

DOI: 10.5846/stxb201207271069

蒋冲,王飞,刘思洁,穆兴民,李锐,刘焱序. “蒸发悖论”在秦岭南北地区的探讨. 生态学报 2013, 33(3): 0844-0855.

Jiang C, Wang F, Liu S J, Mu X M, Li R, Liu Y X. Evaporation paradox in the northern and southern regions of the Qinling Mountains. Acta Ecologica Sinica 2013, 33(3): 0844-0855.

## “蒸发悖论”在秦岭南北地区的探讨

蒋冲<sup>1</sup>, 王飞<sup>1,2,\*</sup>, 刘思洁<sup>3</sup>, 穆兴民<sup>1,2</sup>, 李锐<sup>1,2</sup>, 刘焱序<sup>4</sup>

(1. 西北农林科技大学资源环境学院 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所 杨凌 712100;  
3. 北京大学遥感与地理信息系统研究所 北京 100871; 4. 陕西师范大学旅游与环境学院 西安 710062)

**摘要:** 潜在蒸散量 ( $ET_0$ ) 是大气蒸发的估计值, 已经广泛应用于灌溉管理和无实测蒸发资料地区的估算。分析  $ET_0$  的时空变化是研究水资源对气候变化响应的基础工作, 同时对于农业水资源的优化利用也具有重要意义。根据秦岭南北 47 个气象站 1960—2011 年逐日数据, 利用 FAO Penman-Monteith 公式计算出各站的潜在蒸散量 ( $ET_0$ )。研究了气温、降水与  $ET_0$  之间的长期变化趋势关系, 对导致  $ET_0$  下降的主要原因进行了讨论, 着重对秦岭南北地区是否存在“蒸发悖论”进行验证。结果表明: (1) 秦岭南北整体气温经历了先降后升的变化过程, 1993 年为突变年份, 1960—1993 年的降温速率和 1994—2011 年的升温速率均表现出由南向北递减的规律, 1960—2011 年整体升温速率由北向南递减。(2) 1979 年和 1993 年是  $ET_0$  变化的转折点, 以 1979 和 1993 为界  $ET_0$  经历了“升—降—降”的变化阶段。1960—1979 年仅汉水流域和巴巫谷地存在“蒸发悖论”现象, 1980—1993、1994—2011 和 1960—2011 年 3 个时段区域整体和各子区均发现了“蒸发悖论”现象。秋季后 18a 和 52a 整体以及冬季前 34a 和 52a 整体均存在“蒸发悖论”现象, 冬季最为明显。(3) 近 52 年整体降水表现出不显著的下降趋势, 相较于年尺度, 夏季降水与  $ET_0$  逆向变化趋势更为明显。(4) 年尺度上, 太阳辐射(日照时数)下降引起的潜热通量减少是造成  $ET_0$  下降即“蒸发悖论”现象的主要原因。季节尺度, 春季  $ET_0$  下降的主导因素为风速, 其它季节均为太阳辐射(日照时数)。

**关键词:** 秦岭南北; 潜在蒸散量; 蒸发悖论; 气温; 降水

## Evaporation paradox in the northern and southern regions of the Qinling Mountains

JIANG Chong<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>1,2,\*</sup>, LIU Sijie<sup>3</sup>, MU Xingmin<sup>1,2</sup>, LI Rui<sup>1,2</sup>, LIU Yanxu<sup>4</sup>

1 College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

3 Institute of Remote Sensing and Geographic Information System, Peking University, Beijing 100871, China

4 College of Tourism and Environment Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China

**Abstract:** Potential evapotranspiration ( $ET_0$ ), as an estimate of the evaporative demand of the atmosphere, it has been widely applied in irrigation management and predictions in ungauged basins. Analysis of  $ET_0$  spatial and temporal variation is the basic research on the impact of climate change on water resources, and is also important to the optimal allocation of agricultural water resources. In recent years, change trends in  $ET_0$  and its dominant factors across the different regions of the world have been studied by many researchers. Despite global warming, decreasing trends in  $ET_0$  have been detected in several countries including United States, Russia, India, China, Australia and New Zealand. Decreasing sunshine duration, declining wind speed and increasing relative humidity have been considered to be the main causes for the decreasing  $ET_0$ .

基金项目: 国家自然科学基金(41171420); 中国科学院水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目(10502-Z12-9); 中荷联合主题研究项目渭河流域水环境问题综合治理对策研究(GJHZ1018)

收稿日期: 2012-07-27; 修订日期: 2012-10-26

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wafe@ms.iswc.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

Northern and southern regions of the Qinling Mountains is far away from oceans, water shortage is a serious problem for agriculture in this area. So far, detailed investigation on the change trend in  $ET_0$  over this area has been lacking. In this study, based on the daily data from 47 meteorological stations in northern and southern regions of the Qinling Mountains between 1960 and 2011,  $ET_0$  was calculated by using FAO Penman-Monteith formula. We analyzed the change trend of  $ET_0$  and air temperature as well as the main factors affecting the decrease of  $ET_0$ . It also discussed the existence of the “evaporation paradox”, the results are as following. (1) Air temperature of the whole region experienced two periods which increased initially and then decreased, 1993 was abrupt change point. The decreasing rate between 1960 and 1993 as well as increasing rate between 1994 and 2011 both presented a pattern that declined from south to north, while increasing rate between 1960 and 2011 decreased from north to south. (2) 1979 and 1993 were the change point of  $ET_0$ , which divided  $ET_0$  into two periods,  $ET_0$  increased from 1960 to 1979 and then decreased from 1993 to 2011. Between 1960 and 1979, “Evaporation paradox” only existed in Han River Basin (HRB) and Bawu Valley (BWV), the periods of 1980—1993, 1994—2011 and 1960—2011 all had “Evaporation paradox” phenomenon. Both the last 18 years and the whole 52 years in autumn as well as the initial 34 years and the whole 52 years in winter had “Evaporation paradox” phenomenon, which was more obvious in winter. (3) Precipitation decreased insignificantly in the past 52 years, and the precipitation and  $ET_0$  exhibited a contrary trend, which accounted 53% in the whole year and 79% in summer, respectively. The contrary trend between precipitation and  $ET_0$  was more obvious in summer than year scale. (4) According to the effect of meteorological elements change on  $ET_0$  change, the order was sunshine hours, wind speed, maximum temperature, relative humidity, mean temperature, mean air pressure and minimum temperature. On the year scale, the significant decrease of solar radiation (sunshine hours) was the dominating factor leading to the decrease of  $ET_0$ . While on the seasonal scale, the dominating factor of spring's  $ET_0$  was wind speed, the other three seasons were all solar radiation (sunshine hours).

**Key Words:** the northern and southern regions of the Qinling Mountains; potential evapotranspiration; evaporation paradox; air temperature; precipitation

潜在蒸散量 ( $ET_0$ ) 是指在一定气象条件下水分供应不受限制时,某一固定下垫面土壤蒸发量和植物蒸腾量的总和,它是实际蒸散量的理论上限,也是计算实际蒸散量的基础,又被称之为参考作物蒸散量<sup>[1-4]</sup>。由于蒸散过程本身消耗大量能量并且将大量水汽源源不断的输送到大气,因此蒸散在全球水循环和能量平衡中占有非常重要的地位,并且已经被广泛应用于水资源利用和评价、生态环境恶化、农田灌溉用水和地表旱情监测等研究中<sup>[1]</sup>。近年来,国内外学者对于  $ET_0$  的估算方法<sup>[2-4]</sup>、时空变化<sup>[1, 5-20]</sup>及其影响因素<sup>[1, 5-20]</sup>进行了广泛而深入的讨论。全球变暖已经成为不争的事实,地球表面在过去 50a 间的升温速率为  $0.13^\circ\text{C}/10\text{a}$ <sup>[21-22]</sup>。研究普遍认为温度升高会影响大气中的水汽含量和大气环流,加速近地表空气中水汽分子运动速度,因此在气候变化的研究中也通常会得出  $ET_0$  随温度而增加的结论。尽管近 50 年全球温度普遍上升,但众多研究表明不论是  $ET_0$  (计算值) 还是蒸发皿蒸发量 (实测值) 都表现出下降趋势<sup>[1, 5-20]</sup>。Roderick 等<sup>[23]</sup> 将全球气温上升而  $ET_0$  减少的水文气象现象称之为“蒸发悖论”,目前“蒸发悖论”问题已经成为  $ET_0$  研究中的热点问题<sup>[1]</sup>,中国的大部分地区也都发现了“蒸发悖论”现象<sup>[5-20]</sup>。众多学者对实测蒸发皿蒸发量资料和根据 Penman-Monteith 公式计算得到的  $ET_0$  进行了分析,在全国尺度<sup>[5-7]</sup>、干旱半干旱地区<sup>[8]</sup>、西北地区<sup>[9]</sup>、黑河流域<sup>[10]</sup>、黄河流域<sup>[11]</sup>、渭河流域<sup>[12]</sup>、汉江流域<sup>[13]</sup>、海河流域<sup>[14]</sup>、黄土高原<sup>[15]</sup>、青藏高原<sup>[16]</sup>、松嫩平原<sup>[17]</sup>等地均得出了蒸发皿蒸发量或  $ET_0$  呈下降趋势的结论。此外,部分学者注意到了与  $ET_0$  变化密切相关的气象要素的变化(风速减慢、太阳辐射减少等<sup>[5-20]</sup>)和人类活动(农业灌溉<sup>[6, 18]</sup>、下垫面变化<sup>[5, 9-11]</sup>等)的影响。关于“蒸发悖论”的机理目前尚无定论,McVicar<sup>[11]</sup>等人认为美国、俄罗斯和印度等地区  $ET_0$  减小归因于北半球相对湿度的增加及辐射减少; Roderick<sup>[23]</sup>等人则认为澳洲和新西兰地区  $ET_0$  减小是由于南半球云量和气溶胶浓度的增加。对  $ET_0$  下

降的原因归纳起来包括:云量和气溶胶等污染物的增加引起的太阳辐射下降<sup>[5-20]</sup>;空气湿度的增加导致的水汽压差减小<sup>[5-6,16]</sup>;夏季风变化引起的风速下降等<sup>[5-20]</sup>。但从全球范围来看,云量或气溶胶增加引起的辐射量下降是  $ET_0$  下降的主要原因<sup>[1]</sup>。

秦岭横亘于中国中部地区,植被类型和气候条件具有明显的南北过渡特点,本区还是南水北调中线工程的水源地,在地理学、生态学、水土保持和水文学等相关学科的研究中具有极其重要的地位。以往对于这一地区的研究大多局限于植被景观类型、旅游资源开发和生态环境保护等<sup>[24]</sup>,对于气候变化的研究较少<sup>[25-26]</sup>,少数关于气温、降水等单一要素的分析也局限于陕西境内的关中陕南地区,研究的代表性、覆盖面和时效性明显不足。关于秦岭南北及其周边地区水资源特别是  $ET_0$  的研究更多的是以流域为单位,即秦岭以北的渭河流域(黄河一级支流)<sup>[11-12,15,20]</sup>和汉江流域(长江一级支流)<sup>[13]</sup>。但这些研究更多的是以流域水资源为出发点,并没有关注重要地理界线南北  $ET_0$  的空间分布差异,也没有对不同地理单元以及不同时间尺度(年和季节尺度)是否存在“蒸发悖论”现象及其时空差异进行讨论。虽然目前对于“蒸发悖论”的研究重点已经由单纯分析现象转向了其形成原因的探讨,但是从区域尺度上揭示  $ET_0$  的时空变化和“蒸发悖论”是否存在及其细节特征对于秦岭南北水资源管理、水利工程设计以及气候变化研究仍具有重要意义。本文利用 1960—2011 年逐日气象资料,采用目前普遍使用的 Penman-Monteith 模型计算  $ET_0$ ,试图通过对比分析过去 52a 间  $ET_0$  和气温、降水量的变化趋势,探究秦岭南北是否存在“蒸发悖论”现象及其时空差异。

## 1 研究区概况

秦岭南北包括 4 个地理单元(图 1<sup>[26]</sup>),一是秦岭北坡及其以北的暖温带地区(以下简称“秦岭以北”);二是秦岭南坡,包括伏牛山及其以东平原(因大部分区域属秦岭南坡山地,下简称“秦岭南坡”);三是秦岭以南的汉水谷地、巴山、涇水谷地及淮河上游北亚热带地区(因大部分区域属汉水流域,下简称“汉水流域”);四是巴山南麓、巫山谷地及江汉平原西北部(下简称“巴巫谷地”)<sup>[26]</sup>。该区地处暖温带与北亚热带过渡区,是中国气候上的南北分界线。年均气温 12—17℃,  $\geq 10^\circ\text{C}$  的年积温为 3700—4900℃,年均降水量 600—1200mm,降水变率大,季节分配不均匀,无霜期 200—250d<sup>[24-26]</sup>。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

本文使用的是国家气象中心整编的秦岭南北 47 个气象站 1960—2011 年的逐日平均气温、最高气温、最低气温、降水量、相对湿度、日照时数和平均风速等观测资料,分别计算出各站的  $ET_0$ ,按照 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12—次年 2 月为冬季的原则统计出季节  $ET_0$ 。需要说明的是,日照时数是记录某一地区一天内接受太阳辐射强度大于或等于  $120 \text{ W m}^{-2}$  的时间长度,在我国由于日照时数比太阳辐射的观测历史更长,因此在研究太阳辐射的演变趋势及成因分析中被普遍用作其替代指标。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 Penman-Monteith 公式

采用世界粮农组织(FAO)1998 年修正的 Penman-Monteith 公式<sup>[2-4]</sup>计算  $ET_0$ ,研究表明 Penman-Monteith 公式计算的  $ET_0$  在不同的气候条件下都与实测值非常接近<sup>[2-6,9-12]</sup>。

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

式中  $ET_0$  为潜在蒸散量( $\text{mm/d}$ );  $R_n$  为地表净辐射( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ );  $G$  为土壤热通量( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ );  $T$  为 2m 高

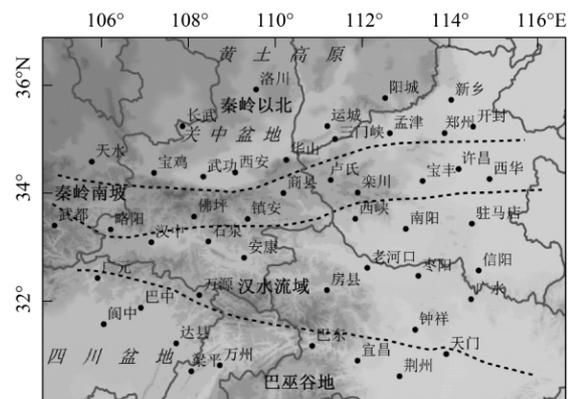


图 1 研究区范围及气象观测站点分布<sup>[26]</sup>

Fig. 1 Location of the study area and distribution of meteorological stations<sup>[26]</sup>

处日平均气温(℃);  $u_2$  为 2m 高处风速(  $ms^{-1}$  );  $e_s$  为饱和水气压( kPa );  $e_a$  为实际水汽( kPa );  $\Delta$  为饱和水气压曲线斜率( kPa/℃ );  $\gamma$  为干湿表常数( kPa/℃ )。我国观测气温、湿度的气象仪器高度一般为 1.5m 左右, 风速感应器( 风杯中心) 距地高度 10—12m。由于 1.5m 和 2m 高处的气温、湿度相差不大, 在本研究中将 1.5m 和 2m 高处的气温、湿度差别忽略不计, 以常规 1.5m 处的气温、湿度记录近似代替 2m 处的气温、湿度值, 并利用公式( 2) 订正到 2m 高处的风速:

$$\mu_2 = \mu_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \tag{2}$$

式中,  $\mu_2$  为 2 m 高处的风速( m/s );  $\mu_z$  为 Z m 高处测量的风速( m/s ); Z 为风速计距地面高度( m )。

### 2.2.2 Pettitt 突变点检验

Pettitt 变点检测方法由 Pettitt 提出, 基于非参数检测一个序列的变点, 计算较简便, 可以明确变化的时间, 能够较好地识别序列分布的突变点, 在变点检测方法中应用较多且物理意义明确<sup>[27]</sup>, 具体算法参见文献<sup>[27]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 气温和 $ET_0$ 的时空变化及年际“蒸发悖论”现象

秦岭南北不同地区气温变化步调基本一致, 由累积距平曲线( 图 2) 可知 1993 年是气温变化的转折点, 经 Pettitt 突变检测 1993 年也是气温突变点, 1993 年以前起伏较大, 整体上表现出下降趋势, 1994 年起快速上升。1960—1993 年 64% ( 30 个) 的站点气温微弱下降, 各区气温下降的站点所占比例排序为巴巫谷地( 80% ) > 汉水流域( 71% ) > 秦岭以北( 57% ) > 秦岭南坡( 44% ), 降温速率排序为汉水流域(  $-0.08^\circ C/10a$  ) = 巴巫谷地(  $-0.08^\circ C/10a$  ) > 秦岭南坡(  $-0.06^\circ C/10a$  ) > 秦岭南北(  $-0.05^\circ C/10a$  ) > 秦岭以北(  $-0.01^\circ C/10a$  )。秦岭以南地区气温下降的站点所占比例和速率均高于秦岭以北, 因此这一地区降温趋势更为明显。1994—2011 年 83% ( 39 个) 的站点气温上升, 升温的站点所占比例排序为秦岭以北( 86% ) = 汉水流域( 86% ) > 巴巫谷地( 80% ) > 秦岭南坡( 78% ), 升温速率排序为巴巫谷地(  $0.13^\circ C/10a$  ) > 秦岭南北(  $0.07^\circ C/10a$  ) > 汉水流域(  $0.05^\circ C/10a$  ) > 秦岭南坡(  $0.02^\circ C/10a$  ) > 秦岭以北(  $0.01^\circ C/10a$  )。1960—2011 年秦岭南北所有站点呈升温趋势, 升温速率排序依次为秦岭以北(  $0.25^\circ C/10a$  ) > 秦岭南北(  $0.18^\circ C/10a$  ) > 秦岭南坡(  $0.17^\circ C/10a$  ) > 汉水流域(  $0.16^\circ C/10a$  ) > 巴巫谷地(  $0.14^\circ C/10a$  ), 其升温趋势均通过了 0.01 水平的显著性检验。

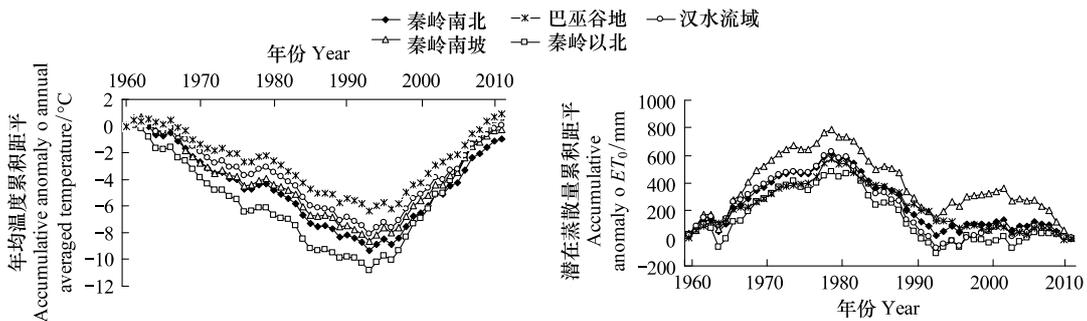


图 2 年平均气温和  $ET_0$  累积距平

Fig.2 Curves of accumulative anomalies of annual average temperature and  $ET_0$

$ET_0$  的变化分为 3 个阶段, 由累积距平曲线( 图 2) 和突变检验可知 1979 年既是转折点也是突变点, 1993 年末通过 99% 的突变显著性检验, 因此只是转折点而非突变点, 并分别以 1979 年和 1993 年为分界点划分为 1960—1979、1980—1993 和 1994—2011 共 3 个不同的时段进行分析( 表 1)。1979 年以前  $ET_0$  整体上表现出增加趋势(  $0.4mm/10a$  ), 1980—1993 年大幅减少(  $-18.6mm/10a$  ), 1994—2011 年微弱减少(  $-2.6mm/10a$  )。1960—1979 年间各子区变化趋势不一, 巴巫谷地(  $7.0mm/10a$  ) 和秦岭以北(  $5.2mm/10a$  ) 增加, 而秦岭南坡(  $-7.1mm/10a$  ) 和汉水流域(  $-3.7mm/10a$  ) 减少, 其中秦岭以北和秦岭南坡  $ET_0$  与同一时期气温变化趋势相同, 而汉水流域和巴巫谷地则相反, 表现出“蒸发悖论”现象; 1980—1993 年 81% ( 38 个) 的站点  $ET_0$  减少, 各

子区减少速率排序为秦岭以北( -33.0mm/10a) > 汉水流域( -20.2mm/10a) > 秦岭南坡( -14.2mm/10a) > 巴巫谷地( -6.8mm/10a) ,全部存在“蒸发悖论”现象; 1994—2011 年秦岭南北气温大幅上升, 而  $ET_0$  则减少, 各区下降速率排序依次为秦岭南坡( -63.1mm/10a) > 秦岭南北( -26.5mm/10a) > 汉水流域( -23.6mm/10a) > 秦岭以北( -16.8mm/10a) > 巴巫谷地( -2.4mm/10a) 。另外, 由于前人众多研究是将过去 50 年整体作为研究对象, 本文为了方便与之对比, 也将 1980—2011 和 1960—2011 两个时间段单独整理分析。1980—2011 年研究区整体和各个子区  $ET_0$  与气温呈同向变化趋势, 而 1960—2011 年则与之相反, 发现了明显的“蒸发悖论”现象。除了时间变化趋势之外, 研究“蒸发悖论”的空间分布特征也很有必要, 限于篇幅问题本文只列举 1960—2011 年间气温和  $ET_0$  变化的空间分布( 图 3) 。存在“蒸发悖论”现象的站点比例高达 85% ( 40 个) , 两者呈同向变化趋势的站点零星分布于各个子区, 且升温趋势均不显著。

表 1 不同时段  $ET_0$  和气温变化趋势  
Table 1 Change trend of  $ET_0$  and temperature in different periods

时段 Periods	指标 Factors									
	$ET_0$ /( mm/10a)					气温 Temperature/( $^{\circ}$ C /10a)				
	NRQ	SSQ	HRB	BWV	SNQ	NRQ	SSQ	HRB	BWV	SNQ
1960—1979	5.2 $\uparrow$	-7.1 $\downarrow$	-3.7 $\downarrow$	7.0 $\uparrow$	0.4 $\uparrow$	0.1 $\uparrow$	-0.01 $\downarrow$	0.01 $\uparrow$	-0.05 $\downarrow$	0.01 $\uparrow$
1980—1993	-33.0 $\downarrow$	-14.2 $\downarrow$	-20.2 $\downarrow$	-6.8 $\downarrow$	-18.6 $\downarrow$	0.2 $\uparrow$	0.01 $\uparrow$	0.1 $\uparrow$	0.2 $\uparrow$	0.1 $\uparrow$
1994—2011	-16.8 $\downarrow$	-63.1 $\downarrow$	-23.6 $\downarrow$	-2.4 $\downarrow$	-26.5 $\downarrow$	0.1 $\uparrow$	0.02 $\uparrow$	0.1 $\uparrow$	0.1 $\uparrow$	0.1 $\uparrow$
1980—2011	16.4 $\uparrow$	4.6 $\uparrow$	19.0 $\uparrow$	10.4 $\uparrow$	12.6 $\uparrow$	0.5 $\uparrow$	0.4 $\uparrow$	0.4 $\uparrow$	0.4 $\uparrow$	0.4 $\uparrow$
1960—2011	-6.6 $\downarrow$	-16.7 $\downarrow$	-9.6 $\downarrow$	-9.9 $\downarrow$	-10.7 $\downarrow$	0.3 $\uparrow$	0.2 $\uparrow$	0.2 $\uparrow$	0.1 $\uparrow$	0.2 $\uparrow$

NRQ: 秦岭以北 northern region of Qinling Mountains; SSQ: 秦岭南坡 southern slope of Qinling Mountains; HRB: 汉水流域 Han River Basin; BWV: 巴巫谷地 Bawu Valley; SNQ: 秦岭南北 northern and southern regions of Qinling Mountains

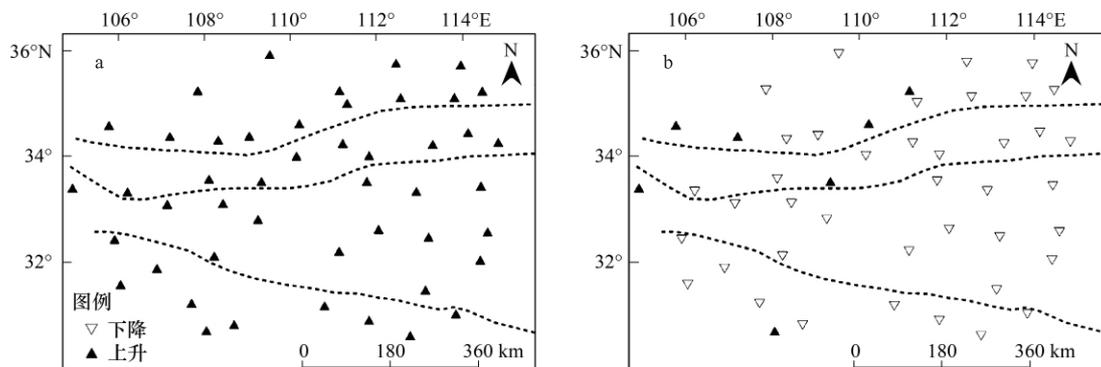


图 3 年平均气温 (a) 与  $ET_0$  (b) 变化趋势的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of annual average temperature (a) and  $ET_0$  (b) change trend

### 3.2 “蒸发悖论”的季节分布

为了进一步分析季节尺度上气温和  $ET_0$  变化的差异, 以 1979 和 1993 年为分界点, 分别计算各子区不同时段气温和  $ET_0$  的均值、气候倾向率及其显著性检验值( 表 2) 。1960—2011 年, 研究区整体除夏季不显著降温( -0.02 $^{\circ}$ C /10a) 外, 其它 3 个季节均呈升温趋势, 按增温速率大小排序为春季( 0.26 $^{\circ}$ C /10a) > 冬季( 0.22 $^{\circ}$ C /10a) > 秋季( 0.20 $^{\circ}$ C /10a) , 各子区的变化规律与研究区整体基本一致。  $ET_0$  方面, 除春季( 2.3mm/10a) 呈增加趋势外, 其余 3 个季节均减少, 按递减速率大小排序为夏季( -11.1mm/10a) > 冬季( -1.1mm/10a) > 秋季( -0.6mm/10a) , 以上分析表明各季节“蒸发悖论”现象的规律存在差异。

分别对比 1960—1979、1980—1993 和 1994—2011 年 3 个时段内温度和  $ET_0$  的变化趋势( 表 2) 。春季, 研究区整体和各个子区在不同时段的气温和  $ET_0$  的气候倾向率均表现出同向变化趋势, 前 20 年( 1960—1979)

表 2 不同时段季节平均气温和  $ET_0$  变化趋势  
 Table 2 Change trend of seasonal average temperature and  $ET_0$  in different periods

季节 Season	时间段 Periods	指标 Factors	气温 Temperature/°C					$ET_0$ /mm				
			NRQ	SSQ	HRB	BWV	SNQ	NRQ	SSQ	HRB	BWV	SNQ
春季 Spring	1960—1979	平均	12.7	13.4	15.1	16.6	14.5	308.6	292.2	278.3	260.5	284.9
		倾向率	0.1	0.03	0.1	0.1	0.03	2.0	1.1	0.9	0.1	1.0
	1980—1993	平均	12.6	13.2	15.0	16.4	14.3	294.4	274.3	268.8	256.3	273.5
		倾向率	-0.5	-0.6*	-0.5*	-0.3*	-0.5*	-33.5**	-29.2**	-27.7**	-19.1**	-27.4**
	1994—2011	平均	14.0	14.4	16.1	17.3	15.4	324.2	297.0	293.0	264.5	294.7
		倾向率	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	18.3	0.5	11.2	8.6	9.4
	1980—2011	平均	13.4	13.9	15.6	16.9	14.9	311.2	287.1	282.4	260.9	285.4
		倾向率	0.7**	0.5**	0.6**	0.5**	0.6**	14.2*	8.0*	10.9*	3.7*	9.2*
1960—2011	平均	13.1	13.7	15.4	16.8	14.8	310.2	289.0	280.9	260.8	285.2	
	倾向率	0.3** ↑	0.2* ↑	0.3** ↑	0.2* ↑	0.3* ↑	4.1 ↑	0.5 ↑	3.7 ↑	1.0 ↑	2.3 ↑	
夏季 Summer	1960—1979	平均	24.2	24.3	26.1	26.8	25.3	437.6	411.8	422.6	407.4	419.9
		倾向率	-0.2	-0.3	-0.2	-0.1	-0.2	-0.8	-9.0	-6.8	-3.1	-3.0
	1980—1993	平均	23.5	23.5	25.2	26.1	24.6	391.7	362.1	368.6	367.3	372.4
		倾向率	0.3	0.1	0.1	0.2	0.2	7.9	11.3	4.3	3.8	6.8
	1994—2011	平均	24.4	24.3	26.0	26.8	25.4	402.8	373.1	384.5	373.0	383.4
		倾向率	-0.2	-0.3	-0.2	0.0	-0.2	-26.8**	-35.5**	-22.2*	-10.9*	-23.8**
	1980—2011	平均	24.0	24.0	25.6	26.5	25.0	397.9	368.3	377.6	370.5	378.6
		倾向率	0.4**	0.3*	0.3*	0.3*	0.3**	1.0	0.3	3.7	1.1	1.4
1960—2011	平均	24.0	24.1	25.8	26.6	25.1	413.2	385.0	394.9	384.7	394.5	
	倾向率	-0.03 ↓	-0.04 ↓	-0.06 ↓	-0.01 ↓	-0.02 ↓	-10.6** ↓	-12.5** ↓	-11.8** ↓	-9.7** ↓	-11.1** ↓	
秋季 Autumn	1960—1979	平均	12.1	13.2	15.5	17.2	14.5	191.0	187.1	194.6	191.9	191.1
		倾向率	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	10.4	6.6	6.3	6.0	7.3
	1980—1993	平均	12.4	13.3	15.6	17.3	14.6	190.6	180.5	185.1	182.4	184.7
		倾向率	0.2	0.0	0.1	0.2	0.1	5.3	13.2*	11.7*	11.0*	10.3*
	1994—2011	平均	13.0	13.9	16.2	17.9	15.2	191.9	180.3	192.7	189.9	188.7
		倾向率	0.1 ↑	0.2 ↑	0.1 ↑	0.3 ↑	0.2 ↑	-9.6 ↓	-19.1* ↓	-12.3* ↓	-2.7 ↓	-10.9* ↓
	1980—2011	平均	12.7	13.7	15.9	17.6	15.0	191.3	180.4	189.4	186.6	186.9
		倾向率	0.3 ↑	0.3 ↑	0.3 ↑	0.4* ↑	0.3* ↑	0.7 ↑	-2.4 ↑	2.3 ↑	3.9 ↑	0.8 ↑
1960—2011	平均	12.5	13.5	15.8	17.5	14.8	191.2	183.0	191.4	188.6	188.6	
	倾向率	0.2* ↑	0.2* ↑	0.2* ↑	0.2* ↑	0.2* ↑	-0.5 ↓	-2.0 ↓	-0.5 ↓	-0.2 ↓	-0.6 ↓	
冬季 Winter	1960—1979	平均	-0.7	1.6	3.9	6.2	2.7	109.6	113.6	107.7	98.2	107.3
		倾向率	0.3 ↑	0.2 ↑	0.1 ↑	0.1 ↑	0.2 ↑	-5.0 ↓	-3.1 ↓	-3.0 ↓	-0.9 ↓	-3.0 ↓
	1980—1993	平均	-0.1	1.8	4.0	6.3	3.0	103.7	106.1	101.0	93.6	101.1
		倾向率	0.8* ↑	0.7* ↑	0.6* ↑	0.6* ↑	0.7* ↑	-9.7 ↓	-5.1 ↓	-6.2 ↓	-2.5 ↓	-5.9 ↓
	1994—2011	平均	0.7	2.5	4.8	6.9	3.7	107.0	108.9	107.4	96.3	104.9
		倾向率	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1	-0.2	-1.9	-7.1	-0.5	-0.5	-2.2
	1980—2011	平均	0.3	2.2	4.4	6.6	3.4	105.5	107.6	104.5	95.1	103.2
		倾向率	0.4	0.4*	0.4*	0.3*	0.4*	0.4	0.3	2.4	1.2	0.9
1960—2011	平均	-0.1	2.0	4.2	6.5	3.1	107.1	109.9	105.8	96.3	104.8	
	倾向率	0.4* ↑	0.3* ↑	0.3* ↑	0.2* ↑	0.3* ↑	-1.4 ↓	-1.9 ↓	-0.5 ↓	-0.7 ↓	-1.1 ↓	

\*\* 0.01 显著水平 0.01 significant level; \* 0.05 显著水平 0.05 significant level

呈微弱升温趋势,中间 14a(1980—1993) 显著降温,而后 17a(1994—2011) 增加幅度明显大于前 20a,两个时段平均值相差 0.4°C。 $ET_0$  也经历了“升—降—升”的变化过程,后 17a(1994—2011) 增加幅度明显大于前

20a,两个时段平均值相差 9.8mm。由图 4(a,b)可知,1960—2011 年研究区 47 个站点中只有 32% (15 个) 的站点气温和  $ET_0$  存在相反的变化趋势,即存在“蒸发悖论”现象,各个子区表现出的变化规律与研究区整体基本一致;夏季,研究区整体在前 20a 呈现出显著的降温趋势,中间 14a 微弱升温,而后 32a 又微弱降温。 $ET_0$  与气温基本呈同向变化趋势,经历了“降—升—降”的变化过程,区域整体未发现“蒸发悖论”现象。但研究区有 36% (17 个) 站点存在“蒸发悖论”现象,空间分布无明显规律[如图 4(c,d)];秋季,前 20a 和中间 14a 气温和  $ET_0$  均表现出上升趋势,但均未达到 0.05 以上的显著水平,后 17a 气温继续上升,但增温速率明显快于前 34a,与气温形成对比的是  $ET_0$  在后 17a 呈现出下降趋势。52a 整体气温表现出 0.05 显著水平上升趋势,而  $ET_0$  不显著下降,也呈现出“蒸发悖论”现象。空间分布上[图 4(e,f)],57% (27 个) 的站点存在“蒸发悖论”现象,均匀分布于整个区域;冬季,研究区整体和各子区气温经历了“升—升—降”的变化过程,中间 14a 的增温速率要明显快于前 20a,两时段平均值相差 0.3℃,而这 2 个时段的  $ET_0$  则保持下降趋势,近 52a 整体以亦是如此,即表现出“蒸发悖论”现象。由图 4(g,h)可知,64% (30 个) 的站点存在“蒸发悖论”现象。

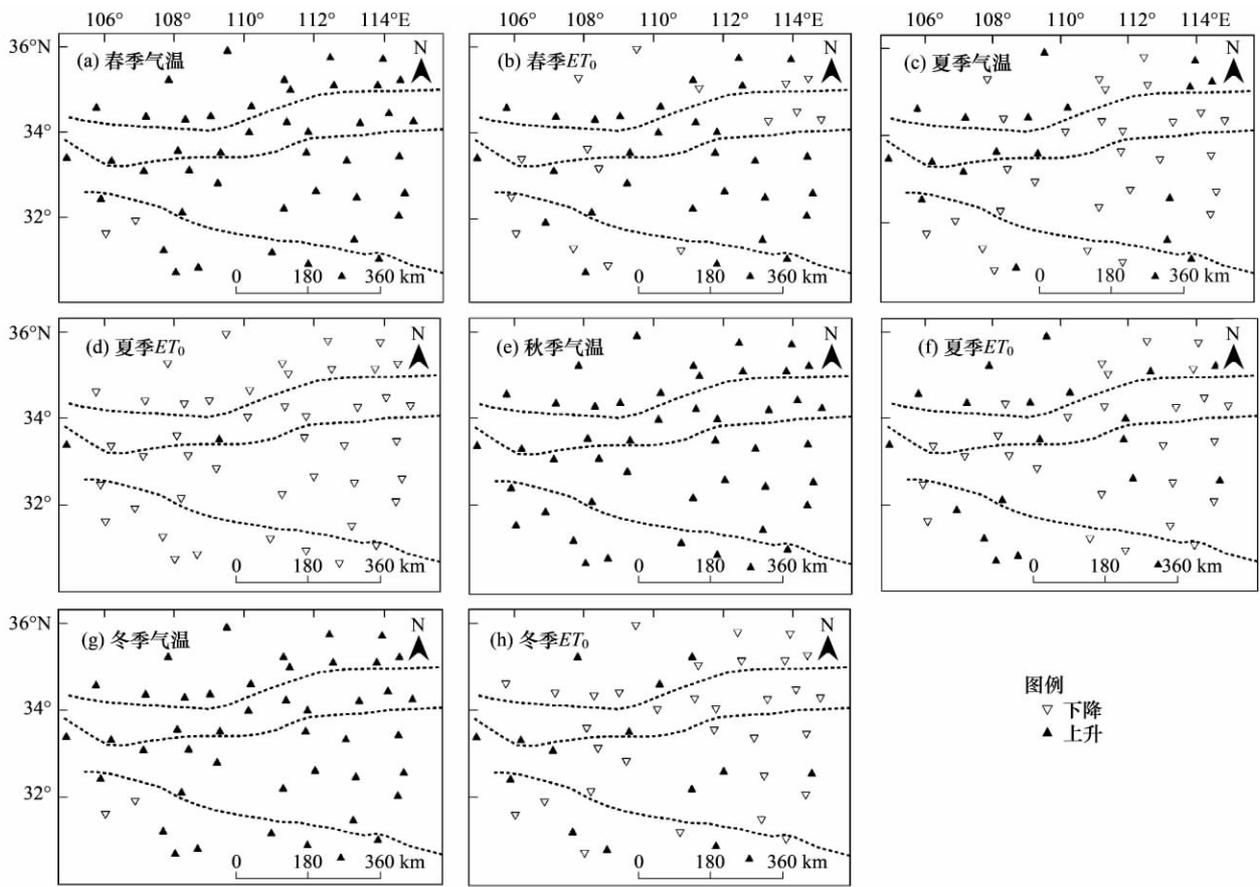


图 4 季节平均气温和  $ET_0$  变化趋势空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of seasonal average temperature and  $ET_0$  change trend

### 3.3 $ET_0$ 与降水的关系

降水与蒸发是水文循环中的两个重要环节,根据 Budyko 假设,在能量条件不变时,随降水的增加,  $ET_0$  将有所下降。秦岭南北大部分地区雨热同期,高温与降水集中于夏秋季节,降水的多寡影响  $ET_0$ ,因此有必要就降水与  $ET_0$  之间的关系进行分析。由于研究区域地形较为复杂,高大山脉阻隔作用明显,大气环流和季风环流影响复杂,降水的季节分配极不均匀,表现出冬春少,夏秋多的特征。因此,本文主要分析降水年际和夏秋两季变化,最后对降水和  $ET_0$  之间的变化趋势进行分析。1993 年是降水变化的突变点,1960—1993 年间 70% 以上的站点降水减少,1994—2011 年 70% 以上站点的降水增多。近 52 年来,部分地区降水表现出不显著的

下降趋势,且区域特征明显(图5)。年尺度上,降水与  $ET_0$  变化呈相反变化趋势的站点占 53% (25 个),夏季为 79% (37 个),秋季则达到 45% (21 个)。相较于年尺度,夏季降水与  $ET_0$  逆向变化趋势更为明显。

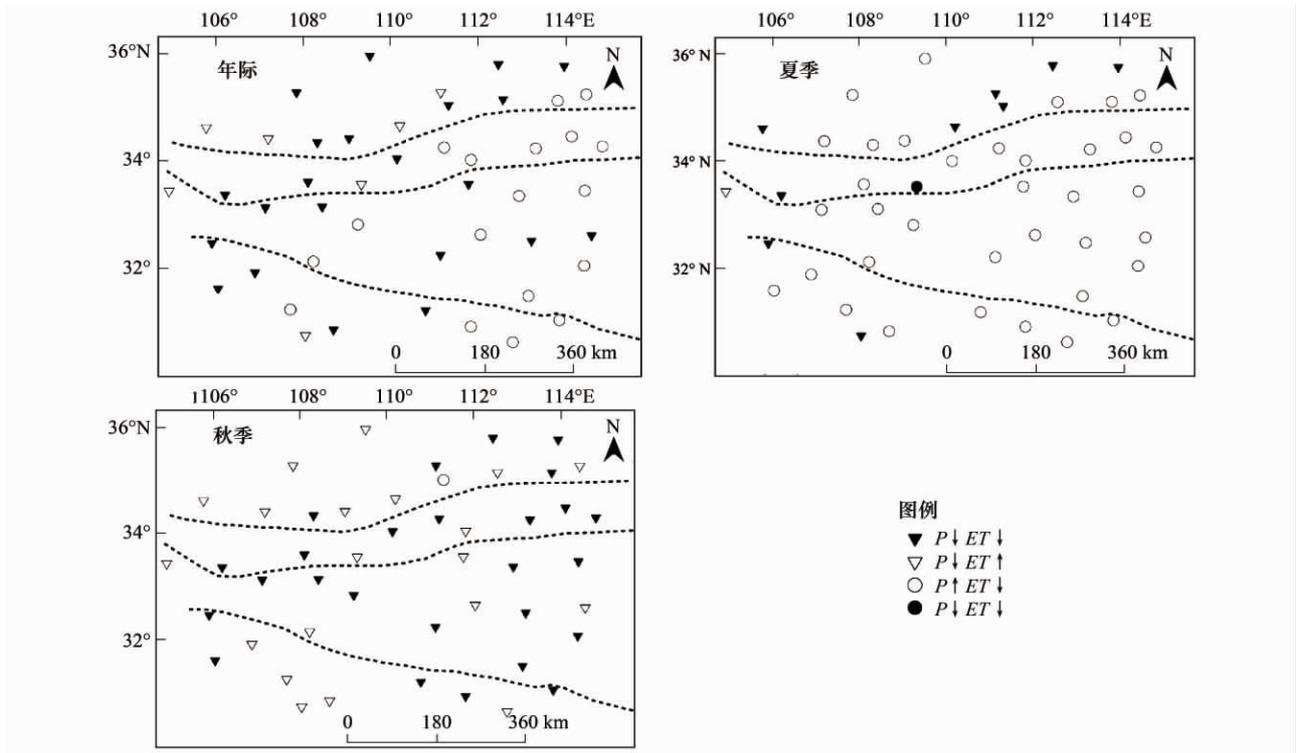


图5 年度和夏秋两季降水和  $ET_0$  变化趋势的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of precipitation and  $ET_0$  change trend in summer and autumn

### 3.4 “蒸发悖论”原因分析

如前文所述,秦岭南北地区存在“蒸发悖论”现象,这与国内外同类研究<sup>[1-20]</sup>的结论基本一致。但影响  $ET_0$  变化的气象因子有很多,包括动力学因素(风速)、热力学因素(平均气温、最高气温和最低气温)和水汽条件(相对湿度)等,上述各因子之间相互影响,其间互作机理复杂,单一因子的变化以及多因素的综合作用都可能导致  $ET_0$  发生变化,因此很有必要对这一地区  $ET_0$  下降的内在原因进行研究。选取平均气压( $P$ )、最高温度( $T_{max}$ )、最低温度( $T_{min}$ )、日照时数( $H$ )、相对湿度( $RH$ )和平均风速( $V$ )6个气象要素,通过相关分析和回归分析来研究各气象要素对  $ET_0$  的影响,分析结果见表3。

从各站  $ET_0$  和气象要素的相关系数来看,  $ET_0$  与日照时数、平均气温、最高气温、最低气温和平均风速呈正相关关系,而与平均气压和相对湿度负相关。日照延长、温度升高和风速增加都会导致  $ET_0$  增加,而气压和湿度的上升则会对  $ET_0$  的上升起到负向作用。在各个要素中,除最低气温以外其它要素与  $ET_0$  的相关关系均达到了0.05以上的显著水平。秦岭南北整体按各要素影响大小排序依次为日照时数 > 平均风速 > 最高气温 > 相对湿度 > 平均气温 > 平均气压 > 最低气温。其中,  $ET_0$  与日照时数的相关关系最好,变化范围介于0.507—0.914,均通过了0.01水平的显著性检验。年尺度上,通过  $ET_0$  与各气象因子的相关分析和多元回归分析对比发现,日照时数的变化是影响秦岭南北地区  $ET_0$  变化的主导因素,其贡献率普遍高于60%,因此太阳辐射(日照时数)的减少是造成  $ET_0$  下降即“蒸发悖论”现象的主要原因。但是从季节尺度上看,导致  $ET_0$  下降的主导因子并不相同。春季,风速为主导因子,其次为相对湿度;夏季,日照时数为主导因子,其次为风速和相对湿度;秋季,日照时数仍然为主导因子,风速为次要因子;冬季,日照时数起主要作用,其次为气温。总体上看,各个气象要素对  $ET_0$  的影响程度不同,日照、风速、湿度和气温是主要因素,而气压和最低气温起到的作用相对较小。

表 3 典型站点  $ET_0$  与气象要素的相关系数及主次排序

Table 3 Correlation coefficient and sequence of the main influencing factors between annual  $ET_0$  and each climate factor at the typical stations

站点 Stations	日照时数 Sunshine hours (H)	平均气压 Air pressure (P)	平均气温 Mean temperature(T)	最高气温 Maximum temperature ( $T_{max}$ )	最低气温 Minimum temperature ( $T_{min}$ )	相对湿度 Relative humidity(RH)	平均风速 Wind speed (V)	影响因子排序 Impact factors
安康	0.860**	-0.456**	0.678**	0.732**	0.338*	-0.746**	0.703**	H RH $T_{max}$ V T P $T_{min}$
宝丰	0.834**	-0.450**	0.341*	0.544**	-0.086	-0.775**	0.807**	H V RH $T_{max}$ P T $T_{min}$
房县	0.853**	-0.212	0.569**	0.685**	0.192	-0.559**	0.546**	H $T_{max}$ V T RH P $T_{min}$
佛坪	0.802**	-0.559**	-0.071	0.280*	-0.321*	-0.838**	0.610**	RH H V P $T_{min}$ $T_{max}$ T
汉中	0.721**	-0.403**	0.448**	0.682**	0.034	-0.578**	0.569**	H $T_{max}$ RH V T P $T_{min}$
华山	0.810**	0.479**	0.729**	0.741**	0.635**	-0.786**	0.388**	H RH $T_{max}$ T $T_{min}$ P V
老河口	0.507**	-0.495**	0.555**	0.793**	0.229	-0.661**	0.556**	$T_{max}$ RH V T H P $T_{min}$
卢氏	0.827**	-0.408**	0.522**	0.475**	0.007	-0.417**	0.518**	H T V $T_{max}$ RH P $T_{min}$
栾川	0.699**	-0.254	0.661**	0.677**	0.421**	-0.619**	0.671**	H $T_{max}$ V T RH $T_{min}$ P
略阳	0.863**	-0.426**	0.511**	0.645**	0.177	-0.738**	0.580**	H RH $T_{max}$ V T P $T_{min}$
孟津	0.656**	-0.027	0.480**	0.678**	0.089	-0.617**	0.351*	$T_{max}$ H RH T V $T_{min}$ P
南阳	0.850**	-0.563**	0.347*	0.685**	-0.095	-0.561**	0.705**	H V $T_{max}$ P RH T $T_{min}$
三门峡	0.867**	0.483**	0.278*	0.336*	-0.073	-0.662**	0.671**	H V RH P $T_{max}$ T $T_{min}$
商县	0.806**	-0.273	0.623**	0.582**	0.162	-0.827**	0.673**	RH H V T $T_{max}$ P $T_{min}$
石泉	0.914**	-0.369**	0.642**	0.662**	0.125	-0.726**	0.602**	H RH $T_{max}$ T V P $T_{min}$
天水	0.815**	-0.417**	0.399**	0.589**	0.173	-0.566**	0.579**	H $T_{max}$ V RH P T $T_{min}$
万源	0.846**	-0.434**	0.572**	0.494**	0.462**	-0.745**	0.554**	H RH T V $T_{max}$ $T_{min}$ P
武都	0.766**	-0.402**	0.700**	0.723**	0.626**	-0.694**	0.800**	V H $T_{max}$ T RH $T_{min}$ P
西峡	0.805**	-0.448**	0.668**	0.800**	0.231	-0.713**	0.566**	H $T_{max}$ RH T V P $T_{min}$
枣阳	0.876**	-0.433**	0.066	0.435**	-0.307*	-0.462**	0.657**	H V RH $T_{max}$ P $T_{min}$ T
镇安	0.873**	-0.019	0.397**	0.454**	0.150	-0.531**	0.453**	H RH $T_{max}$ V T $T_{min}$ P
郑州	0.576**	-0.386**	0.001	0.330*	-0.257	-0.331*	0.542**	H V P RH $T_{max}$ $T_{min}$ T
钟祥	0.731**	-0.445**	0.237	0.539**	-0.075	-0.515**	0.523**	H $T_{max}$ V RH P T $T_{min}$

\*\* 0.01 显著水平 0.01 significant level; \* 0.05 显著水平 0.05 significant level

由有上述分析可知,年和季节  $ET_0$  的主要影响因素为日照时数和风速,因此这一部分对这两个要素进行详细分析。据计算,近 52 年秦岭南北 89% 的站点日照时数呈下降趋势,且部分站点达到 0.05 及以上的显著水平。下降站点所占比例排序为巴巫谷地(100%) > 汉水流域(93%) > 秦岭以北(84%) > 秦岭南坡(78%),秦岭以南的广大地区相对于秦岭以北而言下降更明显。季节尺度,按下降站点所占比例排序依次为夏季(98%) > 冬季(94%) > 秋季(77%) > 春季(53%)。另外,研究区整体和各子区日照时数的突变年份均位于 1979 年前后,与 3.1 部分分析得出的  $ET_0$  的突变时间基本一致,也从侧面印证了日照时数为  $ET_0$  主导因素的结论。太阳辐射作为地球上所有生命过程的初级能量来源,深刻影响着大气、水循环以及生态系统。自 20 世纪 50 年代以来,世界大部分地区太阳辐射出

现下降趋势,即全球变化研究热点之一的“全球变暗”现象,到达地表的太阳辐射减少会削减蒸发所需的潜热通量,减缓地表水循环过程,目前这一效应也被广泛用来解释在“全球变暖”的背景下出现的蒸发皿蒸发量和  $ET_0$  的下降趋势。风速方面,各区风速减小速率排序为秦岭南坡 ( $-0.13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ) > 秦岭以北 ( $-0.11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ) > 秦岭南北 ( $-0.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ) > 巴巫谷地 ( $-0.09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ) > 汉水流域 ( $-0.06 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot 10\text{a}^{-1}$ )。减小趋势均达到了 0.001 以上的显著水平,下降的站点所占比例排序为秦岭南坡 (100%) > 秦岭以北 (86%) > 汉水流域 (69%) > 巴巫谷地 (64%)。季节尺度上,风速减小速率排序为冬季 ( $-0.11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ) > 春季 ( $-0.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ) > 秋季 ( $-0.09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ) > 夏季 ( $-0.07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ),下降的站点所占比例排序为冬季 (83%) > 春季 (77%) > 秋季 (76%) > 夏季 (70%)。年和季节尺度风速的突变集中出现在 1969—1974、1978—1981 和 1990—1994 年间,秦岭南北整体于 1981 年突变,这一时间点与  $ET_0$  的突变时间也较为接近。由上述分析可知,秦岭南北  $ET_0$  的变化趋势和“蒸发悖论”的空间分布规律与风速和日照时数并不完全一致,这主要是因为  $ET_0$  变化是包括风速、日照辐射和气温在内的多种气象要素综合作用的结果,而其中某一主导因素的变化又起到了关键性的作用,其它因子则因其与  $ET_0$  关系的紧密程度和其本身变化趋势起到增加或抵消趋势的作用。另外,研究区整体和各子区气温和降水的突变时间也都位于 1993 年,与  $ET_0$  发生转折(非突变)的时间相一致,二者的共同作用也导致  $ET_0$  于 1993 年前后发生转变。

#### 4 结论

(1) 秦岭南北地区年均气温呈两段式变化特点,1993 年是突变点,此前缓慢下降,1994 年起快速升温。1960—1993 年的降温速率和 1994—2011 年的升温速率均表现出由南向北递减的规律,1960—2011 年整体升温速率由北向南递减。

(2) 1979 年和 1993 年是秦岭南北  $ET_0$  变化的转折点,以 1979 和 1993 为分界点  $ET_0$  经历了“升—降—降”的变化阶段。1960—1979 年仅汉水流域和巴巫谷地存在“蒸发悖论”现象,1980—1993、1994—2011 和 1960—2011 年 3 个时段区域整体和各子区均发现了“蒸发悖论”现象,而其他时段则不存在。

(3) 春季和夏季秦岭南北和各子区整体在不同时段均未发现“蒸发悖论”现象,秋季在后 18a 和 52a 整体都存在“蒸发悖论”,冬季在前 34a 和 52a 整体也存在,冬季的悖论现象最为明显。

(4) 1993 年是降水变化的突变点,呈现由减少到增多的转变,近 52a 整体降水表现出不显著的下降趋势。年尺度上,降水与  $ET_0$  变化呈相反趋势的站点占 53%,夏季和秋季分别为 79% 和 45%。

(5) 各要素对  $ET_0$  的影响大小排序为日照时数 > 平均风速 > 最高气温 > 相对湿度 > 平均气温 > 平均气压 > 最低气温。年尺度上,太阳辐射(日照时数)下降引起的潜热通量减少是造成  $ET_0$  下降即“蒸发悖论”现象的主要原因。季节尺度上,除春季  $ET_0$  的主导因素为风速外,其它季节均为太阳辐射(日照时数)。

#### References:

- [1] McVicar T R, Roderick M L, Donohue R J, Li L T, Van Niel T G, Thomas A, Grieser J, Jhajharia D, Himri Y, Mahowald N M, Mescherskaya A V, Kruger A C, Rehman S, Dinpashoh Y. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation. *Journal of Hydrology*, 2012, 416: 182–205.
- [2] Liu Y, Liu H J, Luo Y. Comparison of potential evapotranspiration methods in Beijing area of China, *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(5): 27–32.
- [3] Wang S P, Song L C, Han Y X. Estimation of the potential evapotranspiration in paramos. *Arid Zone Research*, 2009, 26(1): 126–129.
- [4] Zuo D P, Xue Z X, Cheng L, Zhao F F. Assessment on radiation-based methods to estimate potential evapotranspiration. *Arid Land Geography*, 2011, 34(4): 565–574.
- [5] Yin Y H, Wu S H, Chen G, Dai E F. Attribution analyses of potential evapotranspiration changes in China since the 1960s. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 101(1): 19–28.
- [6] Han S J, Xu D, Wang, S L. Decreasing potential evaporation trends in China from 1956 to 2005: Accelerated in regions with significant agricultural influence? *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 154: 44–56.
- [7] Yang H B; Yang D W. Climatic factors influencing changing pan evaporation across China from 1961 to 2001. *Journal of Hydrology*, 2012, 414

- (2): 184-193.
- [ 8 ] Li P F, Sun X M, Zhao X Y. Analysis of precipitation and potential evapotranspiration in arid and semi arid area of China in recent 50 years. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(7): 57-63.
- [ 9 ] Cao W, Shen S H, Duan C F. Temporal-spatial variations of potential evapotranspiration and quantification of the causes in Northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(11): 3394-3403.
- [10] Ma N, Wang H A, Wang P L, Sun Y M, Dong C Y. Temporal and spatial variation characteristics and quantification of the affect factors for reference evapotranspiration in Heihe River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(6): 975-989.
- [11] Wang W G, Shao Q X, Peng S Z, Xing W Q, Yang T, Luo Y F, Yong B, Xu J Z. Reference evapotranspiration change and the causes across the Yellow River Basin during 1957—2008 and their spatial and seasonal differences. *Water Resources Research*, 2012, 48: 27-35.
- [12] Zuo D P, Xu, Z X, Yang, H. Spatiotemporal variations and abrupt changes of potential evapotranspiration and its sensitivity to key meteorological variables in the Wei River basin, China. *Hydrological Processes*, 2011, 26(8): 1149-1160.
- [13] Zhang D, Zhang W C, Xu Q Z. Comparison and modification of evapotranspiration estimation method in upper Hanjiang Basin. *Resources Science*, 2005, 27(1): 97-103.
- [14] Gao G, Xu, C Y, Chen, D L, Singh V P. Spatial and temporal characteristics of actual evapotranspiration over Haihe River basin in China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2012, 26(5): 655-669.
- [15] Li Z, Zheng F L, Liu W Z. Spatiotemporal characteristics of reference evapotranspiration during 1961—2009 and its projected changes during 2011—2099 on the Loess Plateau of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 154: 147-155.
- [16] Liu X M, Zheng H X, Zhang M H, Liu C M. Identification of dominant climate factor for pan evaporation trend in the Tibetan Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(4): 594-608.
- [17] Liang L Q, Li, L J, Liu Q. Spatio-temporal variations of reference crop evapotranspiration and pan evaporation in the West Songnen Plain of China. *Hydrological Sciences*, 2011, 56(7): 1300-1313.
- [18] Han S J, Wang S L, Yang D W. Agricultural influences on evaporation paradox in China. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(10): 1-8.
- [19] Cong Z T, Ni G H, Yang D W, Lei Z D. Evaporation paradox in China. *Advances in Water Science*, 2008, 19(2): 147-152.
- [20] Ma X N, Zhang M J, Wang S J, Ma Qian, Pan S K. Evaporation paradox in the Yellow River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(5): 645-656.
- [21] Wang S W, Luo Y, Zhao Z C. On debates concerning the global warming. *Progress in Natural Science*, 2005, 15(8): 917-922.
- [22] IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment*. New York: Cambridge University Press, 2007: 10.
- [23] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science*, 2002, 298(15): 1410-1411.
- [24] Li Jing, Sun G N, Ren Z Y. Study on mass survey and value evaluation of land-vegetation's primary productivity in Qinba Mountains in Shaanxi Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(12): 2254-2259.
- [25] Jiang C, Wang F, Mu X M, Li R. Effects of climate change on net primary productivity of vegetation in the northern and southern regions of the Qinling Mountains( I ): Temporal and spatial characteristics of climate change in recent 52 a. *Science of Soil and Water Conservation*, 2012, 10(5): 56-63.
- [26] Zhou Q, Bian J J, Zheng J Y. Variation of air temperature and thermal resources in the northern and southern regions of the Qinling Mountains from 1951 to 2009, *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(9): 1211-1218.
- [27] Fu C B, Wang Q. The definition and detection of the abrupt climatic change. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1992, 16(4): 482-493.

#### 参考文献:

- [ 2 ] 李艳, 刘海军, 罗雨. 北京地区潜在蒸散量计算方法的比较研究. *灌溉排水学报*, 2010, 29(5): 27-32.
- [ 3 ] 王素萍, 宋连春, 韩永翔. 高寒区潜在蒸散量的计算方法探讨. *干旱区研究*, 2009, 26(1): 126-129.
- [ 4 ] 左德鹏, 徐宗学, 程磊, 赵芳芳. 基于辐射的潜在蒸散量估算方法适用性分析. *干旱区地理*, 2011, 34(4): 565-574.
- [ 8 ] 李鹏飞, 孙小明, 赵昕奕. 近 50 年中国干旱半干旱地区降水量与潜在蒸散量分析. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(7): 57-63.
- [ 9 ] 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.
- [10] 马宁, 王乃昂, 王鹏龙, 孙彦猛, 董春雨. 黑河流域参考蒸散量的时空变化特征. *自然资源学报*, 2012, 27(6): 975-989.
- [13] 张东, 张万昌, 徐全芝. 汉江上游流域蒸散量计算方法的比较及改进. *资源科学*, 2005, 27(1): 97-103.
- [18] 韩松俊, 王少丽, 杨大文. 农业活动对中国区域“蒸发悖论”规律的影响. *农业工程学报*, 2010, 26(10): 1-8.

- [19] 丛振涛,倪广恒,杨大文,雷志栋. “蒸发悖论”在中国的规律分析. 水科学进展,2008,19(2): 147-152.
- [20] 马雪宁,张明军,王圣杰,马潜,潘淑坤. “蒸发悖论”在黄河流域的探讨. 地理学报,2012,67(5): 645-656.
- [24] 李晶,孙根年,任志远. 陕西秦巴山区植被第一性生产物质量与价值量测评研究. 生态学报,2002,22(12): 2254-2259.
- [25] 蒋冲,王飞,穆兴民,李锐. 气候变化对秦岭南北植被净初级生产力的影响( I )——近 52 年秦岭南北气候时空变化特征分析. 中国水土保持科学,2012,10(5): 56-63.
- [26] 周旗,卞娟娟,郑景云. 秦岭南北 1951—2009 年的气温与热量资源变化. 地理学报,2011,66(9): 1211-1218.
- [27] 符淙斌,王强. 气候突变的定义和检测方法. 大气科学,1992,16(4): 482-493.