

文章编号:1672-3317(2012)01-0010-05

# 近50年新疆参考作物蒸发蒸腾量的时空演变分析\*

石鑫<sup>1,2,3</sup>, 吴普特<sup>1,2,3,4</sup>, 王玉宝<sup>1,2,3</sup>, 赵西宁<sup>1,2,3,4</sup>, 赵建民<sup>2,3,4</sup>

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;  
2. 中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100; 3. 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心,  
陕西 杨凌 712100; 4. 中国科学院/水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 根据新疆地区53个气象站1960—2009年50年的气象资料,采用FAO推荐的Penman-Monteith公式计算了各站点逐月参考作物蒸发蒸腾量( $ET_0$ )。采用GIS反距离插值方法得到新疆参考作物蒸发蒸腾量分布图,将各站点 $ET_0$ 变化趋势进行聚类分析,通过Morlet小波变换、倾向率等方法探讨了时空变化特征及影响因素。结果表明,近50年新疆平均 $ET_0$ 呈显著减小趋势,不同区域 $ET_0$ 的年际变化趋势差异显著;在25~30年时间尺度上,全区平均 $ET_0$ 的周期振荡较为明显,经历了“多→少→多”3个循环交替过程; $ET_0$ 年内分布均呈单峰状,且各站之间峰值相差很大;多年平均 $ET_0$ 空间分布总体上由西北向东南增加,且与地形起伏有高度的一致性。新疆大部分地区 $ET_0$ 变化率为负值,与“蒸发悖论”规律相符,其主要原因是风速降低对 $ET_0$ 的影响超过了温度上升,但1992年以来,由于温度持续升高, $ET_0$ 出现了回升态势。

**关键词:** 参考作物蒸发蒸腾量; 时空变化; 新疆地区; Penman-Monteith公式

中图分类号: S161 文献标志码: A

石鑫,吴普特,王玉宝,等. 近50年新疆参考作物蒸发蒸腾量的时空演变分析[J]. 灌溉排水学报,2012,31(1):10-14.

## 1 背景与方法

关于我国 $ET_0$ 的时间序列变化的研究结论认为,近几十年来,我国大部分地区蒸发量呈减小趋势,出现了所谓的“蒸发悖论”<sup>[2]</sup>,主要集中在西北和东南地区<sup>[3-4]</sup>;部分地区的蒸发量呈增大趋势,主要集中在黄河上游、黄土高原以及东北地区<sup>[5-7]</sup>。影响蒸发量变化的气象因子主要有:温度、日照时数、风速、辐射强度、降雨等,且不同地域蒸发量变化的规律及影响因子不尽相同。干旱地区、半干旱地区和半湿润地区的参考作物蒸发蒸腾量呈现减少趋势,湿润地区则相对稳定<sup>[8]</sup>。

目前,对新疆气候转型的研究主要集中在气温、降水与径流方面,在蒸发量变化方面研究较少,特别缺乏与农业生产与农业用水管理关系密切的 $ET_0$ 的时空演变研究,已有研究<sup>[9]</sup>仅是分析了蒸发皿水面蒸发量的变化,蒸发皿蒸发量不能直接用于农业用水管理,且站点较少,缺乏详细、精确的空间变化分析,难以反映新疆的整体情况。

根据国家气象局公布的新疆自治区53个气象站点1960—2009年50年的气象数据,采用联合国粮农组织推荐的Penman-Monteith公式计算新疆各站逐月、逐年及全区平均 $ET_0$ 。采用基本数理统计和Morlet小波变换等方法分析了 $ET_0$ 的变化趋势和周期性。使用GIS反距离插值方法得到新疆 $ET_0$ 多年均值及变化率等值线图,探讨了 $ET_0$ 时空分布的变化规律,并通过K-M检验分析了相关影响因素及其显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 $ET_0$ 时间变化

1)  $ET_0$  年际变化。由于新疆面积广阔,地形复杂,全区平均 $ET_0$ 难以反映这种区域差异。为此,对 $ET_0$

\* 收稿日期: 2011-08-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(50809055); 国家科技支撑计划项目(2011BAD29B09); 教育部引智项目(111-2-16); 西北农林科技大学青年学术骨干项目

作者简介: 石鑫(1985-), 女, 山西朔州人。硕士研究生, 主要从事农业水土资源管理。

通讯作者: 吴普特(1963-), 男, 陕西武功人。研究员, 博士生导师, 主要从事水土保持与节水农业方面的研究。

年际变化趋势进行聚类分析,分析结果为,组一,包含站点有七角井和乌恰;地理分布为天山山区。组二,包含站点有吐尔尕特、阿克苏、巴音布鲁克、石河子、红柳河、巴里塘、皮山、和田、民丰、北塔山、塔城、塔什库尔干、富蕴;地理分布为天山山麓、帕米尔及塔里木盆地西南边缘、阿勒泰山区东部、塔城。组三,包含站点有哈巴河、吉木乃、福海、阿勒泰、伊宁、昭苏、乌鲁木齐、巴仑台、达坂城、青河、伊吾、温泉、库米什、蔡家湖、拜城、轮台、喀什、托里、巴楚;地理分布为准噶尔盆地中部、阿勒泰山区西部、伊犁、塔里木盆地西南部。组四,包含站点有乌苏、奇台、克拉玛依、焉耆、库车、库尔勒、阿合奇、铁干里克、若羌、莎车、阿拉山口、于田、和布克赛尔;地理分布为塔里木盆地中东部、准噶尔盆地西部。组五,包含站点有且末、哈密、吐鲁番;地理分布为东疆与塔里木东南部。

图1为与聚类分析相对应的各区域平均 $ET_0$ 的年际变化曲线及趋势线。1960—2009年全区平均 $ET_0$ 为1217 mm,由图1(a)可知,近50年内全区平均 $ET_0$ 在(1200±110)mm的范围内波动;1965年达到最大值,为1308 mm/a;在1992年达到最小值,为1105 mm/a。全区平均 $ET_0$ 呈显著减小趋势,Mann-Kendall检验值 $z=-2.8775 < -1.96$ ,趋势线斜率为-1.9 mm/a。

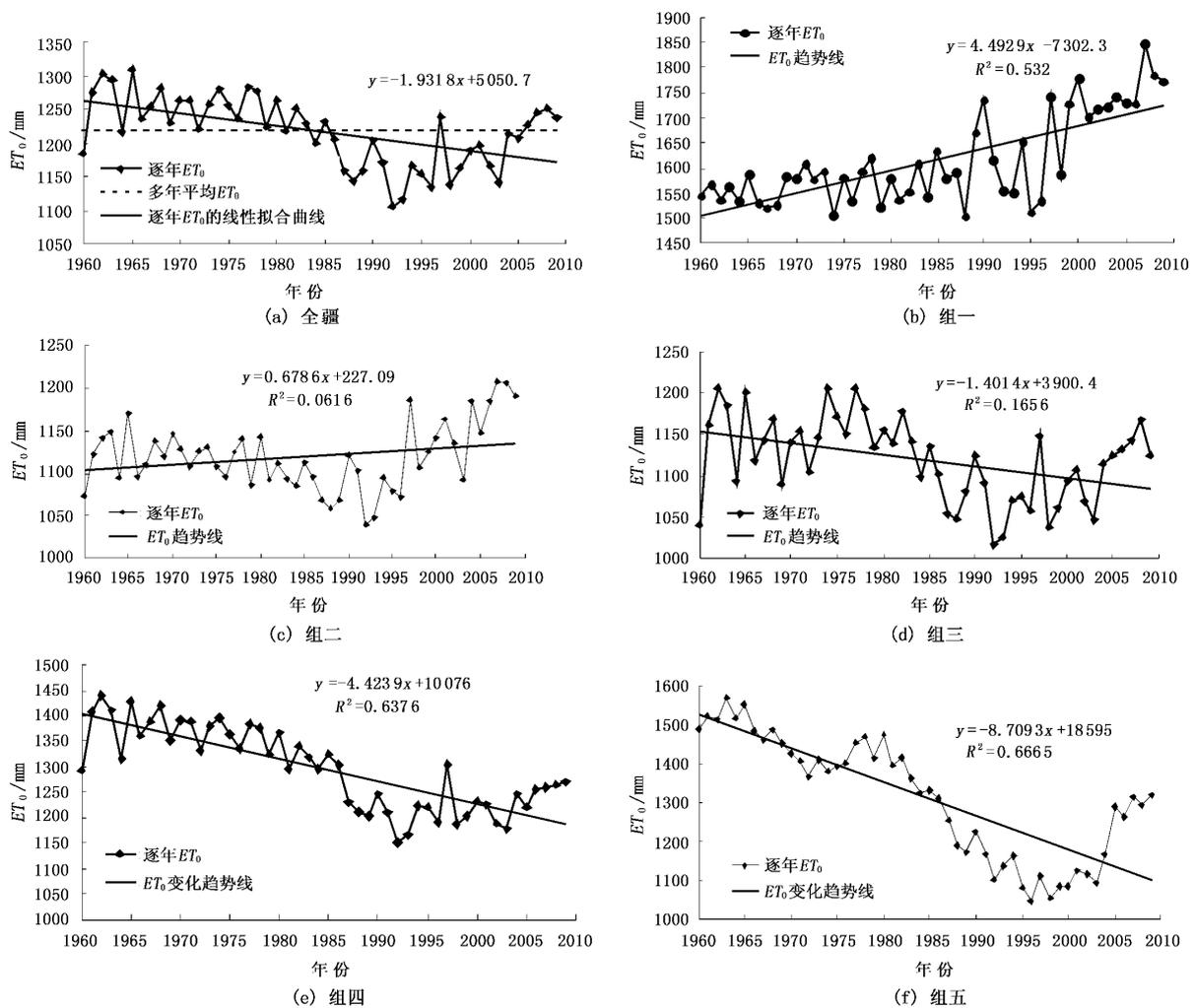


图1 不同区域 $ET_0$ 年际变化趋势

组一的逐年 $ET_0$ 呈显著增加趋势,Mann-Kendall检验值 $z=4.7847 > 1.96$ ,趋势线斜率为4.5 mm/a(图1(b));组二逐年 $ET_0$ 呈增加趋势(不显著), $z=0$ 趋势线斜率为0.67 mm/a(图1(c));组三逐年 $ET_0$ 年际变化呈下降趋势(不显著),趋势线倾向率为-1.4 mm/a(图1(d))。组四逐年 $ET_0$ 呈显著下降趋势, $z=-5.755 < -1.96$ ,趋势线倾向率为-4.4 mm/a(图1(e))。组五 $ET_0$ 呈显著下降趋势, $z=-6.625 < -1.96$ ,趋势线倾向率为-8.7 mm/a(图1(f))。

2)  $ET_0$ 年内变化。由53个气象站各站不同时期多年月平均 $ET_0$ 在年内的变化可知(见图2,给出6个代表站点),新疆各地区 $ET_0$ 年内变化较大,均呈单峰状分布,基本上从1月份的0.1~0.8 mm/d逐渐上升到6—7月份的3.9~7.2 mm/d,然后又逐渐下降到12月份的0.2~1.0 mm/d,且各站之间峰值相差很大。

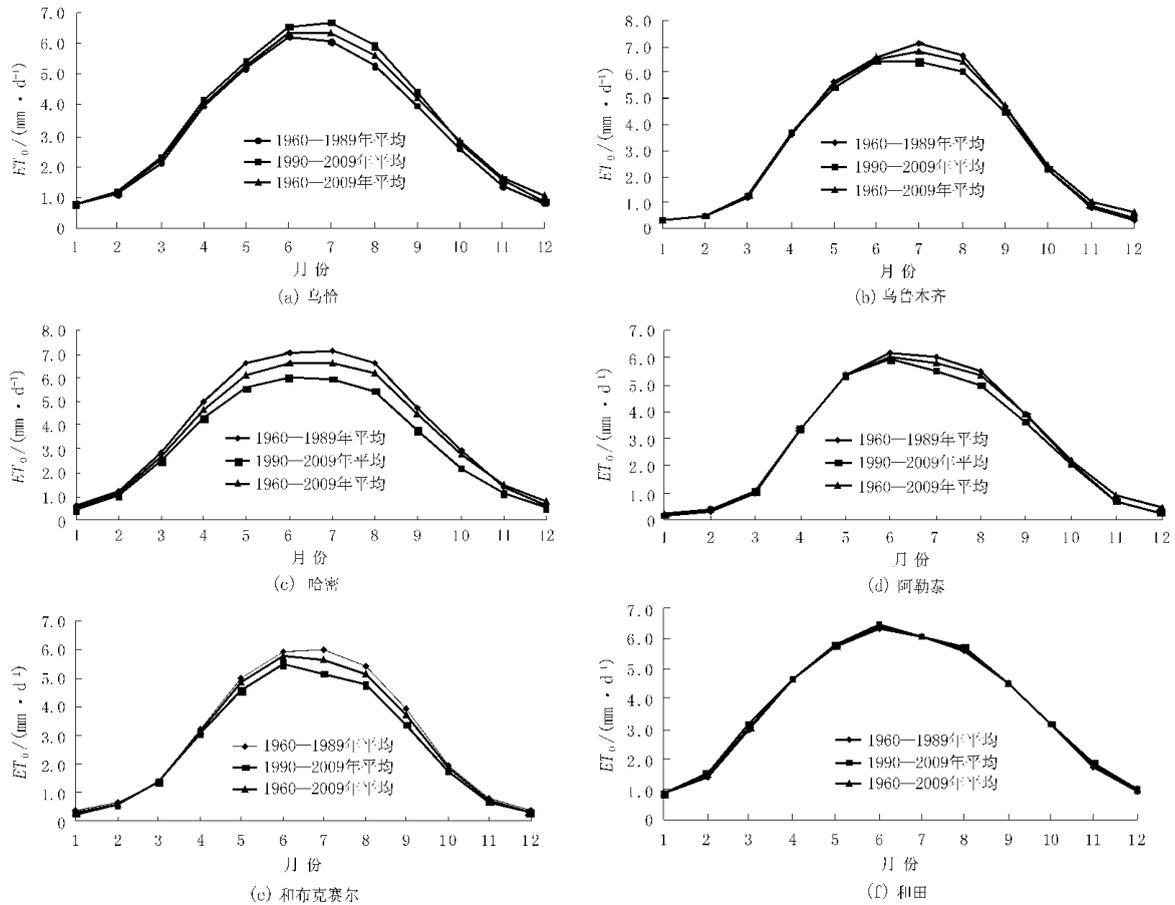


图2 不同地区不同时期多年月平均  $ET_0$  的年内变化

1990年后  $ET_0$  年内分布与1990年前比较,乌鲁木齐、哈密、阿勒泰、和布克赛尔4站的  $ET_0$  峰值有一定程度减少,其中哈密站  $ET_0$  峰值由1990年之前的7.11 mm/d减小到1990年后的5.94 mm/d,乌鲁木齐站  $ET_0$  峰值由1990年的7.12 mm/d减小到1990年后的6.4 mm/d,阿勒泰站  $ET_0$  峰值由1990年之前的6.15 mm/d减小到1990年后的5.92 mm/d,和布克赛尔站  $ET_0$  峰值由1990年之前的5.95 mm/d减小到1990年后的5.49 mm/d;此外,乌恰站点的  $ET_0$  峰值有一定程度增加,由1990年之前的6.04 mm/d增加到1990年后的6.66 mm/d,而和田的  $ET_0$  峰值则无明显变化。除哈密站1—5月的  $ET_0$  值有明显减少外,其余各站1—5月份的  $ET_0$  值均无明显变化。除乌恰站9—12月的  $ET_0$  值有增加外,其余各站5—12月的  $ET_0$  值均有一定程度减小。

3) 周期特征。图3为新疆自治区逐年平均  $ET_0$  的 Morlet 小波变换图。从图3可以看出,不同时间尺度所对应的新疆自治区平均  $ET_0$  在结构上差别很大,在25~35年时间尺度上新疆自治区平均  $ET_0$  的周期振荡非常明显,期间经历了“多→少→多”3个循环交替过程。1977—1994年  $ET_0$  较低,1975年之前、1995年之后的  $ET_0$  较高,直到2009年曲线未完全闭合,说明在2009年之后的一段时间内  $ET_0$  仍将偏低。

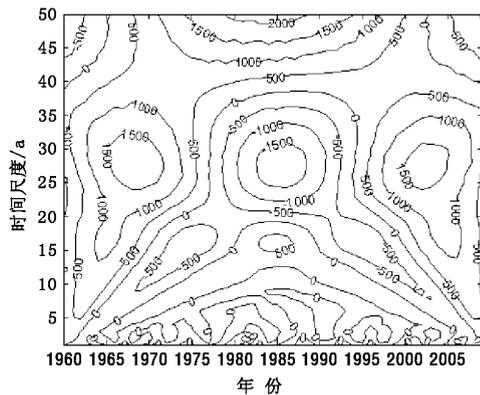


图3 新疆自治区平均  $ET_0$  的 Morlet 小波变换(单位: mm)

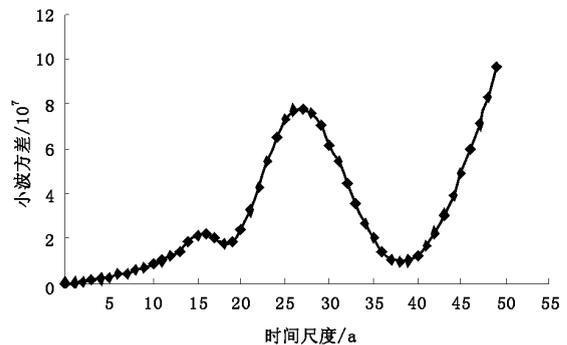


图4 新疆自治区平均  $ET_0$  的 Morlet 小波变换方差

图 4 为小波变换的方差图。从图 4 可以看出,小波方差在时间尺度为 27 年的时候取得峰值,说明新疆维吾尔自治区平均  $ET_0$  变化的主周期为 27 年。

## 2.2 $ET_0$ 空间变化

1)  $ET_0$  空间分布特征。为了揭示新疆地区近 50 年  $ET_0$  的空间分布特征,根据新疆维吾尔自治区各气象站的 1960—2009 年  $ET_0$  的平均值,利用 GIS 软件 Arc/Info 对各个站点的多年平均值进行反距离插值,获得新疆地区多年平均  $ET_0$  空间分布情况。

图 5 为  $ET_0$  多年平均值的分布图。从图 5 可以看出,年均  $ET_0$  空间分布的总体特征为:由西北向东南增加。其中东疆哈密地区大部、吐鲁番地区全部、巴音郭楞蒙古自治州东南部以及北疆塔城地区中部多年平均  $ET_0$  值较大,在 1 200~1 900 mm 之间,最大值出现在七角井站,超过了 1 900 mm;阿勒泰地区、伊宁地区、克孜勒苏柯尔克孜自治州多年平均  $ET_0$  值较小,在 700~1 000 mm 之间,最小值出现在吐尔尕特,为 786 mm,最大值与最小值之比约为 2.4。

年均  $ET_0$  值与地形起伏具有一致性。吐鲁番盆地、准噶尔盆地以及塔里木盆地东部地区平均海拔较低,年均温度较高,在 6~13 °C 之间,为蒸散活动提供了较为充足的能源,是多年平均  $ET_0$  较大的主要原因;与盆地地形相反,阿尔泰山脉、天山山脉以及帕米尔高原海拔较高,年平均温度较低,在 -2~4 °C 之间,由于热量不足,地表水汽运移受限,蒸散活动较弱,年均  $ET_0$  值较小。

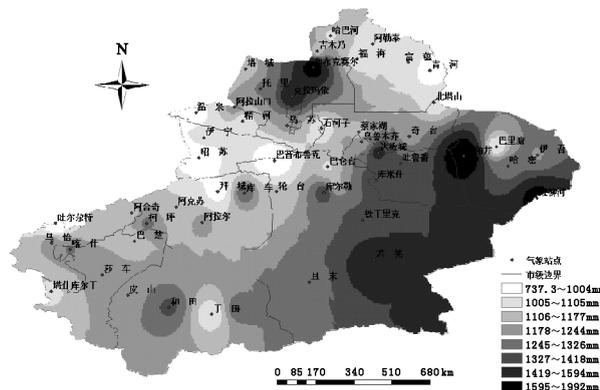


图 5 新疆维吾尔自治区多年平均  $ET_0$  分布图

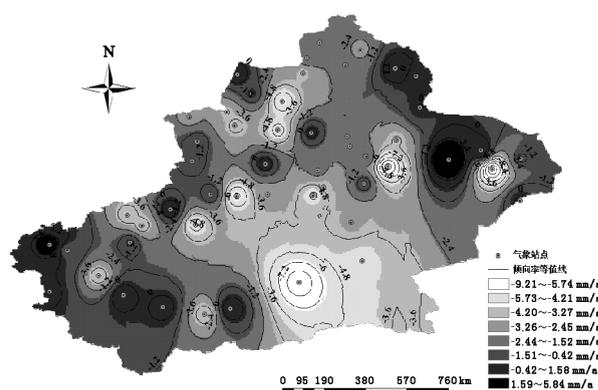


图 6 新疆维吾尔自治区  $ET_0$  倾向率分布图

2)  $ET_0$  变化趋势的空间分异。从图 6 可以看出,约有 70% 站点的  $ET_0$  趋势线倾向率为负值,或者说新疆大部分地区  $ET_0$  呈减小趋势。这些地区的倾向率等值线以哈密(-9.24 mm/a)、吐鲁番(-8.82 mm/a)、且末(-8.06 mm/a)为中心呈环状分布。同时,乌苏、克拉玛依、库车、阿拉尔等地  $ET_0$  减小幅度也较大,倾向率的绝对值均在 5.0 mm/a 以上。

$ET_0$  倾向率为正值的区域主要集中在北疆东部和南疆西南部的帕米尔高原与塔里木盆地西南边缘,以七角井为及乌恰为变化中心, $ET_0$  倾向率分别为 5.85 mm/a 和 3.14 mm/a。此外,吐尔尕特、阿克苏、红柳河、富蕴、巴音布鲁克、石河子、民丰等站的  $ET_0$  也呈增加趋势。倾向率在 0.01~1.3 mm/a 之间。

整体上,盆地内部各站点  $ET_0$  多呈减小趋势,而  $ET_0$  增加的站点多在山区与高原。

## 2.3 $ET_0$ 变化的影响因素分析

全疆  $ET_0$  倾向率的最大值和最小值分别出现在七角井和哈密。七角井最低温度和最高温度均有显著上升的趋势(M-K 检验值  $z=6.4409 > 1.96$ ),风速和相对湿度无显著变化,日照时数和辐射强度亦表现为显著上升趋势( $z_1=2.60 > 1.96, z_2=2.82 > 1.96$ )。温度明显升高为蒸散过程提供了充足的能量,日照时数和辐射强度的显著增加则为温度升高创造了条件,在其他气象要素保持不变(包括微小变化)的情况下, $ET_0$  则表现为显著上升趋势。

哈密的最低温度、最高温度和相对湿度均表现为显著上升趋势( $z_1=3.54 > 1.96, z_2=3.81 > 1.96, z_3=3.74 > 1.96$ ),风速表现为极显著下降趋势( $z=-6.88 < -1.96$ ),日照时数和辐射强度则无显著下降,温度升高虽然是蒸发蒸腾量增加的有利因素,但是风速的显著下降大大降低了水汽在空气中扩散的能力,二者的相互作用使得哈密地区多年  $ET_0$  值呈显著下降趋势。

全疆  $ET_0$  呈显著下降趋势( $z=-4.00 < -1.96$ ),而温度表现为显著上升趋势( $z=5.54 > 1.96$ ),除湿度无显著性变化外,其他气象因子均呈显著下降趋势,风速、日照时数与辐射强度的 M-K 检验值分别为

-6.48、-3.14、-2.30,均小于-1.96,相对于其他气象因素,风速的下降趋势更为显著,这表明风速的减小是全疆  $ET_0$  降低的主要原因,其对  $ET_0$  的影响要超过温度对  $ET_0$  的影响。

### 3 结 论

由新疆 1960—2009 年的气象资料计算得出新疆全疆各站逐月、逐年及多年平均  $ET_0$ ,经分析其时空演变特征得出以下结论:

近 50 年全疆平均  $ET_0$  呈显著减小趋势,减小率为 1.9 mm/a。不同区域  $ET_0$  的年际变化趋势差异显著,按照聚类分析结果,可大致分为 5 个水平:4.5、0.67、-1.4、-4.4、-8.7 mm/a。全疆平均的周期振荡较为明显,经历了“多→少→多”交替过程,且在 25~35 年时间尺度上全疆平均  $ET_0$  的周期振荡最强。

$ET_0$  年内分析结果表明: $ET_0$  年内分布分布均呈单峰状,基本上从 1 月份的 0.1~0.8 mm/d 逐渐上升到 6—7 月份的 3.9~7.2 mm/d,然后又逐渐下降到 12 月份的 0.2~1.0 mm/d,且各站之间峰值相差很大。1990 年后与 1990 前相比,各代表站点的  $ET_0$  峰值均有一定程度减少。

新疆地区多年平均  $ET_0$  空间分布的总体特征为:由西北向东南增加,多年平均  $ET_0$  值与地形分布有高度的一致性,盆地海拔较低年平均温度则较高,为蒸散活动提供了较为充足的能源,多年平均  $ET_0$  值较大;而山脉与高原海拔较高,年平均温度较低,由于热量不足,水汽运移受限,蒸散活动较弱,多年平均  $ET_0$  值较小。

选取的研究站点主要集中在盆地边缘的绿洲地带,因此对于面积广阔的沙漠和山区代表性略有不足,特别是山区是新疆径流的主要来源区,山区蒸散发量的变化对水文过程演变及水资源开发利用具有重要影响,也是今后需要进一步研究的重要课题。

#### 参考文献:

- [1] 吴普特,赵西宁. 气候变化对中国农业用水和粮食生产的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(2):1-6.
- [2] 丛振涛,倪广恒,杨大文,等.“蒸发悖论”在中国的规律分析[J]. 水科学进展,2008,19(2):147-151.
- [3] Thomas A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China[J]. International Journal of Climatology, 2000, 20:381-396.
- [4] 高歌,陈德亮,任国玉,等. 1956—2000 年中国潜在蒸散量变化趋势[J]. 地理研究,2006,25(3):378-387.
- [5] 李林,张国胜,汪青春,等. 黄河上游流域蒸散量及其影响因子研究[J]. 地球科学进展,2000,15(3):256-259.
- [6] 王幼奇,樊军,邵明安. 黄土高原地区近 50 年参考作物蒸散量变化特征[J]. 农业工程学报,2008,24(9):6-10.
- [7] 曾丽红,宋开山,张柏,等. 近 60 年来东北地区参考作物蒸散量时空变化[J]. 水科学进展,2010,21(2):194-200.
- [8] 倪广恒,李新红,丛振涛,等. 中国参考作物腾发量时空变化特性分析[J]. 农业工程学报,2006,22(5):1-4.
- [9] 苏宏超,魏文寿,韩萍. 新疆近 50a 来的气温和蒸发变化[J]. 冰川冻土,2003,25(2):174-178.

## Analysis of Temporal-spatial Characteristics of Reference Evapotranspiration in Xinjiang Province During 1960—2009

SHI Xin<sup>1,2,3</sup>, WU Pu-te<sup>1,2,3</sup>, WANG Yu-bao<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Xi-ning<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Jian-min<sup>2,3,4</sup>

(1. College of Water Resources and Architecture Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Yangling 712100, China; 3. National Engineering Research Center for Water Saving Irrigation at Yangling, Yangling 712100, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

**Abstract:** reference crop evapotranspiration ( $ET_0$ ) is the basic of agricultural water calculation and forecasting. The monthly evapotranspiration of fifty-three weather stations in Xinjiang province in 1960—2009 was estimated using Penman-Monteith equation which was recommended by FAO. The spatial distribution of  $ET_0$  was obtained by GIS and IDW method was used for spatial interpolation. The  $ET_0$  changing trends

(下转第 32 页)

## Pressure Characteristics Analysis of Self-excited Pulsed Jet Device

GAO Chuan-chang, LIU Xin-yang

(North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China)

**Abstract:** Pressure characteristics and hitting power of self-excited pulsed jet device was studied by the independently developing testing system. The influence on hitting power and pulsing effect of cavity length and working pressure was researched. Pressure and hitting power variations of cavity wall different part for self-excited pulsed jet device was studied. The analysis result indicates that while cavity length is smaller the device has not pulsing effect under various working pressures; while cavity length becomes greater the device generates pulsing effect gradually and obtains optimum pulsing effect. The vortex-type cavitation gas bag is formed on two sides of jet core, and this is the basic reason for pulse jet generation. While pulsing effect is better the pressure and hitting power of different part for device cavity wall show obvious periodicity, but change cycle between the pressure and hitting power aren't in synchronization.

**Key words:** self-excited pulsed jet; pressure characteristics; periodicity; pulsing effect

---

(上接第 14 页)

of all sites are divided into five categories through clustering analysis method. Then the spatial and temporal variation characteristics and influence factors of the  $ET_0$  are discussed, in which, Morlet wavelet transform method and the trend rate are also used. The result shows that: in the past 50 years, the regional average  $ET_0$  of Xinjiang presents a significant decreasing trend. The interannual variability trends of  $ET_0$  in different areas are markedly different. The temporal variability of regional average  $ET_0$  has a quasi-periodicity of 25~30 years experiencing three alternating stages (high→low→high).  $ET_0$  yearly distribution tends to a single-peak shape, and the peak values of different stations are significantly different. The general characteristics of average years  $ET_0$  space distribution is increased from northwest to southeast, and have a high consistency with the rolling terrain. The  $ET_0$  rate in most of the region in Xinjiang are negative, conform to the "evaporation paradox" rule, mainly because the influence of the decreasing wind speeds to the  $ET_0$  is bigger than the increasing temperature. Since 1992,  $ET_0$  in Xinjiang shown an upward trend as the temperature rising, the  $ET_0$  evolution in the future need a further forecast and research.

**Key words:** reference crop evapotranspiration ( $ET_0$ ); spatiotemporal variability; Xinjiang Province; Penman Monteith equation