

亚热带城市典型盆栽花卉蒸散量监测与快速测算*

王喜娜¹ 何嘉茜²

(1. 广东生态工程职业学院, 广东 广州 510520; 2. 广东碧桂园学校, 广东 佛山 528312)

摘要 定量监测各个物种的蒸散量, 有助于区域农业物种选择、城市生态景观规划和水资源精细化管理。该文采用称重法监测4种亚热带城市盆栽花卉铜钱草 *Hydrocotyle vulgaris*、长寿花 *Narcissus jonquilla*、碧玉(豆瓣绿) *Peperomia tetraphylla* 和蝴蝶兰 *Phalaenopsis hybrid* 的蒸散量, 并基于监测数据改进空气饱和差方法测算单株花卉的潜在蒸散量。研究表明, 在这一年的监测期(2019年11月—2020年10月), 铜钱草、长寿花、碧玉和蝴蝶兰的花盆单位面积日均蒸散量为3.5、2.5、2.5和1.8 mm; 4种花卉的单位叶面积年蒸散量分别为162、29、74和123 mm。4种盆栽花卉的蒸散量都与气温呈正相关, 与相对湿度(RH)呈负相关。铜钱草的蒸散量与气温和RH都有显著的相关性; 长寿花的蒸散量与气温之间的相关性较弱, 与RH的之间呈显著的负相关; 碧玉和蝴蝶兰在晚上的蒸散量与RH的相关性不显著。风速会提高4种花卉的蒸散量; 当土壤水分供给受限或者RH过高(>80%)时, 4种花卉的蒸散量急剧减少并趋于雷同。根据日均气温和RH, 改进的空气饱和差法能较准确地测算4种花卉的日蒸散量($R^2=0.52\sim 57.0$ RD = -0.9%~4.4%), 这对快速测算4种花卉的潜在蒸散耗水量和自动浇灌设计等有较重要的推广应用价值, 基于该蒸散发估算模型, 可以根据较为容易获得的气温和相对湿度数据, 快速估算和预测植物的蒸散耗水量, 从而做好浇水规划和每日自动浇水量设计。

关键词 盆栽花卉; 蒸散量; 称重法; 空气饱和差法

中图分类号: 568 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053(2021)05-0001-10

Monitoring and Predicting Evapotranspiration for Four Subtropical Urban Potted Plants

WANG Xi'na¹ HE Jiaxi²

(1. Guangdong Eco-Engineering Polytechnic, Guangzhou, Guangdong 510520, China; 2. Guangdong Country Garden School, Foshan, Guangdong 528312, China)

Abstract Quantitatively monitoring the plant evapotranspiration (ET) and water consumption is significant important in selecting appropriate plants, planning urban ecology and garden, and precision management of water resources. This study carried out daily monitoring of ET and water consumption for subtropical urban potted plants, *Hydrocotyle vulgaris* (HV), *Narcissus jonquilla* (NJ), *Peperomia tetraphylla* (PT) and *Phalaenopsis hybrid* (PH) in Guangzhou by weighing from November 1, 2019 to October 31, 2020. The results showed the daily mean ET against the pot area was 3.5, 2.5, 2.5 and 1.8 mm, and the annual ET against the total leaf areas were 162, 29, 74 and 123 mm for the HV, NJ, PT and PH, respectively. The variation of ET for the 4 plants were positively related with air temperature and negatively associated with relative humidity (RH) during day and night time. The Pearson correlation coefficient (CC) of HV's ET with air temperature and RH were significant. Surprisingly, NJ's

* 基金项目: 生态公益林效益补偿资金项目“生态公益林扶贫产业政策与机制研究”。

第一作者及通信作者: 王喜娜(1983—), 女, 副教授, 主要从事精准林业以及森林生态监测研究, E-mail: 95625065@qq.com。

ET showed weak CC with air temperature. Both PT and PH's ET displayed significant CC with air temperature and RH during day time but weak CC with RH during night time. The 4 plants had evidently higher ET during days with larger wind speed, but similarly low ET in conditions of continuously dry soil or damp air (RH >80%). Based on the daily mean temperature and RH, the improved approach of air saturation deficiency could well estimate the 4 plants' ET ($R^2=0.52-57$, RD = -0.9%-4.4%), and has significant implication for estimating their potential ET and designing automated watering system.

Key words potted plants; evapotranspiration; weighing; air saturation deficiency

蒸散发是全球水、能量和碳循环的重要组成部分和关键环节,与土壤-植物-大气系统密切相关,是地球表层中能量循环和物质转化最为强烈的活动层^[1]。蒸散发过程涉及到土壤水文地质和近地大气紊流交换以及植物的生理活动,对局地微气候产生重要影响,是植物生长和生物产量的主要控制因素之一^[2]。植物的蒸散发与园林、农业、林业和水资源管理以及气象监测预警等密切相关,因此,对植物蒸散发的研究和耗水监测分析有着重要的学术意义与社会经济价值。

植物蒸散是一个复杂的物理现象和生理过程,包括从地表和植物表面的水分蒸发,以及通过植物表面和植物体内的水分蒸散^[1]。植物根系依靠渗透压从水中或土中吸收水分后输送到叶片,然后经植物杆径、叶片以及花果表面蒸发到大气,称为植物散发或蒸腾^[3]。植物叶片的蒸腾作用可以帮助植物从土壤吸收水分,促进光合作用;同时也可以使植物排出多余水分,降低叶面温度,以适应其生长和生理需求。影响植物蒸散的因素很多,主要包括植物生理特性、气温、光照、土壤含水量、大气相对湿度和风速等^[3]。在相同的外部条件下,不同的植物种类以及同种植物的不同生长期,其蒸散耗水量也各不相同^[4-5]。比如,1995—1997年间,鼎湖山人工松林的年均降雨量和蒸散量是1 878 mm和938 mm,7月蒸散量最大,高达149 mm,最小为1月只有22 mm^[6]。精确地监测和测算各个物种在不同生长期的蒸散量,是区域农业物种选择、城市生态景观规划和水资源精细化管理的基础,可以帮助决策者根据不同的水资源等外部环境条件选择种植不同的物种,或者根据不同的植物种类和生长周期辅以相应的浇灌策略。陈友媛等^[7]于2011年7—11月份对对春羽 *Philodendron selloum*、绿萝 *Scindapsus aureun* 和铜钱草 *Hydrocotyle vulgaris* 3种水培盆栽景观植物的

蒸散量开展了定量监测,发现铜钱草的耗水量高达1 550 g·m⁻²·d⁻¹,是同期春羽和绿萝耗水量的2.1倍和3.6倍。

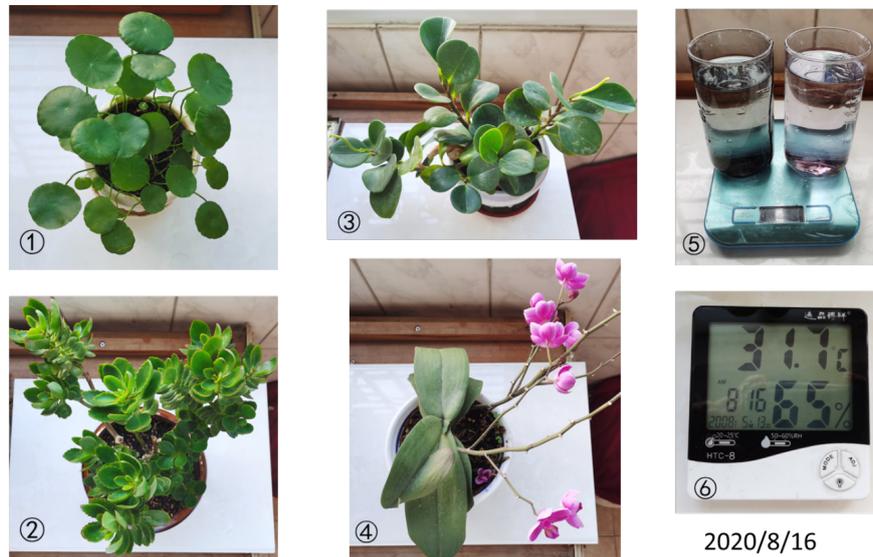
盆栽花卉是城市生态景观与园林建设的主要内容之一,具有广阔的市场容量和巨大的社会经济价值与美学价值^[8]。例如,长寿花 *Narcissus jonquilla* 长期占据丹麦盆栽花卉销售产值之冠,而荷兰的长寿花产值已达千亿美元^[9]。城市家庭的盆栽花卉养殖已成为市民生活和城市景观的重要组成部分;然而,我国在盆栽花卉养殖技术研究中,除了如王梓等^[10]和陈友媛等^[7]研究外,对花卉的蒸散耗水和浇水量多数以定性描述为主,缺乏对花卉蒸散量和需水量的定量化监测^[11-12]。

植物蒸散量的监测往往费时费力,成本较高,难以大规模的实施。多种方法已被开发出来估算区域或田块尺度的蒸散量,诸如空气饱和差法、气温积温法、Penman公式法和布德科公式法^[6]。这些常用的植被蒸散量测算模型多用于区域尺度和田块尺度的蒸散量测算^[13-14],而对于单株城市盆栽花卉的蒸散量计算的研究和应用并不多见。本文的主要研究目的是选择几种常见的亚热带城市盆栽花卉,每天监测其蒸散量,分析典型盆栽花卉在不同季节的蒸散耗水量变化及其主要影响因素,并改进空气饱和差法,为快速测算盆栽花卉的潜在蒸散量和自动浇灌设计等提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究对象

本文研究对象为广州市城市家庭常见的4种成年盆栽花卉:铜钱草(HV)、长寿花(NJ)、碧玉 *Peperomia tetraphylla* (PT) 和蝴蝶兰 *Phalaenopsis hybrid* (PH) (图1)。其生境为广州市城区高层住宅阳台花架,阳台朝南,外有挡雨窗,免受雨水直淋,采光和透气性良好,栽培方式为



注：①铜钱草，②长寿花，③碧玉，④蝴蝶兰，⑤水杯和电子秤，⑥温度与湿度计。

Note: ① *Hydrocotyle vulgaris*, ② *Narcissus jonquilla*, ③ *Peperomia tetraphylla*, ④ *Phalaenopsis hybrid*, ⑤ Glass cup and Electronic scale, ⑥ Thermometer and humidometer.

图 1 研究花卉与监测设备

Figure 1 The study plants and instruments

盆栽土养，人工根部浇水。

铜钱草属伞形科和多年生挺水或湿生草本植物，株高可达 15 cm，地下走茎发达，生长适合温度 20~25 °C^[15-17]。长寿花属多年生草本植物，植株可高达 40 cm，喜温暖湿润和阳光充足环境，生长适温为 15~25 °C^[11]。碧玉属多年生簇生草本植物，植株高 10~30 cm，喜湿润半阴环境，生长适温 25 °C 左右，忌阳光直射^[18-20]。蝴蝶兰属兰科多年附生草本植物，主要分布在热带及亚热带地区，喜暖畏寒，生长适温为 16~27 °C，10 °C 以下停止生长^[12,21]。

1.2 监测方法

常见的植物蒸散耗水量测定和估算方法有水文学法、微气象学法、植物生理学法、遥感方法以及综合模拟法，其中实测法有称重法、气孔计法、水文学法、能量平衡法等。针对家庭阳台盆栽花卉体积小和不受雨水直淋的特点，本文采用电子秤称重法直接测定盆栽花卉的蒸散量。电子秤由中山康诺电子有限公司生产，型号 H-X，最大量程 5 000 g，精度为 1 g。同时，监测水杯内的水面蒸发量，用以表征整个大气环境和太阳辐射能量的实际蒸发潜力。水杯放在阳台外的窗台上，盆栽花卉放在通风良好的阳台内花架上，每个花盆下都配有接水托盘，水杯和花盆都不受雨水直淋；每天人工对花卉根部浇水，根据前 1 d 的

蒸散量控制浇水量，避免托盘积水，用称重法直接测量浇水前后的花盆质量，二者质量差即为当天的浇水量。在每次称重前，记录当时的温度和相对湿度，温度湿度计放在阳台内的花盆旁边，免受阳光直射；温度湿度计由温州盛测仪器仪表有限公司生产，型号为 HTC-8（图 1），温度测量范围：-50~70 °C，测量精度：±1 °C，分辨率：0.1 °C；相对湿度测量范围：10%~99%，测量精度：±5%，分辨率：1%。

2019 年 11 月 1 日—2020 年 10 月 31 日，每天上午约 7:30 时、晚上约 19:30 时分别对花盆和托盘整体称重，计算出早、晚的质量差 (ΔS)，建立花盆（含托盘）的水量平衡公式（1）：

$$\Delta S = P + W - ET - Q \dots\dots\dots (1)$$

公式（1）中， ΔS 为花盆在早、晚两个时间段内的质量差， P 为花盆接收到的降雨量， W 为人工浇水量， ET 为花盆的蒸散量， Q 为渗流量。

每次对花卉浇水都在晚上花盆称重后进行，先测得 ΔS 的值，此时浇水量 (W) 为零；花盆放在阳台内不受雨淋，降雨量 (P) 为零；每次浇水量都略等于前 1 d 的蒸散量，避免过量浇水导致下渗，且花盆底放置有收集渗水的托盘，托盘和花盆一起称重，即使偶尔产生的少许渗流也被计入到花盆的蒸发量当中，这样渗流量 (Q) 也为零。

根据花盆的水量平衡公式(1),当P、W和Q都为零时,早、晚两个时间段内花盆(包括托盘)的质量差值就代表每盆花卉的蒸散量(ET)。

根据表1所列的各个花盆的直径(面积)和水的密度,可将每个花盆的蒸散质量转化为单位面积的蒸散量深度(mm)。花卉每日的蒸散量代表其每日所需的耗水量。由于花卉在12h内的生长量远小于花卉的蒸散量,在公式(1)以及本文的蒸散量和耗水量分析中,未单独考虑花卉的生长量。除了测量花盆的面积外,本文还测量了4盆花卉所有的叶片的总面积,计算出单位叶面积的年均蒸散量。本文所用风速和降雨量数据来自广州市气象局国家标准气象站(天河)。

1.3 蒸散量测算

空气饱和差法根据月平均的气温(T)和相对湿度(RH)计算田块尺度的月蒸散量(ET),其通用公式为:

$$ET = k(T_0 + T)^a (1 - RH)^b \dots\dots\dots(2)$$

公式(2)中,k是转换系数,a和b表征植

被ET受气温和相对湿度的影响敏感度,T₀为温度调节参数。

根据4种盆栽花卉的实测蒸散量对气温和相对湿度影响的敏感性,将公式(2)改为公式(3):

$$ET = k \left(T_0 + T \left(\frac{T}{T_g} \right)^a \right) (1 - RH)^b \dots\dots\dots(3)$$

根据植被蒸散量的连续监测显示,当气温低于植物的适宜生长温度时,植被的日蒸散量极低;而当气温高于某一温度时,植被的日蒸散量急剧上升。因此公式(3)中,增加一个温度参数T_g,可代表最适宜植被生长的气温下限,并将气温影响指数a移到内部作为实际气温与最佳生长气温比值的指数。每种花卉的T₀、T_g、a和b 4个参数都用试差法,根据实测的ET、T和RH进行敏感性分析与最大相关性交叉拟合,找到一套最优的拟合参数范围,最后确定转换系数k。

将1a内每天连续监测的T、RH和ET数据

表1 花盆直径、总叶面积及其监测期内(2019-11-1—2020-10-31)的蒸散量
Table 1 The pot diameter, total leaf areas and the mean ET during 2019-11-1—2020-10-31

变量 Items	水杯 Cup	铜钱草 HV	长寿花 NJ	碧玉 PT	蝴蝶兰 PH
花盆直径/cm Diameter	6.4	9.0	10.0(*15.0)	14.0	14.0
花盆面积/cm ² Areal	32.2	63.6	78.5(*176.7)	153.9	153.9
叶面积/cm ² Area of leaves		499.4	4 144.8	1 867.5	842.2
叶面积:花盆面积 Area of leaves : Areal		7.9	52.8	12.1	5.5
总蒸散量/g Total ET weight	7 243	8 073	11 888	13 772	10 370
单位面积蒸散量/mm Pot ET depth	2 251	1 269	914	895	674
单位叶面积蒸散量/mm Leaf ET depth		162	29	74	123
植物ET:水杯E/% Plant ET : cup E		56	41	40	30
日均蒸散量/(mm·d ⁻¹) Daily ET	6.2	3.5	2.5	2.4	1.8
白天蒸散量/(mm·12h ⁻¹) Day ET	4.6	2.6	1.8	1.9	1.2
晚上蒸散量/(mm·12h ⁻¹) Night ET	1.6	0.9	0.7	0.5	0.6
白天蒸散量:晚上蒸散量 Day ET : Night ET	2.8	2.9	2.7	3.4	1.9

注: * 长寿花在2020年3月21日栽枝分盆种植,花盆的直径改为15.0cm。白天7:30—19:30时,晚上19:30—7:30时,称重时间偶有提前或推后1h左右;总叶面积在2020年12月21日测量。
Note: *HV was planted in a larger pot (d=15.0 cm) on March 21, 2020. Weighing time are at 7:30 and 19:30 with about one hour shift occasionally, day time is from 7:30 to 19:30, and night time is from 19:30 to 7:30 of next day. The total leaf areas were measured on December 21, 2020.

按奇、偶天数分为两组。奇数组数据用于率定模型参数 (T_0 、 T_g 、 a 和 b)，通过敏感性分析和试差法，计算 ET 和公式 (3) 右边除参数 k 以外的因子之间的 Pearson 相关性系数，根据相关性最高确定最优参数组合。偶数组数据用于模型验证，并用估算的 ET 与实测 ET 之间的 Pearson 相关性系数和相对偏差评估模型的性能。

2 结果与分析

2.1 水面蒸发量

水杯水面蒸发量表征花卉养殖环境的最大蒸发潜力。从 2019 年 11 月 1 日至 2020 年 10 月 31 日，水杯水面累计蒸发 7 243 g (或 2 251 mm)，日均蒸发 6.2 mm，其中白天蒸发量是晚上的 2.8 倍 (表 1)；日蒸发量最大值出现在 2020 年 7 月 17 日—19 日 (日最高温 37 °C，RH=60%，并伴随 3~4 级东南风)，高达 16.2 mm。水面蒸发量与气温成正相关，与 RH 成负相关；白天的蒸发量与 RH 的相关性比晚上大 (图 2)。根据日均气温和 RH，改进后的空气饱和差法能较好地估算出水面的潜在蒸发量 ($R^2=0.50$, $RD=-3.6\%$) (图 2)。

从月尺度看 (表 2)，日均蒸发量的最大值 (7 月) 和最小值 (3 月) 发生月份分别对应气温和

RH 的最大值，说明在夏季气温对水面最大蒸发量起着主导作用，比如 11 月和 12 月份的日均 RH 相同，但 11 月的日均气温比 12 月高 4.6 °C，11 月份的日均蒸发量也比 12 月份的大 1.6 mm。

在水面蒸发量中，由于住宅阳台环境条件限制，本研究采用直径为 6.4 cm 的两个玻璃杯盛水后平行监测，取其平均值。但是，水杯的直径远小于常规的气象或者水文监测中用的 D20 (直径 20 cm) 和 E601 (61.8 cm) 蒸发皿，所监测到的水面蒸发量大于自然开阔水面的蒸发量，如广州市地区 2000—2012 年的年均水面蒸发量为 1 150 mm^[22]，而本文在 2019 年 11 月 1 日至 2020 年 10 月 31 日期间用玻璃杯监测到的累计蒸发量高达 2 251 mm，这主要是由于杯壁表面及其毛细作用对水面蒸发量的影响。本文增加了 1 个 20.4 cm 口径的蒸发皿代表 D20 蒸发皿的蒸发量，与水杯一起在 2020 年 5 月 16 日至 6 月 17 日连续监测 1 个月。玻璃杯的水面蒸发量与 D20 水面蒸发量之间有很好的线性相关 ($CC=0.93$)，它与 D20 水面蒸发量之间的折算系数为 0.63。广东地区采用 D20 蒸发皿测得的蒸发量与自然水面蒸发量之间的折算系数在水文行业的推荐值为 0.69^[22]；因此，本文监测的玻璃杯水面蒸发量与开

表 2 气温、相对湿度、水杯蒸发量和 4 种花卉蒸散量每月的日均值, 2019-11-1—2020-10-31

Table 2 The daily mean air temperature, RH, glass evaporation and plant ET in each month during 2019-11-1—2020-10-31

月份 Month	气温 /°C Temperature	相对湿度 /% RH	水杯 /mm Cup	铜钱草 /mm HV	长寿花 /mm NJ	碧玉 /mm PT	蝴蝶兰 /mm PH
11	23.4	48	9.0	6.8	5.1	2.8	2.3
12	18.8	48	7.4	3.2	3.0	2.5	2.1
1	18.0	58	5.1	2.4	2.7	1.9	1.4
2	18.3	64	3.7	1.3	2.0	1.5	1.2
3	21.4	74	3.6	1.1	1.8	1.7	1.0
4	21.7	68	4.4	1.7	1.3	1.4	1.2
5	28.8	69	7.8	3.3	2.1	2.7	1.5
6	29.3	75	7.6	2.9	1.8	2.7	2.5
7	30.8	65	11.2	4.6	2.8	3.6	3.2
8	29.7	71	5.1	4.7	2.3	3.0	2.0
9	28.5	74	5.0	4.7	2.6	2.6	1.6
10	25.6	57	6.0	5.9	3.1	3.1	2.1
平均 Mean	24.5	64	6.2	3.5	2.5	2.4	1.8
标准差 Stdev	5.2	14	3.6	2.1	1.3	1.0	0.9

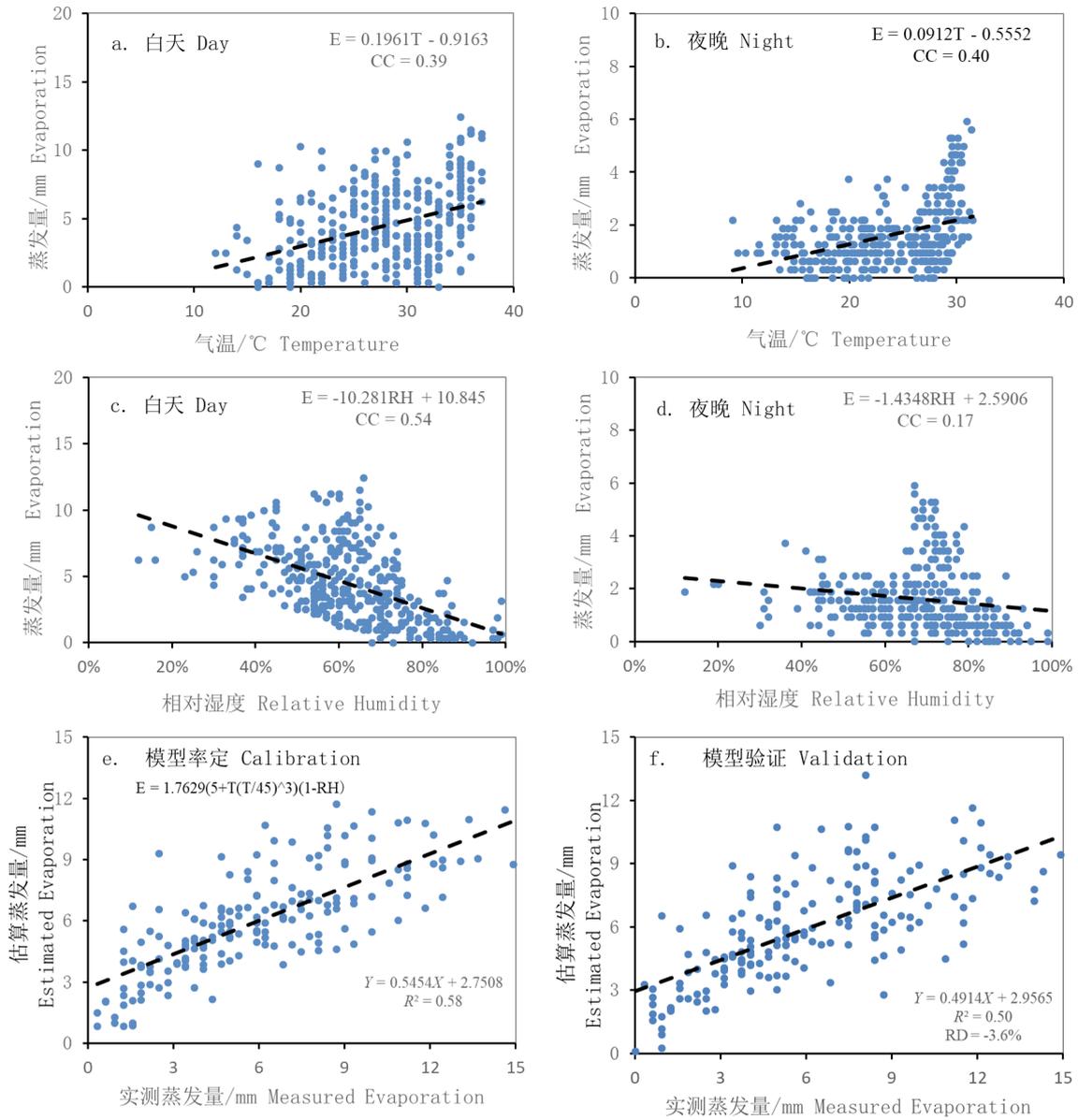


图2 水杯水面蒸发量与气温 (a,b) 和 RH(c,d) 间的散点图 (2019/11/1–2020/10/31), 以及模型估算蒸发量与实测蒸发量之间的散点图 (e, f)

Figure 2 The scatter plots of the half-day glass cup evaporation against air temperature (a,b) and RH(c,d), and the estimated evaporation against the measurements (e,f)

阔水面蒸发量的折算系数为 $0.63 \times 0.69 = 0.44$ 。在这 365 d 的监测期, 水面的自然蒸发量约等于 $2251 \times 0.44 = 991$ mm (2.7 mm/d), 略低于 2000—2012 年广州市的平均水面自然蒸发量 1150 mm, 表明我们用水杯监测到的蒸发量及其与开阔水面自然蒸发量之间的折算系数是合理的。

2.2 花卉蒸散量

本文所指的花卉蒸散量为花卉所在土壤(轻基质)蒸发量和花卉蒸散量之和。在这 1 a 的监测期, 玻璃杯的水面蒸发量明显高于铜钱草、长寿

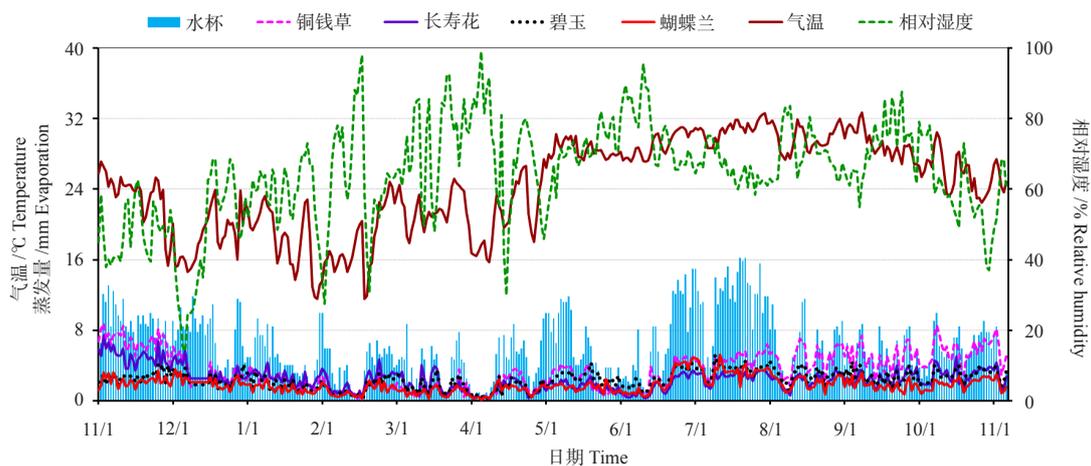
花、碧玉和蝴蝶兰的日均蒸散量(图 3), 分别为 6.2、3.5、2.5、2.5 和 1.8 mm/d, 4 种盆栽花卉的蒸散量只相当于玻璃杯水面蒸发量的 56%、41%、40% 和 30% (表 1)。4 种花卉中, 铜钱草蒸散耗水量最大, 比开阔水面的自然蒸发量 (2.7 mm/d) 高 28%, 接近耗水量最小的蝴蝶兰的 2 倍; 在温度较高和相对湿度较低的 9—11 月, 铜钱草的日均蒸散量甚至达到蝴蝶兰日均蒸散量的 3 倍 (表 2); 这与陈友媛等^[7]的研究结果一致, 铜钱草在 7 至 11 月份的日均耗水量是春羽和绿萝耗水量的

2.1 和 3.6 倍；因此，铜钱草不是缺水城市适宜栽种的景观植物。

除了计算单位花盆面积的蒸散量，本文还测量了 4 种花卉的总叶面积，计算出单位叶面积的年蒸散量（表 1）。与图 1 所示的 4 种花卉的生长形态一致，4 种花卉中长寿花总叶面积与花盆面积之比最高（52.8）、蝴蝶兰最低（5.5）；长寿花的单位叶面积的年蒸散量最低，铜钱草的单位叶面积年蒸散量依旧最高、是长寿花的 5 倍，而蝴蝶兰的单位叶面积年蒸散量排第二、是长寿花的 4

倍和碧玉的 1.7 倍，这与根据单位花盆面积计算的年蒸散量有较大差异。由于各种花卉的生长形态和总的叶面积随季节略有不同，如何便捷的计算和比较不同物种的蒸散量还值得进一步探讨，本文余下内容主要使用单位花盆面积的蒸散量进行讨论。

在温度较低的 2 月份以及 RH 较高的 3—4 月份，4 种盆栽花卉之间的蒸散量非常接近，而碧玉在此期间的蒸散量却相对较高（图 3 和表 2）。4 种花卉在白天的蒸散量都与 RH 呈显著的负相



注：观测时间为 2019-11-1—2020-10-31。

Note: observation period is 2019-11-1—2020-10-31.

图 3 日均气温、相对湿度、水杯日均蒸发量、4 种盆栽花卉的日均蒸散量

Figure 3 The daily mean air T, RH and the daily ET for Glass cup, HV, NJ, PT, PH

表 3 气温、RH 以及水杯和 4 种盆栽花卉在白天和晚上的蒸散量均值及其相互间的 Pearson 线性相关系数矩阵

Table 3 The Pearson Correlation Coefficient (CC) matrix during day time and night time

项目 Items	温度 / $^{\circ}\text{C}$ Temperature	相对湿度 / $\%$ RH	水杯 Cup	铜钱草 HV	长寿花 NJ	碧玉 PT	蝴蝶兰 PH
白天 Day time	25.4	61	4.6	2.6	1.8	1.9	1.2
温度 Temperature		0.17	0.33	0.44	0.06	0.56	0.35
相对湿度 RH	0.42		-0.55	-0.46	-0.64	-0.39	-0.48
水杯 Cup	0.37	-0.18		0.62	0.64	0.68	0.75
铜钱草 HV	0.36	-0.30	0.48		0.77	0.73	0.62
长寿花 NJ	0.13	-0.51	0.51	0.72		0.62	0.61
碧玉 PT	0.48	-0.11	0.63	0.62	0.58		0.78
蝴蝶兰 PH	0.50	-0.16	0.70	0.61	0.58	0.76	
晚上 Night time	23.6	67	1.6	0.9	0.7	0.6	0.6

注：白天（7:30—19:30）右上角，晚上（19:30—7:30 时）左下角，监测日期为 2019-11-1—2020-10-31。

Note: day time (7:30-19:30):upper right, night time (19:30-7:30): lower left. Measuring duration is November 1, 2011 to October 31, 2020.

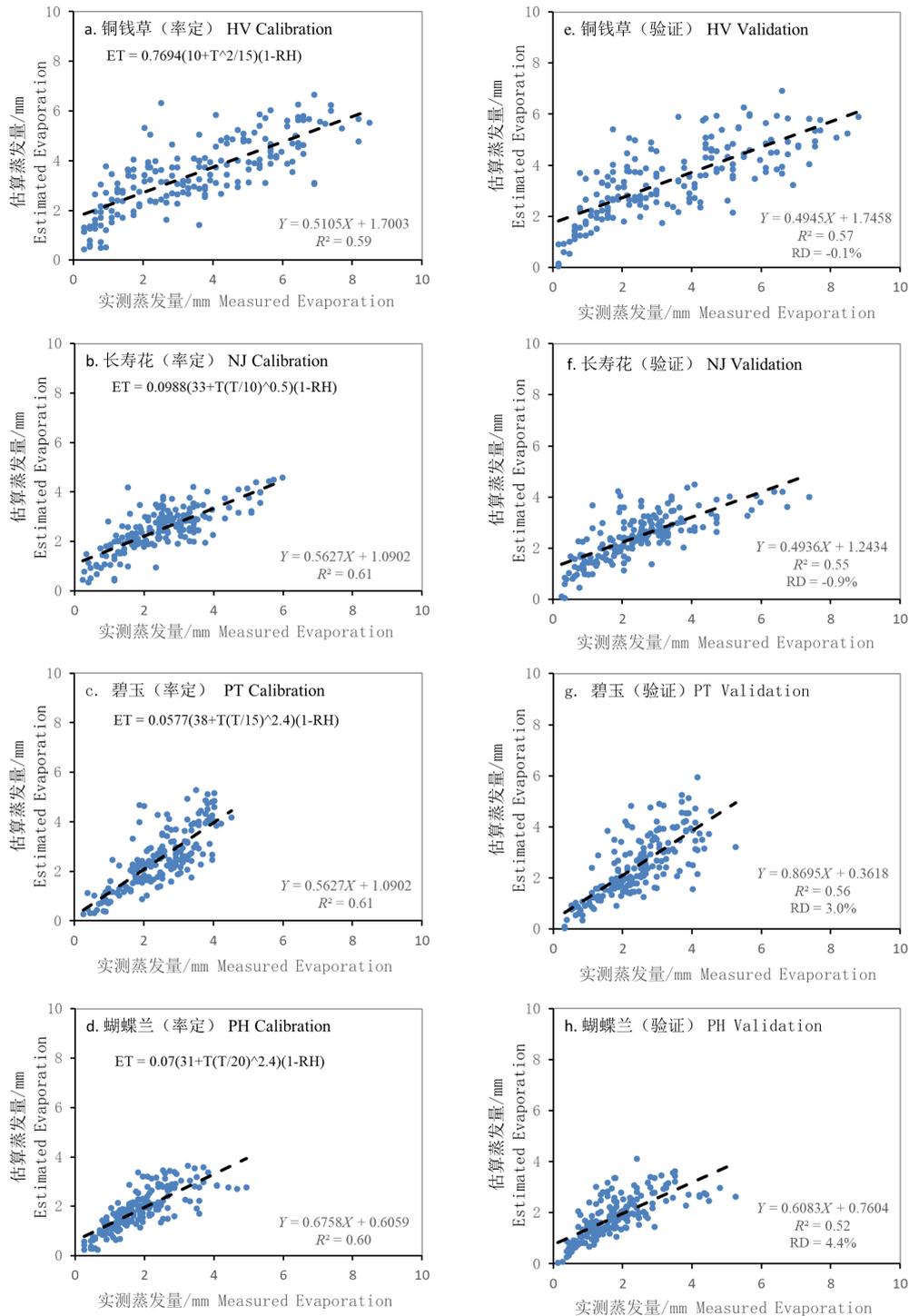


图 4 4 种花卉的模型估算蒸散量与实测蒸散量之间的散点图

Figure 4 The scatter plots of the estimated ET against the measured ET for the 4 potted plants at calibration (a~d) and validation (e~h)

关 (95% 置信度), 而碧玉和蝴蝶兰在晚上的蒸散量与 RH 的相关性不显著 (表 3)。令人意外的是, 长寿花在白天和晚上的蒸散量都与气温没有显著的相关性, 主要受到 RH 的影响; 而铜钱草、碧玉和蝴蝶兰在白天和晚上的蒸散量都与气温呈显

著的正相关 (表 3)。

除了气温和 RH 以外, 风速对花卉的蒸散量影响也较大。如图 3 所示, 水杯、铜钱草和长寿花的蒸散量偶尔会出现较陡峭的峰值, 这些峰值日期都有较大的风速。例如 2019 年 12 月 27 日

出现风速超过 10 m/s 的阵风, 日均气温和 RH 为 15.6 °C 和 49%, 水杯和 4 种花的蒸散量分别是 11.5、4.1、3.9、2.9 和 2.9 mm/d; 而无阵风的 12 月 28 日, 日均气温和 RH 为 16.7 °C 和 46%, 水杯和 4 种花的蒸散量分别是 8.2、2.2、2.8、1.7 和 1.8 mm/d。由于风速的瞬时波动大, 本文没有系统的同步监测风速, 尚无法定量分析风速对花卉蒸散量的影响。

从 2019 年 10 月 12 日广州市下了 15 mm 的降雨后, 直到 12 月 18 和 19 日才下了 5.4 mm 和 4.3 mm 的降雨; 连续 67 d 无降雨, 这是广州市比较罕见的干旱期。当每天晚上对 4 种植物持续浇水并使花盆土壤接近饱和, 使每种花卉都达到其近似的最大蒸散量, 铜钱草的蒸散量是碧玉和蝴蝶兰的 3 倍, 并随 RH 和温度大幅度波动。

从 12 月 3 日到 12 日, 连续 10 d 的日均 RH 低于 40%。在 12 月 6 日晚上对每盆花卉浇到饱和后, 进行连续 9 d 的水压力测试, 直到 12 月 15 日晚上, 当铜钱草和长寿花出现严重枯萎时, 才恢复对各盆花浇水。铜钱草、长寿花、碧玉和蝴蝶兰在这 9 d 的日均蒸散量只相当于 12 月份其余日期的日均蒸散量的 57%、74%、66% 和 39%; 当水分受限后, 各种花卉的蒸散量都趋于雷同, 但铜钱草和长寿花的大部分叶片出现枯萎, 而碧玉和蝴蝶兰的生长状态未发生明显枯萎, 耐旱能力较强 (图 3)。

另一个特殊时期是在 RH 很高的阴雨连绵日子, 如 2020 年 3 月 18 日至 4 月 7 日, 广州市连续下雨, 累计雨量 218 mm, 这 20 d 的平均气温和 RH 为 20.3 °C 和 85%, 玻璃水杯、铜钱草、长寿花、碧玉和蝴蝶兰的日均蒸散量只有 2.3、0.9、0.9、1.1 和 0.7 mm/d, 只相当于整个监测期内各自日均值的 37%、26%、36%、45% 和 38%。这与干旱期水分受限时的蒸散量类似, 当空气 RH 较高时, 各种花卉之间的蒸发量急剧降低且近乎相等。

2.3 盆栽花卉蒸散量测算

根据上述 4 种盆栽花卉的实测蒸散量受气温和 RH 的不同影响, 我们改进了空气饱和差法模型, 并用这一年的奇数日记录的 ET、 T 和 RH 来确定改进模型的最优参数 (图 4a-d)。在模型最优参数率定过程中, 估算 ET 与实测 ET 间的 R^2 为 59%~61%。其中参数 b 在 0.5~5 之间的变化对 R^2 的影响甚小, 取为常数 1。 R^2 对参数 a 和 T_g 的变

化较为敏感, a 的取值大小与表 3 中的相关性大小一致, 比如长寿花的 ET 与气温只有较弱的相关性, 其 $a = 0.5$; 而碧玉和蝴蝶兰的 ET 受气温的影响较大, 其 $a = 2.4$ 。 T_g 的取值与花卉的最低适宜生长温度有关, 如铜钱草和碧玉为 15 °C, 长寿花为 10 °C, 蝴蝶兰为 20 °C。 T_0 的取值上下浮动 2 °C, 对 R^2 的影响都小于 0.01。

另用偶数日记录的 ET、 T 和 RH 来验证改进模型及其最优参数。根据日均气温和 RH, 改进的空气饱和差法能较准确地测算 4 种花卉的日蒸散量 ($R^2=0.52\sim 57$, $RD = -0.9\%\sim 4.4\%$), 这对快速测算 4 种花卉的潜在蒸散耗水量和自动浇灌设计有较重要的推广应用价值, 基于该蒸散发估算模型, 可以根据较为容易获得的气温和相对湿度数据, 快速估算和预测植物的蒸散耗水量, 从而做好浇水规划和每日自动浇水量设计 (图 4e-h)。

3 结论

本文采用称重法监测了水杯的水面蒸发量和铜钱草、长寿花、碧玉和蝴蝶兰的蒸散量, 并根据实测数据改进空气饱和差法测算 4 种花卉的日均蒸散量。结果表明:

(1) 水杯的水面蒸发量能表征环境的最大蒸发潜力, 6.4 cm 口径水杯的蒸发量与 D20 蒸发皿以及开阔水面的自然蒸发量的折算系数约为 0.63 和 0.44。

(2) 在这 365 d 的监测期间, 水杯、铜钱草、长寿花、碧玉和蝴蝶兰单位花盆面积的日均蒸散量 6.2、3.5、2.5、2.4 和 1.8 mm。铜钱草蒸散耗水量最大, 比开阔水面的自然蒸发量 (2.7 mm/d) 高 28%, 是蝴蝶兰的 2 倍。4 种花卉的单位叶面积年蒸散量分别为 162、29、74 和 123 mm; 铜钱草依旧最高, 长寿花最低, 蝴蝶兰排第二、是长寿花的 4 倍和碧玉的 1.7 倍。

(3) 4 种花卉在白天的蒸散量都与 RH 呈显著的负相关 (95% 置信度), 而碧玉和蝴蝶兰在晚上的蒸散量与 RH 的相关性不显著。长寿花的蒸散量与气温没有显著的相关性。风速会提高 4 种花卉的蒸散量。

(4) 当土壤水分供给受限时, 或大气相对湿度过高 (>80%) 时, 4 种花卉的蒸散量急剧下降并趋于雷同。

(5) 根据日均气温和 RH, 改进的空气饱和差

法能较准确地测算4种花卉的日蒸散量,这对快速测算4种花卉的潜在蒸散量和自动浇灌设计有较重要的推广应用价值。

参考文献

- [1] 牛丽丽, 张学培, 曹奇光. 植物蒸腾耗水研究[J]. 水土保持研究, 2007(2): 158-160.
- [2] 司建华, 冯起, 张小由, 等. 植物蒸散耗水量测定方法研究进展[J]. 水科学进展, 2005(3): 450-459.
- [3] 李金柱. 区域蒸散发影响因素综合分析[J]. 山西水利, 2003(3): 23-24.
- [4] 李楠, 李海梅. 水分胁迫对混播草坪生理生态特性的影响[J]. 广东林业科技, 2014, 30(5): 13-18.
- [5] 邱权, 何茜, 李吉跃, 等. 干旱胁迫对华南地区三种苗木蒸腾耗水的影响[J]. 广东林业科技, 2012, 28(1): 19-24.
- [6] 闫俊华, 周国逸, 陈忠毅. 鼎湖山人工松林生态系统蒸散力及计算方法的比较[J]. 生态学杂志, 2001(1): 5-8; 17.
- [7] 陈友媛, 崔香, 胡广鑫, 等. 3种水培观赏植物耗水特性及其与环境因子间的关系[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2013, 43(4): 80-84.
- [8] 刘秋红. 广东省花卉产业的现状与发展对策[J]. 广东林业科技, 2005, 21(2): 60-64.
- [9] 韩玉琴. 三个长寿花品种再生体系的建立和水培技术研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
- [10] 王梓, 王瑞辉, 左海军, 等. 湖南5种园林地被植物蒸腾耗水特征初探[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(6): 139-144.
- [11] 陈少萍. 长寿花栽培管理[J]. 中国花卉园艺, 2019(18): 30-32.
- [12] 陈俊生, 陈岳徐, 江秀娜. 蝴蝶兰肥水管理关键技术[J]. 农技服务, 2014, 31(10): 32.
- [13] 杨瀚凌, 罗维均, 王彦伟, 等. 不同尺度下蒸散量测算方法的应用及展望[J]. 地球环境学报, 2020, 58(1): 35-48.
- [14] 曹聪明, 于红博. 地表蒸散量测定和计算方法综述[J]. 内蒙古科技与经济, 2019(10): 45-46.
- [15] 玲珑. 青翠欲滴铜钱草[J]. 花木盆景(花卉园艺), 2007(12): 18.
- [16] 周遗品, 刘雯, 雷泽湘, 等. 铜钱草对城市生活污水的净化效果[J]. 仲恺农业工程学院学报, 2011, 24(2): 9-12.
- [17] 杨英. 新时期下铜钱草养殖技术探析[J]. 农民致富之友, 2018(16): 103.
- [18] 徐兵, 刘爱凤, 陈恒新. 紫边碧玉组织培养研究[J]. 山东林业科技, 2016, 46(4): 42-44.
- [19] 林振. 浅谈豆瓣绿的养殖[J]. 林业与生态, 2019(2): 33-34.
- [20] 郭文场, 刘佳贺, 李悦. 豆瓣绿的种植和养护[J]. 特种经济植物, 2016, 19(7): 34-37.
- [21] 陈勇, 林开县, 王君晖. 蝴蝶兰的快速繁殖和规模化栽培技术研究[J]. 浙江大学学报(理学版), 2004(1): 84-87.
- [22] 吴雷, 黄强, 赵青. 气候变化下广东地区蒸散发量的变化特征及影响因子的趋势贡献研究[J]. 人民珠江, 2016, 37(4): 49-54.
- [23] 王凡夫. 滇西南湿热区水面蒸发折算系数初探[J]. 人民珠江, 2009, 30(4): 8-10.