

甘肃省参考作物蒸散量变化特征 与影响因子分析

殷长琛^{1,2}, 齐广平¹, 康燕霞^{1,3}, 潘晓艳²

(1. 甘肃农业大学工学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 敦煌市农业技术推广中心, 甘肃 敦煌 736200;
3. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210029)

摘 要: 为了探寻甘肃省参考作物蒸散量(ET_0)的变化特征及其影响因子, 利用 FAO-Penman-Monteith(98)公式计算甘肃省 4 个分区的 ET_0 。依靠处理定性概念与定量描述不确定转换的云模型对 ET_0 变化特征和影响 ET_0 的气象因子进行了研究; 同时, 采用通径分析的方法, 对不同区域影响 ET_0 变化的气象因子进行了探讨。结果表明: 63 年来, ET_0 在空间上表现为西北地区大于东南地区。其中, 河西地区 ET_0 在甘肃省内一直处于最高值, 但呈逐年减小的趋势; 陇中地区和陇东地区前 30 年先减小, 后 33 年较之前有所增加, 但总体趋于稳定; 陇南地区则表现为多年最低值且较为稳定, 无明显变化。63 年来河西地区 ET_0 分布最为离散, 不均匀性也最不稳定; 陇东地区 ET_0 分布最为均匀, 稳定性也相对最好。通径分析表明, 各个气象因子对 ET_0 变化都有影响且对不同区域 ET_0 的主要影响因子也不尽相同。对河西地区和陇南地区 ET_0 变化直接作用最大的气象因子为平均温度; 对陇中地区和陇东地区 ET_0 变化直接作用最大的气象因子分别为平均相对湿度和日照时数。平均风速是对河西地区、陇中地区和陇东地区间接作用最为显著的气象因子; 而对陇南地区 ET_0 间接作用最为显著的气象因子则为日照时数。

关键词: 参考作物蒸散量(ET_0); 甘肃省; 变化特征; 影响因子; 云模型
中图分类号: S161.4 **文献标志码:** A

Variation characteristics and influencing factors of evapotranspiration for reference crops in Gansu Province

YIN Chang-chen^{1,2}, QI Guang-ping¹, KANG Yan-xia^{1,3}, PAN Xiao-yan²

(1. Engineering College of Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
2. Agricultural Technology Promotion Center of Dunhuang, Dunhuang, Gansu 736200, China;
3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: In order to explore the characteristics and influencing factors of reference crop Evapotranspiration (ET_0) and the ET_0 s of the 4 partition areas in Gansu Province were measured by FAO – Penman – Monteith (98) formula. The variation characteristics and meteorological factors of ET_0 were analyzed based on the cloud model of uncertain conversion between qualitative concept and quantitative description. Meanwhile, the meteorological factors affecting ET_0 changes in different regions were investigated by the method of path coefficient analysis. The results showed that during 1951—2013, the ET_0 in the northwest region was greater than that in the southeast. The ET_0 in Hexi region was always the highest in Gansu Province, which nevertheless showed a decreasing trend yearly. The ET_0 s in Longzhong and Longdong regions were decreased during 1951—1980 and it became increased during 1980—2013, reaching an overall stabilized status. Longnan region was shown to possess the minimum value in years and become stable without obvious changes. During 1951—2013, the distribution of ET_0 in Hexi region was most discrete, and the heterogeneity was most stable. The distribution of ET_0 in Longdong region was most uniform, and stability was relatively the best. Path analysis showed that various meteorological factors had affected ET_0 changes and the main influence factors in different regions were not

收稿日期: 2014-12-17
基金项目: 农业行业专项项目(201403048-8); 国家自然科学基金项目(51409048); 水利部公益性行业科研专项项目(201301040); 甘肃农业大学工学院青年教师科技创新基金项目(GXY2013-05)
作者简介: 殷长琛(1989—), 男, 甘肃敦煌人, 助理农艺师, 研究方向为农业水土工程和生态农业。E-mail: ying1989410@163.com。
通信作者: 齐广平(1969—), 男, 甘肃庆阳人, 教授, 博士, 研究方向为节水灌溉与生态农业。E-mail: qigp@gsau.edu.cn。

the same. The average temperature had directly affected the changes of ET_0 in Hexi region and Longxi region. The average relative humidity and sunshine hours had directly affected the changes of ET_0 in Longzhong region and Longdong region, respectively. The average wind speed had indirectly affected the changes of ET_0 in Hexi region, Longzhong region and Longdong region, while the sunshine hours had indirectly affected the changes of ET_0 in Longnan region.

Keywords: reference crop evapotranspiration (ET_0); Gansu Province; variation characteristics; influencing factors; cloud model

参考作物蒸散量(ET_0)是气候条件决定的下垫面蒸散过程的能力,是实际蒸散量的理论上限^[1],同时也是评价气候干旱程度、估算作物生产潜力和作物需水要求的关键参数^[2-6]。目前,针对 ET_0 主要采用传统的趋势分析法^[7-8]、相关分析法^[9]、周期分析法^[10]和地统计学法^[11]、经验正交函数^[12]等方法仅对 ET_0 时空分布特性进行研究;针对影响 ET_0 气象因子研究的主要手段是相关分析^[13]和趋势分析^[14]。传统方法对区域 ET_0 的分布能够进行定量描述,但无法表示 ET_0 时空分布的随机性和模糊性,且不能将随机性和模糊性定量表现出来。 ET_0 时空变化随机性和模糊性的定量表达,是探寻蒸散发时空分异规律和机理的有效途径,有助于蒸散发时空分异规律和尺度扩展研究以及蒸散发的精确估算和预测,对维护自然生态系统的健康和保障人类社会经济的可持续发展有着重要的意义。赵璐等^[15]运用云模型的不均匀性、不均匀性的稳定性指标对四川省参考作物蒸散量地域分布的随机性、模糊性和稳定性进行定量表达,为研究 ET_0 时空分布特性提供了一种新的思路。同时, ET_0 的变化受到多种气象因子的影响,但各个气象因子之间存在着很强的相关性,本文利用通径分析的方法仅对影响 ET_0 的气象因子作一探讨^[16-17],要确定过去 63 年 ET_0 的变化主要由哪个气象因子引起,仍需进一步研究。

甘肃省位于中国西部地区,地处黄河中上游,位于青藏高原、黄土高原和内蒙古高原的交汇处。省内水资源主要分属长江流域、黄河流域和西北内陆河流域。境内地形复杂,气候差异较大,山脉纵横交错,海拔相差悬殊,高山、盆地、平川、沙漠和戈壁等兼而有之。目前,对甘肃省 ET_0 的研究主要集中在采用经验正交函数^[18]、趋势分析^[19]、相关分析等^[20]方法对时空特性进行研究。因此,基于云模型理论对甘肃省 ET_0 时空分布的均匀性、稳定性的研究将会对多流域、多气候带和复杂地形分布区域的 ET_0 研究提供新的思路和方法,同时对该类地区水资源合理配置、农业增产增收以及地区经济发展有着重要的意义。

1 资料与方法

1.1 资料来源及处理

使用国家气象中心数据库所提供的甘肃省 29 个气象测站 1951—2013 年的气象观测资料(包括日平均气温、相对湿度、降水、蒸发、日照等),地理信息包括测站经纬度、海拔高度、行政边界等(测站分布见图 1)。根据甘肃省的地域特点,将全省分为 4 个区域进行研究:河西地区、陇中地区、陇南地区和陇东地区。对于气象数据中的个别日缺测值和异常值,采用前后日均值代替;对于长期缺测值和异常值采用该站点其他年份该月的均值代替。 ET_0 和云模型的计算采用交互式数据语言(IDL)软件编程处理; ET_0 的空间插值分析基于 surfer8.0 的克里格空间插值法^[12]。

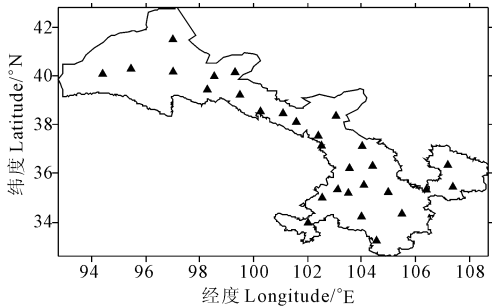


图 1 甘肃省气象观测站点分布

Fig.1 Distribution of meteorological sites in Gansu

1.2 ET_0 的计算

利用 FAO 推荐的 Penman—Monteith(98)公式计算 ET_0 ,其表达式为^[21]:

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

式中, ET_0 为可能蒸散量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); R_n 为地表净辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); T 为 2 m 高处日平均气温($^{\circ}\text{C}$); U_2 为 2 m 高处风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); e_s 为饱和水气压(kPa); e_a 为实际水气压(kPa); Δ 为饱和水气压曲线斜率($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); r 为干湿表常数($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)。

1.3 云模型

云模型是用数字特征揭示了随机性和模糊性的关联性,并用来表示一个定性概念的粒度,是处理定性概念与定量描述不确定转换的模型,由中国工程院院士李德毅于 1995 年提出^[22],该模型已经比较成功地在降雨量预测^[23-24]、城镇空气质量评价^[25]、城市极端雨洪灾害风险评价^[26]、区域水资源承载力评价^[27]等领域得到了应用,取得了重要的研究成果^[23-28]。

1.3.1 云模型的数字特征 云模型的数字特征采用期望 Ex 、熵 En 和超熵 He 3 个数值来表征,见图 2。

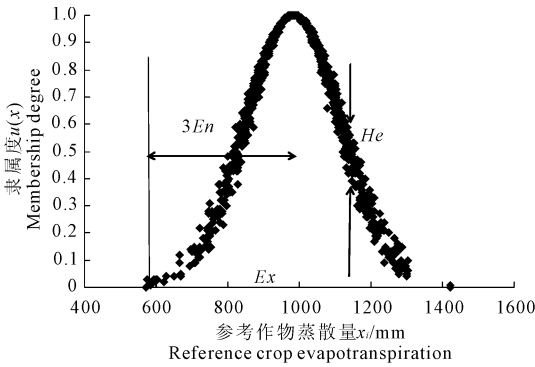


图 2 云模型数字特征
Fig.2 Digital characters of cloud mode

云模型表示自然语言中的基元——语言值,用云的数字特征——期望 Ex 、熵 En 和超熵 He 表示语言值的数学性质。期望 Ex 为云滴在论域空间分布的期望,是最能够代表定性概念的点,是这个概念量化的最典型样本。熵 En 为在云模型中是随机性的度量,反应了云滴的离散程度,不均匀程度以及取值范围。用同一个数字特征来反映随机性和模糊性,也必然反映他们之间的关联性。超熵 He 为熵的不确定性度量,即熵的熵,由熵的随机性和模糊性共同决定。反映了每个数值隶属这个语言值程度的凝聚性,即云滴的凝聚程度。超熵越大,云的离散程度越大,隶属度的随机性也随之增大,云的“厚度”也越大,越不稳定^[23-24]。需要进一步指出的是,根据正态分布的特性,对于论域中的定性概念有贡献的云滴,主要落在区间 $[Ex - 3En, Ex + 3En]$,因此可以忽略 $[Ex - 3En, Ex + 3En]$ 区间之外的云滴对定性概念的贡献,即为正向正态云的“ $3En$ 规则”^[23]。

1.3.2 正向云发生器 正向云发生器(Forward cloud generator)是从定性概念到其定量表示的映射,它根据云的数字特征(Ex, En, He)产生云滴,每个云滴都是该概念的一次具体实现。一维正向正态云

发生器的算法实现如下:输入表示定型概念 A 的 3 个数字特征值 Ex, En, He 以及云滴数 N ;输出为 N 个云滴的定量值,以及每个云滴代表概念。具体计算步骤如下^[22-24]:

- (1) 生成 En 为期望值和 He^2 为方差的一个正态随机 $Eni' = NORM(En, He^2)$;
- (2) 生成以 Ex 为期望值和 Eni'^2 为方差的一个正态随机 $Xi = NORM(Ex, Eni'^2)$;
- (3) 计算确定度 $ui = e^{-(Xi - Ex)^2 / 2Eni'^2}$;
- (4) 生成具有确定度 ui 的 xi 成为数域中的一个云滴;
- (5) 重复(1)~(4)步,直到产生要求的 n 个云滴为止。

1.3.3 逆向云发生器 逆向云发生器(Backward cloud generator)是实现定量值到定性概念的转换模型。它可以将一定数量的精确数据转换为以数字特征(Ex, En, He)表示的定性概念。一维逆向正态云发生器的算法实现如下:

输入: N 个云滴的定量值及每个云滴代表概念的确定度(xi, ui);输出:这 N 个云滴表示的定性概念 A 的期望值 Ex , 熵 En 和超熵 He ;具体步骤^[23-24]:

- (1) 由 xi 计算这组数据的样本均值 $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n xi$, 一阶样本绝对中心矩 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |xi - \bar{X}|$, 样本方差 $S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (xi - \bar{X})^2$;
- (2) 由(1)可得期望 $Ex = \bar{X}$;
- (3) 同时由样本均值可得熵 $En = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |xi - \bar{X}|$;
- (4) 由(1)中的样本方差和(3)中的熵可得 $He = \sqrt{S^2 - En^2}$ 。

1.4 通径分析

通径分析是由数量遗传学家 Sewall Wright 于 1921 年提出的,可用来分析多个自变量与因变量之间的线性关系,是回归分析的拓展,可以处理较为复杂的变量关系,同时该方法能得到自变量对因变量的直接作用和间接作用,进而分析变量间的相互关系^[16-17]。本文依靠 SPSS19.0(回归分析),采用通径分析来确定影响 ET_0 变化的主要气象因子。

2 结果与分析

2.1 时间特性的云模型分析

采用 FAO—Penman—Monteith(98)公式计算甘

肃省 4 个分区 29 个测站各站点的 ET_0 。以甘肃省 4 个分区 1951—2013 年 63 年的 ET_0 作为研究对象, 根据逆向云发生器的算法计算各自云模型的数字特征(表 1), 然后根据正向云发生器的算法计算云滴并绘制各个区域的隶属云图(图 3)。

表 1 甘肃省 ET_0 时间分布云模型的数字特征

Table 1 Cloud model digital characters of temporal ET_0 distribution in Gansu

区域 Area	云模型数字特征(时间) Cloud model digital characters (Time)		
	Ex	En	He
河西地区 Hexi area	1104.35	126.70	34.26
陇中地区 Longzhong area	960.20	105.35	34.19
陇南地区 Longnan area	847.29	101.67	20.09
陇东地区 Longdong area	942.84	22.04	11.25
甘肃省 Gansu Province	1001.64	39.76	8.20

云模型的期望 Ex 表示 ET_0 大小的平均值; 熵 En 反映了 ET_0 大小相对于平均值的确定度和离散度, 其值越大, 反映 ET_0 在这 63 年分布越不均匀, 模糊性和随机性也越大, 确定性越难度量; 超熵 He 体现熵的离散程度, 其值大小反映了不均匀性的稳定性, 值越大, 不均匀性越不稳定, 凝聚程度越差。表 1 是甘肃省不同区域 ET_0 时间分布云模型的数字特征, 从多年平均程度来看, 整个甘肃省 63 年平均 ET_0 为 1 001.64 mm, 河西地区 ET_0 多年平均值为全省最高, 达到 1 104.35 mm, 陇南地区最低为 847.29 mm。从均匀、稳定状况来看, 河西地区 ET_0 在这 63 年分布最为离散, 同时不均匀性也最不稳定性; 陇东地区 ET_0 分布最为均匀, 稳定性也相对最好; 陇中、陇南地区 ET_0 的均匀、稳定程度介于上述两地区之间。

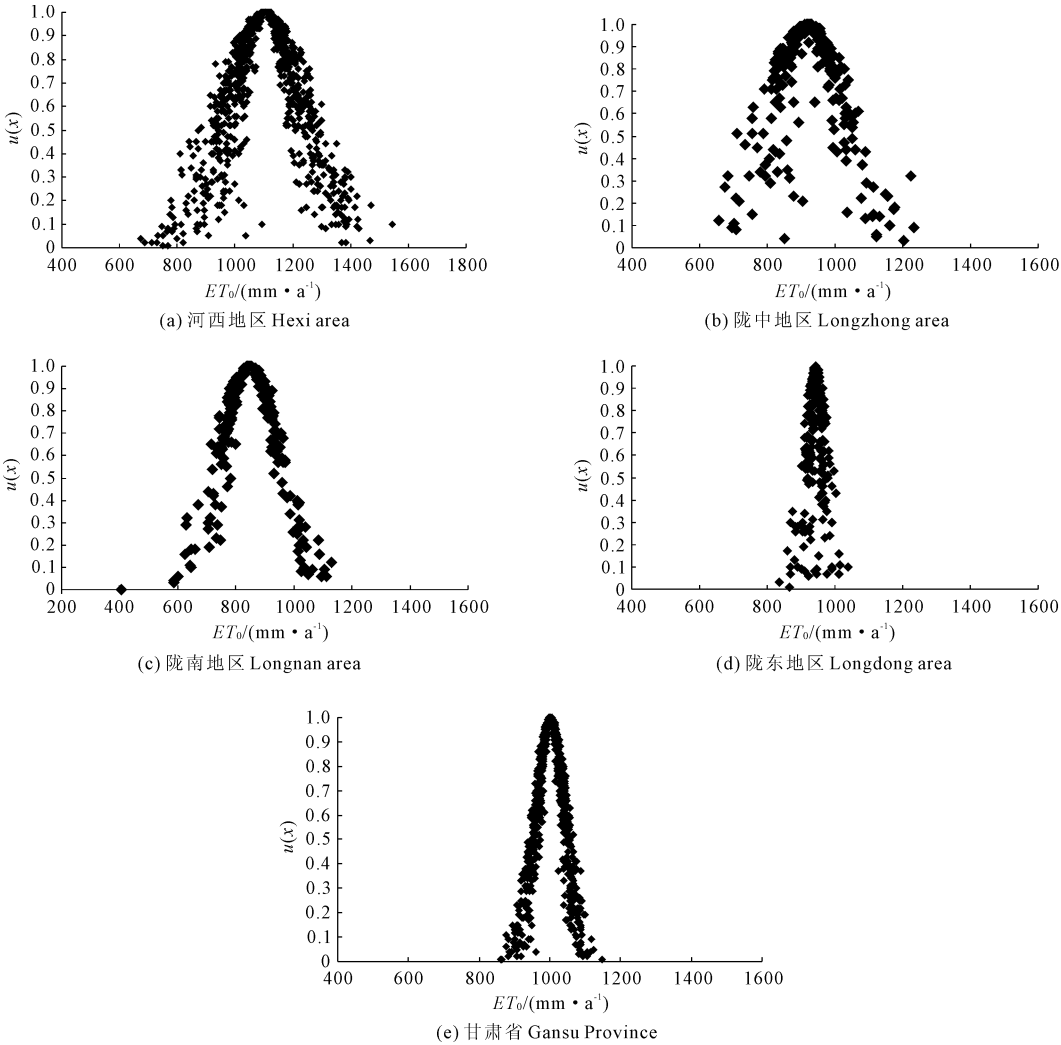


图 3 甘肃省 4 个分区 ET_0 时间分布的隶属云

Fig.3 Cloud of temporal ET_0 distribution in four areas in Gansu

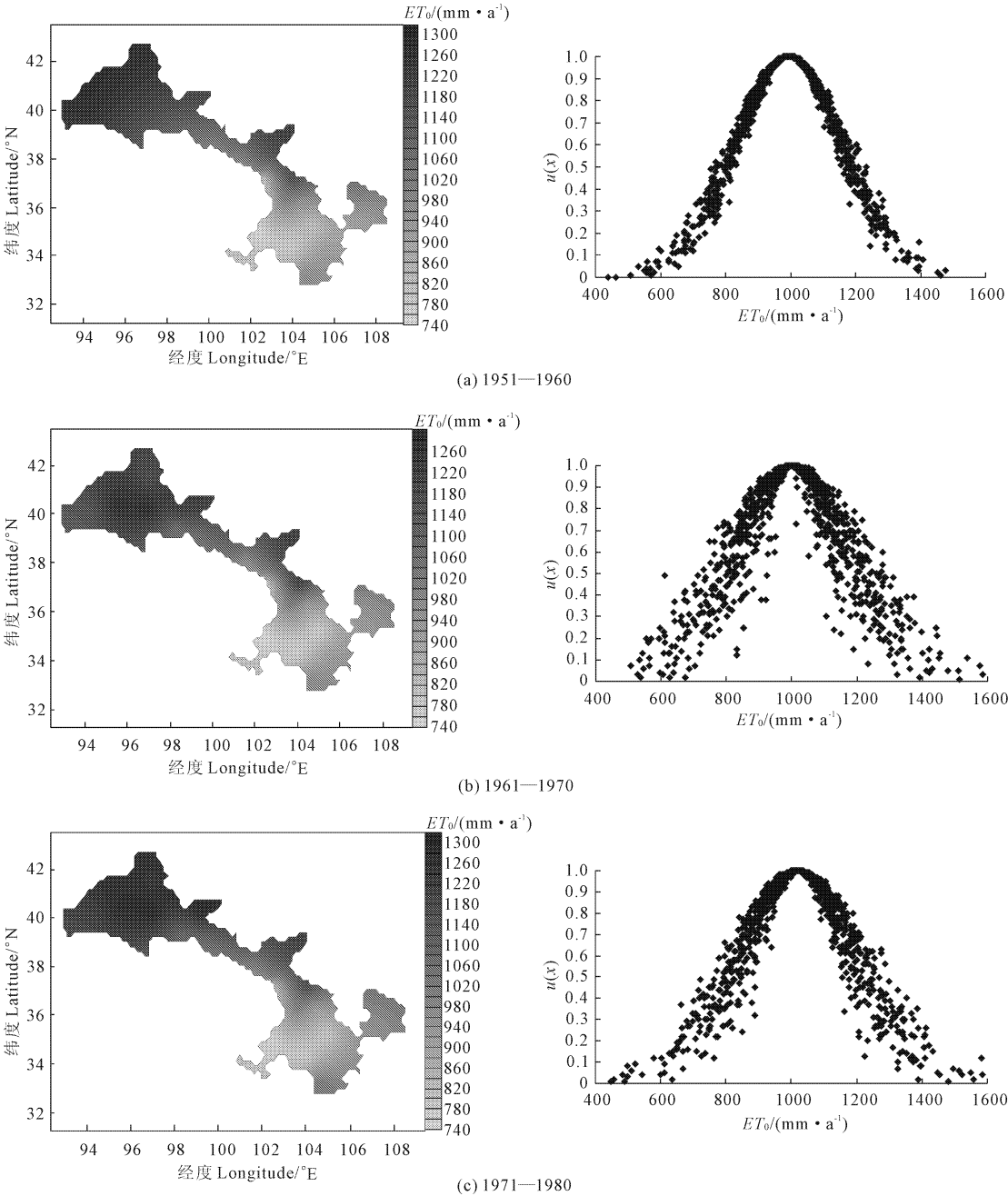
图 3 为甘肃省 4 个分区 ET_0 时间分布隶属云图。图像显示,除陇东地区多年 ET_0 云滴分布较为紧凑,云的厚度相对“较薄”以外,其余 3 个区域的隶属云图云滴分布都较为离散,云也相对“较厚”,结果与云模型的数字特征所描述相一致。

2.2 近 63 年 ET_0 时空分布特征

为了分析 ET_0 空间分布规律在时间上的变化,将年 ET_0 变化特征分为 6 个阶段,如表 2 所示的 1951—1960 年、1961—1970 年、1971—1980 年、1981—1990 年、1991—2000 年、2001—2013 年这 6 个时间段。依靠 ET_0 分布等值线图结合云模型隶属云图(图 4)的方法来描述近 63 年 ET_0 空间分布特征以及分布不均匀程度。

表 2 甘肃省 1951—2013 年不同时段 ET_0 空间分布云模型数字特征

时段 Periods	云模型数字特征(时间) Cloud model digital characters (Time)		
	Ex	En	He
1951—1960	995.14	164.72	15.42
1961—1970	1001.62	174.67	43.72
1971—1980	1020.09	176.63	32.91
1981—1990	967.46	162.12	40.23
1991—2000	983.14	134.47	8.95
2001—2013	1025.76	153.31	27.25
1951—2013	1001.17	160.33	34.61



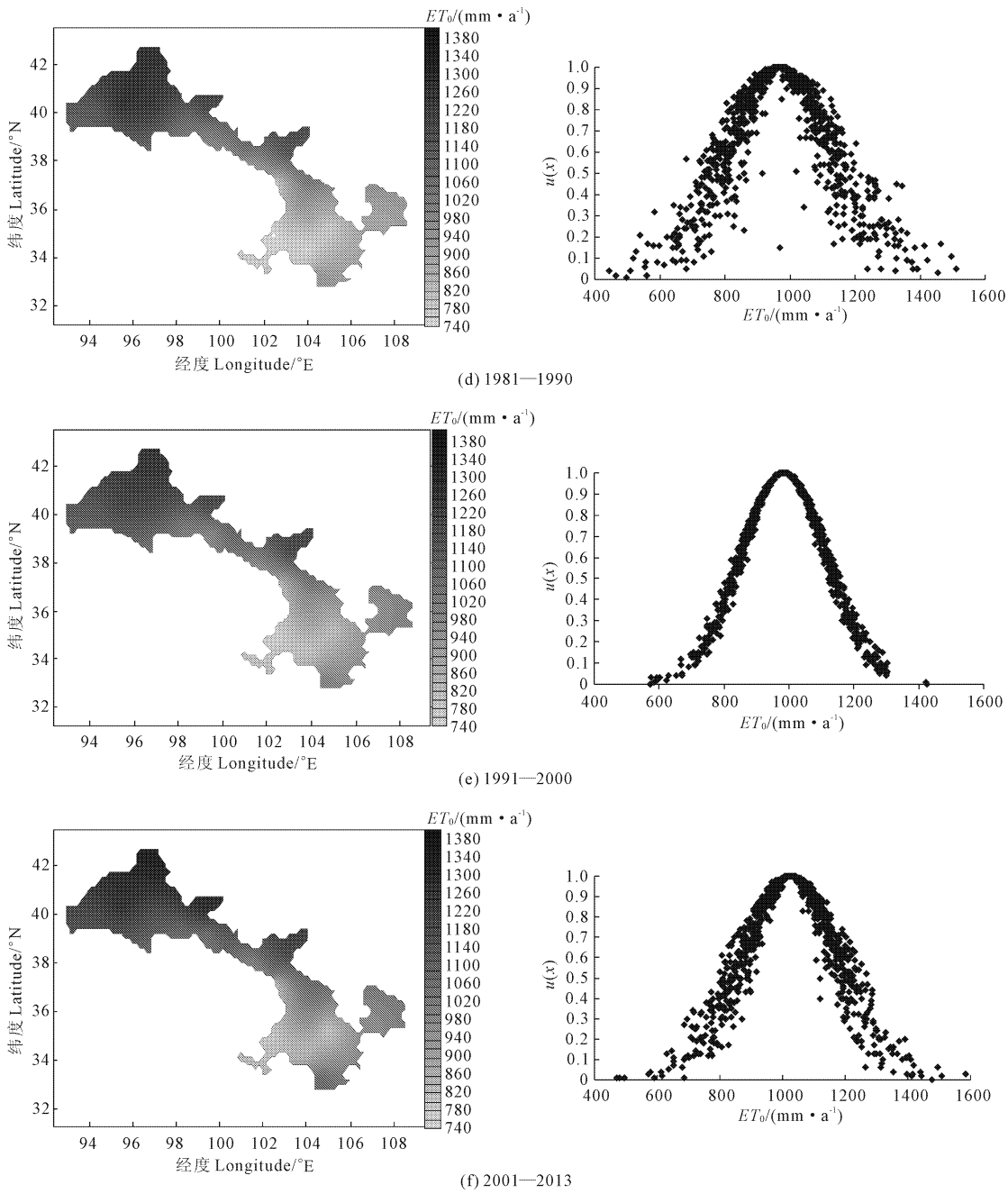


图 4 甘肃省不同时段 ET_0 空间分布

Fig.4 The spatial ET_0 distributions during different periods in Gansu

近 63 年 ET_0 自西北地区向东南地区呈现递减趋势且变化梯度较为明显,其中地处西北端的酒泉地区最高值接近 $1\,300\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$;陇中和陇东地区次之,约为 $1\,000\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$;陇南地区最低,为 $900\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 左右。从不同时段 ET_0 空间分布图可以看到,1951—2013 年河西地区 ET_0 在甘肃省内一直表现为最高值,并呈现出逐年增加的趋势,增加幅度不明显;陇中、陇东地区前 30 年先减小,后 33 年较之前有所增加,但总体趋于稳定;陇南则表现为省内最低值且多年较为稳定,无明显变化。

图 4 的隶属云图结合表 2 的空间云模型数字特

征可知,20 世纪 50 年代和 90 年代两个时间段不均匀性比较稳定,其余年代较不稳定。比较不同时间段 ET_0 空间分布的期望值可知, ET_0 在 21 世纪初达到最大值 $1\,025.76\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$,20 世纪 80 年代取得最小值为 $967.46\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$,其余年代 ET_0 均接近 63 年的平均值。由 En 的变化可以得出,63 年来 ET_0 在空间上分布的离散度先增加(1951—1980 年),后减小(1981—2000 年),2000 年后又有逐渐增加的趋势,总体来看均匀性后 33 年好于前 30 年;同时, He 值变化表明,20 世纪 50 年代和 90 年代不均匀性最为稳定,稳定程度同样是后 33 年更好。

2.3 气象因子时间变化特性分析

图 5 是不同气象因子的年际变化情况。总体来看,整个省域 63 年间平均气温和日照时数逐年递增,增长幅度分别为 $0.24^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 和 $0.01\text{ h}\cdot 10\text{a}^{-1}$,

气温增长较为明显。平均风速和平均相对湿度呈逐年递减的趋势,减幅分别为 $0.03\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 和 $0.46\%\cdot 10\text{a}^{-1}$,平均相对湿度的降幅较为明显。

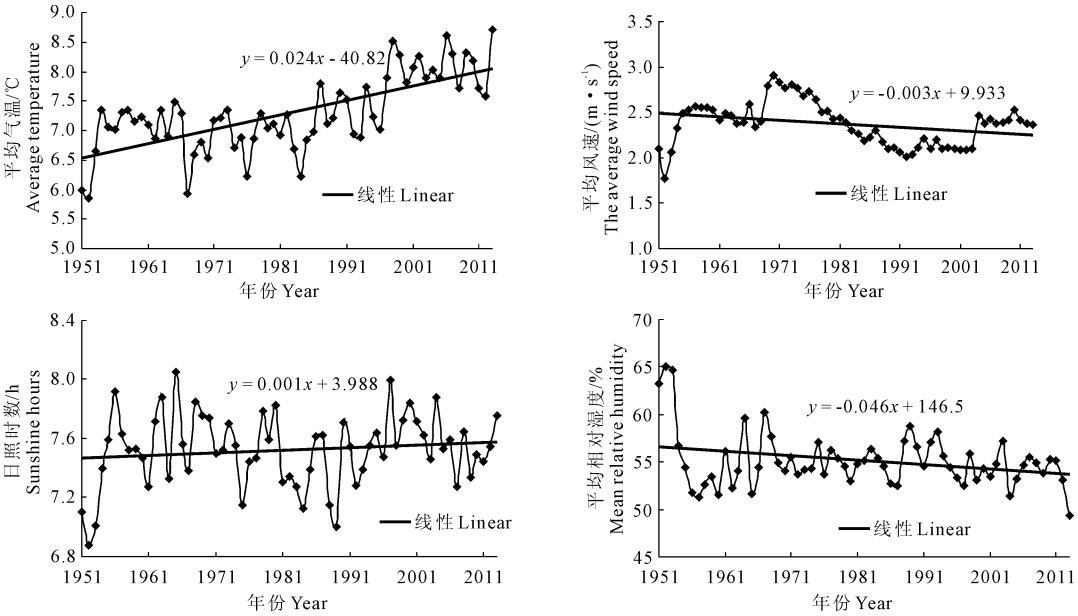


图 5 不同气象因子年际变化

Fig.5 Annual change of meteorological factors

从表 3 气象因子的云模型数字特征和图 6 不同气象因子的云分布来看,平均气温的熵为 0.63,超熵为 0.15,云滴分布不均匀,隶属云“厚度”较厚,表明多年来平均气温分布较为离散,不均匀性也不稳定。平均风速和日照时数的熵值均为 0.24,超熵分别为 0.02 和 0.06,从云分布图像来看这两个气象因子的“云滴”较为紧凑,云的“厚度”比较薄,表明平均风速和日照时数的均匀性和稳定性较好。平均相对湿度的熵值和超熵最大,云分布图像也较为离散、不均匀,说明多年来平均相对湿度分布不均匀且不均匀性也不稳定。因此,近 63 年对甘肃省 ET_0 变化影响最大的气象因子为平均气温和平均相对湿度。

2.4 63 年来气象因子与参考作物蒸散量的通径分析

ET_0 的变化受到多种气象因子(平均气温 (T)、日照时数 (n)、相对湿度 (RH)、风速 (u_2))的影响^[19],在通径分析中,首先计算上述 4 个气象因子对 ET_0 的通径系数 P ,再根据通径分析原理,求解各因子对 ET_0 关于通径系数的正则方程,计算各因子对 ET_0 的直接作用和间接作用,结果见表 4。

从表 4 中可知,各个气象因子对 ET_0 都有影响,但就各个气象因子对 ET_0 直接和间接作用来说,各因子之间还有差异。从整个甘肃省来看,平均气温和平均相对湿度对 ET_0 的通径系数为 0.468,为各个因子中最大值,因此平均气温对 ET_0 的直接作用最大,平均相对湿度次之,日照时数和平均风速相对较小;同时,平均相对湿度对 ET_0 的变化产生负向直接作用,其余因子均具有正向直接作用。平均相对湿度和日照时数对 ET_0 的间接作用最为显著,其中日照时数对 ET_0 的变化产生正向间接作用,平均相对湿度对 ET_0 的变化产生负向间接作用。由气象因子间的间接作用可知,各气象因子间存在着相互制约和相互影响,因而 ET_0 的变化是各气象因子综合作用的结果。

表 3 气象因子的云模型数字特征

Table 3 Digital characteristics of cloud model on meteorological factors distribution

气象因子 Meteorological factors	云模型数字特征(时间) Cloud model digital charaters (Time)		
	E_x	E_n	H_e
平均气温/ $^{\circ}\text{C}$ Average temperature	7.29	0.63	0.15
平均风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ Average wind speed	2.37	0.24	0.02
日照时数 Sunshine time/h	7.52	0.24	0.06
平均相对湿度/ $\%$ Average relative humidity	55.11	2.54	1.42

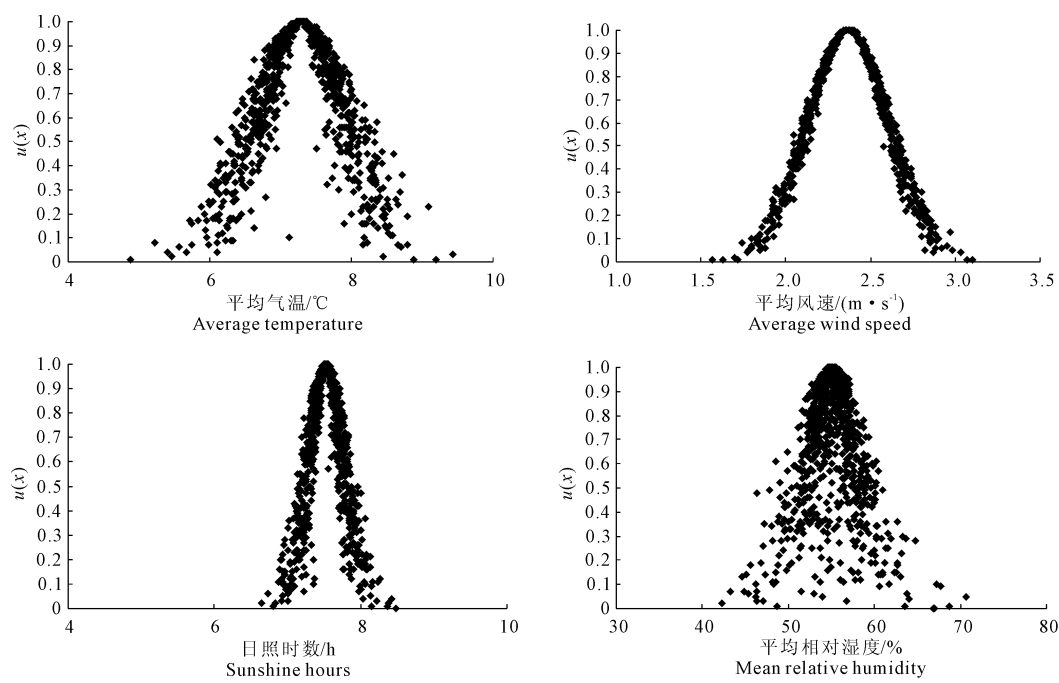


图 6 气象因子的云分布

Fig.6 Cloud of meteorological factors distribution

表 4 气象因子与参考作物蒸散量的通径分析

Table 4 Path analysis between meteorological factors and ET_{0-pm}

区域 Area	气象因子 Meteorological factors	通径系数 P Size coefficient	间接作用系数 Indirect effect				间接作用系数之和 Sum of indirect effect coefficient	总作用系数 Total effect coefficient
			T	n	RH	u_2		
甘肃省 Gansu Province	T	0.468	—	-0.021	0.076	-0.112	-0.057	0.411
	n	0.326	-0.029	—	0.375	0.089	0.434	0.760
	RH	-0.456	-0.078	-0.268	—	-0.092	-0.439	-0.895
	u_2	0.251	-0.210	0.115	0.167	—	0.073	0.324
河西地区 Hexi area	T	0.713	—	0.032	-0.032	-0.517	-0.516	0.197
	n	0.236	0.097	—	-0.013	-0.134	-0.051	0.186
	RH	-0.322	0.071	0.010	—	-0.013	0.067	-0.254
	u_2	0.558	-0.660	-0.057	0.008	—	-0.709	-0.151
陇中地区 Longzhong area	T	0.459	—	0.010	0.031	-0.274	-0.234	0.225
	n	0.155	0.029	—	0.052	-0.056	0.025	0.180
	RH	-0.594	-0.024	-0.014	—	0.008	-0.030	-0.624
	u_2	0.320	-0.394	-0.027	-0.014	—	-0.435	-0.115
陇南地区 Longnan area	T	1.201	—	-0.338	-0.104	-0.125	-0.567	0.634
	n	0.380	-1.067	—	0.074	0.091	-0.902	-0.522
	RH	-0.169	0.738	-0.166	—	-0.077	0.494	0.326
	u_2	0.173	-0.870	0.201	0.075	—	-0.594	-0.421
陇东地区 Longdong area	T	0.348	—	-0.138	-0.001	-0.169	-0.307	0.041
	n	0.422	-0.114	—	0.045	-0.090	-0.159	0.263
	RH	-0.377	0.001	-0.050	—	0.142	0.092	-0.285
	u_2	0.354	-0.166	-0.107	-0.151	—	-0.424	-0.070

注: T 、 n 、 RH 、 u_2 分别表示平均气温、日照时数、平均相对湿度、平均风速。

Note: T 、 n 、 RH 、 u_2 represent temperature, sunshine duration, relative humidity, wind speed.

不同区域 ET_0 的影响因子也不尽相同,对河西地区和陇南地区 ET_0 变化直接作用最大的气象因子为平均温度;对陇中地区和陇东地区 ET_0 变化直接作用最大的气象因子分别为平均相对湿度和日照时数。平均风速是对河西地区、陇中地区和陇东地区间接作用最为显著的气象因子;陇南地区对 ET_0 间接作用最为显著的气象因子则为日照时数。

3 结论与讨论

采用 FAO - Penman - Monteith (98) 公式计算甘肃省 4 个分区, 29 个测站 1951—2013 年共计 63 年的参考作物蒸散量。利用云模型结合等值线图的方法, 能够直观地描述甘肃省 ET_0 在时间和空间上的变化特征以及不同时间、空间 ET_0 分布的均匀、稳定状况; 并将云模型应用于气象因子的分析中, 结果表明: 云模型所描述的甘肃省多年来最不均匀、最不稳定的两个气象因子——平均温度和平均相对湿度正是对 ET_0 直接作用最大的两个气象因子, 研究结果与通径分析结果相一致, 这为研究 ET_0 变化成因提供了新的思路和方法。研究取得了以下结论:

1) 空间尺度上 ET_0 总体表现为西北地区大于东南地区。其中河西地区 ET_0 在甘肃省内一直处于最高值, 但呈逐年减小的趋势; 陇中地区和陇东地区前 30 年先减小, 后 33 年较之前有所增加, 但总体趋于稳定; 陇南地区则表现为多年最低值且较为稳定, 无明显变化。

2) 63 年来河西地区 ET_0 分布最为离散, 不均匀性也最不稳定; 陇东地区 ET_0 分布最为均匀, 稳定性也相对最好。 ET_0 在空间上分布的离散度先增加 (1951—1980 年), 后减小 (1981—2000 年), 2000 年后又有逐渐增加的趋势, 均匀性后 33 年好于前 30 年, 稳定程度同样是后 33 年更好。

3) 63 年间平均气温和日照时数逐年递增, 增长幅度分别为 $0.24^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 和 $0.01 \text{ h} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。平均风速和平均相对湿度呈逐年递减的趋势, 减幅分别为 $0.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 和 $0.46\% \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。多年来平均气温和平均相对湿度分布较为离散, 不均匀性也不稳定; 平均风速和日照时数的分布较为均匀, 稳定性也相对较好。

4) 通径分析表明, 各个气象因子对 ET_0 变化都有影响且对不同区域 ET_0 主要影响因子也不尽相同。对河西地区和陇南地区 ET_0 变化直接作用最大的气象因子为平均温度; 对陇中地区和陇东地区 ET_0 变化直接作用最大的气象因子分别为平均相对湿度和日照时数。平均风速是对河西地区、陇中地

区和陇东地区间接作用最为显著的气象因子; 而对陇南地区 ET_0 间接作用最为显著的气象因子则为日照时数。

参考文献:

- [1] 王文玉, 杨沈冰, 张强, 等. 近 50 年环青海湖高寒地区和环鄯阳湖湿润地区潜在蒸散量变化比较分析[J]. 中国沙漠, 2013, 33(3): 866-873.
- [2] Thomas A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China[J]. Int. J. Climatol, 2000, 20: 281-296.
- [3] 王晓东, 马晓群, 徐莹, 等. 淮河流域参考作物蒸散量变化特征及主要气象因子的贡献分析[J]. 中国农业气象, 2013, 34(6): 661-667.
- [4] 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.
- [5] 赵璐, 蔡焕杰, 王健. 榆林市参考作物蒸发蒸腾量随时间序列变化的规律[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1): 39-43.
- [6] 罗雨, 刘海军, 李艳. 北京地区参考作物蒸散量变化趋势及其主要影响因素分析[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1): 34-38.
- [7] 牛全文, 李靖. 陕西省多年月潜在蒸发量和降水量的随机特性[J]. 干旱地区农业研究, 2001, 19(2): 112-116.
- [8] Hossein Tabari, Ozgur Kisi, Azadeh Ezani, 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.
- [9] 汪治桂, 王素萍, 王建兵, 等. 黄河源区近 40 年参考作物蒸散量变化特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(6): 169-189.
- [10] 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.
- [11] 汪治桂, 王素萍, 王建兵, 等. 黄河上游重要水源补给区参考作物蒸散量变化特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(6): 243-246.
- [12] 吴文玉, 马晓群, 陈晓艺, 等. GIS 支持下安徽省近 35a 参考作物蒸散量的时空变化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 251-255.
- [13] 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): 378-386.
- [14] 尹云鹤, 吴绍洪, 赵东升, 等. 1981—2010 年气候变化对青藏高原实际蒸散的影响[J]. 地理学报, 2012, 67(11): 1471-1480.
- [15] 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, 2013, 45(1): 91-97.
- [16] 范文波, 吴普特, 韩志全, 等. 玛纳斯河流域影响因子分析及 Hargreaves 法的修正[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 19-24.
- [17] 蔡甲冰, 刘钰, 徐迪, 等. 基于通径分析原理的冬小麦缺水诊断指标敏感性分析[J]. 水利学报, 2008, 39(1): 83-89.
- [18] 李玲玲, 黄高宝. 绿洲灌区参考作物蒸散量的测算[J]. 中国沙漠, 2011, 31(1): 142-148.
- [19] 封志明, 杨艳昭, 丁晓强, 等. 甘肃地区参考作物蒸散量时空变化研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 99-103.
- [20] 吕晓东, 王鹤龄, 马忠明. 河西地区近 50 年参考作物蒸散量的演变趋势及其影响因素[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1550-1555.

化具有一定程度的相似性,且表现出明显的变异性。

参 考 文 献:

[1] Heathman G C, Cosh M H, Han E, et al. Field scale spatiotemporal analysis of surface soil moisture for evaluating point – scale in situ networks[J]. *Geoderma*, 2012,170:195-205.

[2] Martínez-Fernández J, Ceballos A. Mean soil moisture estimation using temporal stability analysis[J]. *Journal of Hydrology*, 2005,312(1): 28-38.

[3] Brocca L, Melone F, Moramarco T, et al. Soil moisture temporal stability over experimental areas in Central Italy[J]. *Geoderma*, 2009, 148(3):364-374.

[4] 刘丙霞,邵明安.黄土区退耕草地小尺度土壤水分空间异质性[J].*中国水土保持科学*,2012,10(4):60-65.

[5] Weierm Ller L, Huisman J A, Lambot S, et al. Mapping the spatial variation of soil water content at the field scale with different ground penetrating radar techniques[J]. *Journal of Hydrology*, 2007,340(3): 205-216.

[6] Mohanty B P, Skaggs T H, Famiglietti J S. Analysis and mapping of field-scale soil moisture variability using high-resolution, ground-based data during the Southern Great Plains 1997 (SGP97) Hydrology Experiment[J]. *Water Resources Research*, 2000,36(4):1023-1031.

[7] 张继光,陈洪松,苏以荣,等.湿润和干旱条件下喀斯特地区洼地表层土壤水分的空间变异性[J].*应用生态学报*,2006,17(12):2277-2282.

[8] Hu W, Shao M A, Wang Q J, et al. Soil water content temporal-spatial variability of the surface layer of a Loess Plateau hillside in China [J]. *Scientia Agricola*, 2008,65(3):277-289.

[9] 郭德亮,樊 军,米美霞.黑河中游绿洲区不同土地利用类型表层土壤水分空间变异的尺度效应[J].*应用生态学报*,2013,24(5):1199-1208.

[10] Baroni G, Ortuani B, Facchi A, et al. The role of vegetation and soil properties on the spatio – temporal variability of the surface soil moisture in a maize-cropped field[J]. *Journal of Hydrology*, 2013,489: 148-159.

[11] 单鱼洋.干旱区膜下滴灌水盐运移规律模拟及预测研究[D].北京:中国科学院研究生院,2012.

[12] 刘建军.棉田膜下滴灌条件下土壤水盐分布特征试验研究

[D].西安:西安理工大学,2009.

[13] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006.

[14] 何 丹.封丘地区土壤水分入渗特性的时空变异及其影响因素研究[D].雅安:四川农业大学,2012.

[15] 秦耀东.土壤空间变异研究中的半方差问题[J].*农业工程学报*,1998,14(4):42-47.

[16] 王政权.地统计学及在生态学中的应用[M].北京:科学出版社,1999.

[17] 张 川,陈洪松,张 伟,等.喀斯特坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率的空间变异特征[J].*应用生态学报*,2014,25(6):1585-1591.

[18] 王云强,张兴昌.黄土区小尺度坡面土壤含水率时空变异性研究[J].*水土保持学报*,2008,22(2):32-37.

[19] Cambardella C, Moorman T, Parkin T, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994,58(5):1501-1511.

[20] 张松林,张 昆.空间自相关局部指标 Moran 指数和 G 系数研究[J].*大地测量与地球动力学*,2007,27(3):31-34.

[21] 徐 英,陈亚新,史海滨,等.土壤水盐空间变异尺度效应的研究[J].*农业工程学报*,2004,20(2):1-5.

[22] 李 彦,雷晓云,申详民,等.膜下滴灌条件下土壤水分空间分布特征研究[J].*水资源与水工程学报*,2010,21(6):4-7.

[23] 李芳松,雷晓云,陈大春,等.膜下滴灌棉田土壤水分空间变异规律研究[J].*灌溉排水学报*,2010,29(6):68-71.

[24] 李 敏,李 毅,曹 伟,等.不同尺度网格膜下滴灌土壤水盐的空间变异性分析[J].*水利学报*,2009,40(10):1210-1218.

[25] 余冬立,邵明安,俞双恩.黄土区农草混合利用坡面土壤水分空间变异性[J].*农业机械学报*,2010,41(7):57-63.

[26] 张永萱,张光辉,王志强.黄土剖面土壤颗粒组成对土壤含水量的影响[J].*水土保持通报*,2009,29(6):6-9,15.

[27] Grayson R B, Chiew F H S, BL SCHL G. Preferred states in spatial soil moisture patterns: Local and nonlocal controls[J]. *Water Resources Research*, 1997,33(12):2897-2908.

[28] Gonzalo Martínez García, Yakov A. Pachepsky, Harry Vereecken. Effect of soil hydraulic properties on the relationship between the spatial mean and variability of soil moisture[J]. *Journal of Hydrology*, 2014,516(S1):154-160.

(上接第 15 页)

[21] Allen R G, Perreira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration; guidelines for computing crop water requirements: Irrigation and Drainage Paper 56[R]. Rome:FAO, 1998.

[22] 李德毅,刘常显.论正态云模型的普适性[J].*中国工程科学*, 2004,6(8):28-34.

[23] 刘德地,陈晓宏,楼章华.基于云模型的降雨时空分布特征性分析[J].*水利学报*,2009,40(7):851-856.

[24] 高文荣,段春青,陈晓楠,等.基于云推理的年降水预测模型[J].*中国农村水利水电*,2009,(3):33-35.

[25] 张 峰,张鹏林,吕志勇,等.云模型在城镇空气质量评价中的应用[J].*环境科学与技术*,2009,32(6):160-164.

[26] 王 贺,刘高峰,王慧敏.基于云模型的城市极端雨洪灾害风险评价[J].*水利经济*,2014,32(2):15-18.

[27] 曹玉升,陈晓楠,张 伟,等.云综合评判模型在区域水资源承载力评价中的应用[J].*华北水利水电学院学报*,2010,31(4): 17-20.

[28] 陈贵林.一种定性定量信息转换的不确定性模型—云模型[J].*计算机应用研究*,2010,27(6):2006-2010.