

DOI: 10.5846/stxb201309022184

曹雯, 段春锋, 申双和. 1971—2010 年中国大陆潜在蒸散变化的年代际转折及其成因. 生态学报, 2015, 35(15): 5085-5094.

Cao W, Duan C F, Shen S H. Inter-decadal breakpoint in potential evapotranspiration trends and the main causes in China during the period 1971—2010. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15): 5085-5094.

# 1971—2010 年中国大陆潜在蒸散变化的年代际转折及其成因

曹 雯<sup>1,2</sup>, 段春锋<sup>3,\*</sup>, 申双和<sup>4</sup>

1 安徽省气象科学研究所, 合肥 230031

2 安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 合肥 230031

3 安徽省气候中心, 合肥 230031

4 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044

**摘要:**潜在蒸散时间演变的年代际转折研究有助于全面认识潜在蒸散对气候变化的响应。基于修正的 FAO56 Penman-Monteith 公式和中国 580 个台站逐日气象观测资料, 利用气候变化趋势转折判别模型分析了 1971—2010 年中国潜在蒸散变化的年代际转折特征, 并探讨转折前、后的变化趋势及其主导因素。结果表明: 1971—2010 年中国年平均潜在蒸散在 20 世纪 90 年代初期由显著下降 ( $-2.46 \text{ mm/a}$ ) 转变为显著上升 ( $1.57 \text{ mm/a}$ ), 这与影响潜在蒸散变化的 4 个气象因子趋势的年代际转折密切相关。90 年代之前, 全国风速和日照时数普遍下降引起的负贡献超过气温上升引起的正贡献, 导致潜在蒸散显著下降; 90 年代之后, 全国大部分地区的增暖加剧和干旱化使得气温和相对湿度的正贡献明显增大, 超过由于风速和日照时数下降趋势减缓甚至转折而减小的负贡献, 导致潜在蒸散显著上升。潜在蒸散趋势转折现象在全国 80% 以上的站点普遍存在, 且转折前、后主导因子的空间分布格局存在差异。90 年代之前, 风速和日照时数分别是北方和南方多数站点的主导因子; 90 年代之后, 以气温和相对湿度为主导因子的站点明显增多, 尤其是在西北地区、青藏高原和东南沿海部分地区。

**关键词:**潜在蒸散; 气候变化; 年代际趋势转折; 主导因子

## Inter-decadal breakpoint in potential evapotranspiration trends and the main causes in China during the period 1971—2010

CAO Wen<sup>1,2</sup>, DUAN Chunfeng<sup>3,\*</sup>, SHEN Shuanghe<sup>4</sup>

1 Anhui Meteorological Institute, Hefei 230031, China

2 Anhui Province Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing Key Laboratory, Hefei 230031, China

3 Anhui Climate Center, Hefei 230031, China

4 Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

**Abstract:** In the context of global warming, the impact of climate change on water resources is becoming increasingly significant and is thus drawing more attention. As a main component of the hydrological cycle, potential evapotranspiration ( $ET_0$ ) represents the maximum possible evaporation and is the rate of evaporation that would occur under given meteorological conditions from a continuously saturated surface.  $ET_0$  is essential for scheduling of irrigation system running times, preparing input data for hydrological models used in water balance studies, and assessing the hydrological impacts of the changing climate. Therefore, the trends of the changes in  $ET_0$  and its dominant factors across different regions of the

**基金项目:**国家自然科学基金项目(41405111, 41105098); 安徽省自然科学基金项目(1408085QD73); 淮河流域气象开放研究基金项目(HRM201209)

**收稿日期:**2013-09-02; **网络出版日期:**2014-10-16

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dcf118@126.com

world have been studied by many researchers in recent decades. Despite the global warming, decreasing trends in  $ET_0$  have been detected in several countries, including the United States, Russia, India, China, Australia, and New Zealand. Decreasing sunshine hours, declining wind speed, and increasing relative humidity have been considered to be the main causes of the decreasing  $ET_0$ . Analysis of the linear trend of the time series is frequently used in climate change research. The linear trend can reflect the overall trend of climate change over a time period, but it cannot describe the undulating character of climate change over a long time period. Thus, the characteristics of interdecadal turning of climatic factors, including air temperature, precipitation, and solar radiation, have become a topic of concern for many researchers worldwide. Thorough exploration of the interdecadal turning of  $ET_0$  trends can lead to a better understanding of the evolution and abrupt changes of  $ET_0$  related to climate change. Based on the FAO56 Penman-Monteith equation, interdecadal breakpoints in  $ET_0$  trends were studied using Tomé and Miranda's climate-trend turning discriminatory model for 580 meteorological stations across China during 1971—2010. Differences in the trends and determining factors between the before and after breakpoint periods were also analyzed. The results showed that annual average  $ET_0$  decreased significantly ( $-2.46$  mm/a) before the 1990s but increased significantly ( $1.57$  mm/a) after the 1990s across China. This phenomenon was closely related to the interdecadal breakpoints in the trends of four meteorological factors affecting  $ET_0$  variations. The decrease in  $ET_0$  that occurred before the 1990s was attributed to a larger absolute value of the negative contributions caused by decreasing wind speed and sunshine duration compared to that of the positive contribution caused by increasing air temperature. After the 1990s, positive contribution from the air temperature and relative humidity increased due to the more intensive warming and climatic aridity across most of the areas in China and exceeded the smaller absolute value of the negative contribution from the wind speed and sunshine duration, causing the increasing trend in  $ET_0$ . The interdecadal breakpoints existed at more than 80% of the meteorological stations across China, and there were differences between the pre- and post-breakpoint distribution patterns. Before the 1990s, wind speed and sunshine duration were the determining factors for most stations in North China and South China, respectively. After the 1990s, the number of stations with air temperature or relative humidity as a determining factor increased, especially in Northwest China, the Tibetan Plateau, and some parts of the southeastern coastal area.

**Key Words:** potential evapotranspiration; climate change; inter-decadal breakpoint; determining factors

过去 100 年来,全球地表普遍升温。受气候变暖的影响,水资源在数量和时空分配上也发生明显改变。作为水循环的重要环节,潜在蒸散( $ET_0$ )表示在一定气象条件下水分供应不受限制时某一固定下垫面可能达到的最大蒸散量<sup>[1-2]</sup>。它既是陆面水分平衡和地表能量平衡的主要组成部分,又是评价区域干湿状况、制定水资源管理计划和估算实际蒸散的关键因子,所以潜在蒸散在气候变化背景下的变化特征得到广泛关注。

目前的研究认为 20 世纪 50 年代到 21 世纪初以来,包括美国、前苏联、印度、中国、澳大利亚和新西兰<sup>[3-10]</sup>等全球大部分国家的  $ET_0$  整体上均有所减小,并主要归因于太阳辐射和风速的下降;尼日利亚东北干旱区<sup>[11]</sup>、伊朗北部地区<sup>[12]</sup>、加拿大大草原北部<sup>[13]</sup>和中国台湾高雄<sup>[14]</sup>等个别地区的  $ET_0$  表现出增加趋势,主要与风速的上升和相对湿度的减小有关。这些研究为认识  $ET_0$  对气候变化的响应奠定了基础,然而它们都是通过分析整个时间段上  $ET_0$  序列的线性趋势来讨论其总体变化特征,并未重视  $ET_0$  变化的年代际差异,不能完全反映  $ET_0$  的波动状况,存在一定的局限性。

20 世纪 80 年代以来,年代际气候变化已成为国际气候学研究的热门问题之一<sup>[15-18]</sup>。越来越多研究表明,气象要素的变化趋势存在年代际差异,有的甚至已形成明显趋势转折。IPCC 第 4 次全球气候评估报告中指出地面气温和降水的变化并不都是线性的,存在着阶段性的变化特征<sup>[16]</sup>;Karl 等人对 1880—1997 年间的全球平均气温分析发现,气温变化过程中存在趋势转折点<sup>[17]</sup>。王少鹏等指出中国 1961—2004 年的年均温变化趋势存在显著的转折点,全国平均升温开始于 1984 年,在 1984 年以前,年均温无显著变化<sup>[18]</sup>。近 50 年来

的地面辐射观测资料表明,全球很多区域都经历了从“变暗”到“变亮”的过程<sup>[19]</sup>。我国部分地区近 50 余年地面太阳辐射变化趋势也在 90 年代前后由减少转变为逐渐增加<sup>[20]</sup>。中国风速的下降趋势在 90 年代之后也有所减缓<sup>[3]</sup>。年代际气候变化是年际气候变化的重要背景,同时也是叠加在更长期气候变化趋势上的扰动<sup>[15]</sup>。那么,在与  $ET_0$  变化密切相关的太阳辐射、风速和气温等气象因子的变化趋势出现年代际差异的背景下,潜在蒸散的变化趋势是否也存在显著的年代际转折? 转折前后的变化趋势如何? 转折前后变化的主导因子是否相同? 回答以上问题需要把前人研究整个时间序列线性趋势的思路拓展到从年代际差异的角度来系统探讨潜在蒸散的变化特征,从而更加全面认识气候变化背景下  $ET_0$  的演变规律。

本文基于中国 580 个台站 1971—2010 年逐日气象观测资料,利用气候变化趋势转折判别模型判断我国 40 年来潜在蒸散变化发生年代际转折的时间,并在此基础上分析转折前后  $ET_0$  的变化趋势及其定量化成因,以期能够完整全面地理解中国潜在蒸散对气候变化的响应。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

本研究所用逐日气象资料来自中国气象局国家气象信息中心,包括:平均气温( $^{\circ}\text{C}$ ),最高气温( $^{\circ}\text{C}$ ),最低气温( $^{\circ}\text{C}$ ),10 m 高度处风速( $\text{m/s}$ ),日照时数( $\text{h}$ )和相对湿度( $\%$ )。剔除数据明显异常和缺测较多的台站,选取数据质量较高的 580 个站点,研究时段为 1971—2010 年。在前后两天资料完整的情况下,对参与计算  $ET_0$  的各逐日气象要素的缺测值用线性插值法替换。

### 1.2 Penman-Monteith 公式

潜在蒸散受到多种因素的影响,对它在较大区域范围内进行实测存在一定困难,因此通常采用模型来估算<sup>[21]</sup>。联合国粮农组织(FAO)在 1998 年推荐的 Penman-Monteith 公式以能量平衡和水汽扩散理论为基础,较全面考虑了作物的生理特征和空气动力学参数的变化<sup>[22]</sup>,在湿润和干旱等各种气候条件地区均得到广泛运用。其计算公式如下<sup>[22]</sup>:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{t + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中, $\Delta$  是温度随饱和水汽压变化的斜率( $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$ ); $R_n$  是净辐射( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ),根据 Yin<sup>[23]</sup> 等校正后的净辐射公式来计算得到; $G$  是土壤热通量密度( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ),它相对于  $R_n$  很小,特别是在植被覆盖、计算步长小于等于 1 d 的情况下,取值忽略为 0; $\gamma$  是干湿表常数( $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$ ); $t$  是日平均气温( $^{\circ}\text{C}$ ); $u_2$  是 2 m 高处风速( $\text{m/s}$ ); $e_s$  是饱和水汽压( $\text{kPa}$ ); $e_a$  是实际水汽压( $\text{kPa}$ )。

### 1.3 气候变化趋势转折判别模型

分析时间序列的线性趋势是气候变化研究中的常用方法,它可以获得某段时间内气候的总体变化趋势,但对于时间尺度较长的序列,整个时段上的线性趋势往往并不能描述气候变化的波动特征<sup>[24]</sup>。因此本文采用 Tomé 和 Miranda<sup>[25]</sup> 提出的气候变化趋势转折判别模型(PLFIM)分析 1971—2010 年中国  $ET_0$  变化趋势的转折特征。模型的基本思路为:首先根据所研究的气候变化问题时间尺度,给定趋势转折点的最小间隔,然后确定趋势转折的判别条件。在两个相邻趋势转折点的时间间隔必须大于或等于给定最小间隔的前提下,可以得到多种分段组合情况。分别计算每种组合内各时间段的线性变化趋势,并根据趋势转折判别条件判断其间是否发生趋势转折,最后利用统计分析原则确定满足趋势转折判别条件的最佳分段组合,即可得到所需时间尺度上的趋势转折点检验结果以及各时间段的线性变化趋势<sup>[15]</sup>。该模型用于对近 50 年来全球陆地地面气温与降水的年代际趋势转折特征<sup>[15]</sup>、中国大陆气候型的年代际趋势转折特征<sup>[24]</sup> 和中国 40a 来气温变化的阶段性特征<sup>[18]</sup> 进行分析时都取得了较好的效果。

针对 40a 的  $ET_0$  时间序列,本文假设研究时段区间内只有一个转折点,且转折点前后的序列长度均大于

10a;根据趋势转折判别条件(要求两个连续分段的线性变化趋势符号相反或变化程度达到一定的百分比),利用 A. R. Tomé<sup>[25]</sup>的趋势转折判别模型程序获得某种分段组合情况,计算并检验该组合内各时间段的线性变化趋势。如果两个时间段的变化趋势出现上升与下降之间的转变或显著与不显著之间的转变,都认为转折点存在。

#### 1.4 气象因子的贡献

通过 FAO56-PM 公式计算出的潜在蒸散独立于作物类型、作物生长状况及土壤水分状况,主要只受气象要素的影响<sup>[22]</sup>。从 FAO56-PM 公式可以看出,潜在蒸散是气温、风速、相对湿度和日照时数这 4 个气象因子的函数,即  $ET_0 = f(TA, WD, RH, SD)$ 。因此  $ET_0$  随时间  $t(a)$  的变化可分解为:

$$\frac{dET_0}{dt} = \frac{\partial ET_0}{\partial TA} \cdot \frac{dT_A}{dt} + \frac{\partial ET_0}{\partial WD} \cdot \frac{dWD}{dt} + \frac{\partial ET_0}{\partial RH} \cdot \frac{dRH}{dt} + \frac{\partial ET_0}{\partial SD} \cdot \frac{dSD}{dt} \quad (2)$$

式中,  $ET_0$  的变化是 4 个气象因子共同作用的结果,即等号左边是潜在蒸散的变化情况,等号右边的 4 项分别代表气温、风速、相对湿度和日照时数对潜在蒸散变化的贡献,并规定引起  $ET_0$  上升为正贡献,引起  $ET_0$  下降为负贡献。通过比较各因子对  $ET_0$  变化贡献的绝对值,得出影响潜在蒸散变化的主导因子<sup>[26]</sup>。

## 2 结果分析

### 2.1 全国潜在蒸散变化趋势分析

1971—2010 年,中国年平均潜在蒸散整体上以  $-0.43 \text{ mm/a}$  的速率减少。但是根据气候变化趋势转折判别模型的计算结果,年平均  $ET_0$  时间序列的变化趋势在 1991 年发生明显转折(图 1)。1991 年之前  $ET_0$  以  $-2.46 \text{ mm/a}$  的速率显著下降,而 1991 年之后  $ET_0$  以  $1.57 \text{ mm/a}$  的速率显著上升,转折年前后的变化趋势均通过  $\alpha=0.01$  的显著性检验。因此,整体递减率掩盖了 20 世纪 90 年代之后  $ET_0$  增加的事实,分不同年代际讨论中国  $ET_0$  的变化规律及其成因很有必要。

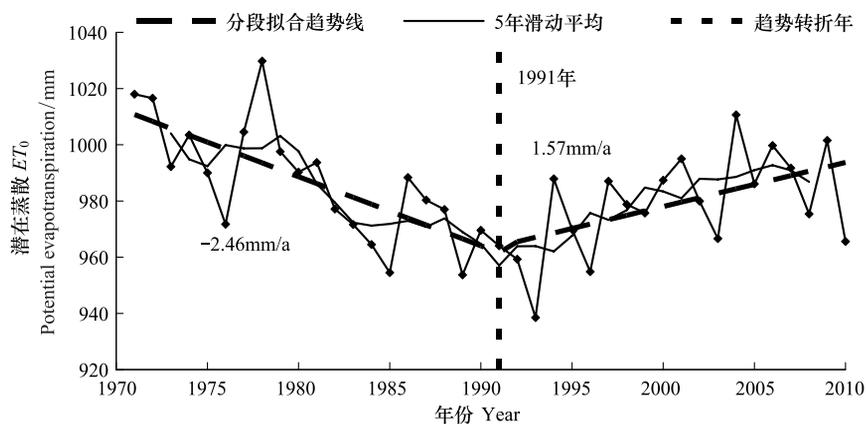


图 1 1971—2010 年间中国潜在蒸散的变化过程

Fig.1 Mean yearly variations of potential evapotranspiration over China during 1971 to 2010

$ET_0$  变化趋势的年代际转折现象在全国超过 80% 的气象站点普遍存在,且基本发生在 20 世纪 90 年代初期,未出现转折的站点在华北地区较为集中。统一以 1991 年为转折点,计算了转折年前、后两段时期 580 个站点  $ET_0$  的变化趋势。统计发现(图 2),1991 年之前有 463 个站点的  $ET_0$  呈下降趋势,占到总站数的 79.8%,上升趋势的站点仅集中分布在海南、广西沿海、山东半岛及辽东半岛,且大多均不显著。而在 1991 年之后有 398 个站点的  $ET_0$  呈上升趋势,占到总站数的 68.6%,下降趋势的站点主要位于海南、辽东半岛和华北平原,仅有少部分通过  $\alpha=0.01$  的显著性检验(图 2)。

### 2.2 全国潜在蒸散变化趋势转折的成因

蒸散过程中,日照时数和气温是利于蒸发的能量因素,风速和相对湿度是利于蒸发的动力因素,因此  $ET_0$

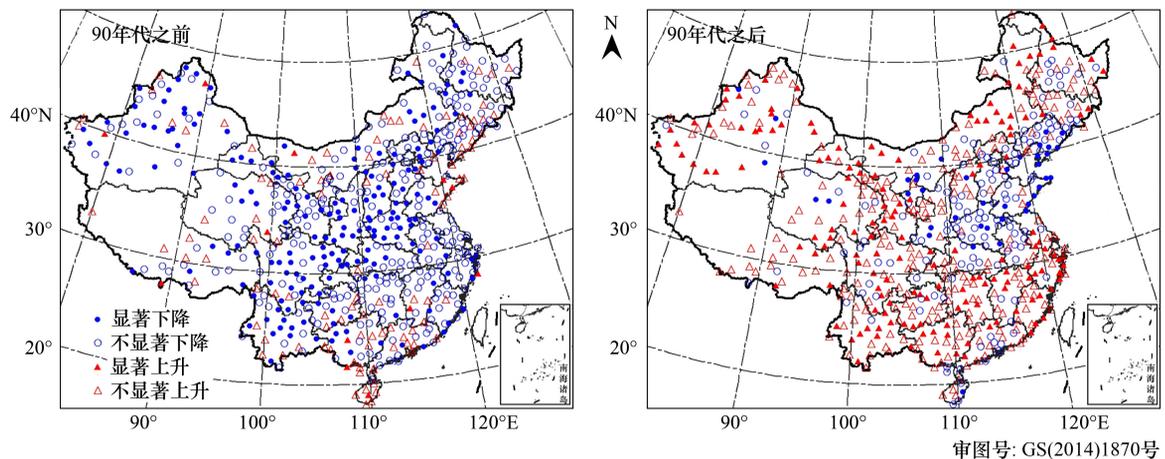


图2 20世纪90年代前、后中国580个站点潜在蒸散的变化趋势

Fig.2 Change trends of potential evapotranspiration of 580 meteorological stations over China before and after 1990s

的变化与这4个要素的变化密切相关。 $ET_0$ 变化的阶段性主要是由于4个要素对其变化的贡献存在年代际差异。

20世纪90年代之前,中国大部分地区缓慢升温<sup>[18]</sup>,气温对 $ET_0$ 的变化在全国86.7%的站点一致表现为正贡献(图3),负贡献的地区仅分布在南阳盆地和四川盆地。各地风速的普遍下降使其在超过85%的站点为负贡献,正贡献的站点较少,且分布无明显规律。相对湿度正贡献与负贡献的站点数基本相当,其中正贡献主要分布在西藏部分地区,东北大部,内蒙古,海南,云贵高原和两广丘陵。日照时数在中国大部分地区的显著下降使得它对 $ET_0$ 的变化在79.7%的站点为负贡献,只有海南,河西走廊,青海南部,山东半岛的正贡献站点较为集中(图3)。所以从贡献正负特征的空间一致性来看,气温、风速和日照时数的较强,三者贡献的全国均值分别为0.68 mm/a、-1.43 mm/a和-1.31 mm/a;而相对湿度的较弱,它的正、负贡献的全国均值分别为0.46 mm/a和-0.40 mm/a,几乎相互抵消。因此对于90年代之前全国平均 $ET_0$ 而言,在相对湿度作用微弱的情况下,它的变化趋势主要取决于其他3个要素的贡献。风速和日照时数的负贡献之和达到-2.74 mm/a,明显大于气温的正贡献,导致 $ET_0$ 显著下降。这在一定程度上有利于地表湿润度的提高和灌溉量的减少,对农牧业生产的发展和水资源优化带来正面效应。

20世纪90年代之后,全国增温更加显著,气温负贡献站点进一步减少,仅占总数的7.6%,且呈零散无序分布状态(图4)。风速的下降趋势有所减缓,甚至在部分地区已由下降转为微弱上升<sup>[27,28]</sup>,所以呈正贡献站点明显增多,占总数的41.9%,集中分布在新疆,甘肃,海南大部,四川盆地、云贵高原及两广丘陵的部分地区(图4)。各地尤其是北方地区出现的“暖干”化趋势<sup>[24,29-31]</sup>使得相对湿度相应下降,有利于蒸散过程,因而呈正贡献的站点明显增加,超过总数的80%,而负贡献站点较集中的地区只在辽宁省,其他负贡献站点均呈零星分布(图4)。部分区域经历的由“变暗”到“变亮”的转折<sup>[20]</sup>导致日照时数正贡献站点数增多,而另一部分地区日照时数的下降趋势减弱,但并未实现转折,仍表现为负贡献,所以正、负贡献站点数接近1:1。其中正贡献地区扩大至长江以南大部分地区,四川盆地,新疆及东北部分地区(图4)。可以看出,气温贡献的正负特征在空间上高度统一,基本上均为正贡献,其全国均值达到1.14 mm/a;相对湿度贡献正负特征的空间一致性也显著改善,全国均值为0.77 mm/a。风速和日照时数贡献正负特征的空间一致性减弱,风速正、负贡献的全国均值为1.43 mm/a和-1.53 mm/a,日照时数正、负贡献的全国均值为1.45 mm/a和-1.48 mm/a。两个要素各自的正贡献与对应的负贡献几乎相互抵消,整体上对 $ET_0$ 变化的作用很微弱。因此对于90年代之后全国平均 $ET_0$ 而言,它的变化趋势主要受气温和相对湿度的影响,这两者的正贡献之和达到1.91 mm/a,导致 $ET_0$ 显著上升。这表明在各相关气象因子变化趋势发生转折的背景下,90年代之后 $ET_0$ 的变化状况已经不同于90年代之前, $ET_0$ 对于生态环境的作用有必要重新评估。

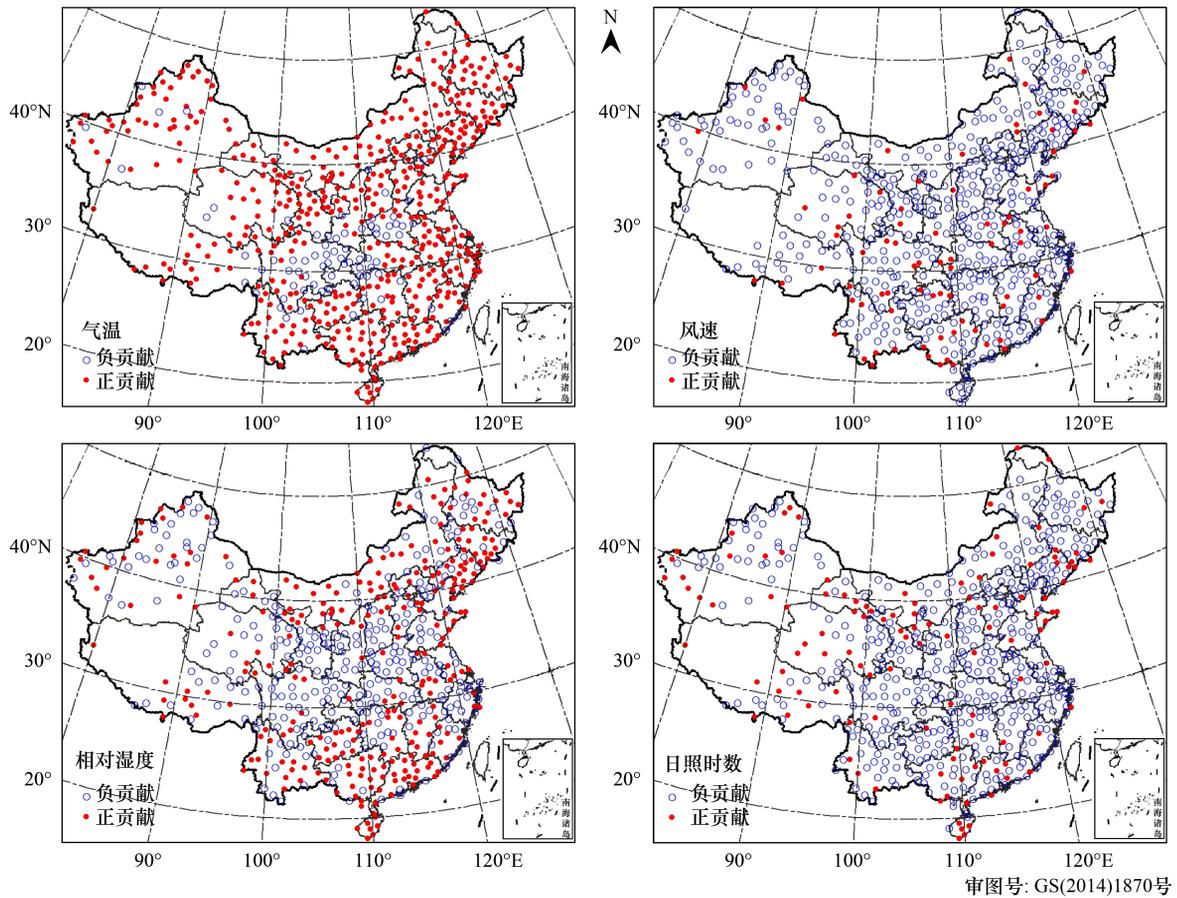


图3 20世纪90年代之前气象要素对潜在蒸散变化的贡献

Fig.3 Spatial distribution of the contributions for four climate variables to potential evapotranspiration over China before 1990s

### 2.3 潜在蒸散变化主导因子的空间分布

从图5可以看出:20世纪90年代之前,45.0%站点的主导因子是日照时数,位于黄河以南大部分地区,这一区域的日照时数变化趋势较明显且 $ET_0$ 变化对日照时数变化较敏感;37.1%站点的主导因子是风速,分布于西北大部、华北大部和辽宁省,这些区域的风速变化显著且 $ET_0$ 变化对风速变化较敏感;15%站点的主导因子是气温,集中在东北部分地区;仅有2.9%站点的主导因子是相对湿度,且呈零星分布状态。

20世纪90年代之后相关气象要素变化趋势的转折和 $ET_0$ 变化对不同要素敏感程度的改变使得主导因子的空间分布格局与90年代之前存在明显差异。90年代之后,32.9%站点的主导因子是日照时数,较为集中的地区是华北平原、长江中下游地区、两广丘陵、四川南部和云南南部;31.6%站点的主导因子是风速,主要位于新疆部分地区、青海中部、内蒙古西部和东北部分地区;21.0%站点的主导因子是气温,分布在河西走廊、祁连山、青藏高原和新疆西部;14.5%站点的主导因子是相对湿度,但地区分布规律性不强,仅在吉林北部较为集中。90年代之后以气温和相对湿度为主导因子的站点明显增多,尤其是在西北地区、青藏高原和东南沿海部分地区。

## 3 讨论

本文研究发现,中国年平均 $ET_0$ 的变化趋势在20世纪90年代初期发生了明显转折,且这种现象在全国普遍存在,主要与影响 $ET_0$ 变化的气象要素的趋势转折密切相关。

蒸发过程中的能量供给主要源于太阳辐射,用日照时数计算所得的太阳辐射与观测值间相关性较高<sup>[32]</sup>。国内外众多研究都认为太阳辐射或日照时数是 $ET_0$ 变化的重要影响因子<sup>[4-10]</sup>,本文的研究也表明日照时数在

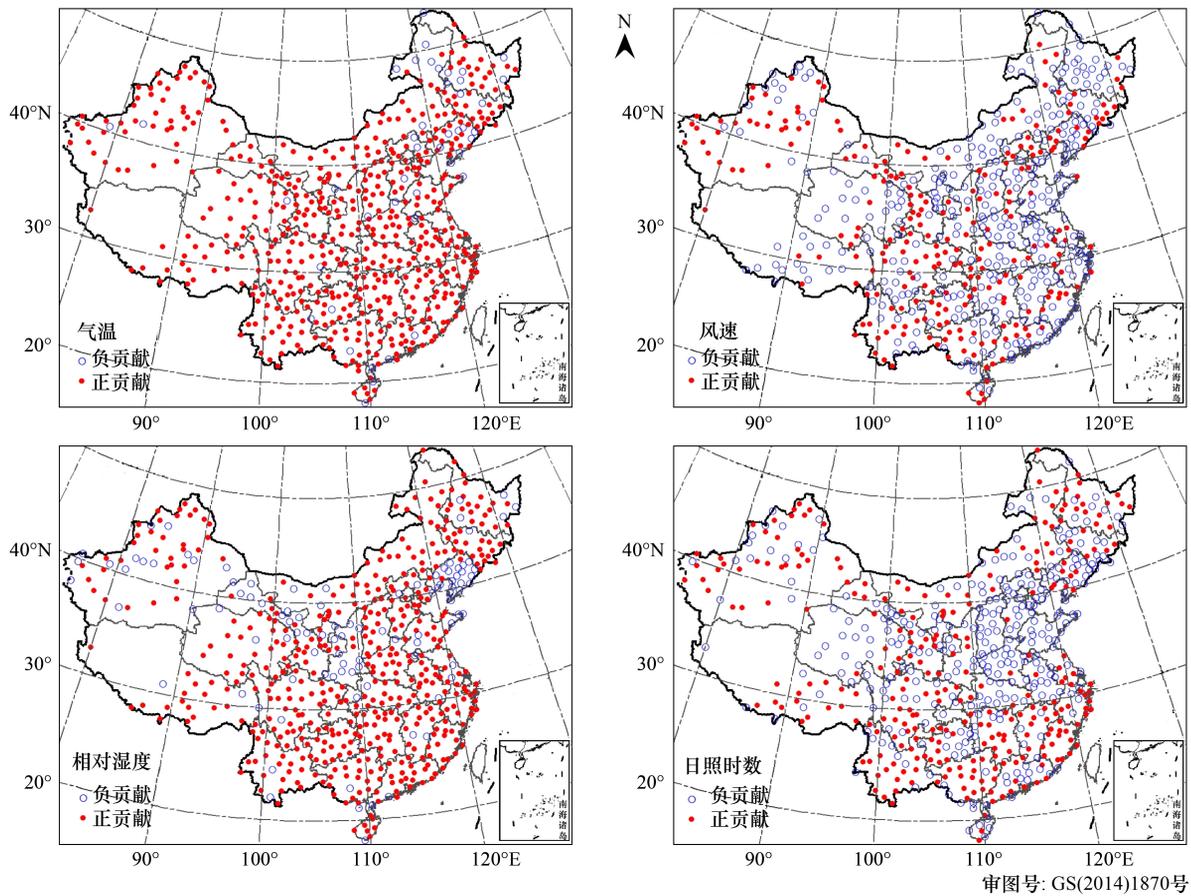


图 4 20 世纪 90 年代之后气象要素对潜在蒸散变化的贡献

Fig.4 Spatial distribution of the contributions for four climate variables to potential evapotranspiration over China after 1990s

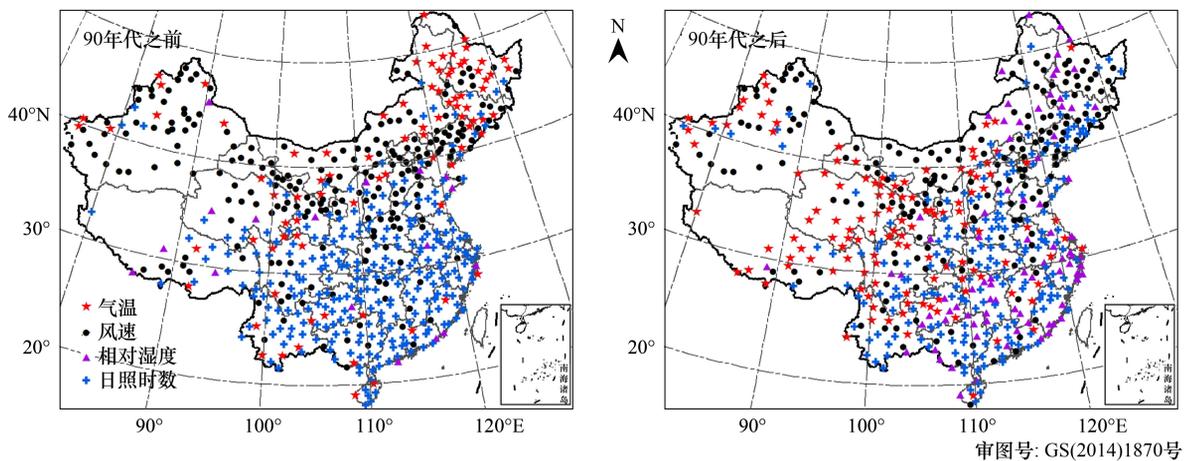


图 5 20 世纪 90 年代前、后中国 580 个站点潜在蒸散变化的主导因子

Fig.5 Determining factors of potential evapotranspiration of 580 meteorological stations over China before and after 1990s

中国南方大部分地区的  $ET_0$  变化中发挥着主导作用。20 世纪 50 年代以来,全球的地面太阳辐射大多经历了一个从减少到增加的过程,也就是所谓的地球“变暗”到“变亮”<sup>[19]</sup>。我国大部分区域近 50 余年太阳辐射或日照时数的变化也发生了类似的转折,1960—1990 年左右呈下降趋势,从 1990 年前后开始逐渐增加<sup>[14]</sup>。从本研究来看,伴随着太阳辐射变化趋势的转折,它对  $ET_0$  变化的作用也发生转变。“变暗”时,太阳辐射(日照时数)在全国以负贡献为主,引起  $ET_0$  的下降;“变亮”时,太阳辐射(日照时数)的负贡献明显减小,正贡献有

所增加,在部分地区引起  $ET_0$  上升,表明  $ET_0$  趋势的转折对太阳辐射(日照时数)趋势的转折很敏感。太阳辐射的变化不仅与太阳活动有关,而且会受到云和大气(包括基本大气成分、气溶胶和水汽等)的影响<sup>[20]</sup>。50年代以来,中国的总云量一直减少<sup>[33-35]</sup>。但这种变化却无法解释1990年之前我国地面太阳辐射的减少,尽管它对于1990年之后地面太阳辐射的增加是有利的。中国人为气溶胶在90年代初期增加至最高值,其后有所下降<sup>[36]</sup>,与太阳辐射的变化有一定的反相关,说明气溶胶的变化在我国太阳辐射变化中可能起着相当重要的作用。

蒸散过程中的水汽输送条件主要取决于风速的大小。在过去30—50a,中纬度大部分地区,包括澳大利亚、中国、欧洲和北美洲<sup>[37-42]</sup>的近地面风速变化呈现减小趋势,趋势在 $-0.004 \text{ ms}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 到 $-0.017 \text{ ms}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 之间,平均减小趋势大约为 $-0.010 \text{ ms}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 。虽然近50年中国地面风速总体上显著下降,但这种下降趋势在90年代之后已明显有所减缓<sup>[27-28]</sup>。本文认为,风速显著下降是90年代之前中国北方 $ET_0$ 下降的主要原因;90年代之后,随着风速下降趋势的减缓, $ET_0$ 变化中风速的负贡献作用被逐渐削弱。风速的变化主要受自然和人为两大因素影响。研究认为中国风速显著下降主要归因于大气环流或季风的减弱<sup>[39]</sup>和下垫面人为改变<sup>[43]</sup>。至于90年代之后风速下降趋势的减缓更多的与自然因素有关。

IPCC第4次全球气候评估报告指出,过去100年来地表气温上升显著,而近50年的上升幅度几乎是过去100年的2倍<sup>[16]</sup>,说明地面气温的变化存在着阶段性特征。气象资料也显示,全球平均气温最高的10个年份都是在1998年后出现的。近50年来,中国年平均地表气温上升了 $1.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,但这种增温存在明显的年代际差异,增温主要发生在20世纪80年代中后期,且有加快趋势<sup>[44]</sup>。这与本文气温对 $ET_0$ 变化的正贡献在90年代之后明显增强相一致。近年来“蒸发悖论<sup>[45]</sup>”颇受关注,它是指全球升温背景下蒸发量减少事实与预期增加之间的矛盾。从本文的研究结果来看,中国气温在近40年一直为 $ET_0$ 变化提供正贡献,它与 $ET_0$ 趋势是否一致也应该分为两个阶段来讨论。90年代之前,风速和日照时数的负贡献超过了气温的正贡献,即使在明显变暖的背景下, $ET_0$ 仍然表现为下降趋势;90年代之后,增温进一步加剧,且风速和日照时数在部分地区的贡献由负转正,全国整体上正贡献超过了负贡献, $ET_0$ 从而显著上升,与变暖保持一致。所以说,“蒸发悖论”在一定程度上孤立看待了气温对 $ET_0$ 变化的正贡献,忽略了其他要素的作用,又没有考虑 $ET_0$ 变化的阶段性。

相对湿度是表征一个地区空气湿润或干燥的重要物理量,它的变化与地表干湿状况的变化密切相关。气候变暖背景下,近半个世纪全球极端干旱区域的面积扩大了两倍以上<sup>[46]</sup>。大量事实也揭示20世纪80年代以后,在降水减少和气温升高的影响下,西北部、华北和东北地区等中国北方区域干旱化正在加剧<sup>[29-31]</sup>。相反,中国另一部分区域,包括西北西部、西南、高原东部地区、江淮地区及华南地区在80年代前后发生了由“干”到“湿”的转变<sup>[24]</sup>。干湿状况的转变伴随着相对湿度趋势的转折。从本文的研究结果来看,虽然90年代之前相对湿度对于 $ET_0$ 变化的贡献远小于其他3个因子,但它对90年代之后全国平均 $ET_0$ 的上升起到重要作用。

#### 4 结论

本文基于修正的FAO56 Penman-Monteith公式和中国580个台站1971—2010年逐日气象观测资料估算了中国40年来的潜在蒸散 $ET_0$ ,深入分析了 $ET_0$ 变化趋势的年代际转折特征及发生转折的主要原因。结论如下:

(1) 1971—2010年中国年平均潜在蒸散时间序列的变化趋势在90年代初期存在明显的年代际转折,且这种转折现象在全国80%以上的站点普遍存在。

(2) 对于全国平均 $ET_0$ 而言,90年代之前,相对湿度作用微弱,风速和日照时数的负贡献之和明显大于气温的正贡献,导致 $ET_0$ 以 $-2.46 \text{ mm/a}$ 的速率显著下降;90年代之后,风速和日照时数的作用整体上可以忽略,气温和相对湿度的正贡献导致 $ET_0$ 以 $1.57 \text{ mm/a}$ 的速率显著上升。

(3) 580个站点 $ET_0$ 变化主导因子的空间分布格局在趋势转折前、后存在差异。90年代之前,风速和日照

时数分别是北方和南方多数站点的主导因子;90 年代之后,以气温和相对湿度为主导因子的站点明显增多,尤其是在西北地区、青藏高原和东南沿海部分地区。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 尹云鹤, 吴绍洪, 郑度, 杨勤业. 近 30 年我国干湿状况变化的区域差异. 科学通报, 2005, 50(15): 1636-1642.
- [ 2 ] 程玉菲, 王根绪, 席海洋, 王军德. 近 35a 来黑河干流中游平原区陆面蒸散发的变化研究. 冰川冻土, 2007, 29(3): 406-412.
- [ 3 ] 尹云鹤, 吴绍洪, 戴尔阜. 1971-2008 年我国潜在蒸散时空演变的归因. 科学通报, 2010, 55(22): 2226-2234.
- [ 4 ] Brutsaert W, Parlange M B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. Nature, 1998, 396(6706): 30.
- [ 5 ] Chattopadhyay N, Hulme M. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change. Agricultural and Forest Meteorology, 1997, 87(1): 55-73.
- [ 6 ] Golubev V S, Lawrimore J H, Groisman P Y, Speranskaya N A, Zhuravin S A, Menne M J, Peterson T C, Malone R W. Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: A reassessment. Geophysical Research Letters, 2001, 28(13): 2665-2668.
- [ 7 ] Ohmura A, Wild M. Is the hydrological cycle accelerating?. Science, 2002, 298(5597): 1345-1346.
- [ 8 ] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength. Nature, 1995, 377(6551): 687-688.
- [ 9 ] Thomas A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China. International Journal of Climatology, 2000, 20(4): 381-396.
- [ 10 ] Gao G, Chen D L, Ren G Y, Chen Y, Liao Y M. Spatial and temporal variations and controlling factors of potential evapotranspiration in China: 1956-2000. Journal of Geographical Sciences, 2006, 16(1): 3-12.
- [ 11 ] Hess T M. Trends in reference evapo-transpiration in the North East Arid Zone of Nigeria, 1961—1991. Journal of Arid Environments, 1998, 38(1): 99-115.
- [ 12 ] Dinpashoh Y, Jhajharia D, Fakheri-Fard A, Singh V P, Kahya E. Trends in reference crop evapotranspiration over Iran. Journal of Hydrology, 2011, 399(3/4): 422-433.
- [ 13 ] Yu P S, Yang T C, Chou C C. Effects of climate change on evapotranspiration from paddy fields in southern Taiwan. Climate Change, 2002, 54(1/2): 165-179.
- [ 14 ] Burn D H, Hesch N M. Trends in evaporation for the Canadian Prairies. Journal of Hydrology, 2007, 336(1/2): 61-73.
- [ 15 ] 施晓晖, 徐祥德. 1951—2002 年全球陆地气温和降水的年代际趋势转折特征. 自然科学进展, 2008, 18(9): 1016-1026.
- [ 16 ] Intergovernmental Panel on Climate Change (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: 241-253.
- [ 17 ] Karl T R, Knight R W, Baker B. The record breaking global temperatures of 1997 and 1998: Evidence for an increase in the rate of global warming? Geophysical Research Letters, 2000, 27(5): 719-722.
- [ 18 ] 王少鹏, 王志恒, 朴世龙, 方精云. 我国 40 年来增温时间存在显著的区域差异. 科学通报, 2010, 55(16): 1538-1543.
- [ 19 ] Wild M, Gilgen H, Roesch A, Ohmura A, Long C N, Dutton E G, Forgan B, Kallis A, Russak V, Tsvetkov A. From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at Earth's surface. Science, 2005, 308(5723): 847-850.
- [ 20 ] 申彦波, 赵宗慈, 石广玉. 地面太阳辐射的变化、影响因子及其可能的气候效应最新研究进展. 地球科学进展, 2008, 23(9): 915-923.
- [ 21 ] 史建国, 严昌荣, 何文清, 刘克礼, 刘勤. 黄河流域潜在蒸散量时空格局变化分析. 干旱区研究, 2007, 24(6): 773-778.
- [ 22 ] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO, 1998.
- [ 23 ] Yin Y H, Wu S H, Zheng D, Yang Q Y. Radiation calibration of FAO56 Penman-Monteith model to estimate reference crop evapotranspiration in China. Agricultural Water Management, 2008, 95(1): 77-84.
- [ 24 ] 施晓晖, 徐祥德. 中国大陆冬夏季气候型年代际转折的区域结构特征. 科学通报, 2006, 51(17): 2075-2084.
- [ 25 ] Tomé A R, Miranda P M A. Piecewise linear fitting and trend changing points of climate parameters. Geophysical Research Letters, 2004, 31(2), doi: 10.1029/2003GL019100.
- [ 26 ] 曹雯, 申双和, 段春锋. 中国西北潜在蒸散时空演变特征及其定量化成因. 生态学报, 2012, 32(11): 3394-3403.
- [ 27 ] 虞海燕, 刘树华, 赵娜, 于永涛, 于丽萍, 曹海维. 我国近 59 年日照时数变化特征及其与温度、风速、降水的关系. 气候与环境研究, 2011, 16(3): 389-398.
- [ 28 ] 张爱英, 任国玉, 郭军, 王颖. 近 30 年我国高空风速变化趋势分析. 高原气象, 2009, 28(3): 680-687.
- [ 29 ] 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.
- [ 30 ] 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.

- [31] 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.
- [32] Zhang Y Q, Liu C M, Tang Y H, Yang Y H. Trends in pan evaporation and reference and actual evapotranspiration across the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112: D12110.
- [33] Qian Y, Kaiser D P, Leung L R, Xu M. More frequent cloud-free sky and less surface solar radiation in China from 1955 to 2000. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33, L01812, doi: 10.1029/2005GL024586.
- [34] Kaiser D P. Analysis of total cloud amount over China, 1951-1994. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(19): 3599-3602.
- [35] Kaiser D P. Decreasing cloudiness over China: An updated analysis examining additional variables. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(15): 2193-2196.
- [36] Streets D G, Yu C, Wu Y, Chin M, Zhao Z C, Hayasaka T, Shi G Y. Aerosol trends over China, 1980-2000. *Atmospheric Research*, 2008, 88(2): 174-182.
- [37] Roderick M L, Rotstayn L D, Farquhar G D, Hobbins M T. On the attribution of changing pan evaporation. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34, L17403, doi: 10.1029/2007GL031166.
- [38] Xu C Y, Gong L B, Jiang T, Chen D L, Singh V P. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment. *Journal of Hydrology*, 2006, 327(1/2): 81-93.
- [39] Xu M, Chang C P, Fu C B, Qi Y, Robock A, Robinson D, Zhang H M. Steady decline of East Asian Monsoon winds, 1969-2000: Evidence from direct ground measurements of wind speed. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: D24111, doi: 10.1029/2006JD007337.
- [40] Pirazzoli P A, Tomasin A. Recent near-surface wind changes in the central Mediterranean and Adriatic areas. *International Journal of Climatology*, 2003, 23(8): 963-973.
- [41] Klink K. Trends in mean monthly maximum and minimum surface wind speeds in the coterminous United States, 1961 to 1990. *Climate Research*, 1999, 13(3): 193-205.
- [42] Tuller S E. Measured wind speed trends on the west coast of Canada. *International Journal of Climatology*, 2004, 24(11): 1359-1374.
- [43] 李艳, 王元, 储惠芸, 汤剑平. 中国陆域近地层风能资源的气候变异和下垫面人为改变的影响. 科学通报, 2008, 53(21): 2646-2653.
- [44] 丁一汇, 任国玉, 林而达. 气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2007; 25-26.
- [45] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science*, 2002, 298(5597): 1410-1411.
- [46] Dai A G, Trenberth K E, Qian T T. A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5(6): 1117-1130.