

# 广东省晚稻干旱灾害评估及其特征分析\*

陈慧华<sup>1</sup>, 王春林<sup>2</sup>, 段海来<sup>1</sup>, 范绍佳<sup>3</sup>

- (1. 广东省气候中心, 广东 广州 510080;
2. 广东省生态气象中心, 广东 广州 510640;
3. 中山大学大气科学系, 广东 广州 510275)

**摘要:** 根据广东晚稻产量及生育期资料, 采用逐日气象干旱指数 DI 计算各个生育期干旱指数, 建立了晚稻干旱灾害评估模型并分析其时空特征。结果表明: ① 1981-2010 年广东省平均晚稻干旱年频率为 14 a 一遇, 减产率为 0.7%, 以轻旱为主。干旱主要发生在晚稻抽穗-乳熟期。② 晚稻干旱频率及减产率均呈北高南低分布, 旱灾高发区集中在西北部, 频率为 4~7 a 一遇, 减产率为 1% 左右。③ 近 30 a 广东省晚稻干旱灾害总体减弱但不显著, 其中东南部干旱灾害趋于增强, 其它地区均趋于减弱。④ 气候变暖后, 晚稻全生育期、抽穗-乳熟期的干旱致灾频率和减产率呈减小趋势。由此可见, 广东省晚稻干旱灾害的关键时期是抽穗-乳熟期, 重点关注区域是西北部地区。

**关键词:** 广东; 晚稻; 干旱灾害; 评估; 模型

**中图分类号:** S423 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2016) 03-0015-07

## Drought disaster evaluation model and characteristics of late rice in Guangdong

CHEN Huihua<sup>1</sup>, WANG Chunlin<sup>2</sup>, DUAN Hailai<sup>1</sup>, FAN Shaojia<sup>1</sup>

- (1. Guangdong Climate Center, Guangzhou 510080, China;
2. Guangdong Eco-Meteorological Center, Guangzhou 510640, China;
3. Department of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** Using yield and growth period data of late rice, drought index of each growth period was calculated by daily meteorological drought indicator (DI), and drought disaster evaluation model was established and temporal-spatial characteristics of the drought disaster was analyzed in this paper. Main results are: ① Average drought frequency of late rice in Guangdong during recent 30 years (1981-2010) was 6.9%; mean yield reduction rate was 0.7%. Drought disaster mainly occurred at milk to mature stage of late rice, and light drought day's accounted for the main. ② Spatial distribution of late rice drought frequency and yield reduction rate was high in the north and low in the east of Guangdong. High incidence region of drought located in northwest of Guangdong, where the drought frequency was 15%~25%, and yield reduction rate was 1%. ③ Drought disaster of late rice in Guangdong tended to decrease without statistical significance during recent 30 years, which tended to increase in the southeast while decrease at the other regions. ④ Drought frequency and reduction rate of late rice tended to decrease under climate change. Therefore, the key period of the late rice drought disaster in Guangdong is heading to milk stage,

\* 收稿日期: 2015-05-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2013CB430200, 2013CB430206); 干旱气象科学研究基金资助项目(IAM201303); 广东省气象局科研资助项目(2015B14)

作者简介: 陈慧华(1982年生), 女; 研究方向: 农业气象; E-mail: chh@grmc.gov.cn

and the attentions should be paid more on the northwest of Guangdong.

**Key words:** Guangdong; late rice; drought disaster; evaluation; model

水稻是广东省的主要粮食作物, 2014 年全省水稻产量占粮食总产量的 80%, 其中双季晚稻产量占粮食总产量的 42%。广东虽然降水丰沛, 是中国种植双季稻的中、高适宜区域<sup>[1]</sup>, 但区域性春旱、秋旱比较突出, 部分年份因严重干旱导致水稻受旱、成灾, 甚至绝收<sup>[2-4]</sup>。因此, 干旱是影响水稻生产的主要农业气象灾害之一<sup>[5-7]</sup>。随着气候变暖, 极端干旱事件频发<sup>[8]</sup>, 水稻干旱灾害评估已成为气候变化科学的一个重点。宋丽莉等<sup>[9]</sup>根据稻田水分平衡试验资料, 结合不同生育期水稻缺水敏感系数, 建立自然环境和灌溉条件下的水稻干旱损失评估模型。苏永秀等<sup>[10]</sup>基于作物水分盈亏原理构建干旱评估模型并分析广西双季稻干旱时空特征。袁淑杰等<sup>[11]</sup>以降水距平百分率、相对湿度指数作为干旱指标构建四川水稻气候干旱灾害风险模型, 评估水稻关键生育期及整个生育期的气候干旱风险。冯利平等<sup>[12]</sup>采用 ORYZA2000 作物模型分析了季节性干旱对湖南双季稻生长及产量影响, 罗伯良等<sup>[13]</sup>建立了湖南中、晚稻生产干旱灾害评价模型, 应用 GIS 软件给出了湖南水稻生产干旱灾害风险区划。姚凤梅等<sup>[14]</sup>采用 DSSAT 作物模式分析了典型气候变化情境下南方稻区水稻产量变化, 马欣等<sup>[15]</sup>结合 VIC 水文模型分析了未来气候变化对中国南方水稻主产区季节性干旱的影响, 王春林等<sup>[16-17]</sup>对华南地区水稻干旱灾害进行评估分析。

干旱指标是干旱影响评估研究中的核心问题之一。一个理想的干旱指标应该同时满足普适性、理论性、实用性、可比性、易理解性、时效性和无量纲性等多方面的描述特征。上述研究中的干旱指标一类是基于稻田水分平衡原理建立的<sup>[9-10]</sup>, 一类是基于模型方法的<sup>[12-15]</sup>, 都考虑了不同生育期干旱影响敏感性差异, 然而由于实验数据和大田的差异性、作物品种适用性以及模型复杂性等原因, 上述评估方法在投入实际业务应用时将是比较困难的。目前为止, 针对广东, 尚未开展干旱对水稻产量影响评估方面的研究。本文采用基于前期降水指数的气象干旱指标<sup>[18-19]</sup>, 构建广东省晚稻分生育期和全生育期的干旱灾害评估模型, 并基于模型结果分析晚稻干旱灾害的时空特征, 为广东晚稻生产发展提供决策依据, 对广东农业的可持续发展战略的制定有重要的指导意义。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据来源

本文资料包括气象数据、晚稻发育期数据、产量数据和灾情数据 4 类。气象数据来自广东省气象信息中心; 发育期数据来自广东省气象局农业气象观测站农气表 1, 包括播种、三叶、移栽、分蘖、拔节、孕穗、抽穗、乳熟、成熟等 9 个发育期; 产量数据为分县逐年单产数据, 来自《广东省农村统计年鉴》; 灾情数据来自《中国气象灾害大典·广东卷》和《广东省防灾减灾年鉴》。上述数据的序列为 1981-2010 年。

### 1.2 气象产量

将产量分解为趋势产量  $y_t$  和气象产量  $y_w$ 。气象产量是受气象因素影响的短时间尺度偏离时间变化的量。根据广东省晚稻单产变化特点, 采用实际产量的 5 a 滑动平均计算得到趋势产量。为减小地域差异造成的差异, 采用相对气象产量 YI (简称气象产量, 即减产率) 建立干旱评估模型。

$$YI = (y_w/y_t) \cdot 100\% \quad (1)$$

### 1.3 干旱指数

单站逐日气象干旱指数 DI 定义为:

$$DI_i = SAPI_i + \bar{M}_i \quad (2)$$

式 (2) 中,  $SAPI_i$  是第  $i$  日前期降水指数 API 的标准化变量  $SAPI$ ,  $\bar{M}_i$  为第  $i$  日常年平均相对湿度指数, 表征某地常年平均干湿程度背景。SAPI 计算方法参见《气象干旱等级》国家标准附录 C 标准化降水指数 SPI, 历史样本资料为近 30 a (1981-2010 年) 逐日 API。API 计算公式为:

$$API_i = P_i + k \cdot API_{i-1} \quad (3)$$

式 (3) 中  $API_i$  为第  $i$  日 API,  $P_i$  为当日降水量 (mm),  $API_{i-1}$  为前一日的 API,  $k$  为衰减系数, 取经验值 0.955。

$\bar{M}_i$  根据 1981-2010 年 30 a 逐日平均降水量和可能蒸散量计算:

$$\bar{M}_i = \frac{\bar{P}_i}{PE_i} - 1 \quad (4)$$

式 (4) 中  $\bar{P}_i$  为第  $i$  日 30 a (1981-2010 年) 平均降水量 (mm),  $PE_i$  为第  $i$  日 30 a 平均可能蒸散量 (mm), 采用 FAO Penman-Monteith 方法计算。为了增强  $\bar{M}_i$  年变化曲线平滑性, 对  $\bar{P}_i$ 、 $PE_i$  作 2 次

30 d 滑动平均处理。 $\bar{M}_i$  理论范围为  $-1$  至  $\infty$ ，为了避免因为  $\overline{PE}_i$  接近于 0 时候导致  $\bar{M}_i$  趋于  $\infty$ ，当  $\bar{M}_i > 0$  时采用双曲正切函数式 (5)，约束  $\bar{M}_i$  变化范围为  $[-1, 1]$  之间。

$$\bar{M}_i = \frac{\exp(2\bar{M}_i) - 1}{\exp(2\bar{M}_i) + 1}, \quad \text{当 } \bar{M}_i \geq 0 \quad (5)$$

某生育期干旱指数  $PI_i$  为第  $i$  生育期内小于 0 的逐日 DI 之和除以生育期总天数  $n$ ，即：

$$PI_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n DI_j, \quad \text{当 } DI_j < 0 \quad (6)$$

式 (6) 中  $n$  为第  $i$  生育期天数， $DI_j$  为第  $i$  生育期内逐日干旱指数 (小于或等于 0)， $i$  为生育期序号。

#### 1.4 广东省晚稻干旱产量损失评估模型

在广东省晚稻生育期间，如果出现暴雨、台风、干旱、寒露风等农业气象灾害等，都有可能造成晚稻产量下降。因此，在建立干旱产量损失评估模型时，剔除晚稻生育阶段内未发生干旱而减产明显的年份，根据分县逐年晚稻气象产量和全生育期 (播种 - 成熟期) 干旱指数，采用回归分析方法，得到广东省晚稻全生育期干旱灾害评估模型：

$$YI = 4.194PI_0 + 0.496 \quad (7)$$

式 (7) 中  $PI_0$  为晚稻全生育期 (播种 - 成熟期) 干旱指数， $YI$  为晚稻减产率 (%)。模型回归系数为正，表明全生育期干旱将导致早稻减产。

广东省晚稻生育期分为播种 - 三叶期、三叶 - 移栽期、移栽 - 分蘖期、分蘖 - 拔节期、拔节 - 孕穗期、孕穗 - 抽穗期、抽穗 - 乳熟期、乳熟 - 成熟期等 8 个阶段。为进一步分析不同生育阶段发生的干旱对晚稻产量的影响，采用 8 个生育期干旱指数和气象产量进行逐步回归分析，得到基于生育期的晚稻干旱灾害评估模型：

$$YI = 4.344PI_7 + 2.219PI_8 + 0.605 \quad (8)$$

式中， $PI_7$ 、 $PI_8$  为晚稻抽穗 - 乳熟和乳熟 - 成熟期的干旱指数，其回归系数为正，表明这两个生育期出现干旱将导致晚稻减产。其他生育期干旱发生频率很低或者对晚稻产量的影响未达统计意义的显著水平，因此并未进入模型。

按农业上划分干旱类型的标准，把减产率小于 5%、5% ~ 10%、10% ~ 20% 及大于 20% 划分为轻旱、中旱、重旱及特旱 4 个等级。如此，便可确定用干旱指数表示的不同程度的干旱指标，即晚稻全生育期及抽穗 - 乳熟期、乳熟 - 成熟期干旱指数的干旱致灾等级标准，见表 1。

表 1 广东省晚稻干旱灾害致灾等级标准

Table 1 Criteria of late rice drought for each growth period

致灾等级	特旱	重旱	中旱	轻旱
全生育期干旱指数	$PI_0 \leq -4.77$	$-4.77 < PI_0 \leq -2.38$	$-2.38 < PI_0 \leq -1.19$	$-1.19 < PI_0 \leq -0.48$
抽穗 - 乳熟干旱指数	$PI_7 \leq -4.58$	$-4.58 < PI_7 \leq -2.29$	$-2.29 < PI_7 \leq -1.14$	$-1.14 < PI_7 \leq -0.46$
乳熟 - 成熟干旱指数	$PI_8 \leq -6.04$	$-6.04 < PI_8 \leq -3.02$	$-6.04 < PI_8 \leq -1.51$	$-1.51 < PI_8 \leq -0.60$
减产率/%	>20	10 ~ 20	5 ~ 10	2 ~ 5

## 2 结果与分析

### 2.1 模型验证

根据晚稻干旱灾害评估模型，近 30 a 广东晚稻干旱灾害最重的 3 a (平均  $YI < -1.5$ ) 依次为：1986、2009、1990 年，次旱的 5 a (平均  $YI < -1.0$ ) 依次为 1989、1998、1992、2004、1991 年 (图 1a)。这与历史实际灾情有很好的对应 (表 2)，与相关的气象干旱研究结果比较一致<sup>[18-19]</sup>。

抽穗 - 乳熟期和乳熟 - 成熟期干旱灾害较重的年份和全生育期相似 (图 1b、c)，其中，抽穗 - 乳熟期 1986 年的干旱减产率明显大于其它年份。根据实际历史灾情，1986 年广东发生了严重的秋旱，8 月中至 10 月中旬平均全省降水量仅有 157.9

mm，是 1981 - 2010 年同期最少的。由此说明，本文的干旱灾害评估模型时可行的。

### 2.2 广东省晚稻干旱灾害发生频率

根据表 1 晚稻干旱致灾等级标准，统计得到 1981 - 2010 年广东省晚稻干旱灾害发生频率为 6.9% (14 a 一遇)，以轻旱为主，中旱及以上等级的干旱没有发生 (表 3)，即大概每 14 a 就会出现一次导致晚稻产量减少 2% ~ 5% 的旱灾。这说明广东晚稻受干旱的影响比较轻，因为在晚稻生长前、中期，广东处于降水充沛的后汛期 (7 - 9 月)，干旱出现几率比较小 (图略)。抽穗 - 乳熟期和乳熟 - 成熟期的干旱灾害发生频率分别为 13.5% (7 a 一遇)、12.9% (8 a 一遇) (表 3)，发生频率高于全生育期，说明影响晚稻产量的干旱

灾害主要发生在抽穗 - 成熟期。因为广东晚稻的抽穗 - 成熟期大概在 10 - 11 月, 而此时广东汛期已结束, 进入季节性少雨期, 发生干旱的几率明显增加 (图略)。根据表 3, 晚稻抽穗 - 乳熟期轻旱频

率低于乳熟 - 成熟期, 但中旱发生频率却高于乳熟 - 成熟期, 因为抽穗 - 乳熟期的干旱影响系数比较大, 同等级的干旱, 如果发生在抽穗 - 乳熟期, 致灾等级将更高, 晚稻减产将会更严重。

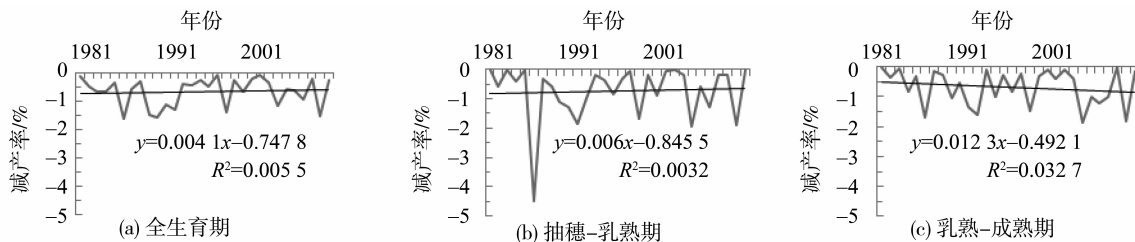


图 1 1981 - 2010 年广东逐年平均晚稻干旱减产率 (%) 及其变化趋势

Fig. 1 Annual mean drought reduction rate of late rice and its changing trend in Guangdong in 1981 - 2010

表 2 广东省实际干旱灾情

Table 2 The condition of late rice drought disaster in Guangdong

年份	实际灾情	年份	实际灾情	年份	实际灾情
1981	中等春旱	1991	重春、秋旱	2001	-
1982	轻春旱	1992	中等秋旱	2002	冬春连旱
1983	轻秋旱	1993	轻春、秋旱	2003	轻春旱、夏秋连旱
1984	中等春、秋旱	1994	中等春、秋旱	2004	重秋冬连旱
1985	中等春、秋旱	1995	轻春、秋旱	2005	中等春、秋旱
1986	严重秋旱	1996	轻春、秋旱	2006	粤西春旱
1987	中等冬春连旱	1997	轻春夏旱	2007	粤西/北春、夏秋旱
1988	较重的春、秋旱	1998	中等夏秋旱	2008	轻春旱
1989	中等春、秋旱	1999	重春旱	2009	重夏秋连旱
1990	秋旱	2000	粤北春旱、粤西秋旱	2010	无明显旱情

表 3 1981 - 2010 年广东省晚稻干旱致灾频率及平均减产率

Table 3 Drought Frequency and reduction rate of late rice in Guangdong averaged over 1981 - 2010

发育期	致灾等级频率/%				合计	减产率/%
	轻旱	中旱	重旱	特旱		
全生育期	6.9	0	0	0	6.9	0.70
抽穗 - 乳熟	10.3	3.2	0	0	13.5	0.72
乳熟 - 成熟	12.7	0.2	0	0	12.9	0.67

广东晚稻全生育期干旱灾害频率呈北高南低分布, 高值区集中在北部和西部, 干旱频率在 15% ~ 25% (4 ~ 7 a 一遇) 以上, 南部大部分地区为 5% (20 a 一遇) 以下 (图 2a)。抽穗 - 乳熟期干旱频率分布与全生育期相似, 高值区仍然集中在西北部, 但干旱频率偏高, 在 20% ~ 40% (2.5 ~ 5 a 一遇) 以上, 南部地区干旱频率 10% (10 a 一遇) 以下 (图 2b)。乳熟 - 成熟期干旱范围明显大于全生育期和抽穗 - 乳熟期, 高值区向东南扩展, 西北部、中部和东部部分地区在 20% ~ 30% (2.5 ~

3.3 a 一遇), 西南部地区干旱频率 10% (10 a 一遇) 以下 (图 2c)。

晚稻生育期间, 广东北部地区干旱灾害发生频率高于其它地区, 是由于后汛期的降水主要是由台风带来的, 台风影响区域主要集中在南部沿海地区, 因此降水也集中在这一区域, 北部降水相对较少。汛期结束后, 随着全省降水的减少, 北部的旱情比其他地区更容易发展起来。进入乳熟 - 成熟期, 东部降水较其它地方明显偏少 (图 3), 导致东部的干旱灾害频率也比较高。

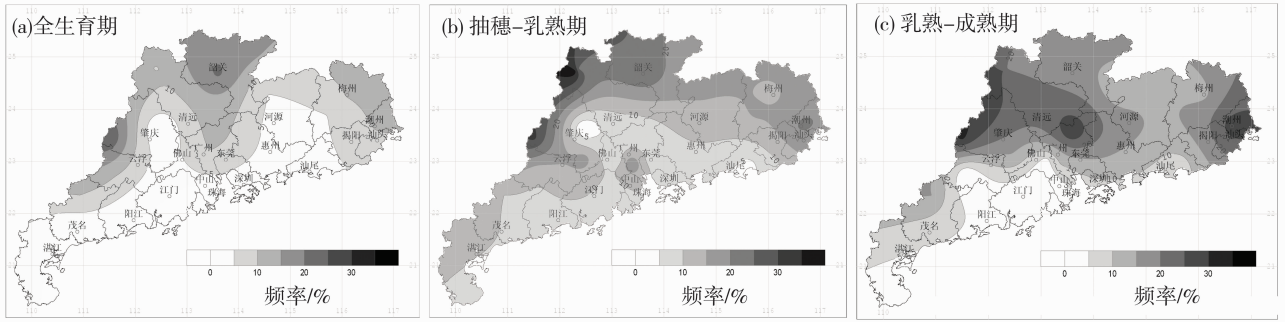


图 2 1981 – 2010 年广东晚稻平均干旱灾害频率

Fig. 2 Spatial distribution of late rice drought frequency in Guangdong averaged in 1981 – 2010

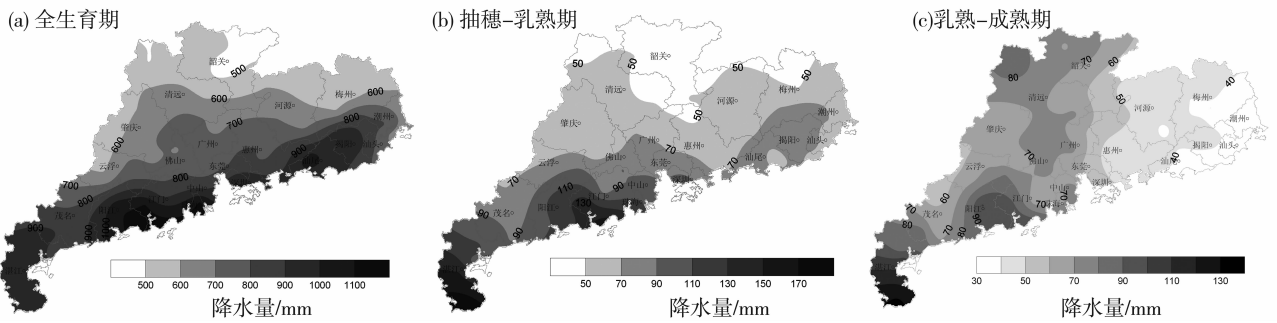


图 3 1981 – 2010 年广东晚稻平均降水量

Fig. 3 Spatial distribution of rainfall in Guangdong averaged in 1981 – 2010

### 2.3 广东省晚稻干旱减产率

1981 – 2010 年，广东省晚稻由于干旱造成的减产率平均为 0.7%，抽穗 – 乳熟期、乳熟 – 成熟期干旱造成的减产率与全生育期的相近，全省平均分别为 0.72% 和 0.67%。抽穗 – 乳熟期的干旱减产率大于乳熟 – 成熟期，是因为抽穗 – 乳熟期的干旱影响系数较大，在此阶段出现干旱将更容易导致晚稻减产。

晚稻干旱减产率空间分布与干旱频率大致相同，均呈北高南低的分布（图 4）。全生育期干旱减产率大于 1% 区域主要分布在韶关北部和清远、

肇庆的西部（图 4a）。抽穗 – 乳熟期干旱减产率分布与全生育期一致，减产率大于 1% 的区域向南扩展，且略高于全生育期（图 4b）。乳熟 – 成熟期干旱减产率大于 1% 的区域，在北部范围缩小，而东部范围扩大（图 4c）。

### 2.4 气候变暖对广东省晚稻干旱灾害的影响

晚稻干旱减产率年际变化（图 1）分析表明，近 30 a 广东晚稻全生育期和抽穗 – 乳熟期由干旱引起的减产率有略微减弱的趋势，倾向率分别为 0.04%、0.06%（10 a），而乳熟 – 成熟期干旱减产率有增加趋势，倾向率为 -0.12%（10 a），变

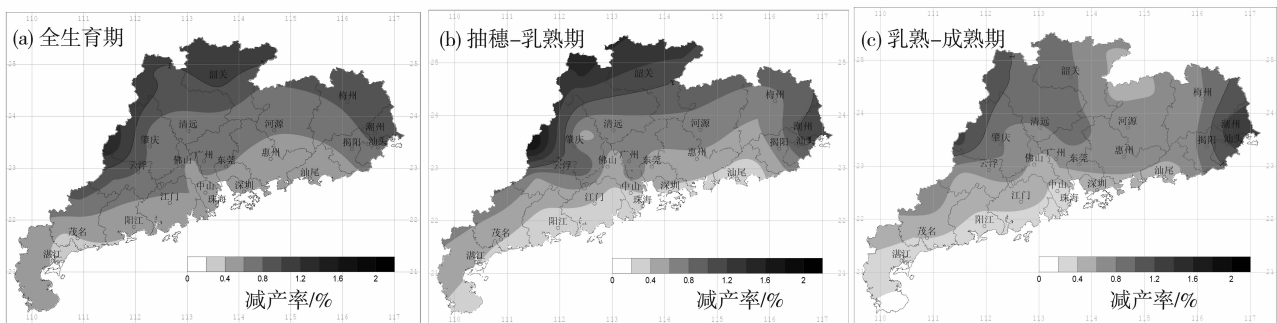


图 4 1981 – 2010 年广东晚稻平均干旱减产率

Fig. 4 Spatial distribution of late rice drought reduction rate in Guangdong averaged over 1981 – 2010

化趋势都没有达到 0.1 显著性水平。从空间分布来看 (图 5), 晚稻全生育期间东南部地区由于干旱导致晚稻减产的风险有增加趋势。在抽穗 - 乳熟

期, 干旱减产率趋于增加的区域北扩至广州北部、清远和韶关等地。在晚稻乳熟 - 成熟期, 基本上整个东部和北部地区的干旱减产率均趋于增加。

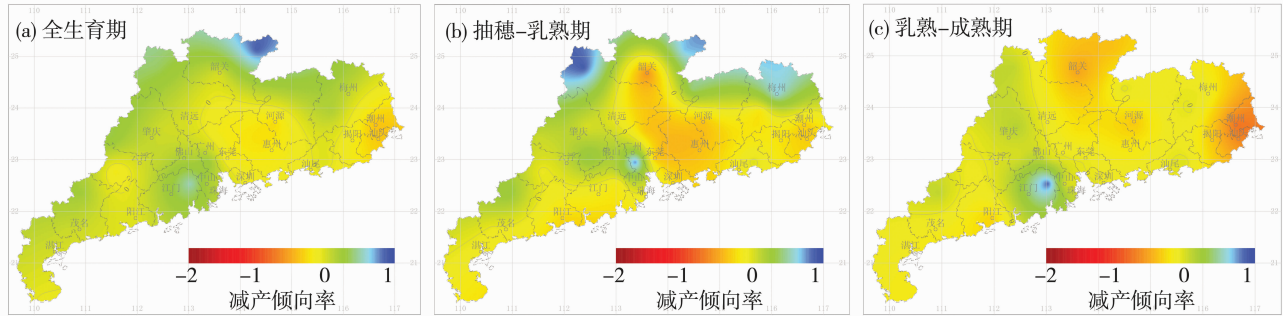


图 5 1981 - 2010 年广东省晚稻干旱减产率变化倾向 (每 10 a 变化值) 分布

Fig. 5 Spatial distribution of linear trend of drought reduction rate of late rice in Guangdong in 1981 - 2010

根据相关研究, 1997 年后广东省的气候出现了以变暖为特征的显著变化<sup>[20-21]</sup>。因此, 以 1997 年作为分界线, 分析气候变暖对广东省晚稻干旱灾害的影响。由表 4 可知, 1997 - 2010 年与 1981 -

1996 年相比, 晚稻全生育期、抽穗 - 乳熟期的干旱致灾频率和减产率呈减小趋势, 乳熟 - 成熟期的变化不大。其中, 全生育期干旱频率减幅近 50%, 减产率的减幅为 24%。

表 4 气候变暖背景下广东省晚稻干旱致灾频率及减产率的变化

Table 4 Variations of drought frequency and reduction rate of late rice in Guangdong under climate change

项目	年代	全生育期		抽穗 - 乳熟			乳熟 - 成熟		
		干旱	干旱	轻旱	中旱	干旱	轻旱	中旱	
干旱频率/%	1981 - 1996	8.6	15.1	11.6	3.4	12.7	12.7	0.0	
	1997 - 2010	4.7	11.3	8.5	2.8	13.2	12.7	0.5	
减产率/%	1981 - 1996	0.78	0.77	0.68					
	1997 - 2010	0.59	0.65	0.66					

### 3 结论

1) 本文采用基于标准化先前降水指数 SAPI、结合考虑相对湿润度指数建立的逐日气象干旱指标, 建立晚稻生育期干旱指数。通过与晚稻气象产量进行逐步回归分析, 建立晚稻全生育期和分生育期的干旱灾害评估模型。模型结果与广东省实际历史干旱灾情的对比分析表明, 此模型是合理可行的。

2) 1981 - 2010 年, 广东省晚稻全生育期和抽穗 - 乳熟期、乳熟 - 成熟期的干旱灾害发生频率分别为 14 a 和 7 a、8 a 一遇, 以轻旱为主, 影响晚稻产量的干旱灾害主要发生在抽穗 - 成熟期。其中, 晚稻抽穗 - 乳熟期轻旱频率低于乳熟 - 成熟期, 但中旱发生频率却高于乳熟 - 成熟期。晚稻生育期间, 广东北部地区干旱灾害发生频率高于其它

地区; 在乳熟 - 成熟期, 东部的干旱灾害频率也比较高。

3) 广东省晚稻由于干旱造成的减产率比较小, 平均不到 1%。抽穗 - 乳熟期的干旱减产率略大于乳熟 - 成熟期, 即抽穗 - 乳熟期出现的干旱将更容易导致晚稻减产。晚稻干旱减产率空间分布与干旱频率分布比较一致, 从西北部向东南部递减。

4) 近 30 a 广东晚稻全生育期和抽穗 - 乳熟期由干旱引起的减产率有略微下降的趋势, 乳熟 - 成熟期干旱减产率有增加趋势。从空间分布来看, 晚稻全生育期东南部地区干旱趋于增强, 抽穗 - 乳熟期干旱趋于增强的区域北扩, 乳熟 - 成熟期基本上整个东部和北部地区的干旱减产率均趋于增加。1981 - 2010 年晚稻生育期间, 广东省东南部的年降水量变化趋势不明显, 但气候变暖后 (1997 - 2014 年) 东南部年降水量变差系数为 0.249, 而变

暖前(1981-1996年)为0.236。变系数的增大表明东南部降水不均匀性增大,增加了干旱的频率,因此东南部地区晚稻干旱趋于增强。

5) 气候变暖背景下,晚稻全生育期、抽穗-乳熟期的干旱致灾频率和减产率呈减小趋势。

本文将模型运用到全省各个地区,但各地降水条件、农业生产水平存在差异,使用统一的模型会存在误差。另外,影响广东省晚稻产量的农业气象灾害除了干旱,还有台风、暴雨、寒露风等,但是单一灾害造成的产量损失难以区分。目前干旱灾害评估技术仍在探索之中,模型有待在业务应用过程中进一步完善。

### 参考文献:

- [1] 段居琦,周广胜.我国双季稻种植分布的年代际动态[J].科学通报,2013,58(13):1213-1220.
- [2] 中国气象局.中国气象干旱图集(1956-2009)[M].北京:气象出版社,2010:1-117.
- [3] 王春林,陈慧华,唐力生.广东气象干旱图集[M].北京:中国科学技术出版社,2013:1-138.
- [4] 张强,张良,崔县成.干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战[J].地球科学进展,2011,26(7):763-778.
- [5] 宋连春,邓振镛,董安祥,等.干旱[M].北京:气象出版社,2003:1-162.
- [6] 袁文平,周广胜.干旱指标的理论分析与研究展望[J].地球科学进展,2004,19(16):982-991.
- [7] 张强,潘学标,马柱国,等.气象灾害丛书:干旱[M].北京:气象出版社,2009:1-199.
- [8] 张强,韩兰英,张立阳,等.论气候变暖背景下干旱和干旱灾害风险特征与管理策略[J].地球科学进展,2014,29(1):80-91.
- [9] 宋丽莉,王春林,董永春.水稻干旱动态模拟及干旱损失评估[J].应用气象学报,2001,12(2):226-233.
- [10] 苏永秀,李政,吕厚全.水分盈亏指数及其在农业干旱监测中的应用[J].气象科技,2008,36(5):592-595.
- [11] 袁淑杰,王婷,王鹏.四川省水稻气候干旱灾害风险研究[J].冰川冻土,2013,35(4):1036-1043.
- [12] 冯利平,莫志鸿,黄晚华.湖南省季节性干旱对双季稻生长及产量影响的模拟研究[J].作物学报,2011,37(5):895-902.
- [13] 罗伯良,黄晚华,帅细强,等.湖南省水稻生产干旱灾害风险区划[J].中国农业气象,2011,32(3):461-465.
- [14] 姚凤梅,张佳华,孙白妮,等.气候变化对中国南方稻区水稻产量影响的模拟和分析[J].气候与环境研究,2007,12(5):659-666.
- [15] 马欣,吴绍洪,李玉娥,等.未来气候变化对我国南方水稻主产区季节性干旱的影响评估[J].地理学报,2012,67(11):1451-1460.
- [16] 王春林,段海来,周菊香,等.华南早稻干旱灾害评估模型及其时空特征[J].中国农学通报,2014,30(18):40-48.
- [17] 王春林,唐力生,谢乌,等.华南晚稻干旱影响评估及其时空变化规律[J].中国农业气象,2014,35(4):450-456.
- [18] 王春林,陈慧华,唐力生,等.基于前期降水指数的气象干旱指标及其应用[J].气候变化研究进展,2012,8(3):157-163.
- [19] 王春林,邹菊香,麦北坚,等.近50年华南气象干旱时空特征及其变化趋势[J].生态学报,2015,35(3):595-602.
- [20] 王华,陈新光,黄珍珠.气候变化背景下广东早稻气象灾害变化[J].应用气象学报,2011,27(6):937-941.
- [21] 陈新光,钱光明,陈特固,等.广东气候变换若干特征及其对气候带变化的影响[J].热带气象学报,2006,22(6):547-552.