

# 1961—2010 年中国参考作物蒸散量变化趋势与时空格局

黄娟<sup>1,4</sup>, 申双和<sup>2</sup>, 李新建<sup>3</sup>, 张文斌<sup>4</sup>

(1. 南京信息工程大学 应用气象学院, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学 气象灾害预警预报与评估协同创新中心, 南京 210044; 3. 新疆维吾尔自治区农业气象台, 乌鲁木齐 830002; 4. 中国气象局 乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002)

**摘 要:**根据甄选的中国 529 个气象台站 1961—2010 年的观测资料,利用联合国粮食及农业组织(FAO)推荐的 Penman-Monteith 模型估算了全国年际参考作物蒸散量,探究了中国 1961—2010 年参考作物蒸散量变化趋势与时空格局。结果表明:(1) 通过对中国参考作物蒸散量的年变化趋势进行分析,发现 1961—2010 年参考作物蒸散量先有下降趋势(1961—1993 年),下降幅度不大,后又有缓慢的回升(1994—2010 年),但总体呈下降趋势;(2) 通过对各站近 50 年参考作物蒸散量平均值的时空分布进行分析,发现中国西北地区 and 西南地区明显大于东北地区和中部腹地;(3) 中国参考作物蒸散量时空分布主要影响因素是风速和气温(气温影响范围广,风速影响程度大),也与中国地形复杂、面积广阔、经纬跨度大、各地气象条件差异导致作物蒸散能力差异有关。

**关键词:**Penman-Monteith 模型; 参考作物蒸散量; 变化趋势; 时空格局

**中图分类号:**S161.4; P311

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2016)05-0240-05

## Research of Variation Trend and Spatial Pattern of Reference Crop Evapotranspiration During the Period from 1961 to 2010 in China

HUANG Juan<sup>1,4</sup>, SHEN Shuanghe<sup>2</sup>, LI Xinjian<sup>3</sup>, ZHANG Wenbin<sup>4</sup>

(1. College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. Xinjiang Agriculture Observatory, Urumqi 830002, China; 4. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

**Abstract:** The annual reference crop evapotranspiration was estimated using Penman-Monteith model recommended by Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) with the observation data from 529 meteorological sites during the period of 1961 to 2010, and the variation trend and spatial pattern of  $ET_0$  were investigated in detail. The results indicated that: (1) through analysis of annual variation tendency for the reference crop evapotranspiration, it was found that during the period from 1961 to 2010, reference crop evapotranspiration declined (1961—1993), did not drop, and then slowly recovered (1994—2010); (2) through the reference crop evapotranspiration in recent 50 years, the average value on the temporal and spatial distribution analysis, it was found that the values in northwest China and southwest China were significantly greater than those of northeast area and the central hinterland; (3) the main factors affecting the spatial and temporal reference crop evapotranspiration were the wind speed and temperature distribution in China (Temperature had a wide range of influence, wind speed had a great effect on  $ET_0$ ). And meanwhile, China's complex terrain, the vast area, latitude and longitude span, all weather conditions caused the differences in different crop evapotranspiration capacity.

**Keywords:** Penman-Monteith model; reference crop evapotranspiration; change trend; temporal and spatial distribution

收稿日期: 2015-09-14

修回日期: 2015-09-28

资助项目: 公益性行业(气象)科研专项“干旱气象科学研究——我国北方干旱致灾过程及机理”(GYHY201506001); 国家重大科学研究计划“干旱半干旱区生态系统和水资源脆弱性评估及风险预估”(2012CB956204)

第一作者: 黄娟(1990—), 女, 新疆塔城人, 硕士研究生, 研究方向为农业气象研究。E-mail: 1321265319@qq.com

通信作者: 申双和(1957—), 男, 江苏姜堰人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业气象研究。E-mail: yqzhr@nuist.edu.cn

蒸散即植物叶面蒸发(蒸腾)和裸间土壤蒸发之和。蒸散是植物失水的主要方式。联合国粮食及农业组织(FAO)将参考作物蒸散定义为“假设高度为0.12 m,冠层阻力为7.0 m/s,反照率为0.23的参考冠层的蒸散,即生长旺盛,长势一致,完全覆盖地面且水分供应充足的开阔绿色草地的蒸散”<sup>[1]</sup>。参考作物蒸散( $ET_0$ )是自然界水循环中的一个重要组成因素,其数值大小直接影响到作物产量的估算、农业用水的安排、各地灌溉制度的制定和选种育种的区域划分。通过分析不同年份不同地区的参考作物蒸散量时空变化趋势,可以更好地服务于农业、牧业、林业等各个行业。

国际上对自然蒸发有文献报道的研究已有300多年的历史。Dalton等<sup>[2]</sup>提出计算蒸发速率的公式:水面蒸发速率与蒸发面的饱和差成正比。Wilm<sup>[3]</sup>和Penman<sup>[4]</sup>等先后提出潜在蒸散的概念及相应的计算公式。Penman公式为计算湿润下垫面潜在蒸散的主要方法。Monteith等<sup>[5]</sup>通过引入表面阻力的概念,推导出Penman-Monteith公式,所以该公式又被称为大叶模型。1998年FAO出版计算作物蒸散的指南<sup>[6]</sup>。

国内蒸散研究工作始于20世纪50年代,朱岗昆等<sup>[7]</sup>应用Penman方法计算了自然状况下中国蒸发量的分布、季节变化等。陶祖文等<sup>[8]</sup>提出了用气候资料计算旬、月可能蒸散和土壤水分不足情况下蒸散量的方法。自80年代以来,王健等<sup>[9]</sup>通过对不同作物农田蒸散试验观测研究,建立了适用于我国的农田蒸发量测定方法和计算模式。辛晓洲<sup>[10]</sup>提出了以热红外遥感信息为主的遥感地表水分蒸发模型。刘钰<sup>[11]</sup>对FAO推荐的作物系数计算方法进行了验证。

黄会平等<sup>[12]</sup>根据1957—2012年全国608个气象站的逐日气象资料利用Penman-Monteith公式计算了作物的潜在蒸散量,采用主成分分析方法对10大水资源一级分区潜在蒸散量的年代际变化进行了分析,在ArcGIS中将4个主成分分别表示在空间分布图上。但是,阎慈琳<sup>[13]</sup>研究证明采用主成分分析方法:(1)首先应保证所提取的前几个主成分的累计贡献率达到了一个较高的水平,即保证相关的气象因素对该地区潜在蒸散量有较大影响。这一条件并不是所有地区都满足,且有地域差异。(2)主成分的解释其含义一般多少带有模糊性,不像原始变量的含义那么清楚、确切,因此采用这一方法,只能表示某一站点某一气象因素有无影响,及这一气象因素在这一站点相对于全国而言的影响程度,而不能准确表示对于这一站点某一气象因素的影响程度是多少。(3)这一方法是将一维数据做出的平面结果平铺到GIS中,

具有空间局限性。

综合国内外关于我国参考作物蒸散量分布时空变化的研究,由于数据不完整<sup>[14]</sup>、区域划分不明确<sup>[15]</sup>、统计量大、计算繁杂等原因,大部分研究只反映了局部地区的参考作物蒸散量时空变化<sup>[16]</sup>,或只反映出近几年的变化趋势<sup>[17]</sup>,缺乏完整的全国范围内时空变化趋势,缺乏不同地区参考作物蒸散量的时空演变趋势对比,缺乏长期变化趋势分析<sup>[18]</sup>。虽然黄会平等<sup>[12]</sup>的文章数据充足,空间范围大,但是并不能准确表示某一站点某一气象因素的影响程度是多少。此外,一维数据具有空间局限性,而采用空间叠加能解决这一问题。本文将分析全国529个站点1961—2010年的数据,以便从时间的长期性和站点数据的完整性两方面弥补之前研究的不足,然后对每一个站点的影响因素做相关性分析,以便能明确、清晰地表示出每一个站点每一个气象因素的影响程度是多少,继而采用空间叠加的方法,以便表示出全国范围内每个站点潜在蒸散的主导影响因子,从而对全国蒸散量演变形势与空间格局有更全面准确的了解。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 材料来源

分析所需的数据主要有如下两个方面:(1)529个气象站1961—2010年逐日基本气象要素资料,包括日平均气温( $^{\circ}\text{C}$ )、最高最低气温( $^{\circ}\text{C}$ )、日照时数(h)、平均风速(m/s)等;(2)1:400万的中国行政边界图层(由国家基础地理信息系统网站提供)。所选站点的分布见图1。

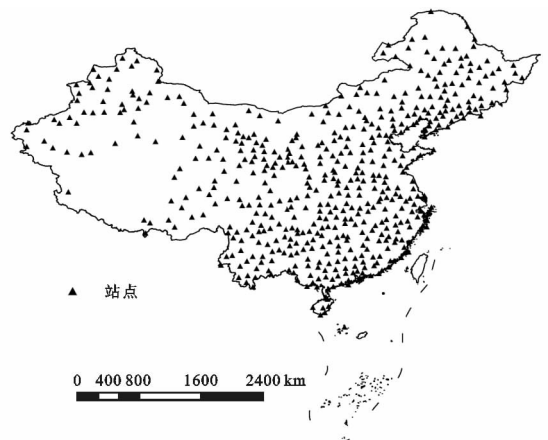


图1 中国气象站点分布

### 1.2 研究方法

1.2.1 FAO Penman-Monteith模型 参考作物蒸散量的计算方法多种多样。其中Penman-Monteith公式是基于能量平衡和水汽扩散理论的算法,在充分了解植被生理特性的基础上,结合空气动力学参数的变化,计算出某一地区的参考作物蒸散量。由于理论

依据充分,应用性广泛,计算误差小,因此,该方法于 1998 年被联合国粮农组织(FAO)推荐为计算参考作物蒸散量的标准方法,直至今日仍然在各个地区得到广泛的应用。本文也利用该公式进行全国参考作物蒸散量的计算和分析。

$$ET_0(\text{FAO}-98)=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+V\frac{900}{T+273}U_2(e_s-e_a)}{\Delta+V(1+0.34U_2)}$$

(1)

式中:  $ET_0(\text{FAO}-98)$  为参考作物蒸散量( $\text{mm}/\text{d}$ );  $R_n$  为地表净辐射 [ $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ];  $G$  为土壤热通量 [ $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ] (在逐日计算式中,  $G \approx 0$ );  $T$  为 2 m 高度处平均气温( $^{\circ}\text{C}$ );  $U_2$  为 2 m 高度处风速( $\text{m}/\text{s}$ );  $e_s$  为饱和水汽压( $\text{kPa}$ );  $e_a$  为实际水汽压( $\text{kPa}$ );  $\Delta$  为饱和水汽压曲线斜率( $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$ );  $V$  为干湿表常数( $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$ )。其中:

$$R_n=(1-T)R_s-e\left(\frac{T_{\max}^4-T_{\min}^4}{2}\right)(0.34-0.14\sqrt{e_a})(1.35\frac{R_s}{R_{\text{so}}}-0.35)$$

(2)

$$R_s=(a_s+b_s\frac{n}{N})R_a$$

(3)

$$R_{\text{so}}=(0.75+2z\times10^{-5})R_a$$

(4)

式中:  $T$  为反射率(无量纲)(本文取  $T=0.23$ );  $R_s$  为地表短波辐射 [ $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ];  $e$  为斯蒂芬—波尔兹

曼常数  $4.903\times10^{-9}[\text{MJ}/(\text{K}^4 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d})]$ ;  $T_{\max}$  为日最高气温( $\text{K}$ );  $T_{\min}$  为日最低气温( $\text{K}$ );  $R_{\text{so}}$  为晴天地表短波辐射 [ $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ];  $a_s$  为阴天( $n=0$ )地表短波辐射与大气层外太阳辐射的比例系数;  $(a_s+b_s)$  为晴天( $n=N$ )地表短波辐射与大气层外太阳辐射的比例系数;  $n$  为实际日照时数( $\text{h}$ );  $N$  为最大可能日照时数( $\text{h}$ );  $R_a$  为大气层外太阳辐射 [ $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ];  $z$  为海拔高度( $\text{m}$ )。本文取  $a_s=0.25$ ,  $a_s+b_s=0.75$ 。

1.2.2 气候倾向率估算

$$r=\frac{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})(i-\bar{i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^n(i-\bar{i})^2}}$$

(5)

式中:  $n$  为年数;  $x_i$  为第  $i$  年要素值;  $\bar{x}$  为样本均值;  $\bar{i}=(n+1)/2$ 。当  $r$  值为正/负时,表示该要素在所计算的  $n$  年内有线性增/减的趋势。

1.2.3 要素相关性判别标准 在计算该序列的相关系数  $r$  的值时,在常规显著性水平  $\theta$  下,  $\max\{|r|_{\theta}\}<0.6$  ( $r_{0.01,18}=0.5614$  小于 0.6),即此时所有阈值中的最大值均小于 0.6。因此,当相关系数满足  $r_{\beta}\leq|r|<0.6$  (且序列长度大于最小值 20 时),序列与时序  $t$  的相关性要高于上面已划分的等级,本文将其趋势变异程度划为低度相关,以此类推得到表 1。

表 1 相关系数分级<sup>[19]</sup>

相关性系数	0	0.01~0.3	0.31~0.5	0.51~0.8	0.81~0.99	1.0
相关性分级	不相关	无相关	低度相关	显著相关	高度相关	完全相关

1.2.4 参考作物蒸散量资料插补方法 在所选 529 个站点中,并不是所有站点的资料都具有完整性,所以要和数据缺失年份的参考作物蒸散量进行插补。本文所需数据为数值型,经过比较之后,采用均值替换法。

2 结果与分析

2.1 全国年平均参考作物蒸散量时间变化趋势

1961—2010 年我国参考作物蒸散量(图 2)总体呈下降趋势,平均每年下降 0.279 7 mm,下降幅度较小。然而不同年份的变化情况有所不同,总体来看,1961—1968 年呈上升趋势,1969—1991 年总体呈下降趋势,下降幅度较大,且均处于趋势线以下,1992—2010 年呈上升趋势,且上升幅度较大。参考作物年蒸散量最大值出现在 1978 年,最大值为 1 007.13 mm,最小值出现在 1993 年,数值为 926.06 mm。

2.2 年参考作物蒸散量空间分布与时空格局

我国 1961—2010 年多年平均参考作物蒸散量(附图 4)总体分布为西部多,东部少。其中,我国西北地区塔里木盆地蒸散量较大,吐鲁番盆地达到最大值。海南岛及雷州半岛蒸散量达到最小值。1961—

2010 年我国年参考作物蒸散量(附图 5)呈西南部增加,西北部和东南大部减少。

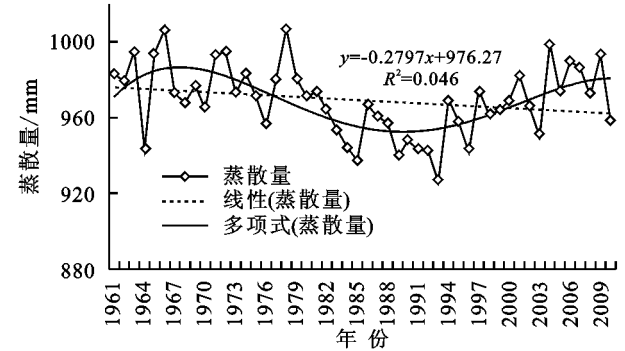


图 2 1961—2010 年年平均参考作物蒸散量变化趋势

2.3 年参考作物蒸散量年代际变化

由附图 6 可知,与 1960s 相比,1970s 我国大部分地区(青藏高原东部、内蒙古高原中部和西部、东北平原北部)蒸散量呈增加趋势,增加数值为 27~49 mm;另外,准噶尔盆地、长江中下游地区以南、华北平原北部等地蒸散量均减少 18~42 mm。由附图 7A 可知,与 1970s 相比,1980s 我国大部分地区蒸散量有减少趋势,减少数值为东部(长江中下游南部地区、东北平原大部)地区 0~17 mm,西部(塔里木盆

地东部)地区 39~49 mm。由附图 7B 可知,与 1980s 相比,1990s 我国大部分地区蒸散量有减少趋势,减少量为 0~20 mm;另外,中部腹地、东北北部有增加趋势,增加量为 22~37 mm。由附图 7C 可知,与 1990s 相比,2000s 我国大部分地区蒸散量有增加趋势,增加量为 1~32 mm。

## 2.4 参考作物蒸散量时空变化原因分析

为了分析出可能对参考作物蒸散量变化有影响的因素,对 1961—2010 年全国的多年平均参考作物蒸散量、气温、相对湿度、风速、日照时数做出了相应的相关系数等级分析,对比之后取每个站点的最大值(主要影响因素),判断其影响程度的大小。

气温对我国参考作物蒸散量的影响程度空间分布

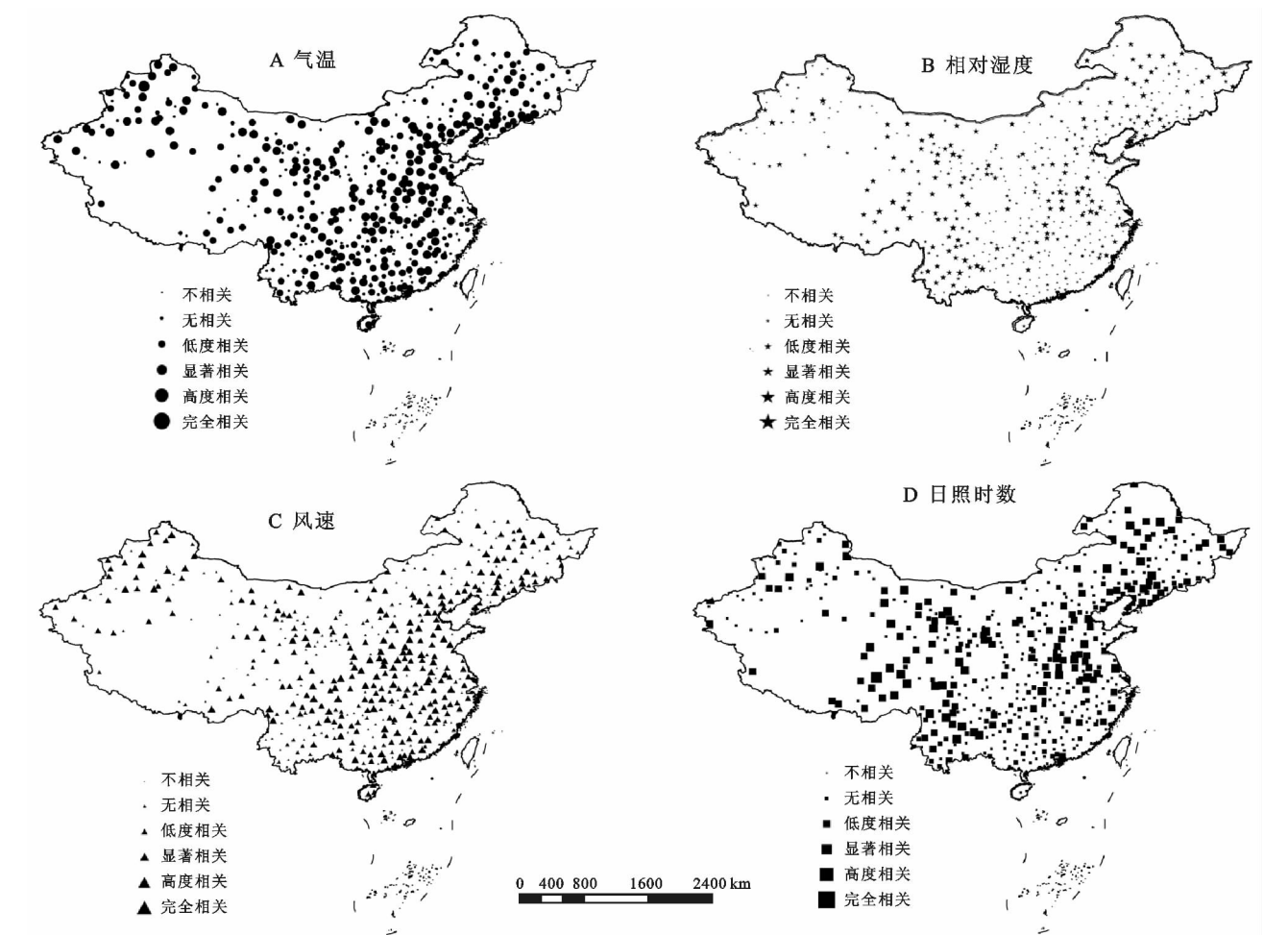


图 3 1961—2010 年中国  $ET_0$  与气温、相对湿度、风速、日照时数的相关性

1961—2010 年我国参考作物蒸散量的主要影响因素为(图 4):就全国范围来看,主要受气温和风速的影响,这二者相比,气温影响范围更广,风速影响程度更大。东北北部主要受日照影响,东北南部主要受气温和风速影响,其中气温为主导因素;辽东半岛主要受相对湿度影响;华北地区主要受气温和风速影响;长江中下游及其以南的地区主要受风速和气温影响,其中风速为主导因素;云贵高原主要受相对湿度

如下(图 3A):东北平原东部、云贵高原低度相关;东北平原西部、东南丘陵大部、青藏高原东部、海南岛显著相关;准噶尔盆地北部、华北平原局部高度相关。相对湿度对我国参考作物蒸散量的影响程度空间分布如下(图 3B):长江中下游沿江地区、东南丘陵大部、黄土高原大部无相关关系;云贵高原大部、青藏高原东部显著相关。风速对我国参考作物蒸散量的影响程度空间分布如下(图 3C):黄土高原北部、云贵高原东部、东南丘陵局部低度相关;其他大部分地区为显著相关。日照时数对我国参考作物蒸散量的影响程度空间分布如下(图 3D):东北平原南部、长江中下游局部、准噶尔盆地西北部低度相关;东北平原西北部、四川盆地、青藏高原东部的局部地区显著相关;其他大部分地区无相关关系。

影响;黄土高原西部主要受日照影响;西北地区主要受气温影响。

## 3 结论

1961—2010 年,我国年参考作物蒸散量总体呈下降趋势,平均每年下降 0.279 7 mm,下降幅度较小。年平均参考作物蒸散量分布西部多,东部少。具体分布如下:我国西北地区塔里木盆地蒸散量较大,

吐鲁番盆地达到最大值,内蒙古高原西部及中部蒸散量达到次大值。东北地区蒸散量较小,尤其东北平原以北(包括小兴安岭及大兴安岭东北部)的地区数值更小。海南岛及雷州半岛蒸散量达到最小值。

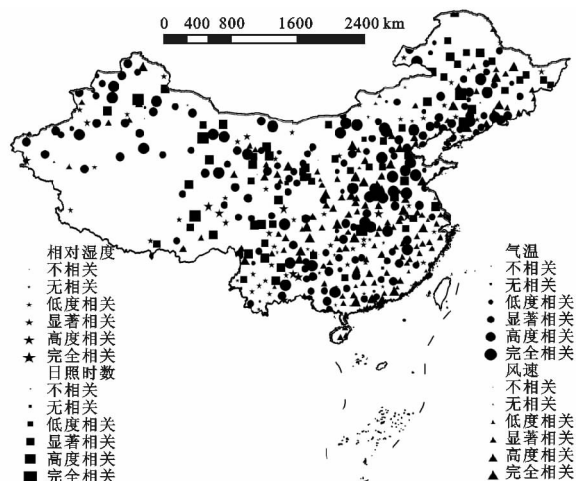


图 4 1961—2010 年中国  $ET_0$  的主要影响因素分布

对参考作物蒸散量的时空变化格局分析发现,1961—2010 年,我国中部地区(包括青藏高原、吐鲁番盆地、内蒙古高原东部、西川盆地大部、秦岭淮河地区、大兴安岭以西的地区)的参考作物蒸散量有明显的增加趋势,其他地区则有不同程度的减小。

另外,近 50 年来,全国范围内的日照时数显著减小,受此影响净辐射亦大幅度减小,因此,作为蒸散能量来源的辐射能的减少,一方面导致蒸散能力减弱,另一方面导致大气热力层结较稳定,湍流减弱,使蒸散量减少;近 50 年来,相对湿度减小,因而空气较干燥,最高温度有较大幅度的上升,这就使得蒸散量有回升的趋势。

本文对我国参考作物蒸散量逐年的变化趋势和空间分布做出了详细分析,但仍有不足之处。(1) 本文只是在 FAO 定义的 Penman-Monteith 模型基础上做了相关分析,日后可以结合其他模型作对比分析;(2) 本文只是根据年际变化来划分时间区域,日后可根据作物的不同生育期来划分时间区域;(3) 还可通过对比不同作物的蒸散量作为参照,通过对比分析得出结论;(4) 近几年遥感、GIS 等空间模拟网络技术快速发展,遥感对空间的模拟更精确,GIS 对数据的插值处理更合理,日后可结合这些技术作相关分析。

#### 参考文献:

[1] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. FAO Irrigation and Drainage Paper 56: Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements [M]. Rome: FAO,1998.

[2] Dalton A J. Electron micrography of epithelial cells of the gastro-intestinal tract and pancreas[J]. American Journal of Anatomy,1951,89(1):109-133.

[3] Wilm H G, Thornthwaite C W, Colman E A, et al. Report of the committee on transpiration and evaporation, 1943-44 [J]. Eos, Transactions American Geophysical Union,1944,25(5):683-693.

[4] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass[M]// Proceedings of the Royal Society of London A. the Royal Society Publishing,1948.

[5] Monteith J L. Evaporation and environment. [J]. Symposia of the Society for Experimental Biology,1965,19(19):205-34.

[6] FAO. World reference base for soil resources [R]. Rome: FAO,1998.

[7] 朱岗昆,杨勿章. 气象记录在经济建设中的应用(II):中国各地蒸发量的初步研究[J]. 气象学报,1955,26(1/2):1-28.

[8] 陶祖文,裴步祥. 农田蒸散和土壤水分变化的计算方法[J]. 气象学报,1979,37(4):79-87.

[9] 王健,蔡焕杰,刘红英. 利用 Penman-Monteith 法和蒸发皿法计算农田蒸散量的研究[J]. 干旱地区农业研究,2002,20(4):67-71.

[10] 辛晓洲. 用定量遥感方法计算地表蒸散[D]. 北京:中国科学院研究生院(遥感应用研究所),2003.

[11] 刘钰. 气象数据缺测条件下参照腾发量的计算方法[J]. 水利学报,2001,32(3):11-17.

[12] 黄会平,曹明明,宋进喜,等. 1957—2012 年中国参考作物蒸散量时空变化及其影响因子分析[J]. 自然资源学报,2015,30(2):315-326.

[13] 阎慈琳. 关于用主成分分析做综合评价的若干问题[J]. 数理统计与管理,1998,17(2):22-25.

[14] 杜加强,舒俭民,刘成程,等. 黄河上游参考作物蒸散量变化特征及其对气候变化的响应[J]. 农业工程学报,2012,28(12):92-100.

[15] 李志. 黄土高原 1961—2009 年参考作物蒸散量的时空变异[J]. 生态学报,2012,32(13):4139-4145.

[16] 于东平,张鑫,何毅,等. 青海省东部高原农业区参考作物蒸散量的时空变化[J]. 农业工程学报,2012,28(2):66-71.

[17] 刘勤,严昌荣,梅旭荣,等. 西北旱区参考作物蒸散量空间格局演变特征分析[J]. 中国农业气象,2012,33(1):48-53.

[18] 刘广东,李艳,刘海军,等. 山西地区近 55 年参考作物蒸散量的变化特征及其主要影响因素分析[J]. 灌溉排水学报,2012,31(5):26-30.

[19] 谢平,唐亚松,李彬彬,等. 基于相关系数的水文趋势变异分级方法[J]. 应用基础与工程科学学报,2014,22(6):1089-1097.