

# 大黄药材 HPLC 指纹图谱及其真伪鉴别研究

章平平, 甘莉, 吴少杰, 唐传球\* (汉江师范学院化学与环境工程学院, 湖北十堰 442000)

**摘要** 为了快速有效地辨别大黄, 减少大黄的误用, 收集了 10 份来源不同的大黄饮片, 从外观形态、显微结构等方面进行研究, 同时采用 TLC 对其进行真伪优劣定性鉴别, 并参考《中国药典》2020 版一部对大黄的芦荟大黄素、大黄素、大黄酸、大黄酚、大黄素甲醚 5 个化合物建立了 RP-HPLC 含量测定。结果表明, 10 个大黄样品在表面颜色、有无星点及气味强弱等方面均具有一定差异, 通过性状鉴别能初略区分真假大黄, 但在草酸钙簇晶、导管、淀粉粒、结晶等显微鉴别方面无明显的外观上区别, 采用显微鉴别对大黄药材真伪鉴别有一定的难度。通过 TLC 色谱鉴别可以快速有效地分辨出大黄药材的真伪, 掌叶大黄和药用大黄均未检出土大黄苷, 而华北大黄检出土大黄苷, 为伪品。10 个大黄样品中游离蒽醌总量均符合 2020 版《中国药典》限量要求, 大黄素甲醚和大黄素含量均较高, 其中华北大黄药材中大黄酸含量极少, 不到掌叶大黄与药用大黄的含量的 1/10。药用大黄和掌叶大黄的指纹图谱相似, 与华北大黄具有明显的差异。

**关键词** 大黄; RP-HPLC; 芦荟大黄素; 大黄素; 大黄酸; 大黄酚; 大黄素甲醚

中图分类号 R 282.5 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)16-0119-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.16.031



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Study on HPLC Fingerprint of Chinese Rhubarb and Its Authenticity Identification

ZHANG Ping-ping, GAN Li, WU Shao-jie et al (School of Chemistry and Environmental Engineering, Hanjiang Normal University, Shiyan, Hubei 442000)

**Abstract** In order to quickly and effectively identify rhubarb and reduce the misuse of rhubarb, 10 pieces of rhubarb from different sources were collected and studied from the aspects of appearance, microstructure, etc. TLC was used to qualitatively identify the authenticity and advantages of rhubarb. With reference to the first volume of Chinese Pharmacopoeia 2020, RP-HPLC was established to determine the content of Aloe emodin, rheum emodin, chrysophanic acid, chrysophanol and emodin ether in rhubarb. The results showed that the 10 rhubarb samples had certain differences in the surface color, whether there were stars and the strength of odor. The true and false rhubarb could be preliminarily distinguished by the character identification, but there was no obvious appearance difference in the microscopic identification of calcium oxalate clusters, ducts, starch granules and crystals. It was difficult to distinguish the authenticity of rhubarb by microscopic identification. The authenticity of rhubarb could be quickly and effectively identified by TLC chromatography. Rhubarb glycoside was not detected in both palmar leaf rhubarb and medicinal rhubarb, while rhubarb glycoside was found in rheum franzenbachii inspection, which was a fake. The total amount of free anthraquinone in the 10 rhubarb samples met the limit requirements of the Chinese Pharmacopoeia 2020. The contents of emodin methyl ether and emodin were relatively high. The content of rhein in rhubarb from rheum franzenbachii was very little, less than 1/10 of that in *Rheum palmatum* L. and rheum officinale baill. The fingerprints of *Rheum palmatum* L. and rheum officinale baill are similar, and there are obvious differences between them.

**Key words** Rhubarb; RP-HPLC; Aloe emodin; Rheum emodin; Chrysophanic acid; Chrysophanol; Emodin monomethyl ether

大黄, 在国内和国外都是常用的中药材, 它是一种蓼科草本植物, 品种很多, 是一味临床常用药材, 化学成分复杂, 主要药效成分为蒽醌类衍生物<sup>[1]</sup>, 主要包括大黄酸、大黄素、大黄酚、大黄素甲醚、芦荟大黄素等 34 种成分<sup>[2]</sup>。一般将掌叶大黄、药用大黄和唐古特大黄这 3 个品种称为正品大黄。正品大黄不含土大黄苷, 含番泻苷, 泻下作用强, 而非正品大黄不含番泻苷, 只含土大黄苷, 无泻下作用或泻下作用很弱; 且有资料显示土大黄不含或少含大黄酸<sup>[3-5]</sup>。

虽然蒽醌类成分并不能作为酸模属土大黄的专属性成分, 但 2020 年版《中国药典》规定大黄含 5 种游离蒽醌的总量不得少于 0.2%<sup>[2]</sup>, 而其泻下的主要活性成分番泻苷的含量未作要求, 此外, 虽然大黄中多成分的含量测定方法均有报道, 有薄层色谱法、高效液相色谱-紫外检测法、高效液相色谱-质谱法、高效毛细管电泳法<sup>[6-11]</sup>。目前, 在大黄中各种蒽醌类物质的定量分析中, 常采用配备紫外检测器的高效液

相色谱仪。相比于比色法、化学光淬灭法和高效毛细管电泳色谱法, 高效液相色谱法(HPLC)分离效果好、灵敏度高、重复性好、精确度高, 而且设备的价格也比较低廉, 在中药的复杂成分分析中广泛的应用。笔者参照中国药典及相关品种质量标准以及相关文献<sup>[12-15]</sup>, 以 10 份来源不同的大黄饮片为研究对象, 采用反相高效液相色谱法(RP-HPLC)对不同来源的大黄药材进行研究, 建立大黄药材的指纹图谱, 为大黄的质量控制提供有效方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

**1.1.1 大黄药材。**10 个样品采购于不同的药店或网上的店铺, 采购品种及地点见表 1。

**1.1.2 主要仪器。**显微镜 Phemix MC-D500U(C)/TP; ThermoU-3000 型高效液相色谱仪(美国, SR-3000 Slvent Rack 真空在线脱气机, LPG-3400SDN 四元梯度泵, WSP-3000 SLANALYTICAL 自动进样仪, Tcc-3000SD 柱温箱, VWD-3100 二极管阵列检测器)。

**1.1.3 主要试剂。**芦荟大黄素、大黄素、大黄酸、大黄酚、大黄素甲醚、土大黄苷、大黄对照药材均购自中国食品药品检定研究院; 甲醇为色谱纯, 购自默克公司。

**基金项目** 汉江师范学院 2021 年国家级大学生创新训练计划项目(202110518005); 湖北省教育厅科学技术研究计划指导性项目(B2019189)。

**作者简介** 章平平(1980—), 女, 安徽桐城人, 副教授, 硕士, 从事分离材料合成与应用研究。\* 通信作者, 副教授, 硕士, 从事现代分离分析技术研究。

**收稿日期** 2021-09-09

表1 大黄饮片来源

Table 1 Sources of rhubarb drink tablets

编号 No.	来源 Source	品种 Variety
S1	广西和信仁中药材批发店	华北大黄
S2	广西杏林千草堂	华北大黄
S3	广西珍百味中药材	华北大黄
S4	广西甘肃药王堂	药用大黄
S5	广西玉林珍草堂	掌叶大黄
S6	江西樟树天齐堂药业有限公司	掌叶大黄
S7	广西仙茶中药科技有限公司	掌叶大黄
S8	广西名众药业	掌叶大黄
S9	安徽协和药业有限公司	掌叶大黄
S10	广西源生泰药业有限公司	掌叶大黄

## 1.2 试验方法

**1.2.1 性状鉴别。**通过简单的试验器材进行判别,主要对可见的形状、大小、表面特征、断面、气味、口感等判别来对药材进行初步鉴别,达到区分中药材的质量和真伪问题。

**1.2.2 显微鉴别。**以S10为检验样品为例,取饮片粉碎并过4号筛,挑取少量放置在载玻片上,滴加甘油醋酸试液,使得粉末均匀散开,并在酒精灯下微热1s左右,缓慢盖上盖玻片,放在显微镜下进行观察,观察大黄药材导管、淀粉粒、草酸钙簇晶等内部物质。取少量上述S10粉末,置于蒸发皿上,用滤纸覆盖,采用酒精灯加热,温度不要过高,火焰距离蒸发皿1cm左右,避免温度过高碳化,加热1min左右,可以看到有物质附在滤纸上,并进行显微观察。

**1.2.3 薄层色谱检查。**

**1.2.3.1 对照品溶液配制。**精密称取土大黄苷0.11mg于10mL容量瓶,甲醇定容,超声5min后,即得。

**1.2.3.2 供试品溶液配制。**精密称取0.1g左右大黄细粉(过4号筛),置于锥形瓶中,加甲醇10mL,超声提取20min,滤过,精密移取1mL滤液,用甲醇定容到10mL容量瓶,摇匀即得。

**1.2.3.3 对照药材溶液配制。**精密称取0.1g左右大黄细粉,置于锥形瓶中,加甲醇10mL,超声提取20min,滤过,精密移取1mL滤液,用甲醇定容到10mL容量瓶,摇匀即得,临用新制。

**1.2.3.4 薄层层析。**吸取S1~S10供试品溶液、对照药材溶液、土大黄苷对照品溶液各5L,分别点于同一聚酰胺薄层膜上,以甲苯-甲酸乙酯-丙酮-甲醇-甲酸(30:5:5:20:0.1)为展开剂,展开,取出,晾干,置紫外光灯(365nm)下检视。

**1.2.4 大黄含量测定。**

**1.2.4.1 对照品溶液的制备。**在电子分析天平中分别称取芦荟大黄素对照品1.65mg、大黄酚对照品1.57mg、大黄酸对照品0.79mg、大黄素对照品0.86mg、大黄素甲醚对照品0.68mg于5个10mL容量瓶中,甲醇溶解并用甲醇定容,超声5min后,得到各对照品溶液。再在5mL容量瓶内分别加入上述各溶液1~5mL,配制对照品混合溶液,其中芦荟大黄素16.219g/mL、大黄酚15.605g/mL、大黄酸15.688g/mL、大黄素16.512g/mL和大黄素甲醚8.993g/mL,保存在4℃备用。

**1.2.4.2 供试品溶液的制备。**取本品粉末(过四号筛)0.1000g,置于50mL离心管中,然后精确地加入25mL甲醇,记录此时的称定重量,用记号笔在离心管液面处画标记线,加热回流1.5h(在整个过程中,确定该液体是轻微沸腾的),然后将其移出,待温度冷却到室温下,称其重量。按标志线加适量甲醇,摇晃使其均匀,然后过滤,取出滤液,用0.22μm的微孔滤膜过滤除去杂质,装入玻璃瓶中,待用。

**1.2.4.3 色谱条件。**色谱柱为JADE-PAK KM-C<sub>18</sub>(250mm×4.6mm,5μm);柱温30℃,进样量10μL;流速1.0mL/min。二极管阵列检测器(VWD),检测波长280nm,按照梯度进行洗脱,流动相为甲醇(A)-0.2%磷酸溶液(B),流动相比比例(0~10min,5~30%A;10~40min,30~60%A;40~60min,60%A;60~70min,60~100%A;70~75min,100%A;75~76min,100~5%A;76~87min,5%A)。

**1.2.4.4 线性关系考察。**按“1.2.4.3”色谱分析条件,精密吸取“1.2.4.1”对照品溶液2、4、6、8、10、12μL注入高效液相色谱仪,记录色谱图,以进样浓度(X,μg/mL)为横坐标、峰面积(Y)为纵坐标绘制标准曲线,计算线性回归方程。

**1.2.4.5 精密度试验。**精密吸取S1号土大黄供试品溶液10μL,按“1.2.4.3”色谱条件连续重复进样6次,依法测定芦荟大黄素、大黄素、大黄酸、大黄酚、大黄素甲醚的峰面积,并计算其RSD。

**1.2.4.6 稳定性试验。**精密吸取S1号土大黄供试品溶液10μL,分别于室温下放置0、2、4、6、8、12h时按“1.2.4.3”色谱条件进样测定,测得芦荟大黄素、大黄素、大黄酸、大黄酚、大黄素甲醚的峰面积,并计算其RSD值。

**1.2.4.7 重复性试验。**按“1.2.4.2”方法制备供试品溶液6份(样品批号为S1),按“1.2.4.3”色谱条件进样,进样量为10μL,测定峰面积,计算平均含量和RSD。

**1.2.4.8 含量测定。**该试验对不同批次大黄中芦荟大黄素、大黄酸、大黄素、大黄酚、大黄素甲醚5个游离型蒽醌类成分含量进行测定。

## 2 结果与分析

**2.1 性状鉴别** 性状鉴定结果如图1所示,通过对10份大黄的鉴别发现,大黄在表面颜色、有无星点及气味强弱等方面均具有一定差异。掌叶大黄和药用大黄表面呈现黄棕色至红棕色,断面呈淡红棕色或黄棕色,根茎髓部有星点、具清香气味;土大黄表面颜色较深,多为黄灰色、棕灰色或棕褐色,断面无星点,香气微弱。

**2.2 显微鉴别** 显微鉴别是当前对中药材最经济有效的鉴别方法之一,采用简单的显微仪器设备,对药材的外观及内部的细胞形态特征等结构进行判别,此检验过程快速高效,结果准确性高于性状鉴别,能有效地减少仪器设备的使用与成本。

采用显微鉴别可以有效地看到大黄细胞的内部结构且具有特征性的物质。图2显示的是以S10样品为例的细胞结构,可以明显地看到大黄的导管、淀粉粒、草酸钙簇晶以及羽状的蒸发晶体,其草酸钙簇晶少见,棱角短钝,网纹导管、螺纹导管非木化,糊粉粒甚多,与《中国药典》鉴别一栏检测

要求符合。

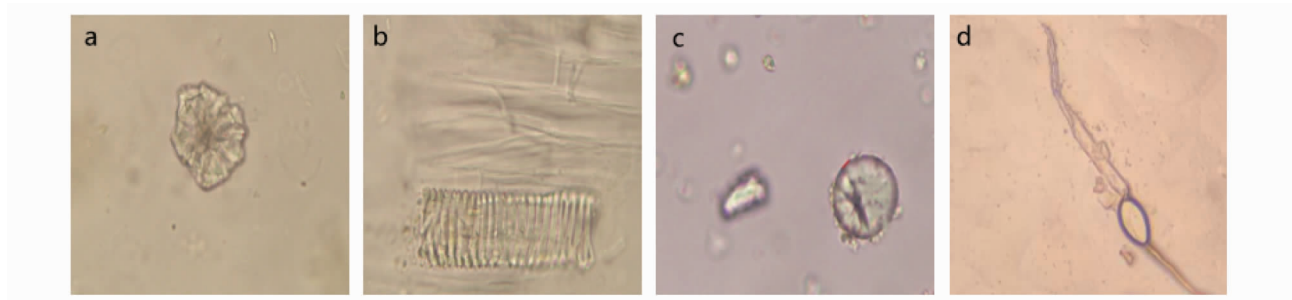
导管、淀粉粒、草酸钙簇晶、羽状的蒸发晶体 4 个特征上无明显差异。

按照上述方法,依次镜检 S1~S9 供试品,相比较 S10,在



图 1 10 个批次大黄样品外表面及其断面

Fig.1 External surface and cross section of 10 batches of rhubarb samples



注:a.草酸钙簇晶;b.螺纹导管;c.淀粉粒;d.升华结晶

Note:a.Calcium oxalate clusters;b.Threaded conduits;c.Starch grains;d.Sublimation crystals

图 2 掌叶大黄 S10 样品的显微鉴别

Fig.2 Microscopic identification of S10 sample of *Rheum palmatum*

2.3 薄层色谱检查 从图 3 可以看出,土大黄苷有非常清晰的蓝紫色荧光,药用大黄 S4 和掌叶大黄 S5~S10 供试品在相应位置无斑点和吸收峰,表明这 7 个样品未含有土大黄苷,

符合大黄鉴别的要求,为正品大黄。而土大黄 S1S3 供试品在相应位置有明显的斑点和吸收峰,为伪品大黄。该方法可操作性强,能够达到快速检识的目的。

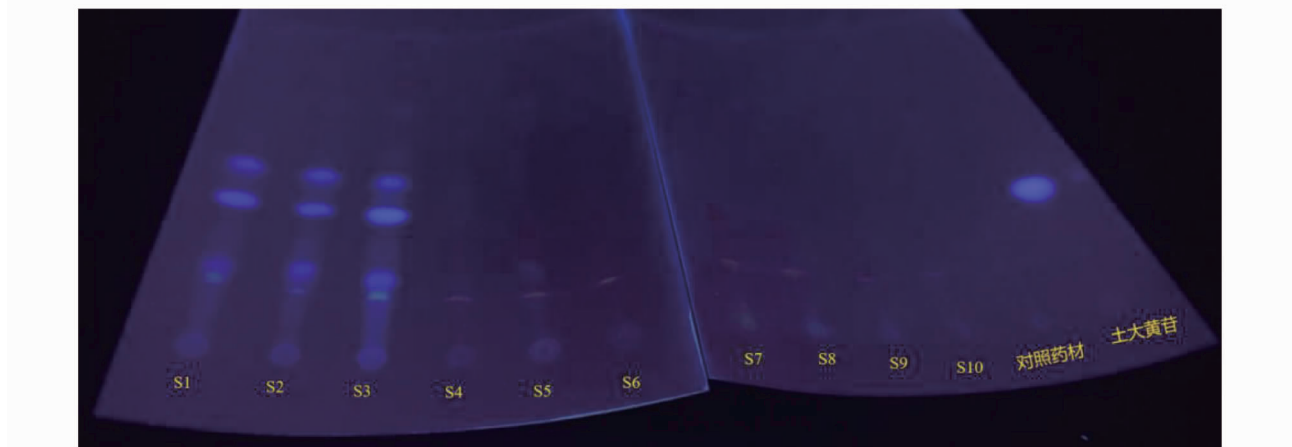


图 3 S1~S10 样品的聚酰胺薄层色谱检查

Fig.3 Polyamide thin layer chromatography detection of S1-S10 samples

2.4 大黄含量测定

( $X, \mu\text{g/mL}$ )为横坐标、峰面积( $Y$ )为纵坐标绘制标准曲线,结果见表 2。

2.4.1 线性关系考察。按“1.2.4.4”方法操作,以进样浓度



表 2 5 种化合物的线性关系

Table 2 Linear relationship of five compounds

化合物 Compound	线性回归方程 Linear regression equation	$R^2$	线性范围 Linear range g/mL
芦荟大黄素 Aloe emodin	$y=40.072x-0.332 6$	0.995 9	10~900
大黄酸 Chrysophanic acid	$y=32.494x+0.110 5$	0.999 8	8~650
大黄素 Rheum emodin	$y=41.945x+0.343 3$	0.999 2	8~600
大黄酚 Chrysophanol	$y=74.852x+0.109 9$	0.999 9	95~350
大黄素甲醚 Emodin monomethyl ether	$y=26.961x+0.037 4$	0.999 7	7~300

**2.4.2 精密度试验。**按“1.2.4.5”方法操作,结果发现,芦荟大黄素、大黄酸、大黄素、大黄酚、大黄素甲醚的峰面积 RSD 分别为 0.2%、0.4%、0.5%、0.2%、0.3%,说明该仪器的精密度良好。

**2.4.3 稳定性试验。**按“1.2.4.6”方法操作,结果发现,芦荟大黄素、大黄酸、大黄素、大黄酚、大黄素甲醚的峰面积 RSD 分别为 0.2%、0.3%、0.5%、0.2%、0.5%,表明供试品溶液在室温下放置 12 h 内稳定性良好。

**2.4.4 重复性试验。**按“1.2.4.7”方法操作,结果发现,芦荟大黄素、大黄酸、大黄素、大黄酚、大黄素甲醚的峰面积 RSD

分别为 3.8%、2.6%、3.7%、3.7%、3.7%,说明该试验的重复性良好。

以上结果表明各色谱峰的相对保留时间和峰面积基本一致,相似度均大于 0.95,符合指纹图谱的要求。

**2.4.5 含量测定。**2020 版《中国药典》以 5 种蒽醌类成分作为含量测定指标成分,规定大黄素、大黄酚、大黄素甲醚、大黄酸和芦荟大黄素的总量不得低于 0.2%。该研究对 5 种游离蒽醌类含量进行了测定,结果见表 3。从表 3 可以看出,10 个大黄样品游离蒽醌的总量均符合 2020 版《中国药典》限量要求,伪品华北大黄 S1~S3 这 3 个批次样品中游离蒽醌总量为 1.49%~2.02%,药用大黄 S4 批次样品中游离蒽醌总量为 1.21%,掌叶大黄 S5~S10 这 6 个批次样品中游离蒽醌总量为 1.21%~2.63%。各批次大黄中,含量比较高的成分是大黄素甲醚和大黄素,含量较少的是大黄酚和芦荟大黄素,但大黄酸 10 个样品各有不同。3 个土大黄药材(S1~S3)中大黄酸含量极低,不及掌叶大黄(S5~S10)与药用大黄(S4)的含量的 1/10;药用大黄中大黄酸含量较高,而 6 个掌叶大黄药材中大黄酸含量视产地有较大的差异。

表 3 不同批次大黄中 5 种蒽醌类化合物的含量

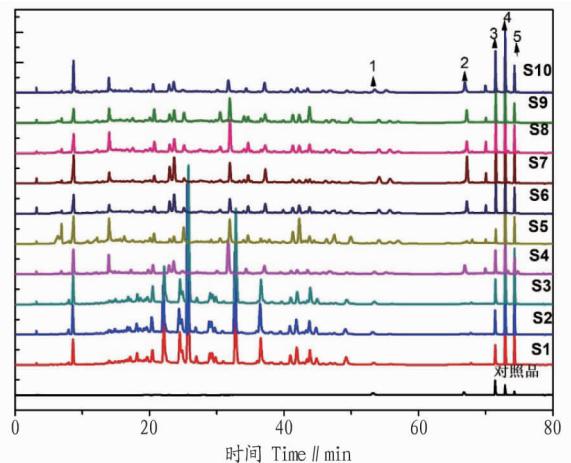
Table 3 HPLC content determination statistics for 5 components of rhubarb

批次 Batch	取样量 Sampling amount g	芦荟大黄素 Aloe emodin %	大黄酸 Chrysophanic acid//%	大黄酚 Chrysophanol %	大黄素 Rheum emodin %	大黄素甲醚 Emodin monomethyl ether//%	游离蒽醌总含量 Total content of free anthraquinone//%
S1	0.52	0.11	0.01	0.15	0.94	0.81	2.02
S2	0.51	0.12	0.01	0.15	0.93	0.81	2.02
S3	0.53	0.09	0.01	0.12	0.70	0.57	1.49
S4	0.51	0.11	0.27	0.15	0.39	0.29	1.21
S5	0.53	0.12	0.27	0.22	0.53	0.34	1.48
S6	0.52	0.13	0.05	0.15	0.94	0.81	2.08
S7	0.52	0.23	0.60	0.42	0.80	0.58	2.63
S8	0.51	0.13	0.26	0.21	0.57	0.38	1.55
S9	0.52	0.11	0.27	0.15	0.39	0.29	1.21
S10	0.51	0.17	0.27	0.22	0.53	0.30	1.49

**2.5 大黄指纹图谱分析与比较** 从图 4 可以看出,在相同的检测方法下,S1~S3 土大黄供试品,相对于药用大黄 S4 和掌叶大黄 S5~S10,在 50 min 前有明显的区别,含有大量的活性物质。而药用大黄和掌叶大黄的指纹图谱相似性高,50~75 min 的色谱峰峰形及相对比例较稳定,且有 5 个共有色谱峰,分别为芦荟大黄素、大黄素、大黄酸、大黄酚、大黄素甲醚,体现了正品大黄的共同特征。HPLC 法简便、时间短、重现性好,专属性、耐用性强,得到的图谱质量高,可为大黄鉴别标准提供科学依据。

### 3 结论与讨论

大黄为常用的普通中药,掺杂及市场上的大黄种类繁多。该研究从不同产地收集、测定了 10 份来自不同药厂或中药店铺饮片,分别为常见的掌叶大黄、药用大黄和土大黄,通过 RP-HPLC 含量检测及指纹图谱建立,反映了大黄药材的内含物质间存在差异。《中国药典》收录的掌叶大黄与药用大黄的相似性高,而与土大黄的相似性不佳,网上销售的大黄普遍存在使用不符合国家《中国药典》规范的中药进行销售,应该加强对网上的药材管理,有利于中药市场的把控与发展。同时对控制土大黄药材的质量、保证临床用药、建



注:1.芦荟大黄素;2.大黄酸;3.大黄素;4.大黄酚;5.大黄素甲醚

Note: 1. Aloe emodin; 2. Chrysophanic acid; 3. Rheum emodin; 4. Chrysophanol; 5. Emodin monomethyl ether

图 4 10 批次大黄 HPLC 指纹测定色谱图

Fig. 4 HPLC fingerprint chromatogram of 10 batches of rhubarb samples

气下滑影响,且甘肃河西高层温度槽、低层温度脊配合较好,产生了较好的不稳定层结条件。

(2)此次过程发生前期有较大的位势不稳定能量,并且0℃层高度在4 411.400 km,-20℃层的高度为6 966.154 km,利于冰雹的产生及增长。0~6 km的垂直风切变(SHR<sub>0</sub>)为24.8,风暴有一定的旋转性。

(3)从物理量条件分析来看,此次风暴过程的水汽条件基本满足庆阳市产生冰雹的阈值,能量条件较好,风暴天气产生于能量舌的顶端。

(4)卫星云图得出,此次过程主要由局地产生的对流云团自西北向东南方向移动发展而引发的,对流云团发展到最强出现了明显的“V”字型结构,可见光云图上对流云团有明显的暗影存在,对流云团的相当黑体亮温较低,其发展的高度较高对流发展旺盛。

(5)雷达图分析得出,此次风暴天气受超级单体影响,超级单体持续时间较长从2021年10月1日17:40持续到18:00,单体发展的高度较高,顶高达11.43 km,钩状回波和前侧入流槽口特征明显,径向速度辐合特征明显,并且垂直积分液态水含量(VIL)的跃变特征较为突出。

#### 参考文献

- [1] 高丽,潘佳文,蒋璐璐,等.一次长生命史超级单体降雹演化机制及双偏振雷达回波分析[J].气象,2021,47(2):170-182.
- [2] 吴剑坤,俞小鼎.强冰雹天气的多普勒天气雷达探测与预警技术综述[J].干旱气象,2009,27(3):197-206.
- [3] 王易,徐芬,吴海英.一次致雹超级单体结构特征分析[J].大气科学学报,2019,42(4):612-620.
- [4] 冯晋勤,俞小鼎,傅伟辉,等.2010年福建一次早春强降雹超级单体风暴对比分析[J].高原气象,2012,31(1):239-250.
- [5] 陈关清,杨群,李伟栋,等.贵州铜仁连续两次冰雹天气过程的对比分析[J].干旱气象,2016,34(1):163-172.

(上接第122页)

立其质量标准提供了一定依据。

#### 参考文献

- [1] 王玉,杨雪,夏鹏飞,等.大黄化学成分、药理作用研究进展及质量标志物的预测分析[J].中草药,2019,50(19):4821-4837.
- [2] 国家药典委员会.中华人民共和国药典:2020年版一部[S].北京:中国医药科技出版社,2020:23-24.
- [3] 严华,魏锋,肖新月,等.同属不同种大黄及含大黄制剂中土大黄苷检查方法的研究[J].药物分析杂志,2010,30(9):1615-1620.
- [4] 陈艳琰,唐于平,陈嘉倩,等.大黄资源化学研究进展与利用策略[J].中草药,2018,49(21):5170-5178.
- [5] 黄凤,蒋桂华.大黄栽培研究进展[J].中药材,2019,42(1):230-234.
- [6] DOU Z H, DAI Y, ZHOU Y Z T, et al. Quality evaluation of rhubarb based on qualitative analysis of the HPLC fingerprint and UFLC-Q-TOF-MS/MS combined with quantitative analysis of eight anthraquinone glycosides by QAMS[J]. Biomedical Chromatography, 2021, 35(6): 1-5.
- [7] LI F, CAO Q E, DING Z T. Separation and determination of five anthraquinones in rheum and rheum-containing preparations by capillary zone electrophoresis[J]. Chromatographia, 2004, 59(11/12): 753-757.
- [8] WENG W C, SHEU S J. Separation of anthraquinones by capillary electro-

- [6] 黄晓龙,高丽.2014年3.19台州冰雹过程中尺度分析[J].气象,2016,42(6):696-708.
- [7] BROWNING K A. Cellular structure of convective storms [J]. Meteor Mag, 1962, 91: 341-350.
- [8] 王昂生,徐乃璋.强单体雹暴的研究[J].大气科学,1985,9(3):260-267.
- [9] 刘治国,俞小鼎,陶健红,等.青藏高原东北侧雹云单体最大垂直累积液态含水量的演变特征及其在降雹定时判断中的应用[J].气象学报,2008,66(4):609-620.
- [10] 吴芳芳,俞小鼎,张志刚,等.苏北地区超级单体风暴环境条件与雷达回波特征[J].气象学报,2013,71(2):209-227.
- [11] 夏文梅,王晓君,孙康远,等.V型缺口在C波段多普勒雷达中的应用研究[J].气象,2016,42(1):67-73.
- [12] ZRNIC D S. Three-body scattering produces precipitation signature of special diagnostic value [J]. J Appl Meteor, 1987, 22(1): 76-86.
- [13] 刘木艳,肖辉,杜秉玉,等.北京一次强单体雹暴的三维数值模拟[J].大气科学,2004,28(3):455-470,482.
- [14] 陈秋萍,陈齐川,冯晋勤,等.“2012.4.11”两个强降雹超级单体特征分析[J].气象,2015,41(1):25-33.
- [15] 陈瑞敏,赵孝伟,于海磊,等.一次长生命史超级单体风暴的雷达观测特征[J].暴雨灾害,2021,40(4):419-429.
- [16] 朱府鸿,李文平,郑皎.滇南一次超级单体风暴的雷达特征分析[J].云南地理环境研究,2021,33(5):64-71.
- [17] 尹丽云,梅寒,张腾飞,等.云南中部一次出现多个超级单体雹暴的强对流过程环境场和雷达回波特征[J].气象,2021,47(4):424-438.
- [18] 龚佃利,朱君鉴,王俊,等.2020年6月1日山东强雹暴过程双偏振雷达观测分析[J].海洋气象学报,2021,41(3):40-51.
- [19] 冯晓莉,马占良,管琴,等.1980—2018年青海高原冰雹分布特征及其关键影响因素分析[J].气象,2021,47(6):717-726.
- [20] 张天峰,王位泰,杨民,等.“2005.5.30”庆阳特大冰雹新一代天气雷达回波资料分析[J].干旱气象,2006,24(1):34-37.
- [21] 徐燕,毛玉琴.庆阳市一次局地冰雹天气分析[J].干旱气象,2008,26(3):57-62.
- [22] 白爱娟,程志刚.新一代天气雷达图像分析与应用[M].北京:气象出版社,2019:80-121.
- [23] 罗喜平,罗雄,李国平,等.中国天眼“FAST”所在地两次大冰雹天气过程的对比分析[J].云南大学学报(自然科学版),2021,43(1):78-89.
- [24] 郑媛媛,俞小鼎,方翀,等.一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析[J].气象学报,2004,62(3):317-328.

phoresis and high-performance liquid chromatography [J]. Journal of high resolution chromatography, 2000, 23(2): 143-148.

- [9] 张村,李丽,肖永庆,等.HPLC法同时测定大黄不同来源药材中2个蒽醌苷类成分的含量[J].药物分析杂志,2010,30(1):53-55.
- [10] 王薛,王曙,叶本贵.藏边大黄的质量标准研究[J].华西药学杂志,2019,34(4):370-374.
- [11] 李红英,向极钎,龙澜,等.HPLC法测定大黄药材中5种游离蒽醌的含量[J].安徽农业科学,2013,41(12):5278-5279.
- [12] KOYAMA J, MORITA I, KOBAYASHI N. Simultaneous determination of anthraquinones in rhubarb by high-performance liquid chromatography and capillary electrophoresis [J]. Journal of chromatography A, 2007, 1145(1/2): 183-189.
- [13] 周慧,宋凤瑞,刘志强,等.ESI-MS和HPLC-UV法研究大黄、黄柏、赤芍炮制前后化学成分变化[J].药物分析杂志,2009,29(6):883-888.
- [14] WANG N, SU M, LIANG S X, et al. Investigation of six bioactive anthraquinones in slimming tea by accelerated solvent extraction and high performance capillary electrophoresis with diode-array detection [J]. Food chemistry, 2016, 199: 1-7.
- [15] CHAI Y F, JI S G, WU Y T, et al. The separation of anthraquinone derivatives of rhubarb by micellar electrokinetic capillary chromatography [J]. Biomedical chromatography, 1998, 12(4): 193-195.