

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.017

基于云模型的安徽省干湿指数时空分布特征研究

孙朋 郭忠臣 刘娜 戴洪宝 苏海民
(宿州学院环境与测绘工程学院, 宿州 234000)

摘要: 为探究变化背景下安徽省干湿指数时空分布格局,利用安徽省 1957—2016 年的逐日气象观测数据,在采用区域修正模式的 FAO 56 Penman – Monteith 模型计算潜在蒸散量(ET_0)的基础上,通过云模型定量描述近 60 年安徽省干湿指数(AI)的时空分布特征、均匀性和稳定性。结果表明:安徽省 AI 、 ET_0 呈现波动下降趋势,倾向率分别为 -0.006 a^{-1} 和 -0.583 mm/a ,降水量 P 呈现 1.155 mm/a 的上升趋势, ET_0 和 P 的相向趋势造成了 AI 的逐渐降低,近 60 年安徽省总体呈现变湿趋势。相较于 ET_0 与 AI , P 最为离散,稳定性最差。在四季尺度上,以夏季为主导 (-0.012 a^{-1}) 的夏秋冬 AI 降低为安徽省干湿变化主要特征, AI 超熵值由高到低依次为夏季、秋季、春冬季,不确定性逐渐降低;四季 ET_0 变化熵值均低于年均熵值,四季 ET_0 模糊性与随机性较差,冬季 ET_0 具有最大不稳定性;夏冬季节的雨雪增加与春秋季节降水量减少是安徽省四季降水格局的主要表现形式,且夏季降水增加趋势显著 (2.467 mm/a),同时表现出最大的不均匀性和不稳定性。在空间尺度上, AI 、 ET_0 和 P 均呈现皖南至皖北的梯度变化特征,出现非平滑纬度地带性现象,空间上各区域熵与超熵均高于时间序列,空间上 AI 的分布更为离散、不稳定。

关键词: 干湿指数; 安徽省; 潜在蒸散量; 云模型; 时空分布

中图分类号: S161.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)04-0147-09 OSID: 

Spatio-temporal Distribution Characteristics of Dry – Wet Index
in Anhui Province Based on Cloud Mode

SUN Peng GUO Zhongchen LIU Na DAI Hongbao SU Haimin
(School of Environmental and Surveying Engineering, Suzhou University, Suzhou 234000, China)

Abstract: Spatio-temporal characteristics of dry – wet change are the key characterization of regional hydrological response under global change. To explore the temporal and spatial distribution characteristics of dry – wet index in Anhui Province under the background of global change, spatio-temporal distribution characteristics of aridity index was comprehensively investigated for 15 meteorological stations during 1957—2016 in Anhui Province. Based on the calculation of potential evapotranspiration (ET_0) by the FAO 56 Penman – Monteith model with regional correction mode, the temporal and spatial distribution characteristics, uniformity and stability of the dry—wet index (AI) in Anhui Province in the past 60 years were quantitatively described by the cloud model. The AI and ET_0 in Anhui Province showed a downward trend, with propensity rates of -0.006 a^{-1} and -0.583 mm/a , respectively, and P showed an upward trend of 1.155 mm/a . The opposite trend of ET_0 and P caused the AI to gradually decrease. Anhui Province generally showed a trend of becoming wet. P was the most discrete and had the worst stability compared with ET_0 and AI . On the four-season scale, summer-autumn and winter AI , which was dominated by summer (-0.012 a^{-1}), was the main feature of dry – wet change in Anhui Province. The AI super-entropy value with descending order was summer, autumn, spring and winter, and the uncertainty was gradually reduced. The change entropy of ET_0 in the four seasons was lower than the annual average entropy. The ambiguity and randomness of the four seasons' ET_0 were poor. The winter ET_0 had the greatest instability. The increase of rain and snow in summer and winter and the decrease of

收稿日期: 2019-07-30 修回日期: 2019-10-02

基金项目: 安徽省教育厅高校自然科学重点项目(KJ2019A0670)、安徽省自然科学基金项目(1808085QE176)、宿州学院博士科研启动基金项目(2017jb04)、安徽省高校优秀青年人才支持计划重点项目(gxyqZD2016347)、宿州学院产学研项目(2018hx023)和宿州学院重点科研项目(2019yzd01)

作者简介: 孙朋(1989—),男,讲师,博士,主要从事资源环境学和生态水文学研究,E-mail: ecosunp@163.com

precipitation in spring and autumn were the four seasons' characteristics in Anhui Province. The main form of the pattern and the summer precipitation were increased significantly (2.467 mm/a), while showing the greatest unevenness and instability. Spatial scale, AI , and P showed the reference crop evapotranspiration variation gradient of Wannan to Wanbei appeared non-smooth latitudes phenomenon, the spatial region of each entropy size was higher than the super time series entropy, and the spatial distribution characteristics of AI were more discrete and unstable.

Key words: dry – wet index; Anhui Province; potential evapotranspiration; cloud model; spatio-temporal distribution

0 引言

随着全球气候变化的日益加剧,区域水热变化过程以及气候风险格局变化日益显著^[1-3]。干湿指数是区域气候状况、水热过程的重要表征指标之一,是开展区域水热过程研究、干旱监测预警、生态环境保护、气候干湿分异界限划分等领域研究的重要内容和关键参数^[4-8]。典型区域干湿指数特征描述^[3]、时空分布特征^[5,8-9]的研究受到众多学者的关注。关于干湿指数的时空特征研究,在地理空间维度上分布在全国^[3,10-12]、西北地区^[8]、新疆^[9]、黄土高原^[13]、宁夏^[14]、河南^[15]等干旱、半干旱区域居多地区,指数选取多基于降水与蒸散比值的干燥指数^[3,10,12,16],而考虑水热盈亏的降水与蒸散差值与蒸散比值的 AI 逐渐得到广泛应用^[8-9,14],研究方法多为趋势分析法^[3,7]、相关分析法^[3,5]、周期分析法^[9,14]和地统计学法^[3,5,17]等,从不同传统序列维度开展干湿指数的时空特征分析。

干湿指数是降水量与蒸散量等多因素影响的结果,由于二者时间上的多变性、空间分布的差异性、影响因子的多重性,造成其时空分布特征量化描述难以开展^[9],加之蒸散发和降水在时间变化上具有周期性、随机性和区域变化上的相似性与特殊性,造成不同时空尺度的精确测定和估算存在一定难度^[18]。云模型作为在传统模糊集理论和概率统计的基础上提出的定性定量不确定性的转换模型^[19],成为表征气象要素变化时空分异规律和机理的有效途径,和实现不同时空尺度气象要素的精确估算和预测的重要手段,并在蒸散发时空分布^[18-19]、降水分布特征与预测^[20-21]、土地资源评价^[22]等领域得到广泛应用,但在干湿指数时空分布不稳定性研究上较为少见。

安徽省位于华北平原和长江中下游平原交汇地带,淮河与长江穿境而过,气候分异、地形地貌南北差异明显^[23],是开展区域水热研究的典型区域。目前对安徽省干湿指数研究主要集中在传统方法、单一水热参量^[23-24]方面。本文利用云模型、MK 检验

等方法分析 1957—2016 年的 AI 时空分布特征与区域差异,以期深入了解安徽省干湿分异规律,对多流域、多气候带和复杂地形分布区域的干湿指数变化研究提供新的思路和方法。

1 数据来源

安徽省位于中国华东地区,东经 114°54' ~ 119°37',北纬 29°41' ~ 34°38'之间(图 1),属于暖温带半湿润季风气候和亚热带湿润季风气候交互地带,过渡性特征显著,全省年均气温在 14 ~ 17℃之间,日照 1 800 ~ 2 500 h,平均无霜期 200 ~ 250 d,年降水量在 800 ~ 1 800 mm,从南至北递减,区域差异明显,降水多集中在夏季,雨热同期;安徽省地势海拔为南高北低,西高东低,地跨长江、淮河、新安江三大流域,由于气候条件分布差异,造成区域降水年际变化大,研究区内常有旱涝等自然灾害发生。

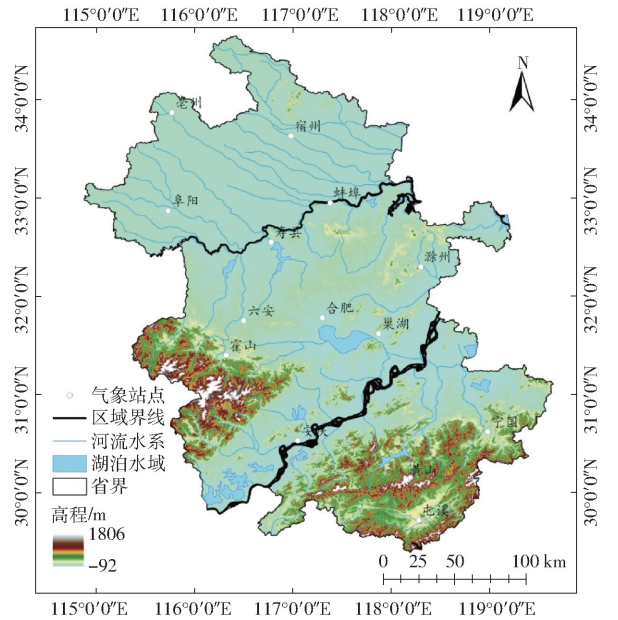


图 1 研究区概况与气象站点分布

Fig. 1 Location and distribution of meteorological stations in Anhui Province

选取 1957—2016 年安徽省 14 个气象站 1957—2016 年逐日气象观测序列,划分皖北(蚌埠、淮北、宿州、亳州)、皖中(霍山、合肥、滁州、寿县、六安、巢

湖、安庆)和皖南(屯溪、黄山、宣城)3个区域,数据包括逐日最高和最低气温、气压、相对湿度、降水量、风速和日照时数等要素,数据来源于中国气象数据共享服务中心(<http://cdc.cma.gov.cn>)。获取数据经过个别缺失值和异常值处理后,基于 Matlab、ArcGIS 平台开展数据分析。

2 研究方法

2.1 干湿指数

干湿指数(AI)是通过潜在蒸散量对比降水量和潜在蒸散量之间的差值,AI 计算式为^[8]

$$AI = \frac{ET_0 - P}{ET_0} \tag{1}$$

式中 AI——干湿指数
ET₀——潜在蒸散量,mm
P——降水量,mm

如果降水量为零,则 AI 为 1,表明研究区干旱,如果降水量大于或等于潜在蒸散量,则 AI 为负值或零,表明研究区较为湿润。

2.2 潜在蒸散量计算与修正

2.2.1 FAO-56PM 方法的 ET₀计算

FAO 在 1998 年推荐的 Penman - Monteith 公式较全面地考虑了影响潜在蒸散量的各种因素^[25],并且应用于湿润和干旱等各种气候条件地区时,都取得了较好的效果,其计算精度高于其他方法^[26-32]。计算式为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273}U_2(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \tag{2}$$

式中 Δ——饱和水汽压随温度变化的斜率, kPa/℃
R_n——净辐射, MJ/(m²·d)
G——土壤热通量密度, MJ/(m²·d)
γ——干湿表常数, kPa/℃
T——日平均气温,℃
U₂——2 m 高处风速, m/s
e_a——饱和水汽压, kPa
e_d——实际水汽压, kPa

2.2.2 FAO-56PM 区域适用性修正

FAO-56PM 公式参数的区域化修正是进行潜在蒸散估算的前提^[33],因此,式(2)中气象数据参照曹雯等^[23]在安徽最优参考作物蒸散估算模型的参数化方案:净辐射的算法根据经辐射校正的邓根云法、气压和水汽压使用实测值。校正后净辐射计算式为^[23-34]

$$R_{nl} = \sigma \frac{T_{min}^4 + T_{max}^4}{2} (0.32 - 0.26 \sqrt{10e_a}) \cdot \left(0.3 + 0.7 \frac{n}{N}\right) \tag{3}$$

式中 σ——Stefan - Boltzmann 常数,取 4.903 × 10⁹ MJ/(K⁴·m²·d)
T_{min}——日最低气温, K
T_{max}——日最高气温, K
n——实际日照时数, h
N——可能日照时数, h

2.3 云模型

设 U 是一个精确数值表示的论域, C 是 U 上的定性概念,对于任意一个论域中的元素 x,都存在一个有稳定倾向的随机数 μ(x) ∈ [0,1],即为 x 对 C 的隶属度,则 x 在论域 U 上的分布称为云(cloud),每个 x 称为云滴。

采用云的数字特征期望 E_x、熵 E_n和超熵 H_e表示语言值的数学性质。熵(E_n)是定性概念不确定性的度量,反映了能够代表这个定性概念的云滴离散程度,即相对于平均值的离散程度, E_n越大,表明序列越分散;超熵(H_e)用来度量熵(E_n)的不均匀程度,即熵的熵,体现了序列不均匀性的稳定程度。云模型的实施可通过正向云与逆向云实现。

2.3.1 正向云发生器

CG(E_x, E_n, H_e, n) 输入:数字特征,生成云滴个数;输出:n 个云滴 x 及其确定度 drop(x_i, μ_i), i = 1, 2, ⋯, n。具体计算步骤如下^[18-20]:

- (1)生成以 E_n为期望值, H_e²为方差的一个正态随机数 E'_{ni} = NORM(E_n, H_e²)。
- (2)生成以 E_x为期望值, E'_{ni}²为方差的一个正态随机数 x_i = NORM(E_n, E'_{ni}²)。
- (3)计算确定度 μ_i。
- (4)具有确定度 μ_i的 x_i成为数域中的一个云滴。
- (5)重复步骤(1)~(4),直到产生要求的 n 个云滴为止。

2.3.2 逆向云发生器

CG-1(E_x, E_n, H_e, n)输入:样本点 x_i,其中 i = 1, 2, ⋯, n;输出:反映定性概念的数字特征(E_x, E_n, H_e)。具体计算步骤如下:

- (1)根据 x_i计算数据样本均值: $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$;一阶样本绝对中心矩: $a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{X}|$;样本方差: $S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2$ 。

- (2)期望为: $E_x = \bar{X}$ 。
- (3)由样本均值获得熵: $E_n = \sqrt{\frac{\pi}{2} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - E_x|}$ 。
- (4)超熵为: $H_e = \sqrt{S^2 - E_n^2}$ 。

3 结果与分析

3.1 安徽省干湿指数时间分布特征

3.1.1 干湿指数与水热参量际变化特征分析

近60年安徽省干湿指数(AI)变化、潜在蒸散量(ET_0)和降水量(P)随时间的变化特征如图2所示。近60年安徽省各站年平均潜在蒸散量为995.97 mm,1996年为最小值916.5 mm,1978年 ET_0 最大,为1 185.7 mm,由 ET_0 滑动平均值可以看出,研究区潜在蒸散量波动起伏较为显著,出现“三峰两谷”特征,其中1982—2002年为较长时期的低谷期。线性变化显示,安徽省潜在蒸散量以 -0.583 mm/a 的倾向率下降,85%站点都呈下降趋

势,与我国潜在蒸散量的变化趋势相一致,变幅低于淮河流域蒸散变化率(-0.802 mm/a)^[35];同时期安徽省年降水均值为1 070.34 mm,降水最大、最小值分别为1991年的675 mm和1978年的1 500 mm,兼具暖温带湿润气候和亚热带季风湿润气候降水特点,线性趋势表明,1957—2016年,安徽省降水量以 1.155 mm/a 趋势上升,降水量增加速率高于同期潜在蒸散量,1982—2002年降水出现较大的起伏波动;研究时段干湿指数波动起伏与蒸散量较为一致,研究时段干湿指数年均值为 -0.079 ,线性趋势表明AI以 -0.006 a^{-1} 的倾向率下降,其中88%的站点通过0.05水平检验,干湿指数变幅在 $-0.44\sim0.31$ 之间,说明安徽省近60年总体呈现变湿趋势。潜在蒸散量和降水量作为干湿指数的主控因素,安徽省研究时段内降水的增加趋势与蒸散量的减少趋势共存,二者的相向趋势造成了干湿指数的逐渐降低趋势,气候变湿。

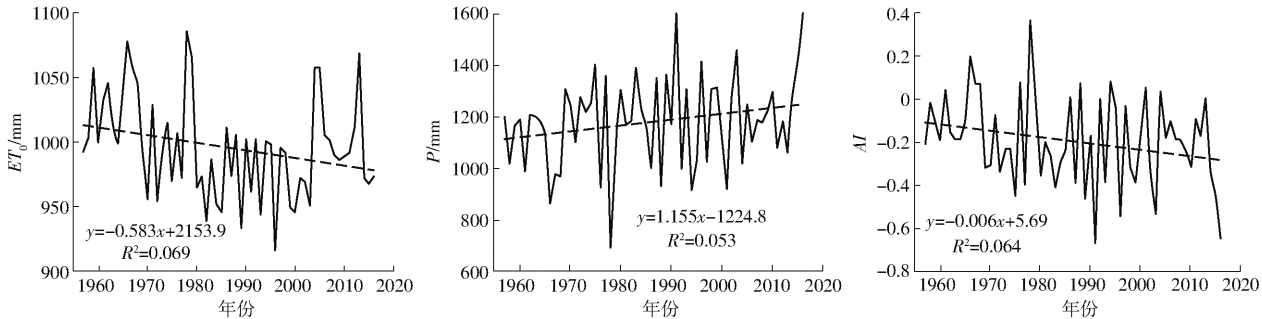


图2 1957—2016年安徽省蒸散发与 ET_0 、P、AI变化趋势

Fig.2 Annual changes of ET_0 , P and AI index in Anhui Province from 1957 to 2016

通过安徽省 ET_0 、P和AI时间序列的隶属云图(图3)可以看出,安徽省 ET_0 在近60年平均值为995.97 mm,熵为37.6,对论域中有贡献的云滴主要落在[883.17,1 108.77] mm区间中,超熵9.06,蒸散发时间分布不均匀性较大。同期降水量期望为1 070.34 mm,熵为127.05,对论域中有贡献的云滴主要落在[689.15,1 451.45] mm区间中,超熵为34.19,云滴“厚度”远大于潜在蒸散量,降水量在时

间序列上的变化稳定性更差;安徽省1957—2016年AI期望为 -0.079 ,熵为0.16,对论域中有贡献的云滴主要落在 $[-0.52,0.4]$ 区间中,超熵为0.007 6,超熵 H_e 反映了熵的离散程度,体现了确定度的不确定性,其值反映不均匀性的稳定性,AI时间序列稳定性较差。

为了进一步分析比较干湿指数在时间序列的变化特征,基于Mann-Kendall法分别针对 ET_0 、P和

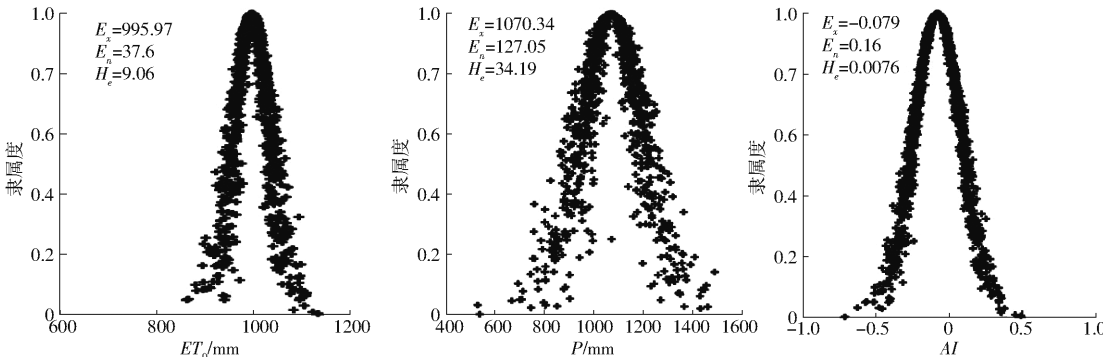


图3 安徽省1957—2016年潜在蒸散量、降水量和干湿指数时间数字特征隶属度云图

Fig.3 Temporal distribution clouds of ET_0 , P and AI in Anhui Province from 1957 to 2016

AI 做了突变分析(图 4)。由图 4 可知,近 60 年,安徽省 ET_0 呈明显的下降趋势,并且从 80 年代开始这种趋势超过 0.001 显著性水平,UK 和 UB 曲线于 1971 年相交于信度为 0.01 的置信线 $U = \pm 1.96$ 之间,则 1972 年即为安徽省潜在蒸散量明显减少的突变点;通过降水量突变检验可以看出,近 60 年降水量 UK 曲线呈增加趋势,并于 1972 年由负值变为正值,UK 和 UB 曲线于 1970—2000 年数次相交于信度为 0.01 的置信线 $U = \pm 1.96$ 之间,说明降水量波动起伏较大,符合过渡区降水变化特征,降水 MK 变化趋势改变在此阶段的多阶段起伏变化多,说明降水量相对于其平均值在此时期分布就越为离散,即

降水在时间上分布不均匀,与图 3 降水云图分析的结果一致;对安徽省近 60 年 *AI* 进行突变检测可看出,安徽省干湿指数呈现降低趋势,1970 年之后 UK 和 UB 曲线两次相交于 1972 年和 2002 年,表明 1972 年为安徽省 *AI* 减小的突变点,2002 年为安徽省 *AI* 增加的突变点,三者 1980 年都存在信号突变,与全球和中国气候在 1980 年显著变化的信号一致^[9]。由图 4 可以看出,降水量的波动起伏最为剧烈,时间序列分布脱离平均值离散度最高,Mann-Kendall 方法对于此种量化尚存在不足,云模型降水量的熵实现了这种不均性的量化,同时云模型超熵还实现了不均匀性稳定程度的量化。

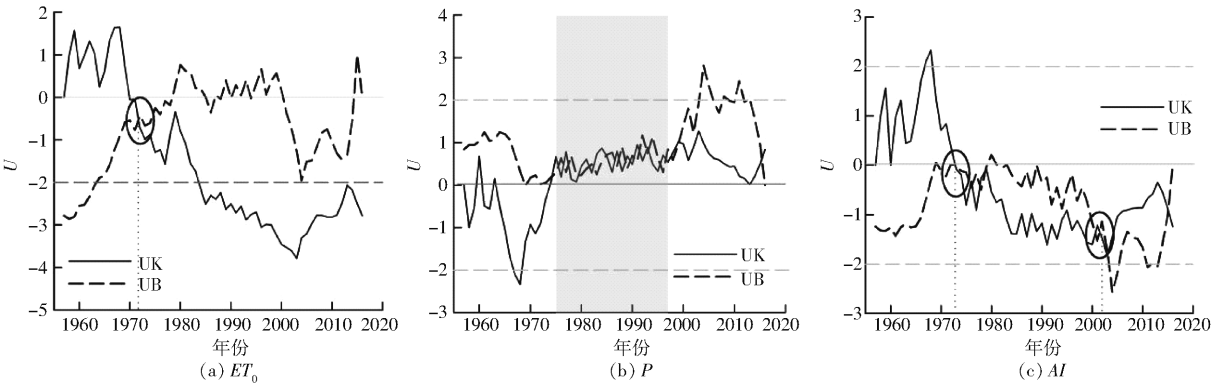


图 4 安徽省 ET_0 、 P 和 AI 突变检验

Fig. 4 Mann-kendall test of ET_0 , P and AI in Anhui Province

3.1.2 ET_0 、 P 和 AI 季节变化分析

从安徽省潜在蒸散量、降水量和干湿指数的季节云特征变化(表 1)来看,1957—2016 年安徽省 ET_0 由大到小为夏季、冬季、春季、秋季,倾向率表明多年来 ET_0 春季呈增长趋势,夏、冬、秋季依次呈减小趋势,且夏季潜在蒸散降低是主导 (-1.017 mm/a),和我国东部地区相关研究相同,主要是受到云量增加、辐射能力削弱所致^[36]。四季

变化熵均低于年均熵,说明区域四季蒸散变化的模糊性与随机性较差,夏春季不确定性较差,秋冬季确定性较好;超熵变化表明,冬季蒸散具有最大的不稳定性,秋夏季次之,春季最为稳定。日照时数和风速作为安徽省蒸散下降趋势最主要贡献参量^[37],夏季降水的增加一定程度降低了研究区日照时数变化趋势,加之夏季相对湿度的快速增加造成了研究区蒸散量四季变化现象。

表 1 安徽省 ET_0 、 P 和 AI 季节云模型数字特征和变化趋势

Tab. 1 Cloud model digital characteristics of season distribution of ET_0 , P and AI in Anhui Province

时间	ET_0 云特征模型				P 云特征模型				AI 云特征模型			
	期望	熵	超熵	倾向率/ ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)	期望	熵	超熵	倾向率/ ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)	期望	熵	超熵	倾向率/ a^{-1}
春季	265.49	20.71	0.01	0.423	313.45	78.19	0.17	-0.647	0.36	-2.00	0.04	0.004
夏季	328.69	28.44	1.43	-1.017	532.12	124.21	25.00	2.467	0.49	-0.66	0.09	-0.012
秋季	254.12	16.13	5.03	-0.154	210.17	70.17	12.93	-0.008	0.31	0.16	0.05	-0.000 2
冬季	280.74	15.58	15.85	-0.262	126.50	42.33	8.33	0.547	0.16	0.54	0.04	-0.003
全年	995.97	37.60	9.06		1 070.3	127.05	34.19		0.19	-0.05	0.05	

夏冬季节的雨雪增加与春秋季降水量减少是安徽省四季降水格局的主要表现形式,且夏季降水增加趋势显著(2.467 mm/a),远高于我国夏季降水增加趋势,其降水增加量介于相近区域亚热带暖温带

与北部温带降水之间^[38],具有典型过渡性特征。夏季降水为研究区年降水主体,降水量约为年降水的 50%,夏季降水的显著上升趋势(2.467 mm/a)为安徽省降水增加的主要成因。安徽省四季降水熵均低

形和地理位置的共同影响,呈现以海拔逐渐降低和纬度地带性降低趋势; AI 由南到北逐渐增加,呈现偏干趋势, AI 在皖南地区表现为负值,蒸散消耗小于降水量,水热湿润,江淮地区 AI 具有显著过渡性特征,降水与蒸散消耗波动起伏,皖北地区普遍降水量小于蒸散量,加之纬度较高、太阳辐射强、日照时数长、潜在蒸散量大等因素影响下,同时区域受制于降水偏少,导致 AI 数较大,该地区水资源供需存在一定不足,造成皖北发生旱灾频率高于淮河以南地区,江淮地区水热过渡性质显著, AI 呈现 0 值上下浮动,突出淮河一线较为明显的地理界线意义。

图 7 和表 2 是安徽省三大区域 ET_0 、 P 和 AI 空

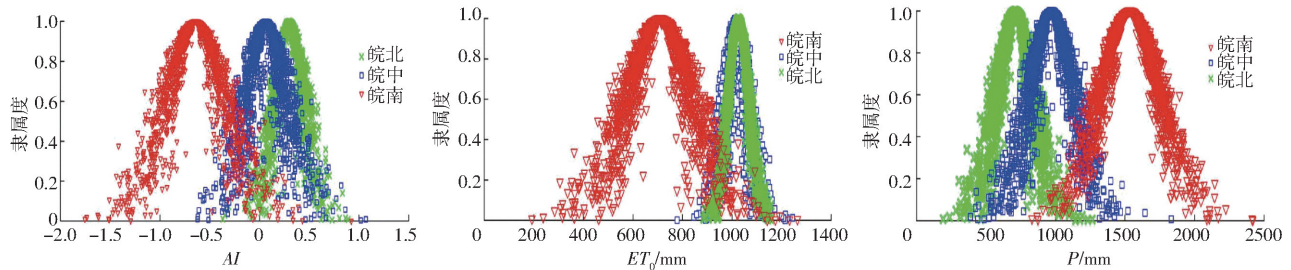


图 7 安徽省三大区域 AI 、 ET_0 、 P 隶属度空间云图

Fig. 7 Temporal distribution cloud of AI , ET_0 and P in three major regions of Anhui Province

表 2 安徽省 AI 、 ET_0 、 P 空间分布云模型的数字特征

Tab.2 Cloud model digital characteristics of temporal distribution of AI , ET_0 and P in Anhui Province

区域	AI			ET_0			P		
	期望	熵	超熵	期望	熵	超熵	期望	熵	超熵
皖北	0.298	0.146	0.043	1 017	42.56	16.37	709.845	129.28	31.18
皖中	0.063	0.201	0.078	1 025.9	42.27	6.69	970.588	158.01	43.89
皖南	-0.644	0.299	0.081	941.93	40.322	18.08	1 534.3	217.76	52.26

变化同样依次降低。

安徽省干湿指数空间变化上,呈现出降水量、干湿指数一致的不确定性与不稳定性现象,可见研究区干湿指数变化受到降水量的较大影响,而蒸散量影响因素较为复杂^[26,30]。同时结合图 3 发现,空间上各区域熵与超熵均高于时间序列上熵与超熵,因此与干湿指数、降水量与潜在蒸散量在时间尺度上(全年)的分布特性相比,其在空间上的分布特性较为离散,且又不稳定,这与安徽省地形地貌特征和气候条件纬度差异所造成的水热差异相关。

4 结论

(1)近 60 年,安徽省相对湿润程度表现为潜在蒸散量以 -0.583 mm/a 的倾向率下降和降水量以 1.155 mm/a 上升的反向趋势,降水量增加速率高于同期潜在蒸散量;研究区过渡性湿润气候特点显著, AI 以 -0.006 a^{-1} 的倾向率下降。云特征分析表明,

间分布云模型的隶属云图和数字特征,由图 7、表 2 可知,以 AI 为主的安徽省干湿指数空间分布不确定性与不稳定性显著高于时间序列云特征。从均匀、稳定状况来看,皖南地区 ET_0 在这 60 年分布最为离散,同时最不稳定,皖北地区 ET_0 分布最为均匀,稳定性较低,皖中地区 ET_0 的稳定性最好;降水变化空间云图表明,皖北与皖南地区降水期望值远小于皖南地区,熵与超熵变化从高到低均为皖南、皖中、皖北,这说明各站的多年平均降水量相对于其平均值较为分散,降水均匀性、稳定性与确定性从南至北逐渐降低;研究区从南至北 AI 期望分别为 -0.644 、 0.063 和 0.298 ,由南至北变干,熵与超熵

相较于潜在蒸散量与干湿指数,降水量最为离散,稳定性最差, AI 在稳定性较差,云模型离散区域变化特点与趋势突变变化相一致。

(2)年内干湿指数特征为以夏季为主导 (-0.012 a^{-1}) 的夏秋冬干湿指数降低为显著特征的转湿变化,冬、春季干湿指数较稳定,秋季次之,夏季最不稳定。

(3)在空间尺度上, AI 由南到北逐渐增加,出现非平滑纬度地带性现象,呈现逐渐偏干趋势,江淮地区 AI 具有显著过渡性特征。以 AI 为主的安徽省干湿指数空间分布不确定性与不稳定性显著高于时间序列云特征。安徽省干湿指数空间变化上,表现为降水量、干湿指数一致的不确定性与不稳定性趋势,研究区干湿指数变化受到降水量的较大影响,空间上各区域熵与超熵均高于时间序列上熵与超熵,其在空间上的分布特性较为离散,且又不稳定,这与安徽省的地形地貌特征和气候条件的纬度差异所造成的水热差异相关。

参考文献

- [1] LIU Z P, WANG Y Q, SHAO M A, et al. Spatiotemporal analysis of multiscale drought characteristics across the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 534:281–299.
- [2] ZHENG D, WU S H, YIN Y H, et al. Frontiers in terrestrial system research in China under global change[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(9):1475–1483.
- [3] 苑全治, 吴绍洪, 戴尔阜, 等. 1961—2015年中国气候干湿状况的时空分异[J]. *中国科学:地球科学*, 2017, 47(11):1339–1348.
YUAN Quanzhi, WU Shaohong, DAI Erfu, et al. Spatio-temporal variation of the wet-dry conditions from 1961 to 2015 in China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2017, 47(11):1339–1348. (in Chinese)
- [4] 岳平, 张强, 赵文, 等. 黄土高原半干旱草地生长季干湿时段环境因子对陆面水、热交换的影响[J]. *中国科学:地球科学*, 2015, 45(8):1229–1242.
YUE Ping, ZHANG Qiang, ZHAO Wen, et al. Influence of environmental factors on land-surface water and heat exchange during dry and wet periods in the growing season of semiarid grassland on the Loess Plateau[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2015, 45(8):1229–1242. (in Chinese)
- [5] 安莉娟. 1971—2010年内蒙古干湿变化特征及对水资源影响[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(3):732–740.
AN Lijuan. Aridity variation and its impact on water resources in Inner Mongolia from 1971 through 2010[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(3):732–740. (in Chinese)
- [6] SRIVASTAVA P K, HAN D, RICO-RAMIREZ M A, et al. Sensitivity and uncertainty analysis of mesoscale model downscaled hydrometeorological variables for discharge prediction[J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(15):4419–4432.
- [7] LI Y, LIANG K, BAI P, et al. The spatiotemporal variation of reference evapotranspiration and the contribution of its climatic factors in the Loess Plateau, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(4):1–14.
- [8] HUO Z, DAI X, FENG S, et al. Effect of climate change on reference evapotranspiration and aridity index in arid region of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 492:24–34.
- [9] 张彦龙, 刘普幸. 基于 AI 指数的新疆干湿时空变化及其影响因素分析[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(4):658–671.
ZHANG Yanlong, LIU Puxing. Study on temporal and spatial variation of the dry-wet and its influence factors in Xinjiang based on aridity index[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(4):658–671. (in Chinese)
- [10] 马丹阳, 尹云鹤, 吴绍洪, 等. 中国干湿格局对未来高排放情景下气候变化响应的敏感性[J]. *地理学报*, 2019, 74(5):857–874.
MA Danyang, YIN Yunhe, WU Shaohong, et al. Sensitivity of arid/humid patterns in China to future climate change under high emission scenario[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(5):857–874. (in Chinese)
- [11] 李明星, 马柱国. 中国气候干湿变化及气候带边界演变:以集成土壤湿度为指标[J]. *科学通报*, 2012, 57(28/29):2740–2754.
LI Mingxing, MA Zhuguo. Soil moisture-based study of the variability of dry-wet climate and climate zones in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(28/29):2740–2754. (in Chinese)
- [12] 胡琦, 董蓓, 潘学标, 等. 1961—2014年中国干湿气候时空变化特征及成因分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(6):124–132.
HU Qi, DONG Bei, PAN Xuebiao, et al. Spatiotemporal variation and causes analysis of dry-wet climate over period of 1961—2014 in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(6):124–132. (in Chinese)
- [13] ZHAO Y, ZOU X, ZHANG J, et al. Spatio-temporal variation of reference evapotranspiration and aridity index in the Loess Plateau Region of China, during 1961—2012[J]. *Quaternary International*, 2014, 349:196–206.
- [14] 张彦龙, 刘普幸, 王允. 基于干旱指数的宁夏干旱时空变化特征及其 Morlet 小波分析[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(8):2373–2380.
ZHANG Yanlong, LIU Puxing, WANG Yun. Temporal and spatial variations of the drought in Ningxia based on aridity index and Morlet wavelet analysis[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(8):2373–2380. (in Chinese)
- [15] SHI B, ZHANG X Y, HU Y C, et al. Drought characteristics of Henan Province in 1961—2013 based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(3):311–325.
- [16] WU S H, YIN Y H, ZHENG D, et al. Moisture conditions and climate trends in China during the period 1971—2000[J]. *International Journal of Climatology*, 2006, 26(2):193–206.
- [17] WEN M, CHENG D, SONG J, et al. Impacts of climate change on aridity index and its spatiotemporal variation in the Loess Plateau of China, from 1961 to 2014[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(4):137.
- [18] 殷长琛, 齐广平, 康燕霞. 基于云模型的甘肃省潜在蒸散量时空分布特征[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(8):152–158.
YIN Changchen, QI Guangping, KANG Yanxia. Analysis on characteristics of temporal-spatial potential evapotranspiration distribution in Gansu based on cloud model[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(8):152–158. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 刘德地, 陈晓宏, 楼章华. 基于云模型的降雨时空分布特性分析[J]. *水利学报*, 2009, 40(7):850–857.
LIU Dedi, CHEN Xiaohong, LOU Zhanghua. Analysis on characteristics of spatial-temporal precipitation distribution based on cloud model[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(7):850–857. (in Chinese)

- [21] 高蔺云,黄晓荣,奚圆圆,等.基于云模型的四川盆地气候变化时空分布特征分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2017,38(1):1-7.
GAO Linyun, HUANG Xiaorong, XI Yuanyuan, et al. Analysis on characteristics of temporal-spatial climate distribution in Sichuan basin based on cloud model[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2017, 38(1):1-7. (in Chinese)
- [22] 张杨,严金明,江平,等.基于正态云模型的湖北省土地资源生态安全评价[J].农业工程学报,2013,29(22):252-258.
ZHANG Yang, YAN Jinming, JIANG Ping, et al. Normal cloud model based evaluation of land resources ecological security in Hubei Province[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(22):252-258. (in Chinese)
- [23] 曹雯,杨天明,陈金华,等.安徽省参考作物蒸散模型参数化[J].农业工程学报,2016,32(增刊2):60-68.
CAO Wen, YANG Taiming, CHEN Jinhua, et al. Parametrization of reference crop evapotranspiration model in Anhui Province[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Sup. 2):60-68. (in Chinese)
- [24] 金菊良,李辉,李靖,等.基于云模型的安徽省干旱时空分布特征分析[J].水电能源科学,2017(4):7-11.
JIN Juliang, LI Hui, LI Jing, et al. Analysis of characteristic of temporal-spatial drought distribution in Anhui Province based on cloud model[J]. Water Resources and Power, 2017(4):7-11. (in Chinese)
- [25] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements [R]. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998. Rome, Italy.
- [26] 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)
- [27] PEREIRA L S, ALLEN R G, SMITH M, et al. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: past and future[J]. Agricultural Water Management, 2015, 147:4-20.
- [28] JAHANBANI H, SHUI L T, BAVANI A M, et al. Uncertainty of climate change and its impact on reference evapotranspiration in Rasht City, Iran[J]. Journal of Water and Climate Change, 2011, 2(1):72-83.
- [29] DINPASHOH Y, JHAJHARIA D, FAKHERI-FARD A, et al. Trends in reference crop evapotranspiration over Iran[J]. Journal of Hydrology, 2011, 399(3-4):422-433.
- [30] 尹云鹤,吴绍洪,戴尔阜.1971—2008年中国潜在蒸散时空演变的归因[J].科学通报,2010,55(22):2226-2234.
YIN Yunhe, WU Shaohong, DAI Erfu. Determining factors in potential evapotranspiration changes over China in the period 1971—2008[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(22):2226-2234. (in Chinese)
- [31] 严坤,王玉宽,徐佩,等.岷江源区 Hargreaves 法适用性与未来参考作物蒸散量预测[J/OL].农业机械学报,2018,49(4):273-281.
YAN Kun, WANG Yukuan, XU Pei, et al. Adaptation of Hargreaves methods and prediction of reference crop evapotranspiration in Minjiang river headwater region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4):273-281. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180431&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.031. (in Chinese)
- [32] 程强,徐嬌,陈超,等.越冬期麦田地表蒸散量估算模型适用性分析与参数修正[J/OL].农业机械学报,2018,49(10):317-325.
CHENG Qiang, XU Qiang, CHEN Chao, et al. Applicable analysis and parameter modification of evapotranspiration models during wintertime[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10):317-325. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181036&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.036. (in Chinese)
- [33] YIN Y, WU S, ZHENG D, et al. Radiation calibration of FAO56 Penman - Monteith model to estimate reference crop evapotranspiration in China[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(1):77-84.
- [34] 邓根云.水面蒸发量的一种气候学计算方法[J].气象学报,1979,37(3):87-96.
DENG Genyun. A climatic calculative method of evaporation from open water [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1979, 37(3):87-96. (in Chinese)
- [35] 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.
HUANG Huiping, CAO Mingming, SONG Jinxi, et al. Temporal and spatial changes of potential evapotranspiration and its influencing factors in China from 1957 to 2012[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(2):315-326. (in Chinese)
- [36] 吴霞,王培娟,霍治国,等.1961—2015年中国潜在蒸散时空变化特征与成因[J].资源科学,2017,39(5):964-977.
WU Xia, WANG Peijuan, HUO Zhiguo, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of potential evapotranspiration and impact factors in China from 1961 to 2015[J]. Resources Science, 2017, 39(5):964-977. (in Chinese)
- [37] 吴文玉,孔芹芹,王晓东,等.安徽省近40年参考作物蒸散量的敏感性分析[J].生态环境学报,2013,22(7):1160-1166.
WU Wenyu, KONG Qinqin, WANG Xiaodong, et al. Sensitivity analysis of reference crop evapotranspiration in Anhui Province in the recent 40 years[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(7):1160-1166. (in Chinese)
- [38] 谭云娟,邱新法,曾燕,等.近50a来中国不同流域降水的变化趋势分析[J].气象科学,2016,36(4):494-501.
TAN Yunjuan, QIU Xinfa, ZENG Yan, et al. Variation trend of precipitation in different river basins in recent 50 years[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2016, 36(4):494-501. (in Chinese)