

喀斯特地区参考作物蒸散量变化特征及驱动机制研究

——以贵州省为例

邢 愿¹, 贺中华^{1,2}

(1. 贵州师范大学 地理与环境科学学院(喀斯特研究院), 贵阳 550001;
2. 贵州师范大学 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001)

摘要:贵州省独特的地表水和地下水二元水文结构及典型的喀斯特低山丘陵地貌区造成农业生态环境极其脆弱,易发生由气象因素引发的农业灾害,导致农业减产。运用修订的 Penman-Monteith 公式,估算贵州省 2000—2017 年 31 个气象站点的参考作物蒸散量(ET_0),利用 ArcGIS 反距离加权插值法研究贵州省植被生长季参考作物蒸散量空间分布特征,利用 MATLAB 软件对参考作物蒸散量栅格数据进行一元线性回归及显著性检验,探究贵州省参考作物蒸散量的趋势特征;在此基础上,利用主成分分析法研究影响贵州省参考作物蒸散量的主要因素。研究表明:①贵州省 ET_0 分布特征为东南部地区高于西北部地区,喀斯特地区低于非喀斯特地区,喀斯特石漠化较为严重的毕节地区、安顺、贵阳及黔南地区的北部地区为 ET_0 最低区;植被生长季年平均 ET_0 总体呈波动上升趋势;②高海拔地区的 ET_0 未发生突增或突减变化,较低海拔地区 ET_0 在不同年份骤增或骤减变化;③影响贵州省 ET_0 的主导气象因素是温度与风速、降水次之。

关键词:参考作物蒸散量;驱动因子;主成分分析;喀斯特

中图分类号:P426.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2021)04-0264-09

对参考作物蒸散量(ET_0)的深入研究有助于规划区域农业生产和安排种植制度,科学评价农业水分资源,合理制定农田灌溉方案,防灾减灾,提高生产力,对区域社会经济科学发展有着重要意义^[1]。由于 ET_0 的直接测量难度大、成本高昂,方法技术无法大面积推广,实用性低下,且数据准确性难以保障^[2]。目前使用最为广泛的是联合国粮农组织(FAO)推荐的 1998 年修订的 Penman-Monteith 公式。在 ET_0 对于气象要素的敏感性方面的研究众多,由于地理环境的差异性,不同研究区域的 ET_0 变化趋势存在差异,其影响因素也因地而异^[3]。

目前关于西南地区 ET_0 及其影响因素,戴明宏等^[4]研究发现,贵州省 ET_0 与降水量、平均气压、日较差和相对湿度呈负相关关系,与平均风速、平均气温、水汽压和日照时数呈正相关关系,影响贵州省 ET_0 的主导因素是日照时数;倪宁淇等^[5]研究表明 1960—2015 年年均 ET_0 呈下降趋势,但下降趋势

不显著,西南全区及各分区参考作物蒸散量均对相对湿度的敏感性最高,除四川盆地外,其余分区对日照时数、最高温度的敏感性较高,四川盆地对平均温度的敏感性较高;张青雯等^[6]研究发现 1954—2013 年西南 5 省年均 ET_0 总体呈下降趋势,空间分布特征为南部大于北部,云贵高原西部和广西地区明显大于四川盆地和云贵高原东部,四川盆地相对最小,川西高原南部和云贵高原东部地区相对最大;张伟伟等^[7]基于西南地区 108 个气象站点 1960—2013 年逐日气温、降水、风速、日照时数、太阳总辐射和相对湿度数据研究表明西南地区参考作物蒸散量在波动中呈降低趋势, ET_0 存在明显的空间差异,表现为以云贵高原西部为高值中心,向四周递减;影响西南地区 ET_0 的因子主要以日照时数、风速和相对湿度为主,但各区所受主控因子却不尽相同。

贵州省充沛的降水和气温的综合作用加剧了岩溶侵蚀,水土流失十分严重^[8]。强烈的岩溶作用导致

收稿日期:2020-11-09

基金项目:国家自然科学基金项目(41471032,u1612441);贵州省水利厅自然科学基金项目(KT201402);2015 年贵州师范大学博士基金项目。

作者简介:邢愿(1994—),男,甘肃白银人,贵州师范大学,硕士研究生,研究方向为喀斯特水文水资源 GIS、遥感干旱;通信作者贺中华(1976—),男,贵州师范大学,教授,博士,博士研究生导师,研究方向为喀斯特水文水资源与遥感。

溶蚀裂隙、漏斗、落水洞等发育,地表水流极易进入地下管网并流出区外,形成独特的地表水和地下水二元水文结构^[9]。喀斯特地区地形起伏大,而地下水埋藏深,水资源开发利用成本高、难度大,地下水利用率低,加上土壤瘠薄,土地的保水性差,农业生态环境极其脆弱^[10-11],水资源的相对缺乏给当地农业发展带来巨大影响。因此,针对喀斯特地区参考作物蒸散量时空变化特征及驱动机制的研究,对农业发展和防灾减灾,提高生产力及水资源合理配置有重要意义。

1 研究区概况

贵州简称黔或贵,地处云贵高原为典型的喀斯特低山丘陵地貌区,介于东经 103°36′~109°35′、北纬 24°37′~29°13′,地势西高东低,自中部向北、东、南三面倾斜,平均海拔约 1 100 m(图 1)。贵州省高原山地居多,素有“八山一水一分田”之说,人均耕地面积不到 0.05 hm² (1 hm² = 10⁴ m²),远低于全国平均水平,且土层厚、肥力高、水利条件好的耕地所占比重低^[12];气候温暖湿润,属亚热带湿润季风气候,常年降雨量充沛,但时空分布不均,分布特点为南多北少,东多西少,全省多年平均降雨量为 1 100~1 300 mm,光照条件差,全省大部地区日照时数为 1 200~1 600 h,分布特点为西多东少;受大气环流及地形等影响,气候不稳定,灾害性天气种类较多,干旱、秋风、凝冻、冰雹等频度大,对农业生产危害严重^[13-15]。

2 数据与方法

2.1 数据来源

气象资料来源于中国气象科学数据共享网提供的地面气象观测数据集。本研究选取能较好均匀覆盖贵州省、空间代表性较好的 31 个气象站点(图 1),2000—2017 年植被主要生长期(4—11 月)逐日降水量(P)、平均气温(AT)、日照时数(t)、平均相对湿度(RH)、风速(F)、水汽压(e)等气象资料。该资料经过了严格的质量控制,为后续计算参考作物蒸散量提供保障。

2.2 研究方法

2.2.1 参考作物蒸散发量(ET_0)

以水汽扩散理论与热量平衡理论相结合的半经验公式法为理论基础,由英国学者彭曼提出的计算公式是目前世界上公认的理论较严密、实用上比较简单且误差较小的用于计算作物蒸散发量的公式^[16]。

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

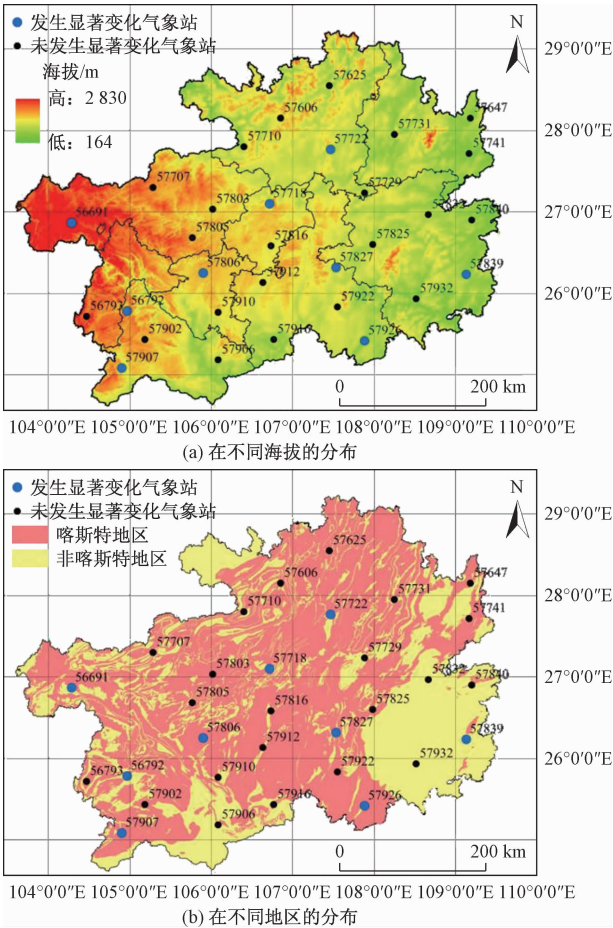


图 1 贵州省地形及气象站点分布

式中: ET_0 为参考作物蒸散量; R_n 为作物表面的净辐射; G 为土壤热通量; T 为地表高 2 m 处的平均气温; γ 为干湿计常数; u_2 为地表高 2 m 处的平均风速; e_s 、 e_a 分别为饱和水汽压、实际水汽压; Δ 为当前空气温度时的饱和水汽压曲线斜率。具体计算见文献^[17-18]。

2.2.2 趋势分析

基于 MATLAB 的栅格数据一元线性回归及显著性检验法^[19-20],计算公式为

$$\theta_{slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n i C_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n i C_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (2)$$

式中: θ_{slope} 为回归方程斜率, $\theta_{slope} > 0$, 表示 ET_0 有增加趋势, $\theta_{slope} < 0$, 表示 ET_0 有减少趋势; n 表示监测累积年数, $n=18$; C_i 表示第 i 年的累积 ET_0 。

$$F = U \frac{n-2}{Q}, U = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2, Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3)$$

式中: F 为给定显著性水平 α , 查自由度为 $(1, n-2)$ 的 F 分布临界表所得临界值; U 为误差平方和; Q 为回归平方和; y_i 为第 i 年蒸散量的像元值, $\hat{y}_i$ 为其回归值, $\bar{y}$ 为监测时段参考蒸散量的平均值; n 为监测年数, $n=18$ 。根据检验结果将变化趋势划分等级。

2.2.3 突变分析

Mann-Kendall 法是一种非参数统计检验法, 许多学者不断完善和改进, 并应用于气温、降水、径流^[21-23]等要素的趋势变化分析和突变检验。它不需要样本遵从一定的分布, 也不受少数异常值的干扰, 计算简便、使用广泛。Mann-Kendall 法检验统计量(S)计算公式为

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_i - x_j) \tag{4}$$

式中: sign 为符号函数, 当 $(x_i - x_j)$ 小于、等于或大于 0 时, $\text{sign}(x_i - x_j)$ 分别为 -1 、0 或 1。序列的 U (变化趋势) 分别为

$$U = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\text{var}(S)}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{\text{var}(S)}, & S < 0 \end{cases} \tag{5}$$

式中, U 为正值表示增加趋势, 负值表示减少趋势。 U 绝对值在大于等于 1.645、1.96、2.576 时分别表示其通过了置信度为 90%、95%、99% 的显著性检验。 $|U| > 1.96$, 拒绝原假设 H_0 。假设检验: H_0 是参考作物蒸散量系列有突变, H_1 为参考作物蒸散量系列没有突变。在时间序列随机独立的假定下, 计算统计量为

$$U_{Fk} = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{var}(S_k)}}, \quad k = 1, 2, \dots, n \tag{6}$$

式中, $E(S_k)$ 和 $\text{var}(S_k)$ 分别表示 S_k 的均值与方差。按时间序列 x 的逆序 $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$ 重复上诉过程, 获得统计变量 $U_{Bk} (k = n, n-1, \dots, 1)$ 同时使

$$U_{Bk} = -U_{Fk} \tag{7}$$

将 U_{Bk} 和 U_{Fk} 通过软件绘制成曲线, 如果两条曲线出现交点, 且该点处的 U 值满足 $|U| < 1.96$, 则认为该点为序列的突变点, 检验置信水平 $\alpha=0.05$ ^[24]。

2.2.4 主成分分析

主成分分析^[25]是利用降维的思想, 在损失很少信息的前提下把多个研究指标转换为几个综合指标的一种统计方法, 且各个主成分之间互不相干。主成分分析的数学模型为: 对于 k 个观测变量 $X_1, X_2, \dots, X_k, n$ 个观测样本的数据矩阵。

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1k} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \cdots & X_{nk} \end{bmatrix} = (X_1, X_2, \dots, X_k) \tag{8}$$

将 k 个预测变量综合成为 z 个新的变量(综合变量), 即

$$\begin{cases} Y_1 = a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \cdots + a_{1k}X_k \\ Y_2 = a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \cdots + a_{2k}X_k \\ \cdots \\ Y_z = a_{z1}X_1 + a_{z2}X_2 + \cdots + a_{zk}X_k \end{cases} \tag{9}$$

式中: Y_1 为第一主成分, Y_2 为第二主成分, 以此类推; a_{ij} 为主成分系数。

3 结果分析

3.1 蒸散量空间分布特征

用反距离权重插值法(IDW)对 2000—2017 年贵州省植被生长季多年平均参考作物蒸散量进行插值得贵州省植被生长季 ET_0 空间分布(图 2)。贵州省不同地区植被生长季年均 ET_0 为 580 ~ 910 mm, 总体分布特征为: 东南部地区高于西北部地区, 喀斯特地区低于非喀斯特地区; 形成以贵阳-安顺为核心的低 ET_0 环状空间分布, 黔西南与黔南交界地区为核心的高 ET_0 的带状空间分布特征; 喀斯特石漠化较为严重的毕节、安顺、贵阳及黔南地区的北部地区为 ET_0 最低区; 遵义西部、毕节东部、六盘水北部、贵阳北部地区为 ET_0 较低区; 遵义东北地区、铜仁、黔东南大部分地区、黔西南地区的西南部地区为 ET_0 中高地区; ET_0 最高较高及最高区位于黔东南南部地区、黔西南与黔南交界地区, 为植被覆盖良好的非喀斯特地区。 ET_0 最高区与最低区之间的差值为 250 mm; ET_0 最高区与最低区面积分别为 10 395.15、43 274.83 km², 分别占全省总面积的 5.9%、24.6%。

由 ET_0 年际变化趋势图(图 3)及其面积统计(表 1)可得, 近 18 年来贵州省参考作物蒸散量总体表现为增加趋势, 即回归系数 θ_{slope} 大于 0 的区域占整个研究区的 67.44%, 其中极显著增加的区域占整个研究区的 9.92%, 主要分布在贵州省西部地区, 以毕节市的西部、六盘水的中部、黔西南地区的西南部最为显著; 显著增加的区域占整个研究区的 8.18%, 分布与极显著增加区一致; ET_0 呈减少趋势的面积远小于增加区域的面积, 在整个研究区中呈显著和极显著降低的区域所占面积不足 10%, 主要分布于贵阳市西北部地区、黔南地区的中部。贵

州省 ET_0 的增加,表明作物灌溉需水量也随之增加,贵州省作为典型喀斯特地区,水土流失严重,地表水资源有限且开发利用率低,自然降水无法保障作物生长蒸散发所需的水分,对水分需求量的水稻等作物不采取有效措施保障作物需水,将引发严重农业干旱问题,导致粮食作物减产。

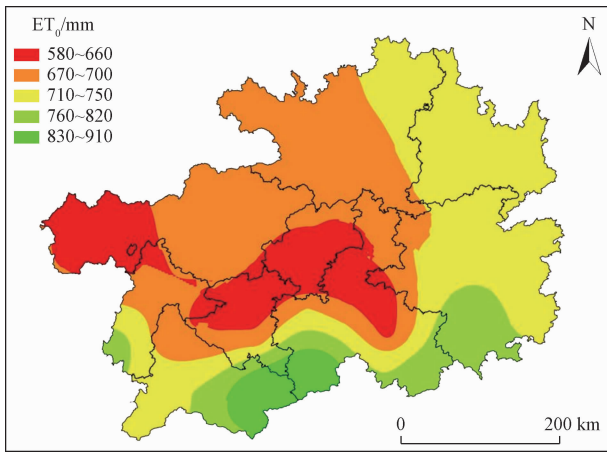
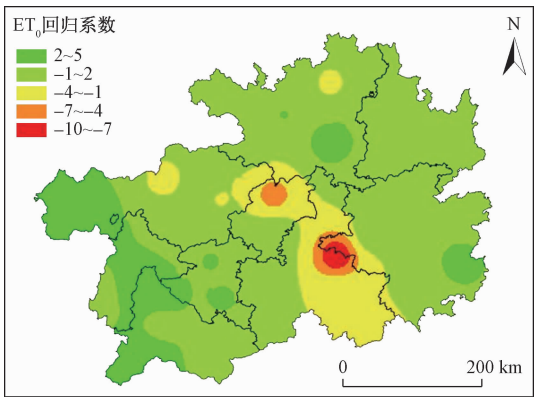
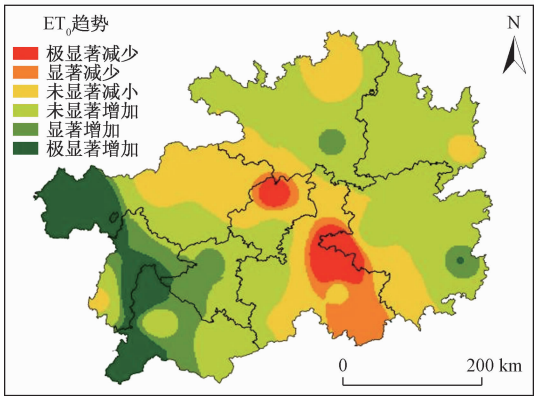


图2 贵州省2000—2017年植被生长季 ET_0 空间分布



(a) ET_0 回归系数



(b) ET_0 趋势

图3 贵州省2000—2017年 ET_0 年际变化趋势及显著性检验空间分布

表1 2000—2017年 ET_0 年际变化趋势统计

划分依据	变化趋势	面积/km ²	面积比/%
$\theta_{\text{slope}} < 0, P < 0.01$	极显著减少	6 016.87	3.41
$\theta_{\text{slope}} < 0, 0.01 < P < 0.05$	显著减少	8 556.98	4.86
$\theta_{\text{slope}} < 0, P > 0.05$	未显著减少	42 813.92	24.29
$\theta_{\text{slope}} > 0, P > 0.05$	未显著增加	86 942.98	49.34
$\theta_{\text{slope}} > 0, 0.01 < P < 0.05$	显著增加	14 415.56	8.18
$\theta_{\text{slope}} > 0, P < 0.01$	极显著增加	17 481.24	9.92

为进一步探究喀斯特地区与非喀斯特地区植被生长季 ET_0 的变化特征,统计喀斯特与非喀斯特地区的气象站点的蒸散量(图4)。由图4可得,植被覆盖良好的非喀斯特地区 ET_0 明显高于喀斯特地区,且非喀斯特地区的 ET_0 高于喀斯特地区约20 mm。非喀斯特地区植被生长季 ET_0 以每年1.318 2 mm 的量增加,喀斯特地区与非喀斯特地区 ET_0 趋势变化一致,呈同增同减特征。

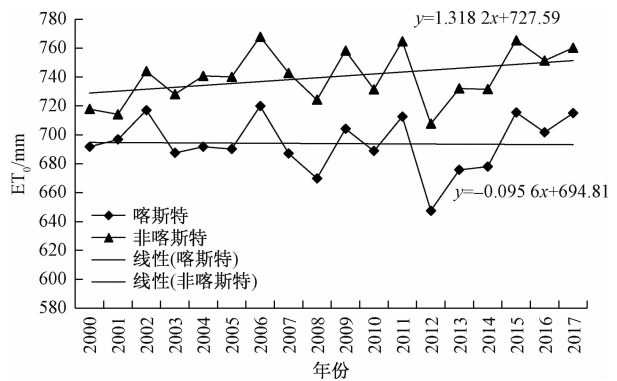


图4 贵州省2000—2017年喀斯特与非喀斯特地区植被生长季 ET_0 趋势统计

3.2 蒸散量趋势分析

用一元线性趋势检验法、Kendall 秩次检验方法分析贵州省31个气象站点的 ET_0 。通过分析可得,其中有9个站点(图1)通过了置信度95%的显著性检验(表2)。一元线性趋势检验法分析可得9个站点的线性趋势方程拟合状况较优,其中威宁气象站点拟合效果最优。9个气象站点的 ET_0 呈明显增加或减少趋势,其中普安站点 ET_0 增加趋势最为显著,以5.297 2 mm/d 的速率增加;都匀站点 ET_0 减小趋势最为显著,以10.66 mm/d 的速率减少;Kendall 秩次检验分析可得,9个站点的 $|U|$ 值均大于 $U_{\alpha}/2=1.96$,表明9个站点的 ET_0 增加或减小趋势显著。其中威宁、普安、湄潭、安顺、黎平、兴义6个气象站点呈显著增加趋势,分别以4.941 3、5.297 2、4.030 2、2.168 1、3.447 4、4.033 7 mm/d 的速率增加,息烽、都匀、荔波3个气象站点呈显著

减少趋势,较少速率分别为 5.8181、-10.66、-3.317 1 mm/d。

由 9 个气象站植被季年平均 ET_0 一元线性趋势变化(图 5)分析可得,独山、安顺、黎平、兴义气象站点 ET_0 变化趋势上下波动明显,各气象站点 ET_0

分别在 2011 年(746.7 mm)、2015 年(659.3 mm)、2017 年(787 mm)、2017 年(784.7 mm)达到最大值;2003 年(629.5 mm)、2012 年(577.6 mm)、2012 年(671.4 mm)、2008 年(675.3 mm)达到最低值。

表 2 气象站点植被生长季 ET_0 变化趋势及检验结果

站点名称	区站号	$ U $ 值	$ U $ 与 $U_{\alpha}/2=1.96$ 的关系	是否显著	线性方程	R^2
威宁	56691	4.509	$ U >1.96$	显著	$y=4.941\ 3x+531.62$	0.824\ 5
普安	56792	3.825	$ U >1.96$	显著	$y=5.297\ 2x+629.2$	0.613\ 8
息烽	57718	2.539	$ U >1.96$	显著	$y=-5.818\ 1x+715.84$	0.497\ 6
湄潭	57722	2.463	$ U >1.96$	显著	$y=4.030\ 2x+645.77$	0.314\ 8
安顺	57806	2.162	$ U >1.96$	显著	$y=2.168\ 1x+601.29$	0.239\ 2
都匀	57827	2.991	$ U >1.96$	显著	$y=-10.66x+740.74$	0.637\ 8
黎平	57839	2.689	$ U >1.96$	显著	$y=3.447\ 4x+690.78$	0.355\ 1
兴义	57907	2.915	$ U >1.96$	显著	$y=4.033\ 7x+700.26$	0.448\ 3
荔波	57926	2.313	$ U >1.96$	显著	$y=-3.317\ 1x+832.72$	0.310\ 6

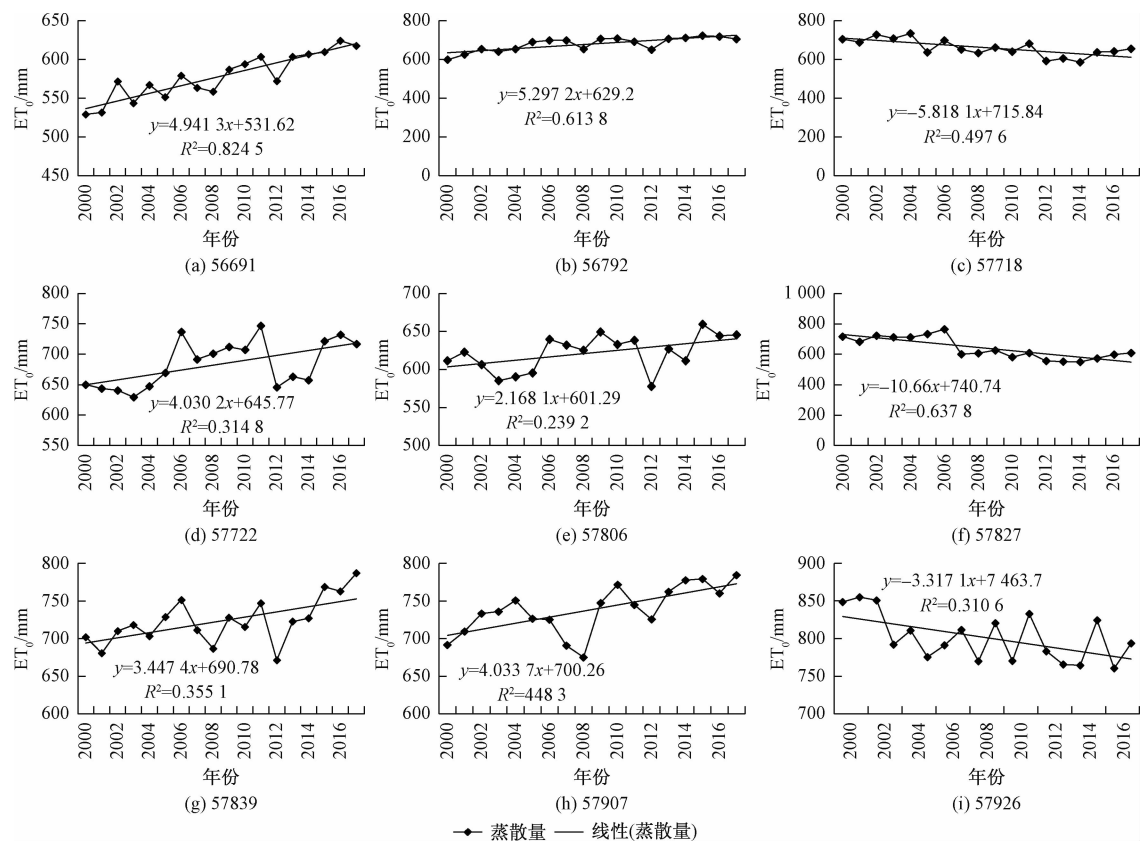


图 5 突变站点 2000—2017 年生长季 ET_0 变化过程

3.3 蒸散量突变分析

为探究气象站点 ET_0 趋势发生波动的原因,利用 Mann-Kendall 非参数统计检验突变点分析法对

9 个气象站点 ET_0 进行 M-K 突变点检验(图 6)。威宁与普安站点 ET_0 未出现突变性增长或减小的时间节点,但威宁与普安气象站点 ET_0 呈持续增长趋势,

分别在 2008 年与 2004 年后 U_F 曲线值大于 1.96，表明威宁与普安气象站点 ET_0 通过 0.05 显著性检验。息烽气象站点的 ET_0 发生突变的年份为 2006 年， U_F 曲线可知其年平均 ET_0 序列呈现出单峰式变化，在 2011 年 U_F 曲线超越 0.05 显著性水平置信下限，减小的趋势显著；湄潭气象站点 ET_0 发生突变的年份为 2004—2005 年，其年平均 ET_0 序列呈现出先减后增变化，在 2004 年后 $U_F > 0$ ， ET_0 呈持续增长趋势，在 2007 年后 $U_F > 1.96$ ，通过 0.05 显著性检验；安顺与黎平气象站点在 0.05 的置信水

平下 U_F 和 U_B 两条曲线有多个交点，经过合理性分析可确定突变年份分别为 2012 年、2014 年。都匀气象站点 ET_0 发生突变的年份为 2008 年，由 U_F 曲线可知其年平均 ET_0 序列呈现出波浪式变化，总体呈下降趋势，在 2011 年后 U_F 曲线超越 0.05 显著性水平置信下限，减小的趋势显著；兴义气象站点 ET_0 发生突变的年份为 2012—2013 年，总体呈增加趋势，单增加趋势不显著；荔波气象站点 ET_0 发生突变的年份为 2003—2004 年，在 2003 年后 $U_F < 0$ ， ET_0 呈持续减少趋势。

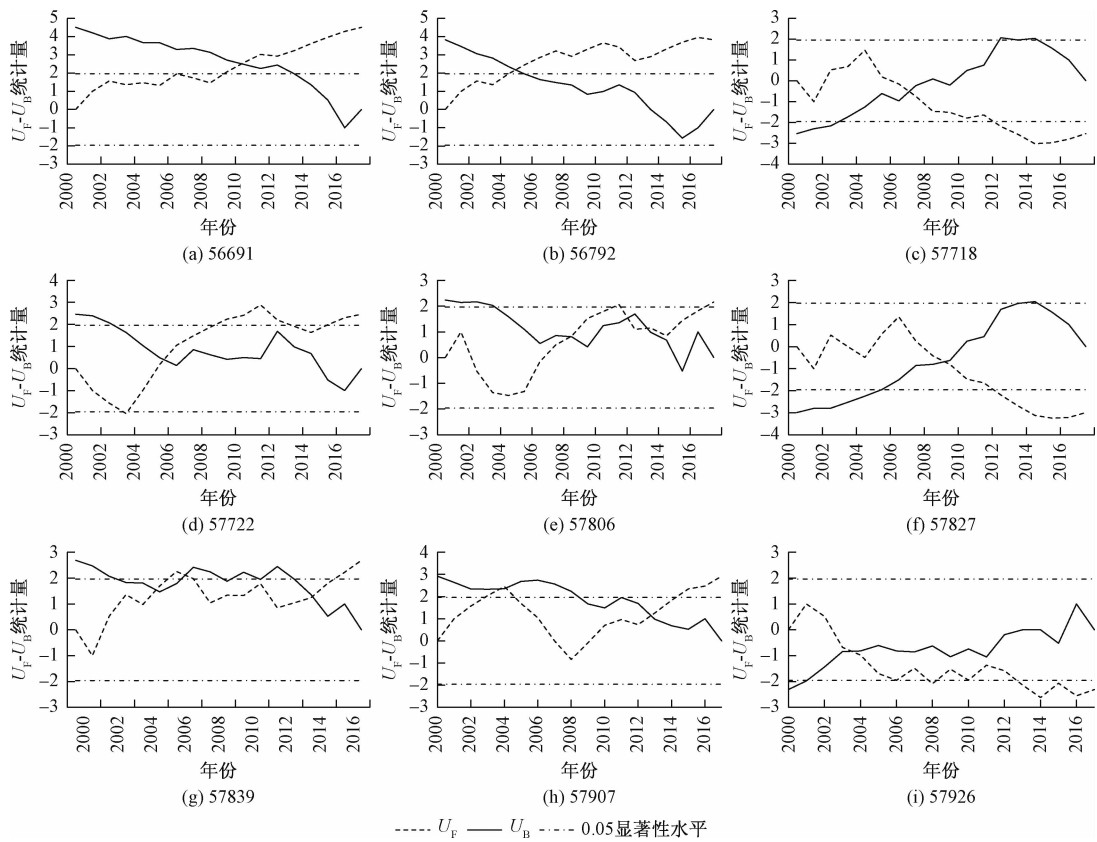


图 6 突变站点 2000—2017 年生长季 ET_0 的 M-K 检验

3.4 蒸散量驱动因子分析

为探究影响 ET_0 的变化的成因，利用因子分析与主成分分析法作为主要研究方法，考虑与 ET_0 有关的平均气温值、平均相对湿度、平均风速日照时数、降水量、平均地表气温等 6 个指标，作为探究影响 ET_0 的影响指标。

由表 3 可得，平均地表气温与降水量的假设相关系数为 0 的单侧显著性检验概率为 0.26 大于 0.05，因此两者之间是不相关的；其他指标假设相关系数为 0 的单侧显著性检验概率均小于 0.05，因此各变量两两之间是相关的。平均气温、平均地表

温度的能量来源主要都是太阳辐射，因此二者与日照时数具有较高的相关度。平均气温值与平均相对湿度呈负相关，与其他指标均呈正相关；平均相对湿度与降水量呈正相关，与其他指标呈负相关；平均风速与平均气温值、日照时数呈正相关，与平均相对湿度与降雨量呈负相关；日照时数与平均气温值、平均风速呈正相关，与平均相对湿度与降水量呈负相关；降雨量与平均气温、平均相对湿度呈正比，与平均风速与日照时数呈反比；平均地表气温与平均相对湿度呈反比，与平均气温、平均风速、日照时数呈正比。

表 3 相关矩阵

指标		平均气温值	平均相对湿度	平均风速	日照时数	降水量
相关	平均气温值	1	−0.248	0.113	0.448	0.107
	平均相对湿度	−0.248	1	−0.234	−0.745	0.444
	平均风速	0.113	−0.234	1	0.124	−0.041
	日照时数	0.448	−0.745	0.124	1	−0.38
	降水量	0.107	0.444	−0.041	−0.38	1
	平均地表气温	0.968	−0.365	0.095	0.576	0.009
Sig. (单侧)	平均气温值		0	0	0	0
	平均相对湿度	0		0	0	0
	平均风速	0	0		0	0.002
	日照时数	0	0	0		0
	降水量	0	0	0.002	0	
	平均地表气温	0	0	0	0	0.26

利用 SPASS 软件,对 31 个气象站点的气象资料进行主成分分析(表 4),第一主成分、第二主成分和第三主成分累积贡献率达 87.891%,因此前 3 个主成分能够代表喀斯特地区植被生长季 ET_0 变化的驱动因子,分别记作 Y_1 、 Y_2 和 Y_3 。主成分与原始变量之间的相关系数,绝对值越大说明关系越密切(表 5),第一主

成分与平均气温、平均地表气温相关系数为 0.973、0.971,均呈较强的正相关;第二主成分主要反映平均相对湿度与降水量的影响,相关系数分别为 0.823 和 0.832,即平均相对湿度与降水量越大, Y_2 值越小;第三主成分反应风速的影响,二者相关系数为 0.990,与其余气象要素相关性很弱,即风速越大, Y_3 值越大。

表 4 主成分特征值及贡献率

初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入	
合计	方差的/%	累积/%	合计	方差的/%	累积/%	合计	方差的/%
2.801	46.691	46.691	2.801	46.691	46.691	2.283	38.047
1.502	25.031	71.722	1.502	25.031	71.722	1.955	32.58
0.97	16.169	87.891	0.97	16.169	87.891	1.036	17.265
0.493	8.213	96.105					
0.215	3.576	99.681					
0.019	0.319	100					

表 5 因子载荷矩阵

指标	Y_1	Y_2	Y_3
平均气温值	0.973	−0.012	0.057
平均相对湿度	−0.275	0.823	−0.213
平均风速	0.042	−0.075	0.990
日照时数	0.518	−0.745	0.055
降水量	0.216	0.832	0.064
平均地表气温	0.971	−0.158	0.029

由特征向量矩阵(表 6)可得,主成分的表达式为

$$Y_1 = 0.46X_{AT} - 0.45X_{RH} + 0.15X_F + 0.51X_t - 0.19X_P + 0.51X_{GT}$$

(10)

$$Y_2 = 0.48X_{AT} + 0.4X_{RH} - 0.11X_F - 0.21X_t + 0.63X_P + 0.39X_{GT}$$

(11)

$$Y_3 = -0.03X_{AT} - 0.03X_{RH} + 0.97X_F - 0.13X_t + 0.21X_P - 0.08X_{GT}$$

(12)

表 6 特征向量矩阵

指标	T_1	T_2	T_3
平均气温值	0.46	0.48	−0.03
平均相对湿度	−0.45	0.4	−0.03
平均风速	0.15	−0.11	0.97
日照时数	0.51	−0.21	−0.13
降水量	−0.19	0.63	0.21
平均地表气温	0.51	0.39	−0.08

由式(10)、式(11)、式(12)得第一因子与平均地表气温和日照时数关系紧密,第二因子与降水量关系紧密,第三个因子与平均风速关系紧密,表明 3 个指标对 ET_0 的影响不同。第一主成分是由因子日照时数与平均地表气温决定的,即影响 ET_0 变化的主要因素为平均气温;第二主成分上降水量为影响 ET_0 变化的主要因素;第三主成分上平均风速为影响 ET_0 变化的主要因素。喀斯特地区植被生长季

的 ET_0 的增加或者减少过程中,平均气温起主导作用,降水量与平均风速起次要作用。研究发现 ET_0 除了受平均地表气温与日照时数的影响外,平均相对湿度、降水量、平均风速的因子载荷较高,说明 ET_0 还和空气的相对湿度、降水量、平均风速关系密切,即空气湿度越高、降水量减少、风速越小则 ET_0 减少。

4 结论

以贵州省喀斯特山区为研究对象,探究喀斯特山区参考作物蒸散量时空变化特征,阐明参考作物蒸散量趋势变化的驱动机制,以期为农业种植规划、干旱灾害监测预警、喀斯特地区石漠化治理等提供科学依据。主要结论如下:

1) ET_0 分布特征为东南部地区高于西北部地区,喀斯特地区低于非喀斯特地区;喀斯特石漠化较为严重的毕节地区、安顺、贵阳及黔南地区的北部地区为 ET_0 最低区,黔西南与黔南交界地区为核心的高 ET_0 的带状空间分布特征,非喀斯特地区的 ET_0 高于喀斯特地区。贵州省西部地区的 ET_0 高于中、东部地区,与戴明宏等^[4] 研究结果一致。

2) 通过 Kendall 秩次检验与 Mann-Kendall 非参数统计检验突变点分析法得 31 个气象站点中有 9 个气象站点的 ET_0 呈明显增加或减少趋势,其中威宁与普安站点 ET_0 未出现突变性增长或减小的时间节点,威宁与普安气象站点 ET_0 呈持续平缓增加趋势,其他站点 ET_0 在不同时段出现突变。

3) 植被生长季影响 ET_0 趋势的主导因素为温度与风速,降水次之, ET_0 与 3 个主成分的多元线性回归模型中,第一主成分主要反映平均气温、平均地表气温的影响,第二主成分主要反映平均相对湿度与降水量的影响,第三主成分与风速密切相关。

参考文献

- [1] 李娜,霍治国,周晓宇,等. 山西省参考作物蒸散量的时空变化特征[J]. 应用生态学,2020,31(10):3489—3498.
- [2] 韩会庆,白玉梅,张新鼎. 贵州省多种参考作物蒸散量估算方法的适用性及修正研究[J]. 水利水电技术,2018,49(10):198—204.
- [3] 刘悦,崔宁博,李果,等. 近 56 年西南地区四季参考作物蒸散量变化成因分析[J]. 节水灌溉,2018(12):54—59.
- [4] 戴明宏,李玉涛,王腊春,等. 典型喀斯特地区参考作物蒸散量的时空变化分析——以贵州省为例[J]. 地球与环境,

- 2016,44(3):342—352.
- [5] 倪宁洪,李果,崔宁博,等. 我国西南地区近 56 年参考作物蒸散量的敏感性分析[J]. 江苏农业科学,2019,47(20):298—305.
- [6] 张青雯,崔宁博,冯禹,等. 中国西南五省参考作物蒸散量时空变化分析[J]. 灌溉排水学报,2016,35(11):80—87.
- [7] 张伟伟,王允,张国斌. 西南地区 1960—2013 年参考作物蒸散量时空变化特征及成因分析[J]. 中国农学通报,2016,32(2):135—141.
- [8] 屠玉麟. 贵州喀斯特农业生态环境的类型划分[J]. 中国岩溶,1991(2):40—49.
- [9] 张军以. 贵州典型喀斯特峰丛洼地水土资源匹配结构及其利用模式研究[D]. 重庆:重庆师范大学,2011.
- [10] 汪霞,汪磊. 西南喀斯特地区农业旱灾脆弱性评价——以贵州省为例[J]. 广东农业科学,2014,41(22):181—186.
- [11] 张晖. 喀斯特石漠化治理增汇型种植与低碳型养殖模式与示范[D]. 贵阳:贵州师范大学,2014.
- [12] 王晋臣. 典型西南喀斯特地区现代农业发展研究[D]. 北京:中国农业科学院,2012.
- [13] 廖婧琳,苏跃,冯泽蔚,等. 54 年来农业自然灾害对贵州农业经济的影响分析——以农业及粮食生产为例[J]. 安徽农业科学,2008(25):11114—11117.
- [14] 周国富. 贵州喀斯特峰丛洼地农业自然灾害及对策初步研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),1997(4):25—30.
- [15] 伍国勇,陆安霞. 农业气象灾害对农业产出的影响程度研究——基于贵州省 1980—2011 年数据的实证[J]. 农村经济与科技,2014,25(3):20—23.
- [16] TELLEN A. A comparative analysis of reference evapotranspiration from the surface of rainfed grass in Yaounde, calculated by six empirical methods against the penman-monteith formula[J]. Earth Perspectives,2017,4(1).
- [17] 梁红闪,王丹,郑江华. 伊犁河流域地表蒸散量时空特征分析[J]. 灌溉排水学报,2020,39(7):100—110.
- [18] 王蒙,刘春伟,邱让建,等. 江苏省参考作物蒸散量的时空变化及影响因素分析[J]. 灌溉排水学报,2020,39(4):124—134.
- [19] YIN L C, WANG X F, FENG X M, et al. A Comparison of SSEBop-Model-Based Evapotranspiration with Eight Evapotranspiration Products in the Yellow River Basin, China[J]. Remote Sensing,2020,12(16):25—28.
- [20] YIN L C, FENG X M, FU B J, et al. Irrigation water consumption of irrigated cropland and its dominant factor in China from 1982 to 2015[J]. Advances in Water Resources,2020,143.
- [21] 梁虹. 喀斯特流域地貌产流机制与产流特征[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),1995(2):23—28.
- [22] 李颜颜,康国华,张鹏岩,等. 1951—2014 年河南省不同季节日照时数时空变化特征及突变分析[J]. 河南大学学报(自然科学版),2018,48(1):33—44.
- [23] 王毓森. 水文时间序列趋势与突变分析系统开发与应用[J]. 甘肃科技,2016,32(9):36—37.
- [24] 周园园,师长兴,范小黎,等. 国内水文序列变异点分析方

法及在各流域应用研究进展[J]. 地理科学进展, 2011, 30
(11): 1361—1369.

[25] 许莹莹, 李薇, 王振龙, 等. 基于主成分分析的裸地潜水蒸发与气象要素关系模拟[J]. 水文, 2020, 40(4): 7—13, 39.

Study on Characteristics and Driving Mechanism of Evapotranspiration of Reference
Crops in Vegetation Growing Season in Karst Area:
Taking Guizhou Province as an example

XING Yuan¹, HE Zhong-hua^{1,2}

(1. School of Geographic and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China;
2. State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: Guizhou province's unique dual hydrologic structure of surface water and groundwater, as well as the typical karst mountainous and hilly landform area, cause extremely fragile agricultural ecological environment, and are prone to agricultural disasters caused by meteorological factors, leading to agricultural production reduction. The use of the revised Penman Monteith formula for estimation of guizhou province in 2000—2017 in 31 meteorological site reference crop evapotranspiration capacity(ET_0), ArcGIS inverse distance weighted interpolation method was used to study the vegetation growing season reference crop evapotranspiration in guizhou space distribution characteristics, using MATLAB software to raster data amount of reference crop evapotranspiration monadic linear regression and significance test, to explore the trend of the reference crop evapotranspiration quantity in guizhou characteristics; On this basis, principal component analysis was used to study the main factors affecting the evapotranspiration of reference crops in Guizhou province. The results show that :① ET_0 distribution in guizhou province is higher in the southeast than in the northwest, and lower in karst areas than in non-karst areas; The area of Bijie, Anshun, Guiyang and the northern part of Southern Guizhou are the lowest ET_0 regions. ② The ET_0 of high-altitude areas did not increase or decrease sharply, while that of low-altitude areas increased or decreased sharply in different years. ③ The predominant meteorological factors affecting ET_0 in Guizhou province are temperature, wind speed and precipitation.

Key words: reference crop evapotranspiration; driving factor; principal component analysis; Karst