

湛江地区干湿气候变化特征及其对水稻、糖蔗和花生产量的影响

赵宝山^{1,2,3}, 窦美安^{2,3,4}, 安东升^{1,2,3,4}, 严程明^{1,2,3,4}, 马海洋¹, 黄松⁵, 苏俊波^{1*}

1. 中国热带农业科学院南亚热带作物研究所, 广东湛江 524091; 2. 中国热带农业科学院湛江实验站, 广东湛江 524091; 3. 国家农业绿色发展长期固定观测湛江试验站, 广东湛江 524091; 4. 广东省省级现代农业(耕地保育与节水农业)产业技术研发中心, 广东湛江 524091; 5. 水利部南京水利水文自动化研究所, 江苏南京 210012

摘要: 探究地区干湿气候变化特征及其对作物产量的影响, 可为气候变化下农业生产规划布局和气象灾害防御提供科学依据。本研究利用 1960—2020 年湛江地区气象站点逐日地面观测资料以及 1990—2020 年该地区水稻、糖蔗和花生产量的统计数据, 以参考作物蒸散量 (ET_0) 和降水量确定的干燥度指数 (AI) 为干旱指标, 分析该地区干湿气候变化特征, 并确定气候变化对 3 种作物产量的影响。结果表明, 湛江地区降水量年际变化波动较大, 年平均降水量 1534.41 mm, 上升趋势不显著; 气温以 0.18 °C/10 a 的速率显著上升; 年平均 ET_0 和 AI 分别为 1242.72 mm/a 和 0.87, 上升趋势不显著。依据干燥度指数年变化情况, 1—4 月和 10—12 月是湛江地区干旱易发生时段。1990—2020 年该地区水稻、糖蔗和花生产量呈显著增长趋势, 4 月干燥度指数升高降低 3 种作物的产量, 5 月干燥度指数升高显著提高花生产量, 而对水稻和糖蔗产量影响不显著, 6 月气温升高和降水量减少有利于显著提高水稻和花生产量。糖蔗产量受气温和降水变化的影响不显著, 而 12 月干燥度指数升高显著提升糖蔗产量。本研究结果对湛江及周边地区农业应对气候变化及提高农作物生产潜力具有重要意义。

关键词: 气候变化; 参考作物蒸散量; 干燥度指数; 降水量; 作物产量

中图分类号: S162.5 文献标识码: A

Characteristics of Dry-wet Climate Change and Its Impacts on the Yield of Rice, Sugarcane and Peanut in Zhanjiang Area, Guangdong, China

ZHAO Baoshan^{1,2,3}, DOU Meian^{2,3,4}, AN Dongsheng^{1,2,3,4}, YAN Chengming^{1,2,3,4}, MA Haiyang¹, HUANG Song⁵, SU Junbo^{1*}

1. South Subtropical Crops Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang, Guangdong 524091, China; 2. Zhanjiang Experimental Station, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang, Guangdong 524091, China; 3. Zhanjiang Experimental and Observation Station for National Long-term Agricultural Green Development, Zhanjiang, Guangdong 524091, China; 4. Guangdong Modern Agriculture Cultivated Land Conservation and Water-saving Agriculture Industrial Technology Research and Development Center, Zhanjiang, Guangdong 524091, China; 5. Nanjing Automation Institute of Water Conservancy and Hydrology, Ministry of Water Resources, Nanjing, Jiangsu 210012, China

Abstract: Exploring the characteristics of dry-wet climate change and its impacts on crop yield can provide scientific basis for agricultural production planning and meteorological disaster prevention under climate change. Based on the daily ground observation data of meteorological stations in Zhanjiang area from 1960 to 2020 and the statistical data of rice, sugarcane and peanut yields from 1990 to 2020, the aridity index calculated by reference crop evapotranspiration

收稿日期 2022-08-01; 修回日期 2022-10-31

基金项目 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (No. 1630102022002, No. 1630062022004)。

作者简介 赵宝山 (1995—), 男, 硕士, 研究实习员, 研究方向: 农业绿色高效用水理论与技术。*通信作者 (Corresponding author): 苏俊波 (SU Junbo), E-mail: junbosu@126.com。

(ET_0) and precipitation were used as drought index to analyze the characteristics of dry-wet climate change, and the impact of dry-wet climate change on crop yield was analyzed. The results showed that the interannual variation of precipitation in Zhanjiang area fluctuated greatly, and the annual average precipitation was 1534.41 mm, showing an insignificant rising trend. The temperature rised significantly at the rate of $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, and the annual average ET_0 and aridity index was 1242.72 mm/a and 0.87 respectively, showing an insignificant upward trend. According to the annual variation of the dryness index, from January to April and from October to December were the drought prone periods in Zhanjiang. The yield of rice, sugarcane and peanut showed a significant growth trend in the past 31 years, the increase of aridity index in April would reduce the yield of the three crops. The increase of aridity index in May would significantly increase the yield of peanut, but had no significant impact on the yield of the other two crops. The increase of temperature and the decrease of precipitation in June were conducive to the significant increase of rice and peanut yield. Sugarcane yield was not significantly affected by the change of temperature and precipitation, while the increase of dryness index in December significantly increased sugarcane yield. The results are of great significance for Zhanjiang and its surrounding areas agriculture to cope with climate change and improve the crop potential productivity.

Keywords: climate change; reference crop evapotranspiration; aridity index; precipitation; crop yield

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.07.022

全球气候呈现变暖趋势，地表气温很可能在 2030—2052 年比工业化前水平约高 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1]，而中国可能上升 $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[2]。与气候变暖相关的其他气候要素（如降水、空气湿度、日照时数、风速等）和干湿状况也会发生变化。农业是对气候变化最为敏感的领域之一，气候变化将对农业生产和粮食安全产生深远影响^[3]。因此，探究气候变化下地区干湿气候变化特征及其对作物产量的影响，对农业发展具有较高的理论意义和科学价值。

湛江市位于中国大陆最南端，是广东省重要的农业生产基地，也是省内干旱灾害频发的区域^[4]。虽然该地区多年平均雨量达 1395.5~1723.1 mm，但由于地处低纬度沿海地区，受热带气旋侵袭的频次和登陆地点不定等的影响，水资源时空分布不均，加之该地区气候炎热蒸发能力强，土壤主要为保水蓄水能力较差的红壤土，农业生产中季节性干旱问题十分突出，已成为制约湛江地区农作物高产稳产的主要因素^[5-6]。在全球气候变暖背景下，湛江地区的气候也发生明显变化，气候变化通过改变农业气候资源影响作物栽培方式、种植制度、生长发育、气候生产力、病虫害等，进而影响作物产量与品质^[7]。当前，针对湛江地区季节性干旱频发现状，已有学者对该地区降水和干旱时空变化特征及发生规律开展了研究^[4, 8-9]。然而，现有研究尚未探讨该地区干湿气候变化对农作物产量的影响。基于此，本研究通过收集该地区气候要素和主要种植的水稻、糖蔗和花生 3 种作物的产量数据，利用干燥度指数表征地区干湿特征，分析气候变化对作物产量的影响，以期气候变化下湛江及周边地区农业生产规划布局

及气象灾害防御提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

湛江地处中国大陆南端，广东省西南部，全境位于 $20^{\circ}13'\text{N}\sim 21^{\circ}57'\text{N}$ ， $109^{\circ}40'\text{E}\sim 110^{\circ}58'\text{E}$ 之间，面积约 1.33 万 km^2 ，地形多为平原和台地，土壤以红壤土为主。气候类型属于热带北缘季风气候，终年受海洋气候的调节，年均气温为 $22.7\sim 23.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，年均雨量 $1395.5\sim 1723.1\text{ mm}$ ，年均日照时数 $1714.8\sim 2038.2\text{ h}$ ，是中国光、热、水资源最为丰富的地区之一，但地区蒸发量高且水资源时空分布不均，是广东省干旱灾害发生较为频繁的区域。湛江市农作物生产以粮食、糖料、油料作物为主，也是广东省重要的热带作物和热带水果生产基地。

1.2 方法

1.2.1 数据来源 收集 1960—2020 年湛江辖区内湛江市（ $21^{\circ}09'\text{N}$ ， $110^{\circ}18'\text{E}$ ，海拔 53.4 m）和徐闻县（ $21^{\circ}15'\text{N}$ ， $110^{\circ}10'\text{E}$ ，海拔 11.4 m）2 个全国基准基本站地面气象日值资料，包括降水、平均气温、最高气温、最低气温、平均相对湿度、平均风速和日照时数等数据，数据来源于国家气象科学数据中心（<http://data.cma.cn>）。对于其中个别缺测数据，采用当日相邻 2 d 该气象要素的平均值替代^[10]。并收集 1990—2020 年湛江地区水稻、糖蔗和花生的产量数据，数据来源于《湛江市统计年鉴 2021》。

1.2.2 干燥度指数计算 干燥度指数 (AI) 为自然条件下大气中水汽输出 ET_0 与输入降水量的比

值,可用于表征地区干湿特征,其计算公式为^[11]:

$$AI = \frac{ET_0}{P} \quad (1)$$

式中, ET_0 为参考作物蒸散量, mm/d; P 为降水量, mm/d。根据 AI 可将干湿区域划分为 6 个等级,其划分标准为^[11]: $AI < 0.5$ 为极湿润区, $0.5 \leq AI < 1.0$ 为湿润区, $1.0 \leq AI < 1.5$ 为亚湿润区, $1.5 \leq AI < 3.5$ 为亚干旱区, $3.5 \leq AI < 20.0$ 为干旱区, $AI \geq 20.0$ 为极干旱区。

1.2.3 ET_0 计算 采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式计算 ET_0 , 该方法作为计算 ET_0 的标准方法已在全球得到广泛应用^[12-13]。计算公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)} \quad (2)$$

式中, Δ 为饱和水汽压曲线斜率, kPa/°C; R_n 为净辐射, MJ/(m²·d⁻¹); G 为土壤热通量, MJ/(m²·d⁻¹); γ 为湿度计常数, kPa/°C; T 为平均气温(日最高气温和日最低气温的均值), °C; u_2 为 2 m 高处的风速, m/s; e_s 为饱和水汽压, kPa; e_a 为实际水汽压, kPa。气象台站观测风速数据为 10 m 高处的平均风速,通过公式(3)转换为 2 m 高处的平均风速^[14]:

$$u_2 = \frac{4.87u_{10}}{\ln(67.8 \times 10 - 5.42)} \quad (3)$$

式中, u_{10} 为 10 m 高处的风速, m/s。

1.2.4 气候倾向率计算 气候倾向率可表征气候要素随时间序列的变化趋势,可通过最小二乘法拟合一元线性回归方程估算^[15]:

$$y(t) = a_0 + a_1 t \quad (4)$$

式中, t 为时间序列, a ; $y(t)$ 为与时间序列相对应的气候要素值; a_1 为线性回归所得的斜率, $a_1 > 0$ 表示气候要素随 t 呈上升趋势,反之 $a_1 < 0$ 表示气候要素随 t 呈下降趋势, a_0 为截距。以 a_1 的 10 倍(即 $10 a_1$) 作为气候要素的倾向率。

1.3 数据处理

利用 Excel 2019 软件进行数据分析、整理,采用 IBM SPSS Statistics 26 软件进行显著性分析,采用 Origin 2021 软件制图。

2 结果与分析

2.1 气候要素变化特征分析

1960—2020 年湛江地区降水量、气温、相对湿度和日照时数的年际变化趋势如图 1 所示,从

图 1A 可以看出,湛江地区降水量年际变化波动较大,整体上湛江市高于徐闻县,湛江市和徐闻县平均降水量分别为 1675.52、1393.30 mm,年最大降水量分别为 2411.30、2134.10 mm,均发生于 1985 年;年最小降水量分别为 1068.50、769.70 mm,均发生于 2004 年。湛江地区降水量的上升趋势不显著,但年际变化波动较大,主要是由于该地区受热带气旋侵袭的频次和登陆地点不定的影响。由图 1B 可知,湛江市气温呈显著上升趋势,且徐闻县气温呈极显著上升趋势,湛江市和徐闻县的气候倾向率分别为 0.12 °C/10 a 和 0.24 °C/10 a,湛江地区气温显著升高与全球气候变暖的大环境一致。由图 1C 可知,湛江市和徐闻县的相对湿度变化范围分别为 76.56%~86.28% 和 77.72%~86.77%,平均值分别为 82.04% 和 82.94%,湛江市上升趋势不显著,徐闻县呈显著下降趋势,气候倾向率为 -0.25%/10 a,说明徐闻县呈一定的干旱趋势。日照作为太阳辐射的直观表现形式,是温度、相对湿度和降水等气象要素的能量来源,由图 1D 可知,湛江市的日照时数变化范围为 4.22~5.89 h,平均值 5.22 h,气候倾向率为 -0.025 h/10 a;徐闻县的日照时数高于湛江市,平均值为 5.65 h,湛江地区的日照时数下降趋势不显著。日照时数的下降可能与人类活动、城市化发展导致大气污染,空气中气溶胶增多有关^[16]。

2.2 干湿状况变化特征分析

1960—2020 年,湛江地区参考作物蒸散量 (ET_0) 整体上升趋势不显著(图 2A),可以看出徐闻县的 ET_0 上升趋势更为明显,湛江市和徐闻县的 ET_0 气候倾向率分别为 4.88 mm/10 a 和 9.68 mm/10 a。地区年际 ET_0 分布不均,湛江市的变化范围为 1102.48~1357.24 mm/a,平均值为 1214.19 mm/a。徐闻县的 ET_0 变化范围为 1075.38~1434.89 mm/a,平均值为 1271.25 mm/a。

湛江地区干燥度指数 (AI) 年际变化如图 2B 所示,结果表明该地区干燥度指数的变化趋势不显著,相同时期内徐闻县的 AI 高于湛江市,湛江市和徐闻县的 AI 平均值分别为 0.76 和 0.99。根据 AI 确定的干湿等级划分标准,湛江地区属于湿润区。但部分年份干湿等级存在差异,1960—2020 年,湛江市约有 9.8% 的年份属于亚湿润区,徐闻县有 27.9% 的年份处于亚湿润区,11.5% 的年份属于亚干旱区。

1960—2020 年湛江地区降水量 (P)、 ET_0 和

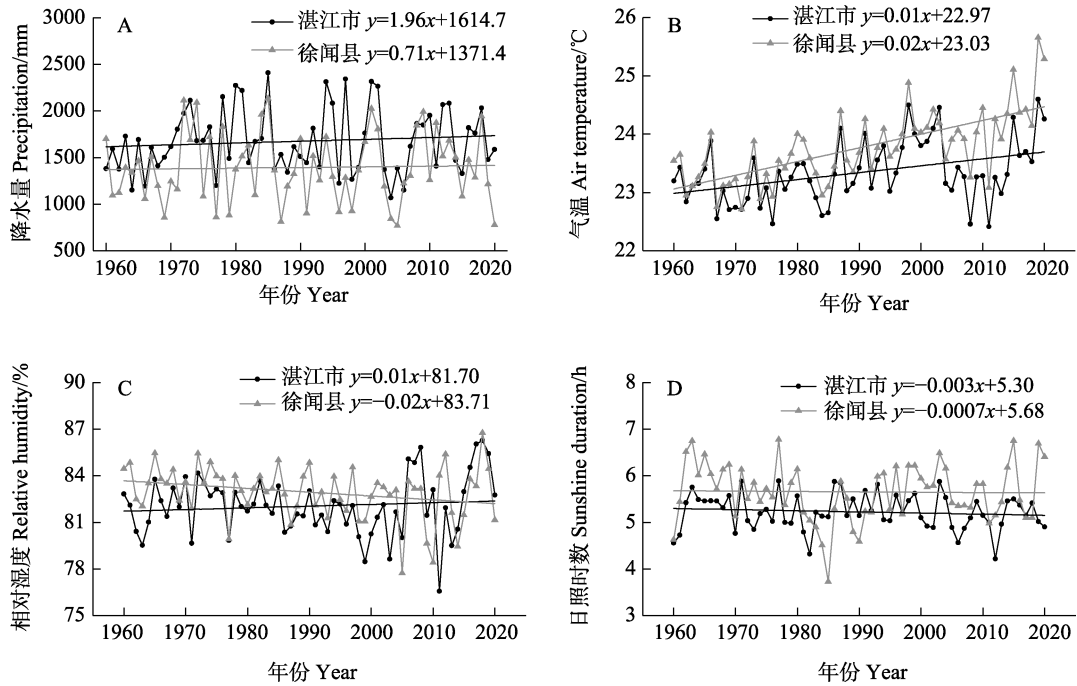


图 1 1960—2020 年湛江地区气象要素年际变化特征及线性趋势

Fig. 1 Interannual variation and linear trends of the meteorological factors in Zhanjiang area from 1960 to 2020

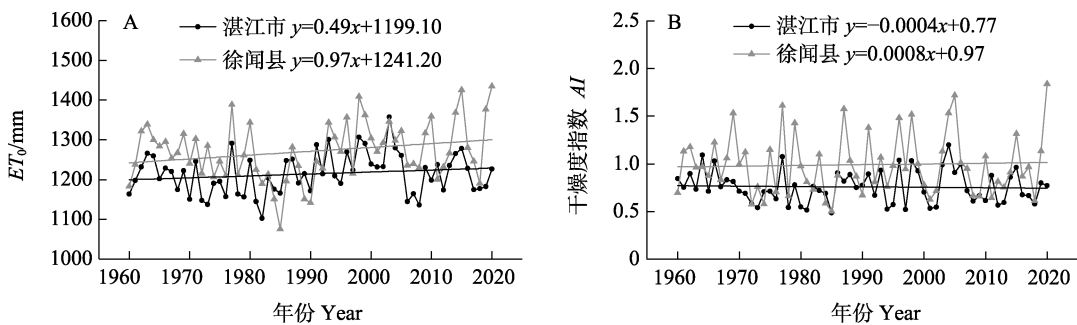


图 2 1960—2020 年湛江地区参考作物蒸散量 (ET_0) 和干燥度指数 (AI) 年际变化特征及线性趋势

Fig. 2 Interannual variation and linear trends of the ET_0 and AI in Zhanjiang area from 1960 to 2020

AI 的月变化曲线如图 3 所示, 从图 3A 可看出, 湛江市降水量呈双峰型变化趋势, 前汛期雨季峰值出现在 6 月, 降水量为 255.25 mm; 7 月降水量减少, 后汛期雨季峰值出现在 8 月, 降水量为 300.08 mm。从图 3B 可看出, 徐闻县降水量呈单峰型变化趋势, 峰值出现于 8 月, 降水量峰值为 278.53 mm。湛江地区降水年内分布不均, 湛江市和徐闻县 6—10 月降水量较多, 分别占全年降水量的 88.8% 和 90.3%。湛江市和徐闻县的 ET_0 在一年内呈单峰型变化趋势, 1 月和 2 月较小, 2 月之后 ET_0 持续增大, 5—10 月的 ET_0 均超过 100 mm, 这 6 个月的总 ET_0 占全年的 63.1%。湛江市和徐闻县的降水与 ET_0 变化趋势略有不同, 湛江市 4—10 月降水量高于 ET_0 , 11 月至次年 3 月 ET_0 高于降水量。而徐闻县 6—10 月降水量高于 ET_0 ,

11 月至次年 5 月 ET_0 高于降水量 (图 3B)。从图 3 还可以看出, AI 指数在 1—5 月下降, 之后 6—9 月基本保持平稳, 10—12 月迅速上升。根据干湿等级划分标准, $AI > 1.5$ 时属于亚干旱及以上干旱程度, 可以看出湛江市在 1—2 月、11—12 月处于亚干旱及以上干旱程度, 徐闻县在 1—4 月、10—12 月处于亚干旱及以上干旱程度。因此, 1—4 月和 10—12 月是湛江地区干旱易发生的时段, 在此期间易因干旱导致作物产量减产。

2.3 干湿气候变化对作物产量的影响

湛江地区季节性、区域性干旱问题较为突出, 进而制约该地区农作物的稳产高产。1990—2020 年湛江地区水稻、糖蔗和花生单产的变化趋势如图 4 所示, 从图 4 可以看出 3 种农作物的单产随时间序列呈不同程度的波动, 其中水稻和糖蔗的

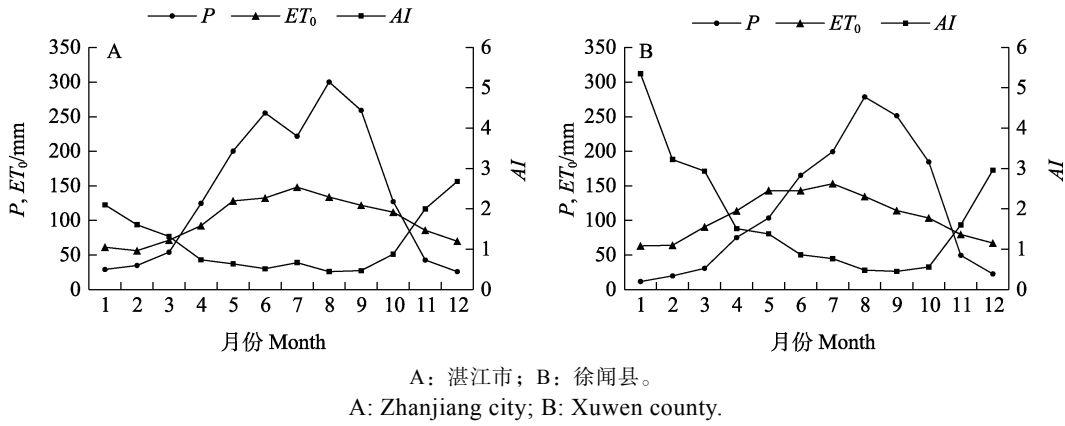


图 3 1960—2020 年湛江地区降水量 (P)、 ET_0 和 AI 的月变化曲线
Fig. 3 Monthly variation curve of the precipitation (P), ET_0 and AI in Zhanjiang area from 1960 to 2020

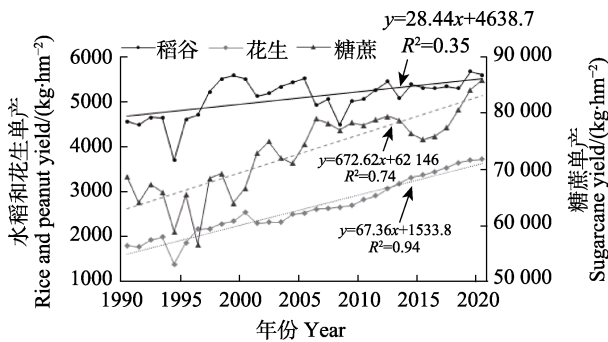


图 4 1990—2020 年湛江地区水稻、糖蔗和花生单产变化趋势

Fig. 4 Variation trend of yield per unit of rice, sugarcane and peanut in Zhanjiang area from 1990 to 2020

单产波动幅度较大, 但 3 种作物整体呈显著增长趋势。1990—2020 年水稻、糖蔗和花生的平均单产分别为 5093.71、72 907.74、2611.45 kg/hm²。2004 年湛江地区发生较严重的春旱和秋旱^[4], 旱情严重影响糖蔗产量。2015 年发生的春夏秋连旱使糖蔗和水稻出现不同程度的减产, 而当年花生未出现明显减产。

采用气温、降水量和干燥度指数 (AI) 分析湛江地区干湿气候变化对 3 种作物产量的影响。湛江是广东省双季稻的主要种植区, 从生育期来看, 早稻和晚稻生育期分别集中于 3—6 月和 8—11 月。对水稻生育期的气温、降水量和干燥度指数与产量进行回归分析 (表 1), 可以看出气温整体上与产量呈正相关, 其中 6 月气温升高显著提高了水稻产量, 气温每上升 1℃, 水稻单产增加 354.61 kg/hm²。4—5 月降水量与产量呈正相关, 而在其余月份呈负相关。干燥度指数在降水较少的 3—4 月和 10—11 月与产量呈负相关, 在其余月份呈正相关。4—5 月处于水稻需水量较多的分蘖期或拔节期, 水分亏缺易导致水稻有效穗

数减少, 因此在此期间降水增多提高了水稻产量, 而 4 月干燥度指数升高显著降低了产量。6 月降水与产量呈显著负相关, 干燥度指数上升在一定程度上有利于提高产量, 这主要是由于 6 月水稻处于扬花授粉期和灌浆期, 降水多使空气湿度增加, 不利于颖花发育和进行授粉, 并且降水过程经常伴随的大风容易使水稻发生大面积倒伏, 也会对湛江地区的水稻产量产生负影响。

湛江地区糖蔗生育期主要集中于 3—12 月, 表 2 为糖蔗生育期气温、降水量和干燥度指数 (AI) 与产量的回归分析结果, 可以看出除 8 月和 12 月外, 气温升高一定程度上有利于提高糖蔗产量, 但气温对糖蔗产量影响程度不显著。5 月、6 月和 12 月降水增加降低了糖蔗产量, 4 月和 12 月 AI 对糖蔗产量影响达到显著水平, 其中 4 月 AI 对产量呈负影响, 干燥度每上升 1 个单位, 糖蔗产量下降 69.71 kg/hm², 其主要原因可能是由于 4 月处于糖蔗幼苗期和分蘖期的过渡阶段, 干旱胁迫易导致糖蔗有效茎数减少; 12 月 AI 对产量呈正影响, 其主要原因是 12 月处于糖蔗成熟期, 降水量过多易导致糖蔗出现倒伏现象, 影响糖蔗生长和后续的收割, 12 月 AI 每上升 1 个单位, 糖蔗产量增加 72.37 kg/hm²。

花生是我国主要的油料作物和重要的经济作物, 也是广东省种植面积仅次于水稻的第二大农作物^[17]。湛江地区花生生育期干湿气候变化与产量的回归分析结果见表 3, 可以看出在 4 月气温升高有利于花生产量的增加, 5 月和 6 月的影响程度达到显著水平。4 月花生处于对水分最为敏感的花针期, 产量与降水量呈正相关, 其余月份呈负相关, 仅 6 月的降水量对花生产量的影响达

表 1 不同月份干湿气候与水稻产量的线性方程参数

Tab. 1 Parameters of linear equation between dry-wet climate and rice yield in different months

月份 Month	气温 Air temperature			降水量 Precipitation			干燥度指数 AI		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i>
3	100.20	3008.96	0.32	-0.42	5110.79	-0.02	-0.99	5099.63	-0.02
4	61.38	3593.56	0.17	1.88	4931.70	0.24	-6.70	5172.40	-0.55**
5	114.92	1 949.84	0.24	1.15	4910.22	0.23	12.51	5074.95	0.03
6	354.61	-5146.64	0.52**	-1.92	5486.06	-0.53**	70.72	4989.64	0.27
8	204.73	-726.53	0.23	-0.52	5248.79	-0.16	127.09	5008.97	0.13
9	71.29	3145.23	0.11	-0.67	5250.97	-0.15	208.39	4955.06	0.15
10	154.76	1200.39	0.27	0.20	5060.64	0.06	-6.21	5127.39	-0.20
11	111.97	2628.45	0.28	-0.67	5123.97	-0.07	-0.97	5117.27	-0.10

注: *a* 为线性回归方程的一次项系数, *b* 为常数项, *R* 为相关系数; *表示显著相关 ($P<0.05$), **表示极显著相关 ($P<0.01$)。

Note: *a* is the first-order term of the linear regression equation, *b* is the constant term, and *R* is the correlation coefficient. * means significant correlation ($P<0.05$), ** means extremely significant correlation ($P<0.01$).

表 2 不同月份干湿气候与糖蔗产量的线性方程参数

Tab. 2 Parameters of linear equation between dry-wet climate and sugarcane yield in different months

月份 Month	气温 Air temperature			降水量 Precipitation			干燥度指数 AI		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i>
3	1205.10	47 834.29	0.24	-32.10	74 225.80	-0.12	56.36	72 569.64	0.07
4	-157.23	76 750.75	-0.03	23.05	70 923.59	0.18	-69.71	73 726.50	-0.35*
5	2133.02	14 554.55	0.27	-11.27	74 704.83	-0.14	1927.26	70 018.29	0.27
6	2365.88	4586.48	0.22	-12.50	75 465.95	-0.21	606.48	72 015.33	0.14
7	1081.76	41 593.10	0.10	0.75	72 737.49	0.02	288.21	72 527.45	0.06
8	-2521.74	144 598.95	-0.18	13.19	68 962.91	0.25	-866.25	73 485.33	-0.06
9	1753.85	24 972.06	0.16	-0.82	73 102.12	-0.01	36.64	72 883.37	0.00
10	296.71	65 443.16	0.03	13.34	70 733.23	0.26	-114.15	73 527.15	-0.22
11	780.38	55 726.06	0.12	18.33	72 076.09	0.11	-3.36	72 989.23	-0.02
12	-775.36	86 935.65	-0.13	-24.74	73 675.97	-0.13	72.37	71 169.54	0.38*

注: *a* 为线性回归方程的一次项系数, *b* 为常数项, *R* 为相关系数; *表示显著相关 ($P<0.05$), **表示极显著相关 ($P<0.01$)。

Note: *a* is the first-order term of the linear regression equation, *b* is the constant term, and *R* is the correlation coefficient. * means significant correlation ($P<0.05$), ** means extremely significant correlation ($P<0.01$).

表 3 不同月份干湿气候与花生生产量的线性方程参数

Tab. 3 Parameters of linear equation between dry-wet climate and peanut yield in different months

月份 Month	气温 Air temperature			降水量 Precipitation			干燥度指数 AI		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i>
3	145.02	-405.77	0.32	-3.29	2746.39	-0.14	0.45	2608.75	0.01
4	-22.75	3167.56	-0.04	2.06	2434.37	0.19	-7.12	2695.06	-0.41*
5	248.95	-4199.16	0.36*	-1.03	2774.90	-0.14	233.65	2261.15	0.37*
6	481.52	-11 293.66	0.49**	-1.99	3017.82	-0.38*	154.28	2384.43	0.40*

注: *a* 为线性回归方程的一次项系数, *b* 为常数项, *R* 为相关系数; *表示显著相关 ($P<0.05$), **表示极显著相关 ($P<0.01$)。

Note: *a* is the first-order term of the linear regression equation, *b* is the constant term, and *R* is the correlation coefficient. * means significant correlation ($P<0.05$), ** means extremely significant correlation ($P<0.01$).

到显著水平。AI 在 3 月对花生生产量影响不显著, 4—6 月的影响达到显著水平, 4 月 AI 每上升 1 个单位, 花生生产量减少 7.12 kg/hm², 而 5—6 月 AI 上升有利于花生生产量的增加。

3 讨论

全球气候变暖背景下, 华南地区气温呈显著上升的同时, 降水量在春季和秋季呈减少趋势, 该地区干旱发生频率和强度增加^[18-20]。近年来,

隋月等^[19]、黄晚华等^[20-21]根据不同干旱指标对华南气候及干旱特征开展了研究,结果表明该地区干旱特征存在明显的时空差异,这主要是由于地区气候资源的时空变化具有非均匀性。本研究利用 1960—2020 年湛江地区气象站点逐日地面观测资料,对降水量、气温、相对湿度、日照时数、参考作物蒸散量 (ET_0) 和干燥度指数 (AI) 变化特征进行了分析。结果表明,湛江市和徐闻县的 AI 平均值分别为 0.76 和 0.99, 2004 年湛江市和徐闻县的 AI 均值最高 ($AI=1.37$), 是湛江地区最干旱的一年,这与历史上 2004 年湛江地区发生严重干旱相吻合。另外, 2005 年和 2020 年 AI 均为 1.31, 是 21 世纪以来湛江地区仅次于 2004 年的干旱年份。1960—2020 年湛江地区降水、相对湿度和日照时数变化趋势不显著,而气温以 $0.18\text{ }^\circ\text{C}/10\text{ a}$ 的速率显著升高, ET_0 以 $7.28\text{ mm}/10\text{ a}$ 的速率上升,气温升高、蒸发增强加剧了地表水汽的输出,可能导致该地区干旱风险的增加。

气候变化通过改变地区农业气候资源进而影响农作物生长环境和产量,许多学者采用不同干旱指标研究了干旱指标与作物产量的关系^[22-25]。其中, AI 综合考虑了大气水汽输入的降水量和输出的蒸散量,综合表征了区域气候的整体变化,是较为理想的气候指标^[15, 24]。以 AI 为干旱指标,已有学者研究了气候变化对小麦、玉米和马铃薯等作物产量的影响^[7, 24]。本研究利用 1990—2020 年湛江地区水稻、糖蔗和花生产量统计数据,以 AI 分析地区干湿气候变化对水稻、甘蔗和花生 3 种主要作物产量的影响。湛江地区光热资源丰富,具备水稻获得高产的潜力,也是广东省水稻种植面积最大的地区^[26]。尹朝静^[27]指出气温升高和降水量增加对华南地区的水稻单产具有负向影响,本研究结果表明,气温升高有利于湛江地区水稻产量的提高,其原因可能是水稻生殖生长阶段的抽穗期避开了常出现极端高温的 6—8 月。在降水较少的 4—5 月水稻产量与降水量呈正相关,即 4—5 月降水量适量增加有利于提高水稻产量,而在其余月份降水量增加不利于水稻增产,这与韩芳玉等^[25]在气温和降水变化对华南地区水稻产量影响的研究结论相似。4 月 AI 与水稻产量呈显著负相关,其余月份对产量影响并不显著。就甘蔗而言,湛江地区是广东省主要甘蔗产地之一,根据 VICENTE 等^[28]和 FÁBIO 等^[29]的研究,甘蔗在发芽期和幼苗期需水量较小,进入分蘖期后快速

增加,至生长期需水量最大,约为 $6.0\sim 9.0\text{ mm}/\text{d}$ 。本研究表明春季 4 月和秋季 10 月的 AI 与糖蔗产量呈负相关,相关系数分别为 -0.35 和 -0.22 ,说明湛江地区在这 2 个月易发生干旱导致糖蔗减产,研究表明甘蔗在 4 月的平均需水量约为 $7.0\text{ mm}/\text{d}$ ^[30],但 4 月湛江未进入汛期,降水不足容易导致干旱使糖蔗减产。就花生而言,虽然花生生育期处于湛江地区的干旱少雨时段,但干旱对其产量影响并不明显,多年来保持显著上升趋势,这主要是由于花生具有较强的耐旱性。花生不同生育期发生干旱对其产量影响程度不同,苗吴翠等^[31]研究表明,干旱胁迫对花生产量的影响在开花期最为敏感,其次为结荚期,而苗期对干旱最不敏感。湛江地区花生在 4 月进入开花期,花生产量与 AI 呈显著相关 ($R=-0.41$)。因此,在 4 月保证花生充足的水分供给,能有效提升该地区花生的产量。

在农业生产中,影响作物产量的因素众多,本研究只考虑主要的气候因素对湛江地区 3 种作物产量的影响。事实上,其他自然灾害如台风、倒春寒等对该地区作物产量也会造成较大影响,因此定量分析其他自然灾害对作物产量的影响将是今后的研究内容之一。另外,通过积极培育抗旱涝、耐高温和抗病虫害等抗逆甘蔗新品种,加强农田水利基础设施建设和水资源管理,做好农业干旱灾害防御工作,是气候变化环境下湛江地区农作物实现高产的另一主要工作内容。

参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis[C]. Contribution of Working Group to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] 王晓欣, 姜大膀, 郎咸梅. CMIP5 多模式预估的 $1.5\text{ }^\circ\text{C}$ 升温背景下中国气温和降水变化[J]. 大气科学, 2019, 43(5): 1158-1170.
WANG X X, JIANG D B, LANG X M. Temperature and precipitation changes over China under a $1.5\text{ }^\circ\text{C}$ global warming scenario based on CMIP5 models[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, 43(5): 1158-1170. (in Chinese)
- [3] 刘宪锋, 傅伯杰. 干旱对作物产量影响研究进展与展望[J]. 地理学报, 2021, 76(11): 2632-2646.
LIU X F, FU B J. Drought impacts on crop yield: progress, challenges and prospect[J]. Acta Geographica Sinica, 2021,

- 76(11): 2632-2646. (in Chinese)
- [4] ZHAO B S, AN D S, YAN C M, YAN H F, KONG R, SU J B. Spatiotemporal variations of reference evapotranspiration and its climatic driving factors in Guangdong, a humid subtropical province of South China[J]. *Agronomy*, 2023, 13: 1446.
- [5] 李金山, 段福义, 韩启彪, 孙浩. 南方红壤旱地季节性干旱特点及节水农业模式[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(S2): 173-177.
- LI J S, DUAN F Y, HAN Q B, SUN H. Mode of water-saving agriculture for upland red soil[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(S2): 173-177. (in Chinese)
- [6] 安东升, 窦美安. 华南季节性干旱区节水农业技术研究进展与趋势[J]. *广东农业科学*, 2015, 42(16): 130-135.
- AN D S, DOU M A. Progress and prospect of the application of water saving agriculture in seasonal drought in South China[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2015, 42(16): 130-135. (in Chinese)
- [7] 姚玉璧, 王润元, 杨金虎, 张谋草, 岳平, 肖国举. 黄土高原半湿润区气候变化对冬小麦生长发育及产量的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(16): 5154-5163.
- YAO Y B, WANG R Y, YANG J H, ZHANG M C, YUE P, XIAO G J. Impacts of climate change on growth and yield of winter wheat in the semi-humid region of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(16): 5154-5163. (in Chinese)
- [8] 王壬, 陈建耀, 江涛, 黎坤, 赵新锋. 近 30 年雷州半岛季节性气象干旱时空特征[J]. *水文*, 2017, 37(3): 36-41.
- WANG R, CHEN J Y, JIANG T, LI K, ZHAO X F. Spatio-temporal characteristics of seasonal meteorological drought in Leizhou Peninsula during 1984—2013[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(3): 36-41. (in Chinese)
- [9] 涂石飞, 徐峰, 张羽, 季倩倩, 陈虹颖, 李晓惠. 湛江市降水年代际特征及其影响机制[J]. *广东海洋大学学报*, 2018, 38(2): 62-70.
- TU S F, XU F, ZHANG Y, JI Q Q, CHEN H Y, LI X H. Interdecadal characteristics and influence factors of precipitation in Zhanjiang[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2018, 38(2): 62-70. (in Chinese)
- [10] 吴霞, 王培娟, 霍治国, 白月明. 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 X, WANG P J, HUO Z G, BAI Y M. 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)
- [11] 张存杰, 廖要明, 段居琦, 宋艳玲, 黄大鹏, 王胜. 我国干湿气候区划研究进展[J]. *气候变化研究进展*, 2016, 12(4): 261-267.
- ZHANG C J, LIAO Y M, DUAN J Q, SONG Y L, HUANG D P, WANG S. The progress of dry-wet climate divisional research in China[J]. *Climate Change Research*, 2016, 12(4): 261-267. (in Chinese)
- [12] 赵宝山, 闫浩芳, 张川, Samuel Joe Acquah, 毋海梅, 张亭年. Venlo 型温室内参考作物蒸散量计算方法比较研究[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(7): 61-66.
- ZHAO B S, YAN H F, ZHANG C, SAMUEL J A, WU H M, ZHANG H N. Comparison of different methods for calculating the evapotranspiration in Venlo-type greenhouse[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(7): 61-66. (in Chinese)
- [13] YAN H F, ZHANG C, MIRIAM C G, SAMUEL J A, ZHANG H N, WU H M, ZHAO B S, HUANG S, FU H W. Parametrization of aerodynamic and canopy resistances for modeling evapotranspiration of greenhouse cucumber[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 262: 370-378.
- [14] PEREIRA L S, ALLEN R G, SMITH M, RAES D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: past and future[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 147: 4-20.
- [15] 胡琦, 董蓓, 潘学标, 姜会飞, 潘志华, 乔宇, 邵长秀, 丁梦琳, 尹紫薇, 胡莉婷. 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 Q, DONG B, PAN X B, JIANG H F, PAN Z H, QIAO Y, SHAO C X, DING M L, YIN Z W, HU L T. Spatio-temporal variation and causes analysis of dry-wet climate over period of 1961—2014 in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(6): 124-132. (in Chinese)
- [16] 肖风劲, 张旭光, 廖要明, 刘秋锋. 中国日照时数时空变化特征及其影响分析[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(20): 92-100.
- XIAO F J, ZHANG X G, LIAO Y M, LIU Q F. Sunshine duration in China: variation characteristics and its influence[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(20): 92-100. (in Chinese)
- [17] 李少雄, 洪彦彬, 陈小平, 梁炫强. 广东花生生产、育种和种业现状与发展对策[J]. *广东农业科学*, 2020, 47(11): 78-83.
- LI S X, HONG Y B, CHEN X P, LIANG X Q. Present situation and development strategies of peanut production, breeding and seed industry in Guangdong[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2020, 47(11): 78-83. (in Chinese)
- [18] 王利盈. 华南地区近 48 年气候变化特征及未来趋势分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- WANG L Y. Characteristics and future trend analysis of climate change for nearly 48 years in South China areas[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014. (in Chinese)
- [19] 隋月, 黄晚华, 杨晓光, 李茂松. 气候变化背景下中国南方地区季节性干旱特征与适应. I. 降水资源演变特征[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(7): 1875-1882.
- SUI Y, HUANG W H, YANG X G, LI M S. Characteristics

- and adaption of seasonal drought in southern China under the background of global climate change. I. Change characteristics of precipitation resource[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(7): 1875-1882. (in Chinese)
- [20] 黄晚华, 隋月, 杨晓光, 代姝玮, 李茂松. 气候变化背景下中国南方地区季节性干旱特征与适应. V. 南方地区季节性干旱特征分区和评述[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(10): 2917-2925.
HUANG W H, SUI Y, YANG X G, DAI S W, LI M S. Characteristics and adaptation of seasonal drought in southern China under the background of climate change. V. Seasonal drought characteristics division and assessment in Southern China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(10): 2917-2925. (in Chinese)
- [21] 黄晚华, 隋月, 杨晓光, 代姝玮, 李茂松. 气候变化背景下中国南方地区季节性干旱特征与适应. III. 基于降水量距平百分率的南方地区季节性干旱时空特征[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(2): 397-406.
HUANG W H, SUI Y, YANG X G, DAI S W, LI M S. Characteristics and adaptation of seasonal drought in Southern China under the background of climate change. III. Spatiotemporal characteristics of seasonal drought in Southern China based on the percentage of precipitation anomalies[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(2): 397-406.
- [22] VERA P, MARTIN M, JOSEF S. Drought evolution at various time scales in the lowland regions and their impact on vegetable crops in the Czech Republic[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 156: 121-133.
- [23] TIAN L, YUAN S, QUIRING S M. Evaluation of six indices for monitoring agricultural drought in the South-Central United States[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 249: 107-119.
- [24] 周海香, 胡梦军, 刘文兆, 宁婷婷. 董志塬区气象干旱特征及其对作物产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(2): 199-204, 209.
ZHOU H X, HU M J, LIU W Z, NING T T. Characteristics of meteorological drought and its impacts on crop yield in the Dongzhi Loess Tableland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(2): 199-204, 209. (in Chinese)
- [25] 韩芳玉, 张俊彪, 程琳琳, 童庆蒙, 刘勇. 气候变化对中国水稻产量及其区域差异性的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(3): 283-289.
HAN F Y, ZHANG J B, CHENG L L, TONG Q M, LIU Y. Impact of climate change on rice yield and its regional heterogeneity in China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(3): 283-289. (in Chinese)
- [26] 傅友强, 钟旭华, 邓铭光, 梁开明, 肖捷, 潘俊峰, 胡香玉, 黄胜, 黄农荣. 湛江市水稻产业发展现状及对策分析[J]. *中国稻米*, 2020, 26(3): 106-110.
FU Y Q, ZHONG X H, DENG M G, LIANG K M, XIAO J, PAN J F, HU X Y, HUANG S, HUANG N R. Situation and countermeasures of rice industry in Zhanjiang city[J]. *China Rice*, 2020, 26(3): 106-110. (in Chinese)
- [27] 尹朝静. 气候变化对中国水稻生产的影响研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
YIN C J. Study on the climate change impact on Chinese rice production[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [28] VICENTE DE P R D S, BERNARDO B D S, WALKER G A, CÍCERA J R B, INAJÁ FRANCISCO D S, JOSÉ D N. Crop coefficient, water requirements, yield and water use efficiency of sugarcane growth in Brazil[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 128: 102-109.
- [29] FÁBIO R M, GEOFF I B, THERES G F S, MURILO S V, DANIEL S P N, KASSIO S C. Sugarcane evapotranspiration and irrigation requirements in tropical climates[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2020, 140: 1349-1357.
- [30] 谭宏伟, 周柳强, 谭俊杰, 杨尚东. 甘蔗节水灌溉及高效施肥关键技术参数研究[J]. *南方农业学报*, 2016, 47(5): 638-643.
TAN H W, ZHOU L Q, TAN J J, YANG S D. Key technical parameters of water-saving irrigation and high-efficiency fertilization for sugarcane[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2016, 47(5): 638-643. (in Chinese)
- [31] 苗昊翠, 李强, 侯献飞, 贾东海, 石必显, 丁红, 李利民, 张智猛. 不同生育期干旱对花生生长发育及产量的影响[J]. *新疆农业科学*, 2021, 58(3): 441-449.
MIAO H C, LI Q, HOU X F, JIA D H, SHI B X, DING H, LI L M, ZHANG Z M. Effects of drought at different growth stages on growth and yield of peanut[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2021, 58(3): 441-449. (in Chinese)