

符淙斌, 马柱国. 全球变化与区域干旱化. 大气科学, 2008, 32 (4): 752~760

Fu Congbin, Ma Zhuguo. Global Change and Regional Aridification. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, 32 (4): 752~760

全球变化与区域干旱化

符淙斌 马柱国

中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室, 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 本文总结了已完成的国家重点基础研究发展规划计划项目(“973”项目)“我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测”(1999~2004年)和正在执行的“973”项目“北方干旱化与人类适应”的有关干旱化问题研究的部分成果。主要是中国科学院大气物理研究所最近几年在近代区域干旱化的事实及全球联系方面的研究进展,并对全球增暖背景下区域干旱化的形成机理展开讨论。

关键词 全球变化 区域干旱化 形成机理 人类活动

文章编号 1006-9895(2008)04-0752-09

中图分类号 P467

文献标识码 A

Global Change and Regional Aridification

FU Congbin and MA Zhuguo

Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia of Chinese Academy of Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Some achievements on aridity trend from the accomplished project of the State Key Development Program for Basic Research of China “Evolution of Life-Supporting Environment in China and the Predictive Study of Aridity Trend in Northern China, Grant No. G1999043400” and the ongoing project of the State Key Development Program for Basic Research of China “Aridity Trend in Northern China and Human Adaptation, Grant No. 2006CB400500” are summarized in this paper, which is related to the studies of drying trend on regional scale. The achievements focus on detecting drying trend in recent 100 years and studying its relationship with global change by scientists from the Institute of Atmospheric Physics of Chinese Academy of Sciences, and the mechanism causing drying trend on regional scale under global warming background is discussed finally.

Key words global change, regional aridity trend, forming mechanism, human activities

1 引言

全球变化研究是以全球增暖为核心、地球环境变化为主要内容的一门新兴学科,始于20世纪80年代初。它以地球系统各组成部分大气圈-陆圈-水圈-冰冻圈-生物圈之间的相互作用和物理过程、生物过程和化学过程相互作用,以及人类与地球环境

的相互作用为主要研究对象。作为全球变化的特征之一,区域干旱化已成为全球变化区域研究的重要内容之一。它的形成既有大尺度的气候背景,同时又受区域尺度地气相互作用的影响,是自然变化和区域人类活动影响共同作用的结果。除气候变化过程外,它的形成还包括生态变化、水文变化等各种物理、化学和生物过程,因此关于干旱化的研究需

收稿日期 2008-03-07, 2008-03-17 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划计划项目 2006CB400504, 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-229, 国家自然科学基金资助项目 40775055

作者简介 符淙斌,男,1939年出生,中国科学院院士,主要从事全球变化和气候变化研究。E-mail: fcb@tea.ac.cn

要通过多学科交叉的方法进行开展, 是全球变化的主要研究内容之一。

我国北方地区的干旱化具有长期的演变过程。近 30 多年, 在我国北方, 尤其是在东北、华北和西北东部, 持续的干旱化已严重威胁这些地区的生存环境, 导致当地水资源严重匮乏、生态环境退化和荒漠化等一系列环境问题。中国科学院大气物理研究所(简称大气所)主持已经完成的国家重点基础研究发展规划项目(“973”项目)“我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测”和正在执行的“973”项目“北方干旱化与人类适应”, 它们的核心内容就是运用多学科交叉的手段对我国北方干旱化的事实、形成机理和预测及其对环境的影响进行系统的研究, 并为国家应对干旱化的决策提供科学基础。过去的工作已对前一个“973”项目的研究进展及成果进行系统的总结^[1~5], 正在执行的“北方干旱化与人类适应”项目的主要研究内容包括: (1) 干旱/半干旱区大气过程、地表过程和人类活动的相互作用; (2) 干旱化的阶段性转折和突变的规律、机理和可预测性研究; (3) 干旱化及其转折对我国粮食、水和国土资源安全的影响和适应对策; (4) 地球系统区域模式的发展及其在干旱化趋势和转折的预测、影响评估和人类适应对策研究中的应用。其中干旱化的阶段性转折和突变的规律和机理研究贯穿于项目各个课题的主题。这里仅就大气所最近在近代区域干旱化的事实及全球联系的研究进展作了介绍, 并对全球增暖背景下区域干旱化的形成机理展开讨论。

2 干旱化的基本事实及其转折性变化特征

2.1 我国北方干旱化的基本事实

在增暖背景下, 近半个世纪全球极端干旱区域的面积扩大了两倍以上^[6]。大量的事实也揭示我国北方地区干旱化正在加剧^[7~9], 且增暖显著^[10]。吉林省草原面积每年以 2.8% 递减, 草原重度退化的面积占整个草原面积的 47.5%; 在内蒙古东部, 近 10 年沙漠化令科尔沁沙地以每年 2.4% 的速度扩展^[2]; 黄河径流也在不断减少^[11]; 北方主要农业区不同程度的干旱面积均有扩大的趋势^[7]。以上特征都是我国北方区域干旱化的具体表现。降水减少和温度升高是形成当前我国北方大部分地区显著干旱

的主要原因。前面提到, 干旱化的形成是一个复杂过程, 是地球系统多圈层相互作用和人类活动影响共同作用的结果。由于其形成原因的多学科特征, 对干旱的定义多种多样, 体现了各自的学科特点, 但至今仍然缺乏一个能综合表现干旱化总体特征的客观指标, 观测数据的不足是其中重要的原因。因此, 在当前资料条件下, 采用多指标的对比分析揭示干旱化的事实仍不失为一条有效途径。已完成的“973”项目“我国北方生存环境演变及未来趋势预测”(1999~2004 年)通过建立“仪器观测时期干旱指数的构建及比较研究”任务组, 详细比较湿润指数、Palmer 干旱指数和降水距平百分率在表征我国北方干旱化中的差异和各自的优缺点, 通过对比分析对我国干旱化的基本事实进行系统的研究。

利用已改进的地表湿润指数对我国北方地区近 100 年的干湿演变规律及变化趋势进行详细的分析, 发现近几十年尽管中国西部降水略有增加, 但从湿润指数的变化说明这个地区并未存在变湿的趋势^[12]。在地表湿润数指数的基础上改进 Thornthwaite 的分类函数, 对中国干旱和半干旱分界线的 10 年际变动进行分析^[8], 结果说明: 近 50 年我国华北南部、东北中部和陕西南部及内蒙古中部的干旱化有进一步发展的趋势, 干旱/半干旱分界线向南或者向东成波动式扩展尤为明显, 近 50 年干旱或半干旱界线向东或者向南扩展的范围大约在 150~300 km。近 100 年干旱和半干旱分界线存在周期性的年际摆动, 分界线位置变化的趋势具有阶段性, 其中在陕西南部, 目前分界线的位置已经接近历史上最南边; 在华北南部, 1950 年代以后有一个明显的向南扩展趋势, 但目前还没有达到历史的最南端。在东北中部半干旱分界线的位置呈明显的规则的周期变化, 周期长度大约 40 年左右, 在规则的周期上叠加了一个明显向东扩展的趋势。

地表湿润指数、反演的土壤湿度、降水和 Palmer 干旱指数(PDSI)的对比研究揭示了我国近半个世纪的干旱化的空间分布格局^[13]。图 1 为 1951~2007 年中国区域干湿变化趋势(地表湿润指数)和极端干旱(Palmer 干旱指数)发生频率变化趋势的空间分布格局。可以看出: 100°E 以东地区近 50 年基本为干旱化的趋势, 显著干旱(红色区域为通过 95% 的信度检验)的地区分布在西北的东部和整个华北地区, 东北的东南部也为干旱化显著的

地区(图 1a)。这些地区干旱化趋势的产生与降水的持续减少密切相关,而近 30 年气温的持续上升是这些地区干旱化加剧且范围扩大的另一个重要原因^[13]。对区域平均状况分析发现:西北东部、华北在 20 世纪 70 年代末期发生明显的由湿向干的年代际转折性变化,两个地区的干旱化均持续至今,时间接近 30 年,这个转折性变化应与 1977/1978 年的全球大尺度气候背景有关^[14, 15]。与上述两个地区不同,东北地区在近半个世纪却存在 3 个干湿变化的转折点,最近的一个转折点发生在 20 世纪 90 年代中期由湿向干的趋势转变,目前这个地区也处于一个干旱的时段,另一个转折点发生在 1965 年和 1983 年。这说明除温度升高加剧了干旱化趋势外,控制东北地区的大尺度气候背景与前述两个地区的大尺度气候背景不同。在 20 世纪 80 年代以后,西北东部、华北和东北地区的极端干旱发生的频率(每年 12 个月极端干旱所出现的月数)明显增加,其中东北增加的幅度最大(图 1b)。值得指出的是,在我国北方发生干旱化最剧烈的地区均位于半干旱地区,而干旱地区降水是增加的^[2, 8, 13]。

2.2 全球干旱化的空间格局及转折性变化特征

进一步的研究发现,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干旱化的趋势(图 2)。不同空间尺度干湿变化的倾向明显不同:在半球尺度,东半球为变干趋势,而西半球反之,为变湿趋势;在大陆尺度上,尤其是非洲大陆和欧亚大陆,干旱化趋势非常显著,其中以非洲大陆最为剧烈,从 1951~2002 年,其干旱化强度增加了 16%。在欧亚大陆的俄罗斯远东、中国华北和东北地区都是干旱化显著的地区。增暖对全球干湿变化有重要影响,除北美大陆外,其余大陆在增暖的作用下其干旱化的强度都有大约 1~5 个百分点的加强,降水为增加趋势的区域也因增暖而变湿趋势减弱或消失。全球 5 个大陆除北美大陆外均为变干趋势,而北美大陆为变湿趋势^[16]。值得注意的是北美大陆与欧亚及非洲大陆的干湿变化的相反趋势,数值模拟的土壤湿度变化也支持这一结论。在增暖背景下,这种半球尺度和大陆尺度干湿变化趋势的差异形成的原因有待于进一步的深入研究。

2.3 不同区域干旱化特征及转折性变化

近半个世纪,北美变湿倾向、非洲大陆和欧亚大陆的干旱化趋势都具有明显的转折性特征,表现

在平均值和距平值的转折变化。在北美、非洲和亚洲发生干旱的地区,平均值发生转折性变化的时间前者为 1950 年代中后期,后两个地区均发生在 1960 年代初期,北美的转折性特征是由于转向湿,而后两个地区都是由湿的倾向转向干的倾向。在距平变化上,三个地区其转折点均位于 1970 年代中后期,这包括气温(T)、降水(P)和表征干湿变化的地表湿润指数(SWI)(图 3),在北美大陆,由干转为湿的时间发生在 1976 年,非洲大陆由湿转为干的时间为 1979 年,亚洲地区的干旱起始于 1975 年,这种年代际的转折性变化普遍存在于全球许多地区^[16]。

分析还发现,在不同气候特征地区,尤其是在干旱和半干旱地区,近半个世纪干湿变化的趋势明显不同。北美干旱区和半干旱地区近半个世纪降水总体趋势均为增加,然而,在 20 世纪 80 年代以后转为减少倾向。与此特征形成鲜明对照的是非洲大陆,无论是干旱区还是半干旱区,近半各世纪降水均为减少趋势;欧亚大陆其变化又明显不同于上述两个地区。在欧亚大陆,增暖背景下半干旱地区降水为明显的减少趋势,而干旱地区降水却为增加,特别是在亚洲地区,其干旱和半干旱地区降水在近半个世纪的变化趋势完全相反。如果以 1980 年为界,在亚洲的半干旱地区,降水平均减少了大约 8 mm,而在干旱地区降水却增加了平均约 4.5 mm,干旱地区与半干旱地区降水的变化趋势完全相反,这一现象的形成原因有待于深入研究^[2, 13]。

3 区域干旱化的形成机理研究

前面提到,尽管干旱化形成机理非常复杂,但无外乎两种原因:一个是气候过程的自然变化,另一个是人类活动的影响,其本质内容就是干旱化的形成既有区域尺度地气相互作用的影响,又有大尺度气候背景的变化,其机理研究的难点是怎样区分其中的自然变化过程和人类活动的影响。围绕这个国际前沿的科学问题,新的“973”项目“北方干旱化与人类适应”关于干旱化机理研究着重三个方面进行:(1)区域干旱化形成的大尺度背景;(2)区域尺度地表过程和大气相互作用的观测实验;(3)用于干旱化机理研究的区域模式发展。下面将介绍上述三个方面取得的进展和初步的成果。

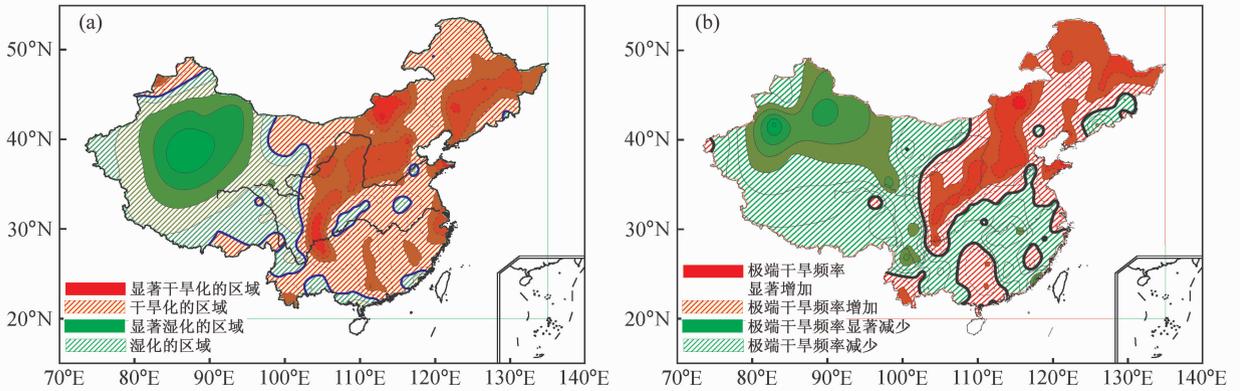


图1 1951~2007年中国区域干湿变化(a)和极端干旱频率(b)的变化趋势

Fig. 1 Variation trends of (a) dry-wet change and (b) extreme drought frequency over China from 1951 to 2007

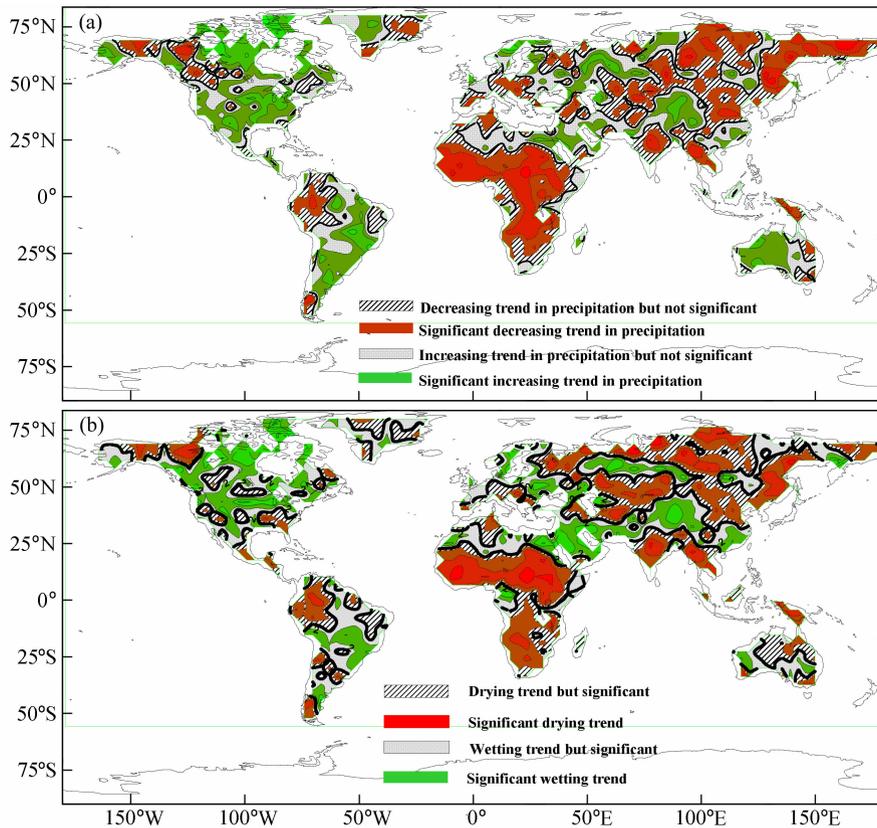


图2 1951~2002年全球(a)降水和(b)地表湿润指数变化趋势的空间分布(引自文献[16])。(a)红色为减少趋势,绿色为增加趋势; (b)红色为变干趋势,绿色为变湿趋势

Fig. 2 The spatial patterns of variation trends of global (a) precipitation and (b) surface wet index (SWI) from 1951 to 2002 (from reference [16]). Red areas are reduction trend, and green increase trend in (a); red means drying, and green wetting in (b)

3.1 区域干旱化地气相互作用的长期观测实验

在“973”项目“我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测”的支持下,于2002年10月在吉林通榆设立通榆观测实验站并投入使用,该站位于吉林省白城市通榆县新华乡的行政地域内,地理位置为

(44°25'N, 122°52'E),处在白城至双辽沙丘覆盖的冲积平原区,平均海拔高度为184 m,实验区地形非常平坦,以新华乡为中心,分别针对典型半干旱区农业和退化草地生态系统建立两个观测点,两点空间距离在5 km左右^[17],被列为国际协同观测计

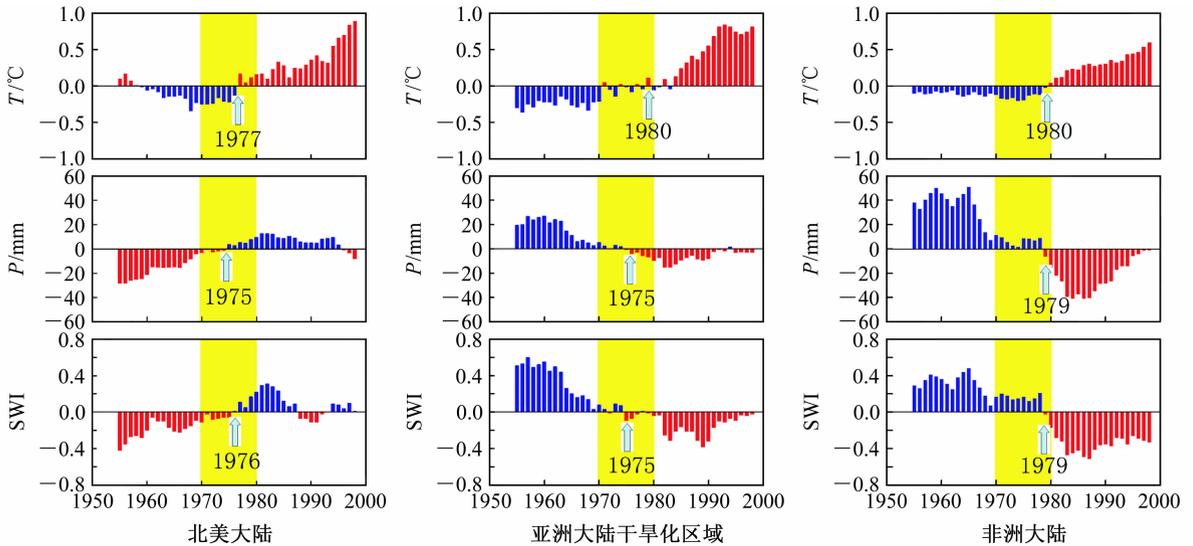


图3 1951~2002年各典型地区距平变化的特征

Fig. 3 Anomaly change in different typical regions from 1951 to 2002

划 CEOP (Coordinate Enhanced Observing Period)^[18] 的基准站, 是继中国科学院碳循环重大项目 (www.chinaflux.org) 之后为数不多的对地气界面物质和能量变换过程进行长期监测的野外实验站。该站从 2002 年开始, 持续观测至今, 取得长达 5 年以上的连续观测资料, 并实现同国际 CEOP 的数据共享, 为研究半干旱地区地气相互作用提供了宝贵的数据。设立这个站的目的有以下三个方面:

(1) 探索土地利用等与人类活动有关的变化对干旱化的作用;

(2) 认识半干旱地区不同生态系统条件下, 水汽、CO₂ 和地表热通量的变化特征;

(3) 对比不同下垫面条件下的物质和能量传输过程的差异。

通过长期观测实验对这些问题的深入研究将有助于进一步认识干旱化的形成机理, 为人类活动的有序适应提供科学基础。图 4 为通榆站草地和农田连续观测地表的能量和热量的变化。

3.2 干旱化形成的大尺度气候背景

20 世纪 50 年代, Namias^[20] 就发现观测的北太平洋海表温度与大气环流异常对天气和气候变化有重要的作用; 大量的研究指出海温变化与全球和区域气候变化关系密切^[21~24]。近年来, 关于海洋上几大涛动, 如南方涛动 (SO)、北大西洋涛动 (NAO) 和北太平洋年代际振荡 (PDO) 等与气候变化的关系引起了广泛的关注。符淙斌等^[25] 发现

冬季北大西洋涛动指数与中国东部旱涝指数有很好的滞后相关; Sahel 地区区域气候变化与大尺度气候背景关系的研究也取得很大的进展^[26~29], 结果表明大尺度海洋的强迫是 20 世纪后半叶 Sahel 地区少雨的主要原因。这些研究主要关注的是大尺度海温变化对气候各分量影响的分别研究, 如对降水和温度变化的影响, 涉及的干湿变化问题也主要体现在降水的异常变化, 而对引起气候变化的综合效应, 如环境干湿变化与大尺度气候背景的关系却研究甚少^[16]。以下是考虑环境干湿变化与大尺度气候背景关系的研究结果。

符淙斌等^[25] 发现, 中国东部特别是北部地区平均旱涝指数 (FDI) 在落后北大西洋涛动指数 (NAOI) 1~3 年的情况下, 两者有很好的正相关关系。对未滑动序列, 相关系数分别为 0.106、0.097 和 0.134, 接近 0.01~0.001 的显著性水平。10、20 年滑动平均相关, 北区 (指 35°N 以北、100°E 以东) 的相关系数信度水平几乎都达到 1‰ 以上; 中区 (指 25°N~35°N 之间)、南区 (华南) 负相关也在 0.01 或 0.05 以上显著性水平, 表明 NAOI 与中国东部 FDI 存在某种遥相关关系。FDI 与 NAOI 的最佳相关时段在 1636~1742 年 (小冰期期间), 两者 5 年滑动平均相关系数在 0.4 以上; 在最近 530 年中, 不同时期存在非常显著的旱、涝趋势变化及明显的年代际和世纪尺度的突变变化。但 NAOI 重建序列在最近 400 年间, 没有达到显著性

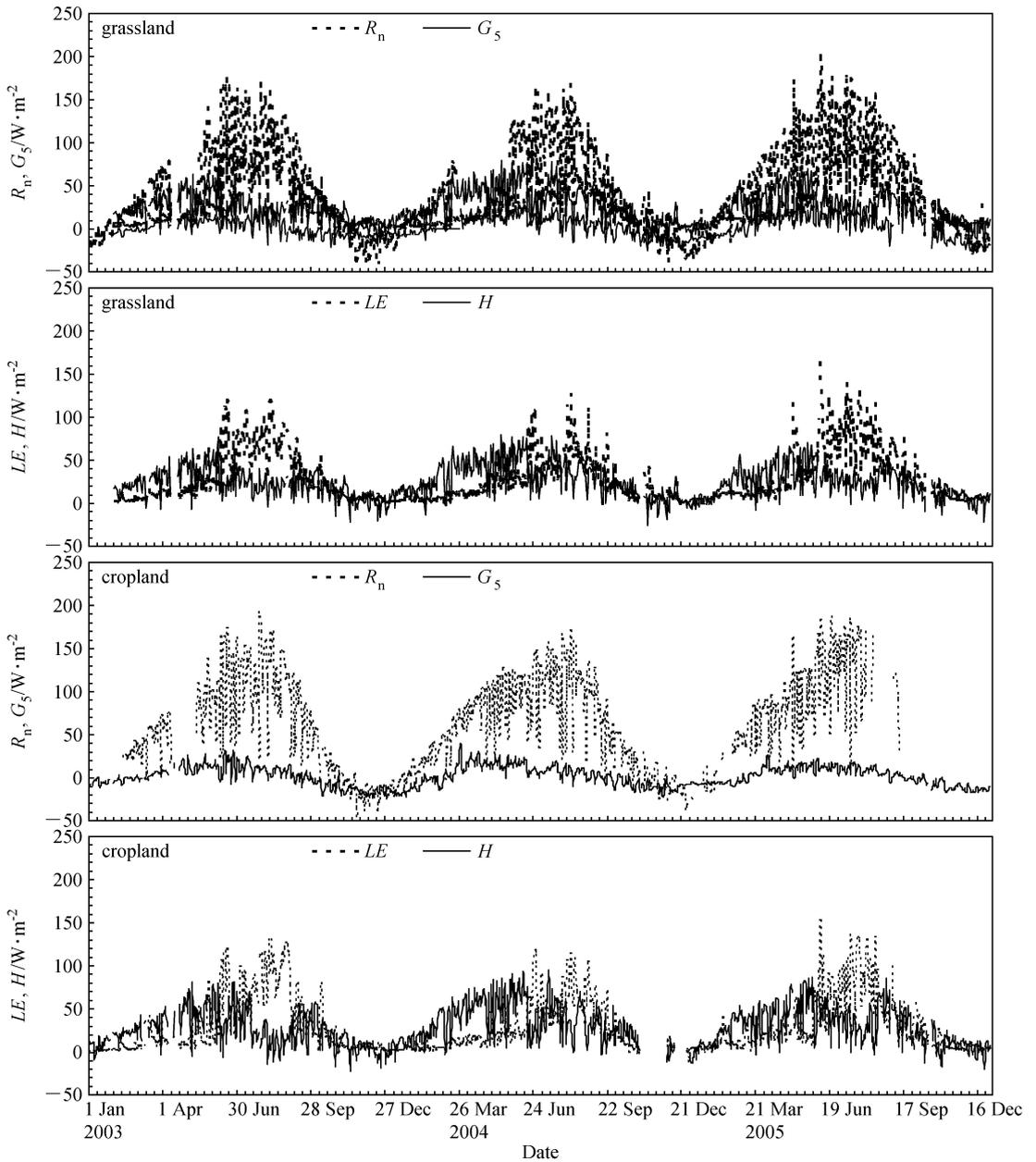


图 4 2003~2005 年通榆站草地和农田观测的日平均的净辐射 (R_n)、感热 (H) 和潜热 (LE) 通量与土壤热通量 (G_s) (引自文献[19])
Fig. 4 The observed daily mean net radiation (R_n), sensible heat flux (H), latent heat flux (LE) and soil heat flux (G_s) at grassland and cropland site of Tongyu station from 2003 to 2005 (from reference [19])

水平的上升或下降的趋势变化，年际和年代际尺度的突变现象较我国 FDI 要频繁得多。

研究还发现^[16]，从区域平均来讲，北美大陆和非洲大陆的干湿变化与北太平洋年代际振荡 (PDO) 的关系最为密切。在近半个世纪，PDO 的暖位相对应北美大陆的湿时段、非洲大陆和欧亚大陆的干时段；同样的现象发生在我国的华北，近半个世纪的干湿变化与 PDO 有非常一致的对应关系，

PDO 的冷位相对应华北低温、多雨和湿润时段，暖位相对应温暖、少雨和干旱时段 (图 5)^[30, 31]，华北的持续干旱与东亚季风减弱所引起的水汽输送量减少有关^[32]。而 PDO 与南美大陆和澳洲大陆各种时间尺度的干湿变化没有显著的相关关系。南方涛动 (SO) 和全球干湿变化的相关关系类似 PDO，但在非洲大陆和澳洲大陆，从年际变化到年代际变化，其相关性都是显著的。与 PDO 和 SO 相比，

NAO 和全球环境干湿变化相关最显著的地区仅限于欧亚大陆, 但仅集中在 5 年以上时间尺度的变化, 与其余大陆干湿变化在同期不存在明显的相关关系。可以认为, 按相关程度大小排列, 和全球年代际干湿变化相关关系从大到小依次为 PDO、SO 和 NAO。因此, 在研究全球或者区域环境干湿的年代际或者以上尺度变化时应重点考虑 PDO 与 SO 的变化。同时, PDO、NAO 和 SO 的年代尺度变化的振幅和位相是否在全球变暖背景下将发生变化是一个需要研究的问题^[16]。

以上研究结果说明, 全球和区域干旱化与大尺度气候背景有着密切的关系, 这些关系具有明显的区域差异, 而干旱化与大尺度背景相互联系的基本过程和物理图像是什么至今尚不清楚, 人类活动和大尺度气候背景相互作用的机理是什么, 这些问题是定量估算大尺度气候背景和人类活动在干旱化形成过程中的相对贡献和深化对干旱化机理认识的关键科学命题。

3.3 干旱化形成机理的数值模拟研究

区域环境系统模式的发展是研究干旱化形成机理的一个有效工具。在前一个“973”模式发展的基础上, 区域模式的研究取得了进展。为了改善模式对水、土、气、生过程及其相互作用的模拟能力, 一个具有并行计算性能的第二代区域环境系统集成模式 (RIMES Version 2.0) 被发展^[5], 已经进行 20 年连续模拟研究, 目标是建立一个包含物理过程、化学过程和生物过程以及人类过程的地球系统区域模式, 作为干旱化机理研究和趋势预测及有序人类活动的数值虚拟实验的工具, 同时也是主持和参与亚洲区域模式比较国际计划 (RMIP for Asia)^[33]的基础平台。关于这方面的研究进展已经进行过介绍^[1, 3, 5], 这里将不再赘述。下面将简单介绍正在发展的区域地气耦合柱状模式。

为了能够模拟单站地气相互作用的特征, 结合 CEOP 实验观测数据的应用, 我们在区域环境系统模式基础上发展了一个耦合 BATS (Biosphere Atmosphere Transfer scheme) 的区域柱状气候模式, 针对通榆实验观测区域进行模拟实验^①。模式中心点设为通榆站 (44.42°N, 122.87°E), 网格距为 20 km, 海拔 184 m, 下垫面植被为农田或者草地。采

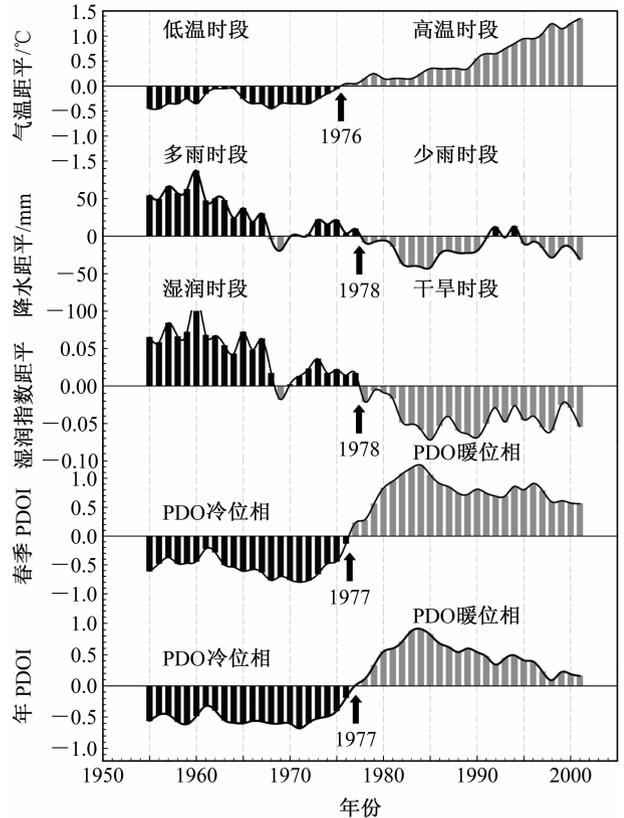


图5 华北区域平均 (a) 温度距平、(b) 降水距平、(c) 湿润指数距平、(d) 春季太平洋年代际振荡指数 (PDOI) 和 (e) 年太平洋年代际振荡指数 (PDOI) 的变化 (引自文献^[31])

Fig. 5 Regional mean (a) air temperature anomaly, (b) precipitation anomaly, (c) surface wet index (SWI) anomaly, (d) spring Pacific Decadal Oscillation Index (PDOI) and (e) annual PDOI variation (from reference ^[31])

用 NCEP 再分析资料作为侧边界积分一年, 与观测数据进行对比。模拟研究发现, 耦合了大气模式后, BATS 模拟的感热通量在夏季明显大了很多, 且热通量则偏小, 尤其八九月份, 潜热偏差较大; 同时, 模拟的降水偏小, 偏差也在八九月份最大。耦合之后相对于 BATS 独立试验, 偏高的量有地表气温、比湿和感热通量, 偏低的量有潜热通量和降水。地气之间的相互作用导致耦合之后对感热和潜热的偏差放大了, 降水的偏差也较大, 较好的模拟地表热通量可以进一步改进气温和降水的模拟。由此看来, 为了更客观地模拟半干旱地区地气相互作用的特征, 柱状耦合模式需要进一步的改进和完善。

① 孟洋新, 符淙斌. 一个区域地气耦合柱状模式的发展. 拟投稿

4 总结和展望

以上概括介绍了“973”项目“我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测”(1999~2004年)和正在执行的“973”项目“北方干旱化与人类适应”有关区域干旱化的检测事实和机理分析的研究进展,给出了近代我国北方干旱化的空间分布格局,揭示干旱化的转折性特征及其与气候变化的联系,指出区域增暖对干旱化强度变化的影响。

值得注意的是,在增暖背景下干旱化进程过程中的转折性变化和突变特征及其人类活动的贡献仍然是今后关于北方干旱化形成机理研究和预测的关键科学问题,围绕这个科学问题需要进一步从两个方面进行深入的研究:(1)区域干旱化与大尺度气候背景联系的基本物理过程;(2)区域人类活动(如土地利用变化等)对干旱化贡献的定量估算。针对这些问题我们需要在今后项目执行过程中加强三个方面的研究工作:(1)北方地区地-气相互作用实验观测的集成及协同研究;(2)遥感信息在干旱化检测及机理研究中的应用;(3)地球系统区域模式的发展和完善。

总之,干旱化的形成是一个复杂的多学科问题,既包含水、土、气、生变化及相互作用的自然过程,又受区域人类活动的严重影响,多学科交叉集成研究是认识干旱化的有效途径,随着地球系统观测技术的发展和认识的提高,区域干旱化机理研究取得的重要进展将为干旱化趋势的预测提供重要的科学基础。

参考文献 (References)

[1] 符淙斌, 安芷生. 我国北方干旱化研究——面向国家需求的全球变化科学问题. *地质学前沿*, 2002, **9**: 271~275
Fu Congbin, An Zhisheng. Study of aridification in northern China—A global change issue facing directly the demand of nation. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2002, **9**: 271~275

[2] 符淙斌, 温刚. 中国北方干旱化的几个问题. *气候与环境研究*, 2002, **7** (1): 22~29
Fu Congbin, Wen Gang. Several issues on aridification in the northern China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7** (1): 22~29

[3] 符淙斌, 安芷生, 郭维栋. 我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究 (I): 主要研究成果. *地球科学进展*, 2005, **20** (11): 1157~1166
Fu Congbin, An Zhisheng, Guo Weidong. Evolution of life-

supporting environment in our nation and the predictive study of aridification in northern China (I): Main scientific issues and achievements. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 2005, **20** (11): 1157~1166

[4] 符淙斌, 安芷生, 郭维栋. 我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究 (II): 研究成果的创新性及项目实施效果. *地球科学进展*, 2005, **20** (11): 1168~1175
Fu Congbin, An Zhisheng, Guo Weidong. Evolution of life-supporting environment in our nation and the predictive study of aridification in northern China (II): Scientific innovations and its contribution to national demands. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 2005, **20** (11): 1168~1175

[5] 符淙斌, 延晓冬, 郭维栋. 北方干旱化与人类适应——以地球系统科学观回答面向国家重大需求的全球变化的区域响应和适应问题. *自然科学进展*, 2006, **16** (10): 1216~1223
Fu Congbin, Yan Xiaodong, Guo Weidong. Aridity trend in northern China and human adaptation—An solution to the problem of the regional response and adaptation of global change affronting national key needs according to earth system science view. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2006, **16** (10): 1216~1223

[6] Dai A G, Trenberth K E, Qian T. A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870 - 2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming. *J. Hydrometeorol.*, 2004, **5**: 1117~1130

[7] 王志伟, 翟盘茂. 中国北方近 50 年干旱变化特征. *地理学报*, 2003, **58** (增刊): 61~68
Wang Zhiwei, Zhai Panmao. Climate change in drought over northern China during 1950 - 2000. *Journal of Geographical Sciences* (in Chinese), 2003, **58** (Supplement): 61~68

[8] 马柱国, 符淙斌. 中国干旱和半干旱带的 10 年际演变特征. *地球物理学报*, 2005, **48** (3): 519~525
Ma Z G, Fu C B. Decadal variations of arid and semi-arid boundary in China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48** (3): 519~525

[9] 马柱国. 我国北方干湿演变规律及其与区域增暖的可能联系. *地球物理学报*, 2005, **48** (5): 1011~1018
MA Zhuguo. Dry/wet variation and its relationship with regional warming in arid-regions of northern China. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), **48** (5): 1011~1018

[10] 任国玉, 徐铭志, 初子莹, 等. 近 54 年中国地面气温变化. *气候与环境研究*, 2005, **10**: 717~727
Ren Guoyu, Xu Mingzhi, Chu Ziyang, et al. Changes of surface air temperature in China during 1951 - 2004. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10**: 717~727

[11] 马柱国. 黄河径流的历史演变规律及成因. *地球物理学报*, 2005, **48** (6): 1270~1275
Ma Zhuguo. Historical regular patterns of the discharge in the Yellow River and the cause of their formation. *Chinese J. Geophysics* (in Chinese), 2005, **48** (6): 1270~1275

- [12] 马柱国, 黄刚, 甘文强, 等. 近代中国北方干湿变化趋势的多时间尺度特征. *大气科学*, 2005, **29** (5): 671~681
Ma Zhuguo, Huang Gang, Gan Wenqiang, et al. Multi-scale temporal characteristics of the dryness/wetness over northern China during the last century. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (5): 671~681
- [13] 马柱国, 符淙斌. 1951~2004 年我国北方干旱化的基本事实. *科学通报*, 2006, **51** (20): 2429~2439
Ma Zhuguo, Fu Congbin. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2006, **51** (20): 2429~2439
- [14] Wang H J. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's. *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18**: 376~386
- [15] Wu L X, Lee D E, Liu Z Y. The 1976/77 North Pacific climate regime shift; The role of subtropical ocean adjustment and coupled ocean-atmospheric feedbacks. *J. Climate*, 2005, **18**: 5125~5140
- [16] 马柱国, 符淙斌. 20 世纪下半叶全球干旱化的事实及其与大尺度背景的联系. *中国科学 (D 辑)*, 2007, **37**: 222~233
Ma Zhuguo, Fu Congbin. Evidences of drying trend in the global during the later half of 20th century and their relationship with large-scale climate background. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2007, **37** (2): 222~233
- [17] 刘辉志, 董文杰, 符淙斌, 等. 半干旱地区吉林通榆“干旱化和有序人类活动”长期观测实验. *气候与环境研究*, 2004, **9**: 378~389
Liu Huizhi, Dong Wenjie, Fu Congbin, et al. The long-term field experiment on aridification and the ordered human activity in semi-arid area at Tongyu, Northeast China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9**: 378~389
- [18] Bosilovich M G, Lawford R. Coordinated enhanced observing period (CEOP) international workshop. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2002, **83** (10): 1495~1499
- [19] Fu Congbin, et al. *Regional Climate Study of China in Book Series of Regional Climate*. Germany: Springer Press, 2008 (in press)
- [20] Namias J. Recent seasonal interactions between North Pacific waters and the overlying atmospheric circulation. *J. Geophys. Res.*, 1959, **64**: 631~646
- [21] Hoerling M, Kumar A. The perfect ocean for drought. *Science*, 2003, **299**: 691~694
- [22] McCabe J G, Palecki M A, Betancourt J L. Pacific and Atlantic ocean influences on multidecadal drought frequency in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 2004, **101** (12): 4136~4141
- [23] Hidalgo H G. Climate precursors of multidecadal drought variability in the western United States. *Water Resources Research*, 2004, **40**, W12504, doi: 10.1029/2004WR003350
- [24] Lau K M, Lee J Y, Kim K M, et al. The North Pacific as a regulator of summertime climate over Eurasia and North America. *J. Climate*, 2004, **15**: 819~833
- [25] 符淙斌, 曾昭美. 最近 530 年冬季北大西洋涛动指数与中国东部夏季旱涝指数之联系. *科学通报*, 2005, **50**: 1512~1522
Fu Congbin, Zeng Zhaomei. Correlations between North Atlantic oscillation index in winter and eastern China flood/drought index in summer in the last 530 years. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2005, **50** (14): 1512~1522
- [26] Janicot S, Moron V, Fontaine B. Sahel drought and ENSO dynamics. *Geo. Res. Lett.*, 1996, **23** (5): 515~518
- [27] Dai A G, Trenberth K E, Karl T R. Global variations in droughts and wet spells: 1900-1995. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25** (17): 3367~3370
- [28] Lu J, Delworth T L. Oceanic forcing of the late 20th century Sahel drought. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**, L22706, doi: 10.1029/2005GL023316
- [29] Held I M, Delworth T L, Lu J, et al. Simulation of Sahel drought in the 20th and 21st centuries. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 2005, **102** (50): 17891~17896
- [30] 马柱国, 邵丽娟. 中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关系. *大气科学*, 2006, **30** (3): 464~474
Ma Zhuguo, Shao Lijuan. Relationship between dry/wet variation and the Pacific Decade Oscillation (PDO) in Northern China during the last 100 years. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (3): 464~474
- [31] 马柱国. 华北干旱化趋势及转折性变化与太平洋年代际振荡的关系. *科学通报*, 2007, **52** (10): 1199~1206
Ma Zhuguo. The interdecadal trend and shift of dry/wet over the central part of North China and their relationship to the Pacific Decadal Oscillation (PDO). *Chinese Sci. Bulletin*. (in Chinese), 2007, **52** (10): 1199~1206
- [32] 李新周, 马柱国, 刘晓东. 中国北方干旱化年代际特征与大气环流的关系. *大气科学*, 2006, **30** (2): 277~284
Li Xinzhou, Ma Zhuguo, Liu Xiaodong. Inter-decadal characteristics of aridification over Northern China associated with the variation of atmospheric circulation during the past 50 years. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (2): 277~284
- [33] Fu C B, Wang S Y, Xiong Z, et al. Regional climate model inter-comparison project for Asia. *Bulletin of American Meteorological Society*, 2005, **86** (2): 257~266