

# 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

马柱国<sup>①②\*</sup> 符淙斌<sup>①②</sup>

(① 中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029; ② 中国科学院大气物理研究所东亚中心, 北京 100029)

**摘要** 利用 CRU(Climatic Research Unit)的全球格点月降水及月平均气温资料, 通过计算地表湿润指数分析了 1951~2002 年全球干湿变化趋势. 重点对比研究了北美大陆、南美大陆、欧亚大陆、非洲大陆及澳洲大陆干湿变化的特征及差异, 并在此基础上对各大洲乃至全球的干湿变化与影响气候变化的大尺度背景的相关关系进行了分析. 结果表明, 在增暖背景下, 20 世纪下半叶全球干湿变化趋势具有明显的区域差异, 非洲大陆、欧亚大陆、澳洲大陆和南美大陆近 52 年主要以干旱化趋势为主, 尤以非洲大陆和欧亚大陆最为剧烈. 北美大陆在 1976 年以后表现为变湿趋势, 南美大陆存在 30 年左右的干湿振荡周期, 但最近仍然处于干化的时段, 澳洲大陆的变化与之类似. 研究还表明, 增暖已经改变了全球环境干湿变化的分布格局, 南美大陆和澳洲大陆尽管降水为增加趋势, 但仍然表现为干旱化趋势, 其中温度升高是其表现为干旱化特征不可忽视的原因. 全球环境的干湿变化与大尺度背景密切相关: 非洲大陆、欧亚大陆的干旱化趋势、北美大陆的湿化趋势与北太平洋年代际振荡(PDO)显著相关; 而南美大陆、澳洲大陆干湿的年代际振荡与南方涛动指数(SOI)的年代际变化一致.

**关键词** 全球干湿变化 干旱化 大尺度背景 年代际变化 相关关系

过去的工作通过对降水量变化的研究揭示了区域干旱的诸多事实. Nicholson<sup>[1]</sup>研究发现西非的半干旱地区降水持续 30 年减少, 其中Sahel地区的降水量减少了 20%~40%; Dai等<sup>[2]</sup>认为从 20 世纪 50~80 年代, Sahel的降水存在明显减少的趋势. 张庆云等<sup>[3]</sup>发现中国华北的降水与非洲次大陆有相似的变化, 并进一步指出华北干旱的原因与大气环流的异常有关<sup>[4]</sup>. 类似的研究还有很多<sup>[5-8]</sup>, 这些研究为认识和理解全球或者区域环境干湿变化提供了相关的重要证据, 但仅从降水的变化无法体现增暖对环境干湿变化的作用, 因为它只是作用于地表干湿变化的一个重要

因子, 但不唯一. 随着全球增暖的加剧, 升温所引起的蒸发潜力变化已对地表湿润状况产生了重要作用<sup>[2,9-11]</sup>. 因而, 不得不去寻求一种较客观的指标来表征环境的干湿变化. Palmer<sup>[12]</sup>早在 1965 年就提出了一个能够用于干旱检测及分析的指标——Palmer 干旱指数(Palmer Drought Severity Index, 简称PDSI), 这是目前在全球或区域干旱检测中应用最广泛的干旱指标<sup>[2,13]</sup>, 但它的局限性在于对计算方案中参数的区域性非常敏感, 加之计算方案中土壤湿度的取值因观测资料缺乏而存在很大的不确定性, 这很大程度上限制了PDSI在全球及区域干湿变化检测中的应

收稿日期: 2006-06-26; 接受日期: 2006-11-14

国家重大基础研究发展计划(批准号: 2006CB400504)、中国科学院知识创新工程重要方向性项目(批准号: KZCX3-SW-229)和国家自然科学基金项目(批准号: 40375028)资助

\* E-mail: [mazg@tea.ac.cn](mailto:mazg@tea.ac.cn)

用。

地表湿润指数( $H$ )近年来在中国区域干湿变化的检测中得到很好的应用<sup>[9,11]</sup>,特别是对我国北方干旱、极端干旱和干湿变化趋势的研究显示出独特的应用价值,它的优点是既考虑降水变化又包含温度变化的影响,计算方案中包含了地表水分收支的两个重要过程降水和潜在蒸发,计算方便,所需资料少。尤其适合于当前资料条件下全球干湿变化问题的研究。

在过去30年,关于干旱形成机理的研究大致沿着两个思路展开,一个是局地陆气相互作用对干旱形成的相对贡献,这方面的研究主要是以Charney<sup>[14]</sup>为代表的工作,这也是人类活动影响气候及环境变化的开创性研究,随后的研究也支持了这种观点<sup>[15-17]</sup>,这些研究的共同点就是强调了陆地地表变化(包括土地利用与植被变化)与大气的相互作用是形成干旱化的重要因素;另一种观点认为,非洲Sahel地区长期干旱化的形成源于全球海洋温度的变化<sup>[18-20]</sup>。最近,Giannini等<sup>[21]</sup>成功地用数值模拟的方法再现了海温异常对Sahel地区降水的重要作用,进一步为第二种观点提供了旁证。这两种观点争论的焦点是类似于Sahel、中国华北等地区的长达20~30多年持续性干旱的形成机理是局地的陆气相互作用还是大尺度海洋温度变化的强迫作用,时至今日,还没有令人信服的定论,但所达成的共识是Sahel的持续气候干旱是大尺度海温变化的结果,而局地的陆气相互作用对这种干旱气候将起到维持和加强的作用<sup>[21-23]</sup>。Hoerling等<sup>[24]</sup>的研究发现,1998~2002年美国、南欧及西南非洲的持续干旱与全球海洋温度变化密切相关,受这些研究的启发,人们在海温及海洋上的大尺度气候背景变化与陆地上降水的年代际尺度变化的关系研究方面取得了重要进展,特别是对三大涛动和陆地气候变化关系的研究<sup>[25-27]</sup>,值得关注的是三大涛动对降水变化的作用存在明显的区域和时间尺度差异。纵观过去,在研究全球或区域干湿变化的规律及其与大尺度背景的关系时,往往都是利用某单一指标(如降水)建立与大尺度背景场的联系,这样所得的结果就无法体现温度变化对环境干湿变化的作用,特别是增暖背景下全球干湿环境变化与大尺度

背景的关系。

本文通过分析地表湿润指数的变化来揭示增暖背景下全球干湿环境变化的趋势、各大陆干湿变化的年代际特征和趋势及其差异;最后,在事实分析的基础上,通过分析地表湿润指数的年代际变化和北大西洋涛动(NAO)、北太平洋年代际振荡(PDO)和南方涛动(SO)的相关关系深入了解大尺度气候背景对全球干湿变化的影响。

## 1 资料和分析方法

### 1.1 资料

文中所用的气候资料(月降水和月平均表面气温)为英国东Anglia大学环境科学学院CRU(Climatic Research Unit)提供的月降水和月平均气温资料<sup>[28]</sup>,其空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ,时间长度为1901~2002年。PDO指数数据来自于文献<sup>[29]</sup>。NAO指数和SO指数分别由Hurrell<sup>[30]</sup>和Können等<sup>[31]</sup>所提出,本文所用的NAO指数和SO指数数据均源于CRU的数据库<sup>1),2)</sup>。三个涛动指数均为月数据,年指数通过12个月的算术平均计算得到,分别记为PDOI,NAOI和SOI。

### 1.2 分析方法

关于地表湿润指数的建立,文献<sup>[9]</sup>已有详细的介绍,这里只简要地说明该指数的物理意义。它的基本原理就是考虑了影响地表干湿状况变化的两个主要影响因子,降水和地表蒸发潜力(潜在蒸发)的变化。降水增多有利于地表变湿,而地表蒸发潜力增大可使地表变干。年地表湿润指数 $H$ 的定义为:

$$H = \frac{P}{P_{e\text{年}}}$$

其中 $P$ 为观测的年降水总量,年潜在蒸发力 $P_{e\text{年}} = \sum_{i=1}^{12} P_{ei}$ , $P_{ei}$ 为第 $i$ 个月的潜在蒸发力,可由经过改进的Thornthwaite<sup>[32]</sup>方法求得。

趋势检验的方法为常用的Mann-Kendall方法<sup>[33]</sup>(简称MK法)。该方法的基本原理就是假设分析要素的原序列为平稳序列,各样本之间相互独立,用原序列通过与前期样本的比较建立新的时间序列,

1) <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/nao.htm>

2) <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/soi.htm>

然后对新的序列进行标准化,再根据其标准化值的大小判断原序列是否存在变化趋势.具体做法是,当标准化变量(检验值)的绝对值大于 1.96 时,变化趋势可达到 95% 的信度,被认为存在显著的变化趋势;正值表示增大趋势,反之则为减小趋势.

## 2 结果分析

### 2.1 全球及干湿变化趋势的空间格局

Dai 等<sup>[2]</sup>最近的研究指出:自从 20 世纪 70 年代以来,全球陆地上干旱区的面积增加了一倍多,而引起这种现象的主要原因是 20 世纪 80 年代中期以后的增暖.相关研究<sup>[10]</sup>也证明了增暖背景下中国干旱和半干旱区域的范围正在向东南方向扩展.众所周知,除少数地区外,增暖属于全球性的.然而,近半个世纪降水的变化趋势在全球的分布却具有很大的不确定

性<sup>[34]</sup>,那么由温度升高和降水的异常共同作用下的全球干湿变化的时空分布格局是什么?区域间干湿变化的差异如何?这些问题目前尚不清楚,特别是大陆尺度干湿变化的比较.下面将针对这些问题展开分析,着重研究各大陆干湿变化的特征及其差异.

图 1 为利用 MK 方法所计算的 1951~2002 年全球年降水(下文中的降水均指年降水)和年地表湿润指数变化趋势(下文中的地表湿润指数均指年地表湿润指数)的空间分布.为了突出降水和地表湿润指数的年代际变化趋势,首先对降水和地表湿润指数的原始序列进行 5 年的滑动平均,其次利用 MK 方法对滑动序列进行趋势分析.分析图 1(a)可以发现,美洲大陆(包括北美大陆和南美大陆)绝大多数地区的降水量在近 50 年都是增加的趋势,仅有美国的阿拉斯加、

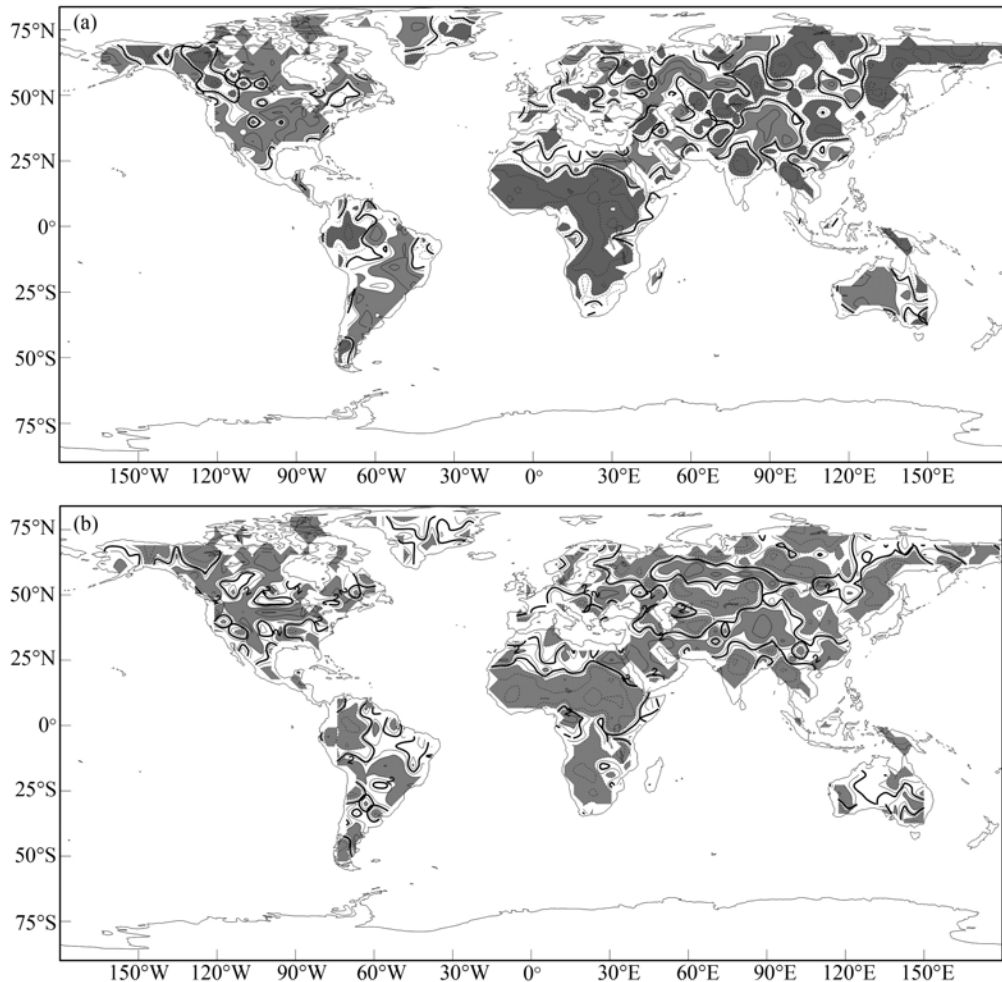


图 1

(a) 全球降水变化趋势;(b) 全球地表湿润指数变化趋势. 5 年滑动平均,趋势用 MK 方法计算.实线区为降水增加((a)中)和变湿((b)中)区域,虚线区为降水减少((a)中)和变干((b)中)区域,阴影区为通过 95% 信度检验的区域(MK 检验值的绝对值大于 1.96)

加拿大西部和南美大陆的西北部等小部分地区降水为减少趋势。然而在欧亚大陆和非洲大陆的大部分地区降水却为明显减少趋势,表现出与北美大陆完全不同的趋势特征。如果把欧亚大陆以  $60^{\circ}\text{E}$ (正好位于欧洲和亚洲的分界线处)为界分成东西两部分,那么以西大部分地区近 52 年降水为增加趋势,这包括整个欧洲地区和非洲大陆北部撒哈拉沙漠地区,而降水为减少趋势的地区主要位于地中海沿岸;在  $60^{\circ}\text{E}$  以东,大部分地区降水的变化趋势检验值为负,说明降水变化的趋势主要以减少为主。而且从整个欧亚和非洲大陆的总特征来看,降水趋势为增加的地区大致集中在  $25^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$  和  $50^{\circ}\text{N}$  纬度带上,形成两个沿纬带分布的狭窄带状区域。其中位于  $25^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$  的降水增加带在  $60^{\circ}\text{E}$  以西主要位于  $25^{\circ}\text{N}$  附近,而在  $60^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{E}$  之间,这个降水增加带北移至  $25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$  之间;在  $80^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$  之间,降水增加区域的南界北移至  $30^{\circ}\text{N}$  且范围扩大,北界扩展到  $45^{\circ}\text{N}$ ,这个区域正好位于我国的西北西部。所以,我国西北西部降水近 20 多年的增加趋势<sup>[35]</sup>并不是一个孤立的局地特征,而是一个大尺度变化的现象;在  $100^{\circ}\text{E}$  以东地区,降水为增加趋势的区域又南撤到  $32.5^{\circ}\text{N}$ (长江沿线)以南,在中国东部形成了一个南部降水增加而北部降水减少的空间格局,另外大尺度降水增加位置在这个地区的变动可能与青藏高原的大地形作用有关。 $100^{\circ}\text{E}$  以东的中高纬度地区,除蒙古国的北部以及俄罗斯中部的局部地区有小范围的降水增加外,  $35^{\circ}\text{N}$  以北地区降水总量以减少趋势为主,其中俄罗斯的远东地区、我国华北及西北的东部为降水显著减少的地区。非洲大陆  $20^{\circ}\text{N}$  以南地区是全球降水量减少最显著且范围最大的地区,仅在赤道附近有小部分地区降水量为增加趋势。在澳洲大陆,东、西部为相反趋势,其中中西部降水有增加的趋势,而东部为减少趋势。

与图 1(a)比较可知,地表湿润指数近 52 年变化趋势的空间分布与降水的空间分布格局基本一致,但变湿(MK 的检验值为正)、变干(MK 检验值为负)的范围在某些地区存在较大差异。差异最显著为北、南美大陆和澳洲大陆。在北美大陆上,  $50^{\circ}\text{N}$  以南降水增加的地区占 90% 以上,而图 1(b)显示有超过 40% 的地区为变干,即在北美大陆大约有 30% 的地区尽管降水量为增加趋势但在年际尺度上却是变干趋势(地表湿润指数为减小趋势);在南美大陆,大约有 20%

的地区有类似的特征;澳洲大陆这种现象同样存在,大约有 40% 的地区尽管降水为增加趋势但却表现出干化趋势。在欧亚大陆,相对于图 1(a)上  $50^{\circ}\text{N}$  纬度带附近的降水增加区域,图 1(b)上的变湿范围明显缩小,说明这个多雨带上同样存在降水增多却变干的区域;  $25^{\circ}\text{N}$  带降水(图 1(a))的增加趋势和地表湿润指数(图 1(b))增大趋势的范围在图 1(a)和(b)上变化不大,但强度却有明显差异,图 1(b)上变湿的强度明显大于图 1(a)上降水增加的强度,这可能与这个纬度带上温度的降低有关(欧亚大陆的几个降温中心均分布在这个纬度带上)。对于非洲大陆,降水和地表湿润指数变化趋势的范围基本一致,但强度明显不同,特别是在 Sahel 及东非地区,地表湿润指数减小趋势的显著性程度和范围明显大于降水减少趋势的显著性程度和范围,而在南部非洲,地表湿润指数的范围和强度却弱于降水减少的强度。

为了客观地了解干湿变化的时空结构,进一步利用地表湿润指数的变化分析了全球环境干湿变化趋势的空间分布结构及区域特征。

从图 1(b)可以看出,在 20 世纪的后半叶,欧亚大陆、非洲大陆具有明显的大范围变干趋势(图中阴影部分),而撒哈拉沙漠、中东、中国西北西部及江南地区、欧亚大陆的西北部、俄罗斯中部部分地区、北美大陆大部区域和南美中南部地区为变湿趋势。所以在全球几乎一致增暖的背景下,干湿变化的时空分布却显著不同。如果按东西半球来看,东半球为变干趋势,而西半球为变湿趋势。除印度半岛和中南半岛外,欧亚大陆发生干旱化的地区主要位于  $35^{\circ}\text{N}$  以北地区,而中国大陆东部( $100^{\circ}\text{E}$  以东)地区,这个分界线稍偏南  $1^{\circ}$ ,其中干旱化趋势显著的地区主要位于俄罗斯远东地区、我国华北及西北东部、蒙古的南部地区,这些地区也正是全球增暖比较明显的地区。值得注意的是,从非洲大陆的撒哈拉地区、地中海东部的中东地区到中国西北西部这些显著变湿地区均位于极端干旱的地区。在美洲大陆,尽管存在有干旱化倾向的区域,但强度弱且范围小,主要以变湿趋势为主。南美大陆除西北地区外,其余地区为变湿趋势。澳洲大陆中南部和西南部为变湿趋势,其余地区为变干趋势。与 Dai 等<sup>[2]</sup>的研究结果比较(图 2),发现两者干旱化的中心均一致,但范围却有差异,图 1(b)的干旱化范围明显小于图 2 中干旱化的范围,特别是在非洲

大陆的北部、中亚、欧洲的西北部和南美大陆;图 1(b)中所给出的变湿范围明显大于图 2 的范围,其中位于欧亚大陆 25°~35°N 之间的变湿带在图 2 上并不存在.这可能与两者所采用的干旱指标不同有关. Palmer 干旱指数和地表湿润指数中潜在蒸发力的计算都采用了 Thornthwaite<sup>[32]</sup>的方案,但在 Palmer 干旱指数里考虑了土壤湿度变化的影响.从物理过程上来讲,Palmer 干旱指数更加完善,但由于全球观测土壤湿度数据的缺乏其取值还存在很大的不确定性.地表湿润指数的优点是计算简便,且考虑了温度变化对地表干湿变化的作用.虽然两种指标在表征干湿变化时某些地区存在差异,但他们的分析结果都说明了温度变化对全球环境干湿变化分布格局的重要影响.

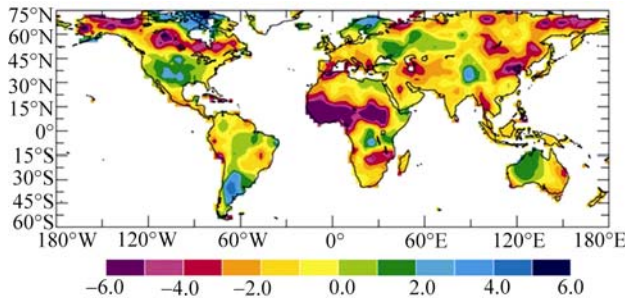


图 2 Palmer 干旱指数的变化趋势(1950~2002)

引自文献<sup>[2]</sup>

## 2.2 各大陆干湿过程的年代际趋势变化

上述分析说明,在增暖背景下,全球干湿变化的空间分布格局具有明显的区域差异.为了更清楚的表征各大陆干湿变化的年代际趋势特征并深刻认识各大陆之间的差异,把全球分为欧亚大陆、非洲大陆、北美大陆、南美大陆和澳洲大陆 5 个子区域来分别研究并进行对比分析.具体的作法是:先计算各大陆的区域平均地表湿润指数,然后对其进行 5 年的滑动平均,得到一个滑动平均的 5 个大陆的地表湿润指数序列,对这 5 个序列进行分析和比较以理解各大陆干湿变化的年代际趋势特征及其区域差异.

图 3 给出了 5 个子区域年地表湿润指数的距平变化和年降水与年地表湿润指数的线性趋势,其中左系列图为经 5 年滑动平均后相对 1961~1990 年的多年平均值的距平;右系列图为未平滑的降水和地表湿润指数的线性趋势.可以看出:北美(图 3(a))从 1976 年开始转为一个相对湿的时期,这个湿期持续了 12

年,之后又出现了一个弱的干期,持续时间较短,为 5 年,随后又转为一个弱的湿期并持续至今,其中降水与地表湿润指数的线性倾向均为增加趋势(图 3(a)),即该区域降水 1951~2002 年间为增加趋势,地表变湿;与北美大陆不同,南美大陆区域平均年降水和年地表湿润指数的线性倾向符号相异,降水变化的线性倾向为正,但地表湿润指数的线性倾向却为负,即降水为增加趋势而地表却是变干趋势.从图 3(c)可以看出,南美大陆的干湿变化在分析时段呈现明显的年代际振荡,周期大约在 30 年左右,如果以此周期推断,南美当前的干旱时段将在近期结束并有可能转入一个相对湿润的时段,但温度变化可能会增加这种转折性变化的不确定性,使得其发生转变的时间延迟.欧亚大陆(图 3(e))从 20 世纪 70 年代中后期转为一个干旱时段,从 1974 开始的 28 年间,仅有 4 年地表湿润指数为弱的正距平,其余年份均为负距平,说明该地区总体平均多数年份处于干旱时段,该地区年降水和年地表湿润指数的区域平均线性倾向均为负,以明显的降水减少和地表变干趋势为主要特征;在 1951~2002 年间,欧亚大陆经历一个由湿向干的转化过程,其转折点发生在 1974 年.非洲大陆(图 3(g))近半个世纪具有明显的由湿向干转换的特征.1979 年以前,非洲大陆处于一个相对较湿的时期,从 1979 年开始转为一个严重的干旱时段,澳洲大陆与南美大陆的干湿变化特征类似,在 1951~2002 年时段,是一个明显的干湿周期振荡过程,周期大约为 30 年左右.

概括而言,在分析时段 1951~2002 年,全球除北美大陆外,其余各大陆都处于干旱化的阶段,尤以非洲大陆的干旱化最为剧烈.北美大陆的干湿变化呈现出与其它大陆明显不同的特征,为变湿趋势.在南美大陆和澳洲大陆,尽管降水变化是增加趋势,但地表湿润指数却表现出干化(地表湿润指数为减小趋势)特征.

为了更清楚地了解各大陆的干湿变化趋势及变率,对 1951~2002 年 5 个大陆的降水、地表湿润指数和气温的线性趋势及降水与地表湿润指数的相对变率(线性趋势与 1961~1990 年 30 年平均值的比值)进行了分析,计算结果列于表 1.可以看出:非洲大陆和欧亚大陆降水变化的线性趋势均为减小,其中非洲大陆尤其显著,降水减少的相对变率达到-11%;

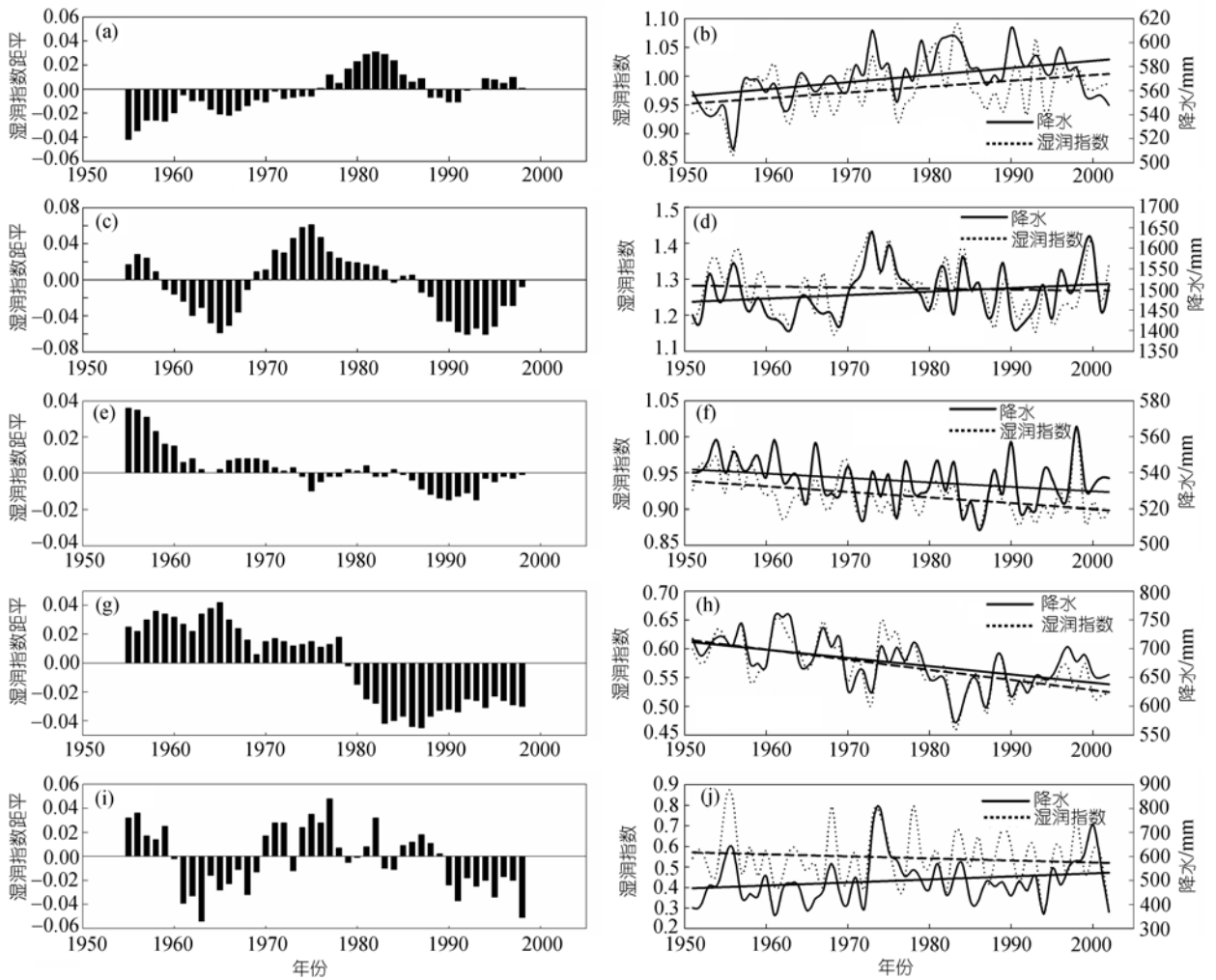


图 3 1951~2002 年地表湿润指数的距平变化及线性趋势  
(a), (b) 北美大陆; (c), (d) 南美大陆; (e), (f) 欧亚大陆; (g), (h) 非洲大陆; (i), (j) 澳洲大陆

表 1 1951~2002 年降水、地表湿润指数和气温的线性趋势<sup>a)</sup>

	降水			地表湿润指数			气温
	$\bar{P}$ /mm	$\nabla P$ /mm·10 a <sup>-1</sup>	相对变率/%	$\bar{H}$	$\nabla H (\times 0.01)/10$ a <sup>-1</sup>	相对变率/%	$\nabla T$ /°C·10 a <sup>-1</sup>
北美大陆	577	5.8	5	0.98	0.98	5	0.17
南美大陆	1497	8.3	3	1.28	-0.28	-1	0.08
欧亚大陆	533	-2.3	-2	0.91	-0.76	-4	0.19
非洲大陆	671	-14.0	-11	0.57	-1.72	-16	0.15
澳洲大陆	497	12.3	13	0.55	-1.00	-9	0.13

a)  $\bar{P}$  和  $\bar{H}$  为各大陆区域平均年降水和地表湿润指数的多年平均值;  $\nabla P$ ,  $\nabla H$  和  $\nabla T$  分别为降水、地表湿润指数和气温的线性趋势; 相对变率为线性趋势与 1961~1990 年 30 年平均值之比

欧亚大陆为-2%; 北美大陆、南美大陆和澳洲大陆降水均为增加趋势, 相对变率分别为 5%, 3%和 13%, 但地表湿润指数在各大陆上却表现出迥然相异的特征, 南美大陆和澳洲大陆区域平均降水和地表湿润指数的线性趋势完全相反, 即降水为增加趋势, 而地表湿润指数却是减小的, 也就是说, 降水量尽管是增

加趋势, 但这两个地区却是干化的趋势, 其中澳洲大陆变率的变化最大, 相对变率从降水的 13%变到地表湿润指数的-9%, 南美大陆也从 2%变到-1%. 在欧亚大陆和非洲大陆, 尽管两者的变率符号一致, 但强度却不同, 非洲大陆从降水的相对变率-11%到地表湿润指数的-16%, 强度增加了 5%, 欧亚大陆也增

加了 2%。北美大陆降水和地表湿润指数的相对变率基本相等。从温度的线性趋势来看, 5 个大陆区域平均均为升温趋势, 对照降水和地表湿润指数的相对变化, 不难看出气温的升高削弱了区域湿化的强度, 改变了干湿变化的结构(如南美和澳洲大陆), 加强了干旱化的强度(欧亚大陆和非洲大陆)。

归纳以上结果发现, 除北美大陆外, 降水和地表湿润指数的相对变率具有明显的差异, 而这种差异正说明了气温变化对各大陆区域平均干湿强度变化的影响, 因此, 在当前增暖背景下对全球和区域环境干湿变化的检测必须考虑气温变化的作用。

### 2.3 全球干湿变化与大尺度背景的相关分析

20 世纪 50 年代, Namias<sup>[36]</sup>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<sup>[24,26,37,38]</sup>。近年来, 关于海洋上几大涛动, 如PDO, NAO和SO等与气候变化的关系引起了广泛的关注。符淙斌等<sup>[27]</sup>发现冬季NAOI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了很大的进展<sup>[23,39,40]</sup>, 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<sup>[41]</sup>。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。针对这个问题, 这一节将对各大陆干湿变化的年代际变化和大尺度气候背景场PDO, NAO和SO的联系进行相关分析, 以期对全球环境的干湿变化与三大涛动的相互关系有一个清楚的认识。

在分析各大陆干湿变化与三大涛动的关系之前, 对三大涛动的基本特征作一个简单的介绍。(1) PDO: 是一个类似于El Niño振荡结构的物理过程, 但它的位置位于中北太平洋和北美。在PDO的暖位相, 中北太平洋海表面温度异常偏低, 而北美西海岸沿岸温度异常偏高, 冷位相则反之<sup>[42]</sup>。它与ENSO的区别就在于异常持续的时间不等, PDO持续时间在 20~30 年左右, 而ENSO大约为 6~18 个月, 另外ENSO发生在热带太平洋, 而PDO在中北太平洋, 还有ENSO的机理相对比较清楚, 而PDO的形成机理尚不明

晰<sup>[29,42,43]</sup>。(2)NAO: 是中北美及欧洲乃至北亚冬季气候变率的一种主要模态, 它是指北大西洋地区的气压变化存在一种南北向翘翘板现象, 即格林兰地区气压升高时, 北大西洋副热带地区气压将降低, 反之亦然。它直接同大气半永久性活动中心冰岛低压和亚速尔高压的活动有关。即当亚速尔地区气压偏高时, 冰岛地区气压偏低, 反之亦然。(3)SO: 是存在于东南赤道太平洋和澳大利亚及印度尼西亚之间气压的振荡现象。当El Niño发生时, 东太平洋气压下降而西太平洋气压上升, 气压梯度减小导致低纬度向东的信风减弱。

三大涛动是影响全球气候变化的关键过程, 它们之间既有区别又有联系。相关分析表明, PDOI与SOI呈显著的反相关, 相关系数为-0.739, 可通过0.001 信度检验; NAOI与SOI的负相关也通过了 95% 的信度检验; PDOI与NAOI为正相关, 但不能通过95%的信度检验。说明PDO与SO有密切的相关关系, 而这种关系的机理可能与中纬度海温异常引起的信风变化改变了赤道地区海洋的温跃层结构, 从而进一步影响了ENSO活动的年代际尺度变化<sup>[44]</sup>。

图4给出了5年滑动平均三个涛动指数序列与全球地表湿润指数5年滑动平均同期相关的分布。分析图4(a)发现, PDOI与地表湿润指数在年代际尺度上相关系数的空间分布结构与地表湿润指数变化趋势的分布结构(图1(b))非常相似。与图1(b)比较发现, 与PDOI指数成正相关的地区对应变湿趋势, 负相关区与干旱化趋势相对应。在图4(b)上, SOI与地表湿润指数的相关系数的全球空间分布格局与图4(a)基本一致, 这是由PDOI与SOI密切的关系所决定的, 只是相关系数的符号相反, 说明在年代际尺度上, PDO和SO对全球干湿环境变化的影响具有同等重要的作用, 显著相关的区域(阴影部分)也基本与图4(a)相同, 其中在欧亚大陆、北美大陆和非洲大陆, SOI与年地表湿润指数的相关最为显著。在图4(c)上, 尽管NAOI与年地表湿润指数的相关系数空间分布与图4(a)和(b)的空间分布基本一致, 但差别在于它的显著相关区非常零散, 缺乏大范围显著相关的区域。说明在年代际尺度上NAO与年地表湿润指数的相关关系弱于PDO和SO两个涛动。

为了说明在不同时间尺度上各大陆区域平均地表干湿状况和三个涛动的联系, 对五个大陆的地表湿润指数进行区域平均, 然后对各个区域的地表湿

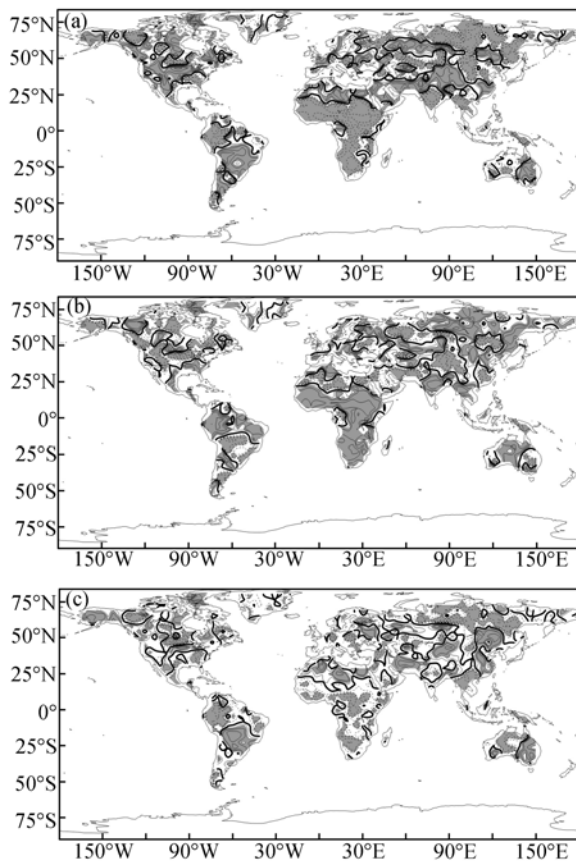


图4 地表湿润指数与三大涛动相关系数的空间分布  
(a) PDO; (b) SOI; (c) NAO. 实线区为正相关, 虚线区为负相关, 阴影区为通过95%信度检验的区域

润指数分别进行5和9年的滑动平均, 再依次计算各大陆地表湿润指数区域平均序列未滑动平均、5年滑动平均和9年滑动平均和所对应三个涛动指数的同期相关, 其相关系数列于表2, N1, N2和N3分别代表未滑动平均、5及9年滑动平均. 可以看出: 无论年际、年代际还是更长时间尺度, 非洲大陆、北美大陆地表湿润指数与PDOI的相关系数均达到99%以上的信度, 而欧亚大陆未滑动平均的地表湿润指数与PDOI的相关并不显著, 但5及9年滑动平均地表湿润指数序列与PDOI的相关系数均能达到99%以上的信度水平, 说明在5年以上时间尺度欧亚大陆的地表湿润指数与PDOI有密切的关系. 然而, 在南美大陆和澳洲大陆, N1, N2和N3三个序列都与PDOI无显著相关. 对于SOI, 显著相关的两个大陆分别是非洲大陆和澳洲大陆, 无论N1, N2还是N3, 其相关系数都能通过99%的显著性检验, 而北美大陆、南美大陆和欧亚大陆的N1与SOI的相关系数都未能通过显著性检

验(未达到95%的信度水平), 但经过5和9年平滑后的序列N2, N3与SOI的相关系数均能达到99%以上的信度水平, 说明三个大陆5年以上时间尺度的环境干湿变化和SO的变化密切相关. 对于NAOI, 除欧亚大陆和非洲大陆外, 其余三个大陆的N1, N2和N3与NAOI均不存在显著的相关关系, 而欧亚大陆在N2和N3尺度上与NAOI可达到95%的信度水平, 非洲大陆仅在N3尺度上可达到99%的显著相关, 说明NAO与全球大部分地区10年以下尺度的干湿环境变化同期相关关系不大, 相对于其它大陆, 受NAO影响最显著的地区仅是欧亚大陆和非洲大陆, 但主要集中在5年以上时间尺度的变化. 对于北美大陆更长时间尺度的干湿变化与PDO和北大西洋大尺度背景的关系, McCabe等<sup>[26]</sup>的研究指出, 北美大陆几十年尺度干旱频率变化的时空分布方差来自于PDO和大西洋数十年际振动(Atlantic Multidecadal Oscillation, 简称AMO)的贡献, 但NAOI中缺乏对环境变化影响的年代际信号. 从以上分析还可以看出, PDO和SO在各种时间尺度上都与非洲大陆的干湿变化有密切关系. Giannini等<sup>[21]</sup>的数值模拟研究指出, Sahel近期的干旱化趋势与非洲周围偏暖的海水密切相关, 特别是在所有热带海域, 海温的变化都对Sahel有着重要贡献. 那么, 与非洲大陆相距遥远的中北太平洋如何影响非洲大陆的气候变化, 其相互联系的物理过程和作用机理尚不清楚, 有待于进一步深入的研究.

综上所述, PDO与北美大陆和非洲大陆的关系最为密切, 其关系涉及了年际和年代际以上时间尺度的变化; 和欧亚大陆的联系主要表现在5年以上时间尺度的变化, 包括年代际变化, 和南美大陆和澳洲大陆各种时间尺度的变化没有显著的相关. SO和全球干湿变化的关系最为紧密, 特别是和非洲大陆、澳洲大陆的关系, 从年际变化到年代际变化, 其同期的相关性都是显著的, 而与其余大陆在5年以上时间尺度上的变化均显著相关. 和上述两个涛动相比, NAO和全球大部分地区环境干湿变化的关系并不显著, 相关最显著的地区仅是欧亚大陆, 但主要集中在5年以上时间尺度的变化.

以上分析了三大涛动与全球环境干湿变化的同期相关关系, 但两者相互联系的物理过程还无法用以上事实进行描述, 这需要进行更多的事实分析并结合耦合气候模式的数值模拟方法进行研究, 下面



将利用中北太平洋(PDO 所覆盖的主要海域)海温的年代际变化与夏季 500 hPa 高度场的时滞相关来初步探索它们之间的物理联系。

### 3 中北太平洋海温的年代际变化与大气环流异常的关系

为了探索三大涛动与全球环境干湿状况相互联系的可能机理,本研究通过用影响 PDO 变化的关键区海温变化与 500 hPa 的时滞相关关系来进行分析。所用的资料为 NCEP 500 hPa 高度场和海平面气压数据,海温资料为 National Climatic Data Center (NCDC) 扩展重建的第二版本海温数据(ERSST.v2),空间分辨率为  $2^\circ \times 2^\circ$ ,资料长度为 1951 年 1 月至 2004 年 9 月。首先,选取影响 PDO 的关键海域为  $30^\circ \sim 45^\circ \text{N}$ ,  $140^\circ \text{E} \sim 145^\circ \text{W}$ ;其次计算该区域平均冬(前一年 12 月至次年 2 月)、春(3~5 月)和夏(6~8 月)三个季节海温序列,再对海温序列分别进行 9 年滑动平均,最后分别计算冬、春、夏季滑动平均的海温序列与滑动平均夏季 500 hPa 高度场的相关关系。图 5 给出了冬、春、夏季 PDO 关键区域海温变化与 500 hPa 高度场的相关系数分布,图 5(a), (c), (e)分别为冬、春和夏季海温与全球夏季 500 hPa 高度场的相关系数分布;图 5(b), (d), (f)为三个季节关键区域海温的距平变化。可以看

出无论海温超前(冬、春季)还是同期(夏季)与夏季 500 hPa 高度场在年代际尺度上都有很强的相关性。在  $60^\circ \text{S} \sim 60^\circ \text{N}$  范围内,冬、春和夏季的海温与夏季 500 hPa 高度场均存在显著的负相关关系(95%显著性的相关系数临界值为  $r_c = 0.27$ ),非洲大陆、欧亚大陆、澳洲大陆都是强的负相关区;冬季关键区的海温与夏季 500 hPa 高度场的相关系数在北半球高纬度形成了一个明显的遥相关带,北半球的三个负相关高值中心分别位于欧亚大陆的东部( $60^\circ \text{E}$  以东)、大西洋的中东部和北美洲的中西部;而四个正相关的相关中心分别位于中北美洲的太平洋沿岸、北美洲沿岸、欧洲的西北部和北太平洋地区。与图 1(a)比较分析可发现,北半球大陆上的负相关中心恰好对应着降水的减少趋势,正的相关区域基本对应降水趋势为增加的地区,这种对应关系在欧亚大陆尤其一致。以  $60^\circ \text{E}$  为界,以东负的相关与降水的减少趋势相对应,以西正的相关与降水的增加趋势对应。春季海温与夏季 500 hPa 高度场相关系数的全球空间分布格局与冬季基本相似,但负的相关系数明显增大,南半球正的相关系数也明显增大,北半球的遥相关带仍然存在,但由于正的相关系数减小而变弱,而负相关却明显增强;夏季海温与夏季 500 hPa 高度场也具有同样的

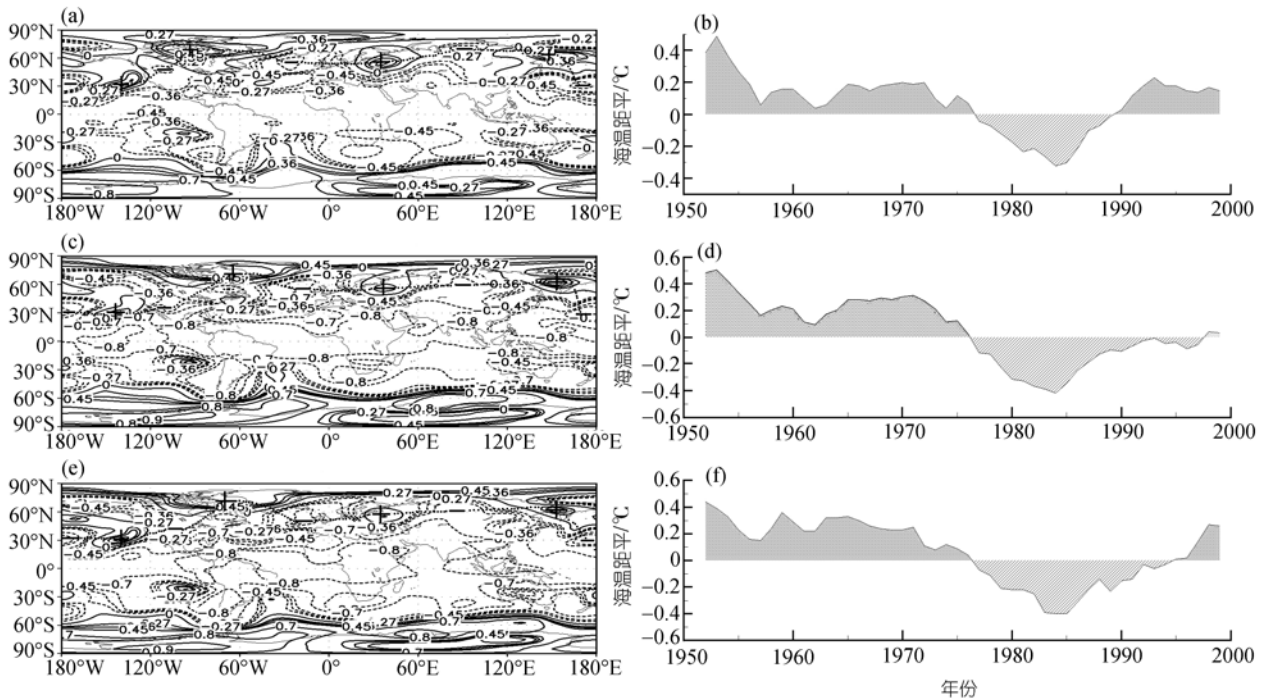


图 5

(a), (c), (e) 夏季 500 hPa 高度场与 PDO 关键地区海温的相关分布。(b), (d), (f) PDO 关键地区不同季节海温距平变化。(a), (b)为冬季;(c), (d)为春季;(e), (f)为夏季

表 2 各大陆干湿变化与 PDOI, SOI 与 NAOI 的相关<sup>a)</sup>

	北美大陆			南美大陆			欧亚大陆			非洲大陆			澳洲大陆		
	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
PDOI	0.431**	0.642***	0.756***	-0.250	-0.268	-0.202	-0.11	-0.438**	-0.566***	-0.518***	-0.802***	-0.923***	-0.134	-0.250	-0.091
SOI	-0.055	-0.464***	-0.543***	0.271	0.592***	0.544***	0.091	0.419**	0.499***	0.381**	0.583***	0.792***	0.496***	0.575***	0.433**
NAOI	0.094	0.114	0.082	0.220	-0.109	-0.276	-0.003	-0.348*	-0.303*	0.005	-0.219	-0.421**	-0.085	-0.065	0.033

a) \*代表通过 95% 的信度检验; \*\*代表通过 99% 的信度检验; \*\*\*代表通过 99.9% 的信度检验

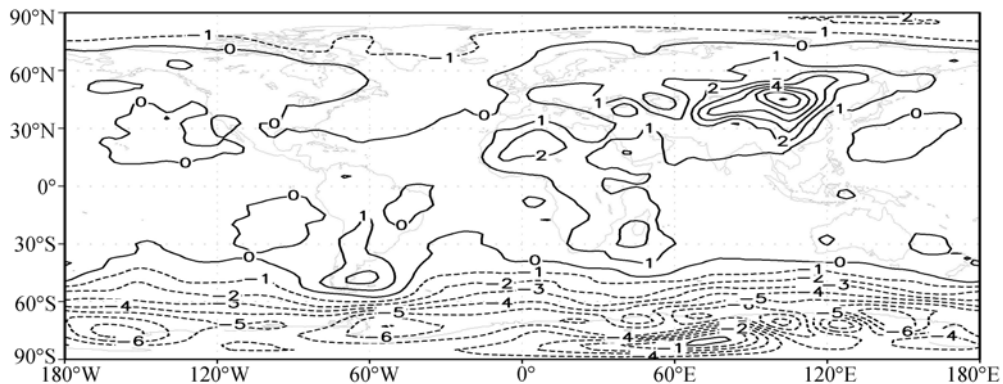


图 6 夏季 1981~2003 年气压平均值与 1956~1980 年多年气压平均之差的全球分布(单位: hPa)

空间相关格局,不同的是遥相关带上位于北美洲中部的正相关中心基本消失,代之以负相关,欧洲西北部的正相关中心也继续减弱,但中西太平洋的正相关中心却有增强之势,南半球高纬度正的相关系数变化不大,保持强的正相关特征.从 PDO 的关键海区海温距平的年代际变化来看(图 5(b), (d), (f)),海温的年代际变化基本处于低温时段(春季)或一个由低温时段向高温时段转换时期(冬、夏).如果以春季海温变化为例,那么根据它与 500 hPa 的相关关系推断,在 60°S~60°N,大范围的负相关关系表示在近 20 多年的低海温时段应对应这些地区 500 hPa 高度场的升高趋势,配合的地面气压场应是气压升高趋势,这在北半球夏季不利于降水过程的形成.为了进一步验证这个推断,计算了 1981~2003 年夏季平均海平面气压减去 1956~1980 年夏季平均海平面气压(图 6)的压差分布.从图 6 可以看出,欧亚大陆的中东部(60°E 以东)和北部非洲的 Sahel 地区都对应着海平面气压升高的趋势,说明其上空的反气旋环流加强而气旋性环流减弱,这是不利于该地区降水过程产生的大气环流背景,是欧亚大陆和非洲大陆出现干旱化趋势的一个原因.中太平洋的东部、大西洋中北部及西北太平洋各有一个弱的气压降低区域,有意思的是北半球 70°N 以南气压升高的区域都在陆地上,而降低的区域均在海洋上.欧亚大陆的东段即亚洲大陆海平面

气压升高的幅度最大,其次是非洲大陆,北美最小.

从以上分析可以看出,影响 PDO 变化的典型海域的海温变化与全球大气环流场的年代际变化有密切关系,而这种关系在 500 hPa 高度场和海平面气压场有显著的表现,那么这个地区海温变化通过那些过程对全球大气环流的变化产生作用需要通过数值模拟方法进行机理探索.

## 4 结论

本文通过对年地表湿润指数的分析,揭示了全球和 5 个大陆的干湿变化趋势及各大陆之间的差异.结果表明,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,尤其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均有大约 1%~5% 的增强,降水为增加趋势的区域也因增暖而变湿趋势减弱或消失.

过去在研究干旱化和大尺度背景(比如海温变化)时,尤其是对 Sahel 地区干旱化问题的研究,多数工作仅局限于利用降水量的变化和大尺度背景场相互联系的研究,但缺乏对全球环境干湿这个多学科交

又问题的整体研究,除降水外,温度等其它环境因子的影响也不可忽视.因此,以前关于降水和大尺度背景联系的研究结果还不能客观的表征大尺度背景与环境干湿变化的相关关系.以上研究在考虑温度变化的前提下,利用地表湿润指数研究了地表环境干湿的年际及年代际尺度的干湿变化与大尺度背景场关系,结果说明,全球年代际干湿变化趋势与大尺度气候背景场关系密切.从区域平均来讲,北美大陆和非洲大陆的干湿变化与 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; 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. 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.

本文着重分析了不同时间尺度环境干湿变化的特征及其与三大涛动的同期相关关系,而对它们相关关系的形成机理未加涉及,尽管也给出中北太平洋海温的年代际变化与全球夏季 500 hPa 高度场的时滞相关关系,但这种相关关系的机理有待于利用耦合气候模式进行数值模拟研究,以期对它们相互作用的机理有一个深刻的认识.

**致谢** 衷心感谢各位审稿专家对本文提出的宝贵意见;感谢曾昭美研究员、华丽娟博士所提供的帮助.

## 参 考 文 献

- Nicholson S E. Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries. *Clim Res*, 2001, 17: 123—144
- Dai A G, Trenberth K T, Qian T 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[DOI]
- 张庆云, 陈烈庭. 近 30 年来中国气候的干湿变化. *大气科学*, 1991, 15(5): 72—811
- 张庆云, 卫捷, 陶诗言. 近 50 年华北干旱的年代际和年际变化及大气环流特征. *气候与环境研究*, 2003, 8(3): 307—318
- Bordi I, Fraedrich K, Gerstengarbe F W. Potential predictability of dry and wet periods: Sicily and Elbe-Basin (Germany). *Theor Appl Climatol*, 2004, 77: 125—138[DOI]
- Nicholson N. The changing nature of Australian drought. *Clim Change*, 2004, 63: 323—336[DOI]
- Tolika K, Maheras P. Spatial and temporal characteristics of wet spells in Greece. *Theor Appl Climatol*, 2005, 81: 71—85[DOI]
- Bordi I, Fraedrich K, Jiang J M, et al. Spatio-temporal variability of dry and wet periods in eastern China. *Theor Appl Climatol*, 2006, 79: 81—91[DOI]
- Ma Z G, Fu C B. Interannual characteristics of the surface hydrological variables over the arid and semi-arid areas of northern China. *Glob Planet Change*, 2003, 37: 189—200
- 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
- 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
- Palmer W C. Meteorologic drought. U S Weather Bureau Res Pap, 1965, 45: 58
- Richard R, Heim J. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2002, 83: 1149—1165
- Charney J G. Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Q J R Meteorol Soc*, 1975, 101: 193—202
- Xue Y K, Shukla J. The influence of land surface properties on Sahel climate, Part I: desertification. *J Clim*, 1993, 6: 2232—2245[DOI]
- Zeng N, Neelin J D, Lau K M, et al. Enhancement of interdecadal climate variability in the Sahel by vegetation interaction. *Science*, 1999, 286: 1537—1540[DOI]
- 符淙斌, 袁惠玲. 恢复自然植被对东亚夏季气候和环境影响的一个虚拟试验. *科学通报*, 2001, 46(8): 691—695
- Folland C K, Palmer T N, Parker D E. Sahel rainfall and worldwide sea surface temperature, 1901—85. *Nature*, 1986, 320: 602—607[DOI]
- Palmer T N. Influence of the Atlantic, Pacific and Indian Oceans on Sahel rainfall. *Nature*, 1986, 320: 251—253[DOI]
- Rowell D P, Folland C K, Maskell K, et al. Variability of summer rainfall over tropical north Africa (1906—92): observations and modeling. *Q J R Meteorol Soc*, 1995, 121: 669—704
- Giannini A, Saravanan R, Chang P. Oceanic forcing of sahel rainfall on interannual to interdecadal time scales. *Science*, 2003, 302: 1027—1030[DOI]
- Zeng N. Drought in the Sahel. *Science*, 2003, 302: 999—1000[DOI]
- Lu J, Delworth T L. Oceanic forcing for the late 20th century Sahel drought. *Geophys Res Lett*, 2005, 32, L22706, doi: 10.1029/2005GL023316
- Hoerling M, Kumar A. The perfect ocean for drought. *Science*, 2003, 299: 691—694[DOI]

- 25 朱益民, 杨修群. 太平洋年代际振荡与中国气候变率与中国气候变率的联系. *气象学报*, 2003, 61(6): 641—654
- 26 McCabe J G, Palecki M A, Betancourt J L. Pacific and Atlantic Ocean influences on multidecadal drought frequency in the United States. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2004, 101(12): 4136—4141[DOI]
- 27 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(14): 1512—1522
- 28 Mitchell T D, Jones P D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int J Climatol*, 2005, 25: 693—712[DOI]
- 29 Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon. *Bull Am Meteorol Soc*, 1997, 78: 1069—1079[DOI]
- 30 Hurrell J W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperature and precipitation. *Science*, 1995, 269: 676—679[DOI]
- 31 Können G P, Jones P D, Kaltofen M H, et al. Pre-1866 extensions of the Southern Oscillation Index using early Indonesian and Tahitian meteorological readings. *J Clim*, 1998, 11: 2325—2339[DOI]
- 32 Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate. *Geog Rev*, 1948, 38: 55—94[DOI]
- 33 Sneyers R. On the Statistical Analysis of Series of Observations. WMO Technical Note, 143. 1990
- 34 Folland C K, Kahl T R, Christy J R, et al. Observed climate variability and change. In: Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al, eds. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Third Assessment Report of the IPCC*. Cambridge-New York: Cambridge University Press, 2001. 142—145
- 35 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北前后由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 219—226
- 36 Namias J R. Seasonal interactions between North Pacific waters and the overlying atmospheric circulation. *J Geophys Res*, 1959, 64: 631—646
- 37 Hidalgo H G. Climate precursors of multidecadal drought variability in the western United States. *Water Resour Res*, 2004, 40, W12504, doi: 10.1029/2004WR003350
- 38 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 Clim*, 2004, 15: 819—833[DOI]
- 39 Held I M, Delworth T L, Lu J, et al. Simulation of Sahel drought in the 20th and 21st centuries. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2005, 102(50): 17891—17896[DOI]
- 40 Dai A G, Trenberth K E. Global variations in droughts and wet spells: 1900—1995. *Geophys Res Lett*, 1998, 25(17): 3367—3370[DOI]
- 41 Janicot S, Moron V, Fontaine B. Sahel drought and ENSO Dynamics. *Geophys Res Lett*, 1996, 23(5): 515—518[DOI]
- 42 Mantua N J, Hare S R. The Pacific decadal oscillation. *J Oceanogr*, 2002, 58: 35—44[DOI]
- 43 Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. ENSO-like interdecadal variability: 1900—1993. *J Clim*, 1997, 10: 1004—1020[DOI]
- 44 Pierce D W, Barnett T P. Connections between the Pacific Ocean and midlatitudes on decadal timescales. *J Clim*, 2000, 15: 1173—1194[DOI]