

文章编号: 1674-7054(2022)01-0048-09



基于 CROPWAT 模型的橡胶树需水量

童俊儒^{1,2}, 安 锋², 谢贵水²

(1. 海南大学 热带作物学院, 海口 570228; 2. 中国热带农业科学院 橡胶研究所/
农业农村部 儋州热带作物科学观测试验站, 海南 儋州 571737)

摘 要: 为了计算和测定橡胶树的需水量, 利用海南省儋州市 1954—2020 年的气候资料, 采用 CROPWAT 模型, 研究了不同水文年橡胶树的需水量及其与有效降水量的耦合度。结果表明: (1) 橡胶树年均需水量为 1069.8 mm, 该区橡胶树年均有效降水量为 1048.3 mm。(2) 以旱季即 11 月至翌年 4 月的降水量为依据可较好划分当地水文年型, 依此得到海南儋州地区橡胶树多雨年、正常年、旱年和特旱年需水量分别为 1060.7、1072.0、1069.3 和 1156.6 mm。6~10 月有效降水量最多; 1~4 月因降水量较小, 有效降水量不能满足橡胶树蒸散需水量, 因此, 容易造成旱害。

关键词: 橡胶树; CROPWAT 模型; 干旱; 灌溉需求

中图分类号: S 718; S 794.1 **文献标志码:** A

引用格式: 童俊儒, 安锋, 谢贵水. 基于 CROPWAT 模型的橡胶树需水量 [J]. 热带生物学报, 2022, 13(1): 48-56. DOI: [10.15886/j.cnki.rdsxb.2022.01.008](https://doi.org/10.15886/j.cnki.rdsxb.2022.01.008)

天然橡胶是我国经济发展和国防事业的重要战略物资^[1]。海南作为我国天然橡胶主产区, 2020 年总种植面积 52.69 万 hm^2 , 产量占全国橡胶总产量的 46.21%^[2]。橡胶树产胶量的高低受多种因素的制约^[3], 其中, 干旱会阻碍橡胶树的生长发育, 每年季节性干旱会给我国橡胶种植业造成巨大的经济损失^[4-5]。然而, 国内外对橡胶树旱害及抗旱栽培技术方面的研究很少。充足的土壤水分和较低的饱和蒸汽压差利于橡胶树产胶^[6]。长时间的大气干旱^[7]或季节性干旱所引起的叶面积指数和蒸腾速率^[8]下降会导致橡胶树的生长受阻、抽叶减慢、植株回枯死亡、过冬落叶和开花提早、割胶时间缩短、产排胶受阻和胶乳产量下降等^[9-16]。通过确定橡胶树蒸散需水量, 结合有效降水量可判断橡胶树受干旱胁迫程度。CROPWAT 模型是由联合国粮农组织 (FAO) 开发的、基于《作物需水量操作指南》^[17-18] 的决策支持工具, 可根据不同土壤、气候和作物类型计算作物蒸散需水量、有

效降水量和灌溉需水量, 并制定灌溉制度。国内外已经有许多学者使用 CROPWAT 模型对作物蒸散需水量进行分析并制定了灌溉制度^[19-25], 但对于落叶乔木及多年生作物研究甚少。本研究拟结合海南省儋州市 1954—2020 年气象和相关土壤数据, 使用 CROPWAT 模型计算橡胶树蒸散需水量、有效降水量和灌溉需水量, 旨在为橡胶树需水量的计算及灌溉制度设计及旱害评估提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 数据来源及处理 本研究所需的气象数据来自中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>) 儋州观测站。

1.2 研究区概况 海南省儋州市位于海南岛西北部, 属热带季风气候类型。多年平均气温为 24.6 $^{\circ}\text{C}$, 最热月 7 月的平均温度为 28.8 $^{\circ}\text{C}$, 多年平均降水量为 1 856 mm, 月平均风速 2.2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 由于受季风影响, 旱季、雨季分明^[15,26]。

收稿日期: 2021-06-09

修回日期: 2021-11-02

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020ZDYF1000600); 国家天然橡胶产业技术体系项目 (CARS-33-ZP1)

第一作者: 童俊儒 (1997-), 男, 海南大学热带作物学 2020 级硕士研究生. E-mail: 675462527@qq.com

通信作者: 安锋 (1977-), 男, 研究员. 研究方向: 作物栽培生理与生态学. E-mail: an-f@catas.cn

1.3 研究方法及模型介绍

1.3.1 橡胶树蒸散需水量 利用联合国粮农组织推荐的植物蒸散量公式^[18]计算橡胶树蒸散需水量, 计算公式为:

$$ET_c = K_c \times ET_0,$$

式中, ET_c 为橡胶树实际需水量(mm), K_c 为作物系数, ET_0 为橡胶树参照需水量(mm)。橡胶树参考需水量 ET_0 采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith^[19] 计算。

1.3.2 作物系数的确定及年生长周期划分 联合国粮农组织将作物年度生育期划分为 4 个阶段: 生长初期(L_{ini})、发育期(L_{dev})、生长中期(L_{mid})和生长后期(L_{late}), 对应的作物系数分别为 K_{cini} 、 K_{cdev} 、 K_{cmid} 和 K_{cend} 。 K_c 值参照《作物需水量操作指南》^[18] 和海南儋州橡胶树历年生长周期、平均割胶时间及年叶面积指数变化情况确定^[27]。本研究将落叶期作为生长初期, 抽叶未开割期作为发育期, 雨季高产期作为生长中期, 旱季割胶期作为生长后期划分橡胶树生育期, 时间根据每年抽芽、割胶及落叶的平均日期确定(表 1)。

表 1 橡胶树各生育阶段及作物系数

项目	生长初期	发育期	生长中期	生长后期
日期	1月1日 ~ 2月15日	2月16日 ~ 4月30日	5月1日 ~ 10月31日	11月1日 ~ 12月30日
天数/d	46	74	184	60
K_c	0.4	—	1	0.9

1.3.3 模型土壤参数 当地土壤为砖红壤, 最大降水入渗率为 $240 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ^[28]。初始土壤含水率为 20.94%^[26], 根系层中总有效水量(TAW)为 $113 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$ ^[29]。

1.3.4 有效降水量计算 有效降水量的计算选用美国农业部土壤保持局(USDA Soil Conservation Service)推荐的方法计算^[24], 公式为:

$$P_{\text{eff}} = \begin{cases} P \times (125 - 0.2P) / 125 & P \leq 250 \text{ mm} \\ 125 + 0.1P & P > 250 \text{ mm} \end{cases},$$

式中, P_{eff} 为月有效降水量(mm); P 为月降水量(mm)。

1.3.5 灌溉需水量 灌溉需水量可反应作物遭受干旱的程度。各生育阶段灌溉需水量等于作物蒸散需水量与有效降水量的差, 若该时期内有效降水量大于作物蒸散需水量, 则无需灌溉^[19]。即:

$$I_r = \text{Max} \left[\left(\sum_{i=1}^n ET_{ci} - \sum_{i=1}^n P_{\text{eff}i} \right), 0 \right],$$

式中, n 为生育阶段时间(d); ET_{ci} 为第 i 生育期作物蒸散需水量(mm); $P_{\text{eff}i}$ 为第 i 生育期的有效降水量(mm); I_r 为需要补充的灌溉量(mm)。

1.3.6 水文年型划分 对 1954—2020 年海南省儋州站年降水数据由大到小进行排列, 然后计算各年度水文经验频率 P_m :

$$P_m = \frac{m}{n+1},$$

式中, P_m 为降水量系列第 m 项的经验频率; m 为降水量系列由大到小排列的序号; n 为降水量观测系列的年数。

然后利用当年降水量和 P_m 值的自然对数值拟合水文经验频率曲线, 进而设置特征年 P_m 值为多雨年($P_m=25\%$)、正常年($P_m=50\%$)、旱年($P_m=75\%$)和特旱年($P_m=95\%$), 计算得到的不同水文年型的拟降水量^[30]。对于海南地区, 降水多集中于夏季, 在 6~9 月降水量充沛, 但降水利用率不高, 而 11 月到翌年 4 月降水很难满足作物生长发育所需水分^[31]。因此, 用全年总降水量去评估很难准确反映实际旱情。为此, 笔者仅使用 1~4 月、11~12 月降水量进行不同年型的划分, 计算得当地多雨年、正常年、旱年和特旱年的旱季(即 1~4 月和 11~12 月)拟降水量分别为 346.48、248.73、191.57 和 158.24 mm。相应的干旱年旱季各月平均拟降水量计算式:

$$P_{i \text{ dry}} = P_{i \text{ av}} \times \frac{P_{\text{dry}}}{P_{\text{av}}},$$

式中, $P_{i \text{ av}}$ 为 i 月多年平均降水量; $P_{i \text{ dry}}$ 为 i 月的旱季降水量; P_{av} 为多年平均降水量; P_{dry} 为旱季降水量^[32-33], 特旱年、正常年和多雨年月平均降水计算公式同理。不同典型年月降水量如表 2 所列。

表 2 不同水文年月拟降水量

	mm						旱季总降水量
月份	1月	2月	3月	4月	11月	12月	
平均	19.18	21.7	38.9	91.03	81.45	35.6	287.85
多雨年	23.08	26.12	46.82	109.57	98.04	42.85	346.48
正常年	16.57	18.75	33.61	78.66	70.38	30.76	248.74
旱年	12.76	14.44	25.89	60.58	54.21	23.69	191.57
特旱年	10.54	11.93	21.38	50.04	44.78	19.57	158.24

1.3.7 气候倾向率 气候倾向率主要反应某时间段内气象要素变化趋势,方程中的系数可用最小二乘法来确定。一般来讲,降水的气候趋势用一次直线方程来定量描述:

$$\widehat{Y}_i = at + b,$$

式中 \widehat{Y}_i 为气象要素的拟合值, t 为对应年份, a 和 b 为回归系数。

把10a作为气候要素的年代际变化,指以10a为尺度的气候倾向率,表示气象要素每10a的变化速率。由于降水量的时间序列呈现非正态分布,可通过Mann-Kendall趋势检验法中标准化检验统计量 Z 值的大小来揭示其显著性,当 Z 的绝对值大于1.65、1.96和2.58时,表示趋势分别通过了信度90%、95%和99%的显著性检验,同时 Z 值的正负也指示序列的上升下降趋势^[34-35]。

1.3.8 作物蒸散需水与有效降水量的耦合度 作物蒸散需水与有效降水量的耦合度反映作物生长期有效降水量满足作物需水的程度。其计算公式为:

$$\lambda_i = \begin{cases} 1 & P_i \geq ET_{ci} \\ P_i / ET_{ci} & P_i < ET_{ci} \end{cases},$$

式中: λ_i 第 i 时段耦合度; P_i 代表第 i 时段内有效降水量(mm); ET_{ci} 为第 i 时段内作物蒸散需水量(mm)。

2 结果与分析

2.1 橡胶树需水量、有效降水量和灌溉需水量变化 对1954—2020年橡胶树需水量和有效降水量变化趋势进行分析(表3,图1)得出,在年生长周期中,橡胶树蒸散需水量历年平均值为1069.8 mm;其中,以1955年为最高,达到1206.7 mm;以2016年为最低,为948.5 mm。年蒸散需水量总体呈现减小趋势,有效降水量总体呈现上升变化但不显著。各月中,橡胶树蒸散需水量仅2~3月呈现逐年不显著上升外,其余各月均呈现下降趋势,其中5月、7月、8月和12月下降极显著,4月、9月下降显著,7月降幅最大,以每10a下降3.44 mm的速率极显著下降。有效降水量12月显著上升,其他月变化不显著。7月橡胶树蒸散需水量的变化范围极差最大为114.4 mm,10月有效降水量变化极差最大,变化范围为2.5~199.1 mm。灌溉需水量7、12月显著下降,其余各月变化均不明显,总

体呈下降趋势。年生长周期内总灌溉需水量变化范围为44.4~488.9 mm。4月灌溉需水量平均值最大。6~10月降水量充沛,灌溉需水量相对较小。每年的11月到翌年4月灌溉需水量较大,此时极可能会出现旱害现象。需水量和有效降水量在一年中均先增大后减小;在12月~翌年2月,多年数据较集中,其中,1月橡胶树需水量约为25 mm;有效降水量在11月至翌年4月普遍低于需水量。降水量各月离散值多,极差大,且在旱季更为集中;不同月份橡胶树需水量、有效降水量的变化与降水量变化密切相关。

2.2 橡胶树蒸散需水量与气象因素相关性分析

橡胶树不同年和不同月蒸散需水量、有效降水量与气象因素相关性分析结果见图2。从图2-a不同月份来看,蒸散需水量与有效降水量、降水量、气温、日照时数、平均水汽压和饱和水汽压差均达到极显著正相关水平,与平均风速和平均气压呈显著负相关。有效降水量与降水量、气温、日照时数和平均水汽压均呈极显著正相关,与平均风速和平均气压呈极显著负相关。降水量与有效降水量同各气象因素的相关性基本一致。需水量、有效降水量和降水量与相对湿度相关性均不显著。

从图2-b中可以看出,在不同年间分析时,蒸散需水量与有效降水量、降水量、相对湿度、平均水汽压呈显著负相关,与平均风速和日照时数呈极显著正相关;有效降水量与年尺度上的最高气温、日照时数、饱和水汽压差呈极显著负相关,与降水量、相对湿度呈极显著正相关。

2.3 不同水文年橡胶树蒸散需水量及有效降水量的差异

为了减小误差,选取与不同水文年型年拟降水量最接近的相邻2个年份的平均值为代表,对1975和1982年、1962和2002年、2010和2019年、1977和2005年分别取平均值作为该地区多雨年、正常年、早年和特早年的代表年。利用代表年气象数据计算橡胶树蒸散需水量,得到儋州市各月橡胶树蒸散需水量(图3)。结果表明,不同水文年型橡胶树蒸散需水量、有效降水量均呈现先升后减的趋势。多雨年、正常年、早年和特早年的橡胶树蒸散需水量分别为1060.7、1072.0、1069.3和1156.6 mm。不同年型蒸散需水量和有效降水量均有差异,其中,1~4月任何年型蒸散需水量和有效降水量均普遍较低,从5月开始增多,

表 3 橡胶树蒸散需水量、有效降水量和灌溉需水量趋势分析

月份/月	项目	蒸散需水量/mm	有效降水量/mm	灌溉需水量/mm
1	平均值	28.49	19.32	13.72
	Z	-0.86	0.44	-0.55
	变化范围	16.5 ~ 59.8	0.1 ~ 112.7	0 ~ 32.5
	气候倾向率	0.03	0.71	-0.46
2	平均值	31.43	22.05	15.36
	Z	1.13	-1.4	1.13
	变化范围	17.7 ~ 65	1 ~ 114.6	0 ~ 42.5
	气候倾向率	0.69	-0.19	1.16
3	平均值	63.45	36.20	33.15
	Z	0.21	0.78	-0.78
	变化范围	42.6 ~ 88.6	0.1 ~ 153.9	0 ~ 88.4
	气候倾向率	0.03	3.3	-1.72
4	平均值	101.62	70.94	39.89
	Z	-2.50*	0.3	-0.75
	变化范围	73.3 ~ 129.2	2.4 ~ 159	0 ~ 112.2
	气候倾向率	-2.07	0.8	-1.75
5	平均值	130.74	132.18	15.44
	Z	-2.67***	1.15	-0.93
	变化范围	70.2 ~ 166.7	44.3 ~ 180.8	0 ~ 94.2
	气候倾向率	-2.77	1.22	-1.28
6	平均值	129.24	127.91	14.91
	Z	-0.81	-1.36	0.93
	变化范围	62.6 ~ 171.8	50 ~ 181.3	0 ~ 94.5
	气候倾向率	-1.76	-2.41	0.87
7	平均值	135.20	135.71	14.99
	Z	-3.24***	1.22	-1.74*
	变化范围	52 ~ 166.4	12.2 ~ 202.2	0 ~ 97.1
	气候倾向率	-3.44	1.98	-2.63
8	平均值	121.49	147.34	5.96
	Z	-2.59***	1.02	-1.07
	变化范围	68.6 ~ 139	23 ~ 197	0 ~ 76.2
	气候倾向率	-1.98	0.53	-0.27
9	平均值	103.10	147.43	4.32
	Z	-2.04*	-0.98	-0.29
	变化范围	73.2 ~ 126.9	23.2 ~ 217.1	0 ~ 57.4
	气候倾向率	-1.48	-1.57	-0.73

续表 3

月份/月	项目	蒸散需水量/mm	有效降水量/mm	灌溉需水量/mm
10	平均值	94.19	115.69	17.55
	Z	-1.49	0.36	-0.45
	变化范围	68.5 ~ 121.3	2.5 ~ 199.1	0 ~ 112.7
	气候倾向率	-1.23	1.51	-1.29
11	平均值	72.41	61.36	27.67
	Z	-1.22	0.29	-0.37
	变化范围	51 ~ 91.1	0.1 ~ 170	0 ~ 89.9
	气候倾向率	-0.88	0.3	-1.41
12	平均值	58.12	31.90	31.77
	Z	-3.07***	1.68*	-1.72*
	变化范围	40.9 ~ 133.3	0.2 ~ 118.4	0 ~ 82.2
	气候倾向率	-1.04	2.93	-2.37
全生育期	平均值	1069.8	1048.3	234.7
	Z	-3.92***	1	-1.69*
	变化范围	948.5 ~ 1206.7	806.6 ~ 1315.2	44.4 ~ 488.9
	气候倾向率	-15.71	9.33	-11.85

注: 平均值和变化范围单位为毫米(mm), 气候倾向率单位为每10年(10a), Z值为正代表序列呈上升趋势, 为负代表下降趋势, *、**和***分别表示在0.05、0.01和0.001水平上显著, 下同。

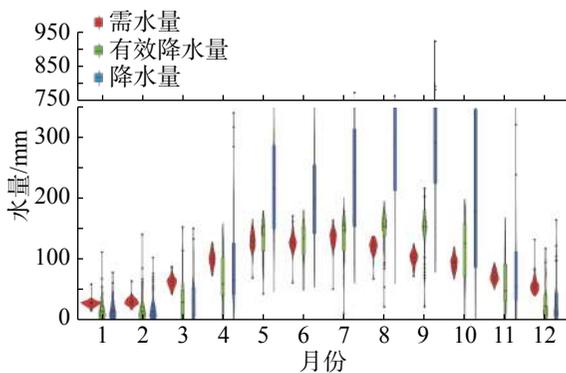


图1 橡胶树蒸散需水量,有效降水量和降水量月变化趋势

11~12月均下降,特早年相较于其他年型蒸散需水量更大。不同水文年橡胶树的灌溉需求也不尽相同,多雨年的早期最短,但春旱依然严重,特早年早期最长且较严重,不同水文年在7~9月灌溉需求均较低,10月至翌年3月是主要的灌溉需求期,说明橡胶树全年的灌溉需求主要与秋冬季的干旱程度有关。

2.4 不同降水年型蒸散需水量与有效降水量耦合度 从图4可知,有效降水量与蒸散需水量在橡胶树年生长周期中趋势相对一致,均表现为先

升高后降低。其中特早年、早年、正常年波动明显,呈现“n”型变化,多雨年呈现“v”型变化。多雨年3~4月耦合度较低。特早年需水量最大,各月需水量与有效降水量耦合度分别为54.79%、18.80%、13.66%、56.98%、89.98%、85.52%、100.00%、100.00%、100.00%、38.79%、48.40%和13.53%,在橡胶树蒸散需水量最大同时有效降雨最小,加重了特早年的干旱胁迫程度。特早年和早年耦合度起伏较大,5月耦合度较其他年型较大,但2月、3月和10~12月较低。正常年有效降水量整体上较高,冬春季需水量和有效降雨量的耦合度较高,但也经历了一定程度干旱。通过耦合度分析可知,不同水文年6~9月有效降水量基本满足橡胶蒸散需水量要求,但11月到翌年4月因降水量偏少,有效降水量难以满足橡胶树蒸散需水量,因此容易造成橡胶树旱害。

2.5 不同水文年型的橡胶树灌溉需求 利用CROPWAT模型计算了海南儋州地区不同水文年型的橡胶树灌溉需求(表4)。从表4可知,海南省儋州地区夏季降雨量十分充沛且需水量和有效降

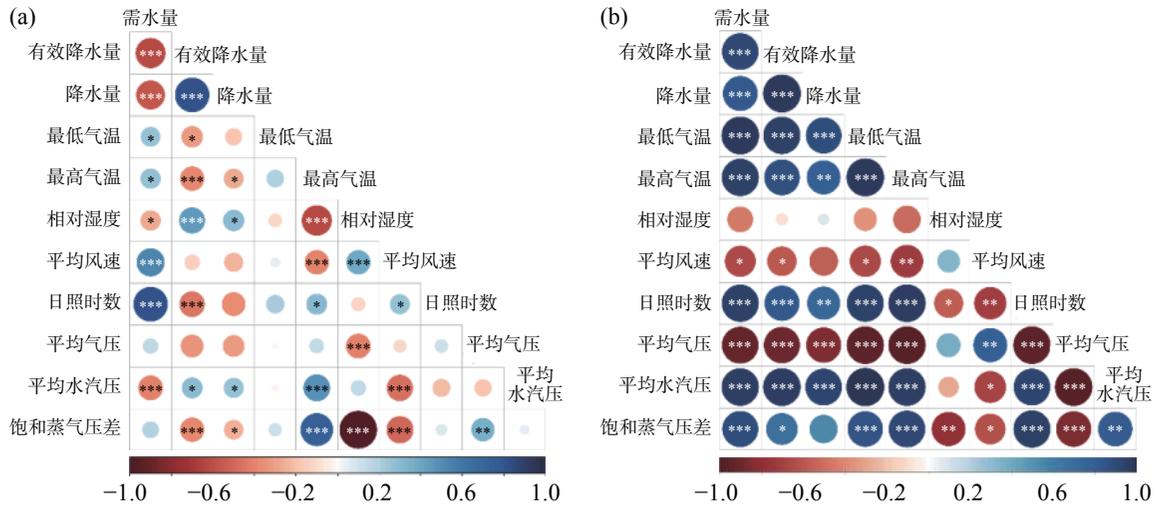


图 2 橡胶树不同月需水量(a)和不同年需水量(b)与气象要素相关性分析

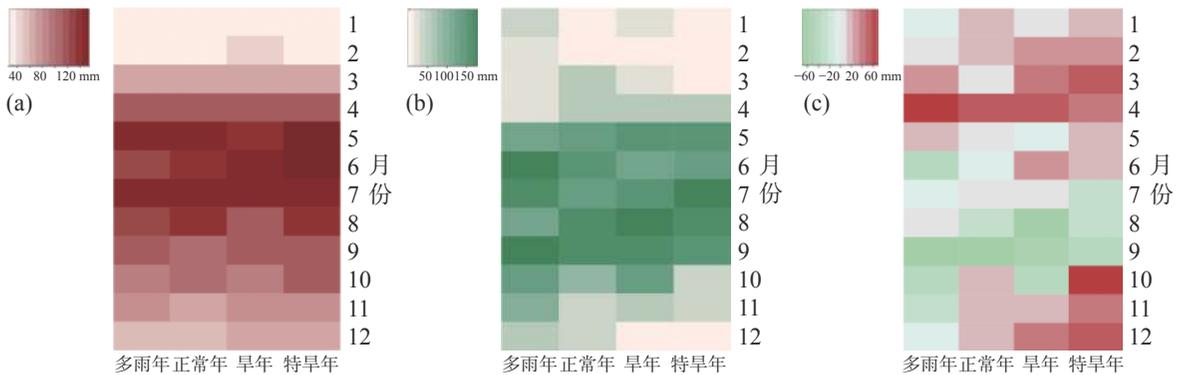


图 3 不同水文年橡胶树蒸散需水量(a)、有效降水量(b)和灌溉需求(c)变化

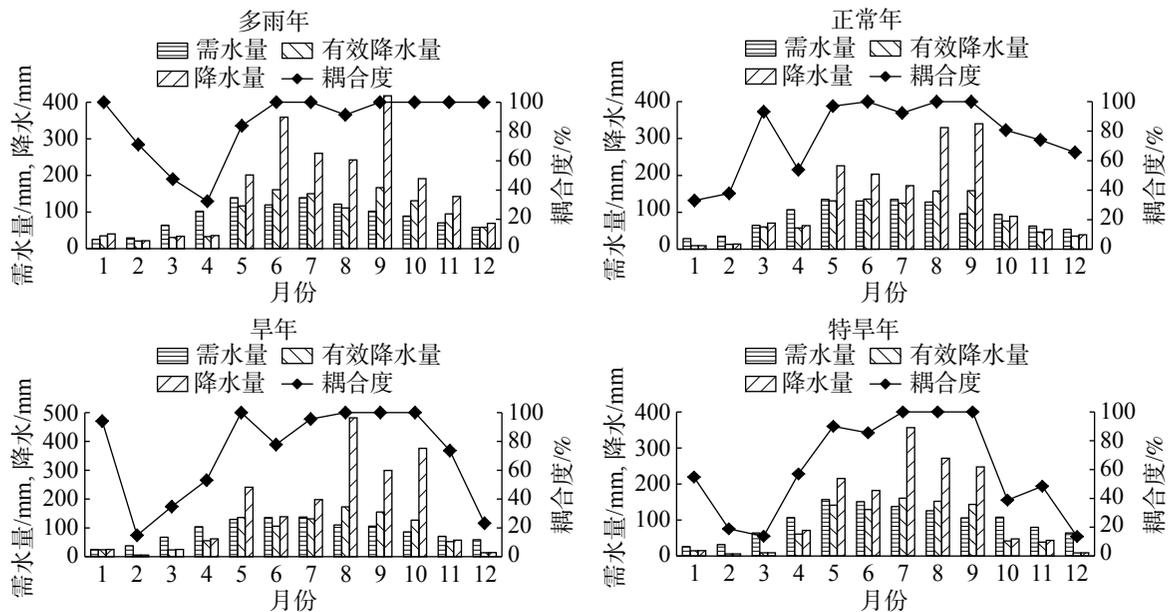


图 4 不同水文年下橡胶树蒸散需水量与有效降水量耦合度

雨量耦合度大, 一般不用考虑灌溉, 冬春季应注意防旱。多雨年灌溉需求及灌溉次数最少, 特旱年灌溉需求及灌溉次数最多。总体而言, 任何年型

在冬春季都会出现不同程度的干旱。多雨年、正常年、旱年和特旱年分别为 116.5、113.2、172.4 和 230.9 mm。

表4 不同水文年型橡胶树灌溉需求量

水文年型	灌溉日期	灌溉需求/mm	总计/mm
多雨年	4月8日	58.8	116.5
	5月2日	57.7	
正常年	4月14日	56.5	113.2
	12月20日	56.7	
	3月15日	58.4	
旱年	4月16日	56.5	172.4
	12月10日	57.5	
	3月12日	57.8	
特早年	4月12日	57.9	230.9
	10月25日	57.1	
	12月2日	58.1	

3 讨论

本研究通过对海南省儋州地区 1954—2020 年气象要素进行趋势分析以及气象要素与蒸散需水量和有效降水量间的相关性比较,得到了当地气象要素的变化规律,明确了橡胶树各生育阶段蒸散需水量和灌溉需水量的变化及其影响因素。分析了不同水文年型下橡胶树蒸散需水量、有效降水量和两者耦合度。为当地合理利用灌溉水资源,防止橡胶遭遇旱害提供了一定的理论支撑。国内已经有许多研究通过水分循环和水分平衡模拟对作物蒸散需水量进行了分析并得到灌溉需求。但大多都是在较短时间间隔和小范围内进行的分析^[36-38]。本研究使用 CROPWAT 模型结合橡胶树种植区多年气象数据进行需水量分析,为橡胶树需水量的计算和测定提供了新思路。

以往对不同水文年型的划分基本是利用全年降水量等数据进行划分。本研究发现,利用全年总降水量去划分海南地区水文年,很难准确反应其干旱与否。因为我国南方大多数地区都有明显的季节性干旱,例如广西的越冬作物在冬季生育阶段内易发生干旱;华南区的广东、广西和海南,春季易发生季节性干旱;长江中下游地区和华南地区发生夏旱和秋旱的可能性较高;冬旱发生可能性较高的地区有华南地区和长江中下游地区^[33]。海南降水多集中于夏季,在 6~9 月降水量充沛,但降水利用率不高,而 11 月到翌年 4 月,降

雨无法完全满足作物生长发育所需水分,所以在本研究中,仅使用 1~4 月、11 月、12 月降雨量进行不同年型的划分,结果比采用全年降水量划分更加吻合海南的干旱情况。由此年型划分得到海南降雨量达到早年、特早年型标准的共有 13 年,这与本世纪以来相关文献报道 2004、2005、2007、2010 和 2019 年海南省均遭受了较为严重旱害的事实基本一致^[10,39]。该划分方式同时也能准确反映旱季蒸散量的多少,其原因在于该方式对旱季降水量监测具有极强针对性,若旱季降水较少,相应的空气湿度及饱和蒸气压差就会较低,从而加快作物蒸腾速率。该方式为南方季节性干旱多发区的水文年型划分及旱季作物蒸散的监测提供了参考。

有学者发现 CROPWAT 模型在计算蒸散量时会出现高于实际值的情况,且对于非喷灌灌溉蒸散准确度更低^[40],橡胶树种植区多地处热带山区,作为高大乔木对水分的适应性也较强,因此橡胶树种植区主要依靠降水提供水分,很少进行灌溉,但干旱导致橡胶树死亡的现象也有发生^[1,5],也有研究报道灌溉可以显著提高胶乳产量^[41],所以,在考虑橡胶树灌溉制度时,该模型所拟定的参考值需进一步讨论。另外,本研究模拟过程对于土壤肥力病虫害胁迫等并未考虑在内,需继续对水肥效应进行研究。

参考文献:

- [1] 李国尧,王权宝,李玉英,等. 橡胶树产胶量影响因素[J]. 生态学杂志, 2014, 33(2): 510-517.
- [2] 海南省统计局等. 海南统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [3] 周艳飞. 云南橡胶树栽培[M]. 昆明: 云南大学出版社, 2008.
- [4] 何康,黄宗道. 热带北缘橡胶树栽培[M]. 广州: 广州科技出版社, 1987.
- [5] 曾宪海,林位夫,谢贵水. 橡胶树旱害与其抗旱栽培技术[J]. 热带农业科学, 2003(3): 52-59.
- [6] RAO G G, RAO P S, RAJAGOPAL R, et al. Influence of soil, plant and meteorological factors on water relations and yield in *Hevea brasiliensis* [J]. *International Journal of Biometeorology*, 1990, 34: 175-180.
- [7] SOPHARAT J, GAY F, THALER P, et al. A simple framework to analyze water constraints on seasonal transpiration in rubber tree (*Hevea brasiliensis*) plantations [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015(5): 753.
- [8] 刘金河. 巴西橡胶树的水分状况与生长和产胶量的关

- 系[J]. 生态学报, 1982(3): 217 - 224.
- [9] VIJAYAKUMAR K R, DEY S K, CHANDRASHEKAR T R, et al. Irrigation requirement of rubber trees (*Hevea brasiliensis*) in the subhumid tropics [J]. *Agricultural Water Management*, 1998, 35(3): 245 - 259.
- [10] 吴嘉涟. 谈垦区橡胶树的旱害[J]. 海南农垦科技, 1998(4): 14 - 17.
- [11] 宫丽丹, 田耀华, 龙云峰, 等. 持续干旱胁迫及复水对橡胶树渗透调节能力的影响[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(1): 35 - 38.
- [12] 张凤良, 毛常丽, 李小琴, 等. 橡胶树优树无性系对干旱胁迫的生理响应[J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(4): 67 - 72.
- [13] CHANDRASHEKAR T R, MARATTUKALAM, NAZEER M A. Growth reaction of *Hevea brasiliensis* to heat and drought stress under dry subhumid climatic [J]. *Journal of Rubber Research*, 1996, 1(9): 1 - 5.
- [14] CHANDRASHEKAR T R, NAZEER M A. An analysis of growth and drought tolerance in rubber during the immature phase in a dry subhumid climate [J]. *Experimental Agriculture*, 1998, 34: 287 - 300.
- [15] 张晓娟. 海南岛西部橡胶林生态系统蒸散特征研究[D]. 海口: 海南大学, 2016.
- [16] ISARANGKOOL N, RATTANAWONG S, MEETHA P, et al. Xylem sap flow and trunk growth of 5 hybrid rubber tree clones [J]. *Acta Horticulturae*, 2018, 1197: 1 - 6.
- [17] SMITH M. A computer program for irrigation planning and management[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1992.
- [18] ALLEN R G. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements[M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper, 2006.
- [19] 张耘铨, 刘继龙, 聂堂哲. 基于 CROPWAT 模型的玉米需水量及灌溉制度研究[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(7): 67 - 75.
- [20] ABDEL-KABIROUA B. 基于 CROPWAT 模型的水稻需水量计算[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [21] MOSEKI O, MURRAYHUDSON M, KASHE K. Crop water and irrigation requirements of *Jatropha curcas L.* in semi-arid conditions of Botswana: applying the CROPWAT model [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 225: 105754.
- [22] 段琪彩, 张雷, 黄英, 等. CROPWAT 模型在滇中南部灌水量模拟中的应用研究[J]. *节水灌溉*, 2020(6): 81 - 86.
- [23] 王忠波, 王欣亮, 聂堂哲. 基于 CROPWAT 模型水稻需水量及灌溉制度研究[J]. *东北农业大学学报*, 2019, 50(7): 87 - 96.
- [24] 徐猛, 金梁, 魏丹, 等. 基于 CROPWAT 模型的哈尔滨地区 26 年大豆生产水足迹变化研究[J]. *大豆科学*, 2019, 38(2): 251 - 257.
- [25] PAYAM N. Assessment of CROPWAT model accuracy for estimating potential evapotranspiration in arid and semi-arid region of Iran [J]. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 2007, 10(16): 2665 - 2669.
- [26] 耿思文. 海南儋州橡胶林生态系统水量平衡研究[D]. 海口: 海南大学, 2020.
- [27] 陈帮乾, 吴志祥, 杨川, 等. 海南儋州地区橡胶林叶面积指数月动态研究[J]. *热带农业科学*, 2015, 35(11): 1 - 6.
- [28] ALLEN R G. FAO Irrigation and drainage paper [J]. *Irrigation and Drainage*, 1998, 300: 64 - 65.
- [29] 陈珍莉, 施晨晓, 王小洁, 等. 海南省农业气象自动站土壤水分分布特征[J]. *现代农业科技*, 2019(16): 160 - 161.
- [30] 耿思文, 吴志祥, 杨川. 海南儋州橡胶林土壤水分变化及其对气象因子的响应特征[J]. *热带农业科学*, 2019, 39(11): 11 - 18.
- [31] 王守鹤, 秦大庸. 几种经验频率公式适应性的分析[J]. *水利水电技术*, 1989(5): 1 - 3.
- [32] 李金山, 段福义, 韩启彪, 等. 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.
- [33] 姜浩. 大豆干旱胁迫的水氮利用及不同水文年型的灌溉制度研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
- [34] 王声锋, 段爱旺, 张展羽. 半干旱地区不同水文年 Hargreaves 和 P-M 公式的对比分析[J]. *农业工程学报*, 2008(7): 29 - 33.
- [35] 曹洁萍, 迟道才, 武立强, 等. Mann-Kendall 检验方法在降水趋势分析中的应用研究[J]. *农业科技与装备*, 2008(5): 35 - 37.
- [36] 张盛霖, 邓高燕, 黄勇奇. Mann-Kendall 检验法在 Excel 中的实现与应用[J]. *地球科学*, 2014(6): 27 - 31.
- [37] 林希昊, 陈秋波, 华元刚, 等. 不同树龄橡胶林土壤水分和细根生物量[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(2): 331 - 336.
- [38] 秦钟. 橡胶林土壤水分平衡的研究[D]. 儋州: 华南热带农业大学, 2002.
- [39] 李海亮, 戴声佩, 陈帮乾, 等. 基于 HJ-1A/1B 数据的天然橡胶干旱监测[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(23): 176 - 182.
- [40] RAISA A V, YURII O L, SERHII V K, et al. Assessment of the CROPWAT 8.0 software reliability for evapotranspiration and crop water requirements calculations [J]. *Journal of Water and Land Development*, 2018, 39(1): 147 - 152.
- [41] 华元刚, 陈秋波, 林钊沐, 等. 水肥耦合对橡胶树产胶量的影响[J]. *应用生态学报*, 2008(6): 1211 - 1216.

Estimation of water requirements of rubber trees with CROPWAT model

TONG Junru^{1,2}, AN Feng², XIE Guishui²

(1. College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou, Hainan 570228; 2. Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences/ Danzhou Investigation & Experiment Station of Tropical Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Danzhou, Hainan 571737, China)

Abstract: Seasonal drought is an important factor affecting the yield of rubber trees in China. Nevertheless few studies investigated the water requirement and irrigation system of rubber trees. Using the CROPWAT model, water requirement of rubber trees and the coupling of water requirements and effective precipitation in different hydrological years were investigated based on the weather data from 1954—2020 in Danzhou, Hainan, China. The results showed that the annual water requirement of rubber trees was 1069.8 mm, and that the annual effective precipitation in this area was 1048.3 mm. According to the precipitation in the dry season (November to April) the patterns of hydrological years could be precisely divided, based on which the water requirements of rubber trees in rainy years, normal years, drought years and severe drought years in Danzhou, Hainan were 1060.7 mm, 1072.0 mm, 1069.3 mm and 1156.6 mm, respectively. The effective precipitation from June to October was maximum, and the effective precipitation from January to April was low, which failed to meet the water requirement of rubber trees for evapotranspiration and hence led readily to suffering of the rubber trees from drought. This study provides a new method for estimation of water requirements of rubber trees and a theoretical support for the evaluation of drought disaster and the design of irrigation regimes for rubber trees.

Keywords: rubber trees; CROPWAT model; drought; requirement for irrigation

(责任编辑:吴志祥 责任编辑:潘学峰)