

## 芥子化学成分、药理作用研究进展及其质量相关功效物质预测分析

李淑贤<sup>1</sup>, 朱紫含<sup>1#</sup>, 邵俊然<sup>2</sup>, 丁梦祥<sup>1</sup>, 杨丽<sup>1</sup>, 杨一帆<sup>1</sup>, 刘文君<sup>1</sup>, 王团结<sup>1</sup>, 王振中<sup>1</sup>, 曹亮<sup>1</sup>, 肖伟<sup>1\*</sup>, 李海波<sup>1\*</sup>

1. 中药制药过程控制与智能制造技术全国重点实验室(江苏康缘药业股份有限公司/南京中医药大学), 江苏 南京 211112
2. 药物合成与优化湖北省重点实验室, 荆楚理工学院, 湖北 荆门 448000

**摘要:** 芥子 *Sinapis Semen* 为温化寒痰之要药, 具有温肺豁痰利气、散结通络止痛之功效, 在中医临床中具有重要作用。现代研究表明, 芥子中主要含有硫代葡萄糖苷类、芥子碱类、黄酮类及挥发油等化学成分, 其中芥子碱硫氰酸盐被《中国药典》2020年版列为芥子的质量控制指标成分。然而, 当前芥子的质量评价指标仍较为单一, 难以全面反映其整体功效物质基础, 仍需进一步深入研究。通过系统全面梳理芥子的化学成分与药理作用研究进展, 并基于中药功效物质的“三要素”与质量标志物的“五原则”, 通过多维度分析预测白芥子苷、黑芥子苷、芥子碱、芥子碱硫氰酸盐、异硫氰酸烯丙酯等成分可作为芥子质量评价的核心功效成分群, 为建立更科学、全面的芥子质量控制体系提供理论参考。

**关键词:** 芥子; 功效物质; 质量标志物; 白芥子苷; 黑芥子苷; 芥子碱; 芥子碱硫氰酸盐; 异硫氰酸烯丙酯

中图分类号: R285 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2026)07-2768-19

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.07.027

## Research progress on chemical constituents and pharmacological effects of *Sinapis Semen* and its quality-related effective components analysis

LI Shuxian<sup>1</sup>, ZHU Zihan<sup>1</sup>, SHAO Junran<sup>2</sup>, DING Mengxiang<sup>1</sup>, YANG Li<sup>1</sup>, YANG Yifang<sup>1</sup>, LIU Wenjun<sup>1</sup>, WANG Tuanjie<sup>1</sup>, WANG Zhenzhong<sup>1</sup>, CAO Liang<sup>1</sup>, XIAO Wei<sup>1</sup>, LI Haibo<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Technologies for Chinese Medicine Pharmaceutical Process Control and Intelligent Manufacture (Jiangsu Kanion Pharmaceutical Co., Ltd., & Nanjing University of Chinese Medicine), Nanjing 211112, China
2. Hubei Key Laboratory of Medicinal Synthesis and Process Optimization, Jingchu University of Technology, Jingmen 448000, China

**Abstract:** Jiezi (*Sinapis Semen*), as an essential herb for warming and resolving cold phlegm, possesses the effects of warming the lungs, dispelling phlegm, promoting *qi* flow, dispersing nodules, unblocking collaterals, and relieving pain. It plays a significant role in clinical applications of traditional Chinese medicine (TCM). Modern research has shown that *Sinapis Semen* primarily contains various chemical components such as glucosinolates, sinapine, flavonoids, and volatile oils. Among these, sinapine thiocyanate is listed as the quality control indicator for *Sinapis Semen* in the 2020 edition of *Chinese Pharmacopoeia*. However, the current quality evaluation indicators for *Sinapis Semen* remain relatively limited, making it difficult to comprehensively reflect its overall material basis of effective components, and further in-depth research is still needed. This article systematically and comprehensively reviews the research progress on the chemical composition and pharmacological effects of *Sinapis Semen*. Based on three essential criteria of effective components (identification, dose-effect precision, and mechanism clarification) and the “five principles” of quality markers for TCM—effectiveness, specificity, measurability, transmission and traceability, and compatibility environment, this study identifies sinalbin, sinigrin, sinapine, sinapine thiocyanate, and allyl isothiocyanate as potential core components for the quality evaluation of

收稿日期: 2025-11-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(82404828); 江苏省院士工作站(BM2024101, BM2023118)

作者简介: 李淑贤, 硕士研究生, 研究方向为中药制药技术与产品开发。E-mail: lishuxian0721@163.com

#共同第一作者: 朱紫含, 硕士, 研究方向为中药复方作用机制。E-mail: zhuzihan1112@163.com

\*通信作者: 李海波, 研究员级高级工程师, 硕士生导师, 从事中药及天然药物活性成分研究。E-mail: lihaibo1985124@sina.com

肖伟, 研究员级高级工程师, 博士生导师, 从事中药新剂型的研究与开发。E-mail: xw\_kanion@163.com

*Sinapis Semen*. This review can provide a theoretical reference for establishing a more scientific and comprehensive quality control system for *Sinapis Semen*.

**Key words:** *Sinapis Semen*; effective components; quality marker; sinigrin; sinalbin; sinapine; sinapine thiocyanate; allyl isothiocyanate

芥子 *Sinapis Semen* 为十字花科白芥属植物白芥 *Sinapis alba* L.或芥 *Brassica juncea* (L.) Czern. et Coss.的干燥成熟种子,前者习称“白芥子”,后者习称“黄芥子”。作为我国传统中药材,芥子产地分布广泛,以河南、安徽地区产量最大。其性温味辛,归肺经,具有温肺豁痰利气,散结通络止痛的功效,是中医临床治疗寒痰喘咳、胸胁胀痛、痰滞经络、关节麻木及阴疽肿毒等症的常用要药,兼具药食同源特性<sup>[1]</sup>。现代研究表明,芥子中主要化学成分包括硫代葡萄糖苷 (glucosinolates, GS) 类(如白芥子苷)、生物碱类(芥子碱)、有机酸类(芥子酸)、脂肪油及挥发油,具有抗炎镇痛、镇咳祛痰平喘、抑制前列腺增生等药理作用,临床应用前景广泛<sup>[2]</sup>。本文对芥子的化学成分及药理作用进行系统全面的综述,并基于“化学成分-生源途径-传统功效-现代药理”的多维关联模式,结合中药功效物质的“三要素”(物质清晰、量效精准、机制明确)与质量标志物 (quality marker, Q-Marker) 的“五原则”,对芥子潜在的质量相关功效物质进行预测分析,为其科学、全面的质量标准体系的构建提供理论支撑。

### 1 化学成分

近年来,随着分析技术的不断发展,特别是色

谱-质谱联用技术、核磁共振及高分辨质谱等先进手段的应用,芥子的化学成分研究取得显著进展。研究表明,芥子富含结构多样、生物活性显著的化学成分,主要包括 GS 类、生物碱类、脂肪酸类、挥发油类、黄酮类及酚类衍生物、氨基酸类及其衍生物、糖类与糖苷类化合物等。此外,研究还发现其含有甾醇类、萜类、核苷酸类及多种脂溶性成分等。这些成分的发现为阐明芥子的药效物质基础提供了重要依据。

#### 1.1 GS 类

GS 简称硫苷,是芥子中的特征性次生代谢产物,也是其发挥药理活性的关键物质基础<sup>[3]</sup>。从化学结构来看,GS 由磺酰基团、β-D-硫代葡萄糖基和 1 个可变的侧链 (R 基团) 3 个特征性结构单元组成。其中磺酰基和 β-D-硫代葡萄糖基共同构成 GS 的核心骨架结构。根据 R 基团的化学特征,GS 可分为脂肪族硫苷、芳香族硫苷及吲哚族硫苷 3 类。目前已从芥子中鉴定出 GS 类成分共 13 个(1~13),具体信息见表 1。其中白芥子和黄芥子中 GS 类成分分别以白芥子苷和黑芥子苷为主,二者在芥子酶的催化作用下会发生降解,生成具有刺激性的异硫氰酸酯。

表 1 芥子中的 GS 类、芥子碱类、脂肪酸类、挥发油类及黄酮类成分

Table 1 GS, sinapines, fatty acids, volatile oils and flavonoids in *Sinapis Semen*

编号	中文名称	分子式	来源	文献
1	黑芥子苷	C <sub>10</sub> H <sub>17</sub> NO <sub>9</sub> S <sub>2</sub> .K	A、B	4-5
2	白芥子苷	C <sub>14</sub> H <sub>19</sub> NO <sub>10</sub> S <sub>2</sub>	A、B	5-7
3	葡萄糖芸薹素	C <sub>11</sub> H <sub>19</sub> NO <sub>9</sub> S <sub>2</sub>	A、B	4-5,8
4	葡萄糖芜菁苷	C <sub>11</sub> H <sub>21</sub> NO <sub>9</sub> S <sub>3</sub>	A、B	4-5
5	8-甲磺酰基辛基硫代葡萄糖苷	C <sub>16</sub> H <sub>31</sub> NO <sub>10</sub> S <sub>3</sub>	B	7
6	9-甲磺酰基壬基硫代葡萄糖苷	C <sub>17</sub> H <sub>33</sub> NO <sub>10</sub> S <sub>3</sub>	B	7
7	苜基芥子油苷	C <sub>15</sub> H <sub>21</sub> NO <sub>9</sub> S <sub>2</sub>	B	4-5,8
8	4-羟基葡萄糖芸薹素	C <sub>16</sub> H <sub>20</sub> N <sub>2</sub> O <sub>10</sub> S <sub>2</sub>	B	5
9	芸薹葡萄糖硫苷	C <sub>11</sub> H <sub>19</sub> NO <sub>10</sub> S <sub>2</sub>	A	5-6,8
10	葡萄糖芜菁素	C <sub>11</sub> H <sub>21</sub> NO <sub>10</sub> S <sub>3</sub>	A	4
11	葡萄糖桂竹香苷	C <sub>11</sub> H <sub>21</sub> NO <sub>11</sub> S <sub>3</sub> .K	A	4
12	芸薹葡萄糖硫苷	C <sub>16</sub> H <sub>20</sub> N <sub>2</sub> O <sub>9</sub> S <sub>2</sub>	A	4-5
13	葡萄糖芸薹卡宁	C <sub>12</sub> H <sub>21</sub> NO <sub>9</sub> S <sub>2</sub>	A	8
14	4-羟基苯甲酰胆碱	C <sub>12</sub> H <sub>18</sub> NO <sub>3</sub>	A	9-10
15	芥子碱	C <sub>16</sub> H <sub>24</sub> NO <sub>5</sub>	A、B	10-11
16	芥子碱硫氰酸盐	C <sub>16</sub> H <sub>24</sub> NO <sub>5</sub> .SCN	A、B	10-11
17	3-羟基-4-甲氧基桂皮酰胆碱	C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> NO <sub>4</sub>	A	10,12

表 1 (续)

编号	中文名称	分子式	来源	文献
18	3,4-甲氧基苯甲酰胆碱	C <sub>14</sub> H <sub>22</sub> NO <sub>4</sub>	A	10,12
19	6-十八碳烯酸	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	A	13
20	硬脂酸	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	A	13-16
21	11-二十碳烯酸	C <sub>20</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>	A	13,16
22	芥酸	C <sub>22</sub> H <sub>42</sub> O <sub>2</sub>	A	13-14,16
23	棕榈酸	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	A	13-14,16-17
24	亚油酸	C <sub>18</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	A	13-17
25	豆蔻酸	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub>	A	14,16-17
26	月桂酸	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub>	A	14
27	十五烷酸	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	A	14
28	α-亚麻酸	C <sub>18</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	A	14,17
29	十九烷酸	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>	A	14
30	棕榈油酸	C <sub>16</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	A	14-17
31	花生酸	C <sub>20</sub> H <sub>40</sub> O <sub>2</sub>	A	14-16
32	油酸	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	A	14-15,17
33	14-甲基十五烷酸	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	A	15
34	7,10-十六碳二烯酸	C <sub>16</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub>	A	15
35	12-十八碳烯酸	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	A	15
36	芥子酸	C <sub>11</sub> H <sub>12</sub> O <sub>5</sub>	A	15
37	2-己烷基环丙烷癸酸	C <sub>16</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	A	15
38	2-己烷基环丙烷辛酸	C <sub>13</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub>	A	15
39	神经酸	C <sub>24</sub> H <sub>46</sub> O <sub>2</sub>	A	15
40	顺-11,14-二十碳二烯酸	C <sub>20</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	A	15,17
41	顺-11-二十碳烯酸	C <sub>20</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>	A	15,17
42	反-11-二十碳烯酸	C <sub>20</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>	A	15,17
43	木蜡酸	C <sub>24</sub> H <sub>48</sub> O <sub>2</sub>	A	15-17
44	亚麻酸	C <sub>18</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	A	15-16
45	山萹酸	C <sub>22</sub> H <sub>44</sub> O <sub>2</sub>	A	15-16
46	11,13-二十碳二烯酸	C <sub>20</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	A	16
47	γ-亚麻酸	C <sub>18</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	A	16
48	15-二十四烯酸	C <sub>24</sub> H <sub>46</sub> O <sub>2</sub>	A	16
49	9-十八碳烯酸	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	A	17
50	8-十八碳烯酸	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	A	17
51	11,14,17-二十碳三烯酸	C <sub>20</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	A	17
52	13-二十二碳烯酸	C <sub>22</sub> H <sub>42</sub> O <sub>2</sub>	A	17
53	11-二十二碳烯酸	C <sub>22</sub> H <sub>42</sub> O <sub>2</sub>	A	17
54	9-二十二碳烯酸	C <sub>22</sub> H <sub>42</sub> O <sub>2</sub>	A	17
55	乙醚	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	B	18
56	环己酮	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O	B	18
57	异丙基异硫氰酸烯丙酯	C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> NS	B	18
58	5-甲基糠醛	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	B	18
59	硫代异氰酸-1-丁烯	C <sub>5</sub> H <sub>7</sub> NS	B	18
60	2-甲硫基甲基咪喃	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> OS	B	18
61	γ-萜烯	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	B	18
62	正戊基异硫氰酸酯	C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> NS	B	18
63	壬醛	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	B	18
64	己基苯	C <sub>12</sub> H <sub>18</sub>	B	18
65	正十三烷	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	B	18
66	1-异硫氰基丙烷	C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> NS	B	18
67	2,4-癸烷二烯醛	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> O	B	18
68	丁香酚	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	B	18
69	2,3-二氢-1,2-二甲基-1 <i>H</i> -吡啶	C <sub>10</sub> H <sub>13</sub> N	B	18
70	α-咕巴烯	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	B	18

表 1 (续)

编号	中文名称	分子式	来源	文献
71	十五烷	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	B	18
72	7-十六烯	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub>	B	18
73	<i>N,N'</i> -二-2-丙烯基硫脲	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> N <sub>2</sub> S	B	18
74	8-十七烷	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub>	B	18
75	2-辛基-环丙辛醇	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O	B	18
76	1-哌嗪乙胺	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> N <sub>2</sub>	B	18
77	<i>D</i> -苧烯	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	B	19
78	4-甲酰基-1,3(2 <i>H</i> )-二氢咪唑	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> N <sub>2</sub> O	B	19
79	4-甲酰基-1,3(2 <i>H</i> )-二氢咪唑-2-硫酮	C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> N <sub>2</sub> OS	B	20
80	( <i>E</i> )-2-(1-戊烯基)-呋喃	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O	B	20
81	2-乙氧基丙烷	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	A	21
82	3-丁烯腈	C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> N	A	21
83	3-甲基-3-丁烯腈	C <sub>5</sub> H <sub>7</sub> N	A	21
84	2,3-二羟基丙醛	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	A	21
85	异硫氰酸-3-丁烯酯	C <sub>5</sub> H <sub>7</sub> NS	A	21
86	1-环丙基丙烷	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	A	22
87	4-甲基-2-羟基己烷	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> O	A	22
88	(1 <i>R</i> )-(+)- $\alpha$ -蒎烯	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	A	22
89	1-乙酰环己烯	C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> O	A	22
90	正庚醇	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> O	A	22
91	甲基庚烯酮	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O	A	22
92	2-甲基-6-庚烯醇	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	A	22
93	甲基-1,3-二己烯酮	C <sub>13</sub> H <sub>22</sub> O	A	22
94	1,2,4-三乙基环己烷	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>	A	22
95	十二烷	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	A	22
96	苯并噻唑	C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> NS	A	22
97	异硫氰酸环己酯	C <sub>7</sub> H <sub>11</sub> NS	A	22
98	茴香脑	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O	A	22
99	十三烷	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	A	22
100	十四烷	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	A	22
101	$\beta$ -叶绿烯	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	A	22
102	2,6-二甲基萘	C <sub>12</sub> H <sub>12</sub>	A	22
103	2,6-二叔丁基对甲酚	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub> O	A	22
104	柏木脑	C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O	A	22
105	丙烯腈	C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> N	A	23
106	戊腈	C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> N	A	23
107	2-庚醇	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> O	A	23
108	( <i>E</i> )-2-庚烯醛	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O	A	23
109	5-乙酰基噻唑	C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> NOS	A	23
110	4-氨基-5-甲基-2(5 <i>H</i> )呋喃酮	C <sub>5</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub>	A	23
111	4,5-二甲基噻唑	C <sub>5</sub> H <sub>7</sub> NS	A	23
112	2-戊基呋喃	C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> O	A	23
113	硫代异氰酸丙烷	C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> NS	A	23
114	硫代异氰酸丁烷	C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> NS	A	23
115	6-甲基-5-庚烯-2-醇	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	A	23
116	辛醛	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	A	23
117	2-辛醇	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	A	23
118	2,4-庚二烯醛	C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> O	A	23
119	柠檬烯	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	A	23
120	3-辛烯-2-酮	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O	A	23
121	正辛醇	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	A	23
122	3,5-辛二烯-2-酮	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O	A	23
123	甲基壬己醛	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O	A	23

表 1 (续)

编号	中文名称	分子式	来源	文献
124	萘	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	A	23
125	2-壬烯醛	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub> O	A	23
126	异茴香醚	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	A	23
127	2-十二碳烯醇	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O	A	23
128	皮蝇磷	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> Cl <sub>3</sub> O <sub>3</sub> PS	A	23
129	反式茴香脑	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O	A	23
130	2,4-二烯十二醛	C <sub>12</sub> H <sub>20</sub> O	A	23
131	反式-2,4-庚二烯醛	C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> O	A	23
132	4,5-二甲氧基-2-(2-丙烯基)酚	C <sub>11</sub> H <sub>14</sub> O <sub>3</sub>	A	23
133	2-乙基萘	C <sub>12</sub> H <sub>12</sub>	A	23
134	雅槛蓝烯	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	A	23
135	(+)- $\alpha$ -附酮	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> O	A	23
136	3-丁基-1,3,2-恶唑硼烷	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> BNO	A	23
137	4-异硫氰基氰基-1-丁烯	C <sub>5</sub> H <sub>7</sub> NS	B	18-20
138	3-氯丙腈	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> ClN	A、B	18,23
139	2-丁烯腈	C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> N	A、B	18,22-23
140	异硫氰酸烯丙酯	C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> NS	A、B	18,22-23
141	邻甲基异丙苯	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	B	18-20
142	苯乙醛	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O	A、B	18-20,23
143	苯丙腈	C <sub>9</sub> H <sub>9</sub> N	A、B	18,23
144	大蒜素	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> OS <sub>2</sub>	A、B	18,23
145	石竹烯	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	B	18-20
146	异硫氰酸苯乙酯	C <sub>9</sub> H <sub>9</sub> NS	A、B	18,20-21,23
147	糠醛	C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O	B	19-20
148	异丁基异硫氰酸酯	C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> NS	A、B	19-21,23
149	1-异硫氰基丁烷	C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> NS	B	19-20
150	1-异硫氰基-3-甲基-丁烷	C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> NS	A、B	19-21
151	1,5-己二烯	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	B	19-20
152	(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮	C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> O	B	19-20
153	苧酮	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O	B	19-20
154	4-甲基戊基异硫氰酸酯	C <sub>7</sub> H <sub>13</sub> NS	B	19-20
155	苯基丙基氰	C <sub>10</sub> H <sub>11</sub> N	B	19-20
156	3-甲基-4-异丙基苯酚	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O	B	19-20
157	1-异硫氰基-3-(甲硫基)-丙烷	C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> NS <sub>2</sub>	B	19-20
158	(E,E)-2,4-癸二烯醛	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> O	B	19-20
159	1,2-二甲氧基-(2-丙烯基)-苯	C <sub>11</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	B	19-20
160	D-柠檬烯	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	A、B	20-22
161	正戊醇	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	A	22-23
162	正己醛	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	A	22-23
163	木樨草素	C <sub>15</sub> H <sub>10</sub> O <sub>6</sub>	A、B	24
164	木犀草素-7-O- $\beta$ -D-葡萄糖苷	C <sub>21</sub> H <sub>20</sub> O <sub>11</sub>	A、B	24
165	山柰酚-3-O- $\beta$ -D-葡萄糖苷	C <sub>21</sub> H <sub>20</sub> O <sub>11</sub>	A、B	24
166	山柰酚-7-O- $\beta$ -D-葡萄糖苷	C <sub>21</sub> H <sub>20</sub> O <sub>11</sub>	A	25
167	车轴草苷	C <sub>21</sub> H <sub>20</sub> O <sub>11</sub>	A、B	25
168	芦丁	C <sub>27</sub> H <sub>30</sub> O <sub>16</sub>	B	25
169	芹菜素	C <sub>15</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>	A	25
170	黄芩苷	C <sub>21</sub> H <sub>18</sub> O <sub>11</sub>	A	25
171	山柰酚	C <sub>15</sub> H <sub>10</sub> O <sub>6</sub>	A、B	24-25
172	槲皮素	C <sub>15</sub> H <sub>10</sub> O <sub>7</sub>	A、B	24,26

A-白芥子; B-黄芥子, 下同。

A-*Sinapis alba*; B-*Brassica juncea*, same as belows.

### 1.2 芥子碱类

芥子碱类化合物为芥子中生物碱类主含成分,属于季铵型生物碱,且广泛存在于十字花科植物中<sup>[9]</sup>。芥子中现已发现5种芥子碱类化合物(14~18),其中芥子碱硫氰酸盐是芥子碱类化合物在植物中的主要存在形式<sup>[3]</sup>。芥子中芥子碱类成分的归纳见表1。

### 1.3 脂肪酸类

芥子中含有丰富多样的脂肪酸类化学成分,脂肪酸是由碳、氢、氧组成的长链羧酸,是脂类(如脂肪、油、磷脂等)的基本构成单位。气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)在芥子中脂肪酸类成分的研究中发挥重要作用,史丽颖等<sup>[13]</sup>、吴国欣等<sup>[14]</sup>、李日葵等<sup>[15]</sup>与张媛等<sup>[16]</sup>采用GC-MS在白芥子提取物中分别鉴定出6个(19~24)、12个(20、22~32)、18个(20、24、30~45)与14个(20~25、30、31、43~48)脂肪酸类成分;邓红等<sup>[17]</sup>采用超临界CO<sub>2</sub>萃取和石油醚超声提取法提取白芥子脂溶性成分,并使用GC-MS联用技术,从中共鉴定出21个脂溶性成分,2种提取方法所得成分大致相同,均以芥酸、油酸、亚油酸、亚麻酸及二十碳烯酸等不饱和脂肪酸为主,但超临界CO<sub>2</sub>提取物中各组分的绝对含量均高于石油醚超声提取法。芥子中的脂肪酸类成分(19~54)归纳见表1。

### 1.4 挥发油类

挥发油类成分是芥子核心活性成分之一,其核心成分主要包括异硫氰酸酯类(如烯丙基异硫氰酸

酯, AITC)、GS 水解产物、醛酮类、醇类和萜烯类等。其中异硫氰酸酯类是由GS(如黑芥子苷和白芥子苷)在芥子酶作用下水解产生,因其独特的R-N=C=S结构而成为当前研究的热点,具有独特的刺激性气味和潜在的生物活性。需要特别说明的是,不同品种芥子(白芥子/黄芥子)的挥发油组成存在显著差异,这种差异直接影响了其临床应用价值。芥子中挥发油类成分(55~162)具体信息见表1。

### 1.5 黄酮类

黄酮类化合物是芥子主要的次生代谢产物之一,具有显著的化学多样性与生物活性。目前已从芥子中鉴定出10个黄酮类化合物(163~172),具体化合物见表1。

### 1.6 酚类衍生物

酚类衍生物是芥子中一类重要的生物活性成分,包括酚酸、酚醇、酚酮等,目前从芥子中共鉴定出酚类衍生物26个(173~198),具体归纳见表2。

### 1.7 氨基酸类及其衍生物

芥子中含有多种氨基酸,目前已从白芥子中鉴定出12个氨基酸(199~210)及12个氨基酸衍生物(211~222)。具体化合物见表2。

### 1.8 糖类与糖苷类化合物

Torrijos等<sup>[24]</sup>通过UHPLC-MS/MS进行测定,从芥子中分析鉴定出8个糖苷类化合物(223~230)。贾小周等<sup>[28]</sup>从白芥子中鉴定出麦芽三糖、麦芽糖和α-乳糖3个糖类化合物(231~233)。冯宝

表2 芥子中的酚类衍生物、氨基酸及其衍生物、糖类与糖苷类成分

Table 2 Phenolic derivatives, amino acids and their derivatives, carbohydrates and glycosides in *Sinapis Semen*

编号	中文名称	分子式	来源	文献
173	对羟基苯甲醇	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	A	27
174	对羟基苯乙酮	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	A	28
175	对羟基苯乙酸	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	A	27,29
176	4,4'-二羟基二苄基醚	C <sub>14</sub> H <sub>14</sub> O <sub>3</sub>	A	27
177	4,4'-二羟基二苄基甲烷	C <sub>13</sub> H <sub>13</sub> O <sub>2</sub>	A	27
178	4,4'-二羟基苄基硫醚	C <sub>14</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub> S	A	27
179	4'-羟基苄基 4-羟基-3-(4"-羟基苄基)苄基醚	C <sub>21</sub> H <sub>20</sub> O <sub>4</sub>	A	27
180	2,4-双(4-羟基苄基)苯酚	C <sub>20</sub> H <sub>28</sub> O <sub>3</sub>	A	27
181	4-羟基苯甲酰胆碱	C <sub>12</sub> H <sub>18</sub> NO <sub>3</sub>	A	27
182	对羟基苯甲醛	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	A	28-29
183	对羟基乙腈	C <sub>8</sub> H <sub>7</sub> NO	A	29-30
184	芥子酸	C <sub>11</sub> H <sub>12</sub> O <sub>5</sub>	A、B	24-25,29
185	对羟基苯甲酸	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	A、B	24,29
186	水杨酸	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	A、B	24-25
187	对羟基肉桂酸	C <sub>9</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	A、B	24,26

表 2 (续)

编号	中文名称	分子式	来源	文献
188	咖啡酸	C <sub>9</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub>	A、B	24,26
189	阿魏酸	C <sub>10</sub> H <sub>10</sub> O <sub>4</sub>	A、B	24-26
190	芥子酸胆碱	C <sub>11</sub> H <sub>14</sub> O <sub>3</sub>	A、B	24-25
191	3-香豆酸	C <sub>9</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	A、B	25
192	绿原酸	C <sub>16</sub> H <sub>18</sub> O <sub>9</sub>	B	25-26
193	4-香豆酸	C <sub>9</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	B	25
194	龙胆酸	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>4</sub>	B	25
195	焦棓酸	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub>	B	25
196	香草酸	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub>	A	26
197	紫丁香酸	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>	B	26
198	原儿茶酸	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>4</sub>	B	26
199	L-组氨酸	C <sub>6</sub> H <sub>9</sub> N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	A	28
200	D-天冬酰胺	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	28
201	D-天冬氨酸	C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>4</sub>	A	28
202	DL-高丝氨酸	C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>3</sub>	A	28
203	L-谷氨酸	C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>4</sub>	A	28
204	L-缬氨酸	C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>2</sub>	A	28
205	L-蛋氨酸	C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>2</sub> S	A	28
206	L-焦谷氨酸	C <sub>5</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>3</sub>	A	28
207	异亮氨酸	C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> NO <sub>2</sub>	A	28
208	L-亮氨酸	C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> ON <sub>2</sub>	A	28
209	L-酪氨酸	C <sub>9</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>3</sub>	A	28
210	L-苯丙氨酸	C <sub>9</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>2</sub>	A	28
211	D-谷氨酰胺	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	28
212	六氢吡啶羧酸	C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>2</sub>	A	28
213	1-甲基-L-组氨酸	C <sub>7</sub> H <sub>11</sub> N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	A	28
214	4-乙酰氨基丁酸	C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>3</sub>	A	28
215	L-蛋氨酸砒	C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>3</sub> S	A	28
216	左旋肉碱	C <sub>7</sub> H <sub>15</sub> NO <sub>3</sub>	A	28
217	4-胍基丁酸	C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	A	28
218	D-焦谷氨酸	C <sub>5</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>3</sub>	A	28
219	2-苯基甘氨酸	C <sub>8</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>2</sub>	A	28
220	还原型谷胱甘肽	C <sub>10</sub> H <sub>17</sub> N <sub>3</sub> O <sub>6</sub> S	A	28
221	氧化型谷胱甘肽	C <sub>20</sub> H <sub>32</sub> N <sub>6</sub> O <sub>12</sub> S <sub>2</sub>	A	28
222	半胱氨酰甘氨酸	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub> S	A	28
223	山柰酚-芥子酰-三己糖苷 I	C <sub>44</sub> H <sub>52</sub> O <sub>26</sub>	/	24
224	山柰酚-芥子酰-三己糖苷 II	C <sub>44</sub> H <sub>52</sub> O <sub>26</sub>	/	24
225	羟基苯甲酸-O-己糖苷	C <sub>15</sub> H <sub>16</sub> O <sub>8</sub>	/	24
226	羟基芥子苷	C <sub>16</sub> H <sub>20</sub> N <sub>2</sub> O <sub>10</sub> S <sub>2</sub>	/	24
227	芥子酰-香草酰-己糖苷	C <sub>31</sub> H <sub>38</sub> O <sub>16</sub>	/	24
228	二芥子酰-己糖苷 I	C <sub>34</sub> H <sub>42</sub> O <sub>18</sub>	/	24
229	二芥子酰-己糖苷 II	C <sub>34</sub> H <sub>42</sub> O <sub>18</sub>	/	24
230	二芥子酰-二己糖苷	C <sub>40</sub> H <sub>54</sub> O <sub>23</sub>	/	24
231	麦芽三糖	C <sub>18</sub> H <sub>32</sub> O <sub>16</sub>	A	28
232	麦芽糖	C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub>	A	28
233	α-乳糖	C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub>	A	28
234	β-胡萝卜苷	C <sub>35</sub> H <sub>60</sub> O <sub>6</sub>	A	30

“/” 未提及。

“/” was not mentioned.

民等<sup>[30]</sup>从白芥子中鉴定出了胡萝卜苷(234)。多糖研究方面, Cui<sup>[31]</sup>研究发现白芥子多糖由多种中性单糖组成, 葡萄糖为主, 其次为半乳糖、甘露糖、鼠李糖、阿拉伯糖及木糖, 此外, 还含有相当比例的糖醛酸。Gould 等<sup>[32]</sup>从休眠白芥子种子的子叶中分离出2种木葡聚糖组分, 二者均具有以(1→4)-β-D-葡萄糖为主链、C-6位连接D-木糖富集侧链的淀粉样蛋白典型结构, 但其侧链结构存在显著差异。

Hirst 等<sup>[33]</sup>从芥子胚中制备并表征出一种阿拉伯聚糖, 同时对芥菜籽的其他多糖(包括胚胎和种皮中的多糖)进行调查研究, 发现果胶型多糖占主导地位。芥子中的糖苷类成分见表2。

### 1.9 其他类化合物

除了上述几类化合物外, 芥子中还含有甾醇类、萜类、核苷酸类、维生素及除脂肪酸外的其他脂溶性成分等化合物(235~263), 见表3。

表3 芥子中的其他类化学成分

Table 3 Other chemical constituents in *Sinapis Semen*

编号	中文名称	分子式	来源	文献
235	(+)-β-萜澄茄油烯	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	A	15
236	2,4,6-三甲基-辛烷	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	A	15
237	1-十四炔	C <sub>14</sub> H <sub>26</sub>	A	15
238	1,3环辛二烯	C <sub>8</sub> H <sub>12</sub>	A	15-16
239	β-谷甾醇	C <sub>29</sub> H <sub>50</sub> O	A	15
240	1-(1,5-二甲基-4-己烯基)-4-甲基苯	C <sub>15</sub> H <sub>22</sub>	A	16
241	邻苯二甲酸酐	C <sub>8</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	A	16
242	二氢单紫杉烯	C <sub>17</sub> H <sub>30</sub>	A	16
243	5,10-十五碳二烯-1-醇	C <sub>15</sub> H <sub>28</sub> O	A	17
244	4,8-二羟基喹啉甲酸	C <sub>10</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>4</sub>	B	25
245	2,3-二氢-1-苯并咪唑-2-羧酸	C <sub>9</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	A、B	25
246	双(4-乙基亚苄基)山梨糖醇	C <sub>28</sub> H <sub>36</sub> O <sub>6</sub>	A	25
247	4-氨基苯甲酸	C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub>	A	25
248	苯甲酰胺	C <sub>12</sub> H <sub>18</sub> NO <sub>2</sub>	A	27
249	水苏碱	C <sub>7</sub> H <sub>13</sub> NO <sub>2</sub>	A	28
250	β-细辛脑	C <sub>12</sub> H <sub>16</sub> O <sub>3</sub>	A	28
251	腺苷酸	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> N <sub>5</sub> O <sub>7</sub> P	A	28
252	腺苷	C <sub>10</sub> H <sub>13</sub> N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>	A	28
253	鸟苷	C <sub>10</sub> H <sub>13</sub> N <sub>5</sub> O <sub>5</sub>	A	28
254	盐酸硫胺素	C <sub>12</sub> H <sub>16</sub> N <sub>4</sub> OS	A	28
255	烟酰胺	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> N <sub>2</sub> O	A	28
256	胆碱	C <sub>5</sub> H <sub>13</sub> NO	A	28
257	反玉米蛋白	C <sub>10</sub> H <sub>13</sub> N <sub>5</sub> O	A	28
258	5-羟甲基糠醛	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	A	28
259	十二烷基伯胺	C <sub>12</sub> H <sub>27</sub> N	A	28
260	胍丁胺	C <sub>5</sub> H <sub>14</sub> N <sub>4</sub>	A	28
261	葡萄糖氨	C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> NO <sub>5</sub>	A	28
262	D-葡萄糖-6-磷酸	C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> O <sub>9</sub> P	A	28
263	香豆素	C <sub>9</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	A	28

## 2 药理作用

芥子作为传统中药材, 其性温味辛, 主归肺经, 具有利气豁痰、温中散寒、通络止痛之功效, 临床上广泛用于痰饮咳喘、胸胁胀痛、痰滞经络、肢体痹痛麻木阴疽、肿毒等的治疗。现代药理学研究揭示, 芥子中富含的GS类、芥子碱等活性成分通过

多靶点多通路发挥显著药理效应: 在呼吸系统方面表现出优异的镇咳祛痰平喘作用; 其抗炎镇痛特性与NF-κB等信号通路的调控密切相关; 同时具有抑制前列腺增生、促进透皮吸收及潜在的抗肿瘤活性。这些研究成果为深入理解芥子的药效物质基础及临床合理应用提供了重要科学依据。

## 2.1 镇咳祛痰平喘

芥子在临床上被广泛用于多种呼吸系统疾病的治疗<sup>[34]</sup>。镇咳祛痰平喘是芥子基于“温肺豁痰”传统功效的核心现代药理作用，其活性已被大量体内实验证实。王辉等<sup>[35]</sup>研究发现芥子碱是芥子中镇咳平喘的功效物质之一，ig 芥子碱 14.8、74.0 mg/kg，及芥子碱 91.9、459.5、919.0 mg/L 喷雾给药，均能显著延长乙酰胆碱所致豚鼠的哮喘引喘潜伏期，通过松弛气道平滑肌、增加肺和气管容量，以起到平喘的作用。余正江<sup>[29]</sup>从白芥子中分离得到活性成分对羟基苯乙腈，并证实其具有镇咳作用。

冯宝民等<sup>[36]</sup>在浓氨水引咳实验中对实验动物的咳嗽潜伏期及咳嗽次数以评价炒制前后白芥子的镇咳作用。结果显示，炒制后白芥子镇咳作用增强，且白芥子炒制 10 min 后，对羟基苯乙腈含量升至炮制前的 7.5 倍，进一步验证了对羟基苯乙腈是白芥子镇咳的药效物质。张学梅等<sup>[37]</sup>对白芥子的不同溶剂提取物的镇咳、祛痰、平喘药理作用进行了研究，结果显示白芥子醇提取物有明显的镇咳作用，水提取物有良好的祛痰作用，石油醚提取物可显著对抗 4%氯化乙酰胆碱诱导的豚鼠哮喘。芥子的镇咳、祛痰、平喘药理作用归纳见图 1。

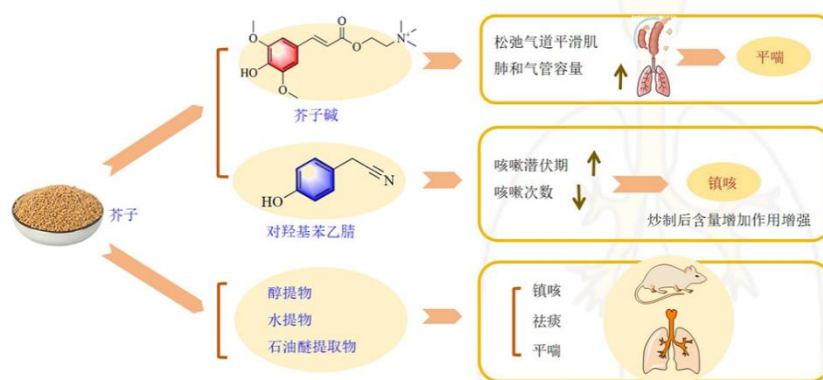


图 1 芥子镇咳、祛痰、平喘药理作用

Fig. 1 Pharmacological effects of *Sinapis Semen* in relieving cough, eliminating phlegm, and alleviating asthma

## 2.2 抗炎镇痛

芥子“通络止痛”的传统功效在现代研究中主要体现为显著的抗炎镇痛活性，其作用机制与调控炎症信号通路、抑制炎症介质释放密切相关。高远等<sup>[38]</sup>研究发现白芥子经皮给药对类风湿性关节炎大鼠具有明显治疗作用，研究表明，与模型组相比，白芥子组血清中白细胞介素-1 $\beta$  (interleukin-1 $\beta$ , IL-1 $\beta$ )、肿瘤坏死因子- $\alpha$  (tumor necrosis factor- $\alpha$ , TNF- $\alpha$ ) 及踝关节滑膜组织中 Toll 样受体 4 (Toll-like receptor 4, TLR4)、核因子- $\kappa$ B (nuclear factor- $\kappa$ B, NF- $\kappa$ B) 蛋白相对表达量均降低，表明其作用机制可能与抑制 TLR4/NF- $\kappa$ B 炎症轴有关。万军梅等<sup>[39]</sup>采用二甲苯致小鼠耳肿胀、醋酸致小鼠扭体反应和小鼠热板法研究白芥子不同提取物的抗炎镇痛作用，发现白芥子的水部位及醋酸乙酯部位均具有抗炎镇痛作用，但不同提取部位的抗炎镇痛作用存在一定差异，其主要有效部位是水部位。李小莉等<sup>[40]</sup>研究显示白芥子醇提物 300、600 mg/kg 均具有较强的抗炎镇痛作用，能显著抑制小鼠毛细血管通透性

增加，抑制小鼠耳肿胀；同时显著延长小鼠痛反应时间，减少扭体次数，并随剂量增加作用增强。Xian 等<sup>[41]</sup>研究发现 250 mg/kg 的白芥子与黄芥子均显著减轻 12-O-十四烷酰佛波醇-13-乙酸酯 (phorbol 12-myristate 13-acetate, TPA) 和花生四烯酸 (arachidonic acid, AA) 诱导的急性炎症模型及一氧化碳 (carbonic oxide, CO) 诱导的慢性炎症模型小鼠耳肿胀程度，明显抑制模型小鼠耳组织髓过氧化物酶活性。其作用机制可能是通过抑制 TNF- $\alpha$ 、IL-6 和 IL-1 $\beta$  等炎症介质的 mRNA 表达来实现的。芥子抗炎镇痛的药理作用及机制见图 2。

## 2.3 抑制前列腺增生

相关研究表明，白芥子及其活性成分可通过多靶点、多途径发挥抑制前列腺增生的作用。刘明等<sup>[42]</sup>在丙酸睾酮诱导的去势小鼠上研究白芥子不同提取物对其前列腺增生的药理作用，发现白芥子乙醇提取物能显著抑制丙酸睾酮诱发的去势小鼠前列腺增生，显著降低小鼠血清酸性磷酸酶活力，而水煎提取物则无此作用。吴国欣等<sup>[43-44]</sup>发现白芥子中  $\beta$ -



图 2 芥子的抗炎镇痛药理作用

Fig. 2 Pharmacological effects of *Sinapis Semen* on anti-inflammatory and analgesic

谷甾醇 8、16 mg/kg, 白芥子苷 8、16 mg/kg 及不饱和脂肪酸等物质协同作用, 产生降低毛细血管通透性、抑制纤维组织增生、降低血清酸性磷酸酶活性、抗雄激素等作用, 从而抑制前列腺增生, 且通过进一步实验证实, 其关键成分白芥子苷与β-谷甾醇均能以剂量相关性显著抑制去势小鼠的前列腺增生。此外, 二者在抗炎作用上各有侧重: 白芥子苷在较高剂量下表现出抗肉芽肿增殖作用, 而β-谷甾醇则在测试的全剂量范围内均能有效降低毛细血管通透性。陈密玉<sup>[45]</sup>首次报道了白芥子中的白芥子苷、芥子碱、β-谷甾醇及白芥子挥发油能够抑制实验小鼠前列腺增生组织中血管内皮生长因子 (vascular endothelial growth factor, VEGF) 和碱性成纤维细

胞生长因子 (basic fibroblast growth factor, bFGF) 的表达, 此外白芥子苷、芥子碱可以抑制试验小鼠前列腺增生组织中雄激素受体的表达。林燕妮<sup>[46]</sup>首次报道了白芥子对前列腺增生模型小鼠前列腺细胞形态学以及细胞凋亡的影响, 研究表明 16、32 mg/kg 的芥子碱、白芥子苷、β-谷甾醇, 及 8、16 mg/kg 的挥发油对丙酸睾酮所致小鼠实验性前列腺增生症具有显著治疗和预防作用, 并对增生的前列腺组织的病理形态具有改善作用。其机制与促进前列腺细胞凋亡, 使前列腺体积缩小、质量减轻相关。芥子的具体抑制前列腺增生作用见图 3。

#### 2.4 透皮吸收促进作用

白芥子生品辛散力强, 炒制后对皮肤刺激减

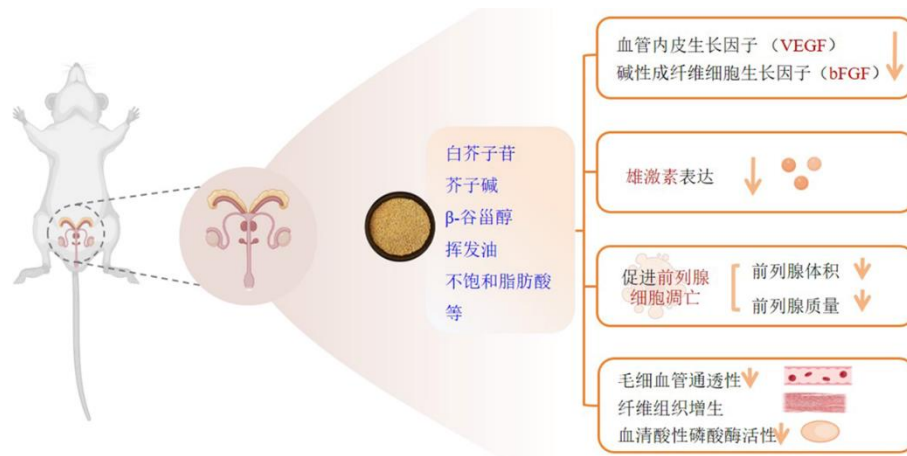


图 3 芥子抑制前列腺增生药理作用

Fig. 3 Pharmacological effects of *Sinapis Semen* on inhibiting benign prostatic hyperplasia

轻,是临床穴位贴敷治疗中最常用的药物<sup>[34]</sup>。王狄鑫等<sup>[47]</sup>发现白芥子与细辛存在互相促渗效果,药对配伍与穴位效应具有协同促渗效果,具体作用机制需进一步研究探讨。高远等<sup>[48]</sup>通过类风湿性关节炎家兔模型比较“冬病夏治”方中有、无白芥子配伍及经穴、非经穴给药方式对延胡索乙素皮肤渗透性的影响。结果显示穴位给药效果优于非穴位,且透皮促进作用与白芥子用量呈现一定相关性。阮世发

等<sup>[49]</sup>用体外透皮实验,以离体大鼠皮肤为透皮屏障测定各模型药物透过量,发现白芥子挥发油能有效促进冬病夏治方中有效成分延胡索乙素、细辛脂素等经皮渗透吸收,发挥治疗与促进药物渗透的双重作用,从而达到增效的目的。杨丹等<sup>[50]</sup>研究白芥子各种成分对盐酸小檗碱体外经皮渗透的影响,发现白芥子挥发油能促进盐酸小檗碱经皮吸收,且质量分数以0.5%为最佳。芥子的透皮吸收促进作用见图4。

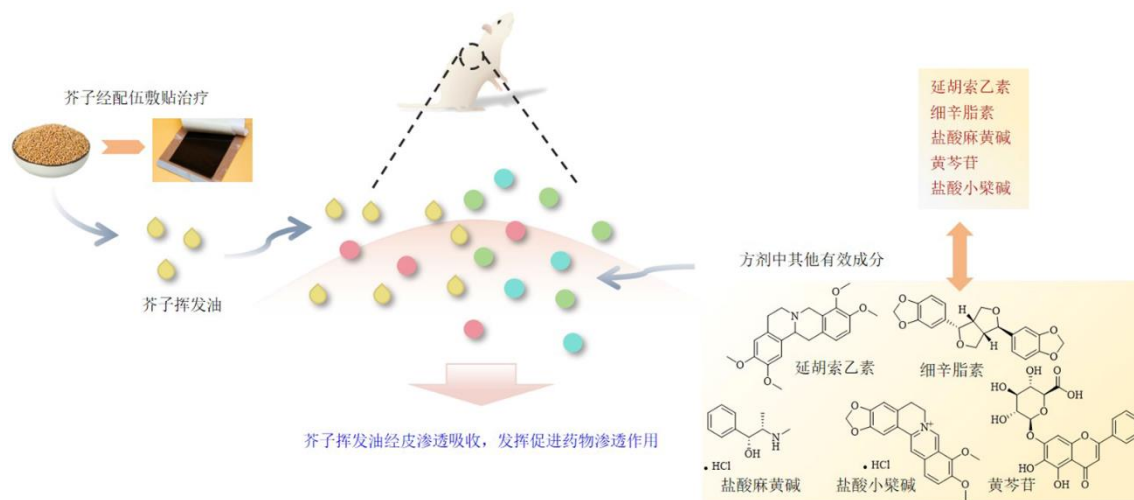


图4 芥子透皮吸收促进作用

Fig. 4 Promoting effect of *Sinapis Semen* on transdermal absorption

## 2.5 抗肿瘤

研究表明,芥子对肝癌、乳腺癌、肺癌及人皮肤鳞状细胞癌均有一定的抑制作用,其中的芥子碱硫酸氢盐、挥发油等物质具有抗肿瘤作用。吴圣曦等<sup>[51]</sup>发现白芥子挥发油能够抑制H<sub>22</sub>荷瘤小鼠肿瘤细胞的生长,且抑制作用呈现良好的剂量相关性,其机制可能与下调B细胞淋巴瘤-2(B-cell lymphoma-2, Bcl-2)的表达,上调肿瘤细胞凋亡相关蛋白Bcl-2相关X蛋白(Bcl-2-associated X protein, Bax)的表达,进而诱导细胞凋亡有关。陈腾祥等<sup>[52]</sup>应用CCK-8实验、划痕实验和Transwell实验等,发现芥子碱硫酸氢盐能显著抑制人肝癌SMMC-7721细胞的增殖、迁移和侵袭的能力,并明显减少SMMC-7721细胞中前列腺素内过氧化物合酶1(prostaglandin-endoperoxide synthase 1, PTGS1)、PTGS2、Bcl-2、基质金属蛋白酶2(matrix metalloproteinase 2, MMP2)和MMP9的蛋白表达,增加Bax的蛋白表达。苏羽岫<sup>[53]</sup>发现芥子碱硫酸氢盐能够剂量相关性抑制人皮肤鳞状细胞癌SCL-1细胞增殖、上皮间质转化、转移,其机制可能与抑制

表皮生长因子受体/磷脂酰肌醇3-激酶(phosphatidylinositol-3-kinase, PI3K)/蛋白激酶B(protein kinase B, Akt)信号通路的活化有关。此外, Jeyaraj等<sup>[54]</sup>研究发现黄芥子对人乳腺癌MCF-7细胞和人肺癌A549细胞具有细胞毒性,且呈现剂量相关性。金璇等<sup>[55]</sup>发现白芥子提取物可抑制宫颈癌细胞的增殖、迁移和侵袭,其机制可能与调节癌胚易感候选基因2、miR-18b-5p表达有关。

## 2.6 抗氧化

研究显示,黄芥子与白芥子均具有显著的体外与体内抗氧化能力,其通过清除自由基、增强抗氧化酶系统及调节相关信号通路等多种途径发挥作用。Jeyaraj等<sup>[54]</sup>经体外抗氧化能力研究发现黄芥子对2,2-二苯基-1-苦基肼基自由基(2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl radical, DPPH)自由基清除率高达89.42%,表现出具有显著的抗氧化活性。Zhang等<sup>[25]</sup>发现黄芥子与白芥子在体外实验中均具有抗氧化及氧化损伤的保护作用,且黄芥子效果更优。孙艳伟<sup>[56]</sup>发现黄芥籽水提物虽无DPPH自由基清除作用,但能有效清除羟自由基并具有亚铁离子还原能

力。此外，在过氧化氢（hydrogen peroxide, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>）诱导的人肝癌 HepG2 细胞氧化损伤模型中，黄芥籽水提物及水解产物可显著提高细胞活力，增强超氧化物歧化酶（superoxide dioxide, SOD）、过氧化氢酶（catalase, CAT）和谷胱甘肽过氧化物酶（glutathione peroxidase, GSH-Px）等抗氧化酶活性，同时降低乳酸脱氢酶（lactate dehydrogenase, LDH）泄漏率、活性氧和丙二醛水平，有效缓解氧化损伤。

赵强等<sup>[57]</sup>研究发现黄芥籽多糖在实验条件下表现出显著的抗氧化活性，其对 DPPH 和羟基自由基的清除能力与其浓度呈正相关。施滢等<sup>[58]</sup>研究发现白芥子具有良好的体内外抗氧化能力，且白芥子水提物 10 mg/mL 能够清除羟基自由基和 DPPH 自由基，有效缓解氧化应激和热应激，降低脂褐素及活性氧水平，其作用机制可能与调控胰岛素信号通路相关基因表达有关。芥子具体抗氧化活性归纳见图 5。



图 5 芥子的抗氧化药理作用

Fig. 5 Pharmacological effects of *Sinapis Semen* on antioxidant

## 2.7 免疫调节

在中药外治领域，白芥子最常用于类风湿性关节炎与哮喘等自身免疫性疾病的治疗。现代研究证实其具有免疫调节作用，这一发现与其传统应用高度契合<sup>[59]</sup>。刘敏等<sup>[60]</sup>发现白芥子涂方穴位敷贴治疗可促进皮肤组织中髓系树突状细胞发生形变、迁移，促进抗原的呈递作用，激活机体免疫功能，发挥调节机体辅助性 T 细胞 1（T helper type 1 cell, Th1）/Th2 的失衡的作用，且对机体不良反应低。屈悦<sup>[61]</sup>发现以白芥子为主要组成药物的白芥子散穴位贴敷对哮喘大鼠的免疫因子 MMP9、IL-4 及转化生长因子-β1（transforming growth factor-β1, TGF-β1）具有调控作用；在免疫系统方面，白芥子散可通过 IL-17、TLR、NOD 样受体信号通路、Th1 和 Th2 细胞分化等相关通路治疗哮喘。此外，Zhang 等<sup>[25]</sup>研究发现白芥子在小鼠单核巨噬细胞白血病 RAW264.7 细胞上表现出显著的免疫调节活性，包括促进细胞增殖、增强吞噬能力及刺激一氧化氮释放。

## 2.8 抑菌

多项研究证实，芥子及其活性成分对多种致病菌具有良好的抗菌潜力。赵强等<sup>[62]</sup>报道了黄芥籽粕

多酚对金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌和大肠杆菌均有一定的抑制作用，且研究发现黄芥籽粕多酚的抑菌圈直径随其质量浓度增加而显著增大，表明其抑菌能力呈现剂量相关性。Engels 等<sup>[63]</sup>发现黄芥子粕粗提物及纯化酚类组分对金黄色葡萄球菌、单核细胞增生李斯特菌等食源性致病菌具有选择性抑制作用。Meng 等<sup>[64]</sup>研究表明白芥子活性成分 4-羟基苜蓿基异硫氰酸酯对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌等病原菌均表现出显著抗菌活性。值得注意的是，其作用机制与破坏细胞膜完整性或通透性无关，而是通过影响细菌的代谢活性来实现。

## 2.9 抗肝纤维化

研究表明，基于化痰理论的白芥子对实验性肝纤维化大鼠具有显著防治作用。郑保平等<sup>[65]</sup>发现白芥子的抗肝纤维化作用机制可能与影响 VEGF、bFGF 蛋白的表达有关。曹思等<sup>[66]</sup>发现 ig 白芥子 1.0、2.0 g/kg 对硫代乙酰胺诱导的大鼠慢性肝纤维化具有治疗作用，且其作用机制可能与提高大鼠肝细胞抗氧化能力及干预一氧化氮合酶（nitric oxide synthase, NOS）系统中总 NOS、钙依赖性的结构型 NOS、诱导型 NOS 的表达，及影响一氧化氮的生成

有关。在此基础上,进一步研究揭示了白芥子的抗肝纤维化机制为通过调控 TGF- $\beta$ 1/Smads 和 PI3K/Akt 信号通路,进而抑制肝星状细胞的活化与增殖、诱导其凋亡,并显著减少胶原沉积,最终有效逆转硫代乙酰胺诱导的大鼠肝纤维化进程<sup>[67]</sup>。

### 2.10 其他药理作用

除以上药理作用外,有研究发现黄芥子蛋白肽通过缓解中枢胰岛素信号通路抑制,能有效改善高脂饮食诱导的代谢综合征。具体表现为显著降低小鼠的空腹血糖、胰岛素抵抗指数、同型半胱氨酸水平及体脂比,从而揭示了其在干预中枢胰岛素抵抗方面的潜力<sup>[68]</sup>;白芥子水提物及芥子酸和芥子碱硫氰酸盐具有减缓  $\beta$ -淀粉样蛋白毒性的抗阿尔茨海默病 (Alzheimer's disease, AD) 作用,其显著的抗氧化活性可能是防治 AD 的主要药效物质基础<sup>[69]</sup>。傅恭博等<sup>[70]</sup>研究发现含 5%白芥子的颗粒饲料喂养可降低酒精对肝细胞的损伤作用,预防肝脏酒精性脂肪变。该作用可能是通过抗氧化、调节脂肪细胞因子分泌来实现的。卢凯慧等<sup>[71]</sup>报道了芥子中的芥子碱类成分在心血管系统疾病中的治疗作用,主要机制为通过抑制肾素-血管紧张素-醛固酮系统的活化及改善血管内皮功能障碍发挥心血管保护作用;此外,白芥子还可用于妇科疾病,临床上可用于治疗不孕、闭经、痛经、及卵巢巢综合征等<sup>[72]</sup>。

### 3 芥子质量相关功效物质预测分析

芥子属于化痰散结药,临床应用广泛。《中国药典》2020年版中规定含芥子碱的以芥子碱硫氰酸盐作为指标性成分,但芥子中化学组分复杂,除了以芥子碱硫氰酸盐为代表的芥子碱类化合物外,还包括 GS 类、脂肪酸类、挥发油类、黄酮类及酚类衍生物等化合物,单一物质作为检测指标不利于芥子质量的整体控制。因此,基于肖伟院士提出的中药功效物质的“三要素”<sup>[73]</sup>和刘昌孝院士<sup>[74-75]</sup>提出的 Q-Marker 核心概念,在对芥子化学成分、药理作用综述研究基础上,对芥子的功效物质和 Q-Marker 进行预测分析,为提高药材质量一致性、可控性和溯源性,建立更为全面完善的质量标准奠定基础。

#### 3.1 植物亲缘学和化学成分特异性

中药原料主要取自天然生物有机体,其中以植物来源占比最高。这些药材的有效成分通常为植物次生代谢产物,不同植物具有独特的遗传特性和代谢途径,能够合成各自特有的次生代谢产物<sup>[76]</sup>,例如人参中的皂苷<sup>[77]</sup>和黄连中的小檗碱<sup>[78]</sup>。不同药材

的特有成分差异显著,构成了药材性味归经和功效的物质基础,也是评价药材质量的重要依据。植物亲缘学认为,亲缘关系相近的植物种类化学成分往往相似<sup>[79]</sup>,因此通过研究同一科属植物的化学特征,可以预测其潜在的 Q-Marker,从而为药材质量评价提供科学依据。

十字花科植物种类繁多,包含 330 余属,约 3 709 种,广泛分布于南极洲除外的各大洲,其中以北温带地区分布最为集中。我国拥有该科植物 102 属,共计 412 种<sup>[80]</sup>。十字花科中药用植物资源丰富,富含芥子苷、黄酮类、脂肪油等活性成分,具有抗炎、抗氧化、抗肿瘤、祛痰止咳等药理作用<sup>[81]</sup>。GS 类化合物是十字花科植物特征性的成分之一,是一类与生氰葡萄糖苷相关联的次生代谢物,白芥子和黄芥子中 GS 类代表成分分别为白芥子苷和黑芥子苷<sup>[3]</sup>。研究表明,GS 类成分具有抗肿瘤、抗氧化等生物活性<sup>[82]</sup>,满足 Q-Marker 中的有效性的原则。且十字花科中不同属植物、同属不同品种植物之间及同种植物不同部位的 GS 类化合物种类及含量也存在明显差异<sup>[83-85]</sup>,具有较强的专属性特征。此外,研究发现 GS 与一种特殊的酶—黑芥子酶共同构成了植物的“芥子油苷-黑芥子酶防御系统”,当植物组织受损时,原本储存在不同细胞区室的芥子油苷与黑芥子酶接触,被水解生成一系列具有生物活性的降解产物,异硫氰酸酯、硫氰酸盐及腈类<sup>[86]</sup>。芥子中亦具有这些降解产物,包括以异硫氰酸烯丙酯和 4-羟基苜蓿基异硫氰酸酯为代表的异硫氰酸酯、以芥子碱硫氰酸盐为代表的硫氰酸盐和以对羟基苯乙腈为代表的腈类。因此,专属性较强的 GS 类(白芥子苷、黑芥子苷)、芥子碱类(芥子碱硫氰酸盐)、异硫氰酸酯类(异硫氰酸烯丙酯、4-羟基苜蓿基异硫氰酸酯)及腈类(对羟基苯乙腈)化合物等,可以作为芥子的 Q-Marker,为后续质量控制及质量标准的完善提供一定基础。

#### 3.2 传统药性和药效

中药的药性是中药的基本属性,也是临床用药的重要依据<sup>[87]</sup>。芥子味辛、性温、归肺经的药性特征,决定了其“能散能行”与“温中散寒”的基本作用方向。传统理论认为,辛味药多具发散、行气、行血之效,温热药长于温里散寒、补火助阳,而现代研究进一步揭示了其与特定物质基础的相关联<sup>[88]</sup>,如温热药中普遍富含的挥发油类成分<sup>[89]</sup>,及作为辛味药主要活性成分的挥发油、生物碱、苷类氨基酸、

有机酸等化合物<sup>[90]</sup>。根据前文药理活性调研发现,芥子中含有的挥发油、芥子碱及其硫酸氢盐、白芥子苷、对羟基苯乙腈、黄芥子多糖及4-羟基苜蓿基异硫氰酸酯等多种成分,在抗肿瘤、抑制前列腺增生、止咳平喘等方面表现出显著活性。这些药理作用与芥子“温肺化痰、散结止痛”传统功效具有一致性。因此,结合传统药性和药效,上述芥子碱、芥子碱硫酸氢盐、白芥子苷、对羟基苯乙腈、4-羟基苜蓿基异硫氰酸酯、挥发油类成分及多糖类成分共同构成了芥子发挥临床疗效的关键物质基础,可对芥子的Q-Marker预测分析及筛选提供一定参考。

### 3.3 化学成分可测性

化学成分可测性是Q-Marker预测分析的主要依据之一,《中国药典》2020年版规定了芥子主要成分芥子碱硫酸氢盐的测定法及限度。包晴等<sup>[91]</sup>采用高效液相色谱(HPLC)波长转换法,建立了同时测定白芥子饮片中白芥子苷与芥子碱硫酸氢盐含量的分析方法;郑丹等<sup>[92]</sup>考察了芥子碱的固有荧光性质,并发现环糊精对其具有显著的荧光增强效应。基于此增敏作用,研究成功建立了环糊精增敏荧光法的定量分析方法,并将其应用十字花科植物种子中芥子碱含量的准确测定。相关研究表明,分光光度法<sup>[93]</sup>、毛细管电泳法<sup>[94]</sup>也可用于芥子碱的含量测定。同时,有研究者采用HPLC测定白芥子饮片中白芥子苷的含量<sup>[95]</sup>;使用气相色谱法测定白芥子挥发油中异硫氰酸烯丙酯的含量<sup>[96]</sup>;采用酸性染料比色法测定黄芥子中总生物碱的含量<sup>[97]</sup>;反相HPLC测定喘嗽灵巴布剂中芥子碱硫酸氢盐的含量<sup>[98]</sup>;微波提取法提取白芥子中总黄酮并采用比色法测定总黄酮含量<sup>[99]</sup>;运用微波技术水提醇沉法<sup>[100]</sup>提取白芥子多糖,苯酚-硫酸比色法测定多糖含量<sup>[100-101]</sup>;采用超声辅助提取黄芥子多糖,苯酚-硫酸法测定多糖含量<sup>[58]</sup>。此外,白芥子油含量和脂肪酸组成可应用重量法和GC-MS法分别测定<sup>[102]</sup>;硫酸根离子沉淀法和葡萄糖释放-酶鉴定法可用于测定GS总量<sup>[103]</sup>。综上,基于化学成分可测性,芥子中的芥子碱硫酸氢盐、芥子碱等生物碱类成分,异硫氰酸烯丙酯等挥发油成分,白芥子苷等GS类成分,及脂肪酸、总黄酮、多糖等成分可作为芥子的Q-Marker。

### 3.4 配伍环境

中药以复方形式临床运用,其核心在于配伍理论。在此背景下,Q-Marker的研究不能孤立地进行,需要置于“配伍环境”这一关键维度下考量<sup>[104]</sup>。常

见的与白芥子配伍的中药大多为温里药、活血化瘀药和解表药,如细辛、附子、延胡索、麻黄等<sup>[105]</sup>。阳和汤是外科治疗阴疽证的常用方剂,具有温阳补血、散寒通滞等功效,其中白芥子与麻黄、肉桂配伍为阳和汤中主祛邪类的药物<sup>[106]</sup>。有研究表明炒白芥子中的芥子碱硫酸氢盐为阳和汤温阳补血、散寒通滞的功效物质之<sup>[107]</sup>。现代研究表明,冬病夏治方中君药白芥子中的挥发油为白芥子的主要成分,有辛辣味、易挥发,是潜在的为透皮吸收促进剂,可促进延胡索乙素、细辛脂素等药效物质的透皮吸收,达到增强疗效的目的<sup>[108]</sup>。因此,芥子碱硫酸氢盐及挥发油成分可作为芥子基于配伍环境的Q-Marker。

### 3.5 炮制影响

中药的炮制是一个复杂而精细的过程,对中药中有效成分会产生一定影响,如有效成分的含量及种类,因此在对Q-Marker进行预测分析时,考虑炮制因素的影响,对Q-Marker的预测分析具有重要意义。研究表明,炮制对芥子中的芥子碱硫酸氢盐、芥子苷及挥发油含量存在影响<sup>[109-113]</sup>;不同炮制时间对芥子中有效成分对羟基苯乙腈及芥子碱硫酸氢盐含量也存在一定影响<sup>[114]</sup>。苏慧等<sup>[115]</sup>基于UPLC图谱,分析白芥子、黄芥子等中药饮片炮制前后的化学成分变化,发现炮制后,芥子碱硫酸氢盐峰面积略有降低,生品中所含的小极性成分峰面积显著降低,大极性成分的峰面积显著增加,并伴有新的成分生成。有研究发现,黄芥子与白芥子炒制后主含挥发油成分异硫氰酸烯丙酯含量呈大幅下降,而挥发油成分2-丁烯腈含量则大幅升高<sup>[18,23]</sup>,此外,芥子中4-氰基-1-丁烯、3-氯丙腈、5-甲基糠醛及壬醛等挥发性成分炮制后含量也出现了不同程度的升高<sup>[18,23]</sup>。研究发现,生芥子与烤芥子的挥发油成分存在显著差异。生芥子中含有异丁基异硫氰酸酯、4-甲基戊基异硫氰酸酯等含硫辛辣物质,糠醛、壬醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛等挥发性成分,及石竹烯等萜烯类化合物,在烤芥子的挥发油中均未被检出<sup>[20]</sup>。将这些在炮制过程中易于变化或消失的成分作为差异性Q-Marker,对于精准区分生、制品并完善芥子的整体质量控制体系具有重要价值。综上,芥子苷,芥子碱硫酸氢盐,对羟基苯乙腈、异硫氰酸烯丙酯、2-丁烯腈等挥发油成分,可作为芥子基于炮制影响的Q-Marker,为芥子Q-Marker的筛选提供参考。

综上,本文在对芥子化学成分及药理作用综述

基础上,结合中药功效物质的“三要素”和 Q-Marker 的五原则,预测分析芥子与质量相关的功效物质,得出白芥子苷、黑芥子苷、芥子碱、芥子碱硫氰酸盐、异硫氰酸烯丙酯、对羟基苯乙腈、4-羟基苄基异硫氰酸酯、2-丁烯腈、异丁基异硫氰酸酯、4-甲基戊基异硫氰酸酯、糠醛、壬醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、石竹烯可作为芥子与质量相关的功效候选物质。

上述部分功效候选物质已具备较为明确的量效关系及体内外实验支持,如对羟基苯乙腈的含量与白芥子镇咳药效密切相关<sup>[36]</sup>;白芥子苷与β-谷甾醇在抗前列腺增生与抗炎模型中均展现出明确的剂量相关性<sup>[44]</sup>;哮喘大鼠体内芥子酸和芥子苷血药浓度与血清中炎症因子含量存在一定的相关性,且芥子苷最佳药动学模型拟合为血管外给药的三房室模型<sup>[116]</sup>;体外研究表明白芥子挥发油能够剂量相关性抑制 H<sub>22</sub> 荷瘤小鼠肿瘤细胞的生长<sup>[51]</sup>。这些

基于明确量效关系、体内外实验验证的研究结果,为上述质量相关功效物质的筛选提供了关键的依据。此外,芥子中黄酮、多糖、脂肪酸等指示性成分可作为芥子潜在的 Q-Marker。相关研究需进一步深入,有助于进一步完善芥子药材的质量控制,更好地指导芥子药材资源的合理利用。芥子的质量相关功效物质预测分析归纳见图 6。

#### 4 结语

芥子药用价值高,临床应用广泛。本文基于大量国内外文献,系统综述了芥子的化学成分及药理作用研究进展,结合中药功效物质的“三要素”及 Q-Marker 五原则等,对芥子质量相关功效物质进行综合预测分析。这对于建立安全、有效的芥子质量评价体系具有重要意义,也有利于推动芥子资源的合理利用。但目前芥子相关研究存在明显缺口:(1)研究对象集中于白芥子、黄芥子的特有化学成分鉴



图 6 芥子的质量相关功效物质预测分析

Fig. 6 Predictive analysis of quality-related effective components of *Sinapis Semen*

定、专属药效机制及针对性质量控制指标研究较为薄弱；(2) 芥子质量相关功效成分的系统性研究尚不充分，整体质量控制体系有待完善。未来可借助代谢组学等现代组学技术，加强芥子（尤其是黄芥子）化学成分的挖掘与鉴定，系统解析其化学成分谱，并深入开展多组分、多靶点的协同作用机制研究，明确其功效物质群的整体作用模式，同时注重探索从化学成分到临床疗效的转化路径，结合炮制与配伍规律，建立与临床效用关联的质量评价新模式，从而系统提升芥子的质量控制与整体应用。

**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: 172.
- [2] 孙银芳. 中药白芥子最新研究进展 [J]. 新中医, 2015, 47(10): 209-211.
- [3] 张青山, 王卓, 孔铭, 等. 芥子中芥子碱类和硫代葡萄糖苷类成分化学稳定性和质量评价研究进展 [J]. 中草药, 2015, 46(1): 148-156.
- [4] Lee K C, Chan W, Liang Z T, *et al.* Rapid screening method for intact glucosinolates in Chinese medicinal herbs by using liquid chromatography coupled with electrospray ionization ion trap mass spectrometry in negative ion mode [J]. *Rapid Commun Mass Spectrom*, 2008, 22(18): 2825-2834.
- [5] Velišek J, Mikulcová R, Míková K, *et al.* Chemometric investigation of mustard seed [J]. *LWT Food Sci Technol*, 1995, 28(6): 620-624.
- [6] Borek V, Morra M J. Ionic thiocyanate (SCN<sup>-</sup>) production from 4-hydroxybenzyl glucosinolate contained in *Sinapis alba* seed meal [J]. *J Agric Food Chem*, 2005, 53(22): 8650-8654.
- [7] Fabre N, Bon M, Moulis C, *et al.* Three glucosinolates from seeds of *Brassica juncea* [J]. *Phytochemistry*, 1997, 45(3): 525-527.
- [8] 赵振东, 李嘉诚, 冯玉红, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法鉴别十字花科植物中硫代葡萄糖苷 [J]. 化学分析计量, 2013, 22(2): 12-15.
- [9] 卢凯慧, 关海星, 朱庆均. 芥子碱在肿瘤、心血管系统疾病及呼吸系统疾病治疗中的作用机制研究进展 [J]. 山东医药, 2024, 64(17): 113-115.
- [10] Clausen S, Olsen O, Sorensen H. 4-Hydroxybenzoylcholine: A natural product present in *Sinapis alba* [J]. *Phytochemistry*, 1982, 21(4): 917-922.
- [11] 刘丽芳, 王宇新, 李海燕, 等. 常用十字花科药用植物中芥子碱的分布研究 [J]. 色谱, 2006, 24(1): 49-51.
- [12] 杨雪萍, 王惠国, 冯宝民, 等. 芥子中总芥子碱类成分的含量测定 [J]. 大连大学学报, 2009, 30(6): 53-55.
- [13] 史丽颖, 吴海歌, 姚子昂, 等. 白芥子中脂肪酸成分的分析 [J]. 大连大学学报, 2003, 24(4): 98-99.
- [14] 吴国欣, 欧敏锐, 林跃鑫, 等. 白芥子脂肪酸成分的研究 [J]. 海峡药学, 2002, 14(3): 37-40.
- [15] 李日葵, 林一星. 白芥子中脂溶性成分的气相色谱-质谱联用分析 [J]. 重庆医学, 2012, 41(26): 2749-2750.
- [16] 张媛, 王喆之. 白芥子脂溶性成分的 GC-MS 分析 [J]. 食品科技, 2006, 31(8): 254-256.
- [17] 邓红, 张蜀, 林华庆, 等. 白芥子脂溶性成分的提取及组成分析 [J]. 中药材, 2009, 32(12): 1914-1917.
- [18] 张璐, 易延遼, 陈兴兴, 等. 炒制对黄芥子挥发油成分的影响 [J]. 江苏中医药, 2007, 39(8): 66-67.
- [19] 陈密玉, 林燕妮, 吴国欣, 等. 提取方法对芥子挥发油化学成分的影响 [J]. 海峡药学, 2005, 17(5): 71-74.
- [20] 陈密玉, 林燕妮, 吴国欣, 等. 生、烤芥子挥发油化学成分比较研究 [J]. 中国中药杂志, 2006, 31(14): 1157-1159.
- [21] 吴圣曦, 赖兰香, 吴国欣, 等. 白芥子挥发油提取工艺优化及其化学成分鉴定 [J]. 中华中医药杂志, 2010, 25(5): 680-682.
- [22] 蔡君龙, 卢金清, 黎强, 等. 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用分析白芥子挥发性化学成分 [J]. 中国药业, 2014, 23(4): 26-27.
- [23] 刘强, 张璐, 易延遼, 等. 炒制对白芥子挥发油成分的影响 [J]. 中成药, 2007, 29(10): 1473-1475.
- [24] Torrijos R, Righetti L, Cirlini M, *et al.* Phytochemical profiling of volatile and bioactive compounds in yellow mustard (*Sinapis alba*) and oriental mustard (*Brassica juncea*) seed flour and bran [J]. *LWT*, 2023, 173: 114221.
- [25] Zhang Y, Lu J K, Liu Y Q, *et al.* Polyphenols of brown (*Brassica juncea*) and white (*Sinapis alba*) mustard seeds: Extraction optimization, compositional analysis, antioxidant, and immunomodulatory activities [J]. *Food Biosci*, 2024, 58: 103753.
- [26] Nicácio A E, Rodrigues C A, Visentainer J V, *et al.* Evaluation of the QuEChERS method for the determination of phenolic compounds in yellow (*Brassica alba*), brown (*Brassica juncea*), and black (*Brassica nigra*) mustard seeds [J]. *Food Chem*, 2021, 340: 128162.
- [27] 蓝金权, 雷欣荷, 段志文, 等. 白芥子化学成分研究 [J]. 中药材, 2025, 48(1): 100-103.
- [28] 贾小舟, 杨小龙, 卢晓莹, 等. 基于超高效液相色谱-质谱联用技术和化学计量学方法比较白芥子炒制前后的化学成分 [J]. 中国药房, 2021, 32(22): 2731-2735.
- [29] 余正江. 白芥子化学成分及镇咳活性研究 [D]. 沈阳: 沈阳药科大学, 2005.
- [30] 冯宝民, 余正江, 李帆, 等. 白芥子化学成分的研究

- [J]. 大连大学学报, 2004, 25(6): 43-44.
- [31] Cui W. Characterization of the structure and physical properties of yellow mustard (*Sinapis alba* L.) polysaccharides. [D] Canada: University of Manitoba, 1993.
- [32] Gould S E, Rees D A, Wight N J. Polysaccharides in germination. Xyloglucans (amyloids') from the cotyledons of white mustard [J]. *Biochem J*, 1971, 124(1): 47-53.
- [33] Hirst E L, Rees D A, Richardson N G. Seed polysaccharides and their role in germination. a survey of the polysaccharide components of mustard seeds with special reference to the embryos [J]. *Biochem J*, 1965, 95(2): 453-458.
- [34] 孙新茹, 董云鹏, 李鑫蕊, 等. 白芥子穴位贴敷治疗呼吸系统疾病的临床应用研究进展 [J]. 中成药, 2024, 46(7): 2302-2309.
- [35] 王辉, 苑艳霞, 邱琳, 等. 芥子碱平喘作用及其机制研究 [J]. 中草药, 2011, 42(1): 134-136.
- [36] 冯宝民, 邱琳, 谌启鹏, 等. 基于炮效关系研究白芥子镇咳药效物质基础 [J]. 中国药理学通报, 2010, 26(9): 1173-1176.
- [37] 张学梅, 刘凡亮, 梁文波, 等. 白芥子提取物的镇咳、祛痰及平喘作用研究 [J]. 中草药, 2003, 34(7): 635-637.
- [38] 高远, 李冀, 韩东卫, 等. 基于 TLR4/NF- $\kappa$ B 炎症轴的白芥子经皮给药对类风湿性关节炎大鼠调控机制研究 [J]. 中医药学报, 2023, 51(8): 17-22.
- [39] 万军梅, 黄红. 白芥子不同提取部位抗炎镇痛作用研究 [J]. 亚太传统医药, 2014, 10(5): 39-41.
- [40] 李小莉, 张迎庆, 黄通华. 白芥子提取物的抗炎镇痛作用研究 [J]. 现代中药研究与实践, 2007, 21(6): 28-30.
- [41] Xian Y F, Hu Z, Ip S P, *et al.* Comparison of the anti-inflammatory effects of *Sinapis alba* and *Brassica juncea* in mouse models of inflammation [J]. *Phytomedicine*, 2018, 50: 196-204.
- [42] 刘明, 张永萍, 罗春丽. 白芥子不同提取物对前列腺增生的作用 [J]. 贵阳中医学院学报, 2008, 30(2): 15-17.
- [43] 吴国欣, 林跃鑫, 欧敏锐, 等. 白芥子提取物抑制前列腺增生的实验研究 (I) [J]. 中国中药杂志, 2003, 28(7): 49-51.
- [44] 吴国欣, 林跃鑫, 欧敏锐, 等. 白芥子提取物抑制前列腺增生的实验研究 (II) [J]. 中国中药杂志, 2003, 28(7): 643-646.
- [45] 陈密玉. 白芥子提取物对小鼠前列腺增生组织生长因子和雄激素受体表达的影响 [D]. 福州: 福建师范大学, 2007.
- [46] 林燕妮. 白芥子对小鼠前列腺增生组织细胞凋亡的影响 [D]. 福州: 福建师范大学, 2007.
- [47] 王狄鑫, 高远, 吴代敏, 等. 白芥子-细辛药对配伍穴位给药对体外经皮渗透影响实验研究 [J]. 亚太传统医药, 2025, 21(1): 10-16.
- [48] 高远, 李冀, 周梦丹, 等. “冬病夏治”方中白芥子促进延胡索乙素经穴、非经穴部位皮肤渗透性比较研究 [J]. 中医药信息, 2023, 40(2): 31-35.
- [49] 阮世发, 乡世健, 安佰超, 等. 白芥子挥发油促进冬病夏治方经皮渗透研究 [J]. 中药新药与临床药理, 2018, 29(2): 155-162.
- [50] 杨丹, 曹风光, 王艳宏. 白芥子与不同促渗剂对盐酸小檗碱体外经皮渗透的影响 [J]. 中国中医药科技, 2013, 20(6): 627-628.
- [51] 吴圣曦, 吴国欣, 何珊, 等. 白芥子挥发油对小鼠肝癌 H<sub>22</sub> 移植性肿瘤的抑制作用及其机制研究 [J]. 中草药, 2013, 44(21): 3024-3029.
- [52] 陈腾祥, 王婧雅, 曾智锐, 等. 芥子碱硫氰酸盐对肝癌细胞 SMMC-7721 增殖、迁移和侵袭的影响及机制 [J]. 中国药理学通报, 2020, 36(12): 1731-1737.
- [53] 苏羽岫. 芥子碱硫氰酸盐对皮肤鳞癌细胞的影响及其机制研究 [D]. 贵阳: 贵州医科大学, 2021.
- [54] Jeyaraj S, Mary Saral A. Green biosynthesis of TiO<sub>2</sub> nanoparticles using aqueous extract of *Brassica juncea* (L.) czern seed: Characterization, antimicrobial, antioxidant and anticancer activities [J]. *ChemistrySelect*, 2024, 9(21): e202401603.
- [55] 金璇, 周鹤峰. 白芥子提取物通过调控 lncRNAC ASC2 的表达影响宫颈癌细胞增殖、迁移、侵袭的实验研究 [J]. 中药材, 2020, 43(12): 3029-3034.
- [56] 孙艳伟. 黄芥籽中活性成分的制备及其抗氧化活性评价 [D]. 天津: 天津科技大学, 2018.
- [57] 赵强, 尹爱萍, 贾楠, 等. 黄芥籽多糖超声辅助提取工艺及其抗氧化活性研究 [J]. 中国油脂, 2017, 42(11): 124-128.
- [58] 施滢, 王平, 代君怡, 等. 基于秀丽隐杆线虫模型探讨白芥子水提物抗氧化作用及机制 [J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(23): 7773-7780.
- [59] 高远, 李冀, 韩东卫. 从白芥子古今外治研究探寻中药“内病外治”机理的新思路 [J]. 中成药, 2022, 44(10): 3253-3257.
- [60] 刘敏, 黄鹤归, 徐宏峰, 等. 白芥子涂方对哮喘治疗中的免疫调节作用研究 [J]. 中国医院药学杂志, 2024, 44(13): 1541-1547.
- [61] 屈悦. 白芥子散穴位贴敷对哮喘大鼠免疫因子的调控与免疫系统相关通路的机制研究 [D]. 太原: 山西中医药大学, 2020.
- [62] 赵强, 吕伟, 赵二芳, 等. 黄芥籽粕中多酚超声辅助提取工艺优化及其抑菌活性 [J]. 中国油脂, 2015, 40(10): 64-67.

- [63] Engels C, Schieber A, Gänzle M G. Sinapic acid derivatives in defatted Oriental mustard (*Brassica juncea* L.) seed meal extracts using UHPLC-DAD-ESI-MS/MS identification of compounds with antibacterial activity [J]. *Eur Food Res Technol*, 2012, 234(3): 535-542.
- [64] Meng Z Y, Tan M, Azarakhsh N, et al. Antibacterial activity and improvement of the oxidative stability of soybean oil by 4-hydroxybenzyl isothiocyanate from white mustard seeds [J]. *Curr Res Food Sci*, 2023, 7: 100563.
- [65] 郑保平, 韩立民, 林唐唐, 等. 化痰法为指导的白芥子相关药组对肝纤维化大鼠 VEGF、bFGF 表达的影响 [J]. 赣南医学院学报, 2016, 36(1): 17-19.
- [66] 曹思, 常欣峰, 尹宝, 等. 白芥子药组对肝纤维化大鼠的治疗作用及机制探讨 [J]. 时珍国医国药, 2017, 28(2): 265-268.
- [67] 曹思. 基于“化痰”理论的白芥子药组抗肝纤维化的作用及机制研究 [D]. 长沙: 湖南中医药大学, 2019.
- [68] 汉济生物科技(武汉)有限公司. 黄芥子蛋白肽在制备治疗代谢综合征药物中的用途: 中国, CN202410359617.6 [P]. 2024-07-09.
- [69] 施滢. 基于秀丽隐杆线虫的白芥子抗氧化及 A $\beta$  蛋白毒性作用研究 [D]. 武汉: 湖北中医药大学, 2023.
- [70] 傅恭博, 董晓颖, 赵明. 白芥子对酒精性脂肪肝小鼠的保护作用 [J]. 时珍国医国药, 2015, 26(4): 821-823.
- [71] 卢凯慧, 关海星, 朱庆均. 芥子碱在肿瘤、心血管系统疾病及呼吸系统疾病治疗中的作用机制研究进展 [J]. 山东医药, 2024, 64(17): 113-115.
- [72] 柯欢笑, 赵小萱, 杨汉铭, 等. 白芥子“以消为补”治疗妇科疾病疾病的古今应用探析 [J]. 浙江中医药大学学报, 2024, 48(8): 1050-1054.
- [73] 肖伟. 解码中成药 [M]. 北京: 中国中医药出版社, 2022.
- [74] 刘昌孝, 陈士林, 肖小河, 等. 中药质量标志物 (Q-Marker): 中药产品质量控制的新概念 [J]. 中草药, 2016, 47(9): 1443-1457.
- [75] 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.
- [76] 齐婧婉, 杨景明, 姜华. 环境因素与药用植物次生代谢产物关系的研究现状 [J]. 锦州医科大学学报, 2019, 40(5): 107-110.
- [77] 刘永利, 雷蓉, 王晓蕾, 等. 基于中药质量标志物的人参、西洋参、三七及相关中成药质量控制方法研究 [J]. 中国药学杂志, 2019, 54(17): 1402-1410.
- [78] 蒋丽施, 李潇戎, 罗曦, 等. 黄连的研究进展及其质量标志物预测分析 [J]. 中华中医药学刊, 2023, 41(8): 97-109.
- [79] 刘耀晨, 许浚, 张洪兵, 等. 基于化学成分特有性质的量标志物发现策略及应用 [J]. 中草药, 2021, 52(9): 2548-2556.
- [80] 中国科学院中国植物志编辑委员会编. 中国植物志 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [81] 白妮, 张亚军, 王世祥, 等. 十字花科植物化学成分和药理作用研究概况 [J]. 中药材, 2011, 34(9): 1465-1468.
- [82] 林海鸣, 郑晓鹤, 周军, 等. 硫代葡萄糖苷及异硫氰酸酯的抗癌和抗氧化作用进展 [J]. 中国现代应用药学, 2015, 32(4): 513-520.
- [83] 姚小桐, 张润芝, 许宁, 等. 不同品种芸薹属蔬菜中硫代葡萄糖苷含量的比较分析 [J]. 北方园艺, 2018(21): 30-36.
- [84] 弓志青, 张懿, 刘春泉. 甘蓝不同部位及加工对硫代葡萄糖苷组分和含量的影响 [J]. 中国食品学报, 2011, 11(4): 218-223.
- [85] 田艳, 邓放明, 卿志星, 等. 十字花科植物中硫代葡萄糖苷类物质的结构与功能研究进展 [J]. 食品科学, 2020, 41(1): 292-303.
- [86] 阮颖, 周朴华, 刘春林. 植物硫代葡萄糖苷-黑芥子酶底物酶系统 [J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2007, 33(1): 18-23.
- [87] 王洋洋, 匡海学, 苏发智, 等. 中药四性的临床应用价值及与五味的关系 [J]. 中草药, 2023, 54(4): 1329-1341.
- [88] 王赛, 谢逸轩, 田硕, 等. 中药组分-药性-药效关系探讨 [J]. 中药药理与临床, 2023, 39(4): 125-128.
- [89] 贾子尧, 林瑞超, 郑虎占, 等. 中药四气现代研究进展 [J]. 辽宁中医药大学学报, 2015, 17(12): 216-219.
- [90] 张淼, 霍海如, 王朋倩, 等. 辛味药性理论溯源与现代研究评述 [J]. 中草药, 2018, 49(3): 505-511.
- [91] 包晴, 高元航, 谢诗忆, 等. HPLC 波长转换法同时测定白芥子饮片中 2 种活性成分含量 [J]. 山西医科大学学报, 2023, 54(8): 1126-1132.
- [92] 郑丹, 王文静, 张清峰. 环糊精增敏荧光法测定十字花科植物总芥子碱含量 [J]. 江苏农业科学, 2018, 46(20): 222-225.
- [93] 林燕妮, 陈密玉, 吴国欣, 等. 芥子碱含量测定方法探讨 [J]. 药物分析杂志, 2007, 27(2): 260-263.
- [94] 苑艳霞, 王惠国, 刘燕妮, 等. 毛细管电泳法测定白芥子中芥子碱的含量 [J]. 沈阳药科大学学报, 2011, 28(5): 384-386.
- [95] 徐敏, 叶凡, 赖先荣, 等. HPLC 法测定白芥子饮片中白芥子苷的含量 [J]. 中国药房, 2016, 27(18): 2549-2550.
- [96] 曹银, 李曼, 汪电雷, 等. 气相色谱法测定白芥子挥发油中异硫氰酸烯丙酯的含量 [J]. 安徽中医学院学报, 2013, 32(3): 78-80.
- [97] 牛家丰, 冯伟贞. 酸性染料比色法测定黄芥子中总生

- 物碱的含量 [J]. 国医论坛, 2011, 26(3): 42-43.
- [98] 杜松云, 李其兰, 陈焜. RP-HPLC 法测定喘嗽灵巴布剂中芥子碱硫氰酸盐的含量 [J]. 中国药师, 2009, 12(10): 1407-1408.
- [99] 王自军, 王国卫, 齐誉. 白芥子中总黄酮的微波提取与含量测定 [J]. 时珍国医国药, 2005, 16(6): 512-513.
- [100] 王自军, 王国卫. 白芥子多糖的微波提取与含量测定 [J]. 海峡药学, 2005, 17(1): 42-44.
- [101] 罗雯, 徐豪瑞. 白芥子多糖的提取与含量测定 [J]. 成都大学学报: 自然科学版, 2009, 28(4): 291-294.
- [102] 陈振德, 许重远, 庄志铨. 白芥子油含量及其脂肪酸测定 [J]. 广东药学院学报, 2001, 17(2): 113.
- [103] 褚庆华, 倪昕路. 油菜籽及其饼粕中硫代葡萄糖苷总量快速测定方法的研究 [J]. 中国粮油学报, 2004, 19(1): 79-83.
- [104] 张铁军, 白钢, 刘昌孝. 中药质量标志物的概念、核心理论与研究方法 [J]. 药学学报, 2019, 54(2): 187-196.
- [105] 陈科旭, 李秀敏, 苗明三. 基于数据挖掘的白芥子临床外用特点分析 [J]. 世界中医药, 2024, 19(1): 100-104.
- [106] 郭红梅, 王悦良, 代波, 等. 经典名方阳和汤古籍文献与现代临床应用分析 [J]. 辽宁中医药大学学报, 2025, 27(5): 152-159.
- [107] 张泽康, 张晴, 窦敏航, 等. 经典名方阳和汤指纹图谱及功效关联物质预测分析 [J]. 中草药, 2023, 54(4): 1106-1119.
- [108] 阮世发, 乡世健, 安佰超, 等. 白芥子挥发油促进冬病夏治方经皮渗透研究 [J]. 中药新药与临床药理, 2018, 29(2): 155-162.
- [109] 罗跃龙, 何华妙, 刘青凤, 等. 炮制对黄芥子中芥子碱硫氰酸盐含量的影响 [J]. 湖南中医杂志, 2015, 31(3): 154-155.
- [110] 张振凌, 杨海玲, 张本山, 等. 炮制对白芥子中芥子碱硫氰酸盐含量及煎出量的影响 [J]. 中国中药杂志, 2007, 32(19): 2067-2069.
- [111] 张青山, 王卓, 孔铭, 等. 黄芥子文火微炒和研粉使用的化学内涵 [J]. 中国中药杂志, 2014, 39(22): 4345-4348.
- [112] 张璐, 易延逵, 陈兴兴, 等. 炒制对黄芥子挥发油成分的影响 [J]. 江苏中医药, 2007, 39(8): 66-67.
- [113] 刘强, 张璐, 易延逵, 等. 炒制对白芥子挥发油成分的影响 [J]. 中成药, 2007, 29(10): 1473-1475.
- [114] 李怡萱, 盛一梁, 吴嫣, 等. 基于超高效液相色谱定量测定法探究不同炮制时间对白芥子中有效成分含量的影响 [J]. 抗感染药学, 2021, 18(3): 316-320.
- [115] 苏慧, 岳琳, 刘颖, 等. 芥子及莱菔子饮片炮制前后物质基础变化规律分析 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2018, 24(7): 23-26.
- [116] 李丽. 芥子和莱菔子炮制前后镇咳、祛痰药效学筛选及炒莱菔子 PK-PD 相关性分析 [D]. 北京: 中国中医科学院, 2020.

[责任编辑 赵慧亮]