



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.01.005

金菊良, 宋占智, 蒋尚明, 等. 基于云模型的淮北平原参考作物蒸散量时空分布[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 25-32. JIN Jur liang, SONG Zhan zhi, JIANG Shang ming, et al. Spatiotemporal distribution of potential evapotranspiration in Huaibei Plain based on cloud model[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 25-32. (in Chinese)

# 基于云模型的淮北平原参考作物蒸散量时空分布

金菊良<sup>1,2</sup>, 宋占智<sup>1,2</sup>, 蒋尚明<sup>3</sup>, 周玉良<sup>1,2</sup>, 张明<sup>4</sup>

- (1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 水资源与环境系统工程研究所, 合肥 230009;  
3. 安徽省水利部淮委 水利科学研究院 安徽省水利水资源重点实验室, 安徽 蚌埠 233000;  
4. 安徽工程大学 建筑工程学院, 安徽 芜湖 241000)

**摘要:** 传统的时空分布分析方法仅可以描述参考作物蒸散量( $ET_0$ )的平均时空分布情况, 难以对 $ET_0$ 时空分布的离散程度与稳定性进行量化。根据安徽淮北平原5个站点的气象数据与地理信息资料, 采用彭曼-蒙特斯公式计算 $ET_0$ , 基于云模型分析了其时空分布特征。结果表明: 年 $ET_0$ 呈下降趋势, 春、冬季增长, 夏、秋季减小; 年 $ET_0$ 空间分布较为均匀, 季节 $ET_0$ 空间分布不均匀; 2004年较为分散而不稳定, 1956年较集中而稳定; 阜阳站较为分散而不稳定, 宿县站较集中而稳定;  $ET_0$ 时间变化的离散程度相对于空间分布较小, 稳定性相近。因此, 基于云模型分析 $ET_0$ 时空分布特性可行、有效, 研究结果可为淮北平原不同作物蒸散发以及旱灾、灌溉等研究提供科学参考。

**关键词:** 参考作物蒸散量; 彭曼-蒙特斯公式; 淮北平原; 云模型; 时空分布

**中图分类号:** S161   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1672-1683(2017)01-0025-08

## Spatiotemporal distribution of potential evapotranspiration in Huaibei Plain based on cloud model

JIN Jur liang<sup>1,2</sup>, SONG Zhan zhi<sup>1,2</sup>, JIANG Shang ming<sup>3</sup>, ZHOU Yu liang<sup>1,2</sup>, ZHANG Ming<sup>4</sup>

- (1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of Water Resources and Environmental Systems Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;  
3. Key Laboratory of Water Conservancy and Water Resources of Anhui Province, Water Resources Research Institute of Anhui Province and Huaihe River Commission, Ministry of Water Resources, Bengbu 233000, China;  
4. College of Civil Engineering and Architecture, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

**Abstract:** Traditional methods can only describe the average case of  $ET_0$  temporal and spatial distribution, but have difficulty in quantifying their degree of dispersion and stability. Based on the meteorological data and geographic information of 5 stations in Anhui Huaibei Plain, we calculated  $ET_0$  using the Penman Monteith equation, and analyzed its temporal and spatial distribution characteristics based on cloud model. The results were as follows: Inter annual  $ET_0$  showed a decreasing tendency.  $ET_0$  in spring and winter showed a growing tendency, and in summer and autumn a decreasing trend. The inter annual  $ET_0$  was evenly distributed in space but the seasonal  $ET_0$  was not.  $ET_0$  was more fragmented and unstable in 2004, and relatively concentrated and stable in 1956.  $ET_0$  was more fragmented and unstable in Fuyang station, and relatively concentrated and stable in Suxian station. The dispersion degree of  $ET_0$  in temporal variation was smaller than that in spatial distribution, while the stability degrees of the two were similar. Therefore, using the cloud model to analyze the characteristics of  $ET_0$  spatiotemporal distribution in Huaibei Plain is feasible and effective. The research results can provide scientific reference for studies on evapotranspiration of various crops as well as drought and irrigation in Huaibei Plain.

收稿日期: 2016-06-24   修回日期: 2016-12-15   网络出版时间: 2017-01-03  
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170103.2041.008.html>  
基金项目: 国家自然科学基金项目(51579059; 51409001; 51409002; 51579060)

**Fund:** National Natural Science Foundation of China(51579059; 51409001; 51409002; 51579060)

**作者简介:** 金菊良(1966-), 男, 江苏吴江人, 教授, 博士, 主要从事水资源系统工程研究。E-mail: JINJL66@126.com

**通讯作者:** 蒋尚明(1983-), 男, 广西桂林人, 工程师, 主要从事农村水利系统工程研究。E-mail: jiangshangming@163.com

**Key words:** potential evapotranspiration; Penman Monteith; Huabei Plain; cloud model; spatiotemporal distribution

蒸散发是水循环的主要环节之一,联系着岩石圈、水圈、大气圈和生物圈<sup>[1]</sup>,是能量传递、物质循环和水量平衡等的重要组成部分<sup>[2,3]</sup>,一直以来都是气象学、地理学、土壤学、水文学、生态学、植物学等各学科领域研究的热点问题之一。参考作物蒸散量( $ET_0$ )是评估气候干湿情况、作物需水量以及水资源合理配置的最重要的指标之一<sup>[4,6]</sup>。参考作物蒸散量是天气状况来确定的大气蒸散过程的能力,是近似于潜在蒸散的值<sup>[7]</sup>,仅受天气、气候、海拔等的影响,因此对某些气象因子的变化非常敏感<sup>[8]</sup>。由于气象因子、水文条件等在时间变化上的周期性和随机性、区域变化上的相似性和特殊性,在不同时空尺度上,参考作物蒸散量的测定和估算比较困难<sup>[9,10]</sup>。目前国内外对于  $ET_0$  的研究取得了一定的进展,Hidalgo 等<sup>[11]</sup>研究了美国加州潜在蒸散变化之源;Hulme 等<sup>[12]</sup>认为温度上升将有助于增加潜在蒸发,并在全球范围内得到验证;Cohen 等<sup>[13]</sup>发现以色列地区  $ET_0$  有升高趋势且夏季变化不明显。目前在  $ET_0$  时空分布研究的一般方法上,主要有神经网络<sup>[14,15]</sup>、相关分析法<sup>[4,16]</sup>、敏感性分析法<sup>[17,18]</sup>、趋势分析法<sup>[8,19]</sup>、周期分析法<sup>[20]</sup>等,可以定量描述  $ET_0$  的时空分布,但是只能定性描述其离散程度、稳定性等不确定性。本文利用云模型<sup>[21]</sup>对  $ET_0$  时空分布的离散程度与稳定性进行量化,通过趋势分析研究  $ET_0$  时间上的变化特征,通过克里金插值方法<sup>[22]</sup>与反距离权重插值法<sup>[23]</sup>描绘  $ET_0$  空间分布的 ArcGIS 图以反映其空间特性,通过云模型方法研究  $ET_0$  时空分布的随机性、模糊性和稳定性等不确定性,研究结果对于淮北平原实际蒸散发时空分布研究,以及农业作物、生态植被等的需水精确估算等有着重要的意义。

## 1 研究区域和资料

### 1.1 研究区域

安徽淮北平原地处安徽省北部、黄淮海平原南侧;介于  $32^{\circ}27' - 34^{\circ}38'N$ 、 $114^{\circ}52' - 118^{\circ}10'E$ ,总面积  $3.74 \text{ km}^2$ (见图 1)。安徽淮北平原地处北温带的南缘,属温带半湿润季风气候,年平均气温  $14^{\circ}\text{C} \sim 15^{\circ}\text{C}$ ,年日照时数  $2\ 300 \text{ h}$  以上,平均年降水量在  $850 \text{ mm}$  以上,汛期 6 月-9 月份间多暴雨。

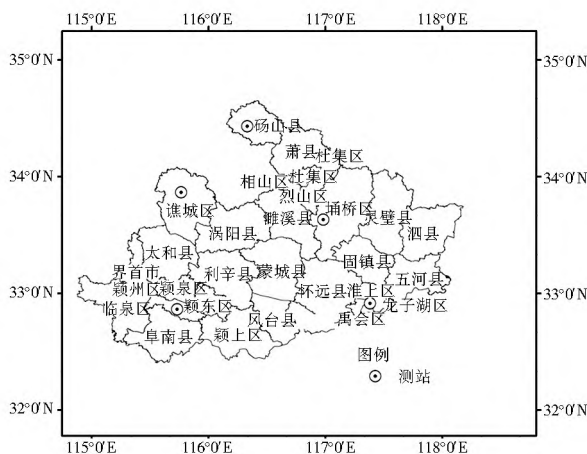


图 1 安徽淮北平原气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the Huabei Plain of Anhui Province

### 1.2 基础资料

本文数据来自国家气象中心数据库所提供的安徽淮北平原 5 个气象测站 1955 年-2014 年共 60 年逐日的观测资料,包括:日最大、最小和平均气温;距地面  $10 \text{ m}$  高处的风速(计算时换算为距地面  $2 \text{ m}$  高处风速);日平均相对湿度和日照时数。同时收集了相关的地理信息资料,包括测站经纬度、海拔高度等。

## 2 研究方法

### 2.1 计算 $ET_0$

彭曼-蒙特斯公式以能量传递为基础,理论依据完备、计算精度高,被联合国粮食及农业组织等部门推荐,并在世界范围内得到广泛使用,其具体计算公式如下<sup>[18,24]</sup>:

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

式中:  $R_n$  为净辐射;  $G$  为土壤热通量;  $\gamma$  为湿度基常数;  $T$  为平均气温;  $u_2$  为距离地面  $2 \text{ m}$  高处的风速;  $e_s$  为饱和水气压;  $e_a$  为实际水气压;  $\Delta$  为饱和水气压-温度曲线斜率。

### 2.2 云模型方法

#### 2.2.1 云模型的简介及定义

李德毅等根据随机性、模糊性等不确定性的关联特征,提出了将定性定量结合起来的云模型<sup>[25,26]</sup>,用以表示离散程度、稳定性等不确定性。

设  $U$  是一个用精确数值表示的定量论域,  $C$  是  $U$  上的定性概念, 若定量值  $x \in U$ , 且  $x$  是定性概念  $C$  的一次随机实现,  $x$  对  $C$  的确定度  $\mu(x) \in [0, 1]$  是具有稳定倾向的随机数。若

$$\mu: U \rightarrow [0, 1] \quad \forall x \in U \quad x \rightarrow \mu(x) \quad (2)$$

则  $x$  在论域  $U$  上的分布称为云, 每一个  $x$  称为一个云滴。

云的整体形状反映了定性概念, 云滴则是对定性概念的定量描述, 云滴产生过程, 表示定性概念和定量值之间的不确定性映射, 即, 用云模型参数来表征离散程度、稳定性等不确定性。

### 2.2.2 云模型参数

可用期望  $Ex$ 、熵  $En$  和超熵  $He$  三个参数<sup>[25]</sup> 来表征水文变量的不确定性(见图 2)。

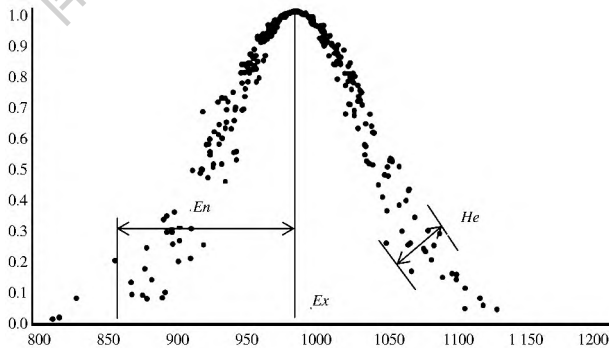


图 2 云模型参数

Fig. 2 Parameters of cloud model

期望  $Ex$  表示平均值, 熵  $En$  反映离散程度, 超熵  $He$  是熵的熵, 也称为二阶熵, 反映了隶属度的稳定性, 相当于云的“厚度”。相比于概率统计方法, 云模型考虑了模糊性与随机性等不确定性, 使得结果更合理、科学。

### 2.2.3 正向高斯云算法

输入: 云模型参数, 云滴数  $N$ 。输出: 云滴  $x$  以及隶属度  $\mu$ 。正向高斯云算法步骤如下<sup>[25-26]</sup> :

- (1) 以  $En$  为期望值,  $He$  为标准差生成一个高斯随机数  $En_i'$ ;
- (2) 以  $Ex$  为期望值,  $En_i'$  为标准差生成一个高斯随机数  $x_i$ ;
- (3) 计算确定度  $\mu_i = \exp\{-(x_i - Ex)^2 / 2En_i'^2\}$ ;
- (4) 具有确定度  $\mu_i$  的  $x_i$  成为数域中的一个云滴;
- (5) 重复步骤(1)到(4), 直至产生  $N$  个云滴为止。

### 2.2.4 逆向高斯云算法

输入: 样本点  $x_i$ , 其中  $i = 1, 2, \dots, n$ 。输出: 云模型参数。逆向高斯云算法步骤如下<sup>[27]</sup>。

- (1) 平均值  $X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ , 一阶绝对中心矩为

$$\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n |x_i - X|, \text{ 二阶中心矩 } S = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - X)^2;$$

- (2) 计算期望  $Ex = X$ 。
- (3) 计算熵, 当  $0 < He < En/3$  时

$$En = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n |x_i - X|。$$

- (4) 计算超熵  $He = \sqrt{S - En^2}$ 。

## 3 实例分析

利用气象数据及地理信息数据, 通过式(1) 可计算得到淮北平原 60 年来逐日  $ET_0$ , 然后累加得到  $ET_0(i, j)$ , 其中  $i = 1955, 1956, \dots, 2014$ ;  $j = \{$  碭山, 亳州, 宿县, 阜阳, 蚌埠  $\}$ 。

### 3.1 时间趋势分析

通过趋势分析研究  $ET_0$  时间上的变化特征, 其中  $ET_0$  年际变化(图 3)中每年  $ET_0$  值由每个站点当年逐日  $ET_0$  累加然后取平均得到, 同理, 得到  $ET_0$  季节变化状况(图 4)。

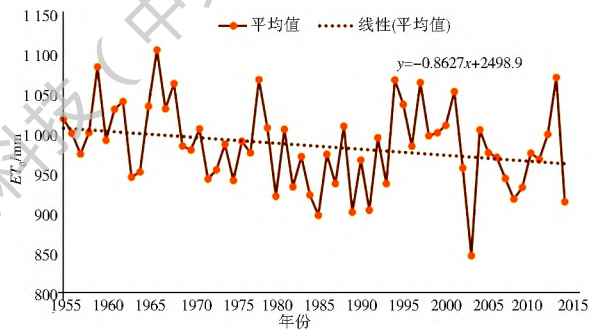


图 3 淮北平原  $ET_0$  年际变化

Fig. 3 The interannual variation of  $ET_0$  in the Huaibei Plain

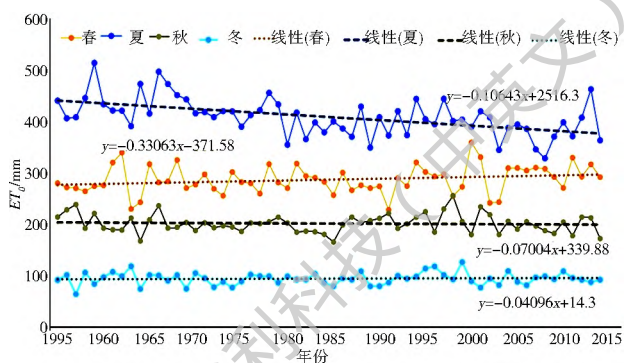


图 4 淮北平原  $ET_0$  季节变化

Fig. 4 The seasonal variation of  $ET_0$  in the Huaibei Plain

由图 3 可知, 近 60 年来,  $ET_0$  上下波动, 年平均  $ET_0$  为 985.194 mm, 其中 1966 年达到最大值 1 106 573 mm, 2003 年则为最小值 846.198 mm, 以 7.5 mm/(10a) 的倾向率呈现下降趋势。

由图 4 可知, 淮北平原  $ET_0$  夏季最大, 冬季最

小,春季、秋季分别排第二、第三;60 年来  $ET_0$  均值夏季最大,为 404.161 mm,冬季最小,为 95.594 mm,春、秋季介于二者之间,分别为 284.551 mm、200.889 mm。春、冬季  $ET_0$  增长,夏、秋季减小。其中变化趋势同样也是“夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季”的分布,夏季变化最大,为 10.47 mm/(10a),春、秋、冬分别为 3.25 mm/(10a)、0.69 mm/(10a)、0.40 mm/(10a)。

### 3.2 空间分布分析

通过克里金插值方法与反距离权重插值法描绘  $ET_0$  空间分布的 ArcGIS 图以反映其空间特性,见图 5、图 6。其中,  $ET_0$  空间分布(图 5)中每个站点的  $ET_0$  由该站点 60 年逐日  $ET_0$  累加然后取年平均得到,同理,得到季节变化空间分布状况(图 6)。

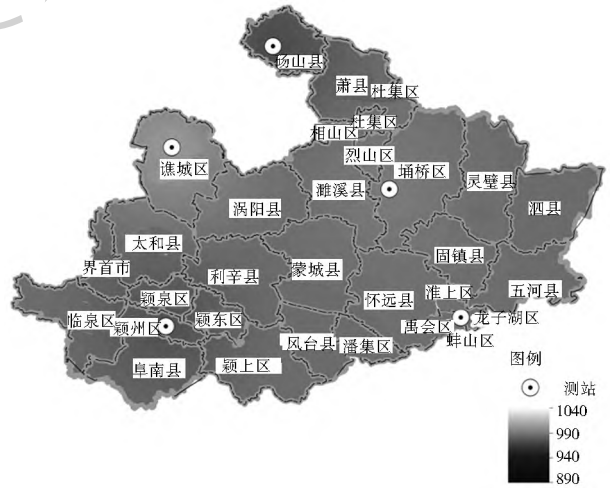


图 5 淮北平原  $ET_0$  空间分布

Fig. 5 The spatial distribution of  $ET_0$  in the Huaibei Plain

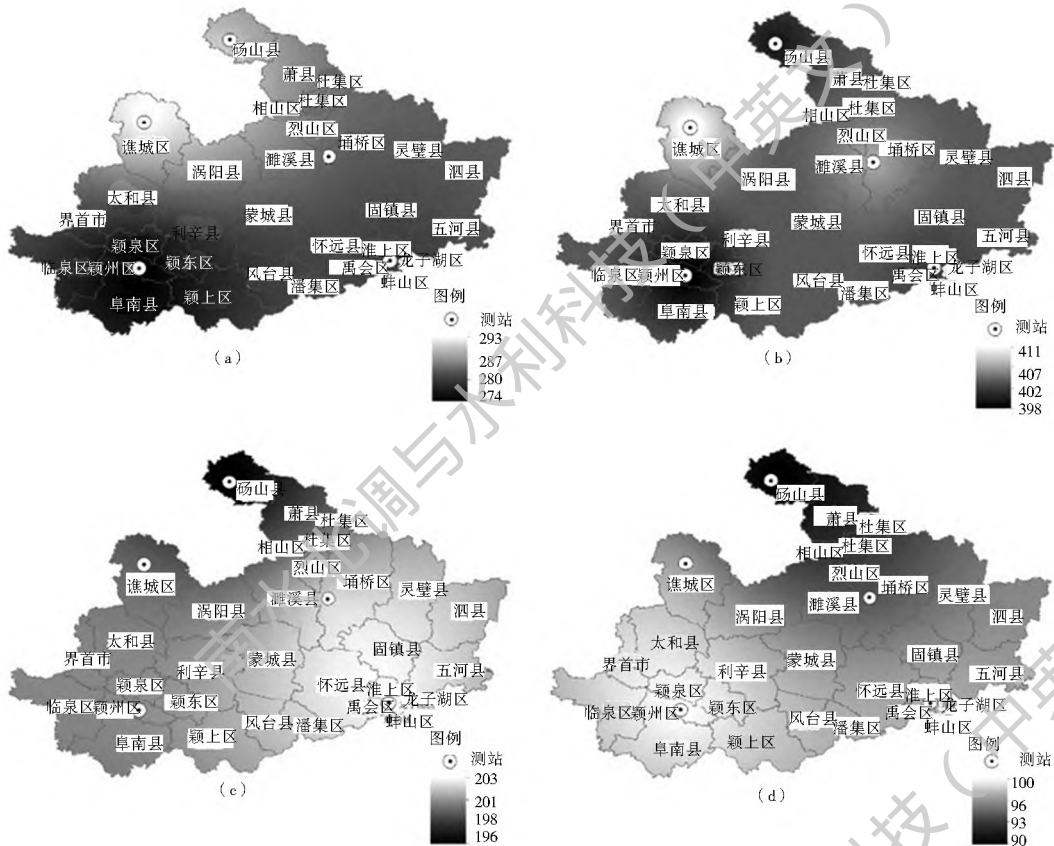


图 6 淮北平原  $ET_0$  空间分布的季节变化

Fig. 6 The seasonal variation of  $ET_0$  spatial distribution in the Huaibei Plain

图 5 反映了淮北平原 60 年来  $ET_0$  空间分布特征,整体来看其空间变化不大,即分布较为均匀。其中砀山站(东北部)与阜阳站(西南部)比平均值稍小,亳州站(西北部)比平均值稍大,蚌埠站(东南部)与宿县站(中北部)接近平均值。

图 6 描述了淮北平原 60 年来不同季节  $ET_0$  空间分布及其分布特征,整体来看其空间变化较大,即分布不均匀。其中图 6(a)表示淮北平原 60 年来春

季  $ET_0$  空间分布,亳州站  $ET_0$  较大,阜阳站较小,其他站与平均值相近;图 6(b)表示夏季  $ET_0$  空间分布,亳州站与宿县站  $ET_0$  较大,阜阳站与砀山站较小,蚌埠站与平均值相近;图 6(c)表示秋季  $ET_0$  空间分布,蚌埠站  $ET_0$  较大,砀山站较小,整体自西北往东南递增的趋势;图 6(d)表示冬季  $ET_0$  空间分布,阜阳站与亳州站  $ET_0$  较大,砀山站与宿县站较小,整体自东北往西南递增的趋势。

### 3.3 云模型方法分析 $ET_0$ 时空分布

#### 3.3.1 时空不确定性分析

某年某站点的参考作物蒸散量  $ET_0(i, j)$ , 固定年份  $i$ , 对于  $ET_0(i, j), j = \{\text{砀山, 亳州, 宿县, 阜阳, 蚌埠}\}$ , 按照逆向高斯运算法求得淮北平原  $ET_0$  由空间分布数据得到的云模型参数, 见表 1; 固定站点  $j$ , 对于  $ET_0(i, j), i = 1955, 1956, \dots, 2014$ , 按照逆向高斯运算法求得淮北平原  $ET_0$  有时间变化数据得到的云模型参数, 见表 2。

由表 1 可知, 从站点平均程度来看, 1966 年

$ET_0$  站点平均值最高, 达到 1 106. 573 mm, 2003 年最低为 846. 198 mm; 从站点数据离散程度来看, 2004 年较为分散, 熵为 65. 365, 1956 年较集中, 熵为 6. 746; 从离散程度的稳定性来看, 2004 年不太稳定, 超熵为 29. 232, 1956 年较为稳定, 超熵为 3. 017。可见, 通过 60 年来逐年的  $Ex$  也可以表现出淮北平原  $ET_0$  的时间变化情况, 通过 60 年来逐年的  $En$  来表现  $ET_0$  离散程度的时间变化情况, 通过 60 年来逐年的  $He$  来表现  $ET_0$  稳定性的时间变化情况。

表 1 淮北平原  $ET_0$  由空间分布数据得到的云模型参数

Tab. 1 Parameters of cloud model derived from spatial distribution of  $ET_0$  in the Huaibei Plain

云模型参数				云模型参数				云模型参数			
年份	期望 $Ex$	熵 $En$	超熵 $He$	年份	期望 $Ex$	熵 $En$	超熵 $He$	年份	期望 $Ex$	熵 $En$	超熵 $He$
1955	1019.588	20.109	8.993	1975	941.526	22.768	10.182	1995	1037.537	40.450	18.090
1956	1001.099	6.746	3.017	1976	990.999	21.846	9.770	1996	984.817	38.928	17.409
1957	974.956	29.715	13.289	1977	976.398	21.954	9.818	1997	1065.317	22.419	10.026
1958	1002.113	18.064	8.079	1978	1069.013	27.918	12.485	1998	997.875	16.570	7.410
1959	1085.179	24.977	11.170	1979	1007.986	22.848	10.218	1999	1001.820	43.383	19.401
1960	992.364	41.227	18.437	1980	921.452	39.021	17.451	2000	1011.166	42.274	18.905
1961	1031.494	20.115	8.996	1981	1006.237	40.079	17.924	2001	1053.903	36.162	16.172
1962	1041.304	30.133	13.476	1982	933.378	24.264	10.851	2002	957.168	62.613	28.002
1963	945.768	39.996	17.887	1983	971.751	13.680	6.118	2003	846.198	52.444	23.454
1964	952.213	26.634	11.911	1984	923.178	14.204	6.352	2004	1005.549	65.365	29.232
1965	1035.442	23.258	10.401	1985	897.417	20.570	9.199	2005	976.660	57.084	25.529
1966	1106.573	43.107	19.278	1986	974.639	42.887	19.180	2006	970.756	48.362	21.628
1967	1032.153	31.641	14.150	1987	937.505	19.327	8.643	2007	944.006	59.484	26.602
1968	1064.007	23.631	10.568	1988	1010.137	18.699	8.363	2008	917.921	51.714	23.127
1969	985.220	17.147	7.669	1989	901.420	17.765	7.945	2009	932.677	51.906	23.213
1970	980.056	30.296	13.549	1990	967.327	18.510	8.278	2010	976.006	47.441	21.216
1971	1006.833	15.145	6.773	1991	904.068	27.007	12.078	2011	968.240	46.078	20.607
1972	943.281	17.281	7.728	1992	995.510	32.585	14.572	2012	999.810	51.685	23.114
1973	955.017	12.304	5.503	1993	937.497	18.054	8.074	2013	1071.762	64.888	29.019
1974	987.198	22.905	10.243	1994	1068.655	36.499	16.323	2014	914.501	58.343	26.092

表 2 淮北平原  $ET_0$  由时间变化数据得到的云模型参数

Tab. 2 Parameters of cloud model

derived from time variation data of  $ET_0$  in the Huaibei Plain

站点	云模型参数		
	期望 $Ex$	熵 $En$	超熵 $He$
砀山	971.060	61.952	7.998
亳州	1003.060	57.244	7.390
宿县	991.677	49.862	6.437
阜阳	973.718	70.278	9.073
蚌埠	986.456	60.318	7.787

由表 2 可知, 从多年平均程度来看, 亳州站  $ET_0$  多年平均值最高, 达到 1 003. 060 mm, 砀山站最低为 971. 060 mm; 从 60 年数据离散程度来看, 阜阳站较为分散, 熵为 70. 278, 宿县站较集中, 熵为 49. 862; 从离散程度的稳定性来看, 阜阳站不太稳定, 超熵为 9. 073, 宿县站较为稳定, 超熵为 6. 437。可见, 通过 5 个站点的  $Ex$  可以表现出淮北平原  $ET_0$  的空间分布情况, 通过 5 个站点的  $En$  来表现  $ET_0$  离散程度的空间分布情况, 通过 5 个站点的  $He$  来表现  $ET_0$  稳定性的空



间分布情况。

### 3.3.2 时空不确定性比较

根据逐日  $ET_0$  累加到不同的时间尺度可得到某年某站点的参考作物蒸散量  $ET_0(i, j, k)$ , 其中  $i = 1955, 1956, \dots, 2014$ ;  $j = \{ \text{砀山, 亳州, 宿县, 阜阳, 蚌埠} \}$ ;  $k = \{ \text{月, 季, 年} \}$ 。分别固定  $i$  与  $j$  然后运用逆向高斯云算法可得到淮北平原某一时间尺度 ( $k$ )  $ET_0$  空间分布与时间变化的云模型参数, 见表 3、表 4, 图 7、图 8。

表 3 淮北平原季节与年际  $ET_0$  时空云模型参数

Tab. 3 Parameters of cloud model derived from seasonal and interannual variation data of  $ET_0$  in the Huaibei Plain

时间	时间变化			空间分布		
	期望 $Ex$	熵 $En$	超熵 $He$	期望 $Ex$	熵 $En$	超熵 $He$
春季	284.551	26.434	3.413	284.551	7.333	3.279
夏季	404.161	35.932	4.639	404.161	5.439	2.433
秋季	200.889	17.660	2.280	200.889	6.048	2.705
冬季	95.594	11.631	1.501	95.594	3.689	1.650
1955 年-2014 年	985.194	52.280	6.749	985.194	13.175	5.892

表 4 淮北平原逐月  $ET_0$  时空云模型参数

Tab. 4 Parameters of cloud model derived from monthly  $ET_0$  in the Huaibei Plain

月份	时间变化			空间分布		
	期望 $Ex$	熵 $En$	超熵 $He$	期望 $Ex$	熵 $En$	超熵 $He$
1	28.709	5.048	0.652	28.709	1.316	0.588
2	37.310	7.663	0.989	37.310	0.711	0.318
3	65.066	10.155	1.311	65.066	1.504	0.673
4	94.435	11.080	1.430	94.435	2.480	1.109
5	125.050	14.998	1.936	125.050	3.494	1.562
6	140.815	15.384	1.986	140.815	5.116	2.288
7	137.391	17.272	2.230	137.391	2.048	0.916
8	125.955	15.687	2.025	125.955	2.861	1.279
9	91.666	10.432	1.347	91.666	2.228	0.997
10	68.198	8.500	1.097	68.198	2.490	1.113
11	41.025	6.352	0.820	41.025	2.047	0.915
12	29.575	5.098	0.658	29.575	1.898	0.849

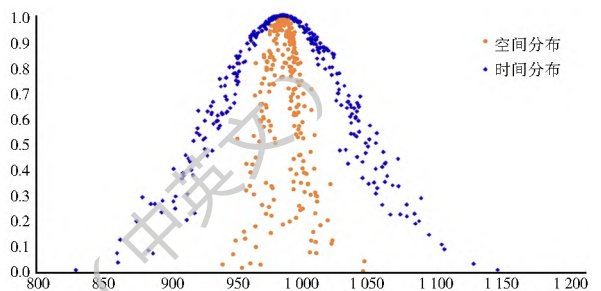


图 7 淮北平原年际  $ET_0$  时空隶属云

Fig. 7 The membership cloud of interannual  $ET_0$  in the Huaibei Plain

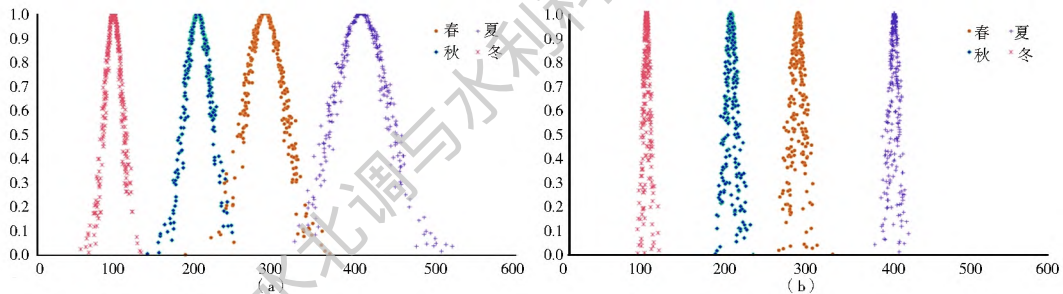


图 8 淮北平原季节  $ET_0$  时空隶属云

Fig. 8 The membership cloud of seasonal  $ET_0$  in the Huaibei Plain

无论是从时间变化的角度还是空间分布的角度来看,  $ET_0$  的平均值 ( $Ex$ ) 是相同的, 不同的是后面两个表征不确定性的参数。从表 3、表 4 可以看出: 淮北平原不同时间尺度时间变化的  $ET_0$  的  $En$  大于空间分布的, 即时间变化上的离散程度相对于空间分布的较大;  $ET_0$  的  $He$  在既有时间变化上大于空间分布, 也有时间变化上小于空间分布, 即稳定性不同月份、不同季节的情况各不相同, 如夏季  $ET_0$  的  $He$  在时间变化上为 4.639、在空间分布上为 2.433, 冬季  $ET_0$  的  $He$  在时间变化上为 1.501、在空间分布上为 1.650。该情况与研究区域的地理位置、气候条件以及不同时间段的天气状况有关。对比图 7 红点(时间变化)与蓝点(空间分布)可更加直观地看出离散程度与稳定性在时间变化上与空间分布上的

不同。

表 4 中还可看出, 各月份  $ET_0$  的时空变化特征, 其中 6 月份  $ET_0$  最大, 为 140.815 mm, 1 月份  $ET_0$  最小, 为 28.709 mm;  $ET_0$  的  $En$  时间变化上最大是 7 月份, 为 17.272, 即 7 月温度、光照等因素不同年份的变化较大;  $ET_0$  的  $En$  空间分布上最大是 6 月份, 为 5.116, 即 6 月份温度、光照等因素不同站点 (区域) 的变化较大; 月尺度  $ET_0$  的  $He$  在既有时间变化上大于空间分布, 也有时间变化上小于空间分布, 如 5 月份  $ET_0$  的  $He$  在时间变化上为 1.936、在空间分布上为 1.562, 12 月份  $ET_0$  的  $He$  在时间变化上为 0.658、在空间分布上为 0.849。该情况与研究区域的地理位置、气候条件以及不同时间段的天气状况有关。对比图 8(a) (时间变化) 与图 8(b) (空

间分布)可以更加直观地看出离散程度与稳定性在时间变化上与空间分布上的不同。

将1955年-2014年每10年为一个时间段分为6段,也可同时表现淮北平原60年来 $ET_0$ 时间变化与空分布的特性,即将时间尺度扩大到10年,相对于月与季来说就是一个大的时间尺度。现分析这6个时段的 $ET_0(i, j, k)$ ,此时 $i = \{(1955-1964), (1955-1964), (1955-1964), (1955-1964), (1955-1964), (1955-1964)\}$ ,  $k$ 为“10年”,分别固定 $i$ 与固定 $j$ 得到的云模型参数,见表5。

表5 淮北平原不同时段 $ET_0$ 时空分布云模型参数

Tab. 5 Parameters of cloud model derived from  $ET_0$  in different period in the Huaibei Plain

时段	时间变化			空间分布		
	期望 $E_x$	熵 $E_n$	超熵 $H_e$	期望 $E_x$	熵 $E_n$	超熵 $H_e$
1955-1964	1004.608	42.217	13.350	1004.608	12.756	5.705
1965-1974	1009.578	50.436	15.949	1009.578	19.544	8.740
1975-1984	974.192	46.631	14.746	974.192	15.782	7.058
1985-1994	959.417	55.110	17.427	959.417	6.767	3.026
1995-2004	996.135	61.748	19.526	996.135	35.532	15.890
2005-2014	967.234	46.083	14.573	967.234	47.051	21.042

表5结果与表3、表4结果类似,不再赘述。

通过图3、图4可直观看到 $ET_0$ 在时间变化上的波动情况,通过图5、图6可直观看到 $ET_0$ 在空间分布上的差异情况,但仅仅是一个定性的表达,无法定量说明其离散程度;运用云模型参数 $E_n$ 可以定量分析比较 $ET_0$ 离散程度, $H_e$ 可表述稳定性;同时还可对比分析其时间变化与空间分布上各特征的不同。

## 4 结论

根据安徽淮北平原1955年-2014年的逐日气象数据以及站点的地理信息资料,采用彭曼-蒙特斯公式计算5个站点60年逐日的参考作物蒸散量( $ET_0$ ),并分析其时间变化与空间分布特征,然后基于云模型分析其离散程度、稳定性等不确定性,取得了如下结论。(1)从时间变化的角度看,年 $ET_0$ 呈下降趋势,春、冬季 $ET_0$ 呈增长趋势,夏、秋季呈减小趋势;从空间分布的角度看,年 $ET_0$ 分布较为均匀,季节 $ET_0$ 分布不均匀,其中秋季自西北往东南

有递增趋势,冬季自东北往西南有递增趋势,春夏两季趋势不明显。(2)云模型参数可以反映 $ET_0$ 的时间与空间上的离散程度与稳定性,从站点平均角度来看,1966年 $ET_0$ 最高,2003年最低;2004年分散而不稳定,1956年集中且稳定。从多年平均角度来看,亳州站 $ET_0$ 最高,砀山站最低;阜阳站分散而不稳定,宿县站集中且稳定。(3)时间变化与空间分布的 $ET_0$ 的 $E_x$ 是相同的;时间变化上 $ET_0$ 的 $E_n$ 大于空间分布,即时间变化的离散程度比空间分布大;时间变化的 $ET_0$ 的 $H_e$ 在既有空间分布的情况,也有小于的情况,即稳定性不同时间段内各不相同,与研究区域具体状况有关。

采用云模型研究 $ET_0$ 时空分布尚存在一些问题:(1)所反映的离散程度与稳定性等不确定性在时间趋势图与空间分布图中无法直接表现出来;(2)本文中安徽淮北平原站点较少,空间分布图代表性不够强,该方法在站点较多的区域应用性会更好一些。将云模型理论的优势与其他方法相结合,并应用于不同学科、不同领域,有着广泛的研究价值和实际应用意义,研究结果可为淮北平原不同作物蒸散发以及旱灾、灌溉等研究提供科学参考。

## 参考文献(References):

- [1] 殷长琛, 齐广平, 康燕霞. 基于云模型的甘肃省参考作物蒸散量时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2015(8): 152-158. (YIN Chang chen, QI Guang ping, KANG Yan xia. Analysis on characteristics of reference crop evapotranspiration distribution in Gansu Province based on cloud mode[J]. Transactions of the CSAE, 2015(8): 152-158. (in Chinese))
- [2] 杨聪, 于静洁, 宋献方, 等. 华北山区短时段参考作物蒸散量的计算[J]. 地理科学进展, 2004(6): 7F-80. (YANG Cong, YU Jing jie, SONG Xian wan, et al. Reference crop evapotranspiration calculation in short interval of Mountainous Area in North China[J]. Progress in Geography, 2004(6): 7F-80. (in Chinese))
- [3] Xu C Y, Singh V P. Evaluation of three complementary relationship evapotranspiration models by water balance approach to estimate actual regional evapotranspiration in different climatic regions[J]. Journal of Hydrology, 2005, 208(1/2): 105-121.
- [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(3): 378-387. (GAO Ge, CHEN De liang, REN Guo yu, et al. Trend of potential evapotranspiration over China during 1956 to 2000[J]. Geographical Research, 2006(3): 378-387. (in Chinese))
- [5] 李春强, 洪克勤, 李保国. 河北省近35年(1965-1999年)参考作物蒸散量的时空变化[J]. 中国农业气象, 2008(4): 414-419. (LI Chun qiang, HONG Ke qin, LI Bao guo. Analysis of temporal-spatial variation of reference evapotranspiration during 1965 and 1999 in Hebei Province[J]. Chinese Journal of

- Agrometeorology, 2008(4): 414-419. (in Chinese)
- [6] 普宗朝, 张山清. 近48年新疆夏半年参考作物蒸散量时空变化[J]. 中国农业气象, 2011(1): 67-72. (PU Zongchao, ZHANG Qingshan. Study on spatial-temporal variation characteristic of summer half year  $ET_0$  in recent 48 years in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011(1): 67-72. (in Chinese))
- [7] 张存桂, 刘峰贵, 沈彦俊, 等. 柴达木流域参考作物蒸散变化成因[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(6): 123-127, 131. (ZHANG Cungei, LIU Fenggui, SHEN Yanjun, et al. Cause analysis of evapotranspiration variations of reference crop in the Qaidam Basin of Qinghai-Tibetan Plateau[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(6): 123-127, 131. (in Chinese))
- [8] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[R]. Rome: FAO Irrigation and Drainage(56), 1998.
- [9] 武夏宁, 胡铁松, 王修贵, 等. 区域蒸散发估算测定方法综述[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 257-262. (WU Xianning, HU Tiesong, WANG Xiugui, et al. Review of estimating and measuring regional evapotranspiration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(10): 257-262. (in Chinese))
- [10] 赵玲玲, 夏军, 许崇育, 等. 水文循环模拟中蒸散发估算方法综述[J]. 地理学报, 2013, 68(1): 127-136. (ZHAO Lingling, XIA Jun, XU Chongyu, et al. A review of evapotranspiration estimation methods in hydrological models[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(1): 127-136. (in Chinese))
- [11] Hidalgo H G, Cayan D R, Derringer M D. Sources of variability of evapotranspiration in California[J]. Journal of Hydro-meteorology, 2005, 6: 3-18.
- [12] Hulme M, Zhao Z C, Jiang T. Recent and future climate change in Asia[J]. International Journal of Climatology, 1994, 14: 637-658.
- [13] Cohen S, Ianetz A, Stanhill G. Evaporative climate changes at Bet Dagan, Israel, 1964-1998[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 111: 83-91.
- [14] Kumar M, Raghuwanshi N S, Singh R. Estimating evapotranspiration using artificial neural network[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 2002, 128(4): 224-233.
- [15] Gorka L, Amaia O B, Jose J L. Comparison of artificial neural network models and empirical and semi-empirical equations for daily reference evapotranspiration estimation in the Basque Country (Northern Spain) [J]. Agricultural Water Management, 2008, 95: 553-565.
- [16] 王幼奇, 樊军, 邵明安, 等. 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. (WANG Youqi, FAN Jun, SHAO Ming'an, et al. Analysis of effects of climate change on reference evapotranspiration on the Loess Plateau in recent 50 years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(9): 6-10. (in Chinese))
- [17] 刘昌明, 张丹. 中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 579-588. (LIU Changming, ZHANG Dan. Temporal and spatial change analysis of the sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological influencing factors in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 579-588. (in Chinese))
- [18] Gong L B, Xu C Y, Chen D L, et al. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin [J]. Journal of Hydrology, 2006, 329(3/4): 620-629.
- [19] Tabari H, Kisi O, Ezani A, et al. SVM, ANFIS, regression and climate based models for reference evapotranspiration modeling using limited climatic data in a semi-arid highland environment [J]. Journal of Hydrology, 2012, 444/445: 78-89.
- [20] 冯禹, 崔宁博, 魏新平, 等. 川中丘陵区参考作物蒸散量时空变化特征与成因分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 78-86. (FENG Yu, CUI Ningbo, WEI Xinping, et al. Temporal and spatial variations of reference crop evapotranspiration in Central Sichuan [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(14): 78-86. (in Chinese))
- [21] 赵璐, 崔宁波, 梁川, 等. 基于云模型的四川省潜在蒸散量时空分布研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2013, 45(1): 91-97. (ZHAO Lu, CUI Ningbo, LIANG Chuan, et al. Analysis on characteristics of temporal-spatial potential evapotranspiration distribution in Sichuan based on cloud model [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2013, 45(1): 91-97. (in Chinese))
- [22] 李俊晓, 李朝奎, 殷智慧. 基于 ArcGIS 的克里金插值方法及其应用[J]. 测绘通报, 2013, 9: 87-91. (LI Junxiao, LI Chaokui, YIN Zhihui. ArcGIS based Kriging interpolation method and its application [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013, 9: 87-91. (in Chinese))
- [23] 房林东, 廖卫红, 王明元, 等. 考虑高程的雨量反距离权重插值法研究[J]. 人民黄河, 2015, 37(9): 38-41. (FANG Lindong, LIAO Weihong, WANG Mingyuan, et al. Research of the inverse distance weighted interpolation method considering the elevation [J]. Yellow River, 2015, 37(9): 38-41. (in Chinese))
- [24] 卓玛兰草, 刘普幸, 张亚宁, 等. 甘肃黄土高原区潜在蒸散量时空变化与成因研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 70-75. (ZHUO Malancao, LIU Puxing, ZHANG Yaning, et al. Study on temporal and spatial changes of the potential evapotranspiration and its impact factors in loess plateau of Gansu province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(1): 70-75. (in Chinese))
- [25] 李德毅, 杜鹑. 不确定性人工智能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005. (LI Deyi, DU YI. Artificial intelligence with uncertainty [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese))
- [26] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, 6(8): 28-34. (LI Deyi, LIU Changyu. Study on the universality of the normal cloud model [J]. Engineering Science, 2004, 6(8): 28-34. (in Chinese))
- [27] 刘常昱, 李德毅, 杜鹑, 等. 正态云模型的统计分析[J]. 信息与控制, 2005, 34(2): 237-241. (LIU Changyu, LI Deyi, DU Yi, et al. Some statistical analysis of the normal cloud model [J]. Information and Control, 2005, 34(2): 237-241. (in Chinese))