

海南省南繁水稻制种水分供求情况分析

邹海平^{1,2}, 陈小敏^{1,2}, 张明洁^{1,2}, 吕 润^{1,2}, 林绍伍^{1,2}, 李伟光^{1,2}, 白 蕤^{1,2},
陈彦希^{2,3}

1. 海南省气候中心, 海南海口 570203; 2. 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海南海口 570203; 3. 海南省气象探测中心, 海南海口 570203

摘 要: 基于海南省南繁水稻制种大市(县)东方市和乐东县水稻生育期资料和 1971—2020 年气象数据, 采用 Penman-Monteith 公式、作物系数法和美国农业部土壤保持局推荐的方法, 得出两市(县)南繁水稻制种大田期及其前、中和后期 3 个生育阶段的需水量(ET_c)、有效降水量(P_e)和缺水量(D_w), 进而分析两市(县)南繁水稻制种水分供求变化特征。采用多元回归方法对影响南繁水稻制种 ET_c 和 D_w 的主要气象因子进行定量研究。结果表明: 东方市和乐东县南繁水稻制种大田期 ET_c 50 a 均值分别为 400.2、322.3 mm, P_e 均值分别为 45.7、84.3 mm, D_w 均值分别为 354.5、238.0 mm。两市(县)南繁水稻制种大田期 ET_c 和 D_w 均主要分布在中、前期, 占大田期 ET_c 和 D_w 的比例之和为 72.4%~85.2%。两市(县)南繁水稻制种大田期 P_e 均主要分布在后、中期, 占大田期 P_e 的比例之和分别为 78.2%和 85.6%。近 50 a 东方市南繁水稻制种大田期及其各生育阶段 ET_c 和 D_w 均呈增加趋势(其中大田期增加显著), P_e 均呈减少趋势。乐东县南繁水稻制种 ET_c 、 P_e 和 D_w 随时间变化趋势与东方市大致相反。近 50 a 东方市南繁水稻制种的缺水形势显著加重, 而乐东县南繁水稻制种的缺水形势有所缓解但仍严峻, 需积极采取有效措施减轻气候变化给两市(县)南繁水稻制种产业带来的影响。近 50 a 高温不显著升高且低温极显著升高或高温不显著升高且日照时数不显著增加是引起东方市南繁水稻制种大多数生育阶段 ET_c 和 D_w 增加的主要原因; 而日照时数不显著减少且平均风速极显著降低或日照时数不显著减少且降水量不显著增加是引起乐东县南繁水稻制种大多数生育阶段 ET_c 和 D_w 减少的主要原因。本研究结果为气候变化背景下海南省南繁水稻制种合理用水、制定科学灌溉方案提供有力支撑。

关键词: 南繁水稻制种; 需水量; 有效降水量; 缺水量; 多元回归; 海南

中图分类号: P49; S511 文献标志码: A

Analysis of Water Supply and Demand of Rice Seed Reproduction in Hainan, China

ZOU Haiping^{1,2}, CHEN Xiaomin^{1,2}, ZHANG Mingjie^{1,2}, LYU Run^{1,2}, LIN Shaowu^{1,2}, LI Weiguang^{1,2},
BAI Rui^{1,2}, CHEN Yanxi^{2,3}

1. Hainan Provincial Climate Center, Haikou, Hainan 570203, China; 2. Hainan Provincial Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Haikou, Hainan 570203, China; 3. Hainan Meteorological Exploration Center, Haikou, Hainan 570203, China

Abstract: Based on the data of rice growth period in Dongfang and Ledong, main producers for rice seed reproduction in Hainan, and the meteorological data from 1971 to 2020, the Penman-Monteith formula and crop coefficient method and the method recommended by the Soil Conservation Service of the United States Department of Agriculture were used to obtain the water requirement (ET_c), effective precipitation (P_e) and water deficit (D_w) of rice seed reproduction in field period and early, middle and late stage of field period. The change characteristics of water supply and demand of rice seed reproduction in the two regions were then analyzed. The 50-year average value of ET_c in field period of rice seed reproduction in Dongfang and Ledong was 400.2 mm and 322.3 mm, respectively, the mean value of P_e was

收稿日期 2024-10-21; 接受日期 2024-11-19

基金项目 海南省气象局业务提升项目(No. HNQXJS202303); 海南省自然科学基金项目(No. 422MS149)。

作者简介 邹海平(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 农业气象; E-mail: google2456@163.com。

45.7 mm and 84.3 mm, respectively, and the mean value of D_w was 354.5 mm and 238.0 mm, respectively. The ET_c and D_w in field period of rice seed reproduction were mainly distributed in the middle and early stages, accounting for 72.4% to 85.2% of ET_c and D_w during the field period. The P_e in field period of rice seed reproduction was mainly distributed in the late and middle stages, accounting for 78.2% and 85.6% of P_e during the field period, respectively. In the past 50 years, the ET_c and D_w of rice seed reproduction in field period and all growth stages of field period in Dongfang showed an increasing trend (the increase in field period was significant), while the P_e showed a decreasing trend. The variation trend of ET_c , P_e and D_w of rice seed reproduction with time in Ledong was roughly opposite to that in Dongfang. In the past 50 years, the water shortage situation of rice seed reproduction in Dongfang was significantly worsening, while the water shortage situation in Ledong was easing to some extent but remained severe. Effective measures should be taken to mitigate the impact of climate change on the rice seed reproduction. In the past 50 years, the main reasons for the increase of ET_c and D_w during most growth stages of rice seed reproduction in Dongfang were the insignificant increase in high temperature and extremely significant increase in low temperature, or the insignificant increase in high temperature and sunshine hours. The main reasons for the decrease of ET_c and D_w during most growth stages of rice seed reproduction in Ledong were the insignificant decrease in sunshine hours, extremely significant decrease in average wind speed, or insignificant decrease in sunshine hours and insignificant increase in precipitation. The results of this study provide strong support for rational water use and scientific irrigation scheme for rice seed reproduction in Hainan province under the background of climate change.

Keywords: rice seed reproduction; water requirement; effective precipitation; water deficit; multiple regression; Hainan

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.04.024

海南省是我国重要的杂交水稻南繁制种基地, 年制种面积达到 13 333.33 hm^2 左右, 生产的水稻种子可供 200 万~267 万 hm^2 大田种植。水资源作为限制农业发展的重要因素之一, 是农业生产中最重要的资源支撑和保证, 与农业生产和粮食安全息息相关^[1]。海南省南繁水稻制种主要是春季制种, 生育期集中在冬、春季^[2]。而冬、春季为海南省非汛期, 其降水量仅占年降水量的 23.4%, 加之南繁水稻制种主要分布在海南省年降水量最少和次少的西部、南部^[3-4], 导致南繁水稻制种水分供需矛盾突出, 尤其是移栽期和授粉期, 几乎每年均有部分制种区域前期因缺水导致不能移栽, 授粉期缺水导致严重减产甚至绝收。如 2016 年因干旱时间过长、水库缺水、地下水位降低, 乐东县佛罗镇青山村有 33.3 hm^2 制种田绝收^[5]。因此, 研究如何提高海南省南繁水稻制种灌溉用水利用率, 对保障南繁水稻制种科学高效生产意义重大。科学确定作物需水量、有效降水量和缺水量, 分析作物水分供求情况是进行水资源优化管理、合理制定作物灌溉方案的重要依据。全球气候变暖以及随之改变的降水时空格局将会直接影响作物生长发育和耗水过程, 进而影响作物需水量和缺水量^[6]。因此很有必要对南繁水稻制种水分供求变化特征及气候归因进行分析。

国内外很多学者分析了不同作物需水量、缺水量和与其密切相关的参考作物蒸散量的变化特

征及归因^[7-19]。在研究方法上, 主要利用联合国粮食及农业组织 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) 推荐的 Penman-Monteith 公式和作物系数法计算需水量, 该方法考虑了影响蒸散的大气物理特性和植物生理机制, 具有很好的物理基础^[20]; 缺水量为需水量与同时期有效降水量之差^[21], 有效降水量的计算主要采用美国农业部土壤保持局 (SCS) 推荐的方法, 该方法是目前众多的有效降水量计算方法中得到公认和普遍推广的方法之一, 其有效性已在许多学者的研究中予以证明^[22]; 作物水分供求变化归因分析主要采用多元回归方法, 该方法能够定量不同气象要素对作物水分供求变化的影响^[17]。目前尚无专门针对海南省南繁水稻制种水分供求变化特征及气候归因的研究报道。海南省南繁水稻制种面积最大的市 (县) 为东方市, 约 6000 hm^2 , 其次为乐东县, 这两个市 (县) 的南繁水稻制种面积占全省的比例高达八成左右^[4]。因此, 本研究基于东方市和乐东县南繁水稻制种生育期资料和气象数据, 采用 Penman-Monteith 公式和作物系数法计算南繁水稻制种需水量, 同时结合有效降水量获得南繁水稻制种缺水量, 分析两市 (县) 南繁水稻制种水分供求变化特征, 并对其主要影响因素进行探讨, 为气候变化背景下海南省南繁水稻制种合理用水、制定科学灌溉方案提供有力支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

气象资料来自海南省气象信息中心,包括东方市和乐东县 1971—2020 年逐日的均温、高温、低温、日照时数、平均风速、水汽压、气压及经纬度和海拔高度。生育期资料来自海南水稻制种产量保险调查数据,包括东方市和乐东县 2021 年春季水稻制种移栽期、孕穗期、开花期和成熟期。

1.2 方法

1.2.1 生育期确定 本文研究的是南繁水稻制种大田期(移栽至成熟)的水分供求情况,根据水稻需水规律将其划分为 3 个生育阶段,即前期(移栽至孕穗)、中期(孕穗至开花)和后期(开花至成熟),各生育期出现时间为多个品种实测平均值。其中移栽期涉及父本和母本移栽期,二者相差 2~3 d,取二者平均值作为移栽期。确定的水稻生育期见表 1。

1.2.2 需水量计算 作物需水量是指作物在适宜的土壤水分和肥力水平下,经过正常生长发育,获得高产时的植株蒸腾、株间蒸发以及构成植株体的水量之和。由于构成植株体的水量很少,可忽略不计,因此在实际计算中作物需水量为植株蒸腾量与株间蒸发量之和。南繁水稻制种需水量采用参考作物蒸散量和作物系数法进行逐日计算,该方法充分考虑了植株蒸腾量与株间蒸发量,其中参考作物蒸散量是指生长高度为 0.12 m、固定叶面阻力为 70 s/m、反射率为 0.23 的参考作物的蒸发蒸腾量,类似于面积广阔、供水充分、高度一致、生长旺盛、完全遮蔽地面的草地的蒸发蒸腾量^[20]。南繁水稻制种各生育阶段的需水量由生育阶段内逐日需水量累加得出:

$$ET_c = \sum_{i=1}^N ET_{ci} = \sum_{i=1}^N K_c \times ET_{0i}$$

式中, ET_c 为南繁水稻制种某生育阶段需水量 (mm); ET_{ci} 为日需水量 (mm/d); i 为生育阶段天数 (d); ET_{0i} 为日参考作物蒸散量 (mm/d),

采用 Penman-Monteith 公式计算^[20]; K_c 为作物系数,不同发育阶段 K_c 不同,根据 FAO 推荐的 K_c 值确定南繁水稻制种大田期前期、中期和后期的作物系数分别为 1.05、1.20、0.75。由于海南实际情况与 FAO 推荐的 K_c 值需满足的标准条件相差较远,因此根据当地土壤和气候条件参考文献[23]的方法对 K_c 值进行修正。

1.2.3 有效降水量计算 有效降水量是指总降水量中能够被作物有效利用的降水量^[16]。南繁水稻制种有效降水量采用美国农业部土壤保持局 (SCS) 推荐的方法进行逐日计算,利用该方法计算的有效降水量充分考虑了无效降水量(含径流量、蒸发量和深层渗漏量),其有效性已在许多学者的研究中予以证明^[22],南繁水稻制种各生育阶段的有效降水量由生育阶段内逐日有效降水量累加得出:

$$P_e = \sum_{i=1}^N P_{ei} = \begin{cases} \sum_{i=1}^N \frac{P_i(4.17 - 0.2P_i)}{4.17} & (P_i < 8.3) \\ \sum_{i=1}^N (4.17 + 0.1P_i) & (P_i \geq 8.3) \end{cases}$$

式中, P_e 为南繁水稻制种某生育阶段有效降水量 (mm); P_{ei} 为日有效降水量 (mm/d); P_i 为日降水量 (mm/d)。

1.2.4 缺水量计算 缺水量为作物生长过程中需依靠灌溉补充的水量,南繁水稻制种各生育阶段缺水量等于需水量减去有效降水量: $D_w = ET_c - P_e$, 式中, D_w 为南繁水稻制种某生育阶段缺水量 (mm)。 $D_w > 0$, 表示该生育阶段作物缺水; $D_w = 0$, 表示水分供需平衡; $D_w < 0$, 表示水分盈余。

1.2.5 气候倾向率 气候倾向率是指某一要素每 10 a 的变化速率,用于表征该要素随时间的变化趋势,正值表示该要素呈增加趋势,负值表示呈减少趋势。本研究用 X_k 表示样本量为 k 的南繁水稻制种 ET_c 或 P_e 或 D_w 或各气象因子,用 t_k 表示 X_k 所对应的年份(即 1971, 1972, ...2020),利用 Excel 软件建立 X_k 与 t_k 之间的一元线性回归方程,并采用 F 检验法进行显著性检验^[24],以方程

表 1 东方市和乐东县南繁水稻制种生育期
Tab. 1 Growth periods of rice seed reproduction in Dongfang and Ledong

试验地 Test site	移栽期-孕穗期 Transplanting period to booting period	孕穗期-开花期 Booting period to flowering period	开花期-成熟期 Flowering period to mature period
东方市	3 月 5 日—4 月 5 日	4 月 6 日—5 月 5 日	5 月 6 日—6 月 2 日
乐东县	2 月 27 日—3 月 31 日	4 月 1 日—4 月 30 日	5 月 1 日—5 月 28 日

回归系数 (a) 的 10 倍作为南繁水稻制种 ET_c 或 P_e 或 D_w 或各气象因子的气候倾向率: $X_k = at_k + b$ ($k=1, 2, 3, \dots, 50$)。式中, b 为回归常数。

1.2.6 多元回归分析 由于影响南繁水稻制种 ET_c 和 D_w 的气象因子较多, 因此利用 SPSS 16.0 软件多元回归方法计算各气象因子对 ET_c 和 D_w 的贡献率, 确定各气象因子对南繁水稻制种 ET_c 和 D_w 变化的影响。因各气象因子的单位、量纲和范围不尽相同, 对各个气象因子及南繁水稻制种 ET_c 和 D_w 进行标准化处理, 标准化后的数据序列按照以下公式计算贡献率^[19]:

$$Y_{ET_c/D_w} = a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + \dots + a_n X_n$$

$$W_j = \frac{|a_j|}{|a_1| + |a_2| + |a_3| + \dots + |a_n|} \quad (j=1, 2, 3, \dots, n)$$

式中, Y_{ET_c/D_w} 为南繁水稻制种 ET_c 或 D_w 的标准化值, $X_1, X_2, X_3 \dots X_n$ 为各气象因子的标准化值, $a_1, a_2, a_3 \dots a_n$ 为标准化后回归系数, W_j 为某一气象因子对南繁水稻制种 ET_c 或 D_w 的贡献率。

1.2.7 偏相关分析 在分析气象因子与南繁水稻制种 ET_c 和 D_w 的关系时, 气象因子之间相互影响, 存在一定的相关性, 可能掩盖气象因子与南繁水稻制种 ET_c 和 D_w 的真实关系。偏相关分析能在有效控制其他变量影响条件下揭示两变量之间的线性相关程度。因此利用 SPSS 16.0 软件偏相关方法计算偏相关系数分别确定南繁水稻制种 ET_c 和 D_w 与各气象因子的相关性, 并采用 t 检验法进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 南繁水稻制种水分供求的时间分布

1971—2020 年东方市和乐东县南繁水稻制种大田期各生育阶段需水量 (ET_c)、有效降水量 (P_e) 和缺水量 (D_w) 均值及占大田期的比例如图 1 所示。由图 1A 可看出, 东方市南繁水稻制种 ET_c 大田期中期 (164.7 mm) > 前期 (125.4 mm) > 后期 (110.2 mm), 大田期 ET_c 为 400.2 mm; P_e 表现为后期 (22.3 mm) > 中期 (13.7 mm) > 前期 (9.7 mm) 的规律, 大田期 P_e 为 45.7 mm; 大田期各生育阶段 D_w 分布情况与 ET_c 一致, 大田期 D_w 为 354.5 mm。乐东县大田期各生育阶段 ET_c 和 P_e 分布情况与东方市一致, 大田期 ET_c 和 P_e 分别为 322.3、84.3 mm; 大田期各生育阶段 D_w 分布情况与东方市略有差异, 表现为前期 (101.6 mm) > 中期 (99.6 mm) > 后期 (36.8 mm), 大田期 D_w 为 238.0 mm。为更直观地体现南繁水稻制种大田期 ET_c 、 P_e 和 D_w 在各生育阶段分布情况, 计算了各生育阶段各指标值占大田期的比例 (图 1B)。由图 1B 可看出, 东方市南繁水稻制种大田期中期、前期 ET_c 占大田期 ET_c 的比例之和为 72.4%, D_w 相应的占比和为 75.3%, 说明东方市南繁水稻制种大田期 ET_c 和 D_w 均主要分布在中期、前期; 同理, 大田期 P_e 主要分布在后期、中期, 二者占比和为 78.2%。乐东县大田期 ET_c 和 D_w 亦主要分布在中期、前期, 二者占比和分别为 74.9% 和 85.2%; 大田期 P_e 亦主要分布在后期、中期, 二者占比和为 85.6%。

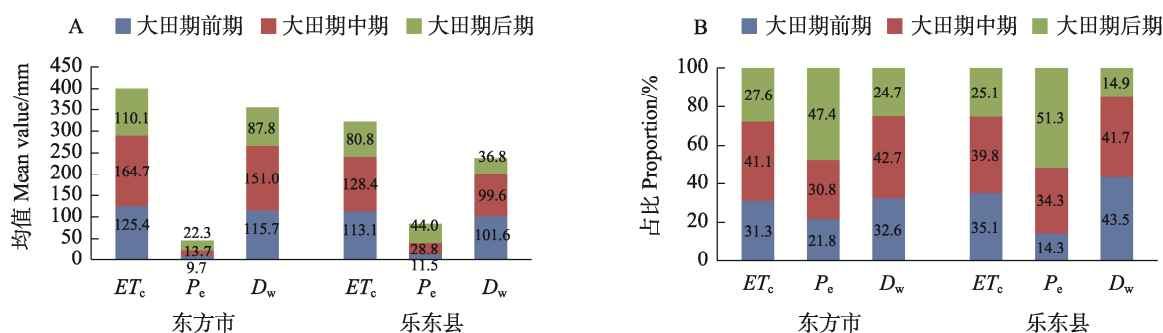


图 1 1971—2020 年南繁水稻制种大田期各生育阶段 ET_c 、 P_e 和 D_w 均值 (A) 及占大田期的比例 (B)

Fig. 1 Average values of ET_c , P_e and D_w at each growth stage of rice seed reproduction in field period (A) and their proportions in field period (B) from 1971 to 2020

1971—2020 年南繁水稻制种大田期及其各生育阶段 D_w 的正负情况如图 2 所示。由图 2 可知, 1971—2020 年东方市南繁水稻制种大田期及其所有生育阶段的 D_w 均为正值。而乐东县南繁水稻制

种除大田期后期 1986 年、1999 年、2000 年和 2019 年的 D_w 为负值外 (分别为 -2.6、-10.5、-5.0、-10.4 mm), 后期其余年份和大田期及其前期、中期每年的 D_w 均为正值, 说明 1971—2020 年东方

市南繁水稻制种大田期所有生育阶段每年均缺水，乐东县稍有差异，仅南繁水稻制种大田期后期极少数年份水分有盈余。

2.2 南繁水稻制种水分供求变化趋势

1971—2020 年南繁水稻制种水分供求变化趋势见表 2。由表 2 可知，东方市南繁水稻制种大田期前、中和后期的 ET_c 均呈不显著增加趋势，其气候倾向率分别为 2.4、1.9、1.4 mm/10 a，而三者累加致大田期 ET_c 呈显著增加趋势，气候倾向率为 5.7 mm/10 a； P_e 的变化趋势与 ET_c 相反，大田期及其前、中和后期均不显著减少； D_w 为 ET_c 与 P_e 之差，因 ET_c 呈增加趋势而 P_e 呈减少趋势，导致大田期及其前、中和后期的 D_w 均呈增加趋势，其中大田期的 D_w 显著增加，对应的气候倾向率分别为 8.6、2.5、2.7、3.4 mm/10 a。

乐东县南繁水稻制种 ET_c 、 P_e 和 D_w 随时间变化趋势与东方市相反。乐东县大田期及其前、中和后期 ET_c 均呈不显著减少趋势，其气候倾向率分别为-4.3、-1.8、-1.5、-1.0 mm/10 a；除大田期后期 P_e 呈减少趋势外（气候倾向率为-0.3 mm/10 a），大田期前、中期和大田期 P_e 均呈增加趋势；大田

期及其前、中和后期 D_w 均呈不显著减少趋势，其气候倾向率分别为-4.4、-2.1、-1.6、-0.7 mm/10 a。

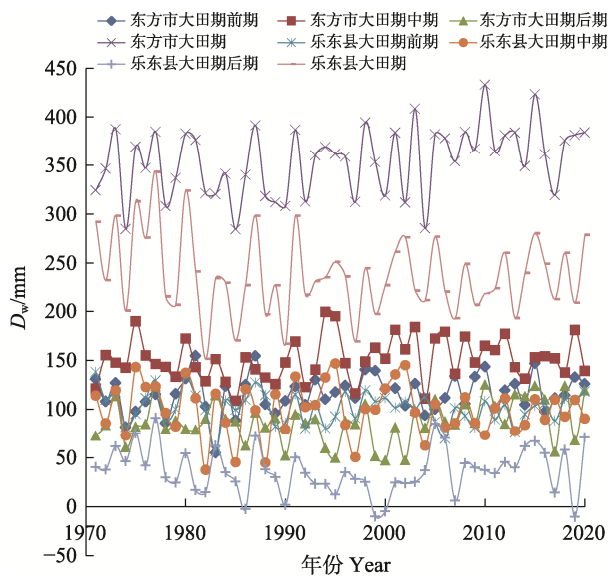


图 2 1971—2020 年南繁水稻制种大田期及其各生育阶段缺水量

Fig. 2 D_w of rice seed reproduction in field period and various growth stages of field period from 1971 to 2020

表 2 1971—2020 年南繁水稻制种 ET_c 、 P_e 和 D_w 的气候倾向率

Tab. 2		Climatic tendency rates of ET_c , P_e and D_w of rice seed reproduction from 1971 to 2020							mm/10 a
指标 Index	东方市 Dongfang city				乐东县 Ledong county				
	大田期 Field period	大田期前期 Early stage of field period	大田期中期 Middle stage of field period	大田期后期 Late stage of field period	大田期 Field period	大田期前期 Early stage of field period	大田期中期 Middle stage of field period	大田期后期 Late stage of field period	
ET_c	5.7 [*]	2.4	1.9	1.4	-4.3	-1.8	-1.5	-1.0	
P_e	-2.9	-0.1	-0.8	-2.0	0.1	0.3	0.1	-0.3	
D_w	8.6 [*]	2.5	2.7	3.4	-4.4	-2.1	-1.6	-0.7	

注：*表示变化显著（ $P<0.05$ ）。
Note: * indicates significant change ($P<0.05$).

2.3 南繁水稻制种水分供求变化的归因分析

利用多元回归方法计算各气象因子对南繁水稻制种 ET_c 和 D_w 的贡献率（表 3）。东方市和乐东县南繁水稻制种大田期及其各生育阶段的 ET_c 、 D_w 与相应阶段的气象因子（降水量、均温、高温、低温、日照时数、水汽压和平均风速）的多元回归方程的决定系数（ R^2 ）为 0.918~0.995，均大于 0.900，说明构建的方程可靠性高，采用上述 7 个气象因子解释 ET_c 和 D_w 的变化原因是科学合理的。但多元回归方法计算的贡献率均为正值，无法区分各气象因子对南繁水稻制种 ET_c 和 D_w 的正负贡献，进而无法确定影响 ET_c 和 D_w 变化的主要气象因子。为解决该问题，需结合各气象因子与

南繁水稻制种 ET_c 和 D_w 的相关性（即偏相关系数，表 3）及各气象因子的变化趋势（即气候倾向率，表 4）进行分析。

以东方市南繁水稻制种大田期前期 ET_c 为例，由表 3 可知，各气象因子中水汽压对大田期前期 ET_c 变化的贡献率最高为 25.0%，水汽压与 ET_c 的偏相关系数为-0.846 且通过极显著检验，说明水汽压与 ET_c 呈极显著负相关。而从表 4 可知，1971—2020 年东方市南繁水稻制种大田期前期水汽压呈不显著增加趋势（气候倾向率为 0.1 hPa/10 a）。水汽压增加导致 ET_c 减少，而实际 ET_c 在增加（表 2），说明东方市大田期前期水汽压对 ET_c 变化的贡献为负贡献。各气象因子中高

温对 ET_c 变化的贡献率为 23.4%, 高温与 ET_c 呈极显著正相关 (偏相关系数为 0.422), 1971—2020 年东方市南繁水稻制种大田期前期高温呈不显著升高趋势 (气候倾向率为 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)。高温升高导致 ET_c 增加, 实际 ET_c 也在增加, 说明东方市大田期前期高温对 ET_c 变化的贡献为正贡献。以

表 3 气象因子与南繁水稻制种 ET_c 和 D_w 的偏相关系数及贡献率
Tab. 3 Partial correlation coefficients and contribution rates between meteorological factors and ET_c and D_w of rice seed reproduction

试验地 Test site	指标 Index	项目 Item	降水量 Precipitation	均温 Average temperature	高温 High temperature	低温 Low temperature	日照时数 Sunshine hours	水汽压 Water vapor pressure	平均风速 Average wind speed	R^2
东方市	大田期前期 ET_c	偏相关系数	-0.093	0.123	0.422**	0.194	0.816**	-0.846**	0.839**	
		贡献率/%	0.7	12.2	23.4	11.3	15.7	25.0	11.7	0.974
	大田期中期 ET_c	偏相关系数	-0.102	-0.103	0.704**	0.668**	0.930**	-0.911**	0.917**	
		贡献率/%	0.7	4.0	22.7	19.2	20.1	18.8	14.5	0.987
	大田期后期 ET_c	偏相关系数	-0.111	0.025	0.717**	0.759**	0.933**	-0.950**	0.964**	
		贡献率/%	0.7	0.8	17.5	22.5	18.8	19.3	20.4	0.992
	大田期 ET_c	偏相关系数	0.276	-0.171	0.657**	0.589**	0.842**	-0.868**	0.872**	
		贡献率/%	2.2	8.7	24.0	21.7	11.7	19.0	12.7	0.963
	大田期前期 D_w	偏相关系数	-0.784**	0.100	0.227	0.107	0.675**	-0.687**	0.693**	
		贡献率/%	13.0	14.4	16.9	8.9	14.7	21.5	10.5	0.947
	大田期中期 D_w	偏相关系数	-0.785**	-0.223	0.451**	0.496**	0.786**	-0.705**	0.645**	
		贡献率/%	12.3	13.7	17.9	19.0	15.6	13.2	8.3	0.945
	大田期后期 D_w	偏相关系数	-0.901**	0.128	0.200	0.293	0.651**	-0.761**	0.669**	
		贡献率/%	28.6	9.0	7.7	13.1	13.8	16.5	11.3	0.966
	大田期 D_w	偏相关系数	-0.609**	-0.185	0.426**	0.502**	0.734**	-0.722**	0.721**	
		贡献率/%	7.9	13.0	17.9	23.9	11.2	15.7	10.3	0.918
乐东县	大田期前期 ET_c	偏相关系数	-0.189	0.155	0.238	0.088	0.942**	-0.604**	0.889**	
		贡献率/%	1.8	12.1	10.9	4.0	38.5	12.3	20.5	0.975
	大田期中期 ET_c	偏相关系数	0.005	0.150	0.614**	0.202	0.989**	-0.753**	0.960**	
		贡献率/%	0.1	5.1	13.0	4.2	51.2	7.9	18.6	0.995
	大田期后期 ET_c	偏相关系数	0.002	0.274	0.598**	0.144	0.973**	-0.583**	0.962**	
		贡献率/%	0.0	7.6	14.4	2.4	43.3	6.3	25.9	0.990
	大田期 ET_c	偏相关系数	-0.052	0.073	0.297**	0.244	0.958**	-0.397**	0.893**	
		贡献率/%	0.7	4.3	9.9	10.2	44.9	5.9	24.0	0.971
	大田期前期 D_w	偏相关系数	-0.812**	0.122	0.163	-0.067	0.731**	-0.383**	0.647**	
		贡献率/%	20.1	15.0	11.6	4.8	23.5	10.8	14.3	0.927
	大田期中期 D_w	偏相关系数	-0.858**	0.325*	-0.125	-0.285	0.821**	-0.150	0.576**	
		贡献率/%	24.2	24.4	4.5	12.7	23.7	2.3	8.2	0.955
	大田期后期 D_w	偏相关系数	-0.895**	0.459**	-0.126	-0.339*	0.441**	-0.069	0.383**	
		贡献率/%	36.6	28.4	5.1	12.2	10.3	1.2	6.2	0.944
	大田期 D_w	偏相关系数	-0.851**	0.358*	0.005	-0.298*	0.826**	-0.139	0.688**	
		贡献率/%	24.3	24.9	0.2	14.0	21.7	2.1	12.7	0.950

注: *表示变化显著 ($P<0.05$); **表示变化极显著 ($P<0.01$)。
Note: * indicates significant change ($P<0.05$); ** indicates extremely significant change ($P<0.01$).

此类推, 可确定东方市和乐东县南繁水稻制种大田期及其各生育阶段各气象因子对其 ET_c 和 D_w 变化贡献的正负情况, 同一类别贡献按照贡献率大小由高至低排序, 结果见表 5。

表 4 1971—2020 年南繁水稻制种各生育阶段气象因子的气候倾向率
Tab. 4 Climatic tendency rates of meteorological factors in different growth periods of rice seed reproduction from 1971 to 2020

试验地 Test site	生育阶段 Growth period	降水量 Precipitation /[mm·(10 a) ⁻¹]	均温 Average temperature /[℃·(10 a) ⁻¹]	高温 High temperature /[℃·(10 a) ⁻¹]	低温 Low temperature /[℃·(10 a) ⁻¹]	日照时数 Sunshine hours /[h·(10 a) ⁻¹]	水汽压 Water vapor pressure /[hPa·(10 a) ⁻¹]	平均风速 Average wind speed /[m·s ⁻¹ ·(10 a) ⁻¹]
东方市	大田期前期	1.5	0.3*	0.2	0.4**	2.3	0.1	-0.1
	大田期中期	-0.4	0.2	0.1	0.3**	1.5	-0.1	-0.1
	大田期后期	-8.8	0.3**	0.1	0.3**	0.4	-0.1	-0.2**
	大田期	-7.7	0.3**	0.1	0.3**	4.2	0.1	-0.1*
乐东县	大田期前期	2.4	0.1	0.2	0.1	-3.3	0.1	-0.1**
	大田期中期	-1.3	0.1	0.2	0.1	-1.8	0.1	-0.1**
	大田期后期	2.2	0.1*	0.3**	0.1	-2.8	0.1	-0.2**
	大田期	3.3	0.1	0.2**	0.1	-7.9	0.1	-0.1**

注：*表示变化显著（ $P<0.05$ ）；**表示变化极显著（ $P<0.01$ ）。
Note: * indicates significant change ($P<0.05$); ** indicates extremely significant change ($P<0.01$).

表 5 1971—2020 年影响南繁水稻制种 ET_c 和 D_w 的主要气象因子
Tab. 5 Main meteorological factors affecting ET_c and D_w of rice seed reproduction from 1971 to 2020

试验地 Test site	指标 Index	正贡献率前二的气象因子占比			
		正贡献气象因子 Meteorological factors with positive contribution	负贡献气象因子 Meteorological factors with negative contribution	因子占比 Proportion of meteorological factors with the top two positive contribution rate/%	主要气象因子 Main meteorological factors
东方市	大田期前期 ET_c	高温、日照时数、均温、低温	水汽压、平均风速、降水量	62.4	高温、日照时数
	大田期中期 ET_c	高温、日照时数、低温、水汽压、降水量	平均风速、均温	52.5	高温、日照时数
	大田期后期 ET_c	低温、水汽压、日照时数、高温、均温、降水量	平均风速	52.5	低温、水汽压
	大田期 ET_c	高温、低温、日照时数	水汽压、平均风速、均温、降水量	79.7	高温、低温
	大田期前期 D_w	高温、日照时数、均温、低温	水汽压、降水量、平均风速	57.6	高温、日照时数
	大田期中期 D_w	低温、高温、日照时数、水汽压、降水量	均温、平均风速	47.4	低温、高温
	大田期后期 D_w	降水量、水汽压、日照时数、低温、均温、高温	平均风速	50.8	降水量、水汽压
	大田期 D_w	低温、高温、日照时数、降水量	水汽压、均温、平均风速	68.6	低温、高温
乐东县	大田期前期 ET_c	日照时数、平均风速、水汽压、降水量	均温、高温、低温	80.7	日照时数、平均风速
	大田期中期 ET_c	日照时数、平均风速、水汽压、降水量	高温、均温、低温	89.7	日照时数、平均风速
	大田期后期 ET_c	日照时数、平均风速、水汽压	高温、均温、低温	91.6	日照时数、平均风速
	大田期 ET_c	日照时数、平均风速、水汽压、降水量	低温、高温、均温	91.2	日照时数、平均风速
	大田期前期 D_w	日照时数、降水量、平均风速、低温	均温、高温	69.6	日照时数、降水量
	大田期中期 D_w	日照时数、低温、平均风速、高温、水汽压	均温、降水量	71.0	日照时数、低温
	大田期后期 D_w	降水量、低温、日照时数、平均风速、高温、水汽压	均温	68.2	降水量、低温
	大田期 D_w	降水量、日照时数、低温、平均风速、水汽压	均温、高温	61.5	降水量、日照时数

通过计算发现,正贡献率排在前 2 位的气象因子贡献率之和占有所有正贡献率之和的 47.7%~91.6%,普遍高于 50.0% (表 5),说明这 2 个气象因子可以解释南繁水稻制种 ET_c 和 D_w 变化的大部分原因,因此定义为主要因子。由此可知,引起东方市南繁水稻制种大田期及其前、中期 ET_c 和 D_w 增加的主要因子为高温和低温或高温和日照时数。从表 4 可知,上述生育阶段的高温均不显著升高,而低温均极显著升高,日照时数均不显著增加,说明高温不显著升高且低温极显著升高或高温不显著升高且日照时数不显著增加是引起上述生育阶段 ET_c 和 D_w 增加的主要原因;大田期后期的主要因子为低温和水汽压或降水量和水汽压,该生育阶段低温极显著升高,降水量不显著减少,水汽压不显著降低,说明低温极显著升高且水汽压不显著降低或降水量不显著减少且水汽压不显著降低是导致大田期后期 ET_c 和 D_w 增加的主要原因。而乐东县的情形有所差异,引起乐东县南繁水稻制种大田期及其各生育阶段 ET_c 减少的主要因子均为日照时数和平均风速,而上述阶段的日照时数均不显著减少,平均风速均极显著降低,说明日照时数不显著减少且平均风速极显著降低是导致大田期及其各生育阶段 ET_c 减少的主要原因;大田期及其前、中期 D_w 减少的主要因子为日照时数和降水量或日照时数和低温,上述生育阶段的日照时数均不显著减少,而降水量不显著增加,低温均不显著升高,说明日照时数不显著减少且降水量不显著增加或日照时数不显著减少且低温不显著升高是引起上述生育阶段 D_w 减少的主要原因。大田期后期 D_w 减少的主要因子为降水量和低温,该生育阶段降水量不显著增加,低温不显著升高,说明降水量不显著增加和低温不显著升高是引起大田期后期 D_w 减少的主要原因。

3 结论与讨论

研究表明,1971—2020 年东方市和乐东县南繁水稻制种大田期 ET_c 均值分别为 400.2、322.3 mm,大田期各生育阶段 ET_c 中期>前期>后期,符合水稻生育过程中 ET_c 先由小到大,再由大到小的变化规律^[25]。两市(县)大田期 ET_c 均主要分布在中、前期,占大田期 ET_c 的比例之和分别为 72.4%和 74.9%;东方市和乐东县大田期 P_e 均值分别为 45.7、84.3 mm,大田期各生育阶

段 P_e 后期>中期>前期。这是因为两市(县)南繁水稻制种大田期前、中、后期对应的月份均大致分别为 3、4、5 月,3—5 月降水量逐月明显增加^[3],进而导致 P_e 亦逐月增加。东方市和乐东县大田期 P_e 均主要分布在后、中期,占大田期的比例之和分别为 78.2%和 85.6%;大田期 ET_c 主要分布在中、前期,而中、前期 P_e 相对较少,占大田期 P_e 的比例之和分别为 52.6%和 48.6%,导致南繁水稻制种中、前期缺水严重,两市(县)南繁水稻制种大田期中、前期 D_w 占大田期 D_w 的比例之和分别为 75.3%和 85.2%。实际生产中,乐东县南繁水稻制种缺水阶段主要为移栽期—授粉期^[5],本研究结果与实际情况相符。1971—2020 年东方市南繁水稻制种大田期所有生育阶段每年均缺水,而乐东县稍有差异,南繁水稻制种大田期后期有极少数年份水分有盈余。因此,需加强这两市(县)南繁水稻制种大田期各生育阶段尤其是中、前期的节水灌溉管理。

1971—2020 年东方市南繁水稻制种大田期各生育阶段 ET_c 均不显著增加,大田期 ET_c 显著增加,气候倾向率为 5.7 mm/10 a;大田期及其各生育阶段 P_e 均不显著减少;大田期各生育阶段 D_w 均不显著增加,大田期 D_w 显著增加,气候倾向率为 8.6 mm/10 a。乐东县南繁水稻制种大田期及其各生育阶段 ET_c 均不显著减少; P_e 除大田期后期不显著减少外,大田期及其前、中期均不显著增加;大田期及其各生育阶段 D_w 均不显著减少。东方市南繁水稻制种大田期各生育阶段 D_w 在增加,且大田期增加显著,表明近 50 a 东方市南繁水稻制种的缺水形势日益严峻。乐东县南繁水稻制种大田期及其各生育阶段 D_w 均不显著减少,说明乐东县南繁水稻制种缺水形势有所缓解但仍较为严峻。因此,需采取有效措施,如加强农业灌溉设施建设、选用抗旱品种等,以应对气候变化给两市(县)南繁水稻制种产业带来的影响。

归因分析表明,高温不显著升高且低温极显著升高或高温不显著升高且日照时数不显著增加是引起东方市南繁水稻制种大田期及其前、中期 ET_c 和 D_w 增加的主要原因;低温极显著升高且水汽压不显著降低或降水量不显著减少且水汽压不显著降低是导致东方市大田期后期 ET_c 和 D_w 增加的主要原因。日照时数不显著减少且平均风速极显著降低是导致乐东县南繁水稻制种大田期及其各生育阶段 ET_c 减少的主要原因;日照时数不显

著减少且降水量不显著增加或日照时数不显著减少且低温不显著升高是引起乐东县南繁水稻制种大田期及其前、中期 D_w 减少的主要原因, 降水量不显著增加且低温不显著升高是引起乐东县大田后期 D_w 减少的主要原因。总体而言, 高温不显著升高且低温极显著升高或高温不显著升高且日照时数不显著增加是引起东方市南繁水稻制种大多数生育阶段 ET_c 和 D_w 增加的主要原因; 而日照时数不显著减少且平均风速极显著降低或日照时数不显著减少且降水量不显著增加是引起乐东县南繁水稻制种大多数生育阶段 ET_c 和 D_w 减少的主要原因。南繁水稻制种 ET_c 和 D_w 均是在参考作物蒸散量 (ET_0) 的基础上通过计算而得到, 且与 ET_0 呈正相关, 陈小敏等^[26]采用敏感系数与气象因子相对变化率相结合的方法, 研究得出东方市春季 (3—5 月) ET_0 增加的主要原因是最低温和最高温升高, 而乐东县春季 ET_0 减少的主要原因是日照时数减少和平均风速降低。本研究结果与其大致相符, 说明采用多元回归方法确定南繁水稻制种 ET_c 和 D_w 变化归因切实可行。本研究结果为气候变化背景下海南省南繁水稻制种合理用水、制定科学灌溉方案提供有力支撑。

参考文献

- [1] 段爱旺, 张寄阳. 中国灌溉农田粮食作物水分利用效率的研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 41-44.
DUAN A W, ZHANG J Y. Water use efficiency of grain crops in irrigated farmland in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(4): 41-44. (in Chinese)
- [2] 吕青, 苏保忠, 王靖, 梅子思. 海南(南繁)水稻制种天气指数保险可行性研究[J]. 现代农业研究, 2018(1): 5-9, 16.
LYU Q, SU B Z, WANG J, MEI Z S. A feasibility study on the weather index insurance of rice in Hainan[J]. Modern Agriculture Research, 2018(1): 5-9, 16. (in Chinese)
- [3] 王春乙. 海南气候[M]. 北京: 气象出版社, 2014: 18-21.
WANG C Y. Hainan climate[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2014: 18-21. (in Chinese)
- [4] 吕青, 柯用春, 何志军, 王仕明, 唐萍, 陈冠铭. 南繁制种水稻基地现状以及问题分析[J]. 农村经济与科技, 2017, 28(20): 24-25.
LYU Q, KE Y C, HE Z J, WANG S M, TANG P, CHEN G M. Analysis of current situation and problems of seed southern-production rice bases[J]. Rural Economy and Science, 2017, 28(20): 24-25. (in Chinese)
- [5] 张维亮, 陈同明, 肖层林. 两系杂交水稻新组合隆两优华占在海南高产高质制种技术[J]. 杂交水稻, 2019, 34(1): 33-34, 48.
ZHANG W L, CHEN T M, XIAO C L. High-yielding and high-quality seed production techniques for new two-line hybrid rice combination Longliangyou Huazhan in Hainan[J]. Hybrid Rice, 2019, 34(1): 33-34, 48. (in Chinese)
- [6] 张华, 王浩. 1967—2017 年甘肃省小麦需水量和缺水量时空特征[J]. 干旱区地理, 2019, 42(5): 1094-1104.
ZHANG H, WANG H. Spatial and temporal characteristics of water requirement and water deficit of wheat in Gansu province from 1967 to 2017[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(5): 1094-1104. (in Chinese)
- [7] 刘钰, 汪林, 倪广恒, 丛振涛. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 6-12.
LIU Y, WANG L, NI G H, CONG Z T. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(12): 6-12. (in Chinese)
- [8] 任修琳, 李宏亮, 张玉虎, 蒲晓, 张立林. 2000—2015 年三江平原主要作物需水量特征及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 854-866.
REN X L, LI H L, ZHANG Y H, PU X, ZHANG L L. Water requirement characteristics and influencing factors of main crops in the Sanjiang plain from 2000 to 2015[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 854-866. (in Chinese)
- [9] 张凤怡, 迟道才, 陈涛涛. 辽宁主要粮食作物生长季需水与降水耦合度分析[J]. 中国农业气象, 2021, 42(9): 746-760.
ZHANG F Y, CHI D C, CHEN T T. Assessment of coupling degree between water requirement of main cereal crops and precipitation in growing season in Liaoning province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2021, 42(9): 746-760. (in Chinese)
- [10] KUMAR S. Reference evapotranspiration (ET_0) and irrigation water requirement of different crops in Bihar[J]. Journal of Agrometeorology, 2017, 19(3): 238-241.
- [11] 曹言, 王杰, 王树鹏, 黄英, 张雷, 李尤亮. 气候变化下滇中地区水稻需水量与灌溉需水指数时空变化研究[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(5): 226-235.
CAO Y, WANG J, WANG S P, HUANG Y, ZHANG L, LI Y L. Temporal and spatial variation analysis of water and irrigation requirement index of rice in central Yunnan province under climate change[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(5): 226-235. (in Chinese)
- [12] 邹海平, 张京红, 李伟光, 陈小敏, 白蕤, 吕润. 海南岛水稻需水量与缺水量的时空变化特征[J]. 热带生物学报, 2023, 14(5): 569-576.
ZOU H P, ZHANG J H, LI W G, CHEN X M, BAI R, LYU R. Spatial and temporal variations of water requirement and

- water deficit of rice in Hainan island[J]. *Journal of Tropical Biology*, 2023, 14(5): 569-576. (in Chinese)
- [13] 朱士江, 李凯凯, 徐文, 丁学军, 张国红, 朱瑾, 贵树彪, 张礼杰. 气候变化对三湖连江灌区水稻生育期和灌溉需水量变化的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2023, 50(2): 191-198.
- ZHU S J, LI K K, XU W, DING X J, ZHANG G H, ZHU J, GUI S B, ZHANG L J. Effects of climate change on rice growth period and variation of irrigation water requirement in Sanhu Lianjiang irrigation district[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2023, 50(2): 191-198. (in Chinese)
- [14] 武梦晗, 王弋. 新疆莎车灌区农作物需水量和产量特征及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2023, 42(8): 1858-1868.
- WU M H, WANG Y. Characteristics and influencing factors of crop water demand and yield in Shache irrigation area of Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(8): 1858-1868. (in Chinese)
- [15] 王洁, 姚怀柱, 梁森, 侯新蕊, 张脉然, 胡家珍, 杨士红. 江苏省冬小麦需水量时空变化特征及气候影响因素分析[J]. *节水灌溉*, 2024(5): 107-114.
- WANG J, YAO H Z, LIANG S, HOU X R, ZHANG M R, HU J Z, YANG S H. Characterization of spatial and temporal variations in water demand of winter wheat in Jiangsu province and analysis of climate influencing factors[J]. *Water Saving Irrigation*, 2024(5): 107-114. (in Chinese)
- [16] 姬兴杰, 成林, 朱业玉, 宋妮. 河南省冬小麦需水量和缺水量的时空格局[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(12): 3268-3277.
- JI X J, CHENG L, ZHU Y Y, SONG N. Spatial and temporal characteristics of water requirement and water deficit of winter wheat in Henan province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(12): 3268-3277. (in Chinese)
- [17] 宋进喜, 高隽清, 李晓鑫, 毛瑞晨, 史阿莹. 近 20 年来黄土高原蒸散发变化规律及其驱动因素[J]. *西北大学学报 (自然科学版)*, 2023, 53(6): 974-990.
- SONG J X, GAO J Q, LI X X, MAO R C, SHI A Y. Changes of evapotranspiration and its driving factors in the Loess Plateau in recent 20 years[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2023, 53(6): 974-990. (in Chinese)
- [18] 谭娇, 丁建丽, 董煜, 杨爱霞, 张喆. 新疆艾比湖绿洲潜在蒸散量年代际变化特征[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(5): 143-148.
- TAN J, DING J L, DONG Y, YANG A X, ZHANG Z. Decadal variation of potential evapotranspiration in Ebinur lake oasis of Xinjiang[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(5): 143-148. (in Chinese)
- [19] 刘泉杉, 吴宗俊, 崔宁博, 朱世丹, 郑顺生. 云贵高原参考作物蒸散量时空特征及成因分析[J]. *排灌机械工程学*报, 2022, 40(3): 302-310.
- LIU Q S, WU Z J, CUI N B, ZHU S D, ZHENG S S. Spatial-temporal distribution characteristics and attribution analysis of reference crop evapotranspiration in Yunnan-Kweichow Plateau[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2022, 40(3): 302-310. (in Chinese)
- [20] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, SMITH M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements - FAO irrigation and drainage paper 56[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998: 37-58.
- [21] BROUWER C, HEIBLOEM M. Irrigation water management: irrigation water needs, irrigation water management training manual No. 3[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1986: 63-68.
- [22] SMITH M. CROPWAT: a computer program for irrigation planning and management - FAO irrigation and drainage paper No. 46[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1992: 20-21.
- [23] 王明田, 曲辉辉, 杨晓光, 张晓煜, 李茂松. 基于降水保证指数的四川省种植制度优化研究[J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2012, 40(10): 82-92.
- WANG M T, QU H H, YANG X G, ZHANG X Y, LI M S. Optimized cropping systems based on ensure index of precipitation in Sichuan province[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2012, 40(10): 82-92. (in Chinese)
- [24] 邹海平, 张京红, 陈小敏, 刘少军, 李伟光. 海南岛农业气候资源的时空变化特征[J]. *中国农业气象*, 2015, 36(4): 417-427.
- ZOU H P, ZHANG J H, CHEN X M, LIU S J, LI W G. Spatiotemporal change characteristics of agricultural climate resources in Hainan island[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015, 36(4): 417-427. (in Chinese)
- [25] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 康绍忠, 罗怀彬, 张大中. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995: 115.
- CHEN Y M, GUO G S, WANG G X, KANG S Z, LUO H B, ZHANG D Z. Main crop water requirement and irrigation of China[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1995: 115. (in Chinese)
- [26] 陈小敏, 邹海平, 张京红, 刘少军, 蔡大鑫. 海南农业气候资源与主要作物区划[M]. 北京: 气象出版社, 2020: 13-24.
- CHEN X M, ZOU H P, ZHANG J H, LIU S J, CAI D X. Agroclimatic resources and main crop regionalization in Hainan[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2020: 13-24. (in Chinese)