蒲黄的化学成分及质量控制研究进展

田　芳[1,2]，吴孟华[1,2]，张　英[1,3]，曹　晖[1,2]，马志国[1,3*]

1. 暨南大学药学院，广东 广州　511443
2. 暨南大学 岭南传统中药研究中心，广东 广州　511443
3. 广东省中医药信息化重点实验室，广东 广州　511443

摘　要：蒲黄药材为香蒲科植物水烛香蒲 *Typha angustifolia*、东方香蒲 *T. orientalis* 或同属植物的干燥花粉，味甘、平，具有止血、化瘀、通淋的功效。通过汇总《中国植物志》2010—2025 年的香蒲属植物标本记载信息，发现我国香蒲属植物有 11 种，广泛分布于东北、华北、华东、西南及华南等湿地区域，以水烛香蒲和东方香蒲分布最广。研究表明，蒲黄化学成分主要包括黄酮类、有机酸类、挥发油类等，黄酮为主要活性成分及质控指标。针对蒲黄的掺伪、非法染色等问题，现代研究逐渐形成“性状-显微-分子-化学”多维联合鉴别模式。在质量评价方面，HPLC、UPLC 等用于黄酮定量分析，指纹图谱、植物代谢组学与化学计量学推动蒲黄质量评价由单一指标向整体质量控制转变，近红外光谱技术为快速、无损检测提供新途径。通过系统检索国内外相关文献，对蒲黄的化学成分与质量控制的相关研究进行全面综述，以期为蒲黄的现代化研究提供参考。

关键词：蒲黄；化学成分；质量控制；资源分布；黄酮；有机酸；挥发油

中图分类号：R282.6　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**0253 - 2670(2026)22 - 9242 - 11

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.22.034

Research progress on chemical constituents and quality control of *Typhae Pollen*

TIAN Fang[1,2], WU Menghua[1,2], ZHANG Ying[1,3], CAO Hui[1,2], MA Zhiguo[1,3]

1. College of Pharmacy, Jinan University, Guangzhou 511443, China
2. Research Center for Traditional Chinese Medicine of Lingnan, Jinan University, Guangzhou 511443, China
3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Traditional Chinese Medicine Informatization, Guangzhou 511443, China

Abstract: Puhuang (*Typhae Pollen*) is the dried pollen of the plants of the Typhaceae, such as *Typha angustifolia*, *T. orientalis* or other plants of the same genus. Its nature is sweet and neutral, with the effects of stopping bleeding, removing blood stasis and relieving stranguria. By summarizing the specimen records of the genus *Typha* in *Flora of China* from 2010 to 2025, it was found that there were 11 species of *Typha* in China, widely distributed in the wetland regions of Northeast, North, East, Southwes and South China, with *T. angustifolia* and *T. orientalis* being the most widespread. Studies have shown that the chemical constituents of *Typhae Pollen* mainly include flavonoids, organic acids and volatile oils, among which flavonoids are the main active components and quality control markers. In response to problems such as adulteration and illegal dyeing, modern research has gradually developed a multi-dimensional identification mode combining morphological, microscopic, molecular and chemical methods. In terms of quality evaluation, HPLC and UPLC are used for the quantitative analysis of flavonoids, while fingerprint profiling, plant metabolomics and chemometrics have promoted the shift of quality evaluation of *Typhae Pollen* from single marker to holistic quality control. Near-infrared spectroscopy provides a new approach for rapid and non-destructive detection. By systematically retrieving relevant domestic and international literature, this paper comprehensively reviews the research progress on the chemical constituents and quality control of *Typhae Pollen*, aiming to provide a reference for its modern research.

Key words: *Typhae Pollen*; chemical constituents; quality control; resource distribution; flavonoids; organic acids; volatile oils

收稿日期：2026-05-02

基金项目：国家重点研发计划项目（2023YFC3504200）；广东省中医药信息化重点实验室（2021B1212040007）；全国名老中医药专家传承工作室建设项目（国中医药人教函［2022］75 号）

作者简介：田　芳，博士，从事中药炮制机制研究。E-mail: 1287882739@qq.com

***通信作者：**马志国，教授，博士生导师，主要从事中药炮制机制与饮片质量标准研究。E-mail: mzg79@hotmail.com

蒲黄作为传统中药，最早记载于《神农本草经》，被列为上品，是化瘀止血的常用药物。《中国药典》2025 年版规定，蒲黄为香蒲科植物水烛香蒲 *Typha angustifolia* L.、东方香蒲 *T. orientalis* Presl 或同属植物的干燥花粉，味甘、平，归肝、心、脾经，具有止血、化瘀、通淋的功效，用于吐血、衄血、咯血、崩漏、外伤出血、闭经、痛经、胸腹刺痛、跌扑肿痛、血淋涩痛等症[1]。

现代研究发现，蒲黄含有黄酮类、有机酸类、挥发油类等多种活性成分[2]。目前未见关于蒲黄在资源分布、化学成分及质量控制等方面的系统性综述，为此，本文以“蒲黄化学成分”“蒲黄资源”“蒲黄”等为关键词，系统检索中国知网、Web of Science、PubMed、ScienceDirect 等数据库，对蒲黄在资源分布、化学成分及质量控制方面的研究进展进行系统梳理，以期为后续研究提供参考。

1 香蒲属植物分布

香蒲属 *Typha* L.植物隶属香蒲科（Typhaceae），为多年生沼生、水生或湿生草本，广布于世界热带和温带地区，全球现存 16 种，主要分布于欧亚和北美，亚洲中部、西南部及大洋洲亦有分布[3-6]。根据《中国植物志》[7]记载，我国有 11 种，可分为 2 组：无苞组（雌花无小苞片，雌雄穗状花序紧密连接或分离）和有苞组（雌花具小苞片，雌雄穗状花序分离）[8-10]。无苞组包括东方香蒲 *T. orientalis* Presl、宽叶香蒲 *T. latifolia* L.、无苞香蒲 *T. laxmannii* Lepech.、普香蒲 *T. przewalskii* Skv.。有苞组则包括水烛香蒲 *T. angustifolia* L.、达香蒲 *T. davidiana* (Kronf.) Hand.-Mazz.、象蒲 *T. elephantina* Roxb.、短序香蒲 *T. lugdunensis* P. Chabert、小香蒲 *T. minima* Funk、球序香蒲 *T. pallida* Pob.以及长苞香蒲 *T. domingensis* Persoon。若按花粉形态划分，蒲黄可分为 2 类[11]：一类为四合体花粉，如宽叶香蒲、象蒲、小香蒲等。另一类为单粒花粉，如东方香蒲、长苞香蒲、狭叶香蒲和达香蒲等，其形状有球形、近球形、卵形、阔卵形、钝三角形或不规则形。

我国香蒲植物的自然分布范围广泛，涵盖黑龙江、内蒙古、陕西、湖北、湖南、河南、山东、河北、安徽、江苏、台湾等多个省区，常见于湖泊、河流沿岸、池塘、沼泽等浅水区域[7, 10]。通过汇总《中国植物志》2010—2025 年香蒲属植物在各地方记载信息（图 1），可初步评估我国香蒲属植物的地理分布格局。东方香蒲分布范围较广，覆盖东北、华北、西南及华南等多个区域，在广西、贵州、湖北、江西等省区植物标本记录相对较多，表现出较强的生态适应能力与区域扩散特征。宽叶香蒲在部分省份有分布，但各地区植物样本数量普遍较低。无苞香蒲分布呈区域性聚集特征，其标本记录主要集中于东北地区（黑龙江、吉林），而在青海、河南、河北及新疆等地仅有零散记录。

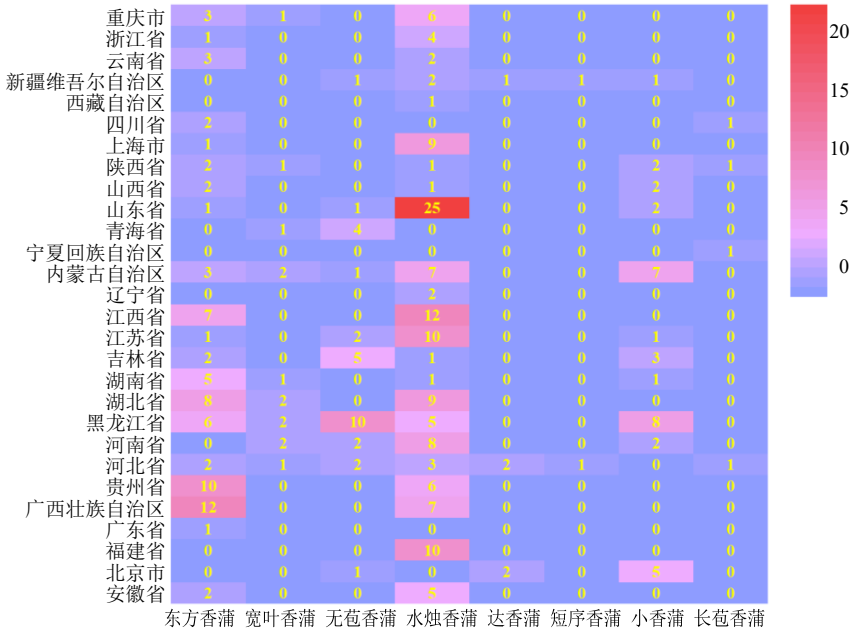


图 1 香蒲属植物全国各区域标本收载情况统计

Fig. 1 Statistics on collection of *Typha* species in different regions across China

相比之下，水烛香蒲为我国香蒲属中分布最广、植物标本记录最丰富的类群，在华东、华中、西南及东北等地区均有较高出现频率，尤其在山东、江西、江苏、湖北等地记录较集中，推测其生态适应幅度较宽。达香蒲植物标本记录较少，仅见于华北及西北部分地区，表现出较明显的局域性分布特征。小香蒲植物标本记录以东北和华北地区最为丰富，主要集中于黑龙江、内蒙古、北京及吉林；此外，在西北（陕西、山西）、华中（河南、湖南）等地区亦有零散分布。长苞香蒲植物标本记录数量极少，目前仅见于四川、河北、宁夏，区域局限性明显。此外，部分种类表现出极强的地域专属性：普香蒲植物标本目前仅见于黑龙江省，象蒲仅记录于云南省，而短序香蒲则仅见于新疆、河北地区，说明这些类群可能具有较窄的生态适应范围。

2 化学成分

蒲黄化学成分种类繁多，主要包括黄酮类、有机酸类、挥发油类等化合物（表 1），其中黄酮类化合物为主要化学成分。

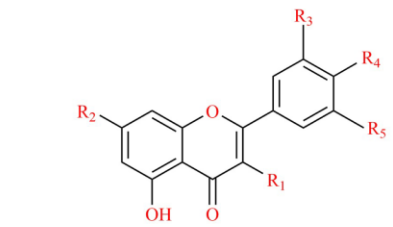
表 1 蒲黄的化学成分

Table 1 Chemical composition of *Typhae Pollen*

类别	编号	化合物名称	文献	类别	编号	化合物名称	文献
黄酮类	1	香蒲新苷	12-14	有机酸类	47	戊酸	35
	2	异鼠李素-3-*O*-新橙皮苷	12		48	十八烷酸	36
	3	水仙苷	12, 15		49	苯甲酸	37
	4	异鼠李素-3-*O*-葡萄糖苷	16		50	对羟基苯甲酸	37
	5	异鼠李素-3-*O*-半乳糖苷	17		51	辛酸	25
	6	异鼠李素-4′-葡萄糖苷	18	挥发油类	52	邻苯二甲酸二甲酯	32
	7	异鼠李素-3-*O*-(2-*O*-α-*L*-鼠李糖基)-β-*D*-吡喃葡萄糖苷	19		53	邻苯二甲酸二乙酯	32
	8	异鼠李素	12		54	9-羟基壬酸甲酯	32
	9	槲皮素-3-*O*-(2^G-α-*L*-鼠李糖基)-芸香糖苷	12		55	苯乙基千里酸酯	32
	10	槲皮素-3-*O*-新橙皮糖苷	20		56	苯甲酸甲酯	32
	11	芦丁	21		57	2-(12-pentadecynyloxy) tetrahydro-2*H*-pyran	32
	12	异槲皮苷	20		58	3-苯丙酸甲酯	32
	13	槲皮素-3-*O*-半乳糖苷	20		59	4-羟基肉桂酸甲酯	38
	14	槲皮素-3,3′-二甲醚	19		60	2,4-二叔丁基苯酚	32
	15	槲皮素-3,3′-二甲醚-4′-葡萄糖苷	22		61	4-羟基-3-甲氧基苯甲酸甲酯	38
	16	槲皮素-3-O-洋槐糖苷	22		62	十六酸甲酯	32
	17	槲皮素	12		63	联环己烷	32
	18	山柰酚-3-*O*-(2^G-α-*L*-鼠李糖基)-芸香糖苷	14		64	己二酸二甲酯	32
	19	山柰酚-3-*O*-新橙皮糖苷	12-14		65	8-羟基辛酸甲酯	32
	20	紫云英苷	20		66	邻苯二甲酸二丁酯	32
	21	山柰酚-3-*O*-芸香糖苷	21		67	壬二酸二甲酯	32
	22	山柰酚-3-*O*-半乳糖苷	20		68	癸二酸二甲酯	38
	23	山柰酚	13		69	十一烷二酸二甲酯	38
	24	柚皮素	23		70	9,10-二羟基十八酸甲酯	32
	25	儿茶素	24		71	邻苯二甲酸二异辛酯	32
	26	表儿茶素	24		72	邻苯二甲酸二异丁酯	32
有机酸类	27	柠檬酸	25		73	1,1-bis(dodecyloxy)-hexadecane	32
	28	琥珀酸	25		74	反式-11-十八烯酸甲酯	32
	29	对羟基肉桂酸	26		75	10-十八碳烯酸甲酯	32
	30	3-甲氧基-4-羟基肉桂酸	27		76	邻苯二甲酸二(2-乙基己)酯	32
	31	棕榈酸	28	甾体类	77	β-谷甾醇	39
	32	4-乙酰氧基-3-甲氧基肉桂酸	26		78	胡萝卜苷	13
	33	硬脂酸	25		79	禾本甾醇	40
	34	十二酸	29		80	5α,8α-环二氧麦角甾-6,22-二烯-3β-醇	41
	35	十四烷酸	30		81	5α,8α-环二氧麦甾角-6,9(11),22-三烯-3β-醇	41
	36	二十烷酸	31		82	3β-羟基豆甾-5-烯-7-酮	39
	37	二十六烷酸	13		83	6α-羟基豆甾-4-烯-3-酮	39
	38	十八烷酸	23		84	3,5-二烯豆甾烷	39
	39	乳酸	25		85	豆甾-5-烯-3β,7β-二醇	39
	40	壬酸	32		86	7α-羟基谷甾醇	39
	41	花生四烯酸	25		87	豆甾烷-3,6-二酮	39
	42	5-反式-咖啡酰莽草酸	33		88	isofucosterol	42
	43	丙酮酸	25		89	豆甾酮	39
	44	原儿茶酸	27		90	7-oxositosterol	39
	45	对香豆酸	27		91	豆甾-4-烯-3,6-二酮	39
	46	香草酸	34		92	6β-羟基豆甾-4-烯-3-酮	39

2.1 黄酮类化合物

蒲黄中黄酮类化合物结构多具有异鼠李素、槲皮素及山柰酚等黄酮醇母核，形成一系列黄酮醇苷，包括黄酮醇、黄酮、二氢黄酮和黄烷类等。其中，黄酮醇及其糖苷化合物含量较高，以香蒲新苷、异鼠李素-3-*O*-新橙皮苷、水仙苷为代表性成分，三者不仅是蒲黄发挥药效的主要物质基础，其中香蒲新苷和异鼠李素-3-*O*-新橙皮苷也是法定标准含量测定的指标性成分。此外，蒲黄中还含有其他结构类型的黄酮，例如二氢黄酮类的柚皮素，以及黄烷类的表儿茶素和 *D*-儿茶素等。黄酮苷中的糖基取代位置多为 C-3 位，包括葡萄糖、鼠李糖、半乳糖、新橙皮糖、芸香糖等单糖及双糖。上述黄酮类化合物的名称见表 1，结构见图 2。



1 R_1 = *O*-(2^G-*α*-rhamnosyl)-rutioside, R_2 = R_4 = OH, R_3 = H, R_5= OCH_3

2 R_1 = *O*-(*α*-rhamnosyl-1→2-β-glucoside), R_2 = R_4 = OH, R_3 = OCH_3, R_5=H

3 R_1 = *O*-(*α*-rhamnosyl-1→6-β-glucoside), R_2 = R_4 = OH, R_3 = OCH_3, R_5=H

4 R_1 = *O*-glucoside, R_2 = R_4 = OH, R_3 = OCH_3, R_5 =H

5 R_1 = *O*-galactoside, R_2 = R_4 = OH, R_3 = OCH_3, R_5 =H

6 R_1 = R_2 = OH, R_3 = H, R_4 = *O*-glucoside, R_5 =OCH_3

7 R_1 = *O*-(2-*O*-α-*L*-rhamnosyl)-β-*D*-glucoside, R_2 = OH, R_3 = OCH_3, R_4 = OH, R_5 =H

8 R_1 = R_2 = R_4 = OH, R_3 = H, R_5 =OCH_3

9 R_1 = *O*-(2^G-α-*L*-rhamnosyl)-rutioside, R_2 = R_3 = R_4 = OH, R_5 =H

10 R_1 = *O*-(α-rhamnosyl-1→2-β-glucoside), R_2 = R_3 = R_4 = OH, R_5 =H

11 R_1 = *O*-(α-rhamnosyl-1→6-β-glucoside), R_2 = R_3 = R_4 = OH, R_5 =H

12 R_1 = *O*-glucoside, R_2 = R_3 = R_4 = OH, R_5 =H

13 R_1 = *O*-galactoside, R_2 = R_3 = R_4 = OH, R_5 =H

14 R_1 = R_5 = OCH_3, R_2 = R_4 = OH, R_3 =H

15 R_1 = R_3 = CH_3, R_2 = OH, R_4 = *O*-glucoside, R_5 =H

16 R_1 = *O*-(α-rhamnosyl-1→6-β-galactoside), R_2 = R_3 = R_4 = OH, R_5 =H

17 R_1 = R_2 = R_4 = OH, R_3 = H, R_5 =OH

18 R_1 = *O*-(2^G-α-*L*-rhamnosyl)-rutioside, R_2 = R_4 = OH, R_3 = R_5 =H

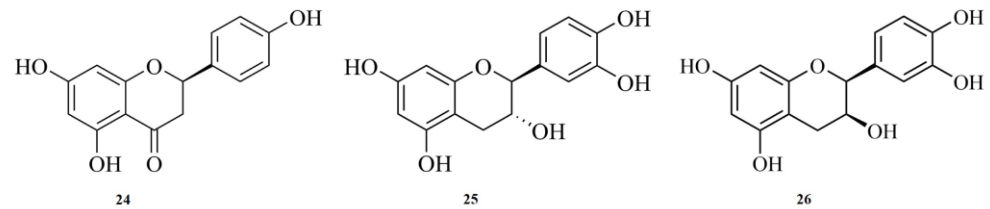
19 R_1 = *O*-(α-rhamnosyl-1→2-β-glucoside), R_2 = R_4 = OH, R_3 = R_5 =H

20 R_1 = *O*-glucoside, R_2 = R_4 = OH, R_3 = R_5 =H

21 R_1 = *O*-(α-rhamnosyl-1→6-β-glucoside), R_2 = R_4 = OH, R_3 = R_5 =H

22 R_1 = *O*-galactoside, R_2 = R_4 = OH, R_3 = R_5 =H

23 R_1 = R_2 = R_4 = OH, R_3 = R_5 =H



24 **25** **26**

图 2 蒲黄中黄酮类化合物的结构

Fig. 2 Structures of flavonoids in *Typhae Pollen*

2.2 挥发油类化合物

蒲黄的挥发油中酯类化合物占有显著比例，包括苯甲酸甲酯、氢化肉桂酸甲酯、香草酸甲酯、棕榈酸甲酯和多种二元酸二甲酯（如己二酸二甲酯、壬二酸二甲酯、癸二酸二甲酯等），以及具有特殊结构的酯类，如 3-甲基-2-丁烯酸-2-苯乙基酯、2-(12-十五烷氧基)-四氢-2*H*-吡喃等[32, 38]。此外，还含有 11-十八碳烯酸甲酯等长链不饱和脂肪酸甲酯以及邻苯二甲酸二甲酯、二乙酯、二丁酯等多种邻苯二甲酸酯类化合物。上述挥发油类化合物的名称见表 1，结构见图 3。

2.3 有机酸类化合物

有机酸也是蒲黄中一类重要的化合物，目前从蒲黄中已鉴定出的有机酸类成分主要涵盖不饱和有机酸与长链脂肪酸[27]。其中，饱和脂肪酸主要包括柠檬酸、琥珀酸、棕榈酸、硬脂酸、二十烷酸、2,4-二甲基己二酸、乳酸、甲酸和乙酸；不饱和脂肪酸则包括花生四烯酸、5-反式-咖啡酰莽草酸以及丙酮酸；此外，还包含酚酸类成分，如原儿茶酸、3-甲氧基-4-羟基肉桂酸、顺式-4-香豆酸、对香豆酸和香草酸等。上述有机酸类化合物的名称见表 1，结构见图 4。

2.4 甾体类化合物

甾体类成分是蒲黄脂溶性部位的重要组成部分[32, 38, 40]，以 β-谷甾醇及其衍生物最为常见。此外，还分离鉴定出一系列结构多样的甾体化合物，主要包括氧化型甾体，如 5α-豆甾烷-3, 6-二酮、3β-羟基豆甾-5-烯-7-酮、豆甾烷-3,6-二酮及多种豆甾烯酮衍生物；环氧化及过氧化甾体，如 5α, 8α-环二氧麦角甾-6,22-二烯-3β-醇；以及羟基化甾体，如豆甾-5-烯-3β,7α/7β-二醇等。上述甾体类化合物的名称见表 1，结构见图 5。

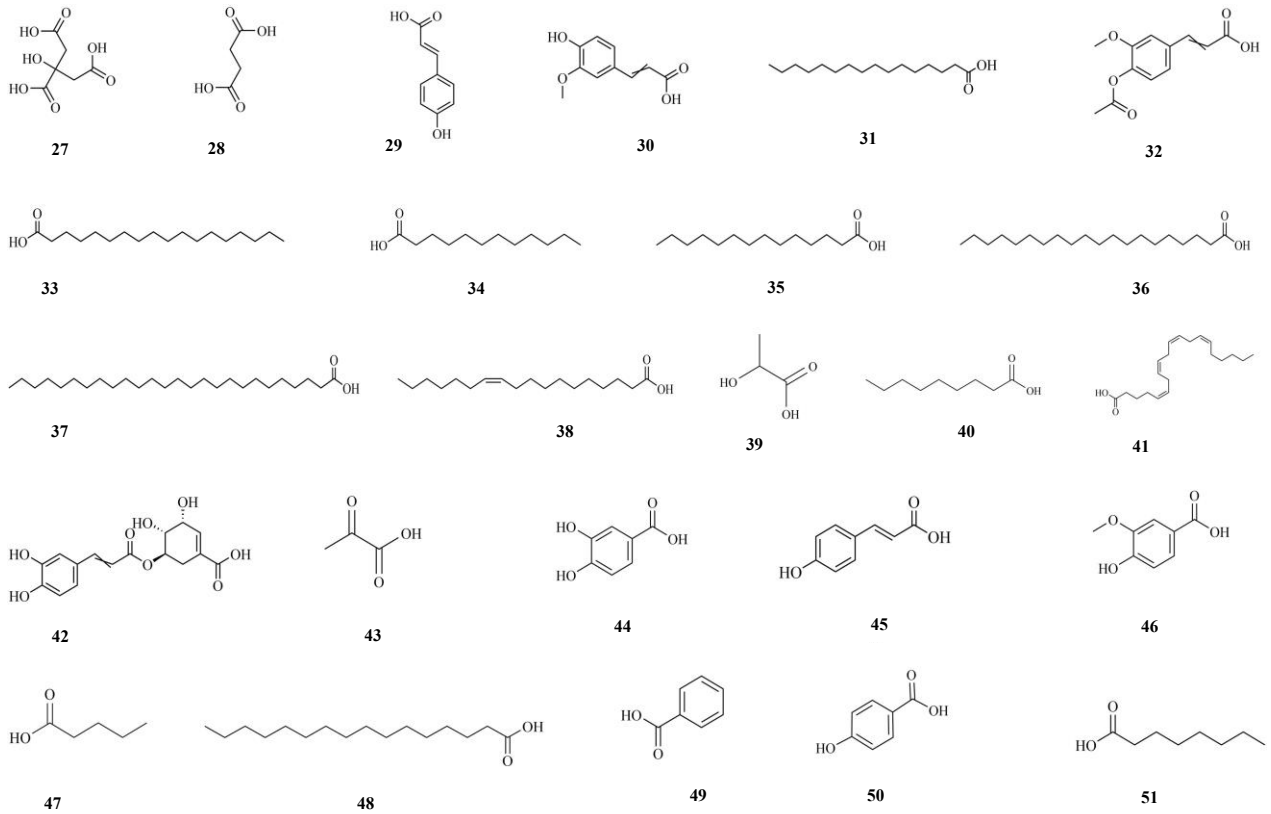


图 4　蒲黄中挥发油类化合物的结构

Fig. 4　Structures of volatile oil compounds in *Typhae Pollen*

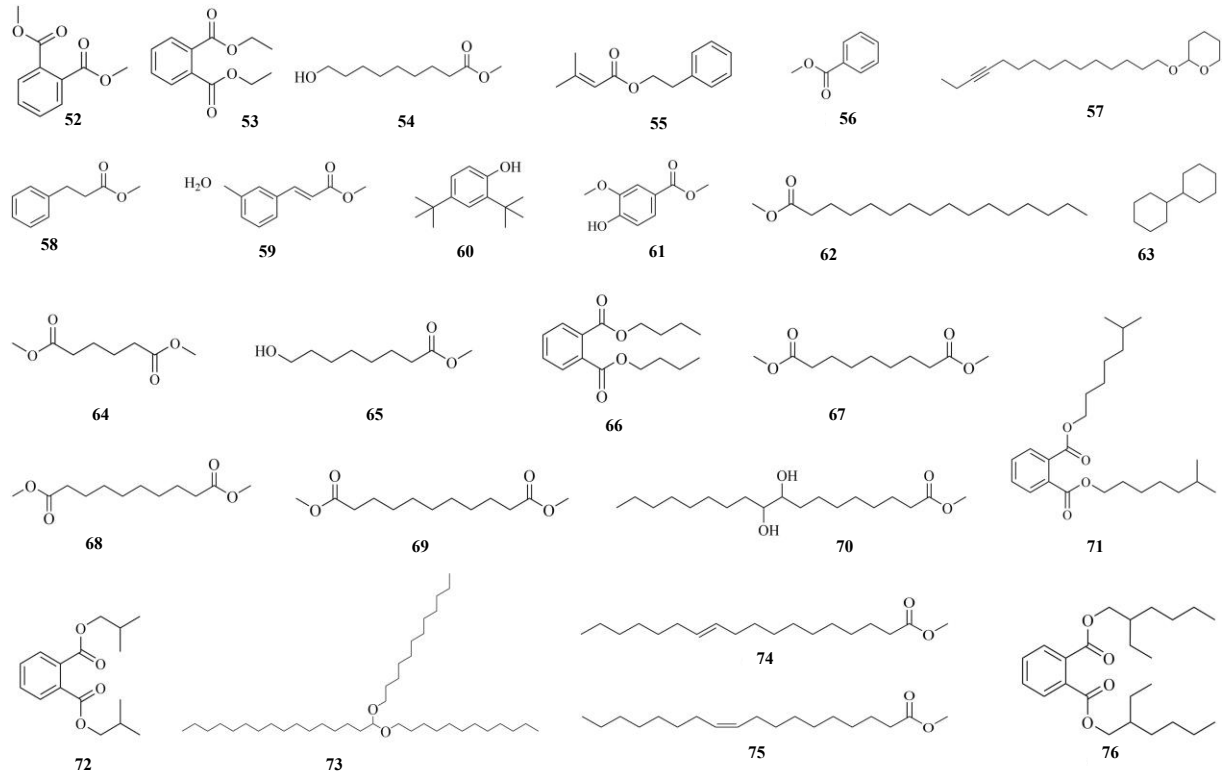


图 3　蒲黄中有机酸类化合物的结构

Fig. 3　Structures of organic acids in *Typhae Pollen*

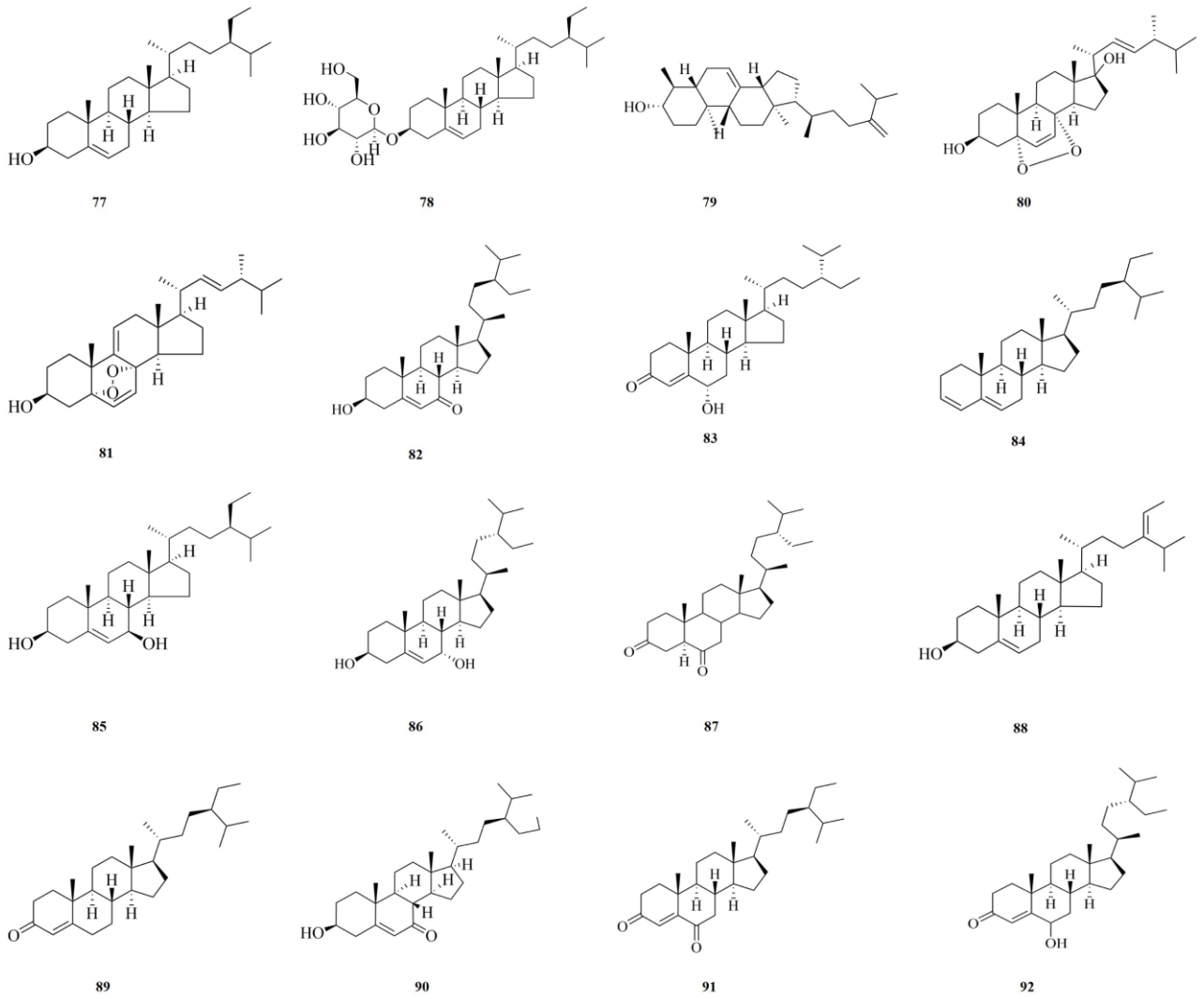


图 5　蒲黄中甾体类化合物的结构

Fig. 5　Structures of steroidal compounds in *Typhae Pollen*

2.5　其他类化合物

有学者在宽叶香蒲中发现(3*R*,5*R*,6*S*,9*E*)-5,6-环氧-3-羟基-β-紫罗兰醇[27]，冯绪强等[43]从水烛香蒲中分离鉴定出 Zarzissine、胆碱、嘧啶-2,4-(1*H*,3*H*)二酮、6-甲基-嘧啶-2,4-(1*H*,3*H*)二酮、1-*O*-(β-*D*-葡萄糖基)-(2*S*,3*S*,4*R*,8*Z*)-2-[(2*R*)-2′-羟二十三酰胺基]-8-十九烯-3,4-二醇、1-*O*-(β-*D*-葡萄糖基)-(2*S*,3*R*,4*E*,8*Z*)-2-[(2*R*)-2′-羟基十九烷醇氨基]-4,3-二烯十九烷-3-二醇。张淑敏等[31]首次从蒲黄中分离得到已知化合物泡桐素。

此外，缪平等[44]分离得到 3 种组成和结构相似的酸性多糖 TAA、TAB、TAC，其中 TAA 含糖醛酸的量较大，主要由 α-*L*-呋喃阿拉伯糖、β-*D*-半乳糖、α-*D*-半乳糖醛酸组成。TAB 和 TAC 均为多分支的多糖，其骨架主要构成成分均是(1→5)-α-*L*-呋喃阿拉伯糖。研究显示[44]蒲黄还含有 1 种多糖，兼具促凝与抗凝作用，由 4-*O*-甲基葡萄糖醛酸、阿拉伯糖、木糖、半乳糖和葡萄糖组成。Gao 等[45]分离鉴定出一种均一的酸性杂多糖（TPP-4），具有鼠李糖乳糖醛酸双-I（RG-I）型果胶类骨架，主要由半乳糖醛酸、阿拉伯糖、半乳糖和鼠李糖等组成。蒲黄富含 15 种氨基酸（如天门冬氨酸、苏氨酸、丝氨酸等）[46]，以及铝（Al）、硼（B）、钡（Ba）、钙（Ca）等多种无机元素[47]。

3　蒲黄质量控制研究现状

3.1　市场现状与真伪鉴别

蒲黄为花粉类中药，花粉粒细小（17～29 μm），颜色鲜黄、质地轻细，极易出现掺假、染色及伪造等问题，导致市场质量参差不齐。张航等[48]采用偏振光显微影像结合薄层色谱-质谱联用技术对市场

样品进行检测，结果显示抽检合格率仅 44%，掺杂或染色品占 22%，纯伪品高达 33%。孙全峰等[49]采用中药微性状鉴定法对蒲黄及其混伪品进行鉴别，结果表明不合格率较高。

市场中常见的掺假方式包括掺入非药用部位、添加淀粉及矿物粉末增重、混入其他植物花粉以及使用化工染料非法染色等[50-51]，甚至以染色杂木屑、黄土细粉直接冒充蒲黄[52]。刘香英等[50]对正品蒲黄与伪品进行研究，发现某些伪品实为黄土细粉中混入少量植物茎叶组织，不仅失去蒲黄的药用价值，还可能因矿物杂质超标而危害人体健康。采用传统水试法观察是否大量沉淀、显微镜下观察是否有典型蒲黄花粉粒，可快速鉴别该掺假方式[53]。掺入扁枝石松子的伪品多呈淡黄色粉末，质稍重且粗糙，手捻有发涩感并易附着于手指，放入水中后可见砂粒状及纤维状物沉降，水液显黄色[54]；显微镜下可观察到棕黄色四面体形孢子，具有明显三裂缝及网状饰纹等特征[52]。

掺入蒲黄非药用部位是较为常见的掺伪方式之一。混入花丝、花药等组织的蒲黄药材，外观多呈丝毛纤维状，质地粗糙，滑腻感减弱，手捻易成团；显微观察可见花丝、花药及薄壁细胞中含有草酸钙针晶[53]。另有掺入松花粉以增加天然花粉感。掺入松花粉后，药材颜色偏淡黄，质轻易流动，搓揉后可闻松节油香气[54]，显微镜下可见具有双气囊结构的椭圆形花粉粒。马孝熙等[55]进一步基于 ITS2 序列构建邻接（neighbor-joining，NJ）系统树，可将蒲黄、松花粉及其混伪品明显区分，显示出 DNA 条形码技术在基原鉴定中的良好应用价值。王孟虎等[56]进一步利用特异性引物、DNA 条形码技术对松花粉、蒲黄进行鉴定，发现当松花粉、蒲黄相互掺伪比例达 2%时，依然能够对二者进行鉴别—基于 ITS2 碱基序列构建的 NJ 系统发育树能够准确鉴定松花粉、蒲黄。上述研究表明，对于形态相似或人为混合的花粉类伪品，仅依赖传统经验鉴别存在局限，而分子生物学方法能够显著提高鉴别准确性。

非法染色是近年来蒲黄市场最突出的质量安全隐患之一。不法商家往往通过染色改善劣质饮片外观，或将白色矿物粉末、植物粉末染黄后掺伪增重。研究发现，掺有化工染料的样品通常质地较重，手捻有明显粗糙感，在 365 nm 紫外灯下，正品蒲黄一般不显荧光，而染色掺伪品则呈黄色甚至强烈黄色荧光[57]。目前常见染料主要为金胺 O。高珊等[58]对市售蒲黄饮片进行调查发现，在 20 批样品中有 9 批检出金胺 O 染色，说明非法染色现象较为严重。

传统性状鉴别主要依赖颜色、气味及手感等经验判断，对于隐蔽性掺假和非法染色的识别能力有限，因此建立快速、准确、客观的鉴别体系已成为蒲黄质量控制的重要方向。近年来，分子生物学、现代显微技术及色谱-质谱联用技术被广泛应用于蒲黄真伪鉴别。林春燕等[59]建立了蒲黄及其饮片中金胺 O、柠檬黄和酸性黄 36 等非法染料的同步检测方法，葛会奇等[60]进一步建立了 LC-MS/PAD 检测方法，可有效识别植物药材是否存在非法染色。数字显微成像技术能够对花粉细胞进行定量分析。刘飞飞等[61]利用像面数字全息显微术获取蒲黄细胞相位分布信息，实现细胞大小及形貌特征的准确分析，提高了显微鉴别的客观性和重复性。蒲黄真伪鉴别已由传统经验鉴别逐渐发展为“性状-显微-分子-化学”多维度联合的鉴别模式。其中，性状及显微鉴别成本较低、适合基层快速筛查；DNA 条形码技术适用于基原鉴定和混伪品识别；LC-MS/MS 等高灵敏度技术则更适用于非法染色及痕量掺假物的精准检测。未来应进一步加强典型掺伪案例数据库建设，推动多技术融合的快速检测体系发展，以提升蒲黄市场监管效率和质量安全水平。

3.2 现代质量评价方法

随着蒲黄化学成分及药效物质研究的深入，传统单一指标质量控制已难以全面反映其整体质量特征。近年来，有关蒲黄化学成分定量分析、指纹图谱建立、化学计量学及质量标志物（quality marker，Q-Marker）筛选等方面的文献报道推动蒲黄质量评价体系逐渐向整体化、系统化和精准化发展。

3.2.1 化学成分定量分析 高效液相色谱（HPLC）、超高效液相色谱（UPLC）、高效毛细管电泳（high performance capillary electrophoresis，HPCE）、LC-MS/MS 等技术已应用于蒲黄活性成分分析。黄酮类成分是蒲黄质量控制的核心指标。文红梅等[62]建立了蒲黄总黄酮含量的 HPLC 测定方法，具有良好的线性关系、重复性及回收率。马家宝等[63]优化蒲黄总黄酮提取工艺，并结合大孔树脂分离纯化，提高了黄酮类成分的富集效率。张妍妍等[64]建立了同时测定蒲黄中异鼠李素-3-*O*-新橙皮苷和香蒲新苷的 UPLC 方法，与传统 HPLC 相比，其分析时间更短、分离效率更高。杨棣华等[65]建立 HPLC 法快速测定不同产地蒲黄中槲皮素、山柰素

和异鼠李素 3 种黄酮苷元含量。白雪薇等[66]进一步采用一测多评，对蒲黄中异鼠李素-3-*O*-新橙皮糖苷、对羟基苯甲酸、香草酸及香蒲新苷 4 种成分进行定量，提高了检测效率并降低对照品成本。此外，药材采收时期也会影响蒲黄质量。吕紫璇等[67]通过测定不同成熟期蒲黄的代谢物，发现半花期采摘样品中活性代谢物含量最高，提示采收期是影响蒲黄质量的重要因素之一。

不同分析技术在蒲黄质量控制中的适用范围存在一定差异。HPLC 技术成熟稳定、重复性好，是目前药典中质量控制的主流方法，适用于常规含量测定；UPLC 具有更高分离效率和更短分析时间，更适用于大批量样品快速检测；LC-MS/MS 灵敏度高、定性能力强，可用于痕量成分及复杂体系分析，但设备昂贵、维护成本高。因此，在实际应用中应根据检测目的、样品复杂程度及实验条件选择合适方法。

3.2.2 指纹图谱与整体质量评价 中药具有“多成分、多靶点、多途径”的作用特点，仅依赖单一成分难以全面评价其质量，因此中药指纹图谱逐渐成为蒲黄整体质量控制的重要手段[68]。杨瑛等[69]建立了蒲黄药材 HPLC 指纹图谱，结果显示不同批次样品之间相似度较高，表明该方法具有较好的稳定性。唐敏等[70]将指纹图谱与多成分定量分析结合，同时测定 8 种主要代谢物含量，通过“整体特征＋定量指标”综合评价蒲黄质量。李钢等[71]测定 16 批蒲黄饮片中 5 种主要代谢物总含量，并建立质量表征及相关性分析方法，提高了质量评价的系统性。

化学计量学与代谢组学进一步推动蒲黄质量评价由经验判断向数据驱动转变。Wang 等[72]结合凝血酶活性、代谢组学及化学计量学分析，通过化学成分与药效活性的关联分析，筛选出柠檬酸、亚麻酸、香蒲新苷及异鼠李素-3-*O*-新橙皮苷作为蒲黄质量评价指标，为蒲黄 Q-Marker 的筛选提供了重要思路。

3.2.3 近红外光谱（near-infrared spectroscopy，NIRS）与快速无损检测 NIRS 技术因具有快速、无损、无需复杂前处理等优点，近年来在中药质量控制中受到广泛关注。董钰宁等[73]采集 91 批蒲黄样品光谱，结合化学计量学，实现了对水分、浸出物及主要含量指标的快速预测。与 HPLC 等传统方法相比，NIRS 检测速度快、适合在线监测及大规模筛查，尤其适用于企业生产过程质量控制。但其准确性高度依赖模型稳定性和样本数据库，且对痕量成分定量能力有限，因此通常作为快速筛查技术，与色谱分析方法互为补充。未来蒲黄质量控制应构建“快速筛查＋精准检测”相结合的多层次质量控制体系，以兼顾检测效率与准确性。

3.2.4 Q-Marker 研究 Q-Marker 是近年来中药质量控制研究的重要方向，其核心在于筛选与药效、安全性及临床疗效密切相关的特征成分[74]。当前蒲黄的质量控制仍主要以香蒲新苷和异鼠李素-3-*O*-新橙皮苷为法定指标成分，但越来越多研究表明，仅依赖这 2 种成分难以全面反映不同基原蒲黄的整体质量。

课题组前期[75-76]通过建立水烛香蒲和东方香蒲 2 种主流基原蒲黄的特征图谱及多指标含量测定方法，发现水烛香蒲中香蒲新苷和异鼠李素-3-*O*-新橙皮苷均达到《中国药典》标准，而东方香蒲中上述两项指标均未达标；然而，通过整体化学特征及多元统计分析发现，东方香蒲整体质量优于水烛香蒲。研究还发现，水仙苷是东方香蒲中含量最高的黄酮类成分，而在水烛香蒲中几乎未检出，提示水仙苷可能更适合作为东方香蒲的特征性 Q-Marker。

上述研究表明，《中国药典》20225 年版关于蒲黄的含量测定标准更适用于水烛香蒲，而对东方香蒲适用性不足，反映出传统单一指标质量控制模式存在一定局限性。未来应加强蒲黄 Q-Marker 研究，结合药效学、代谢组学及网络药理学等方法，筛选能够体现止血、化瘀等核心药效的关键成分，建立“基原-成分-药效”关联的质量评价体系，从而推动蒲黄质量标准的科学化和精准化。

4 结语与展望

传统中药蒲黄在止血、化瘀、通淋方面应用历史悠久，其药材来源香蒲属植物在我国分布广泛、资源丰富。我国有 11 种香蒲属植物，其中东方香蒲与水烛香蒲均为广泛分布，后者密度更高，而无苞香蒲、象蒲等分布局限。目前已知蒲黄主要含黄酮类、有机酸类、挥发油类、甾体类及多糖等成分，其中黄酮类种类最多、含量最高，是蒲黄发挥药效的主要物质基础。针对蒲黄掺入非药用部位、淀粉矿物增重、其他植物花粉伪造以及金胺 O 等工业染料非法染色等问题，传统经验鉴别正逐渐向“性状-显微-分子-化学”多维度联合鉴别模式转变。蒲黄质量评价研究焦点已从传统的单一黄酮指标定量向整体化、系统化过渡。HPLC 及 UPLC 的常规

与快速定量、中药指纹图谱的整体表征、近红外光谱的无损筛查，以及基于代谢组学和化学计量学的 Q-Marker 初步研究，共同推动蒲黄质量评价体系由经验判断向数据驱动转变。

尽管蒲黄研究已取得一定进展，但仍存在一些问题。《中国药典》2025 年版以香蒲新苷和异鼠李素-3-*O*-新橙皮苷作为蒲黄质量控制指标，但该标准更适用于来源于水烛香蒲的蒲黄，来源于东方香蒲的蒲黄均无法达到含量限度要求[73]，而来源于同属其他基原的蒲黄成分研究未见报道。现有研究主要聚焦于黄酮类成分，对多糖、甾体、挥发油等成分的结构解析与生物活性研究相对薄弱。尽管多种现代分析技术已应用于蒲黄质量评价，但目前的质量控制仍以单一或少数指标成分的含量测定为主，缺乏对整体化学特征的动态把握，化学成分与药效之间的关联尚未系统建立。同时，蒲黄市场掺假、造假问题依然严峻，传统鉴别手段难以有效应对。非法染色物和复杂掺伪品的现场速测能力、多技术融合的标准化流程有所欠缺，高通量筛查设备的高成本也限制基层监管的全面覆盖。

未来研究应立足于多学科交叉融合，系统比较不同基原蒲黄的化学成分谱差异，筛选具有基原特异性的 Q-Marker，推动《中国药典》中蒲黄来源与含量测定的修订，提高蒲黄法定标准的科学性。其次，加强非黄酮类成分研究，重点开展蒲黄多糖、甾体等成分的分离纯化、结构鉴定及活性评价，结合构效关系，明确其协同药效作用。此外，进一步完善蒲黄真伪鉴别体系，推动传统性状鉴别与 DNA 条形码、数字显微成像、LC-MS/MS 及近红外光谱等现代技术的融合应用，建立快速、准确、可推广的多维质量检测模式，提高市场监管效率。最后，应加强基于代谢组学、化学计量学及药效学关联分析的 Q-Marker 研究，筛选能够真实反映止血、化瘀等核心功效的关键质量标志物，构建“基原-成分-药效”相结合的整体质量评价体系，推动蒲黄质量标准由经验型向精准化、科学化转变。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

[1] 中国药典 [S]. 一部. 2025: 203.

[2] Liu J Y, Chen Z Y, Tao S A, *et al*. Traditional uses and emerging therapeutic potential of *Typha angustifolia* L.: Insights into its phytochemistry, pharmacological activities and quality control [J]. *Front Pharmacol*, 2025, 16: 1557136.

[3] Kronfeld E M. *Monographie der Gattung Typha Tourn* (*Typhinae Agdh., Typhaceae Schur. -Engl*.) [M]. Berlin: A. Hölder, 1889: 25.

[4] Lee D W, Fairbrothers D E. A serological and disc electrophoretic study of North American *Typha* [J]. *Brittonia*, 1969, 21(3): 227-243.

[5] Smith S G. Typha: Its taxonomy and the ecological significance of hybrids [J]. *Arch. Hydrobiol*, 1987, 27(1): 129-138.

[6] Kim C, Shin H, Choi H K. A phenetic analysis of *Typha* in Korea and far east Russia [J]. *Aquat Bot*, 2003, 75(1): 33-43.

[7] 夏振岱.《中国植物志》-全世界最大的一部植物志 [J]. 中国科学院院刊, 1992, 3(1): 83-84.

[8] 朱秀玉. 中国香蒲属(香蒲科)无苞组的分类学研究 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2012.

[9] 王茹. 中国香蒲属(香蒲科)有苞组的分类学研究 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2012.

[10] 中国科学院植物研究所. 中国高等植物第十三卷 [M]. 青岛: 青岛出版社, 2012: 5-10.

[11] 王镜泉. 国产蒲黄形态研究 [J]. 中草药, 1984, 15(5): 28-31.

[12] 廖矛川, 刘永潞, 肖培根. 蒙古香蒲、宽叶香蒲和长苞香蒲花粉的黄酮类化合物的研究 [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1989(12): 939-947.

[13] 陈嬿, 方圣鼎, 顾云龙, 等. 水烛香蒲花粉中的活性成分 [J]. 中草药, 1990, 21(2): 2-5.

[14] 贾世山, 刘永潞, 马超美, 等. 狭叶香蒲花粉(蒲黄)黄酮类成分的研究 [J]. 药学学报, 1986, 21(6): 441-446.

[15] 杨永华, 柳克铃, 董志立. 长苞香蒲黄酮类化合物的研究 [J]. 中草药, 1983, 14(1): 11-12.

[16] Sick Woo W, Sue Choi J, Sik Kang S. A flavonol glucoside from *Typha latifolia* [J]. *Phytochemistry*, 1983, 22(12): 2881-2882.

[17] 廖矛川, 刘永潞, 肖培根. 狭叶香蒲的黄酮类成分研究 [J]. 植物学报, 1990, 32(2): 137-140.

[18] 梁晶晶, 孙连娜, 陶朝阳, 等. 水烛香蒲叶的化学成分研究 [J]. 药学实践杂志, 2007, 25(3): 150-151.

[19] Nhiem N X, Van Kiem P, Van Minh C, *et al*. A potential inhibitor of rat aortic vascular smooth muscle cell proliferation from the pollen of *Typha angustata* [J]. *Arch Pharm Res*, 2010, 33(12): 1937-1942.

[20] Yin K, Tang S L, Yu X H, *et al*. Apolipoprotein A-I inhibits LPS-induced atherosclerosis in ApoE$^{-/-}$ mice possibly via activated STAT3-mediated upregulation of tristetraprolin [J]. *Acta Pharmacol Sin*, 2013, 34(6): 837-846.

[21] Chen Y Q, Yu H L, Wu H, *et al*. Characterization and

quantification by LC-MS/MS of the chemical components of the heating products of the flavonoids extract in pollen typhae for transformation rule exploration [J]. *Molecules*, 2015, 20(10): 18352-18366.

[22] 巢蕾, 高明亮, 曹雨诞, 等. 水烛香蒲不同部位黄酮类化合物的动态分析 [J]. 广西植物, 2021, 41(5): 831-842.

[23] 陈佩东, 严辉, 张丽, 等. 蒲黄的化学成分研究 II [J]. 海峡药学, 2008, 20(12): 64-66.

[24] 刘斌, 陆蕴如. 东方香蒲花粉化学成分的研究 [J]. 中国药学杂志, 1998, 33(10): 587-590.

[25] 陈瑾, 郝二伟, 冯旭, 等. 蒲黄化学成分、药理作用及质量标志物 (Q-Marker) 的预测分析 [J]. 中草药, 2019, 50(19): 4729-4740.

[26] 冯绪强, 曾光尧, 谭健兵, 等. 水烛香蒲花粉镇痛活性部位化学成分研究 [J]. 中南药学, 2012, 10(3): 201-204.

[27] Della Greca M, Monaco P, Previtera L, *et al*. Carotenoid-like compounds from *Typha latifolia* [J]. *J Nat Prod*, 1990, 53(4): 972-974.

[28] 刘斌, 陆蕴如. 东方香蒲花粉化学成分研究 [J]. 北京中医药大学学报, 1998, 21(2): 43-44.

[29] 陈毓, 李锋涛, 陶伟伟, 等. 蒲黄化学成分研究 [J]. 天然产物研究与开发, 2015, 27(9): 1558-1563.

[30] 吴练中. 蒲黄挥发油化学成分研究 [J]. 中草药, 1993, 24(8): 412.

[31] 张淑敏, 曲桂武, 解飞霞, 等. 蒲黄化学成分研究 [J]. 中草药, 2008, 39(3): 350-352.

[32] 马红飞, 刘斌, 张桂燕, 等. 蒲黄炒炭前后亲脂性成分的 GC-MS 分析 [J]. 中国中药杂志, 2006, 31(3): 200-202.

[33] Ozawa T, Imagawa H. Polyphenolic compounds from female flowers of *Typha latifolia* L. [J]. *Agric Biol Chem*, 1988, 52(2): 595-597.

[34] 莫文电, 覃忠于, 黄月莉, 等. 蒲黄的研究进展 [J]. 今日药学, 2009, 19(8): 25-29.

[35] Zeng G Y, Wu Z Q, Cao W, *et al*. Identification of anti-nociceptive constituents from the pollen of *Typha angustifolia* L. using effect-directed fractionation [J]. *Nat Prod Res*, 2020, 34(7): 1041-1045.

[36] Liang J J, Sun L N, Tao Z Y, *et al*. Studies on the chemical constituents from the leaves of *Typha angustifolia* [J]. *J Pharm Pract*, 2007, 25: 150-152.

[37] Ding M Y, Jiang Y, Yu X A, *et al*. Screening of combinatorial quality markers for natural products by metabolomics coupled with chemometrics. A case study on pollen typhae [J]. *Front Pharmacol*, 2018, 9: 691.

[38] 贾世山, 马超美, 赵立芳. 狭叶香蒲花粉(蒲黄)中的亲脂性成分 [J]. 植物学报, 1990(6): 465-468.

[39] Della Greca M, Monaco P, Previtera L. Stigmasterols from *Typha latifolia* [J]. *J Nat Prod*, 1990, 53(6): 1430-1435.

[40] Della Greca M, Mangoni L, Molinaro A, *et al*. (20*S*)-4α-Methyl-24-methylenecholest-7-en-3β-ol, an allelopathic sterol from *Typha latifolia* [J]. *Phytochemistry*, 1990, 29(6): 1797-1798.

[41] Greca M D, Mangoni L, Molinaro A, *et al*. 5β,8β-Epidioxyergosta-6,22-dien-3β-ol from *Typha latifolia* [J]. *Gazz Chim Ital*, 1990, 120: 391-392.

[42] Takatsuto S. Composition of phytosterols in the pollen of *Typha latifolia* L [J]. *J Jpn Oil Chem Soc*, 1997, 46(6): 687-689715.

[43] 冯绪强, 曹圣楷, 冀思华, 等. 水烛香蒲花粉镇痛活性部位化学成分研究(II) [J]. 中华中医药学刊, 2014, 32(5): 1202-1204.

[44] 缪平, 林垚, 金声. 蒲黄多糖的研究 [J]. 高等学校化学学报, 1990, 11(12): 1362-1366.

[45] Gao M L, Zha Y L, Sheng N, *et al*. Integrated transcriptomics and lipidomics reveals protective effect in vascular endothelial barrier of a polysaccharide from *Typhae Pollen* [J]. *Int J Biol Macromol*, 2024, 282(Pt 2): 136817.

[46] 刘法锦, 金幼兰. 长苞香蒲氨基酸成分的研究 [J]. 湖南中医杂志, 1985, 1(3): 42.

[47] 杨永华, 刘桂焕, 徐华雄, 等. 窄叶香蒲与长苞香蒲化学成分的分析研究 [J]. 中药通报, 1986, 11(12): 39-42.

[48] 张航, Chayanis S, 吴婉莹, 等. 商品中药材蒲黄的真伪优劣鉴别研究 [J]. 上海中医药大学学报, 2019, 33(3): 81-87.

[49] 孙全峰, 周建理, 杨青山, 等. 蒲黄及其混伪品的微性状鉴别 [J]. 甘肃中医药大学学报, 2017, 34(3): 33-37.

[50] 刘香英, 王海祥, 劳敏华. 蒲黄及其伪品的鉴别 [J]. 中国药物经济学, 2013, 8(6): 29-31.

[51] 龙全江, 徐雪莲, 刘峰林, 等. 蒲黄及其伪品的鉴别 [J]. 甘肃中医学院学报, 2000, 17(2): 49-51.

[52] 肖顺经, 马跃新. 蒲黄及其扁枝石松子伪制品的鉴别 [J]. 云南中医中药杂志, 2011, 32(7): 63-64.

[53] 陶翠祥, 张兆芳. 杨锡仓主任鉴别与炮制蒲黄的经验 [J]. 内蒙古中医药, 2013, 32(25): 77.

[54] 张朝民. 蒲黄常见掺伪的鉴别检验 [J]. 光明中医, 2016, 31(4): 590-591.

[55] 马孝熙, 孙伟, 任伟超, 等. 蒲黄、松花粉等花粉类药材及其混伪品的 DNA 条形码鉴定 [J]. 中国中药杂志, 2014, 39(12): 2189-2193.

[56] 王孟虎, 徐义菁, 郭雯雅, 等. 基于特异性引物和 DNA 条形码的松花粉及蒲黄鉴定 [J]. 甘肃中医药大学学报, 2025, 42(4): 44-51.

[57] 杨惠, 崔晓英. 中药材蒲黄的质量问题及快速鉴别方法 [J]. 中医药导报, 2008, 14(1): 64.

[58] 高珊, 张婷婷, 崔邵婧, 等. 市售蒲黄饮片的品质考察 [J]. 中国药事, 2014, 28(3): 292-295.

[59] 林春燕. 蒲黄、草蒲黄药材及其饮片的质量分析和标准研究 [D]. 昆明: 云南中医学院, 2018.

[60] 葛会奇, 贾天柱. LC-MS/PAD 法测定非法染色的中药蒲黄和黄芩饮片中金胺 O [J]. 辽宁中医杂志, 2011, 38(8): 1616-1618.

[61] 刘飞飞, 廖微, 黄敏, 等. 球面参考光像面数字全息显微术及对中药饮片细胞形貌的表征 [J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(2): 20904.

[62] 文红梅, 王业盈, 彭国平, 等. HPLC 法测定蒲黄中总黄酮的含量 [J]. 现代中药研究与实践, 2006, 20(3): 41-44.

[63] 马家宝, 康梦莹, 陈小媛, 等. 蒲黄总黄酮大孔树脂纯化工艺研究 [J]. 广西中医药大学学报, 2014, 17(1): 78-81.

[64] 张妍妍, 陈瑾, 宋舸, 等. UPLC 法同时测定蒲黄中两种黄酮类成分 [J]. 广州化工, 2019, 47(19): 94-97.

[65] 杨棣华, 梁文能. 高效液相色谱法测定不同产地蒲黄药材中 3 种黄酮苷元含量 [J]. 中国药业, 2019, 28(19): 27-29.

[66] 白雪薇, 张薇, 费忠萍, 等. 一测多评法同时测定蒲黄中 4 种成分的含量 [J]. 沈阳药科大学学报, 2018, 35(8): 628-631.

[67] 吕紫璇, 杜云, 唐瑜, 等. 不同成熟度蒲黄中异鼠李素-3-*O*-新橙皮苷、香蒲新苷的含量研究 [J]. 临床医药文献电子杂志, 2018, 5(11): 172-174.

[68] 李敏, 乔旭, 魏建和, 等. 基于 UPLC 多指标测定和指纹图谱对不同来源茵陈药材质量评价 [J]. 中草药, 2025, 56(1): 282-292.

[69] 杨瑛, 王实强, 蔡光先. 蒲黄药材 HPLC 指纹图谱标准研究 [J]. 中华中医药杂志, 2008, 23(5): 444-446.

[70] 唐敏, 孙飞, 梁生旺, 等. 基于 UPLC 的蒲黄指纹图谱和多成分含量测定方法研究 [J]. 中药材, 2022, 45(8): 1894-1898.

[71] 李钢, 许舒娅, 赵丽敏, 等. 基于药物体系质量评价模式的蒲黄质量表征关联分析研究 [J]. 北京中医药大学学报, 2015, 38(6): 393-399.

[72] Wang X Y, Chen X H, Li J, *et al*. Thrombin-based discovery strategy of bioactive-chemical quality marker combination for pollen of *Typha orientalis* by metabolomics coupled with chemometrics [J]. *Phytomedicine*, 2020, 75: 153246.

[73] 董钰宁, 桑梦娇, 任小英, 等. 基于近红外光谱技术的蒲黄主要质控指标同步快速精准预测 [J]. 中国药品标准, 2025, 26(3): 325-331.

[74] 中华中医药学会《中药质量标志物研究技术指南》编写组. 中药质量标志物研究技术指南 [J]. 中草药, 2025, 56(7): 2249-2252.

[75] Tian F, Zhang Y, Chen L X, *et al*. Comprehensive quality evaluation and botanical differentiation of *Typhae Pollen* using UHPLC-DAD/Q-TOF-MS and multivariate chemometric analysis [J]. *Phytochem Anal*, 2025, 36(5): 1435-1449.

[76] 田芳, 张英, 吴孟华, 等. HPLC 特征图谱结合多模式识别及熵权 TOPSIS 法的不同基原蒲黄药材质量评价 [J]. 中草药, 2025, 56(4): 1377-1384.

[责任编辑 时圣明]