North China climate in transient simulations using the IPCC SRES A2 and B2 scenarios with a coupled atmosphere - ocean general circulation model [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 20: 755 - 766.

Gao Xuejie, Zhao Zongci, Ding Yihui, et al. 2001. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 18: 1224 - 1230.

Gao Xuejie, Zhao Zongci, Giorgi F. 2002. Changes of extreme events in regional climate simulations over East Asia [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 19: 927 - 942.

高学杰, 赵宗慈, 丁一汇, 等. 2003. 温室效应引起的中国区域气候变化的数值模拟 II: 中国区域气候的可能变化 [J]. *气象学报*, 61: 29 - 38. Gao Xuejie, Zhao Zongci, Ding Yihui, et al. 2003. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model. Part II: Climate change [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 61: 29 - 38.

高学杰, 徐影, 赵宗慈, 等. 2006. 数值模式不同分辨率和地形对东亚降水模拟影响的试验 [J]. *大气科学*, 30: 185 - 192. Gao Xuejie, Xu Ying, Zhao Zongci, et al. 2006. Impacts of horizontal resolution and topography on the numerical simulation of East Asia precipitation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 30: 185 - 192.

Guo Yufu, Yu Yongqiang, Liu Xiyang, et al. 2001. Simulation of climate change induced by CO₂ increasing for East Asia with IAP/LASG GOALS model [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 18: 53 -

66.

黄荣辉. 1999. 我国气候灾害的特征、成因和预测研究进展 [J]. *中国科学院院刊*, (3): 188 - 192. Huang Ronghui. 1999. Advances in the characteristics, mechanism, and prediction of climatic disaster in China [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences* (in Chinese), (3): 188 - 192.

IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [C]. Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Eds. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1 - 987.

姜大膀, 王会军, 郎咸梅. 2004a. 全球变暖背景下东亚气候变化的最新情景预测 [J]. *地球物理学报*, 47: 590 - 596. Jiang Dabang, Wang Huijun, Lang Xianmei. 2004a. East Asian climate change trend under global warming background [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 47: 590 - 596.

姜大膀, 王会军, 郎咸梅. 2004b. SRES A2 情景下中国气候未来变化的多模式集合预测结果 [J]. *地球物理学报*, 47: 776 - 784. Jiang Dabang, Wang Huijun, Lang Xianmei. 2004b. Multimodel ensemble prediction for climate change trend of China under SRES A2 scenario. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 47: 878 - 886.

Jiang Dabang, Wang Huijun, Lang Xianmei. 2005. Evaluation of East Asian climatology as simulated by seven coupled models [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 22: 479 - 495.

Jiang Dabang. 2008. Projected potential vegetation change in China under the SRES A2 and B2 scenarios [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 25: 126 - 138.

李新周, 刘晓东, 马柱国. 2004. 近百年来全球主要干旱区的干旱化特征分析 [J]. *干旱区研究*, 21: 97 - 103. Li Xinzhou, Liu Xiaodong, Ma Zhuguo. 2004. Analysis on the drought characteristics in the main arid regions in the world since recent hundred-odd years [J]. *Arid Zone Research* (in Chinese), 21: 97 - 103.

马柱国. 2005. 我国北方干湿演变规律及其与区域增暖的可能联系 [J]. *地球物理学报*, 48: 1011 - 1018. Ma Zhuguo. 2005. Dry/wet variation and its relationship with regional warming in arid regions of northern China [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 48: 1011 - 1018.

马柱国, 黄刚, 甘文强, 等. 2005. 近代中国北方干湿变化趋势的多时段特征 [J]. *大气科学*, 29: 671 - 681. Ma Zhuguo, Huang Gang, Gan Wenqiang, et al. 2005. Multi-scale temporal characteristics of the dryness/wetness over northern China during the last century [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 29: 671 - 681.

马柱国, 符淙斌. 2006a. 1951~2004 年中国北方干旱化的基本事实 [J]. *科学通报*, 51: 2429 - 2439. Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2006. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 51: 2913 - 2925.

- 马柱国, 邵丽娟. 2006b. 中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际震荡的关系 [J]. 大气科学, 30: 464 - 474. Ma Zhuguo, Shao Lijuan. 2006. Relationship between dry/wet variation and the Pacific decade oscillation (PDO) in the northern China during the last 100 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30: 464 - 474.
- Nakićenović N, Alcamo J, Davis G, et al. 2000. IPCC Special Report on Emissions Scenarios [M]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1 - 599.
- Palmer W C. 1965. Meteorological drought. Office of Climatology Research Paper 45. Weather Bureau, Washington D C, 1 - 58.
- Qian Weihong, Zhu Yafen. 2001. Climate change in China from 1880 to 1998 and its impact on the environmental condition [J]. Climatic Change, 50: 419 - 444.
- 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 2002. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨 [J]. 冰川冻土, 24: 219 - 226. Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. 2002. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 24: 219 - 226.
- 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 2003. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨 [J]. 第四纪研究, 23: 152 - 164. Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. 2003. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China [J]. Quaternary Sciences (in Chinese), 23: 152 - 164.
- 苏明峰, 王会军. 2006. 中国气候干湿变率与 ENSO 的关系及其稳定性 [J]. 中国科学 (D 辑), 36: 951 - 958. Su Mingfeng, Wang Huijun. 2007. Relationship and its instability of ENSO-Chinese variations in droughts and wet spells [J]. Science in China (Series D), 50: 145 - 152.
- 王菱, 谢贤群, 李运生, 等. 2004. 中国北方地区 40 年来湿润指数和气候干湿带界限的变化 [J]. 地理研究, 23: 45 - 54. Wang Ling, Xie Xianqun, Li Yunsheng, et al. 2004. Changes of humid index and borderline of wet and dry climate zone in northern China over the past 40 years [J]. Geographical Research (in Chinese), 23: 45 - 54.
- 卫捷, 马柱国. 2003a. Palmer 干旱指数、地表湿润指数与降水距平的比较 [J]. 地理学报, 58 (增刊): 117 - 124. Wei Jie, Ma Zhuguo. 2003. Comparison of Palmer drought severity index, percentage of precipitation anomaly and surface humid index [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58 (Suppl.): 117 - 124.
- 卫捷, 陶诗言, 张庆云. 2003b. Palmer 干旱指数在华北干旱分析中的应用 [J]. 地理学报, 58 (增刊): 91 - 99. Wei Jie, Tao Shiyuan, Zhang Qingyun. 2003. Analysis of drought in northern China based on the Palmer severity drought index [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58 (Suppl.): 91 - 99.
- Wells N, Goddard S, Hayes M J. 2004. A self-calibrating Palmer drought severity index [J]. Journal of Climate, 17: 2335 - 2351.
- 徐影, 丁一汇, 赵宗慈, 等. 2003. 我国西北地区 21 世纪季节气候变化情景分析 [J]. 气候与环境研究, 8: 19 - 25. Xu Ying, Ding Yihui, Zhao Zongci, et al. 2003. A scenario of seasonal climate change of the 21st century in Northwest China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8: 19 - 25.
- 许吟隆, 张勇, 林一骅, 等. 2006. 利用 PRECIS 分析 SRES B2 情景下中国区域的气候变化响应 [J]. 科学通报, 51: 2068 - 2074. Xu Yinlong, Zhang Yong, Lin Yihua, et al. 2006. Analyses on the climate change responses over China under SRES B2 scenario using PRECIS [J]. Chinese Science Bulletin, 51: 2260 - 2267.
- 赵宗慈, 丁一汇, 徐影, 等. 2003. 人类活动对 20 世纪中国西北地区气候变化影响检测和 21 世纪预测 [J]. 气候与环境研究, 8: 26 - 34. Zhao Zongci, Ding Yihui, Xu Ying, et al. 2003. Detection and prediction of climate change for the 20th and 21st century due to human activity in Northwest China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8: 26 - 34.
- Zou Xukai, Zhai Panmao, Zhang Qiang. 2005. Variations in droughts over China: 1951 - 2003 [J]. Geophys. Res. Lett., 32: L04707, doi: 10.1029/2004GL021853.