

中药材干燥过程中的理化性质变化规律与机制分析

喻芬¹, 万娜^{1,2*}, 李远辉^{1*}, 王学成¹, 伍振峰^{1,3}, 刘振峰⁴, 杨明^{1,3}

1. 江西中医药大学 创新药物与高效节能降耗制药设备国家重点实验室, 江西 南昌 330004

2. 江西中医药大学药学院, 江西 南昌 330004

3. 江西中医药大学 现代中药制剂教育部重点实验室, 江西 南昌 330004

4. 宜春万申制药机械有限公司, 江西 宜春 336000

摘要: 所谓“药材好, 药才好”。干燥是中药材采收后产地加工过程不可或缺的关键操作单元之一, 但由于中药材在干燥过程受温度影响, 极易引起外观性状、有效成分及生物活性的转变, 直接影响到中药材的药用价值与经济价值。因此, 了解干燥过程中药材质量变化机制, 全面分析中药材的物理性质和化学成分在干燥过程中的动态变化规律, 对指导中药材干燥具有重要意义。以中药材干燥过程中理化性质的变化规律为分析视角, 通过对相关文献进行分析, 综述了干燥工艺对中药材理化性质改变的原因和作用机制。以期对中药材干燥工艺的选择提供参考依据, 进而保障中药材品质。也为中药材干燥工艺和装备的进一步研究、设计和创新提供基础。

关键词: 中药材; 干燥; 理化性质; 变化规律; 变化机制

中图分类号: R282.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2670(2021)07-2144-10

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2021.07.031

Analysis on change rule and mechanism in physical and chemical properties of Chinese herbal medicines during drying

YU Fen¹, WAN Na^{1,2}, LI Yuan-hui¹, WANG Xue-cheng¹, WU Zhen-feng^{1,3}, LIU Zhen-feng⁴, YANG Ming^{1,2}

1. State Key Laboratory of Innovation Drug and Efficient Energy-Saving Pharmaceutical Equipment, Jiangxi University of Traditional Chinese Medicine, Nanchang 330004, China

2. College of Pharmacy, Jiangxi University of Traditional Chinese Medicine, Nanchang 330004, China

3. Key Laboratory of Modern Preparation of TCM, Ministry of Education, Jiangxi University of Traditional Chinese Medicine, Nanchang 330004, China

4. Yichun Wanshen Pharmaceutical Machinery Co., Ltd., Yichun 336000, China

Abstract: As the saying goes, “good medicinal herbs make good herbal medicines”. Drying is one of the indispensable key operating units for the processing of origin after the harvest of Chinese herbal medicines. However, the appearance, active components and biological activities of Chinese medicinal materials are easy to change due to the temperature in the drying process, which directly affects the medicinal value and economic value of Chinese herbal medicines. Therefore, it is of great significance for guiding the drying of Chinese herbal medicines to understand the change mechanism of Chinese herbal medicines and comprehensively analyze the dynamic changes of physical properties and chemical components during the drying process. Based on the changes of physicochemical properties in the drying process of Chinese herbal medicines, the reasons and mechanism of the drying process on the changes of the physical and chemical properties of Chinese herbal medicines are summarized in this paper through analysis of relevant literatures. In order to provide reference for the selection of drying technology of Chinese herbal medicines, and then to ensure the quality of Chinese herbal medicines. It also provides the basis for the further research, design and innovation of drying technology and equipment of Chinese herbal medicines.

Key words: Chinese herbal medicines; drying; physicochemical properties; change regularities; change mechanism

收稿日期: 2020-09-13

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (81903929); 国家自然科学基金地区项目 (81960718); 江西中医药大学 1050 青年人才工程资助项目

作者简介: 喻芬 (1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为中药药剂学。Tel: 15083522882 E-mail: yu1570301314@163.com

*通信作者: 万娜, 讲师, 从事中药新剂型与新技术研究。Tel: (0791)87118658 E-mail: wanna988@163.com

李远辉, 男, 博士, 副教授, 主要从事中药制剂新技术和新工艺研究。Tel: (0791)87118658 E-mail: Liyuanhui1989@163.com

中药材作为我国具有原创优势的自然资源，在防治疾病、保障人民健康和民族繁衍中起着不可忽视的作用。由于新鲜中药材含水率（60%~90%）较高，贮藏时容易遭受机械损伤和微生物侵染而腐烂、变质，失去药用价值和经济价值。干燥可以去除中药材内部大量水分，抑制酶和微生物的活性，延长保存时间，降低中药材贮藏过程中的品质损失。然而，干燥过程中的相关因素如温度、压力、氧化剂、干燥媒介等，将对中药材的理化性质和生

物活性产生不同程度的影响^[1]，如形态收缩、颜色褐变、有效成分损失等，由此引起质量的劣变，从而影响疗效。在长期的研究实践中，人们发现干燥过程对中药材质量的影响存在某些规律，并研究分析了相关潜在机制（图1）。因此，本文对干燥过程中中药材物理性质（色泽、气味、形态、微观结构）和化学性质（多糖、黄酮、多酚、挥发油、其他成分）的变化规律和机制研究进行归纳分析，为中药材干燥工艺的选择提供参考依据，保证中药材的品质。

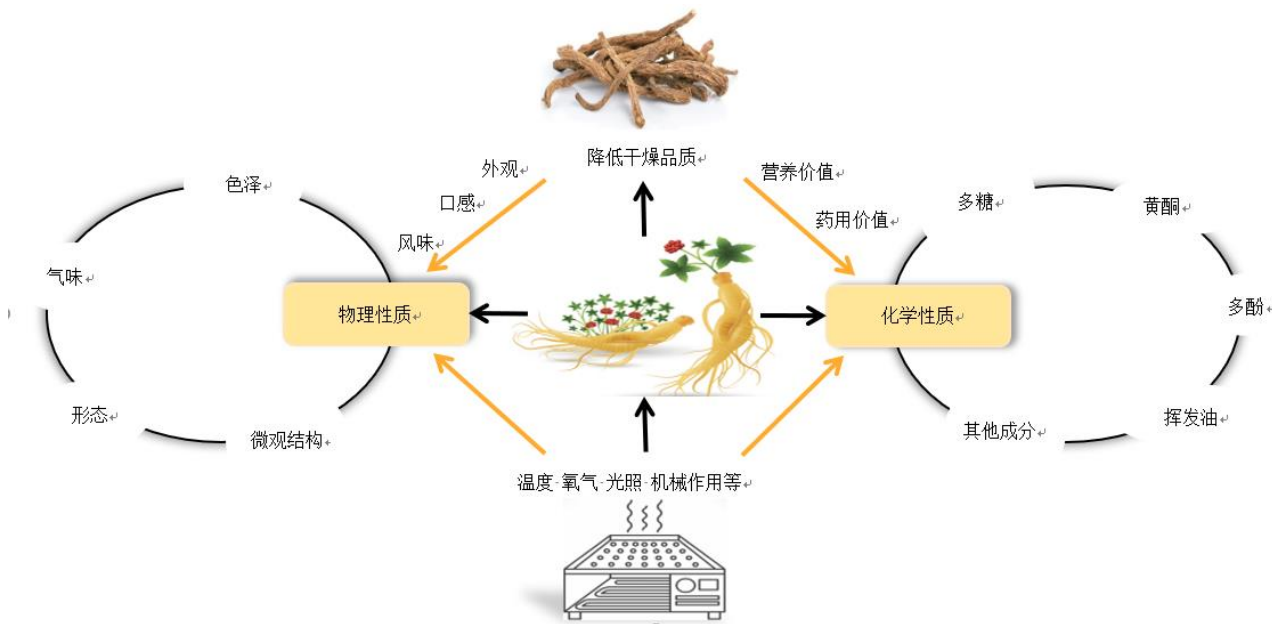


图1 中药材干燥过程中物理性质和化学性质的变化规律和机制研究

Fig. 1 Change rule and mechanism in physical and chemical properties of Chinese herbal medicines during drying

1 物理性质的变化

1.1 色泽

干燥对中药材色泽的影响主要有2个方面：一是干燥过程会引起中药材中相关成分生成褐色聚合物，导致中药材的色泽变暗，简称褐变；二是中药材中含有的色素成分在干燥过程中发生降解，使中药材的固有色泽消退。因此，中药材色泽的变化与其内在成分发生的化学变化密切相关。经调研发现，干燥过程对中药材色泽的影响主要是发生了以下3个化学变化：酶促褐变、非酶促褐变以及色素降解。

1.1.1 酶促褐变 酶促褐变是中药材中的酚类物质在酶（多酚氧化酶、过氧化物酶、氧化酶）作用下形成醌，醌类物质再自我聚合形成类黑色素，从而导致干制品褐变。发生酶促褐变需要3个条件：多酚类物质、酶和氧气^[2]。在大部分正常生长的新

鲜中药材中，存在的酶和多酚类物质通过一系列膜系统实现区域化分布，两者不易发生褐变反应。因此，酶促褐变主要发生在中药材的加工过程中，如干燥。干燥影响酶促褐变的因素主要有以下3点：（1）组织细胞破坏程度，各种干燥工艺基本是利用高温或其他作用（超声波振动、反复压力振动）破坏细胞膜的通透性达到加速中药材脱水的目的。这一过程会产生以下3种效应，从而导致酶原激活，最后经一系列反应生成褐色素。一是氧气大量侵入组织细胞内；二是引起细胞内某些酚类物质渗出至外界环境；三是酶和底物区域化分布的破坏。（2）温度因素，干燥温度对酶活性具有显著影响，引起中药材发生不同程度的褐变反应。在干燥前期，中药材受热时间短，温度较低，酶的活性较强，褐变反应剧烈。而在干燥后期，中药材的较高温度和低水分活度导致酶的活性处于较低水平^[3]，酶促褐变反

应基本不发生。研究表明当干燥温度约为 55 °C 时,多酚氧化酶的活性长期保持较高水平,而在高于 75 °C 的温度下仅观察到中等活性^[4]。(3) 氧气因素,氧是酶促褐变不可缺少的条件之一。因此,以氧气为干燥介质的干燥工艺更容易发生酶促褐变反应,导致中药材色泽变暗。真空干燥、真空脉动干燥等方法能显著地脱氧,将有效控制中药材干燥过程中的酶促褐变。

1.1.2 非酶促褐变 中药材中的化学成分特别丰富,如抗坏血酸、糖类、氨基酸。这些成分可以发生非酶促褐变反应,导致中药材的色泽劣变。非酶促褐变是不需要生物酶作为催化剂的反应,且主要包括抗坏血酸褐变、焦糖化反应和美拉德反应。其中抗坏血酸褐变主要发生在果蔬和果汁加工处理过程中,而焦糖化反应需要高温(140~170 °C)环境将糖类物质加热到其熔点以上温度,从而使中药材产生发焦变黑的现象。因此,在一般的干燥过程中很少发生上述非酶促褐变。美拉德反应是羰基与氨基化合物上的氨基发生糖-氨基反应,经过一系列重排、脱水、缩合及聚合反应生成黑褐色物质的过程^[5],是干燥过程中导致中药材发生非酶促褐变的主要反应。在干燥过程中,温度和中药材水分含量的变化均会影响美拉德反应的发生。温度越高,越有利于诱导美拉德反应。相关研究表明干燥温度在 80 °C 下的美拉德反应最剧烈^[6]。当中药材的含水量降至 10%~15% 时,美拉德反应易发生,而完全干燥的中药材难以发生此反应。此外,pH 值和中药材中糖的种类也会影响美拉德反应。当 pH 值小于 7.0 时反应不明显,pH 值大于 7.0 时反应显著加快,且 pH 值继续增大至 11.0 时,美拉德反应又会减弱。吴惠玲等^[7]指出蔗糖、木糖、半乳糖、葡萄糖、果糖参与美拉德反应的活性次序为:木糖>半乳糖>葡萄糖>果糖,蔗糖没有显示反应活性。虽然以上 2 个影响参数与干燥过程没有很大联系,但是可以为新型干燥工艺的开发提供一定参考。

1.1.3 色素降解 大部分中药材都含有色素成分,如花青素、叶绿素、胡萝卜素、姜黄色素。色素的降解会导致中药材原有色泽消退。干燥影响色素降解的途径主要有:(1) 热降解, β -胡萝卜素在高温下会发生先氧化后降解的反应,引起其含量下降。高温还容易引起花色苷脱苷或开环,最后降解生成酚酸和醛类。(2) 光降解,自然晒干下,光照易导致部分中药材色素成分的降解,如 β -胡萝卜素、花

色苷、花青素。其中花色苷会因光照降解生成 C₄ 羧基的中间产物,该物质在 C₂ 位置上水解开环生成查耳酮,查耳酮继续降解成苯甲酸等产物^[8]。(3) 糖降解,这主要与美拉德反应生成的糠醛类化合物或衍生物有关。它们可以通过亲电作用快速地与花色苷或花色苷结合,最后导致色素降解^[9]。(4) 酶降解,干燥过程中合适的温度能够激活相关酶的活性,引起色素发生各种途径的酶降解。叶绿素在叶绿素酶和脱镁叶绿素酶的作用下,经一系列反应生成无荧光物质。酚类物质在过氧化物酶的作用下氧化形成自由基,促进膜脂过氧化,破坏叶绿体稳定,从而引起叶绿素的降解^[10]。多酚氧化酶可直接或间接氧化花色苷,使花色苷的邻苯二酚结构变成苯醌结构,苯醌再进一步氧化花色苷使其生成无色化合物^[11]。另外,多酚氧化酶能促进多酚生成 O-醌类化合物,该生成物进一步与花色苷快速反应生成花色苷-O-醌的缩合物^[12]。综上所述,中药材中色素成分在干燥过程中的降解途径较多,容易因高温、光照、酶活性、氧气和组织细胞破坏等因素而造成色泽的劣变。因此,采用非热干燥技术可以减少加热带来的负面效应,如冷冻、射频、高压脉冲电场等技术。通过建立新型安全的非热干燥方法可以达到中药材护色调控的目的,并进一步研究其护色机制,有助于维持中药材原有色泽。

1.2 气味

气味在决定中药材干制品的质量以及消费者的喜好和接受程度方面起着重要作用。构成中药材气味的成分主要包括酯类、醛类、内酯类、萜类、醇类、羰基以及含硫、含氮等化合物^[13]。在不同的干燥工艺和干燥条件下,上述成分或中药材中的其他成分会发生质和量的不同变化,对中药材的气味产生不同程度的影响。具体表现在以下 3 个方面:一是芳香气味变浓;二是气味变淡甚至散失;三是产生不愉悦的气味。

在干燥过程中,中药材中的蛋白质、类脂和碳水化合物等成分会发生以下化学反应,生成内酯、饱和与不饱和醛和脂肪酸等化合物,从而形成复杂的香气系统。(1) 热过氧化:脂肪酸和脂类在干燥过程中易发生热过氧化反应,从而生成一系列特征香味成分。如长碳链脂肪酸经过一系列热氧化生成 γ -内酯^[14],脂类在 70 °C 的干燥条件下易发生热过氧化产生 γ -辛内酯和 γ -庚内酯。(2) 热分解或热降解:不饱和脂肪酸类化合物和脂肪在受热时会发生

热降解或热分解反应,分别生成具有芳香的小分子酸类化合物(乙酸)和醇类化合物。有研究表明,随着干燥温度的升高,红枣中酸类物质的相对质量分数逐渐增加^[14]。(3)酶合成:一些氨基酸和不饱和脂肪酸在脂肪氧化酶和醛还原酶等生物酶作用下,直接形成具有香味的醇类物质。不挥发性直链酯、缬氨酸和异亮氨酸在高温及酶的作用下可生成易挥发的支链酯,增加中药材的香味。(4)美拉德反应:美拉德反应产物通常具备一定香味。如含氮杂环化合物(如吡嗪、吡咯等)具有坚果香味;环状烯酮醇结构(如麦芽酚等)具有焦糖香味;单羰基化合物具有酮醇香味;羰基化合物具有焦香味。

干燥过程中,易挥发香气成分的浓度降低是中药材香气变淡或散失的主要原因。其影响因素主要有:(1)高温,温度过高会引起对单萜烯烃、含氧烯烃类成分发生热降解,如 d -柠檬烯、 β -石竹烯、冰片、芳樟醇、乙酸龙脑酯等^[15]。(2)光照,自然晒干下,多烯类成分易发生光降解。(3)氧气和组织结构的破坏程度,干燥会引起中药材组织结构破坏,使一些易挥发的成分挥发或发生氧化反应,尤其是在干燥介质中含有氧气的干燥工艺下反应更剧烈。

通过控制合理的干燥条件,中药材气味劣变的现象较少。而发生这种劣变也主要归因于干燥温度设置不合理。具体表现在以下3个方面:(1)干燥温度过高,导致美拉德反应更剧烈,并生成具有焦糊气味的成分。徐晚秀等^[16]研究表明干燥温度为70、80℃时,生姜原始风味气味散发强度最高,保留的原始气味少,同时焦糊气味最严重。(2)对于富含油脂的中药材,如桃仁、火麻仁等,在干燥过程中受热易发生走油现象,同时伴随着“哈喇味”。(3)油脂和脂肪酸成分受热易氧化,导致酸价升高,出现酸败现象并产生不良气味。此外,干燥过程中会因各种化学反应生成具有不良气味的成分(α -松油醇),从而引起气味的劣变,最终影响中药材的品质。

1.3 体积皱缩

中药材的结构可以被认为是由水溶液和生物高聚物元素组成的一个三维固相网络或基质。其特定结构及其元素在平衡状态下的机械特性决定了样品的体积并确定其大小和形状。在干燥过程中,中药材的分子结构和各类成分的动态平衡状态被打破,导致中药材发生变形,即体积皱缩。具体表现在以下几个方面:干燥引起中药材内部水分占据的空间不断被排空并充满空气,中药材组织无法保

持其结构排列,导致其内部压力和外部压力的不平衡,形成水分梯度,从而产生收缩应力而发生形变^[17];干燥会造成中药材的表皮结构坍塌;干燥使细胞膨胀压力减小甚至消失,导致细胞结构由于内部热应力而塌陷。因此,热应力和收缩应力是干燥过程中中药材发生塌陷、皱缩的原因。其中水分梯度产生的应力几乎在整个干燥过程中存在,是中药材皱缩的主要原因。干燥过程中,影响中药材皱缩率的参数主要有干燥温度、干燥风速和干燥空气的相对湿度。干燥温度对提高干燥速率起着重要作用,最终影响中药材的皱缩^[18]。在低温条件下,水分从中药材内部到外部的扩散速度与从表面蒸发的速率相同,不会形成尖锐的水分梯度,直到干燥的最后阶段才均匀收缩,体积皱缩率较小。如果干燥温度较高,整个中药材中的水分梯度较大,热应力和收缩应力也会相应增大,导致体积皱缩严重。但是,高温也可能使中药材表面形成硬壳,这种硬壳具有支撑物料骨架的作用,可以延缓或阻止中药材进一步收缩。风速是影响干燥过程中中药材收缩的另一个重要因素。一般而言,中药材在干燥过程中的收缩率随着风速的增加而减少^[19-20]。这可能是由于干燥不同阶段由内向外传质的变化所致。在外控能量传递的干燥过程中,传质既有内扩散又有外对流。在低风速时,表面阻力占优势,因此样品中的水分曲线相对平坦,从而产生较低的内应力。因此,中药材在低风速时会均匀收缩。有时空气的相对湿度可以控制中药材的皱缩。在相对湿度低的情况下,Biot数(传热计算中使用的无量纲量)增加,最终限制了中药材的皱缩^[20]。在较低的相对空气湿度下,表面硬化会明显影响中药材的皱缩率。

1.4 微观结构

干燥过程涉及到传质、传热过程,这些过程将引起中药材形变和内部张力增加,从而破坏和损伤其内部组织结构,导致中药材微观结构的变化。中药材微观结构的变化主要表现在孔隙的大小和均匀度方面,且这一变化会直接影响中药材干制品的复水性能、硬度、酥脆性等性能。干燥过程中孔隙率的变化主要基于以下2点:(1)水分的迁移的方向和速率,一般而言,若干燥工艺使样品水分由外向内蒸发,那么在蒸发过程中温度梯度和湿度梯度按照相反方向进行,干燥速率慢,干燥时间长,对组织结构破坏程度大,导致孔隙大小不均匀。如热风干燥过程中,中药材外表面温度高于内部温度,

水分蒸发较内部快,故干燥后干制品表面硬化现象严重,内部组织结构紧密,孔隙分布不均匀,内部颗粒连接现象严重,造成流体较难通过的死端孔隙较多^[21]。在微波或红外干燥过程中,中药材的温度梯度与湿度梯度按照相同方向迁移,且水分迁移速度快,容易形成多孔且疏松的结构。Koç等^[22]表明冷冻干燥的物料孔隙率最高。因为冷冻干燥过程中冰的升华会产生大量且均匀的孔隙,可基本保持物料组织细胞原有的微观结构。(2)结构的破坏程度和内在化学成分的含量和类型会分别影响固体基质机械强度、毛细管压力和玻璃化转变,从而对孔隙率产生一定影响。干燥过程中组织结构的破坏和

高温环境可能发生中药材中原溶性果胶向可溶性果胶的转变,这将引起中药材的固体基质机械强度下降,导致中药材的硬度下降,细胞折叠塌陷。何玉倩等^[23]报道,纤维素随着水分的蒸发会产生形变,甚至断裂,组织收缩严重,导致孔隙变小甚至消失。Lewicki等^[24]报道,多糖和蛋白质的非结晶部分以及细胞液的其他成分可能形成非晶结构,这些结构的玻璃化转变温度随着中药材内水含量的减少而急剧增加,从而在干燥的最后阶段转化为玻璃态,导致中药材的机械强度显著增加。在以上情况下,中药材收缩受阻而孔隙相应产生。

干燥对中药材物理性质的影响见表1。

表1 干燥对中药材物理性质的影响

Table 1 Effect of drying on physical properties of Chinese herbal medicines

物理性质	表现形式	主要原因
色泽	褪色	色素降解
	褐变	酶促褐变、美拉德反应
气味	香味增加	热过氧化、热降解、酶合成、美拉德反应
	气味散失	热降解、光降解、氧化、结构破坏
	不良气味产生	美拉德反应、酸败、生成不良气味化合物
体积	皱缩	表皮结构坍塌;水分排出,产生收缩应力;细胞膨胀压力减小甚至消失,在热应力作用下塌陷
微观结构	疏松多孔,孔隙均匀	温度梯度与湿度梯度迁移方向相同,且水分迁移速度快
	结构紧密,折叠塌陷	发生玻璃化转变;温度梯度和湿度梯度按相反方向进行,干燥速率慢,干燥时间长;固体基质机械强度、毛细管压力改变

2 化学性质的变化

2.1 多糖

多糖类化合物具有抗肿瘤、增强免疫、调节肠道微环境、抗氧化等作用,是中药材重要的活性成分之一^[25]。干燥过程中可能会破坏多糖中含有的多种饱和及不饱和的糖苷键、单糖残基、及空间构象,进而影响多糖生物活性并导致其含量降低。在干燥过程中,多糖含量下降的原因主要包括以下几点:(1)呼吸作用,呼吸作用的强弱会影响多糖消耗的程度。干燥过程中的真空环境和低温环境,使酶的活性减弱,导致中药材的呼吸作用弱,减少了多糖含量的损失。而干燥过程合适的工艺条件(温度、氧气等)可能使中药材的呼吸作用较强,增加多糖消耗。如在传统的热风干燥过程中,由于较长的干燥时间和较高温度,且未隔绝空气,使金钗石斛叶保持相对较强的呼吸作用,增加了多糖的降解;而

冷冻干燥在-60℃下进行,酶活性降低,且隔绝氧气,使药材的呼吸作用变弱,减少了多糖类成分的降解^[26]。(2)酶降解,在一定干燥温度下,多糖裂解酶和多糖水解酶等相关酶的活性较高,导致多糖降解为小分子糖类或其他物质,从而使多糖含量下降。(3)高温降解,高温降低多糖的含量主要表现在以下3个方面:①高温容易破坏多糖的聚集力和剪切力,使多糖降解为小分子物质。殷少文等^[27]报道超过80℃干燥温度会使青钱柳多糖发生热降解反应。孟映霞等^[28]研究发现微波干燥的总多糖含量最少,并猜测可能是因为干燥过程中局部温度过高,样品发生了美拉德或焦糖化反应,部分多糖转化为寡糖或焦糖。②某些多糖在高温条件下极易发生氧化变性^[29]。如糖醛酸在高温环境下极易发生氧化变性反应,导致多糖的抗氧化能力减弱。③高温条件下蛋白质易与多糖发生美拉德反应,生成一些

大相对分子质量和中等相对分子质量的产物^[30]。(4) 其他原因, 以空气作为干燥介质的干燥工艺导致多糖发生氧化降解。喷雾干燥和超声波干燥会产生剪切力, 使多糖(壳聚糖)的侧链等结构断裂, 导致多糖降解为其他物质。此外, 干燥也可能引起多糖含量增加。辛明等^[31]研究表明, 在热风干燥条件下(60 °C), 铁皮石斛碳水化合物的代谢平衡被打破, 纤维素等高相对分子质量的化合物大量形成, 从而使得多糖含量有所增加, 但其内部机制还需要进一步研究。

2.2 黄酮类化合物

黄酮类化合物是植物酚类的最大类别, 主要包括黄酮醇、黄酮、黄烷酮、黄烷醇和花色素。这类化合物可能会由于自身特性和不同干燥工艺参数而发生质与量的变化。其中, 干燥过程引起黄酮类化合物的含量降低的现象普遍, 如花色素的含量变化, 最终导致中药材的品质下降。而其他成分在干燥过程中降低的原因主要有:(1) 高温降解, 一些黄酮类化合物(染料木素、葛根素、染料木苷、大豆素等)对温度敏感, 在干燥过程中损失严重。(2) 氧化, 干燥过程中组织结构的破坏增加了黄酮类化合物和氧气接触的机会, 故以空气作为干燥介质的干燥方式会导致黄酮类化合物(大豆苷)被氧化降解。刘曜儒等^[32]研究发现微波真空干燥和真空干燥能够显著脱氧, 对黄酮的损失率较小, 而鼓风干燥导致黄酮的含量显著降低。蒋赣等^[33]采用低温吸附干燥法干燥土茯苓, 由于低温环境对土茯苓组织结构破坏程度小, 黄酮的损失率比热风干燥的损失率显著降低。(3) 黄酮类化合物合成酶破坏, 高温会破坏相关黄酮类化合物合成酶的结构和活性, 导致某些黄酮类化合物无法合成。(4) 光降解, 对光敏感的黄酮类化合物(芦丁、木犀草苷等), 在自然晒干和阴干下损失严重。

干燥过程中也可能诱发黄酮类化合物的含量增加, 具体涉及以下几个原因:(1) 黄酮类化合物相互转化, 柚皮苷查耳酮在一定干燥条件下会转化成柚皮苷。Kamiloglu 等^[34]也发现烤箱和日光干燥会使无花果干产生木犀草素-7-O-葡萄糖苷。(2) 提高黄酮类化合物的提取率, 红外波和微波有辐射和穿透能力, 可以穿透细胞内部打破高聚物间的共价键, 有助于黄酮等物质的释放及提取, 因此其干燥后中药材的总黄酮显示出更高的含量。(3) 其他方面, 某些成分(蛋白质、糖类、纤维素)可能影响

黄酮类化合物在干燥过程中的生成和降解, 但是关于这方面的研究甚少。因此, 如何综合理解不同干燥条件和工艺下中药材黄酮成分的变化过程, 还需进一步探索和研究。

2.3 酚酸

在酚类化合物中, 酚酸由于具有抗氧化、抗菌、抗病毒、抗癌、抗炎和舒张血管等潜在的保健作用, 近年来引起了广泛关注。由于酚酸类化合物的结构中有较多的酚羟基取代, 因而其结构并不稳定, 在干燥过程中容易受到水分、温度、光、酶等刺激环境而发生变化, 这也是制约酚酸类化合物提取和应用的一个重大问题。本文通过综述不同干燥技术对各种中药材酚酸类化合物含量的影响, 表明其含量有降低或增加的现象。其中, 干燥使酚酸类化合物含量降低的原因有以下几点:(1) 酶降解, 在干燥过程中, 多酚氧化酶和过氧化物酶的激活会导致酚酸类化合物氧化为其他物质, 尤其以绿原酸、咖啡酸、迷迭香酸等含邻二酚羟基结构为特征的化学成分最易受这类酶的影响^[35]。苯丙氨酸解氨酶等其他酶的激活也会降解相关酚酸类化合物。(2) 热降解, 水溶性的酚酸化合物性质不稳定, 受热易发生分解、氧化以及脱羟基的反应^[36], 代表性成分有丹参素 B 和绿原酸, 在超过 60 °C 的干燥条件下, 其含量会急剧降低。黄烷醇类多酚暴露于热条件下会发生异构化和自氧化反应^[37], 从而转化为其他物质。此外, 酚类化合物在干燥过程中可能发生化学结构改变或与蛋白质结合, 导致酚类化合物含量减少。

干燥过程中导致酚酸类化合物的含量增加的原因如下:(1) 酶诱导, 在苯丙氨酸解氨酶、肉桂酸-4-羟化酶、4-香豆酸-辅酶 A 连接酶等关键酶的作用下会生成绿原酸化合物。高压静电场可能诱导隐色花色素还原酶的活性增强, 从而使总黄烷-3-醇含量升高。Ossipov 等^[38]研究也表明干燥过程中莽草酸脱氢酶的激活可使莽草酸氧化为脱氢莽草酸, 再进一步生成没食子酸。(2) 干燥诱导及成分相互转化, 丹酚酸 B 是干燥过程的产物, 而非栽培期该植物原始积累的成分, 而且其他丹酚酸类成分也都是干燥过程中伴随着丹酚酸 B 的大量形成而产生。彭九嫚等^[39]研究表明紫草酸和丹酚酸 B 的共同降解生成丹酚酸 A, 丹酚酸 A 可进一步发生环合反应生成异丹酚酸 C 和丹酚酸 C。当干燥温度超过 60 °C 时, 丹酚酸 B 的含量大大降低, 但是丹参素、原儿茶醛和丹酚酸 A 的含量会相应增加^[40], 最终使

酚酸类化合物的含量在干燥过程中没有显著变化甚至可能提高。(3) 提高酚酸的提取率, 这一情况与黄酮类似。干燥过程中, 细胞内部高聚物间的共价键可能断裂, 有助于酚酸等物质的释放及提取, 因此其干燥后中药材的总酚酸含量提高。(4) 其他方面, 有研究表明没食子酸含量随温度升高而增加。因为氧气的存在促进没食子酸的合成^[41-42], 而高温可能会促使结合酚酸的释放, 间接导致没食子酸、阿魏酸等成分的含量增加。丁胜华等^[43]也表达了类似观点。此外, 高压静电场能够有效维持较高的可溶性糖含量, 而可溶性糖可以诱导多酚类物质积累, 最终维持黄酮醇类多酚酸含量的平衡^[44]。

2.4 挥发油

干燥对中药材挥发油成分的影响已被广泛研究。在干燥过程中, 挥发油可能发生多种化学变化, 导致其含量的增加或减少。Szumny 等^[45]利用微波真空干燥技术干燥迷迭香, 发现其挥发油中的单萜类化合物呈上升趋势, 而倍半萜类化合物呈下降趋势。干燥导致挥发油成分的损失是非常普遍也是无法避免的现象。这主要归因于:(1) 组织结构的破坏和氧化, 在新鲜中药材中, 一部分挥发油储存在腺毛结构中。干燥会导致腺毛中的角质层破裂, 使外界空气进入组织细胞内或挥发性成分释放于外界环境中, 导致挥发油氧化和挥发。(2) 热降解, 一些挥发性成分如单萜、蒽烯对热敏感, 在干燥过程中极易发生热降解反应。薛敏等^[46]研究发现经过烘干和晒干的佩兰, 其单萜类成分分别损失了20%、26%。(3) 光降解, 多烯类化合物如榄香烯对光敏感, 晒干很容易导致这类成分降解。Calín-Sánchez 等^[47]研究发现通过微波辅助干燥方法得到的墨角兰总挥发物浓度与新鲜挥发物浓度没有显著差异。

干燥使中药材挥发油含量增加的现象也被经常报道。这可能是因为:(1) 通过高温诱导、氧化、糖基化物质水解等化学反应生成新的挥发性化合物^[48]。高温处理可能导致倍半萜类化合物分解向单萜类化合物转化^[49]。唐文文等^[50]研究也表明适当升高温度可明显提高萜烯类成分(β -蒽烯、月桂烯、罗勒烯)的相对含量。Schuh 等^[51]指出涉及热处理的干燥过程可能会导致糖基化合物水解后产生新形式的挥发性成分。(2) 不同干燥处理条件使组织结构破坏并改变油细胞的形态及密度, 这可能有利于挥发油的提取, 从而使挥发油含量增加。(3) 较高温度可能导致中药材表面形成一层硬皮层(表皮

层), 阻碍高分子量挥发性化合物扩散和其他挥发性化合物损失。这一现象可能在叶类药材中经常发生。据报道柠檬香桃叶^[52]和槟榔叶^[53]在干燥过程中均存在这种情况。此外, 某些挥发性化合物的疏水性可能限制其在干燥过程中降解, 而亲水性的化合物更容易损失, 需要进一步的研究来确定这种联系。因此, 含挥发油类中药材的干燥应尽量选择低温、无氧干燥技术或非热干燥技术以保证其抗炎、抗菌、抗病毒等药理特性。

2.5 其他成分

多糖、黄酮、酚酸和挥发油类成分由于存在不稳定结构和活泼基团, 在干燥过程中易发生降解和转变, 从而影响中药材的化学特性。此外, 生物碱类、香豆素类和甾体皂苷类也是某些中药材的主要有效成分, 虽然这些成分相对较稳定, 但是在干燥过程中也会发生不同程度的降解和转变。因此, 了解和掌握其变化规律与机制对进一步保证中药材品质具有重要意义。

2.5.1 生物碱类 生物碱是一类天然存在的含氮碱性有机化合物, 且具有复杂的环状结构。某些生物碱具有较高的结构稳定性, 在干燥过程中其含量无显著差异性, 如盐酸益母草碱^[54]、石斛碱^[38]。而其他生物碱类成分由于受干燥过程中高温和氧气的影响而发生氧化、降解和转化。干燥导致生物碱含量下降的原因主要是高温降解。最典型的是槟榔碱, 槟榔碱经热处理极易挥发, 从而影响槟榔的质量和风味。因此, 槟榔的干燥一般建议采用低温环境。当干燥温度超过 150 °C 时, 小檗碱、黄连碱、巴马汀的环状结构易裂解, 导致其含量显著下降。白永亮等^[55]研究表明, 桑叶在 105 °C 的条件下烘干, 其乔麦碱成分显著下降。干燥引起生物碱含量升高的原因主要是由于生物碱成分之间的转化, 具体涉及水解、氧化等反应^[54]。如苦参碱在较高干燥温度下易氧化为氧化苦参碱, 使得苦参碱含量下降, 而氧化苦参碱含量升高。而一些以游离或半乳糖苷的形式存在的生物碱类成分^[56], 在合适的干燥条件下可能发生水解, 使其转化为原形生物碱, 从而增加原形生物碱成分的含量, 但是其成分转化与机制有待深入研究。

2.5.2 香豆素类 香豆素是一类含有苯并吡喃酮结构的有机杂环化合物, 具有良好的热力学和光化学稳定性。因此干燥过程对这类化学成分的影响的报道较少。根据现有研究, 干燥温度是影响某些香

豆素含量降低的主要因素。当温度超过 50 °C 时，白花前胡甲素和乙素的含量因降解和转化而不符合药典要求^[57]，因此宁前胡应尽量选择在 50 °C 以下干燥。对于相对分子质量小的简单苯丙素类化合物，由于其具有挥发性，其含量在干燥过程中更易损失。香豆素类化合物在干燥过程中也会发生相互转变，引起香豆素含量增加。张志梅等^[58]报道，35 °C 烘干温度下白芷根中欧前胡素和异欧前胡素含量提高，而在 70 °C 烘干温度下欧前胡素含量提高而异欧前胡素含量显著降低，其变化机制还需进一步研究。

2.5.3 甾体皂苷类 甾体皂苷是一类由螺甾烷类化合物与糖类结合而成的甾体皂苷，因此在干燥过程中很可能引起糖苷键断裂而导致其含量变化。根据现有研究，干燥过程中引起甾体皂苷含量下降的原因有：(1) 高温降解，部分皂苷在较高的干燥温度下易降解，如人参皂苷、新芒果苷、薯蓣皂苷、甾体皂苷和罗汉果皂苷。因此，含有这类成分的中药材宜选择低温干燥或非热干燥技术。谢其亮等^[59]

研究也表明商陆宜采用低温烘干法以保证总皂苷含量。(2) 酶破坏，在适宜的干燥温度下，酶的活性较高，引起某些甾体皂苷中的糖苷键断裂，从而导致其含量降低。李娴等^[60]也有类似报道。因此高温烘干(80 °C)、微波干燥等干燥技术因破坏或抑制了酶的活性，可能有效避免某些中药材总皂苷含量的损失。然而，某些糖苷键的断裂可能会生成新的次级苷，引起甾体皂苷含量升高。如人参皂苷 Re 在高温下发生糖苷键断裂从而生成人参皂苷 Rh₁。郭晓晔等^[61]表明新芒果苷上的糖苷基对热不稳定，加热干燥过程中容易断裂转化为芒果苷，从而引起芒果苷含量增加。此外，酰基键的断裂也会生成新的甾体皂苷。有研究表明丙二酰基人参皂苷的酰基键不稳定，在高温干燥下发生水解脱去了丙二酸，生成相应的人参皂苷，引起人参皂苷含量增加^[62]。因此，高温或低温干燥条件对含甾体皂苷类中药材的干燥均适用，具体应根据其相关成分及其性质选择适宜的干燥工艺和干燥条件。

干燥过程对中药材化学性质的影响见表 2。

表 2 干燥过程对中药材化学性质的影响
Table 2 Effect of drying on chemical properties of Chinese herbal medicines

化学成分	变化规律	
	含量增加	含量减少
多糖	干燥后利于提取，酶诱导，成分相互转化	热降解，机械破坏，酶解，氧化降解，呼吸作用
黄酮	成分相互转化，酶诱导，干燥后利于提取	光降解，氧化降解，热降解，合成酶破坏
酚酸	成分相互转化，干燥后利于提取	酶降解，热降解，与其他物质结合
挥发油	高温诱导，氧化，干燥后利于提取，糖基化物质水解	热降解，光降解，氧化，组织结构的破坏
生物碱	成分相互转化	热降解
香豆素	成分相互转化	热降解
甾体皂苷	成分相互转化	热降解，酶降解

3 结语与展望

干燥对中药材的物理化学性质有显著影响，可引起外在的色泽、气味、形态到内在的微观结构和有效成分发生变化，最终导致中药材的品质降低。综上所述，干燥主要通过改变中药材的温度和含水率，进而影响中药材的理化特性。干燥过程中，温度的升高虽然会加快中药材的干燥进程，但是也会加速酶促、氧化、水解等反应的发生，造成有效成分迅速降解或转化，也影响着中药材相关物理性质的改变。干燥对中药材含水率的影响将打破中药材内部化学成分和分子结构的动态平衡，导致其形

态、微观结构和有效成分发生变化。由于中药材以植物类为主，其有效成分普遍具有热敏性、易氧化特性，为保证中药材高品质干燥，在干燥技术和设备选择和开发层面，应尽量遵循低温、快速、无氧原则，合理采用真空以及强化干燥技术和相应的装备(如强制热对流、电场强化、超声强化、温度/压力脉冲等)，并尝试将现有热干燥技术与非热干燥技术结合，有效利用各单一设备的优点，在保证中药材干燥品质的基础上，又能最大限度的缩短干燥时间、节约能源和减轻人力消耗等优点，这也是顺应持续发展、节能减排和绿色无污染等新型社会发

展的必经之路,可以大力发展。此外,由于中药材性质和结构的千差万别以及干燥技术的不同特点,再加上相关分析和检测等硬件设备的不足,对上述理化性质的变化形成一套完整的规律体系还比较困难。因此,未来的研究应该倾向于越来越多的建模设计以明确各种理化性质的临界变化点,如颜色变化模型、体积收缩模型、质量退化模型,便于全面了解干燥过程中物理化学性质变化规律,也为不同干燥阶段的工艺参数的选择提供依据,使我国中药材干燥逐步走向规范化、标准化。还应充分利用国内外新型的检测设备和新型干燥设备,以实现生产过程中对数据的精准采集,并提高自动化和智能化水平,最终实现药材加工生产过程的绿色、高效及高品质干燥。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 王学成,伍振峰,李远辉,等. 低温干燥技术在中药领域的应用现状与展望 [J]. 中国医药工业杂志, 2019, 50(1): 42-47.
- [2] 吴启南,钱大玮,段金彪. 中药材贮藏过程中的质量变化机制探讨 [J]. 中国中药杂志, 2010, 35(14): 1904-1908.
- [3] 李文峰,肖旭霖. 气体射流冲击干燥对紫甘薯色泽及抗氧化性的影响 [J]. 中国粮油学报, 2014, 29(6): 27-32.
- [4] Piga A, Del Caro A, Corda G. From plums to prunes: Influence of drying parameters on polyphenols and antioxidant activity [J]. *J Agric Food Chem*, 2003, 51(12): 3675-3681.
- [5] 徐菲,李顺祥,周晋,等. 药食果蔬褐变机制及其干燥工艺研究现状 [J]. 湖南中医药大学学报, 2011, 31(11): 79-81.
- [6] 胡云峰,唐裕轩,李宁宁,等. 枸杞热风干制过程中非酶促褐变反应研究 [J]. 保鲜与加工, 2018, 18(6): 125-129.
- [7] 吴惠玲,王志强,韩春,等. 影响美拉德反应的几种因素研究 [J]. 现代食品科技, 2010, 26(5): 441-444.
- [8] 张愨,廖红梅. 果蔬食品加工贮藏过程中易变色素的降解及调控机理研究与展望 [J]. 中国食品学报, 2011, 11(9): 258-267.
- [9] Debicki-Pospisil J, Lovrić T, Trinajstić N, et al. Anthocyanin degradation in the presence of furfural and 5-hydroxymethylfurfural [J]. *J Food Sci*, 1983, 48(2): 411-416.
- [10] Purvis A C. Sequence of chloroplast degreening in calamondin fruit as influenced by ethylene and AgNO₃ [J]. *Plant Physiol*, 1980, 66(4): 624-627.
- [11] Peng C Y, Markakis P. Effect of phenolase on anthocyanins [J]. *Nature*, 1963, 199(4893): 597-598.
- [12] Kader F, Irmouli M, Nicolas J P, et al. Proposed mechanism for the degradation of pelargonidin 3-glucoside by caffeic acid o-quinone [J]. *Food Chem*, 2001, 75(2): 139-144.
- [13] 肖作兵,朱建才,牛云蔚,等. 香气成分的协同作用研究进展 [J]. 食品科学技术学报, 2018, 36(4): 1-7.
- [14] 鲁周民,闫忠心,刘坤,等. 不同温度对干制红枣香气成分的影响 [J]. 深圳大学学报: 理工版, 2010, 27(4): 490-496.
- [15] 李婧琳,王媚,邵佳,等. HS-GC-MS 分析不同影响因素对砂仁挥发油主要成分的影响 [J]. 中国现代中药, 2018, 20(12): 1504-1508.
- [16] 徐晚秀,李静,李臻峰,等. 基于气味检测的生姜微波干燥特性研究 [J]. 食品与机械, 2017, 33(12): 31-35.
- [17] Mastali M, Kinnunen P, Dalvand A, et al. Drying shrinkage in alkali-activated binders - A critical review [J]. *Constr Build Mater*, 2018, 190: 533-550.
- [18] Mahiuddin M, Khan M I H, Kumar C, et al. Shrinkage of food materials during drying: Current status and challenges [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2018, 17(5): 1113-1126.
- [19] Khraisheh M A M, McMinn W A M, Magee T R A. Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying [J]. *Food Res Int*, 2004, 37(5): 497-503.
- [20] Ratti C. Shrinkage during drying of foodstuffs [J]. *J Food Eng*, 1994, 23(1): 91-105.
- [21] 葛仕福,施明恒. 被干燥多孔物料中孔隙大小及分布的探讨 [J]. 应用科学学报, 2005, 23(1): 94-98.
- [22] Koç B, Eren I, Kaymak-Ertekin F. Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method [J]. *J Food Eng*, 2008, 85(3): 340-349.
- [23] 何玉倩,宋晓燕,刘宝林. 干燥方式对火龙果果皮理化特性的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(2): 159-165.
- [24] Lewicki P P. Effect of pre-drying treatment, drying and rehydration on plant tissue properties: A review [J]. *Int J Food Prop*, 1998, 1(1): 1-22.
- [25] 肖玉焕,韩丽,李浩然,等. 灵芝多糖防治中枢神经系统疾病的研究进展 [J]. 中草药, 2020, 51(24): 6391-6395.
- [26] 鲁文静,梁宗锁,吴媛婷,等. 不同干燥方法对猪苓中多糖及麦角甾醇含量的影响 [J]. 西北林学院学报, 2013, 28(4): 144-148.
- [27] 殷少文,叶世芸,赵琳珺,等. 干燥温度及生长年限对黔产青钱柳中多糖含量的影响 [J]. 贵州农业科学, 2018, 46(1): 82-85.
- [28] 孟映霞,马朝阳,王洪新,等. 不同干燥工艺对金钗石斛叶品质的影响 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2017, 23(15): 26-30.
- [29] 李然,段梦颖,尚红梅,等. 干燥方式对白三叶多糖理化性质和抗氧化活性的影响 [J]. 食品科学, 2018, 39(17): 98-103.
- [30] 郝瑞芳,景浩. 加热处理对香菇中糖和蛋白的影响 [J]. 食品科技, 2009, 34(9): 90-93.

- [31] 辛明, 张娥珍, 李楠, 等. 不同干燥工艺对铁皮石斛多糖及石斛碱的影响 [J]. 南方农业学报, 2013, 44(8): 1347-1350.
- [32] 刘曜儒, 邓小银, 宁华清, 等. 不同干燥技术对罗汉果干品质的影响 [J]. 轻工科技, 2017, 33(5): 18-19.
- [33] 蒋赣, 何顺秋, 刘淑侦. 不同干燥方法对土茯苓品质的影响 [J]. 广东药学院学报, 2013, 29(3): 258-261.
- [34] Kamiloglu S, Pasli A A, Ozcelik B, *et al.* Evaluating the *in vitro* bioaccessibility of phenolics and antioxidant activity during consumption of dried fruits with nuts [J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2014, 56(2): 284-289.
- [35] 朱邵晴, 朱振华, 郭盛, 等. 不同干燥方法对薄荷药材中多元功效成分的影响与评价 [J]. 中国中药杂志, 2015, 40(24): 4860-4867.
- [36] 陈立军, 黄文芳, 刘苗苗, 等. 丹参中多酚酸类成分的干燥方式研究 [J]. 中药材, 2014, 37(9): 1680-1682.
- [37] Han H Y, Wang X H, Wang N L, *et al.* Lignans isolated from *Campylotropis hirtella* (Franch.) Schindl. decreased prostate specific antigen and androgen receptor expression in LNCaP cells [J]. *J Agric Food Chem*, 2008, 56(16): 6928-6935.
- [38] Ossipov V, Salminen J P, Ossipova S, *et al.* Gallic acid and hydrolysable tannins are formed in birch leaves from an intermediate compound of the shikimate pathway [J]. *Biochem Syst Ecol*, 2003, 31(1): 3-16.
- [39] 彭九嫚, 柴尧, 潘旻, 等. 丹参中酚酸类成分在不同工艺条件下转化关系 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2016, 22(5): 67-70.
- [40] 任雪, 董继先, 沈文, 等. 干燥方式对保健食品中丹酚酸 B 含量的影响 [J]. 食品工业, 2019, 40(11): 22-25.
- [41] Hayat K, Zhang X M, Chen H Q, *et al.* Liberation and separation of phenolic compounds from *Citrus mandarin* peels by microwave heating and its effect on antioxidant activity [J]. *Sep Purif Technol*, 2010, 73(3): 371-376.
- [42] Papoutsis K, Pristijono P, Golding J B, *et al.* Effect of vacuum-drying, hot air-drying and freeze-drying on polyphenols and antioxidant capacity of lemon (*Citrus limon*) pomace aqueous extracts [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2017, 52(4): 880-887.
- [43] 丁胜华, 王蓉蓉, 李高阳, 等. 干燥温度对橙皮干燥动力学、酚类物质及抗氧化特性的影响 [J]. 中国食品学报, 2016, 16(11): 137-144.
- [44] Zheng Y J, Tian L, Liu H T, *et al.* Sugars induce anthocyanin accumulation and flavanone 3-hydroxylase expression in grape berries [J]. *Plant Growth Regul*, 2009, 58(3): 251-260.
- [45] Szumny A, Figiel A, Gutiérrez-Ortiz A, *et al.* Composition of rosemary essential oil (*Rosmarinus officinalis*) as affected by drying method [J]. *J Food Eng*, 2010, 97(2): 253-260.
- [46] 薛敏, 乔晶晶, 王倩, 等. 不同干燥方法对佩兰挥发油质量及抗菌活性的影响 [J]. 中成药, 2018, 40(10): 2249-2254.
- [47] Calín-Sánchez Á, Figiel A, Lech K, *et al.* Drying methods affect the aroma of *Origanum majorana* L. analyzed by GC-MS and descriptive sensory analysis [J]. *Ind Crop Prod*, 2015, 74: 218-227.
- [48] Chua L Y W, Chong C H, Chua B L, *et al.* Influence of drying methods on the antibacterial, antioxidant and essential oil volatile composition of herbs: A review [J]. *Food Bioprocess Technol*, 2019, 12(3): 450-476.
- [49] 潘少香, 郑晓冬, 刘雪梅, 等. 干燥方式对生姜挥发性成分的影响 [J]. 食品工业科技, 2016, 37(24): 99-104.
- [50] 唐文文, 李国琴, 晋小军. 不同干燥方法对当归挥发油成分的影响 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2014, 20(3): 9-12.
- [51] Schuh C, Schieberle P. Characterization of the key aroma compounds in the beverage prepared from Darjeeling black tea: Quantitative differences between tea leaves and infusion [J]. *J Agric Food Chem*, 2006, 54(3): 916-924.
- [52] Buchailot A, Caffin N, Bhandari B. Drying of lemon myrtle (*Backhousia citriodora*) leaves: Retention of volatiles and color [J]. *Dry Technol*, 2009, 27(3): 445-450.
- [53] Pin K Y, Chuah T G, Rashih A A, *et al.* Drying of betel leaves (*Piper betle* L.): Quality and drying kinetics [J]. *Dry Technol*, 2009, 27(1): 149-155.
- [54] 谭亚杰, 濮宗进, 唐于平, 等. 基于 UPLC-QTRAP(R)/MS² 方法评价不同干燥方式对益母草中化学成分的影响 [J]. 中草药, 2019, 50(7): 1576-1586.
- [55] 白永亮, 段金廛, 宿树兰, 等. 桑叶干燥过程中黄酮类和生物碱类成分动态变化分析 [J]. 中药材, 2014, 37(7): 1158-1163.
- [56] 张丽慧, 郭春艳, 张文旭, 等. 不同干燥方法对山豆根主要有效成分含量的影响 [J]. 中国药师, 2020, 23(2): 348-351.
- [57] 邱晓霞, 张玲, 岳婧怡, 等. 宁前胡中 3 种香豆素含量影响因素的考察 [J]. 中药材, 2016, 39(4): 713-716.
- [58] 张志梅, 杨太新, 翟志席, 等. 干燥方法对白芷中香豆素类成分含量的影响 [J]. 中国中药杂志, 2005, 30(21): 1703-1704.
- [59] 谢其亮, 陈重, 潘岩, 等. 不同干燥方法对商陆总皂苷和皂苷甲含量的影响 [J]. 湖北农业科学, 2019, 58(8): 126-128.
- [60] 李嫻, 金传山. 正交设计考察不同干燥方法对桔梗质量的影响 [J]. 现代中药研究与实践, 2006, 20(3): 45-47.
- [61] 郭晓晔, 杨东升, 马长华, 等. 不同干燥加工方法对知母化学成分含量的影响 [J]. 中国执业药师, 2012, 9(10): 17-20.
- [62] 李芳, 李乔, 宋丹, 等. 不同干燥方法对人参花和西洋参花皂苷类成分的影响 [J]. 中草药, 2015, 46(19): 2937-2942.