

谢睿恒, 王爱慧, 华维. 2020. 1961~2013 年中国蒸发皿蒸发量时空分布特征及其影响因素 [J]. 气候与环境研究, 25(5): 483–498. XIE Ruiheng, WANG Aihui, HUA Wei. 2020. Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Influencing Factors of Pan Evaporation in China from 1961 to 2013 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25 (5): 483–498. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19130

# 1961 ~ 2013 年中国蒸发皿蒸发量时空分布特征及其影响因素

谢睿恒<sup>1,2</sup> 王爱慧<sup>2</sup> 华维<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225

<sup>2</sup> 中国科学院大气物理研究所竺可桢—南森国际研究中心, 北京 100029

**摘要** 分析了 1961~2013 年中国 1302 个台站的蒸发皿蒸发量 (Pan Evaporation, PE) 的时空分布特征并探讨了影响 PE 变化的主要气候因子。结果表明: 站点平均 PE 在全年和四季都呈明显下降趋势, 且在 1978 年发生了突变。PE 在华北平原、新疆、广东、广西及海南等地呈现出显著的下降趋势, 而在福建、浙江和贵州等地为显著上升的趋势。用年平均 PE 距平场经验正交函数做经验正交函数 (EOF) 分解得到: 在第一模态 (EOF1) 中, 1981 年时间系数由负转正, EOF1 的空间模态与 PE 的变化有较好的一致性; 第二模态 (EOF2) 中 PE 距平呈南北反向分布, 2002 年以后 PE 在北方减小, 在南方增大。通过计算 PE 与近地面 5 个气象因子 (降水、气温、风速、湿度、日照时数) 的偏相关系数后发现: 除了降水外, 其余 4 个因子都和 PE 有很好的相关性。风速与 PE 为显著正相关, 且相关系数最大的区域与 EOF1 中 PE 变率最大的区域吻合; 相对湿度与 PE 为显著负相关; PE 与气温的相关系数都为正值, 且相关系数最大的区域对应于 PE 显著增加的地区, 而与日照时数的相关系数在除春季以外的其他季节都大于 0.6。进一步分析发现, 风速和日照时数与 PE 的关系受两个气象因子的线性趋势影响较大, 以此推断出 PE 的下降趋势应该很大程度是受风速和日照时数减小的影响。此外, 干旱发生时, PE 明显偏大, 降水、气温、湿度和日照时数的变化也都对 PE 增大有明显的贡献, PE 对干旱有很好的指示作用。

**关键词** 中国 蒸发皿蒸发量 时空分布 趋势 影响因子 干旱

文章编号 1006-9585(2020)05-0483-16

中图分类号 P426.2<sup>+</sup>1

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19130

## Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Influencing Factors of Pan Evaporation in China from 1961 to 2013

XIE Ruiheng<sup>1,2</sup>, WANG Aihui<sup>2</sup>, and HUA Wei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

<sup>2</sup> Nansen-Zhu International Research Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

**Abstract** Based on pan evaporation (PE) observations at 1302 weather stations in China for 1961–2013, in this paper, we present our analysis of the temporal and spatial characteristics and their impact on the climate factors of PE. The

收稿日期 2019-08-26; 网络预出版日期 2020-01-17

作者简介 谢睿恒, 男, 1994 年出生, 硕士研究生, 主要从事陆气相互作用与气候变化方面的研究。E-mail: xieruiheng@mail.iap.ac.cn

通讯作者 王爱慧, E-mail: wangaihui@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41875106, 国家重点研发计划项目 2016YFA0602401

**Funded by** National Natural Science Foundation of China (Grant 41875106), National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFA0602401)

results indicate that both the annual and seasonal mean PE values from all stations show a significant downward trend, with an abrupt change occurring in 1978. The stations with a significant downward PE trend are mainly located in the North China Plain, Xinjiang, Guangdong, Guangxi, and Hainan provinces, whereas PE shows a significantly increasing trend in Fujian, Zhejiang, and Guizhou provinces. We performed empirical orthogonal function (EOF) analyses of the annual PE anomalies. For the first mode (EOF1), the time coefficient changes from positive to negative in 1981, and the variation of the EOF1 spatial pattern is similar as that of PE magnitude. The EOF2 mode presents opposite patterns in South and North China and after 2002, the PE decreased in North China, but increased in South China. Additionally, we calculated the partial correlation coefficients between PE and five climate elements, including precipitation, temperature, surface wind speed, relative humidity, and sunshine duration. The results show that except for precipitation, the other four variables are very well correlated with PE. The correlation between wind speed and PE is significantly positive, and the regions with the highest correlation are consistent with those with the largest EOF1 variability. The correlation between humidity and PE is significantly negative. The correlation between temperature and PE are positive overall, with the largest values appearing in areas where PE increases. The correlation coefficients between the sunshine duration and PE are greater than 0.6 in three seasons but not in spring. Moreover, we found that the linear trends of both wind speed and sunshine duration greatly impact their relationships with PE. Thus, we conclude that a decreasing trend in PE is largely because of decreasing wind speed and sunshine duration. Furthermore, when drought occurs, PE increases significantly, and the changes in precipitation, temperature, relative humidity, and sunshine duration also significantly contribute to the increases in PE. As such, PE could be a good indicator of drought.

**Keywords** China, Pan evaporation, Spatial-temporal distribution, Trend, Impact factors, Drought

## 1 引言

蒸发是陆地和大气水热交换的主要纽带, 蒸发潜热的释放会影响近地表的水分平衡和能量平衡, 蒸发在农业和地表水文过程中都起着重要作用。蒸发皿蒸发量 (Pan Evaporation, 简称 PE) 是气象台站中的常规观测项目, 其主要是通过直径 20 cm 的小型蒸发皿以及 E601 型蒸发器 (大型蒸发桶) 进行观测。其中小型蒸发皿是口径 20 cm, 高度 10 cm 的金属圆盆, 安装在离地 70 cm 的高度上进行测量; 而 E601 型蒸发器则是一个器口面积为 3000 cm<sup>2</sup> 的大型蒸发桶, 安装时要求其埋在地下, 且蒸发桶口缘离地 7.5 cm 以下。由于大型蒸发桶的构造和安装高度等因素更加合理所以要比小型蒸发皿更接近水面蒸发 (黄秋红, 2000; 褚荣浩等, 2018)。蒸发的研究对于旱涝灾害的成因, 水资源的利用和调配, 以及水利工程、农林牧业等都有着重要意义。因此, 研究中国 PE 的空间分布特征和时间变化趋势非常重要。

一般而言, 气温的上升会使得大气的饱和含水量增大, 当地表水分充足时, 实际蒸发量也会增加。而在进行观测时, 蒸发皿中的水分是不受限制的, PE 代表着水分供应充足情况下的蒸发, 其本应随气温升高而增大, 但在全球变暖的气候背景下, 许多地区 PE 却呈现出下降的趋势 (Peterson et al.,

1995; Roderick et al., 2002, 2004, 2005; Ohmura and Wild, 2002; Wang et al., 2012a; Zhang et al., 2015), 这即是蒸发悖论。正因如此, 有必要对蒸发的变化进行归因分析, 而由于 PE 是一个对近地面气候变化十分敏感的量, 风速、相对湿度、降水量、日照时长和气温等近地面气象因子对其都有影响。因此, 具体是什么要素主导了 PE 的变化, 成为了研究的重点所在。Liu et al. (2004) 利用中国 85 个气象站点 1955~2000 年的数据, 分 8 个气候区分析了 PE 的变化, 发现 PE 呈显著下降趋势, 并将其归因于气溶胶引起的近地面太阳辐射的下降所致。Yang et al. (2012) 通过研究中国 54 个气象站 1961~2001 年的资料, 发现在大部分地区 PE 减小是由于风速减小, 而在西南部则是由于太阳辐射减小所导致。祁添垚等 (2015) 则利用中国 588 个气象站 1960~2005 年的资料, 通过模糊聚类 FCM 算法将中国分为 3 个 PE 变化差异区, 发现东中南分区 (中国南部、中部、西南部和东部) 和西北分区 PE 下降趋势显著, 并认为相对湿度是关键影响因子。另外, 研究表明 PE 在黄河流域主要为下降趋势, 且在下游地区减小更为显著, 但在河套东部呈上升趋势, 在上升地区 PE 主要受气温升高影响, 在下降地区则主要是和风速减小有关 (柳春等, 2013)。而在长江流域, 平均风速和太阳净辐射的显著减小是造成 PE 减小的主要因素 (王艳君等,

2005)。此外, Zhang et al. (2007) 的研究表明, 风速和水汽压差是西藏地区 PE 减少的主要因素。

上述这些研究, 大多所用的数据时间较短, 测站较少, 或是局限于个别地区而展开的研究, 结果有一定的时空局限性。因此, 有必要利用较多站点长时间的观测资料对全国范围的 PE 进行研究。本文利用 1961~2013 年中国 1302 个气象站的实测资料, 首先对 PE 的空间分布特征进行了研究, 并利用 Mann-Kendall 方法对 PE 变化趋势进行了分析, 然后通过对年平均 PE 距平场的 EOF 分解进一步研究了 PE 不同时间变率的空间分布。紧接着利用同期的降水、风速、相对湿度、气温和日照时数等气候要素, 探讨了影响 PE 的主要气象因子。最后, 以 2006 年川渝地区的干旱为例, 探讨了 PE 对干旱的响应。本研究结果为深入认识和理解中国陆地蒸发变化状况提供基础, 并为气候变化与陆表水循环的研究提供一定的参考和依据。

## 2 资料和方法

### 2.1 资料

本文所用数据为国家气象信息中心提供的中国国家地面气象站基本气象要素日值数据集 (V3.0)。此数据集包括了自 1951 年 1 月起中国基本、基准气象站以及一般气象站在内的 2474 个站点的地面各基本气象要素的逐日观测数据, 并且在数据集的构建过程中进行了比较严格的质量控制。由于大多数站点开始使用大型蒸发器的时间较短、数据缺省较多, 所以选取 20 cm 小型蒸发量进行分析。本研究所选取的气象要素包括 1961 年 1 月 1 日至 2013 年 12 月 31 日的日小型蒸发量、日累计降水量、日平均风速、日平均相对湿度、日平均气温以及日累计日照时数。

和所有地面观测要素记录一样, 站点观测 PE 在不同站点不同时间存在缺测, 有些站点缺测时间较长。为了使得研究结果具有时空代表性, 我们对站点观测资料进行了简单的质量控制。首先, 剔除连续缺测 15 天及以上站点; 其次, 单个站点总缺测时次累加超过研究时段的 5% 的也被剔除。其中, 由于 PE 在 20 世纪 60、70 年代的重庆、贵州、陕西、福建等地存在大面积的长时间缺测, 在这些地区只考虑 1980~2013 年期间满足上述筛选条件的站点 (252 个站点)。经过上述过程, 我们共得到

1309 个站点的相对时间长、观测连续性较好的 PE 数据。为消除台站迁移的影响, 我们计算了上述 1309 个站点历年经纬度最大最小值的差值, 发现纬度变化超过 1° 的站点有 3 个, 而经度变化超过 1° 的站点有 5 个, 剔除掉这 7 个经纬度变化超过 1° 的站点 (其中有一个站点经度和纬度变化均超过 1°), 最终得到 1302 个测站的资料。站点分布如图 1 所示, 在我国东北、西北以及西藏地区站点较为稀疏, 其余区域站点均较为密集。文中以 1~12 月为全年, 3、4、5 月为春季, 6、7、8 月为夏季, 9、10、11 月为秋季, 12、1、2 月为冬季进行统计分析。

### 2.2 方法

#### 2.2.1 Mann-Kendall 非参数统计检验方法

为了检验 PE 在研究时段内是否发生突变, 采用 Mann-Kendall 非参数统计检验方法进行研究, 该方法也可称为无分布检验方法, 即样本不需要遵从一定分布, 同时也可以排除少数的异常值所造成的干扰。该方法常用于气候及水文序列的趋势显著性检验及突变检测 (Yue et al., 2002; Yue and Wang, 2004; 和宛琳和徐宗学, 2006; 刘敏等, 2009; 刘蓉等, 2016)。Mann-Kendall 方法计算公式 (魏凤英, 2007) 如下:

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i, \quad r_i = \begin{cases} 1 & \text{当 } x_i < x_j \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, i), \quad (1)$$

其中,  $x_i$  和  $x_j$  分别为  $i$  和  $j$  时次的时间序列样本, 在文中代表某站点的 PE;  $s_k$  表示  $i$  时刻蒸发量大于  $j$  时刻的累计数。

$$UF_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{\text{Var}(s_k)}} \quad (k = 1, 2, \dots, n), \quad (2)$$

$$E(s_k) = \frac{n(n+1)}{4}, \quad (3)$$

$$\text{Var}(s_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72}, \quad (4)$$

$$UB_k = -UF_k \quad (k = n, n-1, \dots, 1), \quad (5)$$

其中,  $n$  为时间序列的长度,  $UF_k$  是  $s_k$  标准正态化后的分布函数, 其满足标准正态分布,  $UF_1=0$ ;  $E(s_k)$  和  $\text{Var}(s_k)$  分别为  $s_k$  的均值和方差;  $UB_k$  是以时间序列  $x$  逆序计算出的统计量,  $UB_1=0$ 。本文中给定显著性水平  $\alpha=0.05$ , 则当  $|UF_k| > U_\alpha=1.96$  时, 表明时间序列的趋势变化显著,  $UF_k > 0$ , 表明序列呈上升趋势,  $UF_k < 0$ , 则表明呈下降趋势。当  $UF_k$

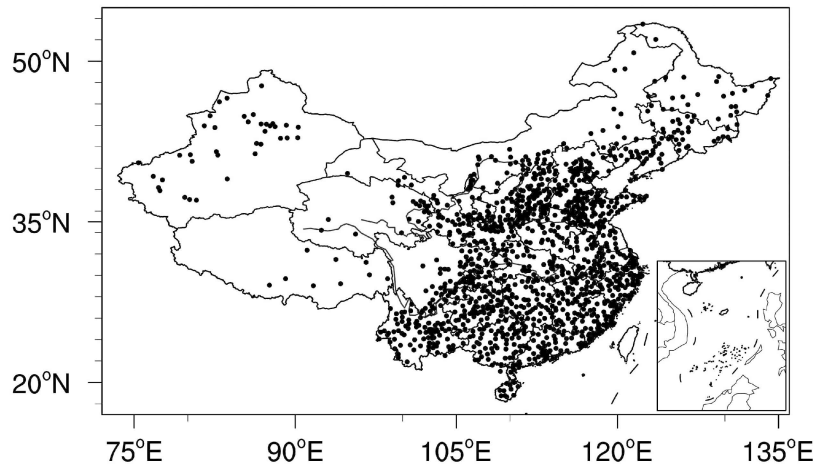


图1 中国 1302 个气象测站分布

Fig. 1 Locations of the 1302 meteorological stations in China

和  $UB_k$  的交点出现在置信区间内则认为变量发生了突变。

### 2.2.2 经验正交函数分解

经验正交函数 (EOF) 分解是一种针对气象要素场进行的统计方法, 又被称为主成分分析。该方法最早是由 Lorenz (1956) 引入大气科学领域, 而后被广泛运用至今 (沈柏竹等, 2012; 徐维新等, 2012)。EOF 方法的优点在于其可以在有限区域内对不规则分布的气象要素场进行分解, 得到相互正交的特征向量及对应的特征值, 从而得到不随时间变化的空间特征向量和对应的时间系数 (PC)。其中空间特征向量可以反映气象要素场的地域分布特点, 而 PC 则表示相应特征向量随时间的权重变化 (魏凤英, 2007)。本文中选用 PE 的距平场做 EOF 分解, 以研究 PE 变率的区域差异。

### 2.2.3 偏相关分析

本文研究的是降水量、平均风速、平均相对湿度、平均气温以及日照时数等要素对 PE 的影响, 然而这几个要素彼此之间也存在相互关联, 如果使用简单的皮尔森 (Pearson) 相关系数进行分析, 其结果可能会受到变量之间关系的影响。为了消除这种影响, 利用偏相关分析进行研究。偏相关分析也称为净相关分析, 其能够在消除其它变量的影响下, 分析两变量之间的线性相关关系。由于在本文中研究的是 PE 与其他 5 个变量之间的关系, 在计算 PE 与其中某一要素的相关系数时, 需要消除其他四个变量的影响, 因此采用四阶偏相关分析。在进行相关分析前, 将所有数据转换为月平均数据, 并去除掉对应月份 53 年的气候平均值, 以消除季

节循环所带来的影响。此外, 还对数据进行了去线性趋势处理, 然后对比分析了去除线性趋势前后的偏相关系数差异, 以确定各因子与 PE 的关系受各因子变化趋势的影响程度。

## 3 结果分析

### 3.1 蒸发皿蒸发量空间分布特征

1961~2013 年全国所有站点平均的年 PE 约为 1578 mm。在图 2a 中, 有 1183 个站点多年平均的 PE 在 1000~2000 mm, 内蒙、云南、新疆等省份为 PE 大值区, 均存在较多站点 PE 在 2000~3000 mm, 青藏高原上也有站点年 PE 在 2000 mm 以上。长江流域附近 PE 的值较小, 大部分站点 PE 在 1000~1500 mm。分别对 1961~2013 年 4 个季节的 PE 分析后发现, 就全国而言, 春、夏季 PE 要比秋、冬季更大。在秋、冬季, 全国大部分站点 (秋季 1262 个站, 冬季 1297 个站) 的 PE 在 500 mm 以下; 在春季, 黄河以北区域以及云南省的 PE 都在 500 mm 以上; 而在夏季除了西南地区 PE 较小, 其余区域 PE 均大于 500 mm, 在新疆和内蒙还有少数站点的 PE 在 1000 mm 以上。总体而言, 除云南和西藏外, 中国南方的 PE 要比北方更小。

### 3.2 蒸发皿蒸发量变化趋势分析

为了研究 PE 变化趋势的空间分布, 对各站点年平均及各季节平均的 PE 的趋势变化进行了分析。值得注意的是, 正如我们在资料部分所提及的, 重庆、陕西、福建、贵州等 4 个省份资料在 20 世纪 60、70 年代有较长时间的缺测, 可能会对这些地

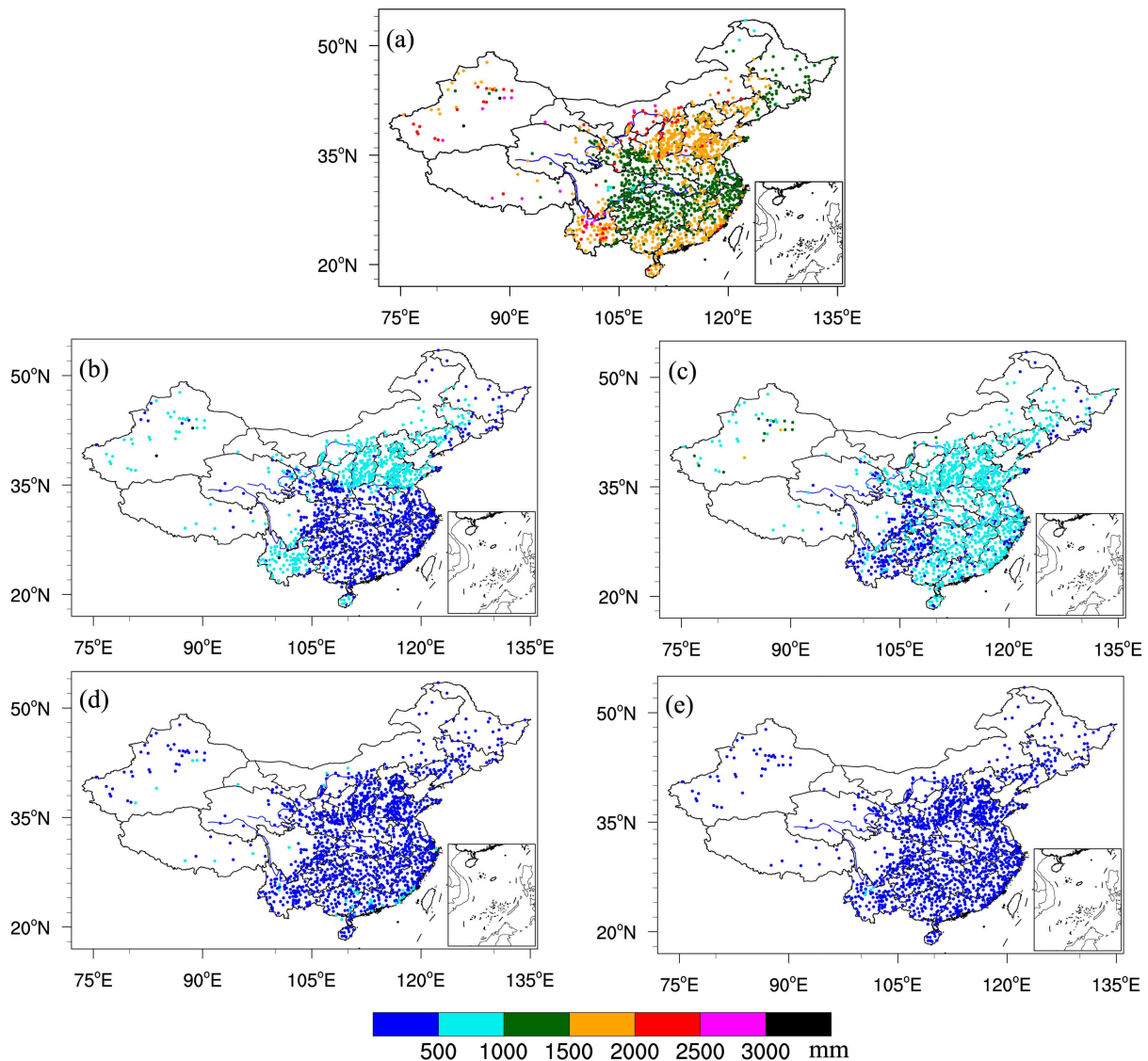


图2 1961~2013 年中国年平均及季节平均 PE 的空间分布: (a) 年平均; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季; (e) 冬季。重庆、贵州、陕西、福建等地在 1961~1979 年间较长时间有缺失

Fig. 2 Spatial distribution of the mean pan evaporation (PE), annually and for four seasons during 1961–2013 in China: (a) Annual; (b) spring; (c) summer; (d) autumn; (e) winter. In Chongqing, Guizhou, Shaanxi, and Fujian, long-term data are missing from 1961 to 1979

区的结果造成一定影响。从分析结果来看,大部分站点的 PE 呈现出下降的趋势,但在局部地区仍有显著上升的站点存在。图 3a 中,显著下降的站点有 516 个,显著上升的站点有 116 个。呈显著下降趋势的站点主要分布在华北平原、新疆、广西、广东和海南等地,而在浙江、福建及贵州等地 PE 则呈现出明显的上升趋势。此外,在四个季节,PE 变化趋势的分布与图 3a 接近,却也有所差别。春季和秋季 PE 显著上升的站点要多于夏季和冬季(春季有 111 个,秋季有 96 个),且在秋季,呈显著下降趋势的站点最少,只有 313 个。在春季,

福建、浙江两省 PE 显著上升的站点要多于其他季节;而在秋季,云南和广东也有部分站点呈现出明显的上升趋势。除了春季和秋季外,长江中下游的 PE 均有明显的下降趋势,而黄河下游的下降趋势在全年和四季都很显著。这与祁添垚等(2015)得到的中国西北、东部、中部及南部 PE 为显著下降趋势,显著上升站点则分布于东南沿海、西南、洞庭湖等地;以及安月改和李元华(2005)得出的河北省 PE 呈显著下降趋势的结论有较好的一致性。而 PE 变化趋势在长江和黄河流域的分布也与已有的研究结论一致(王艳君等, 2005; 柳春等, 2013)。

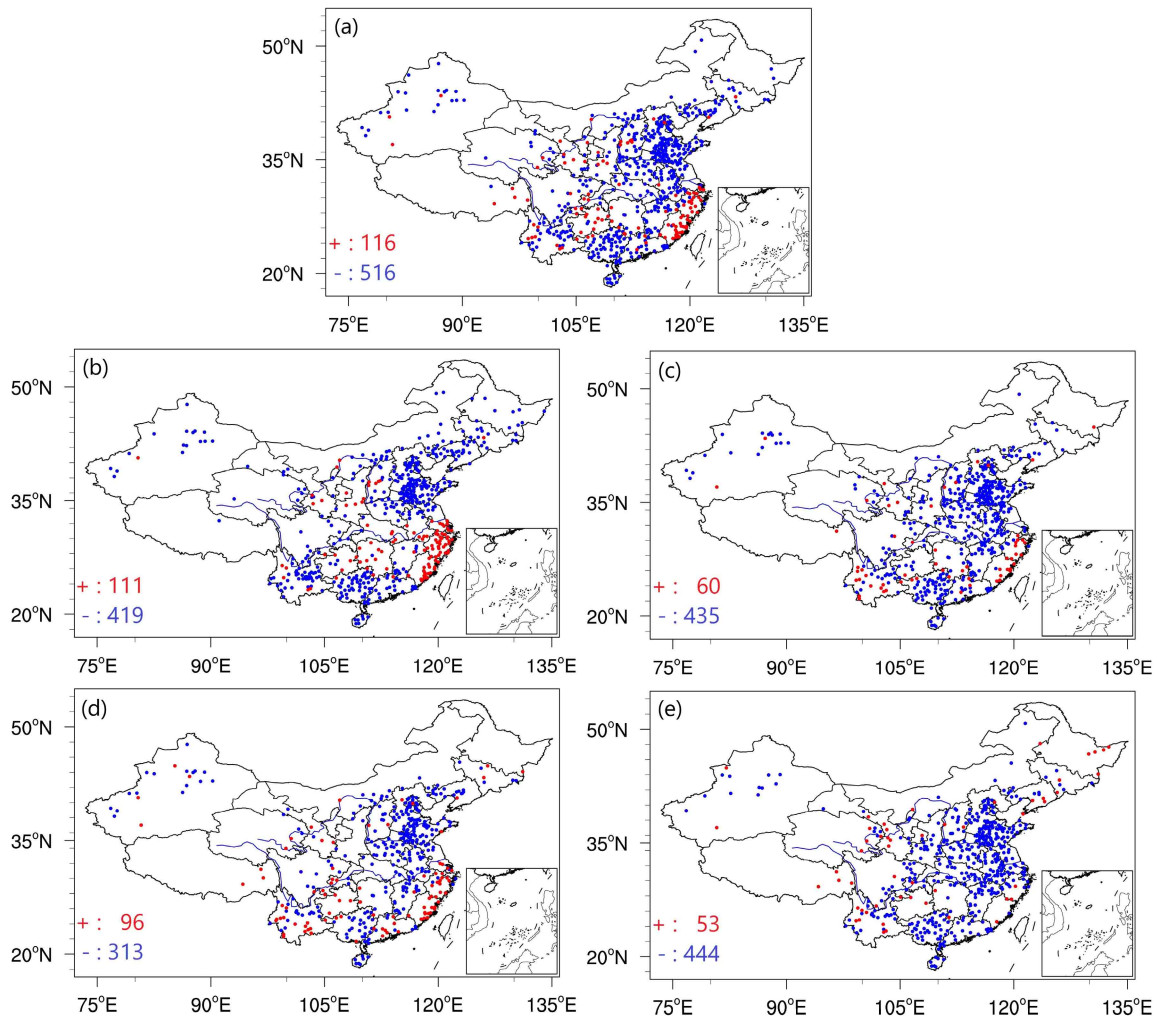


图3 1961~2013年中国年平均及季节平均PE变化趋势的空间分布:(a)年平均;(b)春季;(c)夏季;(d)秋季;(e)冬季。只给出通过显著性检验( $\alpha=0.01$ )的站点;“+”代表显著上升站点(红色点)数,“-”代表显著下降站点(蓝色点)数;其中重庆、贵州、陕西、福建等地在1961~1979年间较长时间有缺测

Fig. 3 Spatial distribution of average PE trend, annually and for four seasons in China during 1961–2013: (a) Annual; (b) spring; (c) summer; (d) autumn; (e) winter. Only stations with a PE trend that passes a test of significance ( $\alpha=0.01$ ) are plotted. “+” indicates significantly increased station (red dot) number, “-” indicates significantly decreased station (blue dot) number. In Chongqing, Guizhou, Shaanxi, and Fujian, long-term data are missing from 1961 to 1979

例如王艳君等(2005)分析发现长江中下游PE在全年和夏季有显著下降趋势。柳春等(2013)研究发现黄河流域PE呈显著下降趋势,且下游下降幅度更大。

从逐年变化来看,在研究的53年间中国PE总体呈明显的下降趋势( $\alpha=0.01$ ,图4a)。全国站点平均下降速率为42.80 mm/10 a,占多年平均PE的2.7%。另外,对年平均PE进行了11年滑动平均后,可以看出自20世纪70年代起,年平均PE有明显的下降,在1986年以后趋于平缓,20世纪90年代后又略微呈现上升趋势。以四季的

PE变化趋势来看(图4c),1961~2013年全国平均PE在各季节都是减少趋势,且均通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。其中夏季下降速率最快,为15.28 mm/10 a,是夏季平均PE的2.6%。春季次之,下降速率为15.08 mm/10 a,是春季平均PE的3.1%。秋季和冬季下降速率较为缓慢,分别为7.22 mm/10 a和7.27 mm/10 a,是其对应季节平均PE的2.2%和4.1%。从相对大小看,冬季减少幅度最大,达到了4.1%,这是由于冬季的PE量级较小,多年平均的PE只有178 mm左右。因此,虽然其减小速率比春夏季都要小,但减小的相对幅度却是最大的。

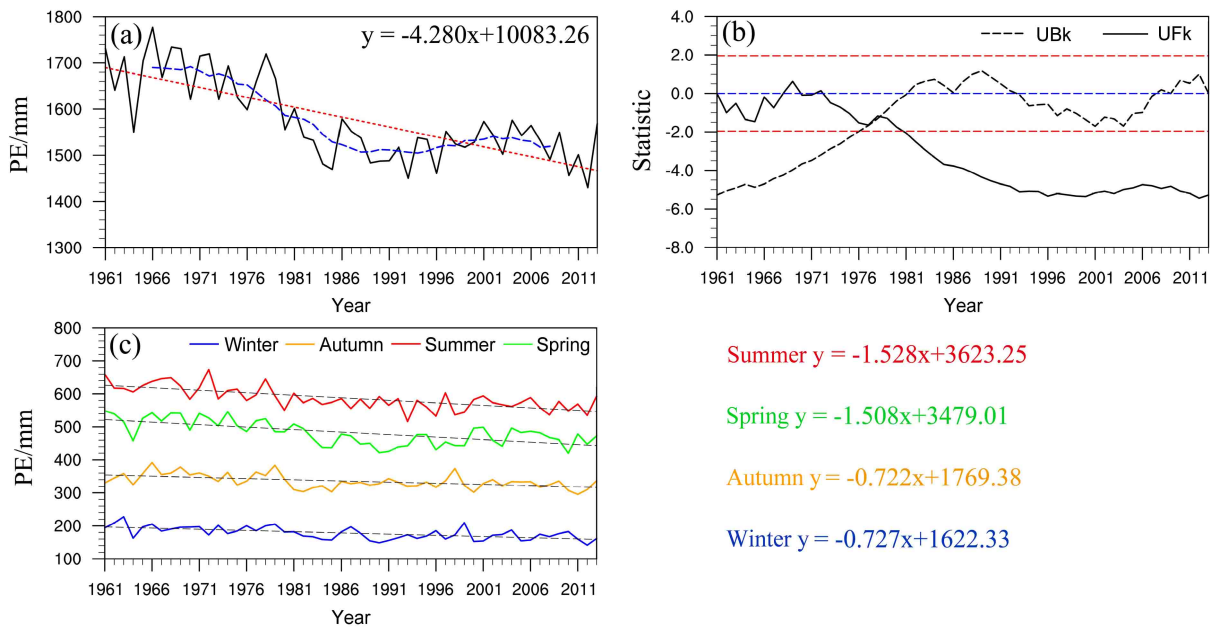


图4 1961~2013 年中国 (a) 年平均 PE 变化趋势 (蓝色虚线为 11 年滑动平均, 图中公式为其回归方程)、(b) 年平均蒸发量 MK 统计量曲线 (红色虚线为  $\alpha=0.05$  水平临界值)、(c) 各季节 PE 的变化趋势 (绿色代表春季, 红色代表夏季, 黄色代表秋季, 蓝色代表冬季, 图中公式表示各季节变化趋势的回归方程)

Fig. 4 (a) Linear trend of annual pan evaporation in China during 1961–2013 (blue dashed curve is the 11-year moving average, for which the formula is the regression equation). (b) Mann–Kendall statistical curve of annual pan evaporation in China during 1961–2013 (red dotted indicates a significance level of  $\alpha=0.05$ ). (c) Series of seasonal pan evaporation in China during 1961–2013 (green: spring, red: summer, yellow: autumn, blue: winter; the dashed lines are linear regression lines; the regression equations are also indicated)

此外, 冬季风速减小速率 $-0.018 \text{ m s}^{-1} \text{ a}^{-1}$ , 仅次于春季的 $-0.019 \text{ m s}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ; 日照时数减小速率 $-0.012 \text{ h/a}$ , 仅次于夏季的 $-0.022 \text{ h/a}$ , 这两个变量与 PE 都成正相关关系, 它们明显下降对 PE 的下降有主要贡献。

在 PE 的 MK 图中 (图 4b), 各时刻  $UF_k$  值基本小于 0,  $UF_k$  和  $UB_k$  的交点出现在 1978 年前后, 交点在置信区间内, 表明 PE 在 1978 年左右发生了突变, 且在 1981 年以后  $UF_k$  超过了临界直线, 表明在此之后 PE 下降趋势显著。PE 发生突变且开始显著下降的时期与 Wang (2001) 发现的东亚夏季风开始减弱的时期, 以及马柱国和符淙斌 (2006) 发现的中国西北东部和华北发生转折性的干湿变化的时期有很好的对应性。而根据王遵亲等 (2004) 的研究, 中国年平均风速距平由正转负的时期同样也是在 20 世纪 70 年代末期, 且风速减弱在冬季比夏季更明显。结合这些研究我们可以推断, PE 的突变应该与上述气候要素变化有着密切的联系。

### 3.3 年平均蒸发量距平场 EOF 分析

为了深入分析 PE 变率的空间分布特征, 对年平均 PE 的距平场进行 EOF 分解 (图 5)。EOF 第一模态方差贡献率为 25.5%。其表现为除贵州、福

建、浙江等地的部分站点为正值外, 其余区域基本为负值, 意味着这几个省份与全国其他地区分布型相反 (即距平符号相反), 第一模态在华北平原和广西绝对值较大, 表明这两个区域为 PE 距平最大的区域。结合对应的时间序列图进行分析 (图 5c), 在 1981 年以前时间系数在每年都主要为负值, 而在 1981 年以后时间系数则主要为正值, 时间系数整体呈上升趋势。这意味着 1981 年以前, 除贵州、福建、浙江等地为 PE 负距平外, 其他的地区都为正距平。而在 1981 年以后, 上述三地 PE 由负距平变为正距平, 在这些地区 PE 呈上升趋势; 其他地区则均由正距平变为负距平, PE 整体呈下降趋势。PE 距平变化最大的华北平原和广西也对应着是 PE 下降速率最大的区域, 这和图 3a 中蒸发量变化趋势的空间分布较为一致。而在之前的分析中, 得到的蒸发量开始出现显著下降的时间点正好也是在 1981 年 (图 4b), 这二者之间也有较好的对应性。EOF 第二模态方差贡献率为 12.0%, 全国的 PE 距平值以长江为界在南北地区呈相反的分布型, 结合第二模态的时间序列图 (图 5d) 可以看出, 其时间系数在 1961~1970 年正负值交替出现, 而

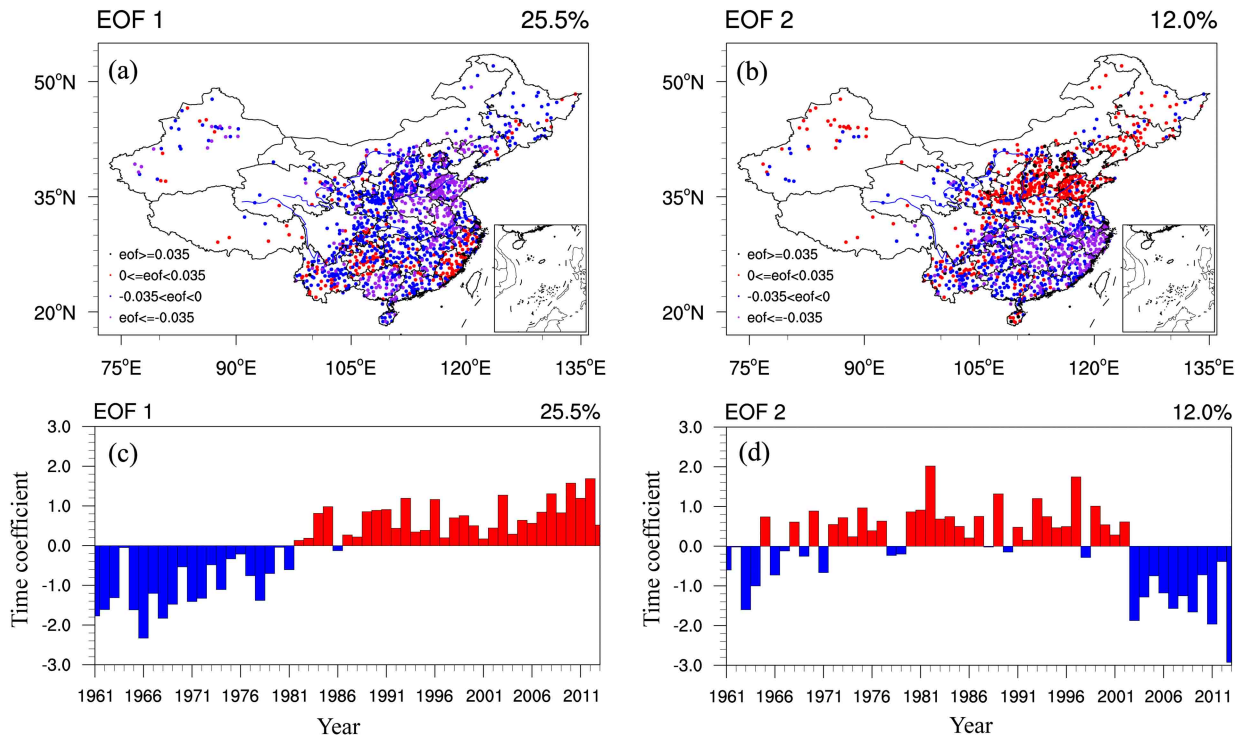


图5 1961~2013年中国平均PE距平场EOF第一模态(EOF1)、第二模态(EOF2)(a、b)空间分布及其(c、d)时间序列:(a、c) EOF1;(b、d) EOF2

Fig. 5 (a, b) Spatial and (c, d) temporal patterns of two leading EOFs (EOF1 and EOF2) of annual PE in China during 1961–2013: (a, c) EOF1; (b, d) EOF2

在1971~2002年,时间系数以正值为主,在2002年之后时间系数又变为负值。这意味着北方地区的PE在2002年以后有下降的趋势,而南方地区的PE则有上升的趋势。

3.4 蒸发皿蒸发量影响因子分析

蒸发是对气象和环境变化非常敏感的要素,它的变化受到动力、热力、水分等因子共同作用的影响,如风速、日照、气温、湿度等都对其有影响。本文采用降水、风速、相对湿度、气温和日照时数等五个要素来研究它们与PE之间的关系。在计算相关系数的全国平均值时,首先计算出了各要素在每个站点(1302站)逐月的异常值,再对所有站点求平均,得到几个要素全国平均的逐月异常值,最后再求得各要素之间的相关系数。表1为各变量去季节循环后的四阶偏相关系数表。可以看出PE与降水之间整体为负相关,但相关系数绝对值较小,在春季和夏季都未能通过 $\alpha=0.01$ 的显著性检验;而PE与平均风速在全年和四季都有显著的正相关,除夏季外,相关系数均能达到0.8以上,其在夏季虽然相对较小,但也达到了0.46。在PE与年平均风速的偏相关系数分布图中,共有1163个站通过

表1 1961~2013年中国PE与其他气候因子的偏相关系数(所有变量都去除了季节循环)

Table 1 Partial correlation coefficients between PE and various climate factors in China during 1961–2013 (seasonal cycle of all variables have been removed)

|    | 与PE的偏相关系数 |       |        |       |       |
|----|-----------|-------|--------|-------|-------|
|    | 降水量       | 平均风速  | 相对湿度   | 平均气温  | 日照时数  |
| 全年 | -0.26*    | 0.66* | -0.41* | 0.60* | 0.49* |
| 春季 | -0.16     | 0.80* | -0.55* | 0.60* | 0.39* |
| 夏季 | -0.01     | 0.46* | -0.60* | 0.26* | 0.66* |
| 秋季 | -0.44*    | 0.76* | -0.55* | 0.68* | 0.77* |
| 冬季 | -0.34*    | 0.86* | -0.68* | 0.90* | 0.73* |

\*表示通过0.01显著性检验。

了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验,其中相关系数大于0.5的站点大多在河南、河北、山东、安徽等地(图6a),很好的对应了EOF第一模态中PE变率最大的区域(图5a),也即是说PE变率最大的区域同时也是PE与风速相关系数最大的区域;相对湿度与PE有着显著的负相关,在4个季节的相关系数都要小于-0.5,且在中国的南方,二者之间的相关性要更为显著(图6b);PE与气温之间也有着非常

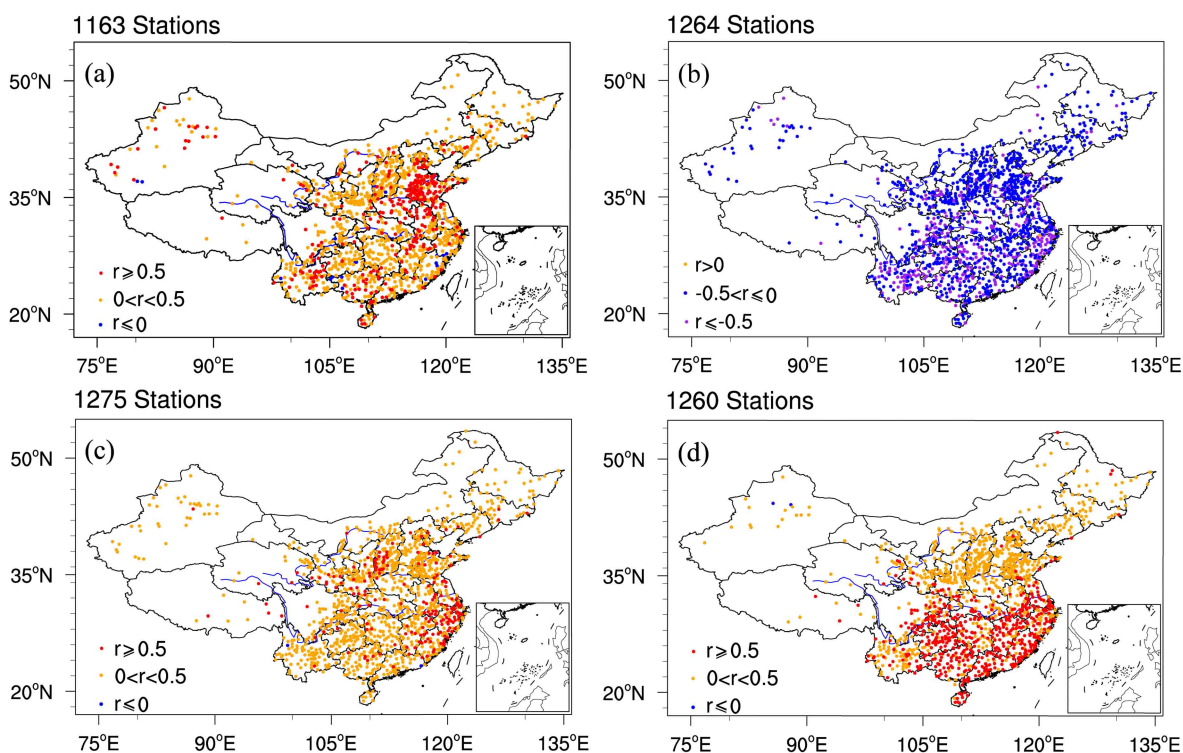


图 6 1961~2013 年中国去季节循环后年平均 PE 与各气象因子的偏相关系数  $r$  分布: (a) 风速; (b) 相对湿度; (c) 气温; (d) 日照时数。各图左上角数字表示通过显著性检验的站点数

Fig. 6 Partial correlation coefficient distributions for PE and (a) wind speed, (b) relative humidity, (c) air temperature, and (d) sunshine duration in China during 1961–2013.  $r$  is the correlation coefficient, and the numbers of stations passing the test for significance ( $\alpha=0.01$ ) are indicated in the upper left corner

显著的正相关, 除夏季外, 其相关系数均大于 0.5, 冬季相关系数要明显高于其他季节, 达到了 0.9, 在年相关系数的分布图中 (图 6c), 有 1275 个站都通过了  $\alpha=0.01$  的显著性检验, 且 PE 与年平均气温相关性最大的区域恰好与图 5a 中 PE 呈显著上升趋势的区域较为吻合, 福建、浙江两省的 PE 显著增大可能是由于气温升高导致的; 日照时数与 PE 在夏、秋、冬 3 个季节, 相关系数均是达到了 0.6 以上。年相关系数大于 0.5 的站点主要分布于中国南方地区 (图 6d)。

为进一步研究上述气象要素与不同区域 PE 的变化关系, 我们针对 1302 个站 PE 与风速、温度、相对湿度、日照时数等 4 个变量年变化趋势的关系进行了分析 (图 7)。可以发现大多数站点风速 (图 7a) 和日照时数 (图 7d) 的变化都以减小为主, 尤其当 PE 趋势小于 0 的时候, 风速和日照时数的趋势基本以负值为主, 即风速和日照时数的减小对 PE 减小起着主要作用。而对于 PE 呈上升趋势的站点, 基本上温度也都是呈上升趋势, 说明部分站点 PE 的增大主要是由于温度升高导致的

(图 7b)。在 PE 与相对湿度的关系图中 (图 7c), 当 PE 呈上升趋势时, 相对湿度基本为下降趋势; 而当 PE 呈下降趋势时, 其与相对湿度的变化并没有很好的对应关系, 这可能是由于相对湿度对 PE 产生的影响不及风速和日照时数大所导致的。

在表 2 中列出了各变量去除季节循环和线性趋势后的偏相关系数值, 对比分析表 1 和表 2 可以发现, 去除线性趋势后, PE 与风速和日照时数的相关系数较之前有较为明显的减小, 尤其是 PE 与风速的相关系数, 减小幅度十分显著, 除冬季以外, 其减小幅度均超过了 0.3。PE 与降水的相关系数并无明显变化, PE 与相对湿度、气温之间相关系数变化幅度也不大, 基本没超过 0.1, PE 与这三者之间的相关性应该受趋势影响不大。近 50 余年来, 中国相对湿度的变化并不明显, 直到 2004 年左右, 才呈现出明显的下降趋势 (图 8b), 表明相对湿度变化对蒸发下降应该并无太大影响。值得一提的是, 中国的气温在 20 世纪 70 年代到 90 年代间, 总体为下降的趋势, 而在 1986 年以后下降趋势减弱, 逐渐变为上升趋势为主 (图 8c), 这与王遵

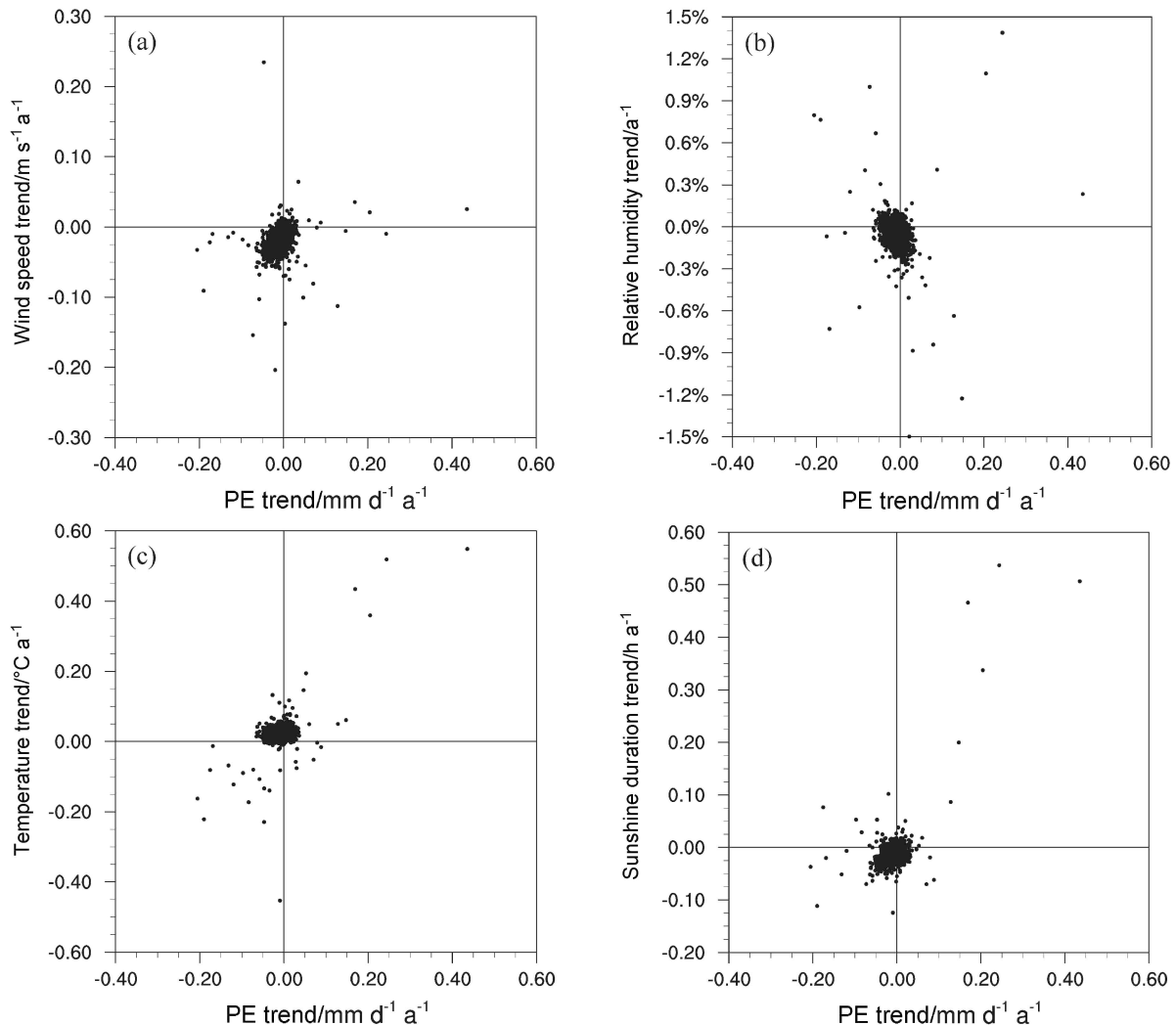


图 7 1961~2013 年中国 1302 站 PE 与各气象因子年变化趋势的关系: (a) 风速; (b) 相对湿度; (c) 气温; (d) 日照时数

Fig. 7 Relationship between the PE trend and (a) wind speed, (b) relative humidity, (c) air temperature, and (d) sunshine duration at 1302 stations in China during 1961–2013

娅等 (2004) 得到的 20 世纪 90 年代增温明显的结论相符合。在温度下降的这段时间里其对 PE 的减小应该也有所贡献。不同于其他 3 个变量, 风速和日照时数与 PE 之间的关系在很大程度上受其趋势的影响。在风速和日照时数的 Mann-Kendall 统计量图 (图 8a、8d) 中也可以发现, 风速自 1978 年以后呈显著下降趋势, 这与 PE 开始呈显著下降的时间点有着较好的对应关系; 而日照时数同样从 20 世纪 70 年代开始呈下降趋势, 在 1987 年以后下降趋势显著, 进一步表明 PE 的下降应该较大程度上受风速和日照时数下降的影响。刘敏等 (2009) 利用完全相关系数进行分析同样也发现了 PE 的减小与平均风速的减小有最显著的相关性。Liu et al. (2004) 认为由于气溶胶增加导致的到达地表的

太阳辐射下降是中国 PE 下降的主要原因, 而在许多研究中, 都将日照时数作为反演太阳辐射的标准 (Tang et al., 2011; Wang et al., 2012b; He et al., 2018), 因此太阳辐射下降其实也意味着日照时数的缩短 (Peterson et al., 1995; Roderick et al., 2002), 即日照时数减小会导致 PE 下降, 这与我们的研究结果也是相符合的。任国玉等 (2005) 在研究 1951~2002 年中国地面气候变化特征时也提出了风速和太阳辐射的减小可能是导致水面蒸发的下降的重要因素。而根据之前在西藏、河北、淮河流域、黄河流域以及长江流域等地展开的研究 (安月改和李元华, 2005; 王艳君等, 2005; 柳春等, 2013; Xie et al., 2015; Li et al., 2018), 我们可以发现这些地区 PE 减小均和该地区风速减小有关。

表 2 1961~2013 年中国 PE 与其他气候因子的偏相关系数 (所有变量都去除了季节循环和线性趋势)

Table 2 Partial correlation coefficients between PE and various climate factors in China during 1961–2013 (seasonal cycle and linear trends of all variables have been removed)

|    | 与PE的偏相关系数 |       |        |       |       |
|----|-----------|-------|--------|-------|-------|
|    | 降水量       | 平均风速  | 相对湿度   | 平均气温  | 日照时数  |
| 全年 | -0.27*    | 0.34* | -0.44* | 0.62* | 0.36* |
| 春季 | -0.08     | 0.26* | -0.69* | 0.70* | 0.27* |
| 夏季 | -0.07     | 0.08  | -0.69* | 0.42* | 0.48* |
| 秋季 | -0.44     | 0.46* | -0.54* | 0.69* | 0.65* |
| 冬季 | -0.33     | 0.64* | -0.63* | 0.90* | 0.66* |

\*表示通过0.01显著性检验。

为了进一步分析 PE 减小的原因, 我们探讨了日照时数及风速减小的原因。自 20 世纪中期开始, 中国区域的日照时数呈明显的下降趋势 (陈少勇等, 2010; 虞海燕等, 2011; 刘玉英等, 2015)。日照时数很大程度上受到直接太阳辐射的影响, 同时依赖于云量、气溶胶以及雾霾等因子 (Kaiser and Qian, 2002)。许多研究表明云量和气溶胶浓度增加, 会减少到达地面的太阳辐射, 从而使得日照时数减少, 特别是每天的早晨和晚上由于光学路径较

长, 受影响程度会更大 (虞海燕等, 2011)。风速的减小则可能是由于气候变化和城市化效应所引起的对流层低层气压梯度力减弱所致 (Guo et al., 2015)。此外, 整个中国地区风速的减小也表征着亚洲夏季风和冬季风的减弱 (Wang, 2001; 王遵娅等, 2004), 而全球或局地大气环流变化 (Chen et al., 2006) 以及人类活动所导致的温室气体排放增加、大气污染、土地利用变化等都可能成为亚洲季风减弱的诱因 (Xu et al., 2006)。值得一提的是, 风速的减小对日照时数的减小起着促进作用, 由于风速减小, 污染物不易扩散, 大气对太阳辐射的反射和吸收都被加强, 到达地面的太阳辐射减小, 日照时数也随之减小, 最终又将导致 PE 减小。由此可见, 气溶胶、雾霾的增多对于 PE 的减小应该也有着比较重要的影响, 且之前结论所得到的 PE 减小速率最大的华北、江淮等地, 同样也是受气溶胶和雾霾影响较大的区域。有关气溶胶和雾霾等因子对 PE 的影响, 也是在以后的工作中要重点关注的。

### 3.5 个例分析: 2006 年川渝特大干旱对 PE 的影响

近年来, 极端气候事件频发, 尤其是高温干旱事件增多, 蒸发对极端气候事件及地表水热过程都很重要的影响 (Wang et al., 2012a)。本文以 2006

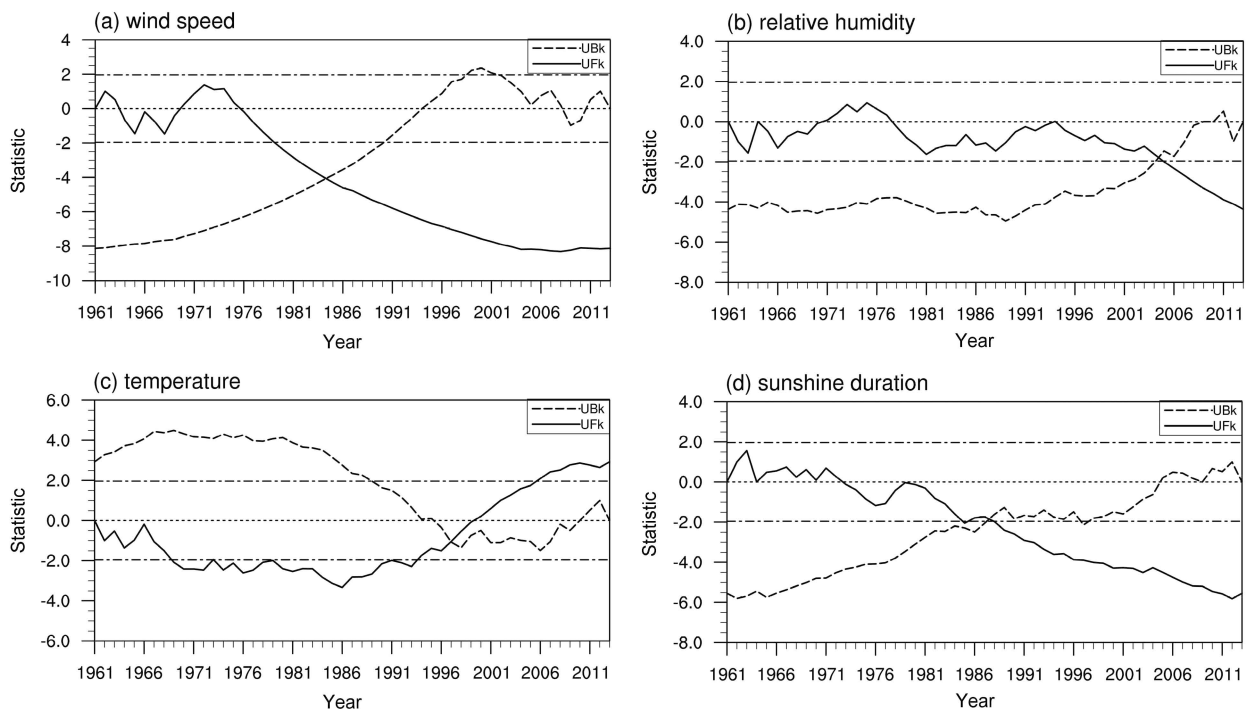


图 8 1961~2013 年中国各气象因子的 Mann-Kendall 统计量曲线 (点划线为  $\alpha=0.05$  水平临界值): (a) 风速; (b) 相对湿度; (c) 气温; (d) 日照时数

Fig. 8 Mann-Kendall statistical curves of (a) wind speed, (b) relative humidity, (c) air temperature, and (d) sunshine duration in China during 1961–2013 (dashed-dotted line indicates a level of significance of  $\alpha=0.05$ )

年川渝地区的特大干旱为例分析了 PE 对极端气候事件的响应。从图 9 上可以看出,重庆地区 2006 年夏季降水为明显的负距平,而 PE 则为正距平,很好的对应了该年川渝地区的干旱。这表明 PE 是对极端高温干旱较为敏感的变量,可用于干旱事件的诊断。事实上,在定义上与 PE 类似的潜在蒸散就常被用于计算干旱指数(马柱国和符淙斌, 2006; Fu and Feng 2014)。

从 2006 年夏季各要素距平值的空间分布(图 10)来看, PE、气温、日照时数在川渝地区的正距平明显高于全国其他地区,而气温、日照都与 PE 有着明显的正相关关系,因此,这两个要素增大会导致 PE 增大,从而使得川渝地区的干旱加剧。此外,与 PE 为负相关关系的降水和相对湿度在川渝地区则有较大的负距平,降水和湿度减小本就是干旱发生的诱因之一,而且这两个要素减小,同样将导致川渝地区 PE 增大,更进一步加剧该地干旱。已有研究表明,冷空气活动减弱,副热带高压西伸加强,青藏高原积雪减少等,都可能是造成该年干旱的原因(彭京备等, 2007; 邹旭恺和高辉, 2007; 海香等, 2008)。总体而言,当干旱发生时, PE 的值明显偏大,且除风速外,与 PE 相关的各气象要素的变化也都对 PE 增大有着明显的贡献, PE 对干旱有着很好的指示作用。因此,在研究干旱等极端气候事件时,可将 PE 的变化作为重要的参考依据。

## 4 结论与讨论

本文针对 PE 的空间分布进行了分析研究,采用了 Mann-Kendall 方法对 1961~2013 年中国 PE

的变化趋势进行分析,并通过年平均 PE 距平的 EOF 分解进一步研究了 PE 变率的空间分布。然后通过 PE 与 5 种气象要素去线性趋势前后的偏相关系数进行相关分析,以辨别对 PE 影响最大的气象因子。此外,通过分析 2006 年川渝地区的旱灾,探讨了 PE 对极端气候事件的响应,得出的主要结论如下:

(1) 全国大多数站点年平均 PE 在 1000~2000 mm, PE 大值区存在于内蒙、云南、新疆等地。全国大部分站点秋冬季平均 PE 在 500 mm 以下,而春夏季 PE 明显增大,尤其是夏季,除西南地区外, PE 基本在 500 mm 以上。

(2) 在 PE 变化趋势的空间分布中,华北平原、新疆、广西、广东和海南等地为下降趋势,而在浙江、福建、贵州等地 PE 则呈现出明显的上升趋势。在 4 个季节, PE 的趋势分布与全年分布类似,但也有所差别。春季呈显著上升的站点要多于其他季节;在秋季,云南和广东也有部分站点为显著上升的趋势。而以逐年变化来看, 1961~2013 年期间站点平均 PE 呈明显的下降趋势,下降速率约为 42.80 mm/10 a,并在 1978 年左右发生了突变,下降趋势在 1981 年后变得明显。此外,四个季节的平均 PE 也都有明显的下降趋势,其中以夏季最大,春季次之,秋冬较小。

(3) 通过对年平均 PE 距平场做 EOF 分解,进一步研究了 PE 变率的空间分布。EOF 第一模态中, 1981 年以后时间系数由负转正,福建、浙江、贵州等地的部分站点距平值由负值变为正值, PE 为上升趋势。而全国其他区域则由正距平变为负距

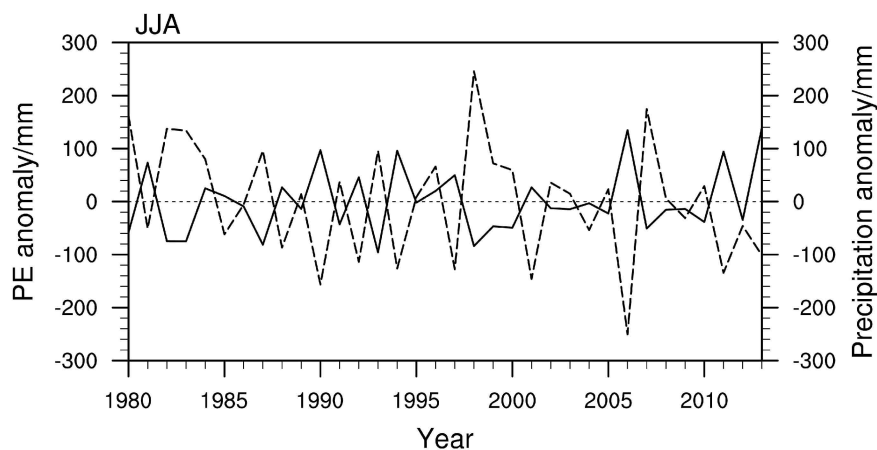


图 9 1980~2013 年夏季重庆地区平均 PE 及降水量的距平变化(实线为 PE, 虚线为降水量)

Fig. 9 The summer PE and precipitation anomalies in Chongqing from 1980 to 2013 (the solid line represents PE and the dotted line precipitation)

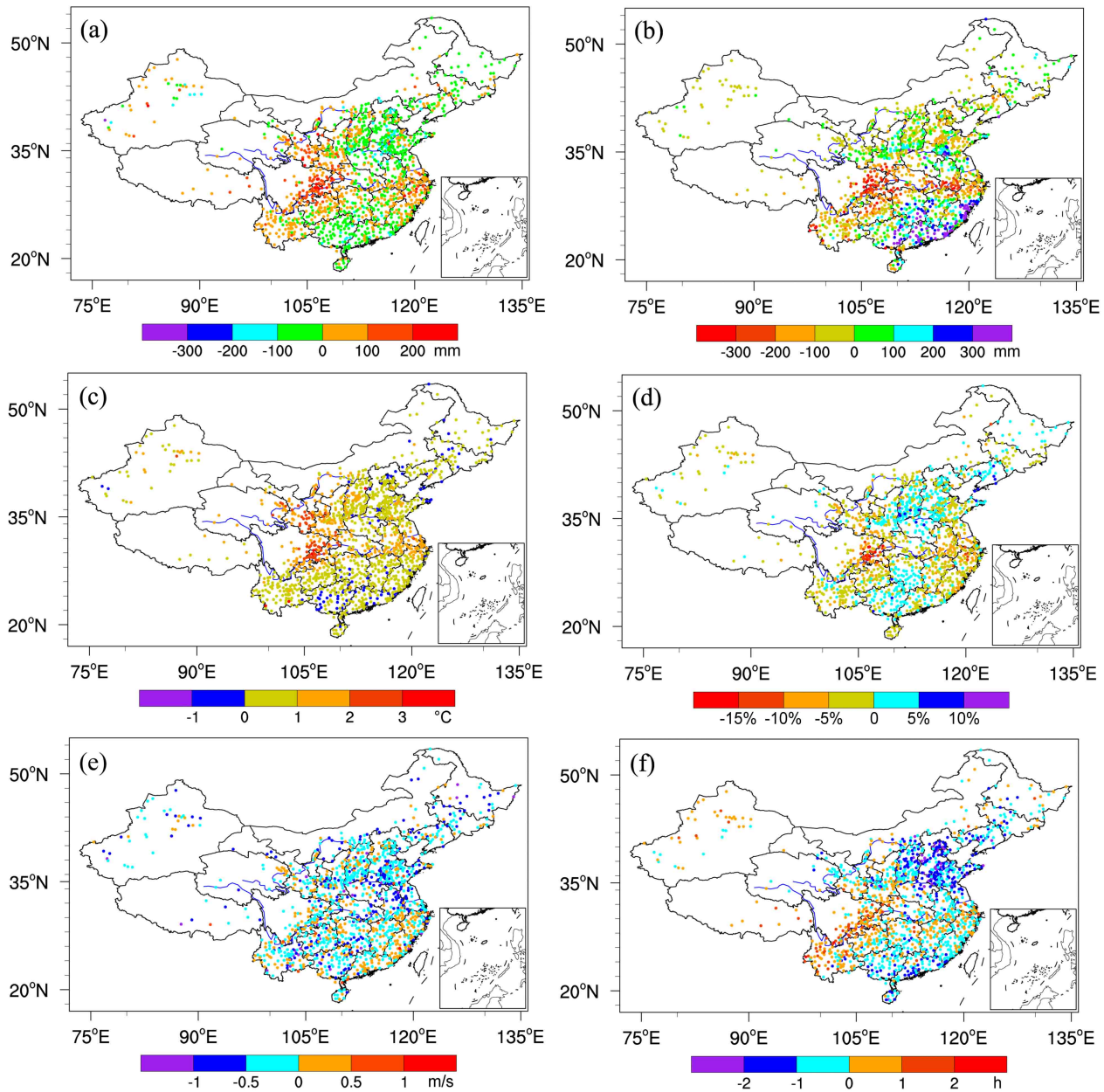


图 10 2006 年中国夏季各气象要素的距平场空间分布: (a) PE; (b) 降水量; (c) 温度; (d) 相对湿度; (e) 风速; (f) 日照时数

Fig. 10 Spatial distributions of the anomalies of each meteorological factor in China in the summer of 2006: (a) PE; (b) precipitation; (c) air temperature; (d) relative humidity; (e) wind speed; (f) sunshine duration

平, PE 为下降趋势, 华北平原和广西是 PE 下降速率最大的区域。这与 PE 变化趋势的空间分布有较好的一致性。时间系数变化的突变点与 PE 出现显著下降趋势的时间点也有较好对应性。第二模态中 PE 距平呈南北反向分布, 2002 年以后 PE 在中国的北方减小, 在南方增大。

(4) 利用偏相关系数分析了 PE 与其他气候因子的相关性。各气候因子去线性趋势前, 除降水外, PE 与其他因子都有较好的相关性, 其与风速、

气温、日照时数呈显著的正相关, PE 与相对湿度则呈现出显著的负相关。风速与 PE 相关系数最大的区域与 EOF 第一模态中 PE 变率最大的区域相吻合。在 PE 呈显著上升的区域, PE 与气温之间有着最好的相关性。而在去线性趋势之后, PE 与风速和日照时数的相关系数都有明显的下降, 且风速与日照时数开始下降的时间点与 PE 接近, 可以推断出, 蒸发量的减小受风速和日照时数减小的影响较大, 中国 PE 减少可能是由于平均风速及日照时

数减小所导致的。风速减小可能是由于全球变暖的气候背景下, 亚洲夏季风、冬季风减弱所导致。而日照时数的减小则很可能与云量及气溶胶含量增大, 到达地面的太阳辐射减小有关。

(5) 通过分析 2006 年川渝干旱, 讨论了 PE 对极端气候事件的响应。2006 年夏季重庆地区有很大的 PE 正距平和降水负距平, 且对各要素距平值的空间分布而言, 川渝地区 PE、温度和日照时数等因子的正距平都明显高于其他地区, 而降水和湿度的负距平也明显高于其他区域。即当干旱发生时, PE 明显增大, 且降水、气温、相对湿度和日照时数的变化也都对 PE 增大有着明显的贡献, PE 对干旱有着很好的指示作用。

虽然本文中所使用的站点数较多, 且时间较长, 但在重庆、陕西等地站点的长时间缺测依然有可能影响到研究的结果, 造成一定程度的偏差, 且站点分布不够均匀, 西部站点明显偏少。在今后的研究中, 应考虑如何合理的补全缺测资料, 或采用更有效的统计方法进行分析。此外, PE 的变化受气溶胶和雾霾的影响不可忽视, 部分影响可以通过地表净辐射反映出来, 但有必要在今后开展更深入的研究。

### 参考文献 (References)

- 安月改, 李元华. 2005. 河北省近 50 年蒸发量气候变化特征 [J]. 干旱区资源与环境, 19(4): 159–162. An Yuegai, Li Yuanhua. 2005. Change of evaporation in recent 50 years in Hebei region [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese), 19(4): 159–162.
- Chen S B, Liu Y F, Thomas A. 2006. Climatic change on the Tibetan Plateau: Potential evapotranspiration trends from 1961–2006 [J]. Climatic Change, 76(3–4): 291–319. doi:10.1007/s10584-006-9080-z
- 陈少勇, 张康林, 邢晓宾, 等. 2010. 中国西北地区近 47 a 日照时数的气候变化特征 [J]. 自然资源学报, 25(7): 1142–1152. Chen Shaoyong, Zhang Kanglin, Xing Xiaobin, et al. 2010. Climatic change of sunshine duration in Northwest China during the last 47 years [J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 25(7): 1142–1152. doi:10.11849/zrzyxb.2010.07.010
- 褚荣浩, 申双和, 李萌, 等. 2018. 小型与 E-601 型蒸发皿蒸发量对比分析及其折算系数——以江苏省为例 [J]. 气象科学, 38(2): 247–257. Chu Ronghao, Shen Shuanghe, Li Meng, et al. 2018. Comparative analysis of small and E-601 pan evaporation and its conversion coefficient——Taking Jiangsu province as an example [J]. J. Meteor. Sci. (in Chinese), 38(2): 247–257. doi:10.3969/2016jms.0080
- Fu, Q, and Feng, S. 2014. Responses of terrestrial aridity to global warming [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 119(13): 7863–7875. doi:10.1002/2014JD021608
- Guo H, Xu M, Hu Q. 2015. Changes in near-surface wind speed in China: 1969–2005 [J]. Int. J. Climatol., 31(3): 349–358. doi:10.1002/joc.2091
- 海香, 李强, 任明明, 等. 2008. 2006 年重庆特大旱灾及其原因分析 [J]. 陕西师范大学学报 (自然科学版), 36(2): 85–90. Hai Xiang, Li Qiang, Ren Mingming, et al. 2008. The serious droughts of Chongqing in 2006 and the causes [J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition) (in Chinese), 36(2): 85–90.
- 和宛琳, 徐宗学. 2006. 渭河流域气温与蒸发量时空分布及其变化趋势分析 [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版), 42(1): 102–106. He Wanlin, Xu Zongxue. 2006. Spatial and temporal characteristics of the long-term trend for temperature and pan evaporation in the Wei River basin [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science) (in Chinese), 42(1): 102–106. doi:10.3321/j.issn:0476-0301.2006.01.024
- He Y Y, Wang K C, Zhou C L, et al. 2018. A revisit of global dimming and brightening based on the sunshine duration [J]. Geophys. Res. Lett., 45(9): 4281–4289. doi:10.1029/2018GL077424
- 黄秋红. 2000. E601 型与小型蒸发器对比观测分析 [J]. 气象, 26(10): 45–48. Huang QiuHong. 2000. Contrast analysis of E601 versus small-sized evaporation gauge [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 26(10): 45–48. doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2000.10.009
- Kaiser D, Qian Y. 2002. Decreasing trends in sunshine duration over China for 1954–1998: Indication of increased haze pollution? [J]. Geophys. Res. Lett., 29(21): 2042. doi:10.1029/2002GL016057
- Li M, Chu R H, Shen S H, et al. 2018. Dynamic analysis of pan evaporation variations in the Huai River basin, a climate transition zone in eastern China [J]. Sci. Total Environ., 625: 496–509. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.12.317
- Liu B H, Xu M, Henderson M, et al. 2004. A spatial analysis of pan evaporation trends in China 1955–2004 [J]. J. Geophys. Res., 109(D15): D15102. doi:10.1029/2004jd004511
- 刘敏, 沈彦俊, 曾燕, 等. 2009. 近 50 年中国蒸发皿蒸发量变化趋势及原因 [J]. 地理学报, 64(3): 259–269. Liu Min, Shen Yanjun, Zeng Yan, et al. 2009. Changing trend of pan evaporation and its cause over the past 50 years in China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 64(3): 259–269. doi:10.3321/j.issn:0375-5444.2009.03.001
- 柳春, 王守荣, 梁有叶, 等. 2013. 1961~2010 年黄河流域蒸发皿蒸发量变化及影响因子分析 [J]. 气候变化研究进展, 9(5): 327–334. Liu Chun, Wang Shourong, Liang Youye, et al. 2013. Analysis of pan evaporation change and the influence factors in the Yellow River basin in 1961–2010 [J]. Progress Inquisitiones de Mutatione Climatis (in Chinese), 9(5): 327–334. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2013.05.003
- 刘玉英, 韦小丽, 李宇凡. 2015. 1961~2012 年吉林省日照时数的变化特征及影响因素 [J]. 自然资源学报, 30(8): 1367–1377. Liu Yuying, Wei Xiaoli, Li Yufan. 2015. Variation of sunshine duration and related driving forces in Jilin Province during 1961–2012 [J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 30(8): 1367–1377. doi:10.11849/zrzyxb.2015.08.011

- 刘蓉, 文军, 王欣. 2016. 黄河源区蒸散量时空变化趋势及突变分析 [J]. *气候与环境研究*, 21(5): 503–511. Liu Rong, Wen Jun, Wang Xin. 2016. Spatial-temporal variation and abrupt analysis of evapotranspiration over the Yellow River source region [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 21(5): 503–511. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15202
- Lorenz E N. 1956. Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction [R]. Science Report 1.
- 马柱国, 符淙斌. 2006. 1951~2004 年中国北方干旱化的基本事实 [J]. *科学通报*, 51(23): 2913–2925. Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2006. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004 [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 51(23): 2913–2925. doi:10.3321/j.issn.0023-074X.2006.20.016
- Ohmura A, Wild M. 2002. Is the hydrological cycle accelerating? [J]. *Science*, 298(5597): 1345–1346. doi:10.1126/science.1078972
- 彭京备, 张庆云, 布和朝鲁. 2007. 2006 年川渝地区高温干旱特征及其成因分析 [J]. *气候与环境研究*, 12(3): 464–474. Peng Jingbei, Zhang Qingyun, Buhe Chola. 2007. On the characteristics and possible causes of a severe drought and heat wave in the Sichuan–Chongqing region in 2006 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 12(3): 464–474. doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2007.03.026
- Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. 1995. Evaporation losing its strength [J]. *Nature*, 377(6551): 687–688. doi:10.1038/377687b0
- 祁添焱, 张强, 王月, 等. 2015. 1960~2005 年中国蒸发皿蒸发量变化趋势及其影响因素分析 [J]. *地理科学*, 35(12): 1599–1606. Qi Tianyao, Zhang Qiang, Wang Yue, et al. 2015. Spatiotemporal patterns of pan evaporation in 1960–2005 in China: Changing properties and possible causes [J]. *Scientia Geographica Sinica (in Chinese)*, 35(12): 1599–1606. doi:10.13249/j.cnki.sgs.2015.012.1599
- 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 2005. 近 50 年中国地面气候变化基本特征 [J]. *气象学报*, 63(6): 942–956. Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi, et al. 2005. Climate changes of China's mainland over the past half century [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 63(6): 942–956. doi:10.3321/j.issn.0577-6619.2005.06.011
- Roderick M L, Farquhar G D. 2002. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years [J]. *Science*, 298(5597): 1410–1411. doi:10.1126/science.1075390-a
- Roderick M L, Farquhar G D. 2004. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002 [J]. *Int. J. Climatol.*, 24(9): 1077–1090. doi:10.1002/joc.1061
- Roderick M L, Farquhar G D. 2005. Changes in New Zealand pan evaporation since the 1970s [J]. *Int. J. Climatol.*, 25(15): 2031–2039. doi:10.1002/joc.1262
- 沈柏竹, 廉毅, 杨涵洧, 等. 2012. 中国东北夏季温度年代际变化特征 [J]. *地理科学*, 32(6): 739–745. Shen Bozhu, Lian Yi, Yang Hanwei, et al. 2012. Interdecadal change characteristics of summer temperature in Northeast China [J]. *Scientia Geographica Sinica (in Chinese)*, 32(6): 739–745. doi:10.13249/j.cnki.sgs.2012.06.014
- Tang W J, Yang K, Qin J, et al. 2011. Solar radiation trend across China in recent decades: A revisit with quality-controlled data [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 11(1): 393–406. doi:10.5194/acp-11-393-2011
- Wang H J. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 18(3): 376–386. doi:10.1007/BF02919316
- Wang K C, Dickinson R E. 2012a. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability [J]. *Rev. Geophys.*, 50(2): RG2005. doi:10.1029/2011RG000373
- Wang K C, Dickinson R E, Wild M, et al. 2012b. Atmospheric impacts on climatic variability of surface incident solar radiation [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 12(20): 9581–9592. doi:10.5194/acpd-12-14009-2012
- 王艳君, 姜彤, 许崇育. 2005. 长江流域蒸发皿蒸发量及影响因素变化趋势 [J]. *自然资源学报*, 20(6): 864–870. Wang Yanjun, Jiang Tong, Xu Congyu. 2005. Observed trends of pan evaporation and its impact factors over the Yangtze River basin between 1961 and 2000 [J]. *Journal of Natural Resources (in Chinese)*, 20(6): 864–870. doi:10.3321/j.issn.1000-3037.2005.06.010
- 王遵亲, 丁一汇, 何金海, 等. 2004. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析 [J]. *气象学报*, 62(2): 228–236. Wang Zunya, Ding Yihui, He Jinhai, et al. 2004. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 62(2): 228–236. doi:10.3321/j.issn.0577-6619.2004.02.009
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 1–269. Wei Fengying. 2007. Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Technology (in Chinese) [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 1–269.
- Xie H, Zhu X, Yuan D Y. 2015. Pan evaporation modelling and changing attribution analysis on the Tibetan Plateau (1970–2012) [J]. *Hydrol. Process.*, 29(9): 2164–2177. doi:10.1002/hyp.10356
- Xu M, Chang C P, Fu C B, et al. 2006. Steady decline of East Asian monsoon winds, 1969–2000: Evidence from direct ground measurements of wind speed [J]. *J. Geophys. Res.*, 111(D24): D24111. doi:10.1029/2006JD007337
- 徐维新, 古松, 苏文将, 等. 2012. 1971~2010 年三江源地区干湿状况变化的空间特征 [J]. *干旱区地理*, 35(1): 46–55. Xu Weixin, Gu Song, Su Wenjiang, et al. 2012. Spatial pattern and its variations of aridity/humidity during 1971–2010 in Three-River Source Region on the Qinghai–Tibet Plateau [J]. *Arid Land Geography (in Chinese)*, 35(1): 46–55.
- Yang H B, Yang D W. 2012. Climatic factors influencing changing pan evaporation across China from 1961 to 2001 [J]. *J. Hydrol.*, 414–415: 184–193. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.10.043
- 虞海燕, 刘树华, 赵娜, 等. 2011. 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 [J]. *气候与环境研究*, 16(3): 389–398. Yu Haiyan, Liu Shuhua, Zhao Na, et al. 2011. Variation characteristics of the sunshine duration and its relationships with temperature, wind speed, and precipitation over recent 59 years in China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 16(3): 389–398. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.03.14
- Yue S, Pilon P, Cavadas G. 2002. Power of the Mann–Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series [J]. *J. Hydrol.*, 259(1–4): 254–271. doi:10.1016/S0022-1694(01)00594-7

- Yue S, Wang C Y. 2004. The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in Serially correlated hydrological series [J]. [Water Resour. Manag.](#), 18(3): 201–218. doi:10.1023/B:WARM.0000043140.61082.60
- Zhang Q, Qi T Y, Li J F, et al. 2015. Spatiotemporal variations of pan evaporation in China during 1960–2005: Changing patterns and causes [J]. [Int. J. Climatol.](#), 35(6): 903–912. doi:10.1002/joc.4025
- Zhang Y Q, Liu C M, Tang Y H, et al. 2007. Trends in pan evaporation and reference and actual evapotranspiration across the Tibetan Plateau [J]. [J. Geophys. Res.](#), 112(D12): D12110. doi:10.1029/2006jd008161
- 邹旭恺, 高辉. 2007. 2006 年夏季川渝高温干旱分析 [J]. [气候变化研究进展](#), 3(3): 149–153.
- Zou Xukai, Gao Hui. 2007. Analysis of severe drought and heat wave over the Sichuan Basin in the summer of 2006 [J]. [Advances in Climate Change Research \(in Chinese\)](#), 3(3): 149–153. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2007.03.005