

基于信息熵原理的东北地区参考作物蒸散量 时空特征分析

王富强^{1,2}, 赵乃立¹, 袁建平^{1,3}, 魏怀斌^{1,2}

(1. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450045; 2. 河南省协同创新中心, 河南 郑州 450046;
3. 水利部水资源管理中心, 北京 100053)

摘要:根据 1951—2013 年东北地区 116 个气象站点的常规气象资料, 基于信息熵理论构建了东北地区日参考作物蒸散量站点间的信息传输模型并分析了信息场的分布情况, 利用聚类分析法解析了东北地区日参考作物蒸散量的区域相似性结构特征; 并在此基础上选取 6 个代表性站点, 运用重标极差法分析了参考作物蒸散量(ET_0)的时间分形特征。结果表明: 空间上, 东北地区日参考作物蒸散量的信息熵随纬度增加而减小, 各站点信息传输指数随基站与辅站距离的增大而减小, 且具有明显的各向异性; 东北地区在站点群层面上的信息传输总体呈由南到北、由东到西的分布规律。时间上, 东北地区多年平均 ET_0 总体呈下降趋势, 哈尔滨、沈阳、赤峰、加格达奇、佳木斯、海拉尔 6 个代表性站点的 ET_0 在未来一定时段内的变化趋势趋于稳定且具有较强的持续性。

关键词:参考作物蒸散量; 时空变化; 信息熵; 模糊聚类分析; 重标极差法; 东北地区

中图分类号:P332.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)04-0006-07

Analysis of temporal and spatial characteristics of reference evapotranspiration in Northeast China based on information entropy theory//WANG Fuqiang^{1,2}, ZHAO Naili¹, YUAN Jianping^{1,3}, WEI Huaibin^{1,2} (1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 2. Cooperative Innovation Center of Henan Province, Zhengzhou 450046, China; 3. Water Resources Management Center, Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, Beijing 100053, China)

Abstract: Using conventional meteorological data from 116 meteorological stations in Northeast China from 1951 to 2013, an information transfer model of daily reference evapotranspiration (ET_0) between stations in Northeast China was constructed based on the information entropy theory, and the distribution of the information field was analyzed. The regional similarity structural characteristics of daily ET_0 were analyzed using the cluster analysis method. Then, six representative stations were chosen based on the analysis. The rescaled range analysis method was used to analyze the time fractal characteristic of ET_0 at the six stations. The results show that, in space, the information entropy of daily ET_0 decreases with the increase of latitude in Northeast China, and the information transfer index of each station, with significant anisotropy, decreases with the increase of distance between the basic station and the auxiliary station. The information transfer at the site level presents a general pattern of distribution from south to north and from east to west. In time, the mean annual ET_0 presents a generally decreasing trend in Northeast China, and the ET_0 of the six representative stations, i. e., the Harbin, Shenyang, Chifeng, Jagdaqi, Kiamusze, and Hailar stations, will tend to stabilize within a certain time period in the future and show strong persistence.

Key words: reference evapotranspiration; temporal and spatial characteristics; information entropy; fuzzy cluster analysis; rescaled range analysis method; Northeast China

参考作物蒸散量(ET_0)是指在一定气象条件下植被地带(高度为 8~15 cm、生长旺盛、水分充足、完全覆盖地面的绿色草丛植被)最大的蒸发蒸腾量^[1]。 ET_0 主要受近地表层气象因子的影响^[2],而我国东北地区地处地球环境变化最大的东亚季风区,气候特征具有空间上的复杂性和时间上的易变性^[3],导致东北地区 ET_0 在时空分布上呈现出不确定性和随机性。国内外关于 ET_0 时空变化特征的研究多采用遥感影像分析法或基于 GIS 的空间化技术^[4-5],对其不确定性与区域化特性的分析较少。针

对水文序列的时空不确定性,目前有研究基于信息熵原理与分形理论进行分析^[6-8]。Singh 等^[9-10]比较系统地总结了应用熵理论解决水文事件不确定性的原理与方法,并应用最大熵原理估计了可能性分布中的一些参数;张继国等^[11]对降水空间分布的结构特征进行了信息熵分析,提出了信息传输模型,刻画了降水空间分布的不均匀性;刘丙军等^[12]应用信息熵原理度量了作物需水量空间分布的不确定性,解析了湖南省作物需水量的相似性区间,为作物需水空间演化规律提供了一种新的方法。气象因子的复杂多变导致了 ET_0 的不确定性,但是气象因子在一定条件下会呈现出近似连续性或自相似性的特点,造成 ET_0 也存在区域间的相关性,为区域化问题的讨论创造了条件。Optis 等^[13-15]运用相似理论证实了临近区域近地表大气层气象因子具有自相似性的特点;刘丙军等^[16]运用分形维数确定了参考作物腾发量空间分布的无标度区间,为有资料地区研究成果向无资料地区的推广和移植提供了一种新的研究思路。

本文在分析东北地区 ET_0 时空变化趋势的同时,采用信息熵原理与重标极差法进一步探讨其时空分布的自相似性,以深入了解东北地区 ET_0 的内在规律,以期将研究成果移植于无资料地区,并为进一步开展气候变化对水文平衡与农业生产影响的研究提供依据。

1 研究方法

1.1 资料来源

选取东北地区 116 个地面气象观测站 1951—2013 年共 63 年的气温、风速、气压、日照时数等逐日气象资料,以及各站点的海拔、经纬度等地理要素资料,进行参考作物蒸散量的计算与时空特征分析,所选气象站点见图 1。

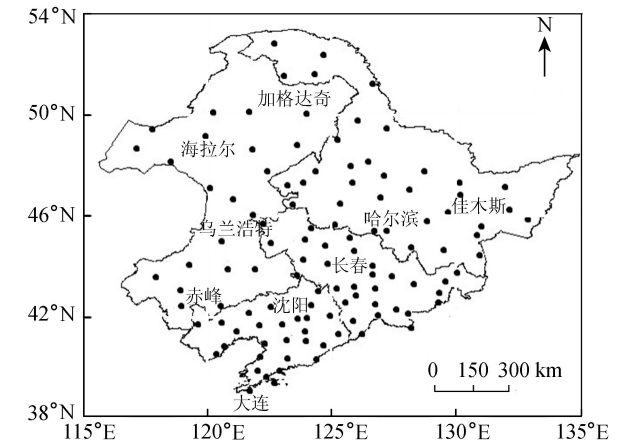


图 1 东北地区气象观测站分布情况

1.2 Penman-Monteith 公式

联合国粮农组织 (FAO) 修正后的 Penman-

Monteith 公式将能量守恒定律与物质传送方法结合起来,考虑了多种气象要素,是目前应用最广且精度较高的计算参考作物蒸散量的方法,计算公式如下:

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

式中: ET_0 为参考作物蒸散量,mm; Δ 为饱和水汽压-温度曲线的斜率,kPa/℃; R_n 为冠层表面净辐射,MJ/(m²·d); G 为土壤热通量,MJ/(m²·d); γ 为干湿球常数; T 为平均气温,℃; U_2 为高度为 2 m 处的风速,m/s; e_a 为饱和水汽压,kPa; e_d 为实际水汽压,kPa。

1.3 信息熵原理

熵指的是系统的混乱程度,1948 年 Shannon 将熵的概念引入信息论,认为信息熵是对随机变量不确定性或信息量的度量,信息量的获得意味着各可能性分布的概率集中,即“负熵”。对于随机变量 $X, P\{X=x_i\}=p(x_i)$,其中 $p(x_i) \geq 0, \sum_{i=1}^N p(x_i) = 1$ 。将 X 视作某站点多年 ET_0 序列,则该随机变量的信息熵为

$$H(X) = - \sum_{i=1}^N p(x_i) \log_2 p(x_i) \quad (2)$$

式中: $p(x_i)$ 为发生事件 x_i 的概率; N 为可能发生事件的总数。

设 Y 为另一随机变量,称 $H(X/Y)$ 为条件熵, $H(X,Y)$ 为联合熵, $I(X,Y)$ 为互信息,计算公式分别为

$$H(X/Y) = - \sum_{i,j} p(y_j) p(x_i/y_j) \log_2 p(x_i/y_j) \quad (3)$$

$$H(X,Y) = - \sum_{i,j} p(x_i,y_j) \log_2 p(x_i,y_j) \quad (4)$$

$$I(X,Y) = H(X) + H(Y) - H(X,Y) \quad (5)$$

式中: $p(y_j)$ 为发生事件 y_j 的概率; $p(x_i/y_j)$ 为在事件 y_j 条件下发生事件 x_i 的概率; $p(x_i,y_j)$ 为发生事件 x_i,y_j 的联合概率。

求取概率时采用等间距算法,即对于由 X,Y 组成的二维向量 (x,y) ,令 $\Delta_1 = x_{\max} - x_{\min}, \Delta_2 = y_{\max} - y_{\min}$,将 Δ_1, Δ_2 分别等分为 m_1, m_2 份,可生成 $m_1 \times m_2$ 的网格,所有点坐标 (x_i, y_j) 均分布在此网格内,记 N_{ij} 为落入格子 (i,j) 内点坐标的个数, N_i 为落在 $i-1$ 与 i 之间内点坐标的个数, N_j 为落在 $j-1$ 与 j 之间点坐标的个数,则

$$p(x_i, y_j) = \frac{N_{ij}}{N} \quad p(x_i) = \frac{N_i}{N} \quad p(y_j) = \frac{N_j}{N} \quad (6)$$

选取不同网格数会得到不同的概率值,文献

[17]定义了一个随系列长度变化的网格数计算公式:

$$m = 1.87(n - 1)^{2/5} \quad (7)$$

式中: m 为网格数; n 为系列长度。

信息传输是指将信息从一端经通信道路传送到另一端,并被对方所接收。对于气象观测站来说,相邻站点之间存在一种相互影响,文献[18-19]论证了将此理论应用到站点之间信息传输的可行性。文献[11]定义了一种判别此影响能力的指标,即有向信息传输指数 DITI,笔者将其记为 I_{ij} :

$$I_{XY} = \frac{I(X, Y)}{H(Y)} = \frac{H(Y) - H(Y/X)}{H(Y)} \quad (8)$$

$$I_{YX} = \frac{I(X, Y)}{H(X)} = \frac{H(X) - H(X/Y)}{H(X)} \quad (9)$$

式中 I_{XY} 、 I_{YX} 分别为两个方向互逆的信息传输指数。若两者均较大,则表明基站与辅站之间信息传输通畅;若两者一大一小,则数值较大的站点自身影响力较强;若两者均较小,则认为两站相互独立,处于不同的场域内。其他物理量含义见文献[11]。

1.4 重标极差法

重标极差法研究的是非线性系统中产生的不光滑和不可微现象。对于多年参考作物蒸散量日序列 $ET_0 = \{ET_{0,1}, ET_{0,2}, \dots, ET_{0,N}\}$,按年份将其分为 N 个子序列,子序列的均值定义为 E_m ,方差为 S_m ,则样本值 $ET_{0,i}$ 对于均值 ET_0 的累积横距的时间序列 $X_{k,m}$ 为

$$X_{k,m} = \sum_{i=1}^k (ET_{0,i} - E_m) \quad (k = 1, 2, \dots, n_z) \quad (10)$$

式中: $ET_{0,i}$ 为第 i 日的参考蒸散量; n_z 为子序列长度,其值为 365 或 366。

$ET_{0,i}$ 的极差 R_m 可表示为

$$R_m = \max(X_{1,m}, X_{2,m}, \dots, X_{k,m}) - \min(X_{1,m}, X_{2,m}, \dots, X_{k,m}) \quad (11)$$

重标极差为 R_m/S_m ,对长度为 n 的子序列计算其重标极差的平均值 $(R_m/S_m)_n$,利用最小二乘法建立回归方程:

$$\lg(R_m/S_m)_n = \lg c + H \lg n_z \quad (12)$$

式中: c 为常数; H 为 Hurst 指数,为该回归方程的斜率。

时间序列分维数 D 与 Hurst 指数的关系为

$$D = 2 - H \quad (13)$$

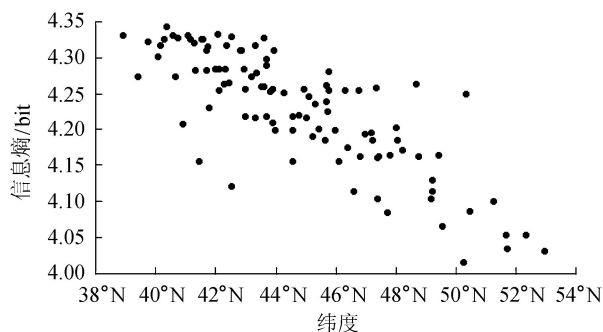
对应于不同的分维数,存在以下 3 种情况:当 $D = 1.5$ 时,表明序列间完全独立,没有相互依赖,高低值的出现是随机的;当 $D < 1.5$ 时,意味着未来的趋势与过去保持一致,具有持续性, D 值越接近 1,

说明持续性越强,反映在 ET_0 的变化规律上,如果过去 ET_0 呈增大趋势,未来仍将保持增大趋势,反之亦然;当 $D > 1.5$ 时,意味着未来的变化趋势与过去相反,具有反持续性,过去呈增大趋势则未来表现为减小趋势。

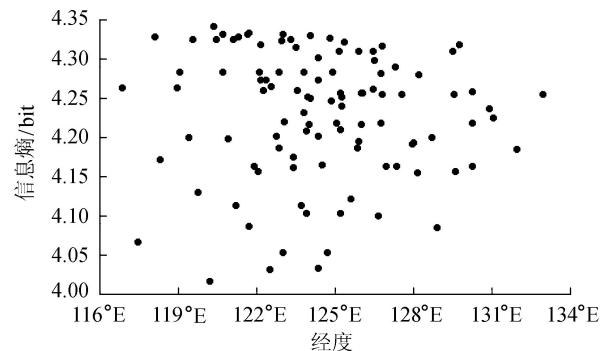
2 空间特征分析

2.1 信息熵分布特征分析

根据式(1)计算出 116 个站点 63 年逐日参考作物蒸散量,根据式(2)(6)(7)求得各站逐日参考作物蒸散量的信息熵,图 2 为各站信息熵与其所处纬度、经度的关系。图 2 表明:信息熵与纬度呈负线性关系,而与经度不存在线性关系。因参考作物蒸散量受温度、相对湿度、日照、风速等气象因子的影响,表明这些气象因子与纬度存在一定的相关关系,而与经度的相关关系不强。由熵的特性知:熵越大,不确定性越强,变量分布越趋于均匀,表明东北地区各站点随着纬度增大,逐日参考作物蒸散量的时序分布越趋于均匀。



(a) 单站信息熵与纬度的关系



(b) 单站信息熵与经度的关系

图 2 各站信息熵与其所处纬度、经度的关系

2.2 信息传输特征分析

根据各气象站地理位置及周围站点分布情况,选取资料系列较长的哈尔滨、沈阳、乌兰浩特、海拉尔 4 个气象站为基站,从每个基站出发分别沿东西、南北方向选取若干辅站,根据式(8)(9)计算出各基站与辅站之间的有向信息传输指数,选取乘幂曲线进行拟合,图 3 显示了 DITI 与基站与辅站之间距离 d 的关系。从图 3 可以看出:DITI 随着距离的增大

而减小;4 站均不同程度地显示出东西方向的 DITI 大于南北方向,这表明该 4 站沿东西方向的信息传输能力强于南北方向;在距离相当条件下,哈尔滨站与海拉尔站的 DITI 较大,表明其自身影响力较强,可以将信息传输得更远,其周围站点 ET_0 的变化规律与基站的变化规律一致性更强。

文献[11]定义了站点群信息传输指数 SDITI,笔者将其记作 D_s :

$$D_s = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^M I_{ij} \quad (j \neq i) \tag{14}$$

式中 M 为站点群内站点的总数。

分别在 $116^{\circ}\text{E} \sim 132^{\circ}\text{E}$ 与 $37^{\circ}\text{N} \sim 53^{\circ}\text{N}$ 范围内每隔 4° 的区域中均匀选取 10 个站点,从而将东北地区分为 8 个网格,分别计算其 SDITI,结果见表 1。由表 1 得出:随着纬度的增加,SDITI 逐渐增大,这说明在南北方向信息传输的总体方向为由南到北;同理,在东西方向信息传输的方向为由东到西。需要指出的是,由于站点个数与位置的限制, $37^{\circ}\text{N} \sim 41^{\circ}\text{N}$ 范围内站点总距离较其他区域小得多,而以上关于信息传输特征的分析已表明 DITI 与距离呈负相关,因此出现其 SDITI 较大的情况。

表 1 8 个站点群 SDITI 比较

纬度	SDITI	经度	SDITI
$37^{\circ}\text{N} \sim 41^{\circ}\text{N}$	30.47	$116^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$	27.09
$41^{\circ}\text{N} \sim 45^{\circ}\text{N}$	25.39	$120^{\circ}\text{E} \sim 124^{\circ}\text{E}$	28.17
$45^{\circ}\text{N} \sim 49^{\circ}\text{N}$	27.60	$124^{\circ}\text{E} \sim 128^{\circ}\text{E}$	29.12
$49^{\circ}\text{N} \sim 53^{\circ}\text{N}$	32.15	$128^{\circ}\text{E} \sim 132^{\circ}\text{E}$	33.26

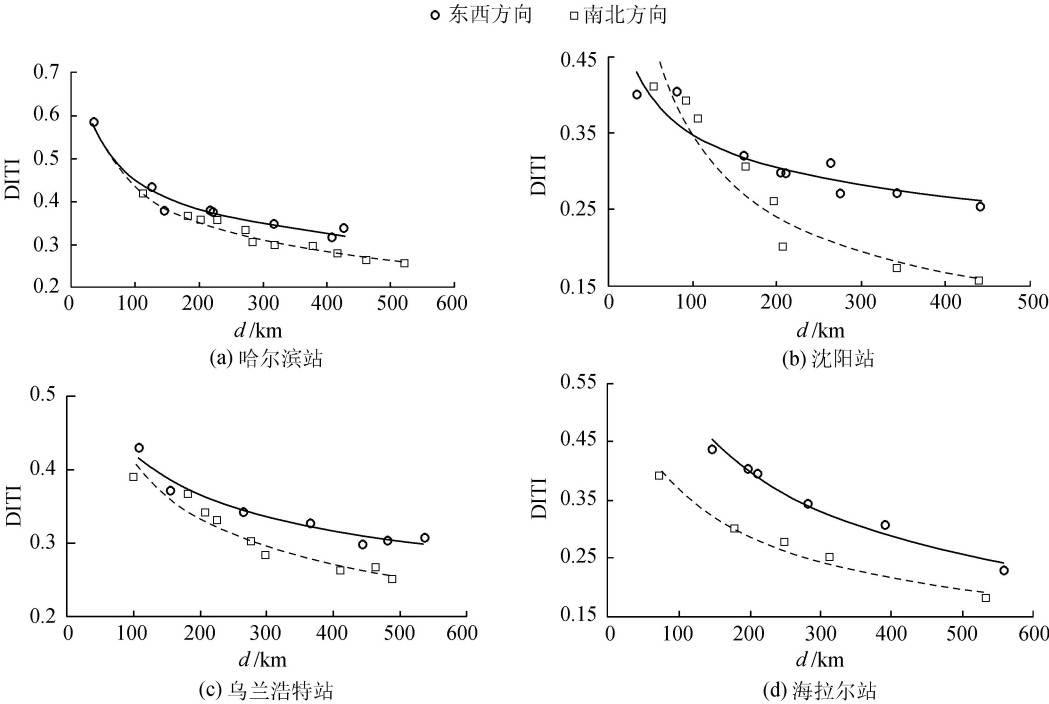


图 3 4 个代表站有向信息传输指数及其拟合曲线

2.3 信息场特征分析

为进一步研究 ET_0 的空间特性,将离散的站点连续化,根据以上拟合结果定义普遍意义上的有向信息传输指数函数:

$$D_{ST} = al_{ST}^{-b} \tag{15}$$

式中: l_{ST} 为站点 S 、 T 之间的距离; a 、 b 为参数,且 a 、 b 均大于零。

这种定义方式可将仅考虑有限离散站点之间的信息传输扩展为连续站点。由于 DITI 的普遍特性是随距离增大而减小,那么在理想状态下,距离趋于无限远时,DITI 应趋于零;而在实际情况下,由于自然与人为因素的影响,参考作物蒸散量有向信息传输指数衰减速率会大大增加,致使存在一个最大信息传输距离,超出此界限后,可认为两站点之间无相互影响。文献[11]将信息距离定义为 I_D ,表示如下:

$$I_D = (2 \int_0^L D_{ST} l_{ST} dl_{ST})^{1/2} \tag{16}$$

式中 L 为站点 S 距流域边界的距离。

以上定义方式均仅考虑站点的影响力或传输能力,并未考虑站点本身的信息量因素,而信息熵的增加意味着信息量的缺失,因此定义相对信息量:

$$I_{COE} = \frac{\log_2 n_i - H(x_i)}{\log_2 n_i} \tag{17}$$

式中: $H(x_i)$ 代表站点 i 的信息熵; n_i 为站点 i 日参考蒸散量系列的长度。

对上述信息距离进一步处理,以站点 S 为极点,向东引一条射线 SO 为极轴,建立极坐标系,对任一站点 T ,记 θ 为 ST 与 SO 之间的夹角, $\theta \in (0, 2\pi)$ 。

不可否认,信息传输函数中的参数与极角 θ 有关,因此定义信息场面积 Ω 如下:

$$\Omega = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} W^2 d\theta \tag{18}$$

其中 $W = I_{\text{COE}} \left(2 \int_0^L D_{ST} l_{ST} dl_{ST} \right)^{1/2}$ $I_{\text{COE}} \in (0,1)$

信息场的定义可将信息沿单一方向传输扩展为沿任意方向传输,符合信息传输的全方位性。由于站点的限制,无法求出所有方向的信息距离,只能得到无限趋近的信息场面积。图 4 为不同 θ 值时信息距离的分布。由图 4 可知: $\theta=0$ 时,信息距离高值区分布在内蒙古(东北地区,下同)大部、吉林西部以及辽宁西北部,最大值出现在乌兰浩特,其值为 580 km,低值区分布于黑龙江北部以及吉林、辽宁沿海地区; $\theta=\pi/4$ 时,高值区分布在黑龙江、吉林中东部,最大值 496 km 出现在依兰,低值区主要位于东北地区西部; $\theta=3\pi/4$ 时,高值区分布在内蒙古中北部,最大值 345 km 出现在海拉尔,低值区主要分布于辽宁大部与黑龙江、吉林沿边沿海地区; $\theta=3\pi/2$

时,高值区分布在辽宁大部,最大值出现在沈阳,其值为 792 km,低值区主要分布于东北地区北部。相同地区在 4 个不同方向具有不同的信息距离,甚至相差较大,说明站对之间的信息传输具有各向异性,这与地区地形地貌以及气候条件密切相关。

3 时间特征分析

3.1 ET_0 及相关气象因子变化趋势分析

根据聚类分析结果,选取分属不同区域的 6 个代表站点,分别为哈尔滨站、沈阳站、赤峰站、加格达奇站、佳木斯站、海拉尔站。统计出各站气象要素及参考作物蒸散量的月平均值、年平均值及其变化趋势。图 5 仅列出哈尔滨站各要素的年变化趋势,其中年积温总体呈增大趋势,年均相对湿度、年日照时数、年均风速总体呈下降趋势,经 M-K 趋势检验,所有因子均通过 99% 显著性检验。

其余 5 站年积温、年相对湿度、年日照时数与年均风速变化趋势大致与哈尔滨站一致,年 ET_0 除沈阳

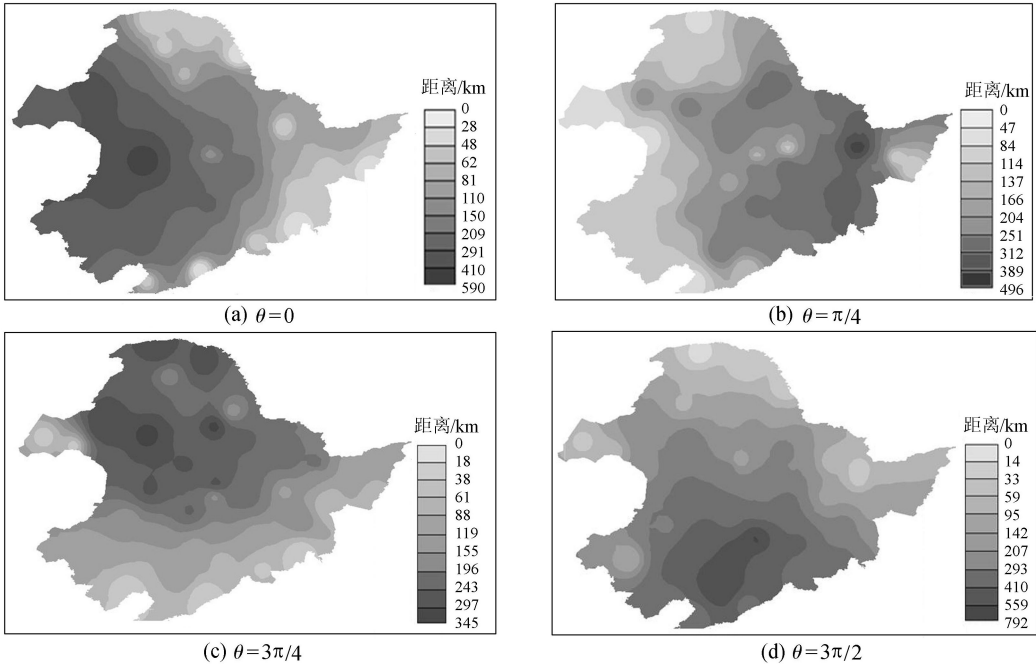


图 4 东北地区各站点沿不同方向信息距离分布

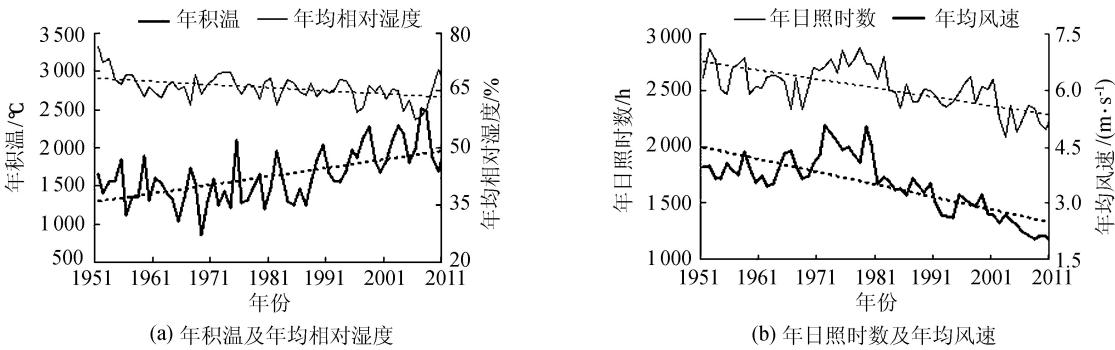


图 5 哈尔滨站相关气象要素年变化趋势

站、哈尔滨站呈减小趋势,其他 4 站均呈上升趋势。东北地区 116 个站点 ET_0 呈增大趋势的有 36 个,分布在东北地区北部、西南部及东南部,其余地区大多呈减小趋势。

图 6 显示东北地区年 ET_0 随时序呈轻微减小趋势,通过 95% 显著性检验,其线性倾向率为 -0.092 mm/a 。通过对其 63 年累积距平的考察,可将其变化过程分为以下几个时段:3 个上升期(1952—1965 年、1972—1982 年、1997—2009 年),2 个下降期(1983—1996 年、2010—2013 年),以及 1 个平值期(1966—1971 年)。1952—1965 年、1972—1982 年、1997—2009 年期间大多数年份为正距平值,阶段平均值分别为 953 mm 、 970 mm 、 971 mm ;前 2 个阶段 ET_0 呈波动上升趋势,线性倾向率分别为 4.11 mm/a 、 5.57 mm/a ;1997—2009 期间 ET_0 呈波动下降趋势,线性倾向率为 -1.45 mm/a 。1983—1996 年和 2010—2013 年为 2 个下降阶段,其间大多数年份为负距平值,阶段平均值分别为 938 mm 和 902 mm , ET_0 呈波动上升趋势,线性倾向率分别为 0.80 mm/a 和 0.15 mm/a 。

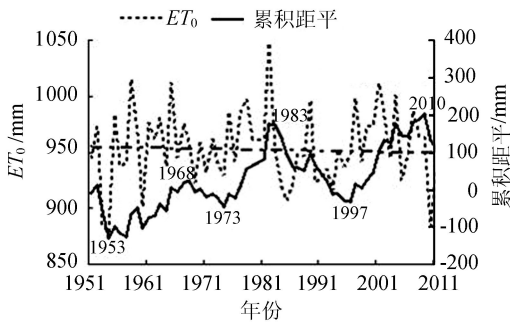


图 6 东北地区 ET_0 多年变化过程及累计距平

将 6 站多年平均月 ET_0 值时序绘于图 7,可知:各站 ET_0 年内变化基本呈近似抛物线,除海拉尔最大月峰值出现在 6 月外,其余代表站均出现在 5 月,峰值由高到低依次为:赤峰、沈阳、哈尔滨、海拉尔、佳木斯、加格达奇,总体上呈现由南至北 ET_0 减小的趋势。逐日 ET_0 最大值依次为:哈尔滨 14.8 mm/d 、沈阳 13.1 mm/d 、赤峰 12.5 mm/d 、加格达奇 9.4 mm/d 、佳木斯 14.4 mm/d 、海拉尔 13.0 mm/d 。

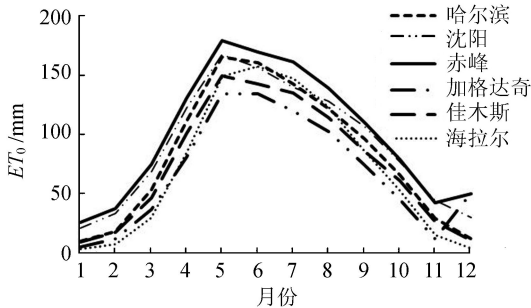


图 7 6 个代表站多年平均月 ET_0 年内变化过程

3.2 ET_0 时间分形特征

根据不同时间尺度(年尺度与月尺度)的 ET_0 ,采用式(10)~(12)拟合出 6 站的 Hurst 指数,根据式(13)得出分维数,列于表 2 中。

表 2 6 个代表站不同时间尺度的分维数

时间尺度	哈尔滨	沈阳	赤峰	加格达奇	佳木斯	海拉尔
1 月	1.285	1.213	1.226	1.223	1.274	1.332
2 月	1.318	1.173	1.308	1.189	1.250	1.235
3 月	1.183	1.306	1.182	1.340	1.319	1.447
4 月	1.329	1.209	1.307	1.266	1.203	1.496
5 月	1.226	1.391	1.250	1.244	1.454	1.356
6 月	1.385	1.345	1.373	1.413	1.401	1.371
7 月	1.490	1.330	1.301	1.372	1.497	1.390
8 月	1.398	1.409	1.239	1.381	1.359	1.261
9 月	1.323	1.295	1.441	1.246	1.274	1.374
10 月	1.372	1.376	1.425	1.317	1.366	1.239
11 月	1.227	1.239	1.225	1.289	1.323	1.277
12 月	1.197	1.382	1.369	1.242	1.342	1.233
年	1.174	1.143	1.168	1.177	1.237	1.229

由表 2 可知:年尺度下各站点分维数均小于 1.5,意味着 ET_0 年序列在将来一段时间内仍然保持与过去相一致的变化趋势,即哈尔滨站、沈阳站呈减小趋势,其余 4 站呈增大趋势,各地区 ET_0 年序列具有持续性。6 个站点中沈阳站分维数最小,持续性最明显。

对比 ET_0 月序列可知:各站点各月分维数同样小于 1.5,意味着未来一段时间内 ET_0 月序列与过去相应月份保持一致的变化趋势,各地区 ET_0 月序列具有持续性。另外,6 站年尺度下的分维数均小于月尺度,说明年序列的持续性比月序列更明显。

由 6 站点各月分维数对比可知:1 月海拉尔分维数最高,沈阳最低,分别为 1.332、1.213,表明沈阳 ET_0 在历年 1 月的下降趋势较海拉尔明显;4 月海拉尔站与 7 月佳木斯站分维数接近 1.5,表明其 ET_0 的变化趋势几乎不具有持续性;除 4 月与 7 月之外,其余月份分维数最小值依次出现在沈阳、赤峰、哈尔滨、海拉尔、赤峰、加格达奇、海拉尔、赤峰、哈尔滨,分维数最小值出现的地域具有一定的随机性;6 站各月分维数较小值大多分布在 12 月至次年 3 月,而较大值大多出现在 5 至 9 月,说明东北地区冬季参考蒸散量未来的变化趋势具有较强的稳定性,而夏秋季则会呈现一定程度的波动。

4 结 论

a. 随着纬度的增加,日参考蒸散量的时序分布趋于均匀;有向信息传输指数 DITI 随着基站与辅站距离的增大而减小,沿不同方向衰减速率不一,但却具有相同的函数形式;东北地区在站点群层面上的

信息传输总体呈现由南到北、由东到西的分布规律。

b. 根据信息传输指数衰减函数建立了信息传输模型,发现东北地区各站点信息距离分布具有各向异性,不同站点沿不同方向的信息距离相差较大,通过区域传输规律可将有资料或资料系列较长地区的成果移植于无资料地区。

c. 东北地区年 ET_0 总体呈轻微减小趋势,年内变化近似呈抛物线,峰值出现在5—6月;除佳木斯站7月与海拉尔站4月的 ET_0 分维数接近1.5外,6个代表站点其余时段的 ET_0 分维数均较小,表明其未来一段时间内的变化趋势稳定且具有持续性。

参考文献:

[1] TRAJKOVIC S, KOLAKOVIC S. Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions[J]. *Water Resources Management*, 2009, 23(14): 3057-3067.

[2] 王卫光,彭世彰,罗玉峰. 参考作物腾发量的混沌性识别及预测[J]. *水利学报*, 2008, 39(9): 1030-1036. (WANG Weiguang, PENG Shizhang, LUO Yufeng. Chaotic behavior analysis and prediction of reference crop evapotranspiration[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(9): 1030-1036. (in Chinese))

[3] 张淑杰,张玉书,隋东,等. 东北地区参考蒸散量的变化特征及其成因分析[J]. *自然资源学报*, 2010(10): 1750-1761. (ZHANG Shujie, ZHANG Yushu, SUI Dong, et al. Changes in reference evapotranspiration and its causes in Northeast China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2010(10): 1750-1761. (in Chinese))

[4] VETTER S H, SCHAFFRATH D, BERNHOFER C. Spatial simulation of evapotranspiration of semi-arid Inner Mongolian grassland based on MODIS and eddy covariance data[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 65(5): 1567-1574.

[5] 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. (ZENG Lihong, SONG Kaishan, ZHANG Bo, et al. Spatiotemporal variability of reference evapotranspiration over the northeast region of China in the last 60 years[J]. *Advance in Water Science*, 2010, 21(2): 194-200. (in Chinese))

[6] SINGH V P. Entropy measures, maximum entropy principle and emerging applications[M]. Berlin: Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co., 2003: 261-297.

[7] CHAPMAN T G. Entropy as a measure of hydrologic data uncertainty and model performance [J]. *Journal of Hydrology*, 1986, 85: 111-126.

[8] 张劲松,孟平,高峻,等. 山茱萸人工林蒸腾速率混沌及分形特征[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(4): 661-666.

(ZHANG Jingsong, MENG Ping, GAO Jun, et al. Chaotic and fractal characteristics of transpiration rate of *Cornus officinalis* plantation [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(4): 661-666. (in Chinese))

[9] SINGH V P. The use of entropy in hydrology and water resources [M]. Baton Rouge: Hydrological Processes, 1997: 587-626.

[10] SINGH V P, FIORENTINO M. A historical perspective of entropy applications in water resources [J]. *Entropy and Energy Dissipation in Water Resources*, 1992, 9: 21-61.

[11] 张继国,刘新仁. 降水时空分布不均匀性的信息熵分析[J]. *水科学进展*, 2000, 11(2): 133-143. (ZHANG Jiguo, LIU Xinren. Information entropy analysis on nonuniformity of precipitation distribution in time-space [J]. *Advance in Water Science*, 2000, 11(2): 133-143. (in Chinese))

[12] 刘丙军,邵东国,曹卫锋. 基于信息熵原理的作物需水空间相似性分析[J]. *水利学报*, 2005, 36(12): 1439-1444. (LIU Bingjun, SHAO Dongguo, CAO Weifeng. Spatial similarity analysis of crop water requirement based on information entropy theory [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(12): 1439-1444. (in Chinese))

[13] OPTIS M, MONAHAN A, BOSVELD F C. Moving beyond monin-obukhov similarity theory in modelling wind-speed profiles in the lower atmospheric boundary layer under stable stratification [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2014, 153(3): 497-514.

[14] KELLY M, GRYNING S E. Long-term mean wind profiles based on similarity theory [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2010, 136(3): 377-390.

[15] HARTOGSIS O K, de BRUIN H A R. Monin-Obukhov similarity functions of the structure parameter of temperature and turbulent kinetic energy dissipation rate in the stable boundary layer [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2005, 116(2): 253-276.

[16] 刘丙军,邵东国,沈新平. 参考作物腾发量空间分形特征初探[J]. *水利学报*, 2007, 38(3): 337-341. (LIU Bingjun, SHAO Dongguo, SHEN Xinping. Study on spatial fractal features of reference crop evapotranspiration [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(3): 337-341. (in Chinese))

[17] 庄楚强,吴亚森. 应用数理统计基础[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1992.

[18] YEH H C, CHEN Y C, WEI C, et al. Entropy and kriging approach to rainfall network design [J]. *Paddy and Water Environment*, 2011, 9(3): 343-355.

[19] MONDAL N C, SINGH V P. Evaluation of groundwater monitoring network of Kodaganar River Basin from southern India using entropy [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(4): 1183-1193.

(收稿日期: 2015-03-25 编辑: 骆超)