

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170293

吴丽萍, 陈洪松, 连晋姣, 付智勇, 王升. 喀斯特与非喀斯特地区参考作物蒸散量时空变化分析——以广西壮族自治区为例[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(10): 1508–1517

Wu L P, Chen H S, Lian J J, Fu Z Y, Wang S. Spatio-temporal variation in reference evapotranspiration in recent 50 years in karst and non-karst areas in Guangxi Zhuang Autonomous Region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(10): 1508–1517

喀斯特与非喀斯特地区参考作物蒸散量时空变化分析* ——以广西壮族自治区为例

吴丽萍^{1,2,3}, 陈洪松^{1,2}, 连晋姣^{1,2**}, 付智勇^{1,2}, 王升^{1,2}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所/中国科学院亚热带农业生态过程重点实验室 长沙 410125; 2. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站 环江 547100; 3. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 参考作物蒸散量(ET_0)是确定植被生态系统需水量的关键因子, 其时空分布特征及主要影响因素分析对于制定植被恢复策略与区域水资源配置方案具有重要意义。本文基于 FAO-56 Penman-Monteith 公式和广西地区 25 个气象站点 1960—2010 年的逐日资料, 计算了各站点的 ET_0 , 在此基础上采用 GIS 的克里金插值、Spearman 秩次相关法和通径分析方法分析了广西喀斯特与非喀斯特地区 ET_0 的时空变化特征及其影响因素。结果表明, 51 年来广西各站点多年平均 ET_0 为 $1\ 138\ \text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$; 空间分布呈由南向北、由低纬度向高纬度递减的特征, 高值区主要分布在非喀斯特地区, 低值区主要分布在喀斯特地区。喀斯特与非喀斯特地区年 ET_0 累积距平曲线均呈“N”型分布; 20 世纪 70 年代最高, 90 年代最低, 21 世纪以来年 ET_0 有所回升, 但仍低于 51 年平均值。此外, 喀斯特地区 ET_0 年际变化小于非喀斯特地区。日照时数、风速和平均温度是影响非喀斯特地区年 ET_0 变化的主要气象因子, 而相对湿度则通过与其他气象因子的相互作用间接对喀斯特地区年 ET_0 的变化产生较大影响。在季节尺度上, 日照时数和平均气温在各季节都是 ET_0 最主要的影响因子, 与 ET_0 呈正相关关系; 风速在喀斯特地区冬、春两季对 ET_0 的间接作用系数为负, 在非喀斯特地区并未发现这一现象。了解不同地区 ET_0 的变化趋势是植被生态需水定额计算的必要措施。

关键词: 参考作物蒸散量; Penman-Monteith 公式; 喀斯特地区; 非喀斯特地区; 气象因素; 通径分析
中图分类号: S161.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)10-1508-10

Spatio-temporal variation in reference evapotranspiration in recent 50 years in karst and non-karst areas in Guangxi Zhuang Autonomous Region*

WU Liping^{1,2,3}, CHEN Hongsong^{1,2}, LIAN Jinjiao^{1,2**}, FU Zhiyong^{1,2}, WANG Sheng^{1,2}

(1. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Regions, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Reference evapotranspiration (ET_0) is the water requirement of plants driven by meteorological factors. It is critical

* 国家重点基础研究发展计划项目(2015CB452703)、国家重点研发计划课题(2016YFC0502403)和国家自然科学基金项目(41671287)资助

** 通讯作者: 连晋姣, 主要从事遥感水文的研究。E-mail: lianjinjiao@isa.ac.cn

吴丽萍, 主要从事喀斯特土壤侵蚀与水土保持的研究。E-mail: wuliping15@mails.ucas.ac.cn

收稿日期: 2017-04-06 接受日期: 2017-06-26

* This study was supported by the National Program on Key Basic Research Project of China (2015CB452703), the National Key R & D Projects (2016YFC0502403) and the National Natural Science Foundation of China (41671287).

** Corresponding author, E-mail: lianjinjiao@isa.ac.cn

Received Apr. 6, 2017; accepted Jun. 26, 2017

for restoration of vegetation and regional water resources management. In Southwest China where karst landforms are common, the ecological environment is fragile. Extreme drought and flood events are usually caused by declining annual precipitation and large amounts of precipitation within short time periods. The response of ET_0 to global climate change is a key in the assessment of the effect of climate change on hydrology. Therefore, it was important to explore the spatial and temporal variations and the related driving factors of ET_0 . Based on data collected from 25 meteorological stations in Guangxi for the 1960–2010, daily ET_0 was computed using the FAO-56 Penman-Monteith equation. The spatio-temporal variations and the driving factors of ET_0 in Guangxi karst and non-karst areas were analyzed separately using Kriging interpolations, cumulative anomalies and spearman rank correlation at seasonal and annual scales. The driving factors of ET_0 in karst and non-karst areas were analyzed using the path-analysis method. Results showed that ET_0 decreased gradually from southeast to northwest of the study area, with an average rate of $1\ 138\ \text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ during the studied period. High ET_0 was mainly distributed in non-karst areas and low ET_0 in karst areas. For different seasons, ET_0 values from stations in non-karst areas were generally higher than those from stations in karst areas. Mean monthly ET_0 in both karst areas and non-karst areas tracked a unimodal curve, with relatively high ET_0 for the period from May to September. Non-karst areas had higher ET_0 variations than karst areas. The average monthly ET_0 in non-karst areas was 95 mm and that in karst areas 64 mm. Summer ET_0 was highest and winter ET_0 lowest. In the recent 51 years, annual ET_0 for both karst and non-karst areas tracked N-shaped distribution, and were the highest in the 1970s and lowest in the 1990s with an increasing trend for period 2002–2010. The trends of variation in annual ET_0 in Guangxi were also analyzed. Out of the 25 stations, 3 stations in karst and 4 stations in non-karst areas had significant decrease in trend; then 2 stations in karst and 1 station in non-karst areas showed significant increase in trend, and the other stations had no significant trends. Analysis of the relationship between ET_0 and meteorological factors showed that sunshine duration, wind speed and average temperature were the main meteorological factors driving ET_0 in non-karst areas. Relative humidity influenced annual ET_0 by interacting with other meteorological factors in karst areas. Seasonally, sunshine duration and average temperature had the highest impact on ET_0 , and both were positively related with ET_0 . Furthermore, the indirect effect of the coefficient between wind speed and ET_0 was negative for karst areas and positive for non-karst areas in winter and spring. Differences in geographical location and topography were the main reasons for the differences in ET_0 between karst and non-karst areas. Therefore, understanding the trend of change and the reasons for the change in ET_0 in different regions was a necessary measure for analysis of ecological water requirement.

Keywords: Reference evapotranspiration; Penman-Monteith equation; Karst area; Non-karst areas; Meteorological factor; Path analysis

蒸散量是生态系统维持生物生存所消耗的水量^[1], 既包括土壤和植被的蒸发作用, 也包括植物自身的蒸腾作用, 因其在土壤-植被-大气系统中的重要纽带作用而受到全球变化学者的广泛关注^[2]。参考作物蒸散量(ET_0)是表征大气蒸发能力的气象因子, 是区域水量平衡和能量平衡研究的重要参数, 准确地估算 ET_0 不仅是制定区域植被生态需水定额和水资源优化配置决策的重要依据, 也已成为监测农业旱情、提高区域水资源利用效率的关键环节^[3]。FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式(以下简称 FAO-PM)较为全面地考虑了影响 ET_0 的各种因素, 精度较高^[4], 在各个气候区下应用都取得了较好的结果, 具有普遍的适用性^[5-7]。

在全球气候变化的背景下, 国内外学者针对 ET_0 时空变化特征及其影响因子做了大量的研究。Hulme 等^[8]认为, 全球变暖、气温升高会促进 ET_0 增加。但也有研究表明^[9], 除个别地区外, 北半球蒸发皿观测的 ET_0 在过去几十年内呈减少趋势。中国 ET_0 在过去几十年中的变化趋势也较为明显。刘昌明等^[10]

分析了中国 10 大流域片区 ET_0 对气象因子的敏感性及其区域分异, 发现 10 大流域片区中有 8 大流域片区 ET_0 呈下降趋势, 北方流域 ET_0 对水汽压敏感, 南方流域对最高气温敏感。Zhang 等^[11]分析了湟水流域及周边地区 ET_0 对气象因子的敏感性, 发现 ET_0 时空分布特征与海拔高度相关, 在高海拔地区 ET_0 对实际水汽压较敏感, 而在低海拔地区 ET_0 对气温较敏感。基于这些结果可知, 由于地理环境的差异性, 各地 ET_0 的变化及其成因具有区域性差异, 其影响因素也因地而异, 因此对 ET_0 的研究要分区域进行。

喀斯特地貌区主要是指碳酸盐岩出露区及以碳酸盐岩成分为主的分布区^[12]。其中, 西南喀斯特地区是全球三大喀斯特集中连片分布区之一, 生态环境敏感脆弱, 旱、涝灾害频繁, 农业生产不稳定^[13]。在全球气候变化大背景下, 近 60 年来西南地区降雨量呈下降趋势, 极端事件的频发使得对该区 ET_0 变化的研究更加急迫^[14]。Gao 等^[15]、徐蒙蒙等^[16]发现贵州省年 ET_0 总体呈下降趋势, 而日照时数的减少是导致

ET₀ 下降的主要原因。戴明宏等^[17]发现影响贵州省 ET₀ 的主导气象因素是日照时数,与 ET₀ 呈正相关,而地理纬度与 ET₀ 存在明显的负相关。关保多等^[18]认为 1951—2001 广西地区 95% 站点的 ET₀ 呈下降趋势,与 1951—2001 年比,未来 ET₀ 呈上升趋势的比例将会增加。胡可等^[19]研究阐明了日照时数和风速的减少是引起桂西北 ET₀ 变化的主要原因。目前,区别对待喀斯特地区与非喀斯特地区的研究仍十分缺乏。开展喀斯特与非喀斯特地区 ET₀ 变化特征及影响因子的对比研究,阐述两种地貌背景下 ET₀ 的差异,对我国西南喀斯特和非喀斯特地区的农业发展和水资源合理配置具有重要意义。本文基于 25 个气象站点 51 年的逐日气象资料,分析了广西 ET₀ 的时空分布特征,并采用相关分析、途径分析等方法探讨了气象因子与 ET₀ 的相关关系,以期揭示影响喀斯特与非喀斯特地区 ET₀ 变化的主要气象因素,为该地区气候干湿状况评价与预测以及喀斯特地区脆弱生态环境的恢复等提供科学依据。

1 研究区域及数据来源

1.1 研究区概况

广西(20°54'~26°24'N, 104°26'~112°04'E)地处中国西南部,位于中国地势第二级阶梯云贵高原的东南边缘。四周多山地与高原,中部与南部多为平地,地势自西北向东南倾斜。属亚热带季风气候区,气候温暖,热量丰富。年平均气温 16.0~23.0 °C,由北向南递增,由河谷平原向丘陵山区递减。雨量丰富,水热同季,年降水量均在 1 070 mm 以上,大部分地区为 1 500~2 000 mm。降水量季节变化不均,4—9 月为雨季,其降水量占全年降水量的 70%~85%,日照适中,冬少夏多。广西区喀斯特地貌广布,占全区总面积的 41%,集中连片分布于桂西南、桂西北、桂中和桂东北。

1.2 数据来源

研究区域的气象资料下载自国家气象信息中心的 中国地面气象观测数据库(<http://www.nmic.gov.cn/>),共获取 25 个气象站点(图 1)1960—2010 年的逐日资料,包括逐日平均温度(T_{mean})、最高气温(T_{max})、最低气温(T_{min})、2 m 高处风速(u_2)、日照时数(n)和相对湿度(RH)等数据;从建站至今数据记录较完整,数据质量较高,个别缺测数据和无效值采用临近站点或临近年份的值进行插补。若气象站点所在的县(市)喀斯特地貌面积大于 30%,则认为该气象站点属于喀斯特站点^[20]。25 个气象站点中,喀斯特站点有 11

个,非喀斯特站点有 14 个,能够较好地代表广西喀斯特、非喀斯特地区 ET₀ 分布及变化情况。

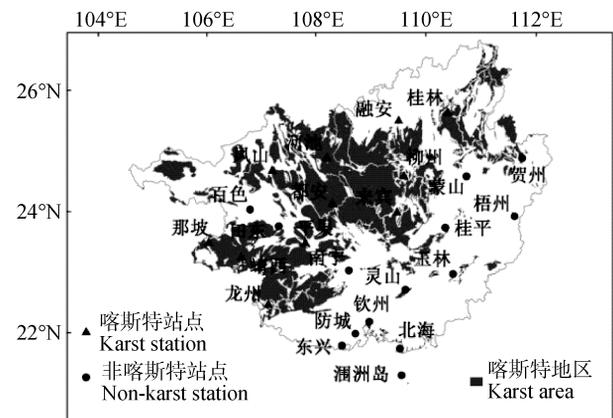


图 1 广西喀斯特地区和气象站点分布图
Fig. 1 Distribution of meteorological stations in Guangxi

2 研究方法

2.1 FAO-PM 公式

FAO-PM 公式以能量平衡和水汽扩散理论为基础,较全面考虑了作物的生理特征和空气动力学参数的变化,其表达式为^[21]:

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

式中: ET₀ 为参考作物蒸散量(mm·d⁻¹), R_n 为地表净辐射(MJ·m⁻²·d⁻¹), G 为土壤热通量(MJ·m⁻²·d⁻¹), T 为 2 m 高处日平均气温(°C), u₂ 为 2 m 高处风速(m·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(kPa·C⁻¹), γ 为干湿表常数(kPa·C⁻¹)。

2.2 累积距平法

累积距平法^[22]是一种常用的由曲线直观判断变化趋势的方法。对于序列 X 在某一时刻 t 的累积距平表示为:

$$X = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}) \quad (t=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, 将 n 个时刻的累积距平值全部算出,即可绘出累积距平曲线进行趋势分析。

2.3 Spearman 秩次相关检验法

Spearman 秩次相关检验^[16]主要是通过分析序列 x_i 与其时序 i 的相关性来检验时间序列是否具有趋势性。在运算时,时间序列 x_i 用其秩次 M_i 代表,则秩次相关系数为:

$$r = \frac{1 - 6 \sum_{i=1}^n (M_i - i)^3}{n^2 - n} \quad (3)$$

式中: n 为系列长度(即年数)。秩次 M_i 与时序 i 相近时, 秩次相关系数 r 大, 趋势显著。通常采用 t 检验法检验水文序列的趋势性是否显著, 统计量 T 的计算公式为:

$$T = r \sqrt{\frac{n-4}{1-r^2}} \quad (4)$$

式中: T 服从自由度为 $(n-2)$ 的 t 分布, 原假设为序列无趋势, 根据序列的秩次相关系数计算 T 统计量, 然后选择显著水平 α , 在 t 分布表中查出临界值 $t_{\alpha/2}$, 当 $T \geq t_{\alpha/2}$ 时, 则拒绝原假设, 序列趋势显著; 否则, 接受原假设, 趋势不显著。

2.4 通径分析

通径分析是由数量遗传学家 Sewall Wright 于 1921 年提出的, 它能够不受自变量间度量单位和自变量变异程度的影响, 直接量化反映各自变量的相对重要性, 同时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、自变量对因变量的作用方式和程度^[23-24]。本文依靠 SPSS(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。

3 结果与分析

3.1 参考作物蒸散量的空间分布特征

广西 25 个气象站点 51 年 ET_0 的平均值为 $1\ 138\ \text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 利用 ArcGIS 软件中的 Kriging 插值法获得广西多年 ET_0 的空间分布状况(图 2)。由图可以看出, 广西各地的多年 ET_0 为 $1\ 018\sim 1\ 343\ \text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 整

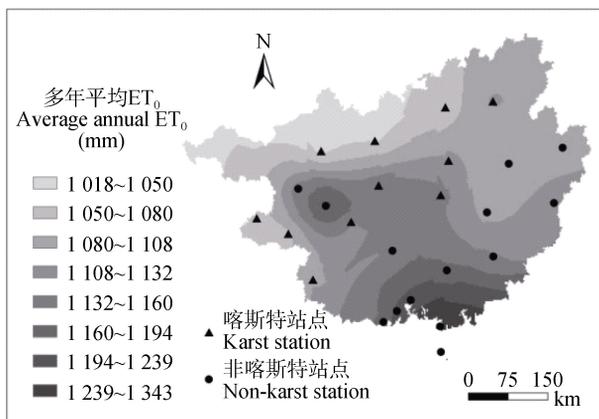


图 2 1960—2010 年广西喀斯特地区和非喀斯特地区年平均参考作物蒸散的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of average annual ET_0 in karst and non-karst areas in Guangxi during 1960 to 2010

体呈现由南向北、由低纬度向高纬度递减的特征。高值区位于南部气温较高、降水充沛的沿海非喀斯特地区, 次高值区位于西部光照充足、地势较平坦的田东地区, 低值区主要分布在海拔较高的桂北和桂西北的喀斯特山区, 其值在 $1\ 108\ \text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 以下。

各季节 ET_0 的空间分布有明显差异(图 3)。春季广西各地的 ET_0 为 $256\sim 342\ \text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 整体上呈现由西向东递减的趋势, 高值区主要位于广大的桂西北地区, 以百色、田东非喀斯特地区为中心向四周的喀斯特地区递减。夏季广西各地的 ET_0 为全年最高, 为 $345\sim 434\ \text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 其中喀斯特地区和非喀斯特地区的平均值分别为 $377\ \text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $403\ \text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 空间分布呈现由东南向西北递减的趋势。秋季 ET_0 为 $224\sim 372\ \text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 其空间特征与年 ET_0 空间特征较为相似, 但桂东北地区略有差异。冬季 ET_0 为 $134\sim 226\ \text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 整体上呈现由南向北递减的趋势, 其中桂西北的田东地区出现了一个次高值区域。由此可以看出, 春季 ET_0 空间分布特征与其他季节差别很大, 这主要是因为春季, 与其他地区相比, 广西西部地区日照时数较长、气温较高而相对湿度较小。南部沿海非喀斯特地区在各季节均是 ET_0 高值区, 这与南部沿海非喀斯特地区日照时数远远大于广西其他地区有关。

3.2 参考作物蒸散量的时间分布特征

3.2.1 多年逐月平均蒸散量变化趋势

广西喀斯特地区与非喀斯特地区多年逐月平均 ET_0 的变化趋势如图 4 所示, 两者的变化趋势基本一致, 呈单峰抛物线型, 最高值出现在 7 月, 最低值出现在 1 月。喀斯特地区多年逐月平均 ET_0 变化范围为 $40\sim 104\ \text{mm}$, 两者相差 $64\ \text{mm}$, 非喀斯特地区的多年逐月平均 ET_0 的变化范围为 $60\sim 155\ \text{mm}$, 两者相差 $95\ \text{mm}$; 喀斯特地区逐月 ET_0 的极差小于非喀斯特地区。此外, 喀斯特地区多年逐月平均 ET_0 以及变化斜率都小于非喀斯特地区。

3.2.2 年蒸散量的变化趋势

喀斯特与非喀斯特地区 ET_0 累积距平年际变化较大(图 5)。年 ET_0 累积距平曲线均呈“N”型分布, 大致可以分为 4 个阶段: 1) 1960—1967 年, ET_0 均呈明显的增加趋势, 喀斯特地区 ET_0 增幅较非喀斯特地区小; 2) 1967—1980 年, 是一个相对平稳的阶段, ET_0 在小幅度波动中保持稳定; 3) 1980—2002 年, ET_0 呈下降趋势, 期间, 1992 年之前下降趋势较小, 并且在 1985 年左右出现小幅度上升, 1992 年之后呈明显

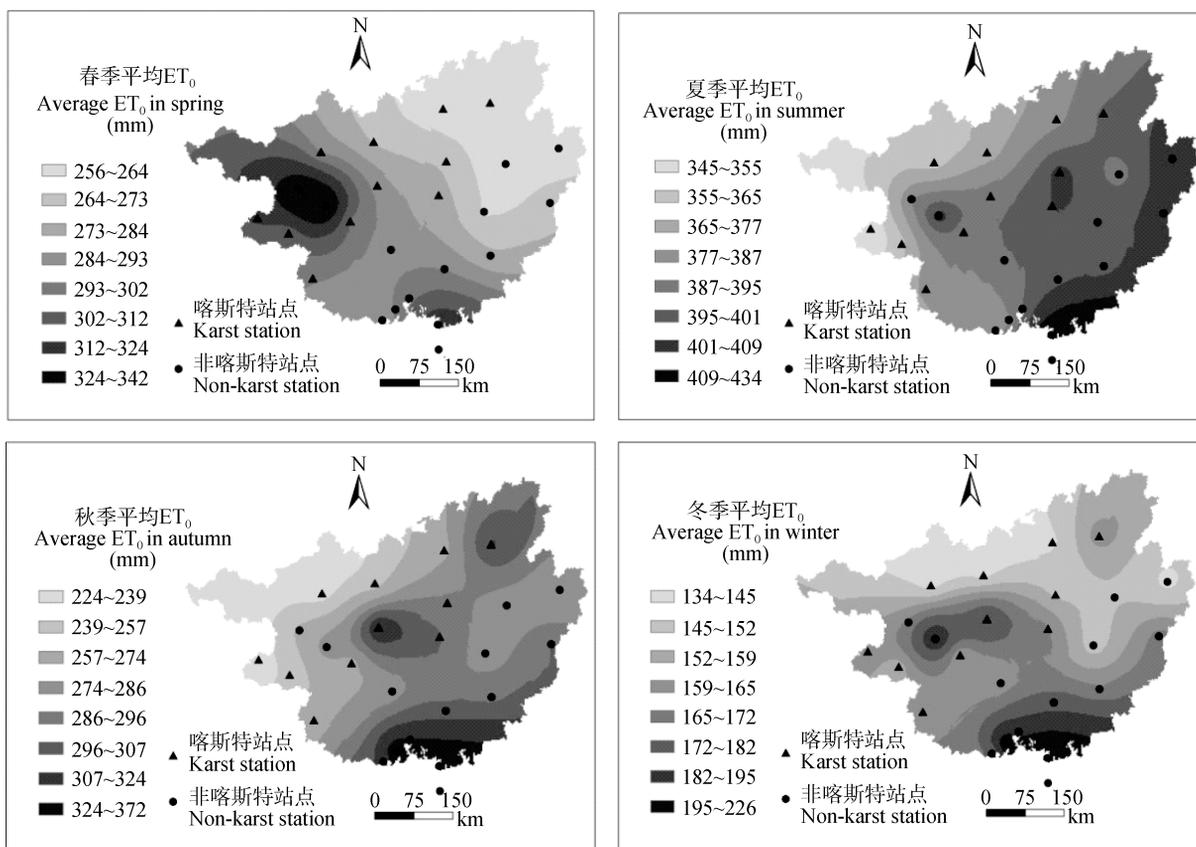


图 3 1960—2010 年广西各季节年平均参考作物蒸散量的空间分布
 Fig. 3 Spatial distribution of average seasonal ET_0 in Guangxi during 1960 to 2010

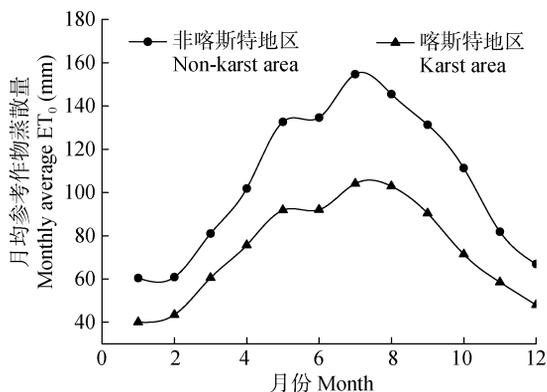


图 4 1960—2010 年广西喀斯特和非喀斯特地区多年逐月平均参考作物蒸散量变化趋势
 Fig. 4 Trends of multi-year monthly average ET_0 in Guangxi karst and non-karst areas from 1960 to 2010

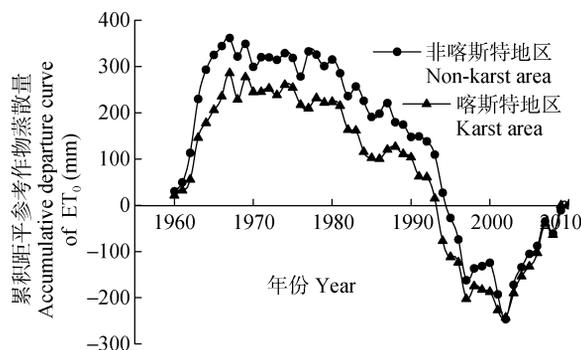


图 5 1960—2010 年广西喀斯特和非喀斯特地区年际参考作物蒸散量累积距平曲线
 Fig. 5 Accumulative departure curves of ET_0 in Guangxi karst and non-karst areas from 1960 to 2010

的下降趋势,且喀斯特地区 ET_0 减幅也较非喀斯特地区小;4)2002—2010 年, ET_0 呈上升趋势,但仍低于平均值,此外,喀斯特与非喀斯特地区的 ET_0 变化相差不大。

为了进一步分析喀斯特与非喀斯特地区各站点的变化趋势,采用 Spearman 秩次相关系数法分别计算了 25 个站点秩次相关系数(表 1)。11 个喀斯特地区站点中有 6 个站点的 ET_0 呈下降趋势,占 54.55%,

显著下降趋势的有 3 个站点,占 27.27%;5 个站点呈上升趋势,占 45.45%,呈显著上升趋势的有 2 个站点,占 18.18%。在 14 个非喀斯特地区站点中,8 个站点呈下降趋势,占 57.14%,显著下降趋势的有 4 个站点,占 28.57%;6 个站点呈上升趋势,占 42.86%,呈显著上升趋势的有 1 个站点,占 7.14%。由此可以看出,广西地区 ET_0 呈下降趋势的站点大于呈上升趋势的站点,且下降趋势的站点中有 50%呈显著下

表 1 1960—2010 年广西各站点多年参考作物蒸散量的变化趋势分析
Table 1 Change trend of ET₀ in Guangxi karst and non-karst areas from 1960 to 2010

站点 Station	是否喀斯特 发育 Whether karst development	Spearman 秩次相关法 Spearman rank correlation		站点 Station	是否喀斯特 发育 Whether karst development	Spearman 秩次相关法 Spearman rank correlation	
		ET ₀ 变化趋势 Trend of ET ₀	相关系数 Correlation coefficient			ET ₀ 变化趋势 Trend of ET ₀	相关系数 Correlation coefficient
融安 Rong'an	是 Yes	下降 Decline	-0.440**	贺州 Hezhou	否 No	下降 Decline	-0.229
桂林 Guilin	是 Yes	下降 Decline	-0.153	涠洲岛 Weizhoudao	否 No	上升 Increase	0.025
来宾 Laibin	是 Yes	下降 Decline	-0.734**	东兴 Dongxing	否 No	上升 Increase	0.458**
柳州 Liuzhou	是 Yes	上升 Increase	0.155	灵山 Lingshan	否 No	上升 Increase	0.158
都安 Du'an	是 Yes	上升 Increase	0.377**	北海 Beihai	否 No	上升 Increase	0.182
河池 Hechi	是 Yes	下降 Decline	-0.042	桂平 Guiping	否 No	下降 Decline	-0.175
凤山 Fengshan	是 Yes	下降 Decline	-0.053	钦州 Qinzhou	否 No	上升 Increase	0.219
靖西 Jingxi	是 Yes	上升 Increase	0.187	防城 Fangcheng	否 No	上升 Increase	0.332
平果 Pingguo	是 Yes	上升 Increase	0.586**	南宁 Nanning	否 No	下降 Decline	-0.594**
那坡 Napo	是 Yes	下降 Decline	-0.365**	玉林 Yulin	否 No	下降 Decline	-0.341*
龙州 Longzhou	是 Yes	上升 Increase	0.134	田东 Tiandong	否 No	下降 Decline	-0.325
梧州 Wuzhou	否 No	下降 Decline	-0.221	百色 Baise	否 No	下降 Decline	-0.337*
蒙山 Mengshan	否 No	下降 Decline	-0.324*				

**：在置信度(双测)为 0.01 时相关性极显著；*：在置信度(双测)为 0.05 时相关性显著。 ** and * indicate that it passes the significance test at the levels of 0.01 and 0.05, respectively.

降趋势，上升趋势的站点主要呈不显著性上升趋势；喀斯特地区 ET₀ 与非喀斯特地区 ET₀ 的下降趋势及显著性较为相似，但喀斯特地区 ET₀ 显著上升的站点比率略大于非喀斯特地区。

3.3 参考作物蒸散量的影响因素分析

ET₀ 可以反映区域大气蒸发能力，受到多种环境因子的影响^[25-26]。本文采用 25 个站点的气象因子(日照时数、风速、平均气温、相对湿度)和年 ET₀、季节 ET₀ 进行相关分析和通径分析，并计算其直接作用系数和间接作用系数(表 2，表 3)。

从整个广西地区来看，日照时数、风速和平均气温对年 ET₀ 影响较大，且呈正相关关系，相关系数分别为 0.845、0.759 和 0.664；相对湿度对年 ET₀ 影响较小，呈负相关关系(表 2)。非喀斯特地区站点气象因子与年 ET₀ 的相关关系与广西地区全部站点相关分析结果类似，日照时数、风速、平均气温和相对湿度对年 ET₀ 的相关系数分别为 0.862、0.797、0.679 和 -0.076。喀斯特地区站点相对湿度与年 ET₀ 表现出较强的负相关关系，相关系数为 -0.526。结合

通径分析结果可以看出，喀斯特地区站点相对湿度对年 ET₀ 的直接作用系数并不大，甚至低于非喀斯特地区，较大的负相关系数主要是其他气象因子通过与相对湿度的相互作用从而间接对 ET₀ 产生的影响，间接作用系数之和为 -0.349。此外，喀斯特地区日照时数、风速和平均气温三者之间的间接作用系数均小于非喀斯特地区，说明喀斯特地区日照时数、风速和平均气温这 3 个气象因子间的相互影响较非喀斯特地区小。

分别对喀斯特地区和非喀斯特地区各季节气象因子和 ET₀ 进行相关分析和通径分析(表 3)。综合来看，日照时数和平均气温在各季节都是 ET₀ 最主要的影响因子，与 ET₀ 呈正相关关系。相对湿度与 ET₀ 呈显著的负相关关系，且喀斯特地区各季节相对湿度对 ET₀ 影响的间接作用均大于直接作用。此外，风速在喀斯特地区冬、春两季对 ET₀ 的间接作用系数为负，可能是因为风速增大，导致平均气温降低，从而导致 ET₀ 减少，进而抵消了风速对 ET₀ 的正向影响；在非喀斯特地区并未发现这一现象。

表 2 广西喀斯特和非喀斯特地区气象因子对年参考作物蒸散量的途径分析
Table 2 Path analysis between meteorological factors and annual ET₀ in Guangxi karst and non-karst areas

类别 Category	气象因子 Meteorological factors	直接作用系数 Direct effect coefficient	间接作用系数 Indirect effect coefficient				相关系数 Correlation coefficient	
			<i>n</i>	<i>u</i> ₂	<i>T</i> _{mean}	RH		间接作用系数和 Sum of indirect effect coefficient
广西 Guangxi	<i>n</i>	0.450	—	0.245	0.155	-0.004	0.395	0.845
	<i>u</i> ₂	0.458	0.241	—	0.096	-0.035	0.301	0.759
	<i>T</i> _{mean}	0.296	0.235	0.148	—	-0.015	0.368	0.664
	RH	-0.209	0.010	0.078	0.021	—	0.108	-0.100
喀斯特地区 Karst area	<i>n</i>	0.471	—	0.078	0.099	0.037	0.214	0.686
	<i>u</i> ₂	0.568	0.065	—	-0.085	0.044	0.024	0.591
	<i>T</i> _{mean}	0.422	0.111	-0.115	—	0.046	0.043	0.464
	RH	-0.177	-0.098	-0.141	-0.111	—	-0.349	-0.526
非喀斯特地区 Non-karst area	<i>n</i>	0.432	—	0.288	0.122	0.021	0.430	0.862
	<i>u</i> ₂	0.469	0.265	—	0.129	-0.066	0.328	0.797
	<i>T</i> _{mean}	0.265	0.199	0.228	—	-0.013	0.414	0.679
	RH	-0.203	-0.044	0.154	0.017	—	0.127	-0.076

n, *u*₂, *T*_{mean}, RH 分别表示日照时数、风速、平均气温和相对湿度; 相关系数亦即途径分析中气象因子对年 ET₀ 的总作用系数。*n*, *u*₂, *T*_{mean}, RH represent sunshine duration, wind speed, temperature and relative humidity, respectively. Correlation coefficients are the total effect coefficients of meteorological factors to ET₀ in path analysis.

表 3 广西喀斯特和非喀斯特地区各季节气象因子对参考作物蒸散量的途径分析
Table 3 Path analysis between meteorological factors and seasonal ET₀ in Guangxi karst and non-karst areas

季节 Season	气象因子 Meteorological factor	喀斯特地区 Karst area			非喀斯特地区 Non-karst area		
		直接作用系数 Direct effect coefficient	间接作用系数和 Sum of indirect effect coefficient	总作用系数 Total effect coefficient	直接作用系数 Direct effect coefficient	间接作用系数和 Sum of indirect effect coefficient	总作用系数 Total effect coefficient
春季 Spring	<i>n</i>	0.652	0.203	0.855	0.485	0.437	0.923
	<i>u</i> ₂	0.363	-0.217	0.147	0.273	0.357	0.630
	<i>T</i> _{mean}	0.385	0.183	0.567	0.210	0.545	0.755
	RH	-0.226	-0.387	-0.613	-0.349	-0.203	-0.551
夏季 Summer	<i>n</i>	0.663	0.242	0.906	0.739	0.240	0.979
	<i>u</i> ₂	0.220	0.206	0.426	0.184	0.325	0.510
	<i>T</i> _{mean}	0.258	0.489	0.747	0.068	0.458	0.526
	RH	-0.155	-0.519	-0.674	-0.251	-0.568	-0.819
秋季 Autumn	<i>n</i>	0.398	0.384	0.782	0.380	0.371	0.752
	<i>u</i> ₂	0.495	0.202	0.697	0.554	0.243	0.797
	<i>T</i> _{mean}	0.299	0.281	0.580	0.254	0.407	0.661
	RH	-0.169	-0.596	-0.766	-0.154	-0.147	-0.301
冬季 Winter	<i>n</i>	0.434	0.229	0.662	0.246	0.413	0.659
	<i>u</i> ₂	0.604	-0.198	0.406	0.573	0.164	0.737
	<i>T</i> _{mean}	0.600	-0.166	0.434	0.417	0.250	0.667
	RH	-0.239	-0.307	-0.546	-0.296	0.014	-0.282

n, *u*₂, *T*_{mean}, RH 分别表示日照时数、风速、平均气温和相对湿度; 相关系数亦即途径分析中气象因子对年 ET₀ 的总作用系数。*n*, *u*₂, *T*_{mean}, RH represent sunshine duration, wind speed, temperature and relative humidity, respectively. Correlation coefficients are the total effect coefficients of meteorological factors to ET₀ in path analysis.

4 讨论与结论

4.1 参考作物蒸散量时空变化特征

ET_0 的时空分布特征表明喀斯特地区 ET_0 小于非喀斯特地区 ET_0 , 这与非喀斯特地区主要位于南部沿海地区, 日照时数较长有关, 这一研究表明 ET_0 在一定程度上受地理位置的影响。但与距海较远的喀斯特地区相比, 同样是深居内陆, 四面环山、地势较平坦的田东地区(非喀斯特) ET_0 却较高, 这说明地形地貌对 ET_0 的高低也有重要影响。因此, 在水资源利用与管理时应该区别对待。

1960—2010 年广西地区 ET_0 整体呈下降趋势, 其中累积距平蒸散量在 20 世纪 70 年代达到最大值, 之后逐渐降低, 20 世纪 90 年代降到最低, 2002 年开始迅速增加。近年来 ET_0 累积距平的升高表明广西地区大气蒸发能力增强, 植被蒸腾、作物需水量增加, 如果 ET_0 持续升高而不及及时采取有效措施保障生态需水, 将加剧喀斯特地区石漠化、引发整个广西地区的农业干旱, 甚至威胁该地区人们的生活用水。张伟伟等^[27]指出西南地区 20 世纪 70 年代末至 21 世纪初, ET_0 大幅下降, 2004 年以后, ET_0 急剧增加, 这与本研究结果的变化趋势一致。表明同一地区不同时期 ET_0 的变化特征不同, 在今后的研究中, 有必要针对不同年代的 ET_0 变化特征及其成因进行分段探讨, 从而科学客观地认识 ET_0 变化在不同气候变化阶段水资源管理中所起的作用^[28]。累积距平只是给出了广西地区年际 ET_0 的变化趋势, 不能反映各站点的变化趋势, 本文运用 Spearman 秩次相关法计算了广西地区各站点多年平均 ET_0 的相关系数, 定量分析了各站点的变化趋势。从广西地区各站点多年平均 ET_0 的变化趋势看, 呈下降趋势的站点略大于呈上升趋势的站点, 而上升趋势的站点主要呈不显著性上升趋势, 这与关保多等^[18]对广西 20 个气象站点的研究结果类似, 与张方敏等^[29]研究认为中国 ET_0 呈显著上升的站点略多于显著下降站点的结论不尽相同, 反映了气候变化的区域特性。

4.2 参考作物蒸散量时空变化影响因子

Zhao 等^[30]研究发现海河流域 ET_0 对平均相对湿度最敏感, 而风速和短波辐射的减少是海河东部和南部地区 ET_0 下降的主要原因; 曹雯等^[28]发现日照时数和风速是安徽省 ET_0 变化的主导因子; Shi 等^[31]认为风速是导致黄土高原地区大多数气象站点 ET_0 变化的主要因子。可见, 不同地区 ET_0 的主导因子不同。在本研究中, 日照时数、风速和平均气温对广西地区和非喀斯特地区年 ET_0 影响较大, 相对湿度

对其影响较小, 与田雷等^[32]在贵州的研究结果类似; 在喀斯特地区, 各气象因子与年 ET_0 均有较强的相关性, 相对湿度主要通过影响其他气象因子对 ET_0 产生影响。通径分析结果表明喀斯特地区日照时数、风速和平均气温这 3 个气象因子间的相互影响较非喀斯特地区小, 相互之间的变化关系可能受到微地形的影响而更加复杂。此外, 在喀斯特地区冬、春两季, 可能是风速增大, 导致平均气温降低, 从而导致 ET_0 减少, 进而抵消了风速对 ET_0 的正向影响, 说明 ET_0 不仅受各气象因子的直接影响, 各气象因子间的相互制约、相互影响也会对 ET_0 变化产生重要影响。

本研究进一步说明了 ET_0 变化及其影响因素具有区域性差异, 即便是处于同一地区的喀斯特与非喀斯特地区 ET_0 的影响因素也不同, 因此对 ET_0 的研究要分区域进行, 充分了解各个区域的变化趋势和影响因素, 这有助于评估未来气候变化下不同地区水资源需求量的变化, 对制定合理的植被恢复策略、防灾减灾、提高生产力具有重要指导意义。

4.3 结论

本文基于 FAO-56 Penman-Monteith 公式和 1960—2010 年广西 25 个气象站点的逐日资料, 分析了广西喀斯特与非喀斯特地区 ET_0 的时空变化特征及其影响因子。

广西各站点 51 年平均 ET_0 为 1 018~1 343 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 平均值为 1 138 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 非喀斯特地区 ET_0 整体上高于喀斯特地区, 除春季 ET_0 高值区主要集中在西部的喀斯特地区外, 其他季节 ET_0 高值区主要集中在南部沿海的非喀斯特地区。喀斯特和非喀斯特地区季节 ET_0 变化趋势一致, 夏季最大, 春季和秋季相差不大, 冬季最少。年 ET_0 累积距平曲线均呈“N”型分布, 20 世纪 70 年代最高, 90 年代最低, 21 世纪以来年 ET_0 有所回升, 但仍低于平均值; 此外, 喀斯特地区 ET_0 年际变化小于非喀斯特地区。

ET_0 和气象因子的通径分析表明, 不同地区、不同季节 ET_0 的主要影响因子不同。相对湿度对非喀斯特地区年 ET_0 影响不大, 但相对湿度通过与其他气象因子的相互作用间接地对喀斯特地区年 ET_0 产生较大的影响; 在季节尺度上, 日照时数和平均气温在各季节都是喀斯特地区与非喀斯特地区 ET_0 最主要的影响因子, 此外, 风速在喀斯特地区冬、春两季对 ET_0 的间接作用系数为负, 在非喀斯特地区并未发现这一现象。实际上, ET_0 的变化不仅受日照时数、风速、气温和相对湿度的影响, 还受其他气候

因素、下垫面条件、植被度、人类活动等多种因素的影响,需要进一步研究这些因素对区域蒸散量的影响,从而全面了解区域蒸散量差异的主导因子。

参考文献 References

- [1] 何永涛, 闵庆文, 李文华. 植被生态需水研究进展及展望[J]. 资源科学, 2005, 27(4): 8–13
He Y T, Min Q W, Li W H. Progress and perspectives on ecological water requirement of vegetation[J]. Resources Science, 2005, 27(4): 8–13
- [2] 尹云鹤, 吴绍洪, 戴尔阜. 1971~2008 年我国潜在蒸散时空演变的归因[J]. 科学通报, 2010, 55(22): 2226–2234
Yin Y H, Wu S H, Dai E F. Determining factors in potential evapotranspiration changes over China in the period 1971–2008[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(22): 2226–2234
- [3] 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
Feng Z M, Yang Y Z, Ding X Q, et al. Temporal-spatial changing characteristics of reference crop evapotranspiration in Gansu Province[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 99–103
- [4] Allen R G, Jensen M E, Wright J L, et al. Operational estimates of reference evapotranspiration[J]. Agronomy Journal, 1989, 81(4): 650–662
- [5] 李志. 黄土高原 1961—2009 年参考作物蒸散量的时空变异[J]. 生态学报, 2012, 32(13): 4139–4145
Li Z. Spatiotemporal variations in the reference crop evapotranspiration on the Loess Plateau during 1961–2009[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(13): 4139–4145
- [6] 王升, 付智勇, 陈洪松, 等. 基于 GEP 和地理位置信息的湘鄂地区月参考作物腾发量模拟计算[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(4): 490–496
Wang S, Fu Z Y, Chen H S, et al. Using gene-expression programming method and geographical location information to simulate evapotranspiration in Hunan and Hubei Provinces[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(4): 490–496
- [7] 刘文娟, 安瑞平, 连晋姣. 宁夏参考作物蒸散量的时空变化特征分析[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(1): 69–73
Liu W J, An R P, Lian J J. Temporal-spatial characteristics of reference crop evapotranspiration in Ningxia[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(1): 69–73
- [8] Hulme M, Zhao Z C, Jiang T. Recent and future climate change in East Asia[J]. International Journal of Climatology, 1994, 14(6): 637–658
- [9] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength[J]. Nature, 1995, 377(6551): 687–688
- [10] 刘昌明, 张丹. 中国地表潜在蒸散敏感性时空变化特征分析[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 579–588
Liu C M, Zhang D. 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
- [11] Zhang C G, Shen Y J, Liu F G, et al. Changes in reference evapotranspiration over an agricultural region in the Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 123(1/2): 107–115
- [12] 林俊清. 贵州喀斯特与非喀斯特地貌分布面积及其特征分析[J]. 贵州教育学院学报, 2001, 12(4): 43–46
Lin J Q. The distributed area and the features analysis of karst and non karst landscape in Guizhou[J]. Journal of Guizhou Educational College, 2001, 12(4): 43–46
- [13] 蔡运龙. 中国西南岩溶石山贫困地区的生态重建[J]. 地球科学进展, 1996, 11(6): 602–606
Cai Y L. Preliminary research on ecological reconstruction in karst mountain poverty areas of Southwest China[J]. Advance in Earth Sciences, 1996, 11(6): 602–606
- [14] Liu M X, Xu X L, Sun A Y, et al. Is southwestern China experiencing more frequent precipitation extremes?[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(6): 064002
- [15] Gao X L, Peng S Z, Wang W G, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of reference evapotranspiration trends in Karst area: A case study in Guizhou Province, China[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2016, 128(5): 677–688
- [16] 徐蒙蒙, 张志才, 陈喜. 贵州省参考作物蒸散量的时空变化分析[J]. 地球与环境, 2012, 40(2): 243–249
Xu M M, Zhang Z C, Chen X. Spatio-temporal variation of reference evapotranspiration in Guizhou Province from 1960 to 2009[J]. Earth and Environment, 2012, 40(2): 243–249
- [17] 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
Dai M H, Li Y T, Wang L C, et al. Temporal and spatial variation of reference crop evapotranspiration in Guizhou Province, China[J]. Earth and Environment, 2016, 44(3): 342–352
- [18] 关保多, 代俊峰, 杜君, 等. 广西多站点参考作物蒸散量时空变化分析[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(6): 126–128
Guan B D, Dai J F, Du J, et al. Temporal and spatial variability of reference crop evaporation in Guangxi Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(6): 126–128
- [19] 胡可, 王升, 聂云鹏, 等. 近 60 年桂西北喀斯特地区气候与参考腾发量变化及成因分析[J]. 农业现代化研究, 2014, 35(4): 500–506
Hu K, Wang S, Nie Y P, et al. Variations and impact factors of potential evapotranspiration in karst area of Northwest Guangxi over the last 60 years[J]. Research of Agricultural Modernization, 2014, 35(4): 500–506
- [20] 覃海绍. 七百弄地区岩溶地质研究及旅游资源开发保护[D]. 西安: 长安大学, 2007
Qin H S. On the Karst geology in Qibainong areas and its exploitation and protection for tourist resources[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007
- [21] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56[R]. Rome: FAO, 1998
- [22] Ran L S, Wang S J, Fan X L. Channel change at Toudaoguai

- Station and its responses to the operation of upstream reservoirs in the upper Yellow River[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(2): 231–247
- [23] 宋小园, 朱仲元, 刘艳伟, 等. 通径分析在 SPSS 逐步线性回归中的实现[J]. *干旱区研究*, 2016, 33(1): 108–113
Song X Y, Zhu Z Y, Liu Y W, et al. Application of path analysis in stepwise linear regression SPSS[J]. *Arid Zone Research*, 2016, 33(1): 108–113
- [24] 蔡甲冰, 许迪, 刘钰, 等. 冬小麦返青后腾发量时空尺度效应的通径分析[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(8): 69–76
Cai J B, Xu D, Liu Y, et al. Path analysis on spatio-temporal scaling effect of crop evapotranspiration in growing seasons for winter wheat after reviving[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(8): 69–76
- [25] 闫人华, 熊黑钢, 李成圆, 等. 绿洲-荒漠过渡带蒸散与主要环境因子关系分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(1): 154–160
Yan R H, Xiong H G, Li C Y, et al. Relationships between evapotranspiration and primary environmental factors in oasis-desert ecotone[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(1): 154–160
- [26] 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 Y, Cui N B, Wei X P, et al. Temporal-spatial distribution characteristics and causes analysis of reference crop evapotranspiration in hilly area of central Sichuan[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(14): 78–86
- [27] 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
- Zhang W W, Wang Y, Zhang G B. Temporal and spatial change of reference crop evapotranspiration and its cause analysis in Southwest China during 1960–2013[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(2): 135–141
- [28] 曹雯, 段春锋, 姚筠, 等. 1961—2010 年安徽省参考作物蒸散时空变化特征及成因[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(12): 3619–3626
Cao W, Duan C F, Yao Y, et al. Temporal-spatial variations of reference evapotranspiration in Anhui Province and the quantification of the causes[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(12): 3619–3626
- [29] 张方敏, 申双和. 我国参考作物蒸散的空间分布和时间趋势[J]. *南京气象学院学报*, 2007, 30(5): 705–709
Zhang F M, Shen S H. Spatial distribution and temporal trend of reference crop evapotranspiration in China[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2007, 30(5): 705–709
- [30] Zhao L L, Xia J, Sobkowiak L, et al. Climatic characteristics of reference evapotranspiration in the Hai River Basin and their attribution[J]. *Water*, 2014, 6(6): 1482–1499
- [31] Shi Z J, Xu L H, Yang X H, et al. Trends in reference evapotranspiration and its attribution over the past 50 years in the Loess Plateau, China: Implications for ecological projects and agricultural production[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2017, 31(1): 257–273
- [32] 田雷, 杨胜天, 王玉娟. 应用遥感技术研究贵州春季蒸散发空间分异规律[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(1): 87–91
Tian L, Yang S T, Wang Y J. Research on the spring evapotranspiration of karst area based on RS and GIS in Guizhou Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 15(1): 87–91