4 种地黄红外光谱、热分析及微观结构对比研究

章茂森[1]，丁 融[1]，吕年青[*2]
（1. 江苏省中医院，江苏 南京 210029；2. 江苏省卫生健康发展研究中心，江苏 南京 210036）

摘要：为比较 4 种地黄（生地黄、熟地黄、生地炭、熟地炭）成分的相似性及差异性，采用傅立叶红外光谱仪测试了 4 种地黄红外光谱，并计算了它们的二阶导数图谱，用综合热分析仪分析了它们在受热过程中热性能变化，用 X 射线能谱仪和扫描电子显微镜分析了它们表面化学元素质量分数和微观结构。结果表明：4 种地黄红外光谱主要吸收峰位置、峰形相似，但吸收峰强度有差异，它们均有地黄糖、醇和氨基酸等分子的—OH、—CH、C═O、—NH 的吸收峰，其中熟地黄的糖质量分数较高，生地炭和熟地炭在多处吸收峰强度明显降低。在 1 200~500 cm^{-1} 波段，4 种地黄红外光谱二阶导数图在强度和形状均存在较大差异。在 190~350 ℃温度段，由于地黄中多种糖类、醇、氨基酸等热分解导致较大的热失重，其中，生地黄和熟地黄比生地黄炭和熟地黄炭热失重更明显。生地炭和熟地炭比生地黄和熟地炭的氧元素原子质量分数低，而碳元素原子质量分数高，这些研究表明 4 种地黄化学成分相似，且生地黄和熟地黄有相似化学成分和微观结构，而生地炭和熟地炭有相似化学成分和微观结构，生地炭和熟地炭的糖、醇和氨基酸等质量分数比生地黄和熟地黄明显降低。

关键词：地黄，红外光谱，热分析，微观结构
中图分类号：R 282.5　**文章编号：**1673-1689(2023)02-0073-07　**DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2023.02.011

Comparative Study on Infrared Spectrum, Thermal Analysis and Microstructure for Four Kinds of *Radix rehmanniae*

ZHANG Maosen[1]，*DING Rong*[1]，*LYU Nianqing*[*2]
（1. Jiangsu Province Hospital of Traditional Chinese Medicine, Nanjing 210029, China; 2. Jiangsu Health Development Research Center,Nanjing 210036, China）

Abstract: In order to investigate and compare the similarities and differences of chemical composition of *Rehmanniae radix*, four-kind *Rehmanniae radix* (i.e., *Radix rehmanniae*, *Radix rehmanniae preparata*, *Radix rehmanniae charcoal*, and *Radix rehmanniae preparata charcoal*, shorted for RR, RRP, RRC and RRPC, respectively) were studied by infrared spectroscopy (FTIR) and their second derivative spectra were calculated. Their thermal performance changes during heat treatment were analyzed with a comprehensive thermal analyzer, and their surface chemical element content and microstructure were analyzed by X-ray energy spectrometer and scanning electron microscope (SEM). The results showed that four types of Rehmanniae Radix had similar absorption

收稿日期：2021-06-22
基金项目：国家卫生健康委计划生育药具不良反应监测中心/江苏省卫生健康发展研究中心开放基金课题(JSHD2021007)；江苏省卫生健康发展研究中心 2021 年度开放课题(JSHDRC2021007)。
作者作者：章茂森(1973—)，男，博士，副主任中医师，硕士研究生导师，主要从事中医生殖方面的研究。E-mail：zms1973@yeah.net
*** 通信作者：**吕年青(1963—)，男，博士，研究员，主要从事生殖健康和健康促进方面的研究。E-mail: nqlu@jsfp.org.cn

peak position and shape, however, their absorption peak intensity was different. They all had absorption peaks of -OH, -CH, C=O and -NH of polysaccharides, alcohols and amino acid groups of *Rehmanniae radix*, among which the content of polysaccharide was higher in the dry root of *Rehmanniae radix*, while the absorption strength of RRC and RRPC significantly reduced in many peaks. The intensity and shape of second derivative of infrared spectra of four-kind *Rehmanniae radix* were quite different at the 1 200-500 cm^{-1} band. The four-kind *Rehmanniae radix* showed thermal weight loss due to the thermal decomposition of various polysaccharides, alcohols and amino acids under 190 ℃ ~ 350 ℃, and RR and RRP had significant thermal weight loss than that of RRC and RRPC. Compared with RR and RRP, RRC and RRPC had lower O element atomic content and higher C element atomic content were higher. These studies showed that the chemical composition was similar for four-kinds *Rehmanniae radix*, and RR and RRP had similar chemical composition and micro-structure, while RRC and RRPC had similar chemical composition and micro-structure. The content of polysaccharides and alcohols and amino acid in RRC and RRPC were significantly lower than that of RR and RRP.

Keywords: *Rehmanniae radix*, infrared spectrum, thermal analysis, microstructure

地黄来源于玄参科植物地黄的干燥根，主要产于河南、河北、内蒙古及东北，在我国大部分地区有栽培。秋季采挖，鲜用或干燥切片生用。李时珍对生地黄的评价是："服之百日面如桃花，三年轻身不老"。地黄在我国具有悠久的食用历史，早在 1 000 多年前，中原地黄产区群众就将地黄腌制成咸菜，泡酒、泡茶而食之，至今人们仍把地黄切丝凉拌食用，地黄可以做成地黄粥、地黄酒、地黄饼、地黄乌骨鸡、地黄瘦肉汤、地黄当归羊肉煲等，对人体具有一定保健作用。如生地黄粥具有清热凉血，养阴生津，可用于皮肌炎、肌肉隐痛或萎缩、形体消瘦、头晕目眩、腰膝酸软等阴虚内热症的保健；生地黄枸杞枣仁粥可作为更年期综合征的保健养生；生地黄乌骨鸡可用于用脑过度、脑髓不足，常食能达到填精补脑、益智健身的功效；生地黄黄豆瘦肉汤可用于阴虚身热、内热口干、口渴、津伤便秘、温病发斑等不适的保健调理；熟地黄浸酒在补血同时，又兼有一定活血作用；熟地黄淮山药粥可滋阴清火、益肾安神；熟地黄还可以和排骨、当归、枸杞等药材一起做成滋补药膳，能帮助身体更充分吸收日常饮食的营养元素。地黄为药食两用食物，地黄药用历史始载于《神农本草经》，列为上品，其对血液、免疫系统、糖尿病、恶性肿瘤等方面均有良好的治疗作用。地黄多糖和梓醇是其主要活性成分，地黄多糖有增强免疫、抗肿瘤、调节血脂、补血等生理功能，还有明显降血糖作用，能降低模型动物的甘油三酯和胆固醇水平，对高脂饮食慢性应激大鼠糖代谢异常有较好的改善作用，能促进正常小鼠和 CTX 导致免疫抑制小鼠的血清循环抗体溶血素和溶血空斑的形成。地黄多糖还可以通过提高血清溶菌酶活性加强机体免疫功能，地黄多糖还具有抗焦虑作用[1-8]。地黄中梓醇对糖尿病大鼠肾病有较大影响[9]，能改善胆碱能功能、减少由 *D*-半乳糖诱导衰老小鼠中的炎性细胞因子[10]。地黄有生地黄、熟地黄、生地炭、熟地炭等炮制品，不同炮制品地黄具有不同用途，生地黄性寒、味甘，以清热凉血、养阴生津为主；熟地黄性温，味甘，以滋阴补血、益精填髓为主[1-2]；生地炭具有凉血止血功效，多用于吐血、衄血、尿血、崩漏及多种出血病证；熟地炭以补血止血为主，多用于崩漏或虚损性出血[10]。

目前，国内外学者对地黄进行了大量研究，认为地黄富含低聚糖类，其中以水苏糖为主，经炮制加工成熟地黄，低聚糖会转化成单糖。一些学者已从地黄中分离得到多糖类成分，对其化学结构和药理作用进行了较深入研究，取得了丰富成果[11-24]，而目前用红外光谱、热分析、能谱及扫描电镜研究生地黄、熟地黄、生地炭和熟地炭成分结构的相似性及差异性相关报道很少，作者利用红外光谱(FTIR)、X 射线能谱(EDS)和扫描电镜(SEM)对 4 种地黄进行分析，研究结果为光谱、热分析、能谱和扫描电镜等分析 4 种地黄提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

生地黄、熟地黄、生地炭、熟地炭均来源于河南

焦作,4 种地黄名称和简写分别为:生地黄 *Radix rehmanniae* (RR),熟地黄 *Radix rehmanniae praeparata*(RRP),生地炭 *Radix rehmanniae charcoal* (RRC),熟地炭 *Radix rehmanniae Praeparata charcoal*(RRPC)。

1.2 性能测试

1.2.1 红外光谱分析 将 4 种地黄样品进行真空干燥处理(110 ℃,2 h),并研磨成粉状,过 60 目筛,取其粉末 0.002 g 与溴化钾 0.2 g 混合均匀压片制备试样,用 Nicolet iS-1063001 FTIR 谱仪(赛默飞世尔科技(中国)有限公司)对 4 种试样进行扫描,波数为 4 000~400 cm^{-1},分辨率为 4 cm^{-1},扫描次数为 16 次。用 Omnic 8.3 软件对原始红外光谱图进行基线校正、归一化处理得 4 种地黄红外光谱图,之后进行二阶求导处理得它们的二阶导数光谱图。

1.2.2 红外光谱方法学考察 精密度实验:取同一份生地黄样品,参照 1.2.1 测定方法,连续测 5 次获 5 个红外光谱图,用 SPSS22.0 软件计算图谱间相似度(Pearson correlation coefficient)及相对标准偏差。

稳定性实验:取同一份生地黄样品,参照 1.2.1 测定方法,每隔 1 h 测 1 次,共测 5 次获 5 个红外光谱图,用 SPSS22.0 软件计算图谱间的相似度(Pearson correlation coefficient)及相对标准偏差。

重现性实验:取 5 份生地黄样品,参照 1.2.1 测定方法分别测试,共获 5 个红外光谱图,用 SPSS22.0 软件计算图谱间的相似度(Pearson correlation coefficient)及相对标准偏差。

1.2.3 热失重分析 利用 NETZSCH STA449 F3 Jupiter(耐驰科学仪器商贸(上海)有限公司)综合热性能分析仪分析 4 种地黄的热性能,得到它们的热重(TG)和热重微分(DTG)曲线,测试环境为惰性气体氩气,温度范围取 30~600 ℃,升温速率为 10 ℃/min。

1.2.4 X 射线能谱及扫描电子显微镜分析 采用日立 S-4800 扫描电子显微镜(日本株式会社)对 4 种地黄表面微观结构进行观察,并用配置 X 射线能谱仪(EDS)表征 4 种地黄表面化学元素质量分数。

2 结果与分析

精密度、稳定性和重现性实验结果表明,图谱间相似度分别为:0.999 982、0.999 900、0.992 640;相对标准偏差(RSD)分别为 0.02‰、0.08‰和 0.55%;表明该方法可靠、重复性和稳定性好。

2.1 4 种地黄红外光谱对比分析

图 1 和表 1 为 4 种地黄红外光谱图,可以看出,4 种地黄红外光谱主要吸收峰位置、峰形均相似,但吸收峰强度有较大差异,它们相同吸收峰主要有:在波数 3 418 cm^{-1} 附近有地黄多糖分子、糖苷分子和醇分子羟基—OH 伸缩振动吸收峰,在 2 926 cm^{-1} 附近有碳水化合物甲基和亚甲基—CH 伸缩振动吸收峰,1 636 cm^{-1} 附近是多糖分子 C═O 伸缩振动和氨基酸分子—NH 弯曲振动产生酰胺 I 带吸收峰,1 419 cm^{-1} 附近为氨基酸—CN 酰胺Ⅲ谱带伸缩吸收峰,1 260 cm^{-1} 附近有糖苷类分子 C—O 伸缩振动吸收峰,1 075 cm^{-1} 附近有糖和醇 C—OH 伸缩振动吸收峰,586 cm^{-1} 附近有糖及糖苷 C—O 伸缩振动吸收峰。熟地黄在波数 3 418、2 926、1 636、1 419、1 075 cm^{-1} 附近吸收峰比生地黄大,熟地黄在 1 145、872、799 cm^{-1} 附近有吸收峰,1 145 cm^{-1} 主要由糖羟基 C—OH 的化合物产生,872 cm^{-1} 为糖苷 C—O 伸缩吸收峰,799 cm^{-1} 属糖环 C—O 伸缩吸收峰。可见熟地黄糖成分特征峰更突出,相关研究也表明,生地黄经加热蒸熟为熟地黄后部分多糖(主要是水苏糖)水解转化成单糖(半乳糖、果糖、葡萄糖),单糖可使熟地黄“甜如饴”,水解所得的果糖能与氨基酸反应成蛋白黑素使熟地黄“黑如漆”[1,22]。

从表 1 还可看出,生地炭和熟地炭在 3 418、2 926、1 636、1 419、1 263、1 070 cm^{-1} 附近吸收峰强度比生地黄和熟地黄明显减小,表明它们的多糖、醇和氨基酸等成分质量分数明显降低,这是由于生地炭与熟地炭分别由生地黄和熟地黄炮制而成,在炮制过程中有部分炭化,导致其多糖、醇和氨基酸等有机化合物有部分分解和炭化,使多糖、醇羟基—OH、氨基酸分子氨基—NH 和氰基—CN 等特征峰减少。

2.2 4 种地黄红外光谱二阶导数图对比分析

图 2 为 4 种地黄红外光谱二阶导数图。从图 2 可知,4 种地黄在 1 800~500 cm^{-1} 波数段出现许多“锯齿”峰;在 1 800~1 200 cm^{-1} 波数段它们“锯齿”峰数量和峰值相似;在 1 200~500 cm^{-1}“锯齿”峰数量和峰值存在明显区别,生地炭和熟地炭“锯齿”峰数量较少,生地黄和熟地黄“锯齿”峰数量较多,特别是熟地黄“锯齿”峰数量最多,峰值也较大。“锯齿”峰由地黄糖产生,这进一步说明生地炭和熟地炭糖质量分数较低,而熟地黄糖质量分数较高。从

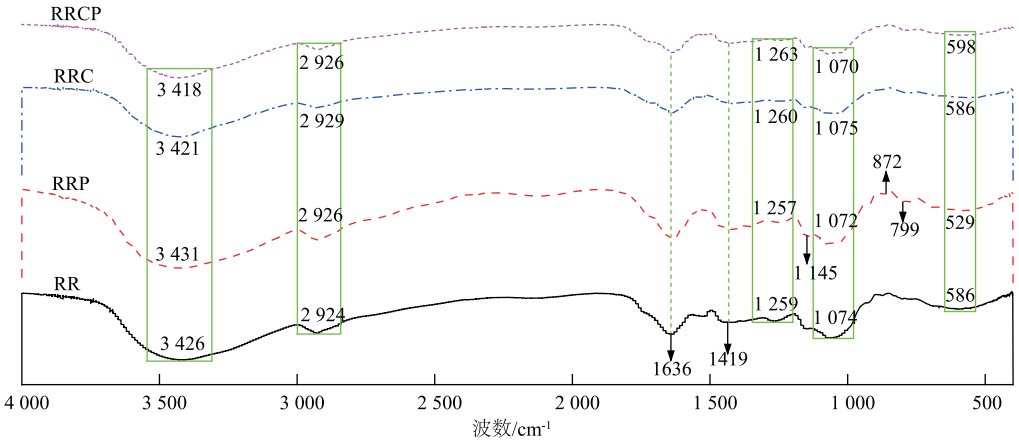


图 1　4 种地黄红外光谱图

Fig. 1　FTIR spectra of four types of *Rehmanniae radix*

表 1　4 种地黄红外图谱各峰的吸光度

Table 1　Absorbance of each peak of FTIR for four types of *Rehmanniae radix*

品种	3 418~3 426 cm^{-1}	2 926~2 929 cm^{-1}	1 636 cm^{-1}	1 419 cm^{-1}	1 257~1 263 cm^{-1}	1 145 cm^{-1}	1 070~1 075 cm^{-1}	872 cm^{-1}	586~598 cm^{-1}
RR	73.46	44.56	45.69	32.33	31.66		49.62	–	18.52
RRP	84.63	54.15	52.27	43.06	35.63	50.05	57.13	13.58	22.59
RRC	53.42	21.01	27.43	16.34	15.54		28.24	–	11.44
RRPC	57.30	26.71	30.26	19.94	17.03		31.20	–	21.24

图 1~2 可知,生地黄和熟地黄红外光谱曲线及其二阶导数曲线相似,生地炭和熟地炭红外光谱曲线及其二阶导数曲线更相似,综合它们的红外光谱和二阶导数曲线特征可以看出,生地黄和熟地黄化学成分和结构更相似,而生地炭和熟地炭化学成分和结构更相似。

2.3　4 种地黄热稳定性对比分析

图 3 分别为 4 种地黄 TG 和 DTG 曲线，从图 3(a)可知,在 190~350 ℃时,4 种地黄失重均较大,其中生地黄和熟地黄失重更大,原因可能是地黄富含多糖、梓醇及多种氨基酸等,这些有机生物质特别是多糖加热会分解，多糖在加热时分解成单糖,单糖在 190~220 ℃及较高温度下脱水成为焦糖,焦糖进一步加热生成二氧化碳、一氧化碳等产物,从而使它们有较大失重,相关文献表明葡萄糖、蔗糖热分解温度在 200~400 ℃发生热分解反应[23]。生地黄和熟地黄中糖和梓醇的质量分数相对较高,故它们的热失重比生地黄炭和熟地黄炭更大。从图 3(b)可看出,在 225 ℃左右生地黄和熟地黄 DTG 曲线有较

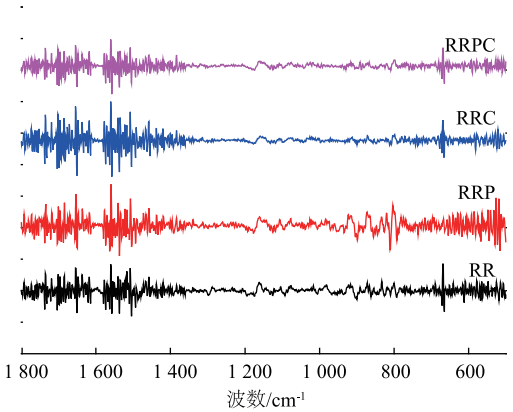


图 2　4 种地黄红外光谱二阶导数图

Fig. 2　Second derivative images of four-kind *Rehmanniae radix* FTIR spectra

大的峰值，表明它们在 225 ℃左右失重速率较大，而生地黄炭和熟地黄炭 DTG 曲线在此处峰值较小，表明生地黄炭和熟地黄炭在此处失重速率较小,这进一步表明生地黄和熟地黄糖类质量分数比生地黄炭和熟地黄炭高。

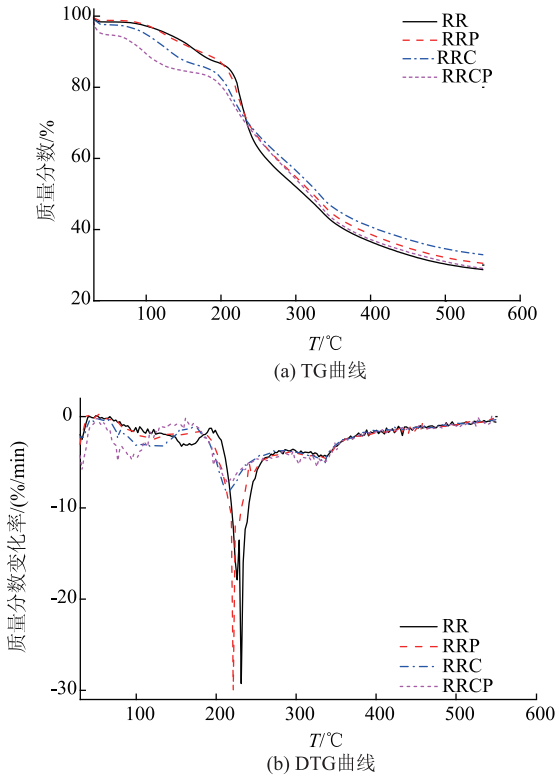


图 3　4 种地黄 TG 和 DTG 曲线

Fig. 3　TG & DTG curves of four-kind *Rehmanniae radix*

2.4　4 种地黄表面化学元素质量分数及微观结构对比分析

图 4 为 X 射线能谱所测的 4 种地黄表面元素质量分数。从图 4 可知,4 种地黄主要含有 C、O、K、Si、Al 等元素，且 C、O 元素质量分数较其他元素质量分数高很多，这进一步表明 4 种地黄富含多糖、醇和多种氨基酸等有机物成分,由于多糖、醇和多种氨基酸成分等有机物大分子主要由 C、H、O 这 3 种元素组成(X 射线能谱检查不能测 H 元素质量分数),所以 C、O 2 种元素质量分数较高,同时 4 种地黄也含有少量的 K、Si、Al 等无机元素。生地黄和熟地黄表面 O 元素质量分数分别为 46.86%、48.52%，C 元素质量分数分别为 50.53%、50.50%，生地炭和熟地炭 O 元素质量分数分别为 40.64%、40.94%,C 元素质量分数分别为 57.24%和 56.02%。由此可知：生地黄和熟地黄比生地炭和熟地炭 O 元素质量分数高,而生地炭和熟地炭的 C 元素质量分数比生地黄和熟地黄高，这进一步表明生地黄和熟地黄中糖、醇和多种氨基酸质量分数比生地炭和熟地炭高,生地黄和熟地黄在制成生地炭和熟地炭时其表面成分已炭化,多糖、醇和氨基酸等成分的质量分数减少，导致它们 C 原子质量分数明显增加,O 原子质量分数减少。

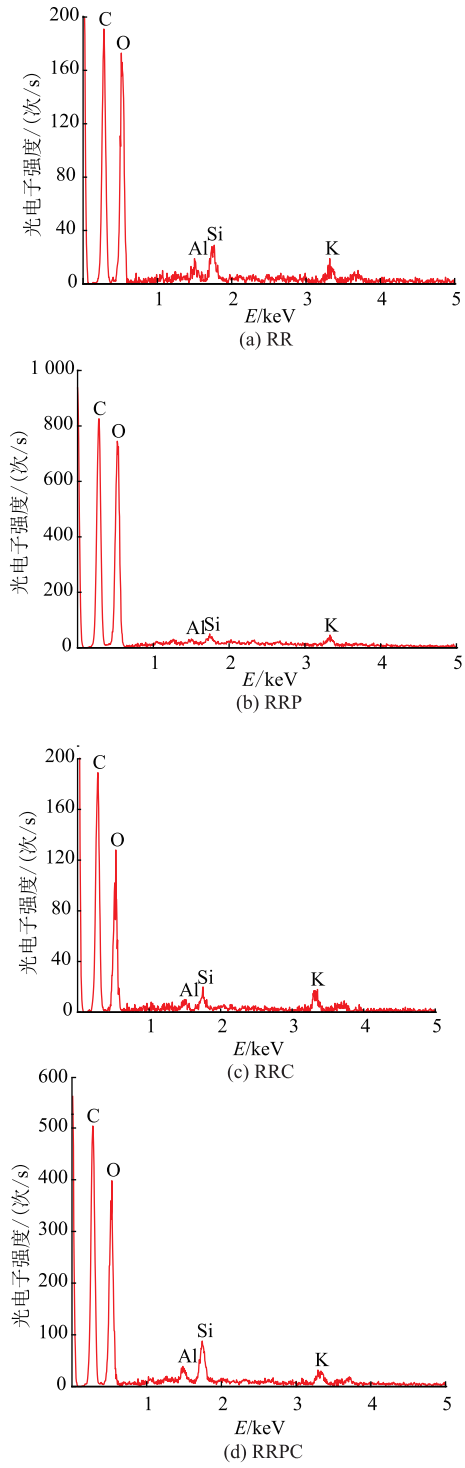
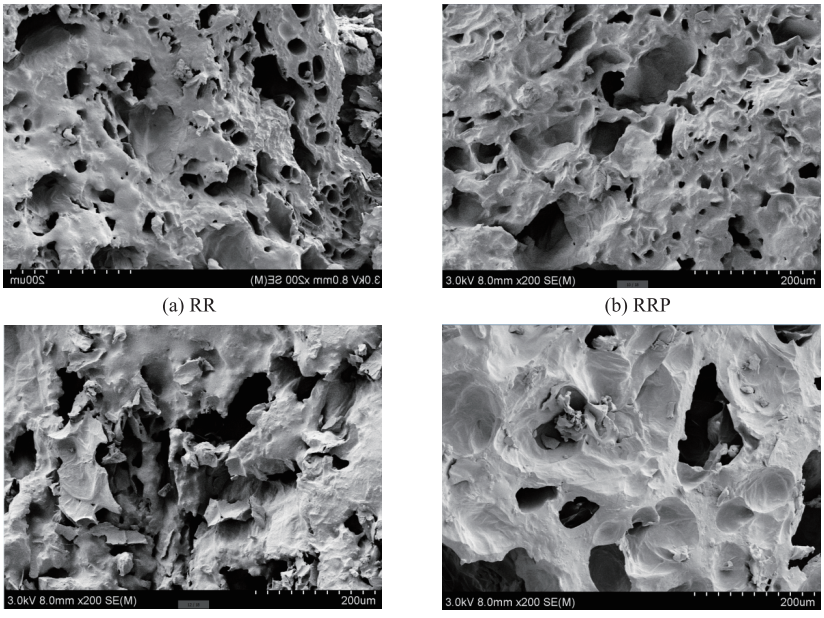


图 4　4 种地黄表面 X 射线能谱分析图

Fig. 4　X-ray energy spectrometer of four-kind *Rehmanniae radix*

图 5 为 4 种地黄表面微观结构 SEM 图。4 种地黄表面均有孔隙结构,且生地黄和熟地黄表面结构相似,而生地炭和熟地炭表面结构更接近。生地黄和熟地黄表面有很多小孔隙结构,表明生地黄蒸熟成熟地黄后其表面结构变化较小。从前面分析也可知,生地黄和熟地黄红外光谱曲线、二阶导数曲线均相似,C 原子质量分数相近,故生地黄和熟地黄化学成分和结构的相似性较高。而生地炭和熟地炭表面较大的孔隙结构相对较多,这是由于生地炭和熟地炭在制备时其表面部分炭化,从而形成较大孔隙,这也导致生地炭和熟地炭分别较生地黄和熟地黄的一些化学成分减少,如前面红外光谱中生地炭和熟地炭在 3 418 cm^{-1} 等波数吸收峰明显降低,X 射线能谱测出生地炭和熟地炭表面的 C 元素质量分数明显增大,O 元素质量分数明显减少,进一步表明地黄经泡制后其成分和表面结构发生改变,生地黄和熟地黄化学成分和微观结构相似,生地炭和熟地炭化学成分和微观结构更相似。



(a) RR (b) RRP (c) RRC (d) RRPC

图 5 4 种地黄微观结构 SEM 图

Fig. 5 SEM image of *Rehmanniae radix* microstructure

3 结 语

1)4 种地黄红外光谱主要吸收峰位置、峰形相似,但吸收峰强度有差异,它们均有地黄糖、醇和氨基酸等分子的—OH、—CH、C═O、—NH 的吸收峰,其中熟地黄中糖质量分数较高,生地炭和熟地炭在多处吸收峰强度明显降低。在 1 200~500 cm^{-1} 波段,4 种地黄红外光谱二阶导数图在强度和形状存在较大差异。

2)4 种地黄在 190~350 ℃热分解导致它们热失重较大。生地炭和熟地炭的 C 元素质量分数比生地黄和熟地黄高,它们的多糖、醇和氨基酸等成分质量分数比生地黄和熟地黄少;生地黄和熟地黄化学成分和微观结构相似,生地炭和熟地炭化学成分和微观结构更相似。

参考文献:

[1] 张西强. 近年来地黄的研究概况[J]. 中国中医药,2015,13(16):136-137.
[2] 周志敏. 地黄的质量评价和炮制方法研究[D]. 石家庄:河北中医药大学,2017.
[3] 张芳芳. 地黄不同炮制品对阴虚动物的影响研究[D]. 济南:山东大学,2015.
[4] ZHANG R X,ZHOU J,LI M X,et al. Ameliorating effect and potential mechanism of *Rehmannia glutinosa* oligosaccharides on the impaired glucose metabolism in chronic stress rats fed with high-fat diet[J]. **Phytomedicine**,2014,21:607-614.

[5] DONG Z, CHEN C X. Effect of catalpol on diabetic nephropathy in rats[J]. **Phytomedicine**, 2013, 20: 1023-1029.
[6] ZHANG X L, JIN C Z, LI Y C, et al. Catalpol improves cholinergic function and reduces inflammatory cytokines in the senescent mice induced by *D*-galactose[J]. **Food and Chemical Toxicology**, 2013, 58: 50-55.
[7] WANG Y H, KWAK M, LEE P C W, et al. *Rehmannia glutinosa* polysaccharide promoted activation of human dendritic cells[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2018, 116: 232-238.
[8] HUANG Y, JIANG C M, HU Y L, et al. Immunoenhancement effect of rehmannia glutinosa polysaccharide on lymphocyte proliferation and dendritic cell[J]. **Carbohydrate Polymers**, 2013, 96: 516-521.
[9] 韩清泉. 不同炮制方法对中药地黄化学成分的影响与分析[J]. 中医临床研究,2013,5(9):33-34.
[10] 李娴,王娜,卫向龙,等. 生地炭、熟地炭炮制历史沿革及现代研究进展[J]. 中华中医药 学刊,2012(8):1737-1739.
[11] 刘方,余绍玲. 地黄不同炮制品中梓醇含量比较[J]. 中国药房,2003,14(6):378- 379.
[12] 王志江,魏国栋,马思缇. 地黄多糖的化学和药理作用研究进展[J]. 中国实验方剂学杂志,2015,21(16):231-234.
[13] KIN H M, AN C S, JUNG K Y, et al. *Rehmannia glutinosa* inhibits tumour necrosis factor-alpha and interleukin-1 secretion from mouse astrocytes[J]. **Pharmacological Research**, 1999, 40: 171-176.
[14] CUI Y, RONG C L, WANG J M, et al. Mechanism-based anti-anxiety effects of polysaccharides extracted from Shudihuang (*Radix rehmanniae preparata*) by two-dimensional electrophoresis analysis in rat hippocampus proteins[J]. **Journal of Traditional Chinese Medicine**, 2013, 33:524-530.
[15] 李红伟,孟祥乐. 地黄化学成分及其药理作用研究进展[J]. 药物评价研究,2015,38(2):218-228.
[16] LIU Y F, LIANG D, LUO H, et al. Ionone glycosides from the roots of *Rehmannia glutinosa*[J]. **Journal of Asian Natural Products Research**, 2014(16): 11-19.
[17] 付海燕,杜红阳,包翠芬. 地黄多糖诱导大鼠 BMSCs 向神经元样细胞分化及对 Notch1 和 Jagged1 蛋白表达的影响[J]. 解放军医学杂志,2014(6):448-453.
[18] ZHANG Y L, FENG W S, ZHENG X K, et al. Three new ursane-type triterpenes from the leaves of *Rehmannia glutinosa*[J]. **Fitoterapia**, 2013, 89:15-19.
[19] WANG F Q, ZHI J Y, ZHANG Z Y, et al. Transcriptome analysis of salicylic acid treatment in *Rehmannia glutinosa* hairy roots using RNA-seq technique for identification of genes involved in acteoside biosynthesis [J]. **Frontiers in Plant Science**, 2017, 8: 787.
[20] WANG F Q, SUO Y F, WEI H, et al. Identification and characterization of 40 isolated *Rehmannia glutinosa* MYB family genes and their expression profiles in response to shading and continuous cropping[J]. **International Journal of Molecular Sciences**, 2015, 16:15009-15030.
[21] 樊克锋,赵建平,汤法银,等. FTIR 对酒炖熟地黄炮制终点的量化分析[J]. 中国兽药杂志,2017,51(9):49-54.
[22] 李真,周立红,叶正良,等. 红外光谱技术在中药质量控制中的应用进展[J]. 药物评价研究,2015,39(3):463-468.
[23] 陈颖钦,何晗冰,刘畅,等. 葡萄糖和蔗糖热分解过程的动力学分析[J]. 过程工程学报,2010,10(4):720-725.
[24] LI M, WANG X L, ZHANG Z G, et al. Three new alkaloids and a new iridoid glycoside from the roots of *Rehmannia glutinosa*[J]. **Phytochem Letters**, 2017, 21: 157-162.