

DOI: 10.11766/trxb201808260225

# 近57年中国北方气候干湿变化及与太平洋年代际振荡的关系\*

贾艳青<sup>1</sup> 张 勃<sup>2†</sup>

(1 忻州师范学院地理系, 山西忻州 034000)

(2 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

**摘 要** 利用中国北方424个气象站点1960—2016年逐日地面观测资料, 应用联合国粮农组织 (FAO) Penman-Monteith模型计算潜在蒸散 ( $ET_0$ ), 基于降水量和潜在蒸散计算的湿润指数研究了1960—2016年中国北方干湿气候时空变化特征, 分析了太平洋年代际振荡 (PDO) 对气候干湿变化的影响。结果表明: 北方总体干湿变化不显著, 空间上表现为西北、青藏高原、内蒙古湿润化而华北干旱化的特征。极端干旱区面积显著缩小, 干旱区、半干旱区则明显扩张, 表明气候敏感区域在扩张。极端干旱区和干旱区显著变湿润, 半干旱区有变湿润的趋势。1960—1990年至1991—2016年, 北方经历了变湿润的过程。西北西部、青藏高原湿润化趋势明显, 极端干旱—干旱区的界线呈西界东移、南北界线收缩的变化。干旱化趋势主要发生在华北和东北部分地区, 华北黄河沿线一带半干旱—半湿润区界线向东南方向扩张。东北中部和西北西部由于降水增加而  $ET_0$  减少, 气候变湿润。华北中西部、内蒙古东部和东北部分地区降水减少、 $ET_0$  增加, 气候变干旱。在PDO暖位相, 西北、东北北部及内蒙古东部地区地表气候偏湿润; 在PDO冷位相, 地表气候偏干旱。而华北则相反。

**关键词** 干湿变化; 湿润指数; 潜在蒸散; 太平洋年代际振荡; 北方地区

**中图分类号** P467 **文献标识码** A

在全球变化的背景下, 气候变暖及其环境影响已成为各国政府和民众普遍关心的问题。全球气温升高使得海洋和陆地水分蒸发加速, 大气中的水汽含量增加, 降水量总体呈现增加趋势<sup>[1-2]</sup>。但降水增加的区域差异明显, 热带及高纬度降水增加, 而中纬度降水减少<sup>[3]</sup>。降水时空分布格局的变化, 改变了中国地区的水分循环, 同时对气候的干湿状况及空间分布格局产生重要影响<sup>[4-5]</sup>。中国北方地区位于中纬度, 气候干湿程度对季风降水变化依赖性强<sup>[6]</sup>, 全球变暖对北方干湿的负面影响可能更为深刻, 北方气候干湿空间分布格局的变化同时也

对农业需水、作物布局和种植制度产生重大影响。因此, 研究气候变化背景下北方干湿气候的时空变化特征及其成因, 对防止生态脆弱带自然环境的进一步恶化以及区域的农业生产和经济建设具有重要的理论意义和科学价值。

全球和区域尺度干湿气候的变化特征是应对和适应气候变化的关键参考因素<sup>[7]</sup>。近年来, 干湿变化的研究受到广泛关注。吴绍洪等<sup>[8]</sup>在修正Penman-Monteith模型的基础上, 利用干燥度指数 (潜在蒸散 $ET_0$ 与降水量之比) 研究了1971—2000年中国气候干湿状况, 指出综合水分收支平衡的干

\* 国家自然科学基金项目 (41561024) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41561024)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhangbo@nwnu.edu.cn

作者简介: 贾艳青 (1980—), 女, 山西忻州人, 副教授, 博士, 研究方向为气候变化与地表过程。E-mail: jiaqy5170@163.com

收稿日期: 2018-08-26; 收到修改稿日期: 2018-12-02; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-01-03

燥度指数更能准确表征中国陆地表层的干湿状况。郑景云等<sup>[9]</sup>利用干燥度指数作为干湿区划的主要指标,以年降水量作为辅助指标,对中国1981—2010年的干湿气候状况进行了区划,得出干湿气候界线的移动变化及干湿区域差异特征。申双和等<sup>[10]</sup>对比了湿润指数与传统降水量指标在干湿气候区划中的表现差异,发现基于Penman-Monteith的湿润指数能够更好地表征中国的干湿气候状况。马柱国和符淙斌<sup>[11]</sup>利用60个气象站的月平均气温和降水资料,分析了中国北方地区地表水分收支的历史演变规律及区域差异。毛飞等<sup>[12]</sup>比较了五种湿润度指标在青藏高原的适用性,分析发现,采用湿润指数分析1961—2006年青藏高原干湿状况及其界线的动态变化较合理。

气候干湿的核心是地表水分盈亏及收支的变化,要客观表征干湿状况需要综合考虑地气系统水分输入(降水)和输出(蒸散)的状况及变化<sup>[11-13]</sup>。因此,对干湿状况的客观表征需要综合降水和气温变化的共同影响。近年来,湿润指数和干燥度指数在中国区域干湿变化的检测中得到很好的应用,其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散,同时考虑了气温和降水变化对气候干湿的影响<sup>[11]</sup>。但由于研究目标的差异,已有研究主要集中在区域大尺度和小流域干湿时空变化趋势的研究,得出干湿气候带界线的移动规律和北方干旱化的事实<sup>[11, 12, 14-15]</sup>,对北方干湿的时空分异规律认识不够全面,且近期鲜有长时间序列的北方气候干湿区域分异和时空演变的研究。有研究指出,增温背景下北方地区干旱和洪涝可能会同时增多<sup>[16]</sup>。结合东北部分地区、西北西部、青藏高原有湿润化趋势的事实<sup>[14, 17]</sup>,北方地区的干旱化程度是否有所缓解呢?目前还没有相关的研究和探讨。为此,本文利用北方424个气象站点1960—2016年逐日实测数据,分析中国北方地区干湿状况的时空分异,旨在明确气候变化背景下北方干湿分布和变化趋势,为农业规划和作物布局、规避可能的气候风险提供科学依据。

干湿变化的成因是多方面的,普遍认为气候要素的变化影响了气候干湿变化。有研究指出<sup>[18]</sup>,赤道中太平洋地区海表温度年代际变化与中国东部旱涝36年周期密切相关。太平洋年代际

振荡(Pacific decadal oscillation, PDO)是北太平洋海温年代际循环的海洋现象,不仅对北美乃至整个北半球大气环流有重要影响<sup>[19]</sup>,还可以通过调制ENSO事件来间接影响气候<sup>[20]</sup>。朱益民和杨修群<sup>[21]</sup>研究表明,东亚大气环流及中国气温和降水年代际变化与太平洋年代际振荡关系密切,且不同区域气候变化与PDO的相关关系具有差异。过去的研究从不同方面揭示了中国气候变化与PDO的关系,但未深入探讨PDO对多年代际北方气候干湿变化趋势的影响和调制作用。鉴于此,本文分析PDO对北方干湿变化趋势的影响,为深入认识北方干湿变化特征和成因提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

研究区为1月份0℃等温线以北的地区,包括华北、东北、西北、青藏高原、内蒙古地区,介于26° 00' ~ 53° 33' N、73° 40' ~ 135° 2' E之间(图1)。北方424个气象站点1960—2016年的逐日降水量、平均气温、最高气温、最低气温、相对湿度、风速及日照时数源自中国气象局气象数据中心。实际观测中,部分气象台站由于迁址、仪器更换、观测场周边环境变化等原因造成气候资料时间序列的非均一性问题,研究中参考20个省(市、自治区)气象台站简史资料,使用RHtest方法对马鬃山、五台山、海阳等29个台站的数据资料进行了均一化检验。太平洋年代际振荡(PDO)指数1960—2016年逐月数据取自于<http://jisao.washington.edu/pdo//PDO.latest>,年指数为12个月的算术平均值。

### 1.2 湿润指数

采用湿润指数作为气候干湿状况的评价指标,计算方法为降水量与潜在蒸散之比:

$$HI = \frac{P}{ET_0} \quad (1)$$

式中,HI为年湿润指数,P为年降水量,ET<sub>0</sub>为年潜在蒸散。

本文参照毛飞等<sup>[22]</sup>的干湿区划标准,将湿润指数小于0.05的地区划分为极端干旱区,湿润指数介于0.05~0.2之间的为干旱区,0.2~0.5的地区为

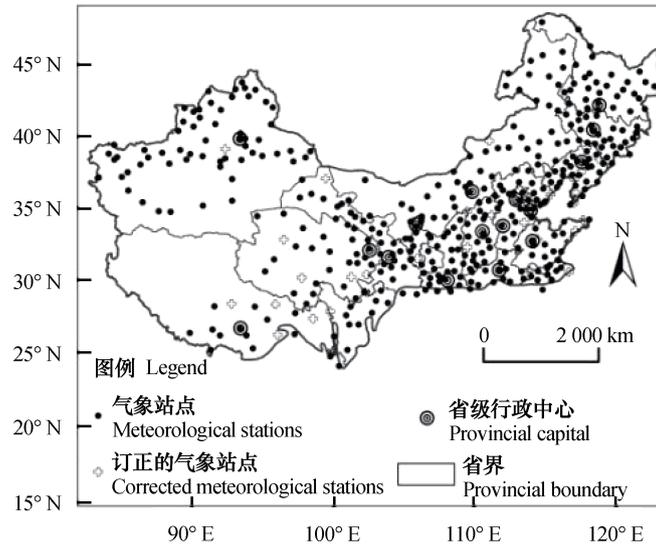


图1 北方地区气象站点分布图

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the northern part of China

半干旱区，0.5~1.0的地区为半湿润区，大于1.0的为湿润区。

### 1.3 潜在蒸散

湿润指数计算的关键是 $ET_0$ ，采用联合国粮农组织（FAO）推荐使用的Penman-Monteith模型计算北方424个站点的 $ET_0$ 。公式如下：

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (2)$$

式中， $ET_0$ 为日潜在蒸散（mm）； $\Delta$ 为饱和水汽压曲线斜率（ $\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$ ）； $U_2$ 为2 m高处风速， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ； $e_a$ 为空气饱和水汽压（kPa）； $e_d$ 为空气实际水汽压（kPa）； $T$ 为日平均气温（ $^{\circ}\text{C}$ ）； $\gamma$ 为干湿常数（ $\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$ ）； $R_n$ 为太阳净辐射（ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ）； $G$ 为土壤热通量密度（ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ）。Yin等<sup>[23]</sup>修正了该模型中计算太阳辐射 $R_n$ 的经验参数，使其更好地适应中国气候特点。修正后的计算公式为：

$$R_n = 0.77 \times \left( 0.2 + 0.79 \left( \frac{n}{N} \right) \right) R_{so} - \sigma \left( \frac{T_{\max,k}^4 + T_{\min,k}^4}{2} \right) \times \left( 0.56 - 0.25\sqrt{e_a} \right) \left( 0.1 + 0.9 \left( \frac{n}{N} \right) \right) \quad (3)$$

式中， $\sigma$ 为Stefan-Boltzmann常数（ $4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ）， $T_{\max,k}$ 为日最高气温绝对温标（K）， $T_{\min,k}$ 为日最低气温绝对温标（K）， $n$ 为实

际日照时数（h）， $N$ 为可照时数（h）， $R_{so}$ 为晴天太阳总辐射（ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ）。

### 1.4 气候倾向率

倾向率是研究某一特征量在某段时间内变化趋势时常用的表达方式。用 $x_i$ 表示样本量为 $n$ 的某一气象变量， $t_i$ 表示 $x_i$ 所对应的时间，建立 $x_i$ 与 $t_i$ 之间的一元线性回归方程：

$$x_i = a + bt_i \quad i=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$b$ 为回归系数， $b > 0$ 时，表示气候要素随时间增加呈上升趋势， $b < 0$ 时，气象要素随时间增加呈下降趋势。式中， $a$ 为回归常数， $b$ 为年际倾向率（ $(10a)^{-1}$ ）， $a$ 和 $b$ 可以用最小二乘法估算。采用F检验法对拟合的回归方程进行显著性检验（ $P < 0.05$ ）。

## 2 结果

### 2.1 北方陆地气候的平均干湿状况及年代尺度空间变化

图2a是近57 a北方年湿润指数的平均格局。总体来看，北方气候湿润程度自东南向西北内陆逐渐减少。由图2a可以看出，东北长白山脉以东、辽宁东北角和吉林东南角湿润指数大于1.0，气候湿润。湿润指数介于0.5~1的半湿润区包括大兴安岭以东的东北地区、黄淮地区、黄土高原以南至青藏高原的东部地区。东北平原以西、贺兰山以东穿过

宁夏、甘肃的中南部向西经青海中部至青藏高原的中南部地区，新疆的西北和东北角湿润指数在0.2~0.5之间，属于半干旱气候区。北方的干旱区和极端干旱区主要集中在西北，干旱区包括新疆大部分地区、西藏西北部地区、青海北部和甘肃西北部以及内蒙古西部地区，湿润指数在0.05~0.2之间。极端干旱区主要位于新疆南部地区、西藏、青海和甘肃的西北角，湿润指数小于0.05。1960—2016年，北方极端干旱区、干旱区、半干旱区、半湿润区、湿润区的面积分别为 $6.018 \times 10^5$ 、 $1.779 \times 10^6$ 、 $2.021 \times 10^6$ 、 $2.048 \times 10^6$ 、 $3.856 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，分别占北方陆地总面积的9.28%、27.42%、31.15%、31.56%、0.59%。

图2b显示，1990—2016年较1960—1990年，37%的站点变干，52.2%的站点变湿，10.8%的站

点干湿状况未发生明显变化。变干的站点主要分布在北方东部地区，包括华北大部分地区 and 东北部分地区，变湿的站点主要分布在西北、青藏高原、华北东南部和东北大部分地区，干湿状况未发生明显变化的站点零星分布在各区。图2c显示，极端干旱区的界线呈现西界东移、南北界线收缩的变化，总体上，西北西部变湿的区域增加，表现为极端干旱区向干旱区转变，极端干旱区面积显著缩小。干旱—半干旱区界线西段北移、中段东移，在青藏高原北部和青海中西部变湿的区域增加。半干旱—半湿润区界线西段西移、中段向东南方向扩张、东段西移南退，青藏高原和松花江流域变湿的区域增加，具体表现为半干旱区向半湿润区转变；在华北和内蒙古东部变干的区域增加，具体表现为半湿润区向半干旱区转变。

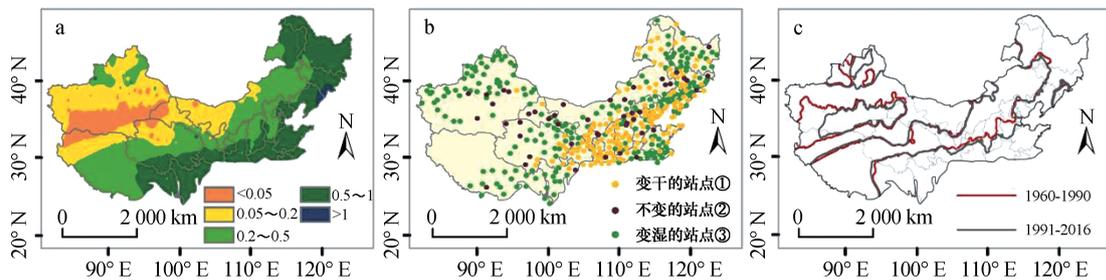


图2 1960—2016年中国北方地区干湿状况 (a) 及年代尺度气候干湿变化特征 (b、c)

Fig. 2 Dry and wet status in the northern part of the China in the years of 1960—2016 (a) and variation of the dry-wet climate on a decade scale (b, c)

## 2.2 气候干湿变化总体趋势

1960—2016年，北方湿润指数围绕57 a平均值波动变化，气候干湿状况的线性变化趋势整体不显著 ( $R^2=0.0008$ ) (图3)。气候干湿状况波动较大的年份大多为厄尔尼诺年，如1965—1966年、1982—1983年、1986—1987年、1997—1998年、2001—2002年、2009—2010年，这可能是厄尔尼诺对中国季风区气候变化显著影响的关系<sup>[24]</sup>。11年滑动平均曲线显示，1980年之前北方总体气候干燥，自20世纪80年代开始进入一段相对湿润的时期。而且1987—1996年期间北方年平均湿润指数较近57 a平均值偏高，说明这10年间北方气候总体偏湿润。吴绍洪等<sup>[25]</sup>指出，20世纪60年代以来，中国气候先后经过两个时段，分别是相对冷的时段 (1960—1986年) 和相对暖的时段 (1987—2011

年)。可见，1987年前后可能是近五六十年北方气候变化的一个重要转折点。苑全治等<sup>[17]</sup>的研究表明中国气候整体干湿变化不明显，本文研究结论与之一致。马柱国和符淙斌<sup>[11]</sup>研究表明中国北方干旱趋势明显，本文研究结论与之存在差异，原因可能在于除青藏区外，2000年之后东北、华北和蒙新3个分区地表湿润度均呈增加趋势有关。

## 2.3 气候干湿变化趋势的区域差异

北方湿润指数变化表现出较明显的区域差异 (图4a)。北方61.3%的站点湿润度增加，年际倾向率范围 $1.72 \times 10^{-5} \sim 0.06 (10a)^{-1}$ ，平均值为0.0009，其中20%的站点通过显著性检验，主要分布新疆、青藏高原、甘肃河西地区、华北南部和东北部分地区；其余38.7%的站点湿润度减少，年际倾向率范围 $-0.08 \sim -1.9 \times 10^{-5} (10a)^{-1}$ ，平均值

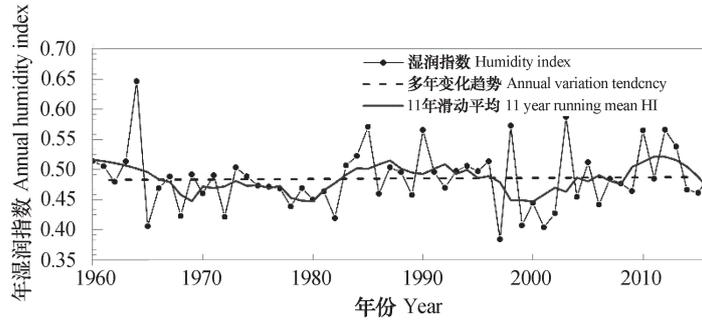


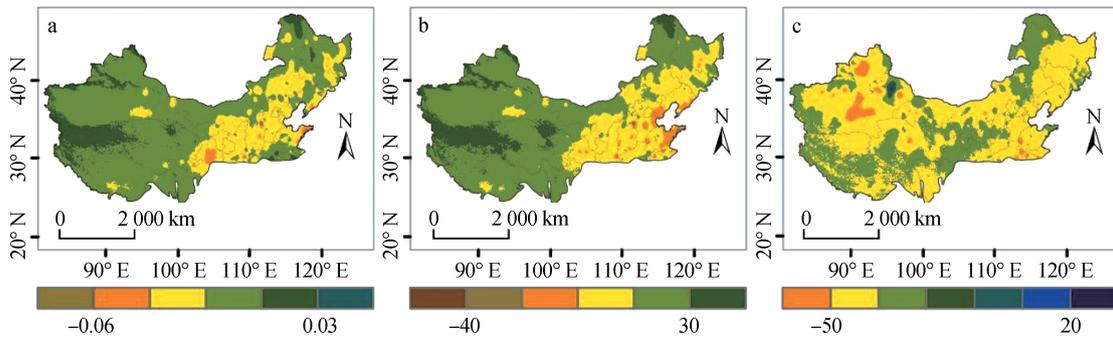
图3 北方湿润指数年际变化趋势

Fig. 3 Interannual changing trends of humidity index in the northern part of China from 1960 to 2016

为-0.0012，其中8.5%的站点通过显著性检验，主要分布在华北。可见，北方湿润化区域多于干旱化的区域，但干旱化进程要大于湿润化进程。

湿润指数的变化由降水量和 $ET_0$ 的变化共同决定。图4b、图4c分别为北方降水和 $ET_0$ 的空间变化趋势分布图。北方降水多年线性变化趋势不显著（图4b），年际倾向率为 $-1.87\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。北方48.3%的站点降水量增加，降水显著增加的站点分布在新疆北部、东北和青藏高原的南部、东北部。51.7%的站点降水量减少，显著减少的站点主要分布在华北和东北南部地区。1960—2016年，北方 $ET_0$ 以 $-6.71\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 的速率显著减少（图4c）。

显著减少的站点主要分布在新疆、华北南部和东部以及东北的中南部，显著增加的站点主要分布在东北北部、华北西部和青藏高原。东北中部和西北西部降水增加而 $ET_0$ 减少，二者共同影响下湿润度增加。青藏高原中部和西北西部部分地区降水和 $ET_0$ 均呈增加趋势，但降水增加趋势大于 $ET_0$ 增加幅度，导致地表湿润度上升。华北中西部、内蒙古东部和东北部分地区湿润度的减少主要是降水减少和 $ET_0$ 增加的综合作用。华北中东部和东北南部降水和 $ET_0$ 均呈现减少趋势，但降水减少幅度大于 $ET_0$ 减少幅度，二者综合作用下湿润度总体减少。



注：降水量年际倾向率单位为 $\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ， $ET_0$ 年际倾向率单位为 $\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$  Note: Unit of climatic trend of precipitation is  $\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ , and Unit of climatic trend of  $ET_0$  is  $\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$

图4 1960—2016年北方湿润指数（a）、降水（b）和 $ET_0$ （c）气候倾向率空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of climatic trend rate of humidity index (a), precipitation (b) and  $ET_0$  (c) from 1960 to 2016 in the northern part of China

### 2.4 干湿分区面积、湿润指数年际变化

图5是1960—2016年北方不同干湿区域面积和湿润指数的年际变化图。分析可知，中国北方极端干旱区的面积显著缩小，趋势为 $-7.4 \times 10^4 \text{ km}^2\cdot(10\text{a})^{-1}$ ；半干旱区显著扩张，趋势为 $4.2 \times 10^4 \text{ km}^2\cdot(10\text{a})^{-1}$ ；

干旱区和湿润区不显著扩张，趋势分别为 $2.8 \times 10^4 \text{ km}^2\cdot(10\text{a})^{-1}$ 和 $0.4 \times 10^4 \text{ km}^2\cdot(10\text{a})^{-1}$ ；半湿润区面积变化不明显，趋势为 $-3.0 \text{ km}^2\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。总之，北方极端干旱区的范围在缩小，干旱区、半干旱区和湿润区的范围在扩大。曾有研究指出，1951—2002年中

国半干旱区呈变干的趋势，而干旱区干旱化有所缓和<sup>[26]</sup>。姜江等<sup>[27]</sup>研究得出中国极端干旱区和湿润区在收缩，其余等级干湿区的范围在扩大，特别是半湿润和半干旱区表现为明显的扩张趋势。Huang 等<sup>[28]</sup>也指出中亚干旱区有缩小的趋势。此外，卞娟娟等<sup>[14]</sup>研究表明湿润区和半干旱区范围的增加主要

表现为中温带地区湿润半湿润东界东移和大兴安岭中部与南部的半湿润半干旱界线北扩的特点，本文的研究结论与前期的多种研究结论一致。由于干旱半干旱区升温显著，地表生态环境脆弱，对人类活动的响应比较敏感，干旱半干旱区的扩张表明各类生态环境敏感性高的区域正在扩张。

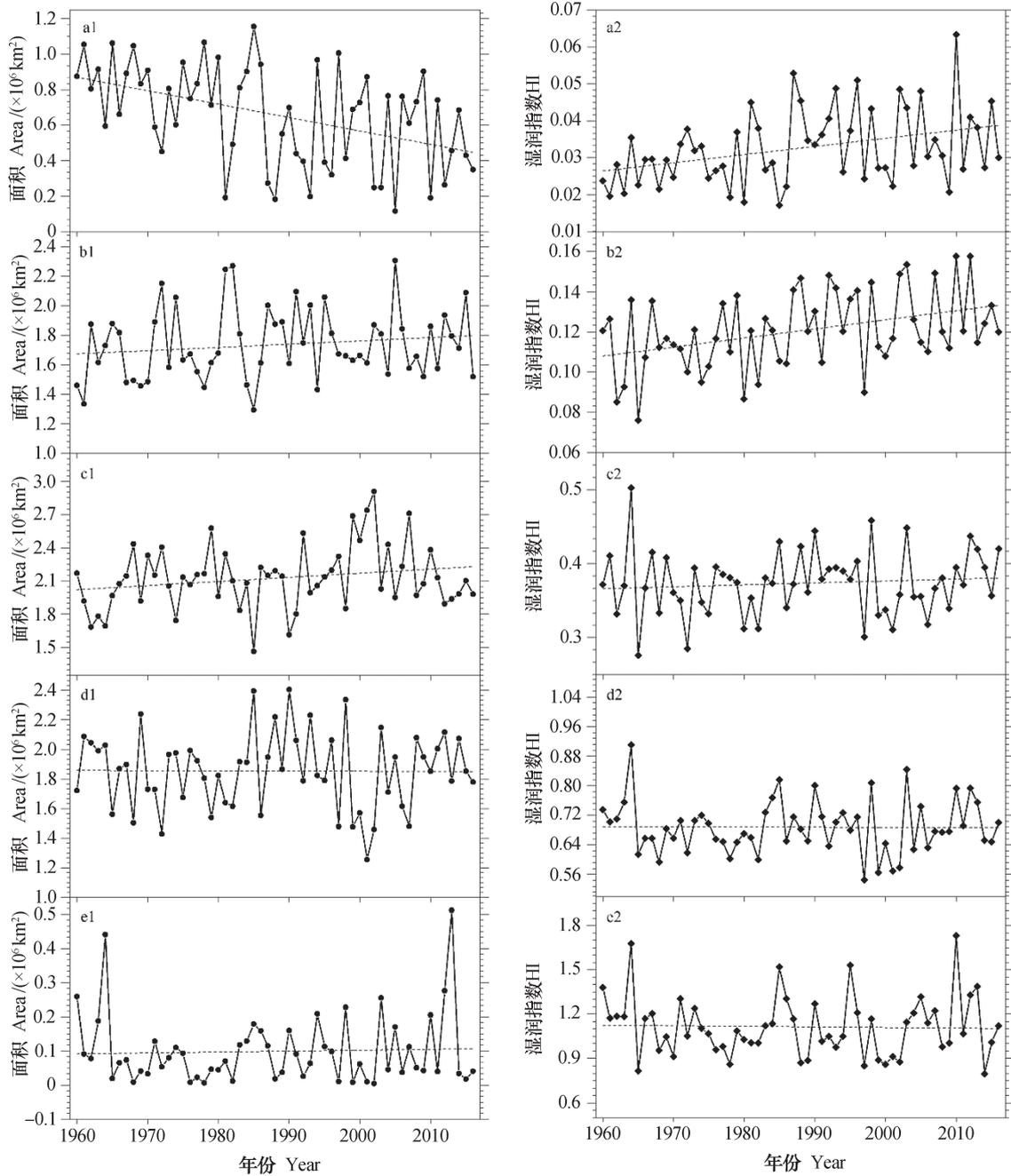


图5 1960—2016年北方极端干旱区 (a1、a2)、干旱区 (b1、b2)、半干旱区 (c1、c2)、半湿润区 (d1、d2) 和湿润区 (e1、e2) 面积和湿润指数年际变化

Fig. 5 Interannual changes in area and humidity index of the extremely arid, arid, semi-arid, semi-humid and humid regions in the northern part of China from 1960 to 2016

极端干旱区和干旱区湿润指数均呈增加趋势，倾向率分别为 $0.002(10a)^{-1}$ 和 $0.005(10a)^{-1}$ ，并通过0.01的显著性检验。11年滑动平均结果显示，极端干旱区和干旱区在20世纪80年代以前气候较干旱，进入20世纪80年代后总体转湿润。半干旱区湿润指数也表现为增加的趋势，倾向率为 $0.002(10a)^{-1}$ 。半干旱区变湿的趋势主要发生在20世纪80年代和2010年以后，总体上该区变湿趋势较极端干旱区和干旱区弱。半湿润区干湿变化不明显，湿润区湿润指数以 $-0.004(10a)^{-1}$ 的速率呈小幅下降趋势。综上，北方极端干旱区和干旱区显著变湿润，半干旱区有变湿润的趋势，半湿润区干湿变化不明显，湿润区略变干。

## 2.5 北方干湿变化与太平洋年代际振荡的关系

图6a为PDO指数与气温、降水和湿润指数相关系数分布图。PDO年际指数与北方绝大多数区域气温呈正相关关系，正相关显著的地区主要分布在东北和内蒙古东部。PDO指数与降水相关系数分布

图显示(图6b)，PDO与北方 $35^{\circ}N$ 以北的地区年降水呈正相关，与 $35^{\circ}N$ 以南的地区呈负相关，显著正相关的地区主要在新疆天山以北地区，显著负相关的地区在西藏西南部和华北中东部部分区域。根据PDO与气温及降水的关系得知，PDO的暖相位时期北方大部分地区气温上升，降水多且地表偏湿润，特别是西北、东北和青藏高原。而华北却相反，PDO的暖相位对应降水少地表偏干，冷位相对应降水多地表偏湿润。可见，北方气温与降水变化与PDO关系密切，那么由此引起的干湿变化是否受到PDO的影响呢？图6c给出了PDO指数与北方湿润指数的同期相关系数分布。湿润指数与PDO的相关性空间分布与图6b相似，只是显著正相关的范围明显扩大，特别是在天山以北、西北东部以及内蒙古东北部和东北北部部分地区。比较发现，PDO对北方干湿变化的影响要大于对降水和气温的影响，可以将PDO作为监测北方干湿变化的一个重要指标。

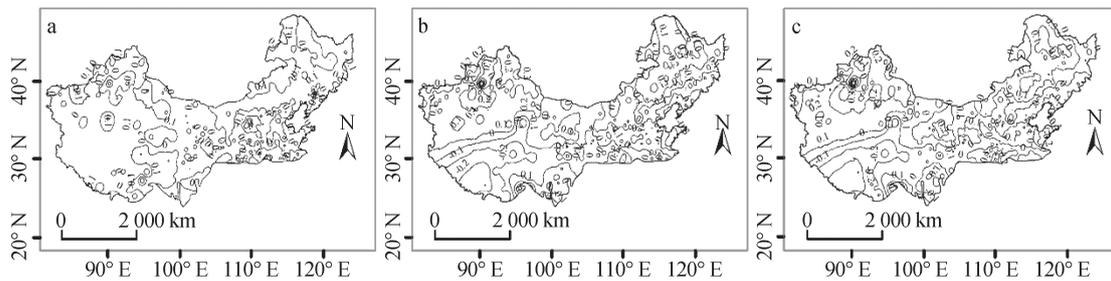


图6 1960—2016年北方气温(a)、降水(b)、湿润指数(c)与PDO的相关系数

Fig. 6 Correlation coefficient of PDO with air temperature (a), precipitation (b), and humidity index (c) in the northern part of China from 1960 to 2016

为进一步分析北方干湿变化与PDO的关系，对四个和PDO显著相关的地区西北东部、西北部、华北东部、内蒙古东部及东北北部地区的平均气温、降水和湿润指数距平进行9 a滑动平均，与年PDO距平进行对照比较。图7为4个受PDO影响的典型区域平均气温、降水、湿润指数和PDO指数距平9 a滑动平均，显示了各典型区域干湿变化与PDO指数的关系。分析可知，近57 a，PDO指数时间序列变化存在两个明显的负位相和一个正位相，持续时间分别为18 a、21 a和8 a。因PDO第2个负位相持续时间较短，这里考虑持续时间较长的两个PDO正负位相对应的干湿变化。在西北东部、西北西部和东北北部及内蒙古东部地区，年代际尺度

PDO变化与干湿变化存在正相关关系，即在PDO暖位相，降水偏多地表偏湿；在PDO冷位相，降水偏少地表偏干。而华北地区却相反，年代际尺度PDO变化与干湿变化反相关，即在PDO暖位相，降水偏少地表偏干；在PDO冷位相，降水偏多地表偏湿润。这与裴琳等<sup>[29]</sup>得出的PDO暖位相对应华北偏旱，而PDO冷位相对应偏涝结论一致。

## 3 讨论

本文利用湿润指数研究了北方气候干湿时空演变特征，探讨了PDO对北方气候干湿变化的影响。总体而言，近57 a北方干湿变化不显著，湿润指数

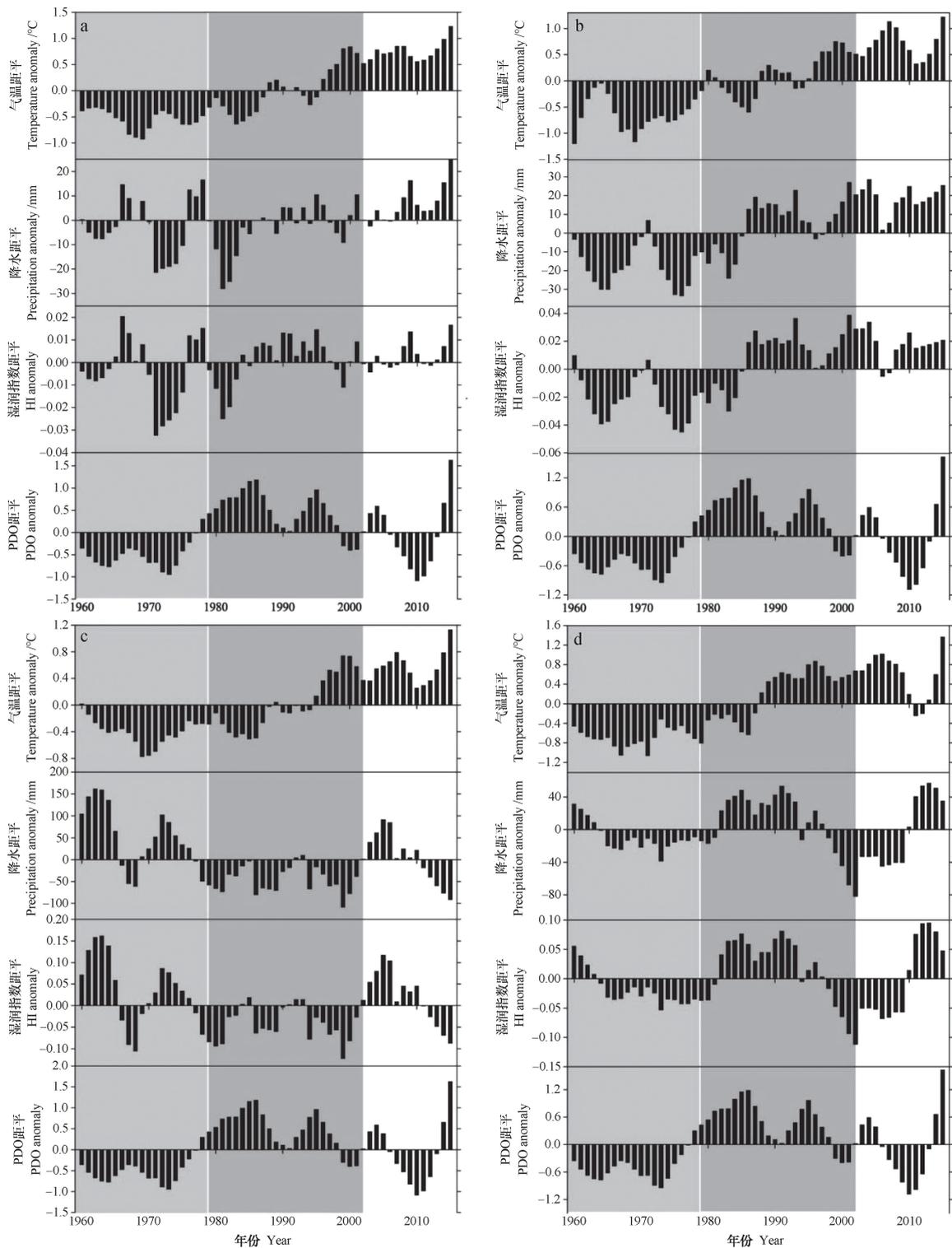


图7 西北东部 (a)、西北西部 (b)、华北东部 (c)、内蒙古东部及东北北部 (d) 年气温、降水、湿润指数及年 PDO 指数的 9 年滑动距平

Fig.7 Nine year running anomaly of air temperature, precipitation, humidity index, and PDO index in the east part of Northwest China (a), the west part of Northwest China (b), the east part of North China (c), the east part of Inner Mongolia and the north part of Northeast China (d)

轻微上升。年代际尺度上, 变湿区域面积多于变干区域面积。西北、东北、青藏高原、青海中西部以及松花江流域变湿的区域增加, 华北和内蒙古东部变干的区域增加。苑全治等<sup>[17]</sup>指出中国气候干湿状况线性变化趋势整体不显著, 胡琦等<sup>[15]</sup>研究表明1961—2014年中国湿润化地区增多, 但干旱化进程大于湿润化进程, 本文结论与之类似。郑景云等<sup>[9]</sup>和卞娟娟等<sup>[14]</sup>研究发现, 北方半干旱及华北半湿润区总体转干, 河西走廊、新疆及青藏高原的干旱、半干旱区总体转湿。本文的结论印证了这一点, 表明北方干湿变化的区域差异明显。马柱国和任小波<sup>[30]</sup>研究指出1951—2006年中国西北东部、华北、东北处于干旱化的过程, 西北西部处在一个相对湿润的阶段, 但气温的升高削弱了这种变湿的趋势。本研究得出华北干旱化趋势明显, 东北趋干与转湿并存, 西北整体有变湿润的趋势, 尤其西北西部的湿润化进程并未因气温的升高而停止。造成这种差异的原因可能与气候变化的多时间尺度周期有关, 也可能与选取资料、资料处理方法及计算方法不同有一定的关系。

Feng 和Fu<sup>[31]</sup>指出全球干旱半干旱区面积呈现扩张的趋势。Huang等<sup>[32]</sup>发现了全球半干旱区的强化增温和加速扩张的事实, 但中亚干旱区却有缩小的趋势。赵俊芳等<sup>[13]</sup>基于情景数据研究表明未来(2011—2050年)极端干旱区缩小以及半干旱地区的扩大趋势依然明显。姜江等<sup>[27]</sup>研究表明, 中国干湿气候空间上表现为东部干旱化和西部湿润化的特征, 显著缩小的是湿润区和极端干旱区, 半湿润区、半干旱区和干旱区则显著扩大。这些结论与本文基本一致, 但也存在一些差异。本研究得出北方干旱区、半干旱区扩张的结论与上述研究结果基本一致, 这表明北方气候敏感区域正在扩张。北方极端干旱区显著缩小是对Huang等<sup>[28]</sup>指出的中亚干旱区面积缩小现象的响应, 表明西北干旱区的缩小是中亚干旱区缩小进程中的一部分。本文的结论也印证了施雅风等<sup>[2]</sup>提出的西北西部由暖干向暖湿转型的假设。研究发现, 西北西部变湿趋势明显, 但干湿气候转型主要在西北西部(新疆), 并未扩大至西北东部。

中国北方地区干湿变化与PDO关系密切。相关显著的地区分布在天山以北、西北东部以及内蒙古东北部和东北北部部分地区。年代际周期估算的

结果显示, 在PDO暖位相, 西北东部、西北西部和东北北部及内蒙古东部地区降水偏多地表偏湿; 在PDO冷位相, 上述地区降水偏少地表偏干; 而华北地区却相反。这与裴琳等<sup>[29]</sup>得出的PDO暖位相对应华北偏旱, 而PDO冷位相对应偏涝结论一致。Zhou等<sup>[33]</sup>发现, 在PDO负位相向正位相转换过程中, 东亚地区海陆热力差异减小导致夏季风减弱, 致使北方降水偏少、偏旱。丛靖等<sup>[34]</sup>研究表明, 当PDO为暖相位时, 印度洋区域及赤道西太平洋通过对流加热的作用激发了太平洋—日本/东亚—太平洋(PJ/EAP)遥相关型的产生, 有利于渤海湾暖湿水汽输送至干旱半干旱区北部区域, 增大降水概率; 同时, 在河套北部区域当偏西和偏北气流相遇时会形成降水中心。当PDO位于冷位相时, 结论相反。

本文仅从现有资料初步分析了中国北方干湿变化和PDO的相互关系, 并未涉及它们之间联系的机理。PDO对北方气候干湿影响机理复杂, 有研究指出, PDO还与中国气候年代际变化及东亚大气环流关系密切<sup>[35]</sup>。未来要全面了解PDO对北方干湿气候的影响, 有必要研究PDO对西风带及东亚季风系统的影响及其物理机理, 对这方面问题的进一步研究将有助于深入了解中国北方干湿年际和年代际变化的形成机理。

## 4 结 论

近57年, 北方气候干湿变化总体不显著。61%的站点湿润度增加, 极端干旱区和干旱区显著变湿润, 半干旱区有变湿润的趋势, 半湿润区干湿变化不明显, 湿润区略变干。北方极端干旱区的范围显著缩小, 干旱区、半干旱区和湿润区的范围在扩大。年代际尺度上, 北方经历了变湿的过程。变湿的站点主要分布在西北、青藏高原、华北东南部和东北大部分地区, 极端干旱—干旱区的界线呈现西界东移、南北界线收缩的变化。干旱化趋势主要发生在华北和东北部分地区, 华北黄河沿线一带半干旱—半湿润区界线向东南方向扩张。东北中部和西北西部由于降水增加而 $ET_0$ 减少, 气候湿润度增加。华北中西部、内蒙古东部和东北部分地区降水减少和 $ET_0$ 增加, 气候变干旱。PDO暖位相时期, 西北东部、西北西部和东北北部及内蒙古东部地

区,降水偏多地表偏湿润;PDO冷位相时期,降水偏少地表偏干旱。而华北地区则相反。

### 参考文献

- [ 1 ] Wentz F J, Lucrezia R, Kyle H, et al. How much more rain will global warming bring? *Science*, 2007, 317 ( 5835 ): 233—235
- [ 2 ] 施雅风, 沈永平, 胡汝曦. 西北气候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
- Shi Y F, Shen Y P, Hu R J. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China ( In Chinese ). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24 ( 3 ): 219—226
- [ 3 ] IPCC. *Climate change 2007: The physical science basis: Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 235—336
- [ 4 ] 曹永强, 徐丹, 曹阳. 淮河流域地表干湿变化的时空分布特征. *土壤学报*, 2015, 52 ( 5 ): 1031—1043
- Cao Y Q, Xu D, Cao Y. Spatio-temporal distribution of dry-wet alteration in surface soil layer of the Huaihe River Basin ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 ( 5 ): 1031—1043
- [ 5 ] 张仲胜, 李敏, 宋晓林, 等. 气候变化对土壤有机碳库分子结构特征与稳定性影响研究进展. *土壤学报*, 2018, 55 ( 2 ): 273—282
- Zhang Z S, Li M, Song X L, et al. Effects of climate change on molecular structure and stability of soil carbon pool: A general review ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 ( 2 ): 273—282
- [ 6 ] 张红丽, 张强, 刘晓云. 华北河套地区气候干燥度的影响因素研究. *气候变化研究进展*, 2016, 12 ( 1 ): 20—27
- Zhang H L, Zhang Q, Liu X Y. Study on the main factors of aridity in Hetao area of North China ( In Chinese ). *Climate Change Research*, 2016, 12 ( 1 ): 20—27
- [ 7 ] 刘珂, 姜大膀. RCP4. 5情景下中国未来干湿变化预估. *大气科学*, 2015, 39 ( 3 ): 489—502
- Liu K, Jiang D B. Projected changes in the dry/wet climate of China under the RCP4. 5 scenario ( In Chinese ). *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2015, 39 ( 3 ): 489—502
- [ 8 ] 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 近30年中国陆地表层干湿状况研究. *中国科学: 地球科学*, 2005, 35 ( 3 ): 276—283
- Wu S H, Yin Y H, Zheng D, et al. Study of surface dry and wet conditions in China in recent 30 years ( In Chinese ). *Science China: Earth Sciences*, 2005, 35 ( 3 ): 276—283
- [ 9 ] 郑景云, 卞娟娟, 葛全胜, 等. 1981-2010年中国气候区划. *科学通报*, 2013, 58 ( 30 ): 3088—3099
- Zheng J Y, Bian J J, Ge Q S, et al. The climate regionalization in China for 1981-2010 ( In Chinese ). *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58 ( 30 ): 3088—3099
- [ 10 ] 申双和, 张方敏, 盛琼. 1975-2004年中国湿润指数时空变化特征. *农业工程学报*, 2009, 25 ( 1 ): 11—15
- Shen S H, Zhang F M, Sheng Q. Spatio-temporal changes of wetness index in China from 1975 to 2004 ( In Chinese ). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25 ( 1 ): 11—15
- [ 11 ] 马柱国, 符淙斌. 1951—2004年中国北方干旱化的基本事实. *科学通报*, 2006, 51 ( 20 ): 2429—2439
- Ma Z G, Fu C B. Primary fact of droughts in Northern China during 1951—2014 ( In Chinese ). *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51 ( 20 ): 2429—2439
- [ 12 ] 毛飞, 唐世浩, 孙涵, 等. 近46年青藏高原干湿气候区动态变化研究. *大气科学*, 2008, 32 ( 3 ): 79—87
- Mao F, Tang S H, Sun H, et al. A study of dynamic change of dry and wet climate regions in the Tibetan Plateau over the last 46 years ( In Chinese ). *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32 ( 3 ): 79—87
- [ 13 ] 赵俊芳, 郭建平, 徐靖文, 等. 基于湿润指数的中国干湿状况变化趋势. *农业工程学报*, 2010, 26 ( 8 ): 18—24
- Zhao J F, Guo J P, Xu J W, et al. Trends of Chinese dry-wet condition based on wetness index ( In Chinese ). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26 ( 8 ): 18—24
- [ 14 ] 卞娟娟, 郝志新, 郑景云, 等. 1951-2010年中国主要气候区划界线的移动. *地理研究*, 2013, 32 ( 7 ): 1179—1187
- Bian J J, Hao Z X, Zheng J Y, et al. The shift on boundary of climate regionalization in China from 1951 to 2010 ( In Chinese ). *Geographical Research*, 2013, 32 ( 7 ): 1179—1187
- [ 15 ] 胡琦, 董蓓, 潘学标, 等. 1961-2014年中国干湿气候时空变化特征及成因分析. *农业工程学报*, 2017, 33 ( 6 ): 124—132
- Hu Q, Dong B, Pan X B, et al. Spatiotemporal variation and causes analysis of dry-wet climate over period of 1961-2014 in China ( In Chinese ).

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33 (6): 124—132
- [ 16 ] 黄建平, 冉津江, 季明霞. 中国干旱半干旱区洪涝灾害的初步分析. 气象学报, 2014, 72 (6): 1096—1107  
Huang J P, Ran J J, Ji M X. Preliminary analysis of the flood disaster over the arid and semi-arid regions in China ( In Chinese ). Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72 (6): 1096—1107
- [ 17 ] 苑全治, 吴绍洪, 戴尔阜, 等. 1961-2015年中国气候干湿状况的时空分异. 中国科学: 地球科学, 2017, 47 (11): 1339—1348  
Yuan Q Z, Wu S H, Dai E F, et al. Spatio-temporal variation of the wet-dry conditions from 1961-2015 in China ( In Chinese ). Science China: Earth Sciences, 2017, 47 (11): 1339—1348
- [ 18 ] 王绍武, 赵宗慈. 我国旱涝36年周期及其产生的机制. 气象学报, 1979, 37 (1): 64—73  
Wang S W, Zhao Z C. The 36-YR. wetness oscillation in China and its mechanism ( In Chinese ). Acta Meteorologica Sinica, 1979, 37 (1): 64—73
- [ 19 ] Gutzler D S, Kann D M, Thornbrugh C. Modulation of ENSO-based long-lead outlooks of southwestern U. S. winter precipitation by the Pacific Decadal Oscillation. Weather and Forecasting, 2002, 17 (6): 1163—1172
- [ 20 ] 唐民, 吕俊梅. 东亚夏季风降水年代际变异模态及其与太平洋年代际振荡的关系. 气象, 2007, 33 (10): 88—95  
Tang M, Lü J M. The inter-decadal mode of the summer monsoon rainfall in East Asia and its association with Pacific decadal oscillation ( In Chinese ). Meteorological Monthly, 2007, 33 (10): 88—95
- [ 21 ] 朱益民, 杨修群. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系. 气象学报, 2003, 61 (6): 641—654  
Zhu Y M, Yang X Q. Relationships between pacific decadal oscillation ( PDO ) and climate variabilities in China ( In Chinese ). Acta Meteorologica Sinica, 2003, 61 (6): 641—654
- [ 22 ] 毛飞, 孙涵, 杨红龙. 干湿气候区划研究进展. 地理科学进展, 2011, 30 (1): 17—26  
Mao F, Sun H, Yang H L. Research progress in dry/wet climate zoning ( In Chinese ). Progress in Geography, 2011, 30 (1): 17—26
- [ 23 ] Yin Y H, Wu S H, Zheng D, et al. Radiation calibration of FAO56 Penman-Monteith model to estimate reference crop evapotranspiration in China. Agricultural Water Management, 2008, 95 (1): 77—84
- [ 24 ] 谭明. 近千年气候格局的环流背景: ENSO态的不确定性分析与再重建. 中国科学: 地球科学, 2016, 46 (5): 657—673  
Tan M. Circulation background of climate patterns in the past millennium: Uncertainty analysis and reconstruction of ENSO-like state ( In Chinese ). Science China: Earth Sciences, 2016, 46 (5): 657—673
- [ 25 ] 吴绍洪, 刘文政, 潘韬, 等. 1960-2011年中国陆地表层区域变动幅度与速率. 科学通报, 2016, 61 (19): 2187—2197  
Wu S H, Liu W Z, Pan T, et al. Amplitude and velocity of the shifts in the Chinese terrestrial surface regions from 1960 to 2011 ( In Chinese ). Chinese Science Bulletin, 2016, 61 (19): 2187—2197
- [ 26 ] 李新周, 刘晓东, 马柱国. 近百年来全球主要干旱区的干旱化特征分析. 干旱区研究, 2004, 21 (2): 97—103  
Li X Z, Liu X D, Ma Z G. Analysis on the drought characteristics in the main arid regions in the world since recent hundred-odd years ( In Chinese ). Arid Zone Research, 2004, 21 (2): 97—103
- [ 27 ] 姜江, 姜大膀, 林一骅. 中国干湿区变化与预估. 大气科学, 2017, 41 (1): 43—56  
Jiang J, Jiang D B, Lin Y H. Changes and projection of dry/wet areas over China ( In Chinese ). Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2017, 41 (1): 43—56
- [ 28 ] Huang J P, Yu H P, Guan X D, et al. Accelerated dryland expansion under climate change. Nature Climate Change, 2016, 6 (2): 166—172.
- [ 29 ] 裴琳, 严中伟, 杨辉. 400多年来中国东部旱涝型变化与太平洋年代际振荡关系. 科学通报, 2015, 60 (1): 97—108  
Pei L, Yan Z W, Yang H. Multidecadal variability of dry/wet patterns in eastern China and their relationship with the Pacific Decadal Oscillation in the last 413 years ( In Chinese ). Chinese Science Bulletin, 2015, 60 (1): 97—108
- [ 30 ] 马柱国, 任小波. 1951-2006年中国区域干旱化特征. 气候变化研究进展, 2007, 3 (4): 195—201  
Ma Z G, Ren X B. Drying trend over China from 1951 to 2006 ( In Chinese ). Advances in Climate Change Research, 2007, 3 (4): 195—201
- [ 31 ] Feng S, Fu Q. Expansion of global drylands under a warming climate. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13 (6): 14637—14665
- [ 32 ] Huang J P, Ji M X, Xie Y K, et al. Global semi-arid

- climate change over last 60 years. *Climate Dynamics*, 2016, 46 ( 3/4 ) : 1131—1150
- [ 33 ] Zhou T J, Song F F, Lin R P, et al. The 2012 North China floods: Explaining an extreme rainfall event in the context of a longer-term drying tendency. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94: s49—s51
- [ 34 ] 丛靖, 赵天保, 马玉霞. 中国北方干旱半干旱区降水的多年代际变化特征及其与太平洋年代际振荡的关系. *气候与环境研究*, 2017, 22 ( 6 ) : 643—657  
Cong J, Zhao T B, Ma Y X. Multi-decadal variability of precipitation in arid and semi-arid region of northern China and its relationship with Pacific Decadal Oscillation index ( In Chinese ) . *Climatic and Environmental Research*, 2017, 22 ( 6 ) : 643—657
- [ 35 ] 朱益民, 杨修群, 陈晓颖, 等. ENSO与中国夏季年际气候异常关系的年代际变化. *热带气象学报*, 2007, 23 ( 2 ) : 105—116  
Zhu Y M, Yang X Q, Chen X Y, et al. Relationships between Pacific Decadal Oscillation ( PDO ) and climate variabilities in China ( In Chinese ) . *Journal of Tropical Meteorology*, 2007, 23 ( 2 ) : 105—116

## Relationship of Dry-Wet Climate Changes in Northern China in the Past 57 Years with Pacific Decadal Oscillation (PDO)

JIA Yanqing<sup>1</sup> ZHANG Bo<sup>2†</sup>

( 1 Department of Geography, Xinzhou Normal University, Xinzhou, Shanxi 034000, China )

( 2 College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China )

**Abstract** 【 Objective 】 Global warming has caused heterogeneous changes in precipitation intensity and distribution, which inevitably impacts dry and wet status of the climate. In order to explore changes in distribution of dry and wet climate zones occurring in recent 57 years (1960—2016) in the northern part of the China, this paper characterize the spatiotemporal variation of dry-wet climate in the northern part of China over the period, analyzed the variation for impacts of the Pacific Decadal Oscillation (PDO), and explored potential causes of the variation. 【 Method 】 The meteorological data used in this study were downloaded from the “China Surface Climate Daily Data” and “China Surface Climate Data & Daily Data V3.0” of the National Meteorological Information Center, including daily mean temperature, mean minimum temperature, mean maximum temperature, precipitation, relative humidity, mean wind velocity at 10 m height and sunshine hours. Based on the daily climate data of the 424 meteorological stations in northern part of China from 1960 to 2016,  $ET_0$  was calculated with the Penman-Monteith method, humid indices(HI) were analyzed for spatio-temporal variation of the wet-dry climate, impacts of the Pacific Decadal Oscillation (PDO) on variation of the wet-dry climate were explored with the correlation analysis method, and spatio-temporal variation of the dry and wet climate was characterized with the linear trend analysis method and the multiple linear regression spatial interpolation method. 【 Result 】 Results showed: the overall wet-dry status of the northern part of China fluctuated up and down the mean of the 57 years and did not follow any obvious linear variation trend. Spatially, it displayed as wetting in Northwest China, Qinghai-Tibetan Plateau, Inner Mongolia and Xinjiang, and drying in North China. The extremely arid region was shrinking in area, while the semi-arid, and arid regions expanding, which indicates that the climate-sensitive regions are overspreading. Apparent wetting trends were observed in the extremely arid, arid and semi-arid regions. All the findings show that the boundary between the wet and dry regions was shifting during the period of 1991—2016 to the period of 1960—1990. The northern part of the country experienced a wetting process and the northwestern and western parts of the country and the Qinghai-

Tibetan Plateau did a significant one, too. The west boundaries of the extremely arid and arid regions shifted towards the east, and their south and north boundaries retreated inwardly. The trend of aridification was found in North China and parts of the Northeast China. The central section of the boundary of the semi-arid and semi-humid regions along the Yellow River in North China moved southeastward. The climate in the central part of Northeast China and western part of Northwest China was turning humid because of increasing precipitation and decreasing  $ET_0$ . On the contrast, the climate in the central and western parts of North China, and eastern and northeastern parts of Inner Mongolia was turning arid because of decreasing precipitation and increasing  $ET_0$ . In the eastern part of Northwest China, western part of Northwest China and eastern part of Inner Mongolia, PDO index was positively related to dry and wet climate, that is to say, when PDO is in its positive phase, precipitation in those regions would be higher and the surface climate relatively wet. When PDO is in its negative phase, precipitation in the above regions would be lower and the surface climate relatively dry. The case in North China was just opposite. Variation of the wet-dry climate was negatively related to PDO, namely when PDO is in its positive phase precipitation in North China tends to be lower and the surface climate relatively dry. When PDO is in its negative phase, precipitation in North China would be higher and the surface climate relatively wet. 【 Conclusion 】 All the findings in this paper suggest that the climate in northern part of the country was on the process of getting wet in two time period (period 1: 1960—1990; period 2: 1991—2016) and PDO is closely related to the dry-wet climate.

**Key words** Variation of dry-wet climate; Humid index;  $ET_0$ ; the Pacific Decade Oscillation; Northern China

(责任编辑：檀满枝)