

贯叶金丝桃 (*Hypericum perforatum*) 种子灌浆与发芽特性研究

张丹^{1,2}, 陈垣^{1,3}, 郭凤霞^{1,2}, 梁伟^{1,2},
赵小强^{1,2}, 景岩^{1,2}, 樊睿^{1,2}

(1. 甘肃农业大学农学院, 干旱生境作物学国家重点实验室, 甘肃兰州 730070;

2. 甘肃农业大学生命科学技术学院, 甘肃兰州 730070; 3. 四川康弘中药材种植有限公司, 四川成都 748100)

摘要: 贯叶金丝桃 (*Hypericum perforatum*) 是抗抑郁中药的基原植物, 以有性繁殖为主, 种子微小。为了揭示贯叶金丝桃种子发育规律, 明确种子适宜采收期, 以甘肃礼县栽培的2年生贯叶金丝桃为研究对象, 于开花后第5天开始, 每隔3 d测定种子粒重变化动态, 并拟合 Logistic 曲线方程, 最后测定各时期采收种子的发芽指标。结果表明: 贯叶金丝桃种子灌浆持续期44 d, 籽粒干质量变化符合 Logistic 生长曲线; 开花后第5~11天为渐增期, 第11~32天为快增期, 第32~44天进入稳增期后略有下降。在灌浆过程中, 种子鲜质量呈先升高后下降的动态变化趋势, 在花后第32天达到最大值0.2697 g; 灌浆速率和脱水速率呈波动趋势, 种子干质量与平均灌浆速率、灌浆持续期呈极显著正相关, 与含水量呈极显著负相关。种子发芽率和发芽指数在开花后44天达到最大, 发芽势在开花后41天达到最大, 发芽率、发芽势和发芽指数均与灌浆持续期呈极显著正相关, 与含水量呈极显著负相关。以上说明甘肃礼县贯叶金丝桃繁种时以开花后44天左右(8月9日前后)为种子采收适宜期, 过早采收和延迟采收均影响种子发芽质量。

关键词: 贯叶金丝桃; 种子灌浆; 发芽特性; 采收期; Logistic 模型

中图分类号: S567.23; S330.2; Q142.2 **文献标志码:** A

Study on seed filling and germination characteristics of *Hypericum perforatum*

ZHANG Dan^{1,2}, CHEN Yuan^{1,3}, GUO Fengxia^{1,2}, LIANG Wei^{1,2},
ZHAO Xiaoqiang^{1,2}, JING Yan^{1,2}, FAN Rui^{1,2}

(1. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, State Key Laboratory of Aridland Crop Science, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

3. Sichuan Kanghong Traditional Chinese Medicinal Materials Co., Ltd, Chengdu, Sichuan 748100, China)

Abstract: *Hypericum perforatum* is the base plant of antidepressant traditional Chinese medicine, which is mainly sexually propagated and has small seeds. To reveal the development patterns and the optimum harvest time of the seeds, the 2-year-old *H. perforatum* cultivated in Li County of Gansu Province was used as the research material, starting from the 5th day after flowering. The dynamic changes in seed weight were measured every 3 days, and the Logistic curve equation was fitted to predict the filling parameters. Finally, the seed germination indicators collected at each stage were measured. The results showed that the plant filling duration was 44 days, and the changes of seed dry mass followed the Logistic curve: the 5th to 11th day after flowering was a gradual increase period, the 11th to 32nd day was a rapid increase period, and after entering a stable increase period from 32nd to 44th day, it slightly decreased. During the filling process, the fresh mass of seeds showed a dynamic change, first increasing and then decreasing, reaching its maximum value of 0.2697 g on the 32nd day after flowering. The filling rate and

收稿日期:2023-06-14

修回日期:2023-09-18

基金项目:甘肃省高校研究生“创新之星”项目(2023CXZX-683);校企合作企业项目“贯叶金丝桃新品种选育”(KHZZZZ20210730056/2021620005001562);甘肃省现代农业中药材产业体系首席专家项目(GARS-ZYC-1)

作者简介:张丹(1999-),女,甘肃天水人,硕士研究生,研究方向为药用植物资源与利用。E-mail: 1597711808@qq.com

通信作者:陈垣(1963-),男,甘肃通渭人,教授,主要从事中药材育种和栽培研究。E-mail: cygex1963@163.com, guofx@gsau.edu.cn.com

dehydration rate showed a fluctuating trend. The dry mass of seeds showed a highly significant positive correlation with the average filling rate and filling duration, while a highly significant negative correlation with water content. The seed germination rate and germination index reached their maximum at 44 days and the germination potential reached its maximum at 41 days after flowering. The germination rate, germination potential, and germination index were highly significantly positively correlated with the filling duration, and highly significantly negatively correlated with water content. The above indicated that the optimum seed harvesting time was 44 days or so after flowering (around Aug. 9th) in Li County, Gansu Province. Premature and delayed harvesting both affect seed germination quality.

Keywords: *Hypericum perforatum*; seed filling; germination characteristics; harvest period; Logistic model

贯叶金丝桃(*Hypericum perforatum*)为藤黄科金丝桃属草本植物,是抗抑郁中药贯叶金丝桃的基原植物,以地上部分入药^[1],广泛分布于欧洲西北部、西伯利亚中部及中国西南部等多个国家和地区^[2-3]。它最早记录于唐代的《新修本草》,其味辛、性平,具有调经通乳、利湿利尿、愈合伤口等功效^[2-3]。贯叶金丝桃中含有金丝桃素、贯叶金丝桃素、黄酮类等有效成分,具有治疗中轻度抑郁症^[2]、抗肿瘤^[3]、抗动物病毒^[4]、治疗失眠^[5]、治疗心绞痛^[6]、保护神经系统^[7]和保护肝细胞^[8]等功效。贯叶金丝桃药理活性独特、药用价值高,随着野生资源的过度采挖和自然生长环境的破坏,人工繁育成为获取贯叶金丝桃的主要途径,因此,提高栽培贯叶金丝桃的产量和质量对于缓解市场需求具有重要意义。

种子繁殖是人工培育贯叶金丝桃的主要方式^[9],种子的产量、成熟度和质量直接决定贯叶金丝桃的田间出苗率,进而影响贯叶金丝桃药材的产量和质量,但在生产上仍没有统一的种子采收标准,造成实际生产中出现种子产量减少、质量下降等问题。种子灌浆作为植物生长的最后阶段,是种子干物质积累的关键时期,近年来,陆续有学者对柴胡(*B. chinense*)^[10]、麻花秦艽(*G. stramine*)^[11]、唐古特大黄(*Rheum tanguticum*)^[12]等药用植物种子灌浆特性及发芽指标进行了研究,结果表明平均灌浆速率、灌浆持续期和含水量等灌浆参数与种子粒重、发芽能力之间均存在显著关系。目前对贯叶金丝桃的研究主要集中在化学成分提取、药理活性和作用机制等方面^[7,13],缺乏对其种子灌浆规律及发芽特性等方面的深入研究。本文通过研究贯叶金丝桃种子灌浆过程中干物质积累的动态变化,分析不同灌浆参数间的相关性,以及采收期对种子发芽能力的影响,了解贯叶金丝桃种子的灌浆特性,明确种子的最佳采收期,有利于从源头保障贯叶金丝桃药材及其中药产品的药效和质量,也为制定规范化的贯叶金丝桃种子采收标准提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试材料为四川康弘中药材种植有限公司提供的礼县种植 2 年生贯叶金丝桃(*Hypericum perforatum*)。

1.2 种子灌浆特性测定

于 2022 年 6 月 20 日贯叶金丝桃盛花期,选取 900 朵同一生长时期的贯叶金丝桃花蕾进行挂牌标记。从开花后的第 5 天开始,每天 10:00 取样,每次采收 60 个蒴果,每隔 3 d 采收一次。将每次采收的蒴果平均分成 3 组,分别取出籽粒并数出 1000 粒后称量其鲜质量,称重后阴干保存。待灌浆试验结束后带回甘肃农业大学实验室于 80℃ 烘干至恒重后称量其干质量,并在光学显微镜下观察不同采收期种子的形态变化。将称量得到的千粒种子鲜质量和干质量分别带入下列公式计算灌浆参数。

灌浆速率($\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot 1000 \text{粒}^{-1}$) = (后次取样千粒干质量 - 前次取样千粒干质量) / 取样间隔天数

平均灌浆速率($\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot 1000 \text{粒}^{-1}$) = 开花后某天千粒干质量 / 开花后天数

含水量(%) = (鲜质量 - 干质量) × 100 / 鲜质量

脱水速率($\% \cdot \text{d}^{-1}$) = (前次取样千粒含水量 - 后次取样千粒含水量) / 取样间隔天数

1.3 种子发芽特性

将不同时期采收的种子阴干后带回实验室进行种子发芽试验,以成熟的贯叶金丝桃种子作为对照组,每个处理设置 3 个重复,每个重复 60 粒种子。将种子放置在铺有滤纸的灭菌培养皿中,然后置于 25℃ 黑暗环境中进行恒温培养,并于每日 10:00 统计发芽数,试验持续记录 15 d,最后计算种子发芽势、发芽率和发芽指数。

发芽势(%) = 当天最大发芽数 / 供试种子数 × 100%

发芽率(%) = 发芽数 / 供试种子数 × 100%

发芽指数(%) = \sum (当天发芽数/对应天数)

1.4 数据统计分析

采用回归分析对籽粒千粒重(y)和开花后时间(x)拟合 Logistic 曲线方程^[14]: $y = k / (1 + e^{A+Bx})$, 以 k 表示理论上籽粒千粒重的最大值; A 、 B 为方程参数, A 为种子千粒重的初始值, B 为种子千粒重的增长速率; 其中, 贯叶金丝桃 $x \in [5, 47]$, k 、 A 和 B 的值采用曲线方程直线化法确定: 令 $y' = \ln(k-y)/y$, $k = [y_2^2(y_1+y_3) - 2y_1y_2y_3] / (y_2^2 - y_1y_3)$, y_1 、 y_2 、 y_3 分别为花后天数(x)对应的千粒重, 本文选择第 20、29、38 天分别为 y_1 、 y_2 、 y_3 对应的天数, 代入公式算出 k 值, 然后算出 Logistic 方程参数 $A' = A$ 、 $B' = B$, 最后按照郭凤霞等^[14]的方法估算灌浆高峰起始、结束时间等其他次级参数(表 1)。试验采用 Excel 2019 拟合 Logistic 曲线方程, SPSS 26 进行方差检验和相关性分析, Origin 9.0 制图。

表 1 贯叶金丝桃千粒质量与开花后天数配合 Logistic 方程的灌浆参数及其估算公式

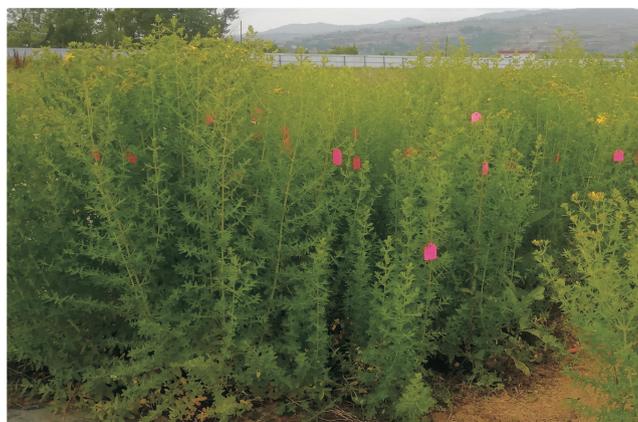
Table 1 Filling parameters and their estimated formulas based on Logistic equation fitting 1000-seed dry mass with filling duration in *H. perforatum*

灌浆参数 Filling parameters	估算公式 Estimated formula	灌浆参数 Filling parameters	估算公式 Estimated formula
灌浆高峰起始时间/d Maximum filling start time	$t_1 = (A - \ln(2 + 1.732)) / (-B)$	最大灌浆速率/(g · d ⁻¹) Maximum filling rate	$VM = -Bk/A$
灌浆高峰结束时间/d Maximum filling finish time	$t_2 = (A + \ln(2 + 1.732)) / (-B)$	灌浆渐增期持续天数/d Start-filling duration	$T_1 = t_1 - 0$
灌浆终期/d Filling terminating time	$t_3 = -(4.59512 + A) / B$	灌浆快增期持续天数/d Fast-filling duration	$T_2 = t_2 - t_1$
最大灌浆速率到达时间/d Time of maximum filling rate	$TM = -A/B$	灌浆缓增期持续天数/d Slow-filling duration	$T_3 = t_3 - t_2$

2 结果与分析

2.1 贯叶金丝桃种子灌浆过程中干物质积累的动态变化

礼县种植 2 年生贯叶金丝桃(*H. perforatum*)于 2022 年 6 月 1 日现蕾, 6 月底进入盛花期, 于 6 月 20 日(开花前 5 d)对植株进行挂牌标记, 图 1A 为挂牌当天贯叶金丝桃植株, 图 1B 为挂牌当天贯叶金丝桃花蕾, 图 1C 为贯叶金丝桃开花当天形态, 从开花后第 5 天称量籽粒千粒鲜质量。如图 2 所示, 在贯叶金丝桃的灌浆过程中, 千粒鲜质量呈现先增后降的变化趋势。开花后 5~11 d, 种子鲜质量显著增加($P < 0.05$)(快增期); 开花后 12~32 d, 种子鲜质量稳定增加(稳增期), 并在第 32 天种子鲜质量达到最大值 0.2697 g, 开花后 33 d 种子开始脱水, 鲜质量显著下降($P < 0.05$), 在 44 d 时降为 0.1667 g, 与开



(A) 挂牌当天贯叶金丝桃植株
Plants of *H. perforatum* on the day of tagging



(B) 挂牌当天贯叶金丝桃花蕾
Flower buds of *H. perforatum* on the day of tagging



(C) 开花当天贯叶金丝桃
Flowers of *H. perforatum*

图 1 标记当天的贯叶金丝桃植株、花苞及开花的形态

Fig.1 Plants, buds, and flowers of *H. perforatum* on the day of tagging

花后第 32 天相比降低了 38.20%。在灌浆过程中,千粒干重的增长趋势符合 Logistic 生长曲线,因此利用曲线方程直线化的方法拟合 Logistic 模型,直线化结果如图 3 所示,估算的灌浆各参数如表 2 所示,拟合的 Logistic 曲线方程为 $y=0.1941/(1+e^{3.7040-0.1488x})$, $A'=3.7040$, $B'=-0.1488$, $k=0.1941$, 其拟合程度 ($R^2=0.8474$, $P<0.01$) 达到显著水平,说明模型构建正确,方程参数估测真实性大。开花后的前 11 d,种子干物质缓慢积累,开花后的 11~32 d 种子干质量迅速增加进入灌浆快增期,作为干物质积累的关键阶段,积累量占干质量最大值的 91.58%。如表 2 中灌浆参数所示,开花后 16 天前为灌浆渐增期,开花后 16~34 d 为灌浆快增期,在第 26 天灌浆速率达到最大,即为 Logistic 曲线直线化后与 x 轴的交点,这与实际值基本吻合。开花后 34~56 天为灌浆稳增期,开花第 56 天灌浆结束,实际灌浆持续时间为 44 d,与估算值相比缩短 12 d。

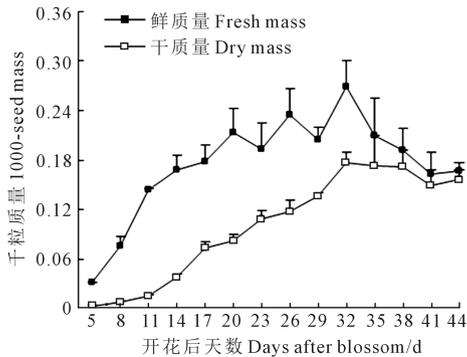


图 2 贯叶金丝桃种子灌浆过程中千粒鲜质量、干质量的变化

Fig.2 Changes of 1000-seed fresh and dry mass during the filling process of *H. perforatum*

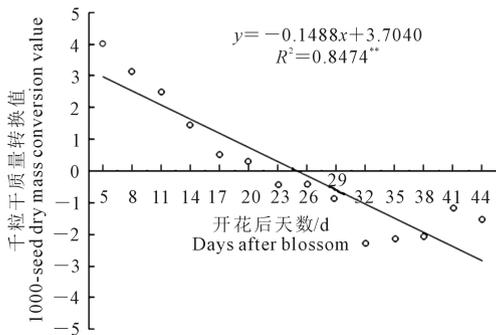


图 3 贯叶金丝桃籽粒千粒质量积累与灌浆进程配合 Logistic 方程直线化拟合结果

Fig.3 Linear results based on Logistic equation fitting 1000-seed dry mass with filling duration of *H. perforatum*

2.2 贯叶金丝桃种子灌浆速率及平均灌浆速率的变化

如图 4 所示,在贯叶金丝桃的灌浆过程中,灌浆速率整体呈波动变化,全程共出现 2 次高峰和 3 次低谷,开花后 14 d 出现第一次峰值 ($0.0120 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$),之后分别在开花后 17 d 和 23 d 出现 2 次低谷,开花后 29 d 出现最大值 ($0.0133 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$),与 Logistic 曲线方程估计的最大速率出现时间 (26 d) 基本一致,之后灌浆速率开始显著降低 ($P<0.05$),在开花后 38 d 出现最低值,之后有所升高但整体呈波动下降。平均灌浆速率整体呈先升高后下降的变化趋势,开花后 5~11 d,平均灌浆速率缓慢增加,开花后 11~14 d 开始显著升高 ($P<0.05$),17~32 d 稳定增加,在 32 d 达到最大值 ($0.0055 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$),之后开始缓慢下降,并在开花后 41 d 逐渐趋于稳定。通过相关性分析(表 3)发现,平均灌浆速率与千粒重、千粒鲜质量和灌浆持续时间呈极显著正相关 ($P<0.01$)。

表 2 贯叶金丝桃籽粒干质量积累与开花后天数配合 Logistic 方程估计的灌浆参数

Table 2 Estimation of filling parameters based on Logistic equation fitting seed dry mass with filling duration in *H. perforatum*

灌浆参数 Filling parameter	取值 Value
灌浆高峰起始时间(t_1) Maximum filling start time/d	16
灌浆高峰结束时间(t_2) Maximum filling end time/d	34
灌浆终期(t_3) Filling terminating time/d	56
最大灌浆速率到达时间(TM) Time of maximum filling rate/d	25
最大灌浆速率(VM) Maximum filling rate/ $(\text{g} \cdot \text{d}^{-1})$	0.0078
灌浆渐增期持续天数(T_1) Start-filling duration/d	16
灌浆快增期持续天数(T_2) Quick-filling duration/d	18
灌浆稳增期持续天数(T_3) Slow-filling duration/d	22

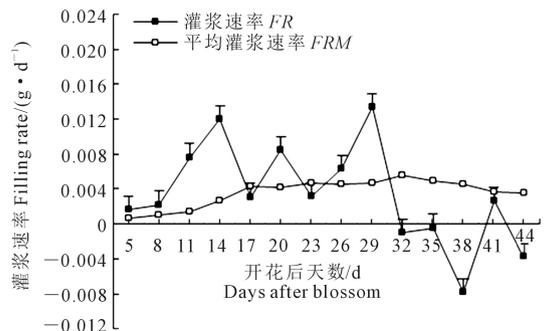


图 4 贯叶金丝桃种子灌浆速率和平均灌浆速率的变化
Fig.4 Changes of the seed filling rate and the mean filling rate of *H. perforatum*

表3 贯叶金丝桃种子灌浆参数与发芽指标的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between seed filling parameters and germination indicators of *H. perforatum*.

因素 Factor	千粒鲜质量 FW	千粒重 DW	含水量 WC	脱水速率 DR	灌浆速率 FR	平均灌浆速率 MFR	发芽率 GR	发芽势 GP	发芽指数 GI
千粒重 DW	0.738 **	1.000							
含水量 WC	-0.555 *	-0.951 **	1.000						
脱水速率 DR	0.422	0.017	0.144	1.000					
灌浆速率 FR	0.037	-0.442	0.498	0.274	1.000				
平均灌浆速率 MFR	0.912 **	0.858 **	-0.727 **	0.089	-0.143	1.000			
发芽率 GR	0.250	0.479	-0.661 **	-0.079	-0.448	0.107	1.000		
发芽势 GP	0.023	0.458	-0.639 *	-0.076	-0.442	0.098	0.997 **	1.000	
发芽指数 GI	0.021	0.467	-0.649 *	-0.075	-0.477	0.099	1.000 **	0.999 **	1.000
灌浆持续期 FD	0.591 *	0.943 **	-0.983	-0.003	-0.465	0.696 **	0.712 **	0.694 **	0.701 **

注: * 表示显著相关($P<0.05$), ** 表示极显著相关($P<0.01$)。

Note: * shows significant correlation ($P<0.05$); ** shows extremely significant correlation ($P<0.01$).

2.3 贯叶金丝桃种子灌浆过程中种子含水量及脱水速率的变化

如图5所示,在贯叶金丝桃的灌浆过程中,种子含水量呈先升高后下降的变化趋势,含水量最大值出现在开花后第11天,之后开始波动下降,开花后38 d左右种子含水量逐渐稳定,在44 d时达到最低值,从89.66%下降到6.05% ($P<0.05$)。在灌浆过程中,种子的脱水速率整体呈现波动变化,开花后38 d脱水速率逐渐平稳,此时的种子含水量也趋于稳定。通过相关性分析(表3)发现,在贯叶金丝桃的灌浆过程中,种子含水量与平均灌浆速率、灌浆持续期呈极显著负相关($P<0.01$),与千粒鲜质量呈显著负相关($P<0.05$)。

2.4 不同采收期贯叶金丝桃种子发芽特性的变化

由表4可知,采收时间对贯叶金丝桃种子的发芽率、发芽势和发芽指数均有较大的影响。开花后20 d(7月16日)采收的种子开始具备萌发条件,此时种子棕黑色,表面纹路较稀疏,宽约0.5 mm,长约0.8 mm左右(图6),并于种子着床后的第5 d开始萌发,种子的发芽率、发芽势和发芽指数均随着采收时间的延长而提高。开花后20~38 d之内采收的种子发芽能力较弱且差异不显著($P<0.05$),开花后41 d(8月6日)采收的种子发芽能力显著提高,种子发芽势在第41 d达到最大为57.78% ($P<0.05$) (表4),种子发芽率和发芽指数在第44天(8月9日)达到最大分别为93.33%和62.06,开花后41 d和44 d采收的种子发芽能力无显著差异,可以看出成熟的贯叶金丝桃种子具有较高的发芽率、发芽势和发芽指数,此时种子深棕黑色,表面具有明显蜂窝状纹路,宽约0.5 mm,长约1.2 mm。通过相关性分析(表3)发现,灌浆持续时间与种子发芽率、发芽

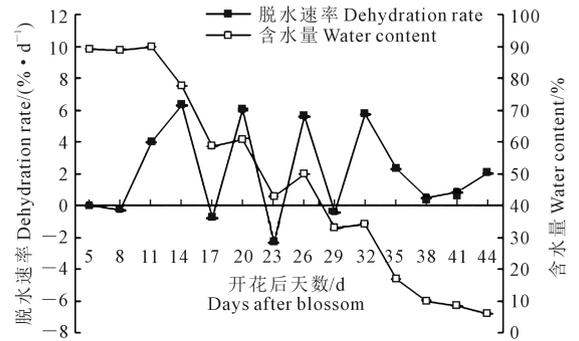


图5 贯叶金丝桃种子灌浆过程中含水量和脱水速率的变化
Fig.5 Changes of water content and dehydrate rate during seed filling of *H. perforatum*

表4 贯叶金丝桃种子发芽率、发芽势和发芽指数的变化

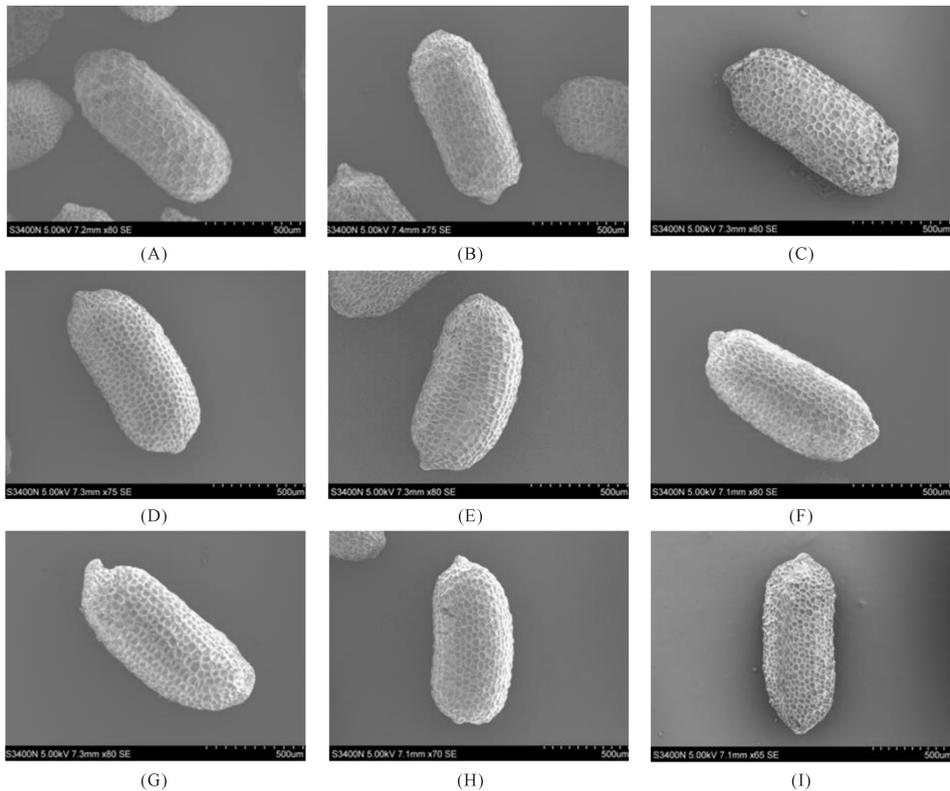
Table 4 Changes of the germination rate, germination potential and germination index in seeds of *H. perforatum*

开花后天数 Days after blossom/d	发芽率 Germination rate/%	发芽势 Germination potential/%	发芽指数 Germination index
20	1.67±0.58Dd	1.67±0.58Cc	0.94±0.48Ee
23	2.22±0.33Dd	2.22±0.33Cc	1.65±0.41Ee
26	3.33±0.58Dd	3.33±0.58Cc	2.30±0.86Ee
29	5.56±1.20Dd	3.33±1.00Cc	3.74±1.25DEde
32	16.11±0.88Cc	7.22±0.88Cc	9.21±1.06CDed
35	19.44±1.86Cc	8.89±1.45Cc	11.88±1.93Cc
38	43.89±2.85Bb	26.67±3.21Bb	28.47±3.14Bb
41	92.78±2.03Aa	57.78±2.6Aa	61.19±2.35Aa
44	93.33±2.08Aa	56.67±3.51Aa	62.06±2.00Aa

注:同列不同大写字母和小写字母分别表示在 $P<0.01$ 和 $P<0.05$ 水平差异显著。

Note: Different capital letters and lowercase letters in the same column indicate significant differences at the level of $P<0.01$ and $P<0.05$, respectively.

势和发芽指标呈极显著正相关($P<0.01$),种子含水量与种子发芽率、发芽势和发芽指标呈显著负相关($P<0.05$)。



注:图 6(A)~(I)依次为花后 20、23、26、29、32、35、38、41、44 d 采收的贯叶金丝桃种子。

Note: Figures 6(A)~(I) show the seeds of *H. perforatum* collected at 20, 23, 26, 29, 32, 35, 38, 41 and 44 days after flowering.

图 6 不同采收期的贯叶金丝桃种子电镜扫描图

Fig.6 Different harvesting periods of *H. perforatum* seeds by SEM

3 讨论

3.1 贯叶金丝桃种子灌浆过程的动态变化

种子灌浆是籽粒中光合产物相互转换、碳水化合物逐渐积累的过程^[15]。研究表明灌浆特性是影响种子产量和品质的重要因素,据报道灌浆时间长的大麦籽粒具有更高的耐热性和籽粒质量^[16];平均灌浆速率大的玉米籽粒中玉米核糖苷的含量更高^[17],灌浆持续时间决定种子采收时间,采收过早种子成熟度低,采收过晚会造成果荚开裂种子散落^[14]。目前,籽粒灌浆特性的研究主要集中在禾谷类作物,有关药用植物种子灌浆特性的报道较少。本研究结果表明,贯叶金丝桃种子灌浆期共持续 44 d,而通过拟合 Logistic 模型估测的灌浆期为 56 d,与试验结果相差 12 d,据文献报道灌浆时间会受气候因素及试验品种的影响,Wang 等^[18]研究发现轻度干旱会缩短水稻籽粒灌浆期,Jing 等^[19]发现高温胁迫会显著降低小麦灌浆速率,从而缩短灌浆时间,胡吉帮等^[20]发现轻微干旱胁迫会缩短小麦灌浆时间,同时增加小麦粒重。因此,本研究认为灌浆后

期(7月28日—8月6日)的高温干旱天气是造成贯叶金丝桃灌浆时间减少的主要原因,但是与方程估测值(0.1941 g)相比,千粒重的实际最大值(0.2697 g)更高,这表明灌浆后期的高温干旱虽然缩短了贯叶金丝桃的灌浆时间,但增加了籽粒中干物质的积累量。

除灌浆时间外,灌浆速率对于种子的干物质积累同样十分重要。Zhao 等^[21]研究发现,通过抑制 *miR1432* 基因的表达来促进水稻灌浆速率可使水稻籽粒重量增加 17.14%,Ren 等^[22]研究发现增施氮肥提高玉米的最大灌浆速率和平均速率,可以增加玉米籽粒的库容和最终产量。在贯叶金丝桃的灌浆进程中,灌浆速率在快增期出现 2 次低谷(7月10日和7月16日),据研究报道降雨天气会降低掌叶大黄 (*Rheum palmatum*)^[23]、甘肃贝母 (*Fritillaria przewalskii*)^[14] 和麻花秦艽 (*G. stramine*)^[11] 等药用植物种子的灌浆速率,因此本研究认为,7月10日—7月15日的连续降雨天气是造成灌浆速率出现低谷的主要原因,且在理想的气象条件下贯叶金丝桃种子的干物质积累量应该会有所增加。在贯

叶金丝桃的灌浆过程中,千粒鲜质量经历了渐增、快增、缓增和下降4个时期,千粒重经历了渐增、快增和缓增3个时期,这与前人对于甘肃贝母(*F. przewalskii*)^[14]、菘蓝(*Isatis indigotica*)^[24]、麻花秦艽(*G. stramine*)^[11]和掌叶大黄(*R. palmatum*)^[23]等药用植物灌浆特性的研究结果相同。此外,本研究还发现,千粒重与平均灌浆速率呈极显著正相关,与种子含水量呈极显著负相关,随着种子干物质积累量的稳定,平均灌浆速率趋于稳定,含水量也降至最低并逐渐稳定,说明平均灌浆速率的稳定以及含水量的降低是种子干物质积累停止的标志,代表着灌浆进程的结束。目前关于环境因素对贯叶金丝桃种子灌浆特性的影响还鲜见报道,本研究将在之后的工作中探索环境因素与贯叶金丝桃种子灌浆特性之间的关系,为贯叶金丝桃种子生产过程中产量和品质的控制提供理论依据,同时采取相应措施保障贯叶金丝桃栽培生产的正常进行。

3.2 采收期对贯叶金丝桃种子发芽特性的影响

药用植物种质资源是中医药事业健康发展的基础,种子的产量和质量决定田间出苗率,进而影响药材最终的产量与品质,灌浆过程是种子质量和库容形成的关键时期,种子的发芽率、发芽势和发芽指数是衡量种子质量的重要标准,有学者研究发现柴胡(*B. chinense*)^[10]、唐古特大黄(*R. tanguticum*)^[12]、麻花秦艽(*G. stramine*)^[11]和掌叶大黄(*R. palmatum*)^[23]的种子发芽率、发芽势和发芽指数与种子干质量、灌浆持续时间呈显著相关,与含水量呈显著负相关^[10],因此通过研究药用植物种子发芽特性可以更加直观地反映种子成熟度与灌浆特性之间的关系。本研究结果发现贯叶金丝桃种子的发芽率、发芽势和发芽指数与灌浆持续时间呈极显著正相关,与含水量呈极显著负相关,与上述研究结果一致。贯叶金丝桃开花后20 d前采收的种子干质量约为最大干质量的50%,不具备萌发能力,这与曹师等^[12]对唐古特大黄种子的研究结果相同,开花后41 d采收的种子发芽势达到最大值,44 d时有所下降,但差异不显著,同时种子发芽率在44 d时达到最大(93.33%),说明成熟度越高的贯叶金丝桃种子发芽能力越好,这与唐古特大黄(*R. tanguticum*)^[12]、苦苣菜(*Lactuca indica*)^[25]、艳山姜(*Alpinia zerumbet*)^[26]等药用植物的种子发芽试验结果一致。石有太等^[27]研究发现掌叶大黄种子发芽率、发芽势和发芽指数与种子可溶性糖和淀粉含量呈显著正相关,研究发现,叶底珠(*Securinega suffruticosa*)种子发芽势与蛋白质含量呈极显著正相关^[28],桃叶卫

矛(*Euonymus bungeanus*)种子发芽率与不饱和脂肪酸存在一定相关性^[29],但也有研究认为三七(*Panax notoginseng*)种子营养物质含量与种子活力和发芽率无显著影响^[30]。综上,本研究认为种子营养物质含量可能是影响贯叶金丝桃种子萌发力的重要因素,但是,不同营养物质与贯叶金丝桃种子发芽能力间的关系还有待进一步研究。

4 结论

在贯叶金丝桃灌浆过程中,种子千粒鲜质量先升高后降低,最后趋于千粒重水平;千粒重和平均灌浆速率呈“S”型变化曲线,灌浆速率和脱水速率呈波动趋势,含水量呈波动下降趋势。分析灌浆参数与发芽指标的相关性发现,种子千粒重与平均灌浆速率、灌浆持续期呈极显著正相关,与含水量呈极显著负相关;发芽率、发芽势和发芽指数与灌浆持续期呈极显著正相关,与含水量呈极显著负相关。因此,本研究认为甘肃礼县贯叶金丝桃繁种时,以开花后44 d左右(8月9日前后)为种子适宜采收期,根据田间观察此时的贯叶金丝桃果皮深褐色,果顶微微开裂;种子长卵圆形,深棕黑色,质地坚硬,表面具有蜂窝状纹路,长约1.2 mm,宽约0.5 mm。

参考文献:

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 242-243.
Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China: part 1[M]. Beijing: China Medical Science Press, 2020: 242-243.
- [2] BUSSMANN H, HÄBERLEIN H, BOONEN G, et al. Effect of St. John's wort extract Ze 117 on the lateral mobility of β_1 -adrenergic receptors in C6 cells [J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2023, 157: 114006.
- [3] JUNG J H, HWANG J, KIM J H, et al. Phytochemical candidates repurposing for cancer therapy and their molecular mechanisms [J]. Seminars in Cancer Biology, 2021, 68: 164-174.
- [4] MOHAMED F F, ANHLAN D, SCHÖFBÄNKER M, et al. *Hypericum perforatum* and its ingredients hypericin and pseudohypericin demonstrate an antiviral activity against SARS-CoV-2 [J]. Pharmaceuticals, 2022, 15(5): 530.
- [5] KIM J, LEE S L, KANG I, et al. Natural products from single plants as sleep aids: a systematic review [J]. Journal of Medicinal Food, 2018, 21(5): 433-444.
- [6] 赖思佳, 王达洋, 李天力, 等. 基于分子对接和网络药理学的五指毛桃-贯叶金丝桃治疗微血管性心绞痛的机制研究 [J]. 中国中药杂志, 2021, 46(24): 6474-6483.
- [7] LAI S J, WANG D Y, LI T L, et al. Mechanism of ficus hirta-hypericum perforatum in treatment of microvascular angina based on network pharmacology and molecular docking [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2021, 46(24): 6474-6483.

- [7] OLIVEIRA A I, PINHO C, SARMENTO B, et al. Neuroprotective activity of *Hypericum perforatum* and its major components[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 1004.
- [8] JANG E. Hyperoside as a potential natural product targeting oxidative stress in liver diseases[J]. *Antioxidants*, 2022, 11(8): 1437.
- [9] 姚园园. 低温促进贯叶连翘中金丝桃素积累的机制研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2019.
- YAO Y Y. Study on mechanism of low temperature enhancing hypericin accumulation in *Hypericum perforatum* [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2019.
- [10] 晋昕, 任兵, 曹爱农, 等. 柴胡种子灌浆动态及发芽特性研究[J]. *中国中药杂志*, 2014, 39(19): 3731-3735.
- JIN X, REN B, CAO A N, et al. Grain filling dynamics and germination characteristics of *Bupleurum chinense* seeds[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2014, 39(19): 3731-3735.
- [11] 米永伟, 陈垣, 郭凤霞, 等. 麻花秦芥种子灌浆充实动态及其发芽特性研究[J]. *草业学报*, 2013, 22(6): 129-135.
- MI Y W, CHEN Y, GUO F X, et al. A study on the filling dynamics and germination characteristics of *Gentiana straminea*[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(6): 129-135.
- [12] 曹师, 郭凤霞, 陈垣, 等. 唐古特大黄种子灌浆充实动态及发芽特性研究[J]. *草业学报*, 2014, 23(6): 225-232.
- CAO S, GUO F X, CHEN Y, et al. The filling dynamics and germination traits of *Rheum tanguticum* seeds [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(6): 225-232.
- [13] MENEGAZZI M, MASIELLO P, NOVELLI M. Anti-tumor activity of *Hypericum perforatum* L. and hyperforin through modulation of inflammatory signaling, ROS generation and proton dynamics[J]. *Antioxidants*, 2021, 10(1): 18.
- [14] 郭凤霞, 常彦莉, 林玉红, 等. 甘肃贝母种子灌浆特性研究[J]. *草业学报*, 2010, 19(2): 97-102.
- GUO F X, CHANG Y L, LIN Y H, et al. Studies on grain filling characteristics of *Fritillaria przewalskii*[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2010, 19(2): 97-102.
- [15] TENG Z N, CHEN Y K, MENG S, et al. Environmental stimuli: a major challenge during grain filling in cereals [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(3): 2255.
- [16] SHIRDELMOGHANLOO H, CHEN K F, PAYNTER B H, et al. Grain-filling rate improves physical grain quality in barley under heat stress conditions during the grain-filling period[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 858652.
- [17] WEI S S, WANG X Y, LI G H, et al. Plant density and nitrogen supply affect the grain-filling parameters of maize kernels located in different ear positions[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 180.
- [18] WANG X P, FU J X, MIN Z S, et al. Response of rice with overlapping growth stages to water stress by assimilates accumulation and transport and starch synthesis of superior and inferior grains[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(19): 11157.
- [19] JING J G, GUO S Y, LI Y F, et al. The alleviating effect of exogenous polyamines on heat stress susceptibility of different heat resistant wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 7467.
- [20] 胡吉帮, 王晨阳, 郭天财, 等. 灌浆期高温和干旱对小麦灌浆特性的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2008, 42(6): 597-601, 608.
- HU J B, WANG C Y, GUO T C, et al. Effects of high temperature and drought stress on grain filling characteristics in wheat during grain filling period [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2008, 42(6): 597-601, 608.
- [21] ZHAO Y F, PENG T, SUN H Z, et al. MiR1432-*O*sACOT (Acyl-CoA thioesterase) module determines grain yield via enhancing grain filling rate in rice [J]. *Plant Biotechnology Journal*, 2019, 17(4): 712-723.
- [22] REN H, ZHAO M, ZHOU B Y, et al. Understanding physiological mechanisms of variation in grain filling of maize under high planting density and varying nitrogen applicate rate[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 998946.
- [23] 石有太, 陈垣, 郭凤霞, 等. 掌叶大黄种子灌浆动态及其发芽特性研究[J]. *草业学报*, 2009, 18(3): 178-183.
- SHI Y T, CHEN Y, GUO F X, et al. Studies on filling dynamic and germination characteristics of *Rheum palmatum* seeds[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(3): 178-183.
- [24] 王宏霞, 蔡子平, 王国祥, 等. 板蓝根种子灌浆特性研究[J]. *时珍国医国药*, 2018, 29(12): 3036-3038.
- WANG H X, CAI Z P, WANG G X, et al. Studies on filling characteristics of *Isatis indigotica* seeds[J]. *Lishizhen Medicine and Materia Medica Research*, 2018, 29(12): 3036-3038.
- [25] 张靓, 胡远彬, 季杨, 等. 不同成熟度苦苣菜种子发芽特征比较[J]. *耕作与栽培*, 2023, 43(1): 12-17.
- ZHANG L, HU Y B, JI Y, et al. Comparison of germination characteristics of seeds with different maturity degrees in *Lactuca indica*[J]. *Tillage and Cultivation*, 2023, 43(1): 12-17.
- [26] 曾亚军, 罗在柒, 周凤娇. 艳山姜种子萌发试验[J]. *广东农业科学*, 2012, 39(11): 49-51.
- ZENG Y J, LUO Z Q, ZHOU F J. Research on seed germination test on *Alpinia zerumbet*[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2012, 39(11): 49-51.
- [27] 石有太, 陈垣, 郭凤霞, 等. 掌叶大黄籽粒营养物质积累动态及其发芽特性研究[J]. *中国中药杂志*, 2009, 34(15): 1979-1983.
- SHI Y T, CHEN Y, GUO F X, et al. Studies on nutrient accumulation dynamic and germination characteristics of *Rheum palmatum* seeds[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2009, 34(15): 1979-1983.
- [28] 徐宁伟, 姚楠, 沈江洁, 等. 不同年份叶底珠种子营养物质含量、保护酶活性与种子活力研究[J]. *种子*, 2022, 41(3): 25-31.
- XU N W, YAO N, SHEN J J, et al. Effects of storage year on seed nutrient content, seed protective enzyme activity and seed vitality of *Securinega suffruticosa*[J]. *Seed*, 2022, 41(3): 25-31.
- [29] 宋红, 李万义, 丁格根其尔, 等. 不同贮藏方法对桃叶卫矛种子萌发和营养物质的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2015, 43(6): 30-33, 63.
- SONG H, LI W Y, DING G G Q E, et al. Effects of different storage methods on seeds germination and nutrient substance of *Euonymus bungeanus* max-im [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2015, 43(6): 30-33, 63.
- [30] 葛进, 魏琼, 曲媛, 等. 三七种子质量分级研究[J]. *中药材*, 2017, 40(7): 1516-1520.
- GE J, WEI Q, QU Y, et al. Research on seed germination test on *Alpinia zerumbet*[J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2017, 40(7): 1516-1520.