

DOI:10.11913/PSJ.2095-0837.2021.50496

冉家栋, 杨芙蓉, 谢彩香. 药用植物掌叶大黄化学组分空间变异及气候响应特征[J]. 植物科学学报, 2021, 39(5): 496-505

Ran JD, Yang FR, Xie CX. Spatial variation in chemical components of *Rheum palmatum* L. and climatic response characteristics[J].

Plant Science Journal, 2021, 39(5): 496-505

# 药用植物掌叶大黄化学组分空间变异及气候响应特征

冉家栋<sup>1,2</sup>, 杨芙蓉<sup>1,2</sup>, 谢彩香<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国医学科学院, 北京协和医学院药用植物研究所/国家中医药管理局中药资源保护重点研究室, 北京 100193;

2. 中药资源教育部工程研究中心, 北京 100193)

**摘要:** 基于多层次气候因子和掌叶大黄(*Rheum palmatum* L.)的化学成分含量,运用聚类和相关性分析法对掌叶大黄化学成分的地理变异规律进行研究。结果显示,四川地区的掌叶大黄属于游离蒽醌-双蒽酮化学型,甘肃-宁夏地区属于结合蒽醌化学型。Pearson 系数分析结果表明,气温和水汽压是造成掌叶大黄品质空间变异的主要原因。结合掌叶大黄中的结合蒽醌类物质与3-11月的月均气温为强正相关,与全年的月均水汽压呈强正相关,同时与6-8月的月均辐射量呈强正相关,与6-9月月均降水呈负相关。游离蒽醌与最冷季的月均水汽压呈负相关,蒽酮类物质与每月气温呈强负相关,与每月水汽压呈负相关。研究结果说明最冷季的水汽压和最湿季的月均气温是影响掌叶大黄品质的重要时间窗口和关键因子。

**关键词:** 掌叶大黄; 化学组分; 空间变异; 多尺度气候因子; 响应特征

中图分类号: Q948.11

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2021)05-0496-10

## Spatial variation in chemical components of *Rheum palmatum* L. and climatic response characteristics

Ran Jia-Dong<sup>1,2</sup>, Yang Fu-Rong<sup>1,2</sup>, Xie Cai-Xiang<sup>1,2\*</sup>

(1. Key Lab of Chinese Medicine Resources Conservation, State Administration of Traditional Chinese Medicine of the People's Republic of China, Institute of Medicinal Plant Development, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Beijing 100193, China; 2. Engineering Research Center of Chinese Medicine Resources, Ministry of Education, Beijing 100193, China)

**Abstract:** We investigated geographical variation in the chemical components of rhubarb (*Rheum palmatum* L.) and its response to multilevel climatic factors based on clustering and heap graph analysis. Results showed that rhubarb from Sichuan belonged to the free anthraquinone-double anthrone chemical type, while rhubarb from Gansu and Ningxia belonged to the anthraquinone chemical type. Pearson correlation analysis of the response relationships between multilevel climatic factors and rhubarb components showed that temperature and vapor pressure were key factors related to spatial variation in *R. palmatum* quality. Anthraquinones were positively correlated with mean monthly temperature from March to November and mean monthly water vapor pressure for the whole year, positively correlated with mean monthly sunshine from June to August, and negatively correlated with mean monthly precipitation from June to September. Free anthraquinones were negatively correlated with mean monthly water vapor pressure in the coldest season. Anthrones were negatively

收稿日期: 2021-04-29, 修回日期: 2021-05-28。

基金项目: 中国医学科学院医学与健康科技创新工程服务“一带一路”战略先导科技专项(2017-I2M-B&amp;R-09)。

This work was supported by a grant from the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Medical Sciences for Medicine and Health Science and Technique Innovation Project(2017-I2M-B&amp;R-09)。

作者简介: 冉家栋(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为药用植物资源学(E-mail: jdran\_0126@163.com)。

\* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: caixiangxie@163.com)。

correlated with monthly temperature and negatively correlated with monthly water vapor pressure. These results implied that vapor pressure in the coldest season and monthly average temperature in the wettest season were important time windows and key factors affecting *R. palmatum* quality.

**Key words:** *Rheum palmatum*; Chemical composition; Spatial variation; Multilevel climatic factors; Response characteristics

掌叶大黄 (*Rheum palmatum* L.) 为蓼科大黄属多年生草本植物, 以干燥根及茎入药, 主要有效成分为具有抑菌作用的游离蒽醌(如大黄酚、大黄酸、大黄素等)以及具有泻下作用的结合蒽醌(如双蒽酮苷和单糖苷), 具有泻下攻积、清热泻火、凉血解毒、逐瘀通经等功效<sup>[1-3]</sup>, 是 2020 版《中国药典》收载的大黄药材主要来源之一。掌叶大黄主要分布在甘肃、四川、青海、宁夏、西藏、陕西、山西等地区的潮湿凉爽地带, 与唐古特大黄 (*Rheum tanguticum* Maxim. ex Balf.) 相比, 其地理分布跨度较大, 最低分布海拔 2500 m, 最高可达 4400 m。有研究认为青藏高原、雅鲁藏布江河谷、横断山脉和祁连山区域为掌叶大黄的分布中心和优质产区<sup>[4]</sup>。此外, Wang 等<sup>[5]</sup>对掌叶大黄进行调查时发现, 掌叶大黄的 actual 分布范围更广, 从华北到西南、西北部均有分布。在地理分布上, 掌叶大黄的地理分布区域处于唐古特大黄和药用大黄的中间过渡地带, 显示出较大的生态幅和较强的适应性。

研究发现, 不同产地的大黄成分含量具有显著差异<sup>[6-11]</sup>。药用资源化学成分种类及含量差异是道地药材地域性的具体体现<sup>[12-22]</sup>。因此, 掌叶大黄品质地域性及其与气候间的响应关系是阐释该物种品质空间变异的重要环节。目前针对不同产区掌叶大黄的化学成分、提取方法以及药理方面的研究较多<sup>[23-30]</sup>, 而对影响掌叶大黄品质形成的气候成因研究开展较少<sup>[31-33]</sup>, 且主要集中在单因子研究或者静态研究, 缺乏对环境因子的综合性和动态研究。因此, 本文基于不同产地掌叶大黄的化学成分含量<sup>[34]</sup>和多尺度气候因子数据, 研究气候因子对掌叶大黄品质的动态影响, 明确不同地区掌叶大黄的气候响应特征, 探索掌叶大黄品质空间变异的气候成因, 揭示道地药材掌叶大黄不同化学型形成的生态学机制, 以期掌叶大黄高品质种植区选址及其资源可持续发展提供依据。

1 材料与方法

1.1 植物材料

本研究共采集 12 份掌叶大黄栽培品的根茎样本<sup>[34]</sup>, 分别来自于大黄的主要产区四川、甘肃和宁夏等地。采集原则是县与县之间的距离在 100 km 以上, 为避免重复采样, 每株样品之间的距离至少间隔 50 m 以上(表 1)。

表 1 掌叶大黄样本点地理信息  
Table 1 Geographic information on sampling points of *Rheum palmatum*

采集地点 Location	管理方式 Management	栽培年限 Cultivation period (y)	海拔 Altitude (m)	编号 Code
四川新龙	粗放	5	4367	S-XL
四川小金	粗放	5	4312	S-SJ
四川丹巴	粗放	5	3636	S-DB
四川理塘	粗放	5	4265	S-LT
四川炉霍	粗放	5	3166	S-LH
四川康定	粗放	6	4077	S-KD
甘肃迭部	粗放	5	3227	G-DB
甘肃岷县	粗放	5	2530	G-MX
甘肃宕昌	粗放	6	2331	G-TC
甘肃礼县	粗放	6	2136	G-LX
宁夏隆德	粗放	5	2358	N-LD
宁夏彭阳	粗放	5	1441	N-PY

1.2 气候数据

本文所采用的气候数据包含 3 个时间尺度(表 2), 首先是 4 个年均因子, 来源于中国气象数据网共享平台; 其次是 19 个反映季节性变化的季度气候因子, 来源于世界气候数据库 (<http://www.worldclim.org/>), 为 1980 - 2010 年监测数据的平均值, 空间分辨率为 30"; 最后是 4 个月均因子, 反映因子在月际间的动态变化。

1.3 掌叶大黄品质测定

掌叶大黄样品切片后于 60℃烘干, 粉碎后过 60 目标标准筛。采用 HPLC 法测定分析样品游离蒽醌类(芦荟大黄素、大黄酸、大黄素、大黄酚、大

表 2 环境变量  
Table 2 Environmental variables

因子 Factor	指标 Indices	气候变量 Climatic variables
综合因子	平均气温及变化系数	年均气温 (Bio1)、温度季节性变化系数 (Bio4)
	极端温度	最热月份最高温 (Bio5)、最冷月份最低温 (Bio6)、最热季平均温度 (Bio10)、最冷季平均温度 (Bio11)
	降水量及季节性分布	年降水量 (Bio12)、降水量季节性变化 (Bio15)
	极端水分条件	最湿月降水量 (Bio13)、最干月降水量 (Bio14)、最湿季降水量 (Bio16)、最干季降水量 (Bio17)
	热量条件	最湿季平均温度 (Bio8)、最干季平均温度 (Bio9)、最暖季降水量 (Bio18)、最冷季降水量 (Bio19)
	温差特点	昼夜温差月均值 (Bio2)、等温性 (Bio3)、年温度变化范围 (Bio7)
月均因子	月均量	月均温、月均降水量、月均水汽压、月均太阳辐射量
年均因子	年均量	年均气温、年均相对湿度、年均降水、年均日照时数

黄素甲醚)、总蒽醌(芦荟大黄素、大黄酸、大黄素、大黄酚、大黄素甲醚)、结合蒽醌(总蒽醌-游离蒽醌含量)、多酚类(没食子酸、儿茶素)、双蒽酮苷类(番泻苷 A、番泻苷 B)等组分含量。使用 Agilent1100 高效液相色谱仪, 色谱柱为 Agilent Zorbax SB-C18 色谱柱 (4.6 mm × 250 mm, 5 μm); 流动相为 0.05% 的磷酸水溶液 (A)-乙腈 (B)。使用仪器如下: DAD 二极管阵列检测器; KQ5200D 超声清洗器; 万分之一电子分析天平; FW100 型高速万能粉碎机; 旋转蒸发器(上海亚荣生化仪器厂)。

1.4 数据分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 25.0 软件进行数据统计和分析。采用 RStudio、Prism8.0 软件作图。采用统计中的描述性统计法 (Analyze-Descriptive Statistics) 标准化处理不同量纲数据, 得到标准化结果后进行数据统计分析。聚类分析将数据线性标准化后采用系统聚类法, 分析方法采用组间联结, 化学成分聚类相似度量采用平方欧式距离法; 年均因子聚类相似度量采用 Pearson 距离法。采用 SPSS 25.0 软件中 Pearson 进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 掌叶大黄品质地理变异

本研究发现, 不同产地间掌叶大黄中的 4 种功效组分间的含量有明显的地理变异, 尤其是游离蒽醌类、结合蒽醌类和蒽酮类化学物质含量随地域变化很大。青海和宁夏样点的大黄结合蒽醌类物质含量较高, 而四川样本游离蒽醌类含量较

高(图 1)。

甘肃-宁夏样品中结合蒽醌类化学成分在该组别中的含量占比平均为 72.3%, 其中甘肃宕昌占比最高 (87.9%), 其次是宁夏隆德 (75.2%), 最低的是甘肃礼县 (54.1%); 而四川样本中结合蒽醌类化学成分的平均含量占比仅为 5.7%。而四川样品中游离蒽醌类化学成分在该组别中的含量占比平均为 68.3%, 其中, 四川理塘最高 (80.6%), 其次是四川炉霍 (75.6%), 最低的是四川康定 (60.8%); 而甘肃-宁夏样品中游离蒽醌含量的平均值仅为 13.61%。

2.2 掌叶大黄化学成分与多尺度气候因子间的响应

气候因子对药用植物成分的影响具有动态性特点, 即不同物候期植物对气候因子需求不同。因此, 本研究基于不同时间尺度 (年均、季均、月均) 的气候因子, 研究它们对掌叶大黄化学成分的动态影响和关键时间窗口, 并探究掌叶大黄各成分积累的气候响应特征。

2.2.1 年均气候因子与化学成分的响应关系

掌叶大黄 4 种化学组分与气候因子间的 Pearson 相关系数分析结果显示 (图 2), 除了多酚物质外, 其它 3 种化学组分与年均因子均呈显著相关。其中, 游离蒽醌与年均相对湿度呈显著负相关; 结合蒽醌与年均气温呈现正相关, 与年均降水呈现负相关; 蒽酮类与年均气温为强负相关, 与年均降水呈正相关。

2.2.2 季度气候因子与化学成分的响应关系

19 个季度因子间的自相关性分析结果说明一些因子间具有较强的相关性。本研究删除相关性较

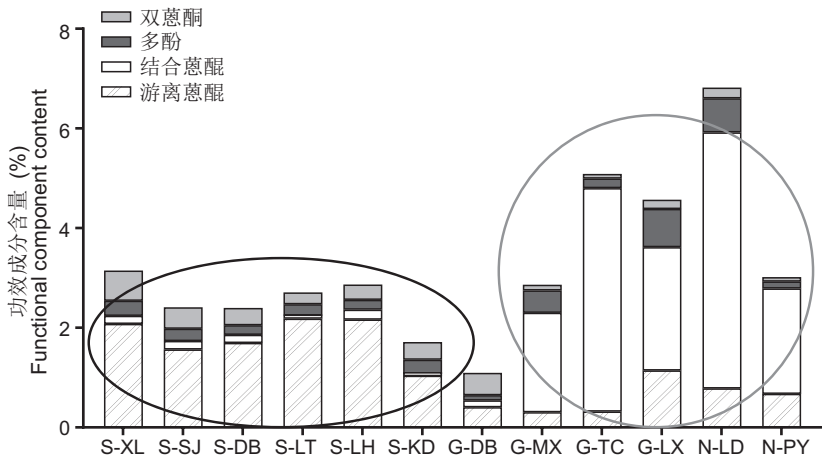


图 1 掌叶大黄 4 种功效组分含量堆积图  
Fig. 1 Accumulation map of chemical composition in *Rheum palmatum*

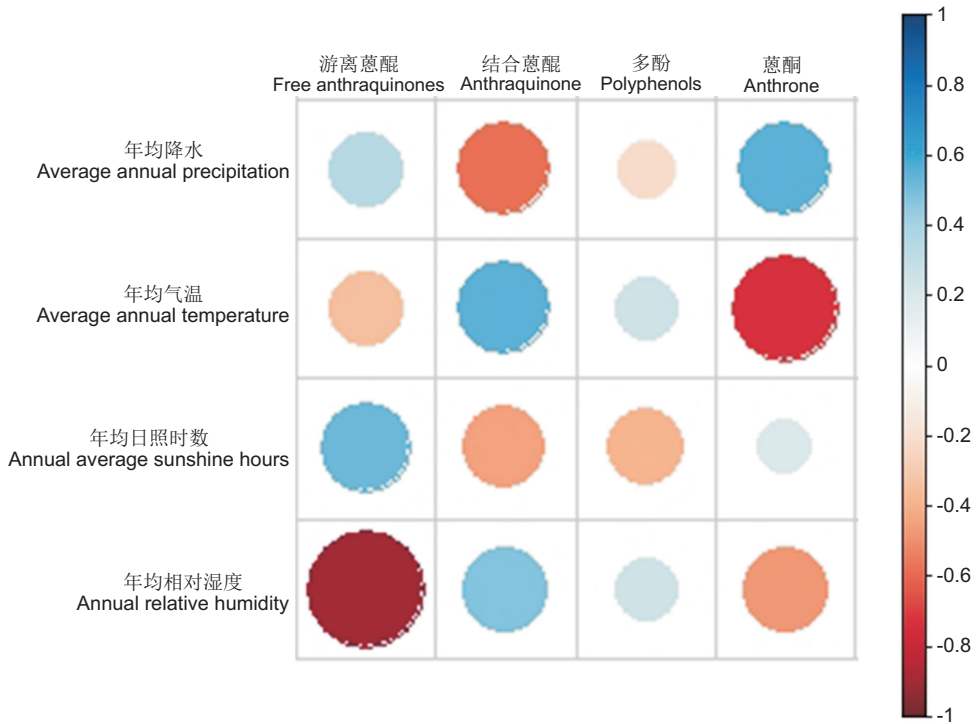


图 2 掌叶大黄 4 种成分与年均因子的相关性  
Fig. 2 Correlations among components of *Rheum palmatum* and annual average factor

大的 7 个因子，保留 12 个相对独立的气候因子。进一步分析这 12 个因子与大黄成分间的相关系数，发现除多酚类物质外，结合蒽醌、游离蒽醌和蒽酮类物质与季度因子间均有一定相关性，这与 2.2.1 中结论一致(表 3)。

游离蒽醌类物质与等温性 (Bio3) 和最湿月降雨量 (Bio13) 为正相关，与降水量季节性变化

(Bio15) 为强正相关，说明在温度变化剧烈且暖季降水量多的地区适合游离蒽醌的积累和形成。

结合蒽醌与昼夜温差月均值 (Bio2)、等温性 (Bio3) 呈强负相关，而与温度季节性变化系数 (Bio4) 和最湿季平均温度 (Bio8) 为正相关，与最冷月份最低温 (Bio6) 为强正相关，与降水因子最湿月降水量 (Bio13) 为负相关，说明在温度变化不



表 3 掌叶大黄 4 种成分与季度因子 Pearson 系数  
Table 3 Pearson correlation coefficients between components of *Rheum palmatum* and seasonal factors

气候因子 Climatic factor	游离蒽醌 Free anthraquinones	结合蒽醌 Anthraquinone	多酚 Polyphenols	蒽酮 Anthrone
Bio2	0.627	-0.907 **	-0.622	0.719 *
Bio3	0.696 *	-0.860 **	-0.450	0.691 *
Bio4	-0.551	0.683 *	0.233	-0.607
Bio6	-0.530	0.774 **	0.491	-0.842 **
Bio7	-0.442	0.275	-0.152	-0.300
Bio8	-0.587	0.722 *	0.324	-0.800 **
Bo9	-0.311	0.509	0.334	-0.751 *
Bio13	0.689 *	-0.669 *	-0.257	0.579
Bio14	0.099	-0.307	-0.030	0.426
Bio15	0.809 **	-0.525	-0.289	0.381
Bio17	0.006	-0.288	-0.083	0.412
Bio19	0.006	-0.288	-0.083	0.412

注：\* 表示在 0.05 水平（双尾）相关性显著；\*\* 表示在 0.01 水平（双尾）相关性显著。下同。  
Notes: \* indicates significant correlation at 0.05 level (two-tailed); \*\* indicates significant correlation at 0.01 level (two-tailed). Same below.

大，气温较暖和且降水量不大的地区适合结合蒽醌的累积。

蒽酮类物质与最湿季平均温度 (Bio8) 和最冷月份最低温 (Bio6) 为强负相关，与最干季平均温度 (Bio9) 为负相关，而与昼夜温差均值 (Bio2) 和等温性 (Bio3) 呈正相关，说明温度寒冷且气温变化剧烈地区适合蒽酮类物质合成。这与结合蒽醌类累积的气候条件正好相反。

2.2.3 月均因子与化学成分响应关系

本研究发现，游离蒽醌和蒽酮类物质与月均温均呈负相关，而结合蒽醌与月均温则为正相关 (表 4)。其中结合蒽醌在 3 – 11 月均呈现出与月均温的显著正相关，说明此时间段内温度高适合掌叶大黄中结合蒽醌类物质累积与形成，而蒽酮类物质则与每月气温均呈强负相关，说明低温有助于掌叶大黄中蒽酮类物质的合成和累积。游离蒽醌类物质虽然与月气温没有呈现显著相关，但有一定的负相关性，说明低温也有助于游离蒽醌的形成。

如图 3 所示，月均降水量与多酚成分相关性不大，但与其它 3 种成分具有一定相关性。其中游离蒽醌与干季 (1 – 5 月、10 – 12 月) 降水量呈负相关，而与 6 – 9 月降水量呈强正相关。结合蒽醌与 6 – 9 月降水量呈显著负相关。而蒽酮仅与 6 – 9

月降水量呈显著正相关。可见，3 种化学成分对 6 – 9 月降水量均有一定的响应。

月均太阳辐射量与 4 种成分的相关性也较小 (表 5)。其中，游离蒽醌与 7 和 8 月太阳辐射量为负相关，而与 11、12 月太阳辐射量则为正相关；结合蒽醌与 6 – 8 月太阳辐射量为正相关；蒽酮与 7、8 月太阳辐射量则为负相关。

水汽压与游离蒽醌和蒽酮类物质呈负相关，而与结合蒽醌类物质为正相关 (表 6)。影响游离蒽醌物质累积的时间窗口是 1 – 5 月及 11 – 12 月，而影响蒽酮类物质累积的是全年的月均水汽压，说明空气湿度越低越能促进游离蒽醌和蒽酮物质累积。相反，空气湿度越高越能促进结合蒽醌物质累积。

因此，结合蒽醌类物质与月平均水汽压和月平均气温全年均呈正相关，而与月均降水和月均太阳辐射量呈现动态变化趋势，表现为最热季的月均温越高越有助于结合蒽醌物质形成，同时最热季时期的少降水量和高太阳辐射量有助于结合蒽醌物质形成；游离蒽醌与月平均水汽压和月平均气温全年均呈负相关，与月平均降水和月平均太阳辐射量呈负相关-正相关-负相关的动态变化趋势；蒽酮类物质与月平均气温和月平均水汽压全年呈较强负相关，是影响蒽酮类物质累积的主要气候因子，说明较低的气温和湿度有利于蒽酮类物质形成。而多酚类

表 4 掌叶大黄 4 种成分与月均气温 Pearson 系数

Table 4 Pearson correlation coefficients between components of *Rheum palmatum* and monthly average temperature

气候因子 Climatic factor	游离蒽醌 Free anthraquinones	结合蒽醌 Anthraquinone	多酚 Polyphenols	蒽酮 Anthrone
1 月平均气温	-0.441	0.558	0.359	-0.786 **
2 月平均气温	-0.443	0.557	0.345	-0.780 **
3 月平均气温	-0.574	0.645 *	0.310	-0.825 **
4 月平均气温	-0.602	0.698 *	0.319	-0.811 **
5 月平均气温	-0.548	0.715 *	0.330	-0.801 **
6 月平均气温	-0.545	0.728 *	0.327	-0.794 **
7 月平均气温	-0.616	0.742 *	0.330	-0.790 **
8 月平均气温	-0.640 *	0.735 *	0.334	-0.794 **
9 月平均气温	-0.564	0.696 *	0.310	-0.805 **
10 月平均气温	-0.552	0.670 *	0.322	-0.826 **
11 月平均气温	-0.564	0.671 *	0.355	-0.835 **
12 月平均气温	-0.490	0.590	0.361	-0.812 **

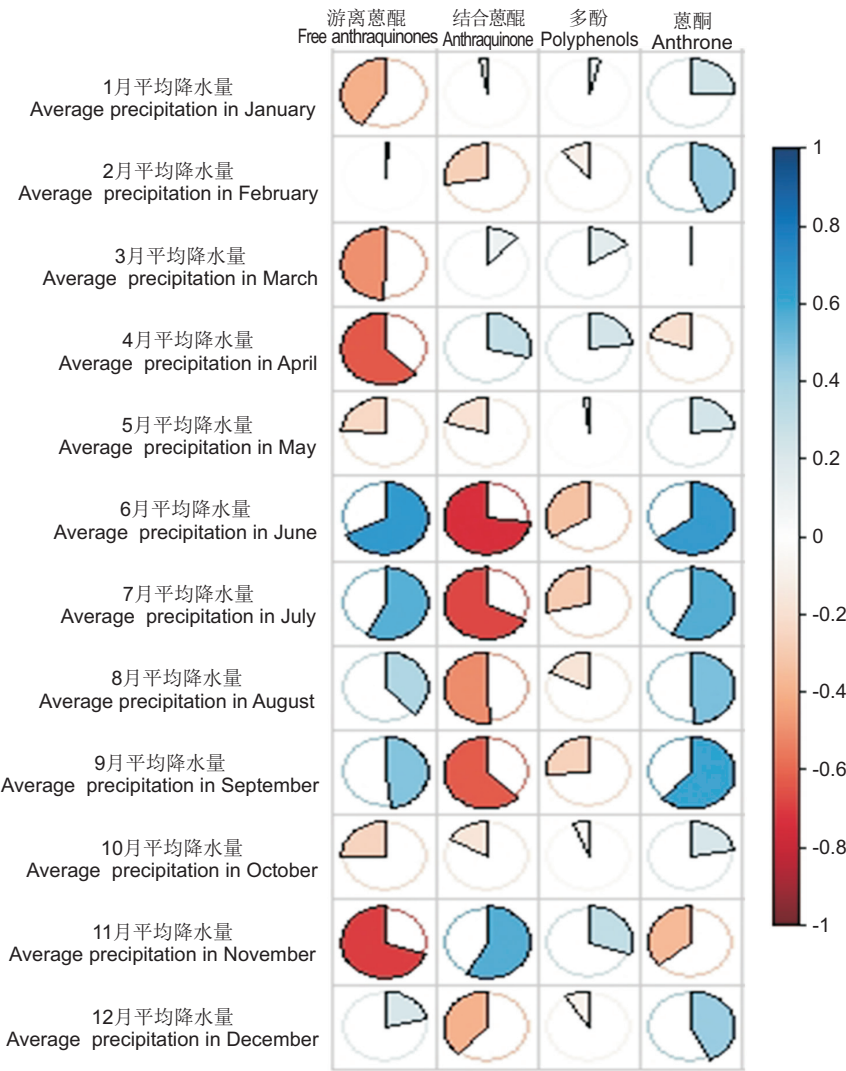


图 3 掌叶大黄 4 种成分与月均降水量的相关性

Fig. 3 Correlations between monthly average precipitation and chemical composition of *Rheum palmatum*

表 5 掌叶大黄 4 种成分与月均太阳辐射量相关性  
Table 5 Correlations between chemical components of *Rheum palmatum* and average solar radiation

气候变量 Climatic factor	游离蒽醌 Free anthraquinones	结合蒽醌 Anthraquinone	多酚 Polyphenols	蒽酮 Anthrone
1 月平均太阳辐射量	0.537	-0.210	-0.174	0.142
2 月平均太阳辐射量	0.230	-0.025	-0.154	-0.021
3 月平均太阳辐射量	0.055	0.280	0.027	-0.287
4 月平均太阳辐射量	-0.174	0.419	0.069	-0.391
5 月平均太阳辐射量	-0.486	0.631	0.187	-0.544
6 月平均太阳辐射量	-0.619	0.726 *	0.263	-0.628
7 月平均太阳辐射量	-0.691 *	0.746 *	0.297	-0.644 *
8 月平均太阳辐射量	-0.674 *	0.737 *	0.269	-0.638 *
9 月平均太阳辐射量	0.093	0.158	-0.103	-0.073
10 月平均太阳辐射量	0.482	-0.145	-0.186	0.142
11 月平均太阳辐射量	0.807 **	-0.585	-0.320	0.496
12 月平均太阳辐射量	0.690 *	-0.422	-0.287	0.338

表 6 掌叶大黄 4 种成分与月平均水汽压相关性  
Table 6 Correlations between chemical composition of *Rheum palmatum* and monthly mean water vapor pressure

气候因子 Climatic factor	游离蒽醌 Free anthraquinones	结合蒽醌 Anthraquinone	多酚 Polyphenols	蒽酮 Anthrone
1 月平均水汽压	-0.701 *	0.752 *	0.400	-0.724 *
2 月平均水汽压	-0.697 *	0.720 *	0.405	-0.740 *
3 月平均水汽压	-0.733 *	0.763 *	0.376	-0.742 *
4 月平均水汽压	-0.706 *	0.734 *	0.349	-0.760 *
5 月平均水汽压	-0.683 *	0.736 *	0.333	-0.749 *
6 月平均水汽压	-0.579	0.743 *	0.334	-0.758 *
7 月平均水汽压	-0.446	0.714 *	0.293	-0.689 *
8 月平均水汽压	-0.496	0.725 *	0.299	-0.706 *
9 月平均水汽压	-0.452	0.707 *	0.317	-0.719 *
10 月平均水汽压	-0.628	0.741 *	0.367	-0.765 **
11 月平均水汽压	-0.662 *	0.735 *	0.368	-0.761 *
12 月平均水汽压	-0.648 *	0.740 *	0.407	-0.749 *

物质与 4 种气候因子相关性最弱，没有达到显著水平。

3 讨论

3.1 掌叶大黄品质空间变异规律

本研究中，掌叶大黄 4 种功效组分含量随地域不同而有显著变化，可划分为甘肃-宁夏型和四川型两种类型，其中甘肃-宁夏样品中结合蒽醌物质含量和多酚含量比较高，而四川样品中游离蒽醌和双蒽酮含量相对较高。从空间距离来看，甘肃宁夏采样点相对较近，且采样地岷县、宕昌、礼县与宁夏采样点气候相似，但是甘肃迭部与四川北部接壤，位于岷山山脉海拔较高，因此甘肃迭部气候与

四川相似。

甘肃迭部样点 (G-DB) 的品质与四川样点相似。掌叶大黄样点处的气候因子显示，迭部的月平均气温和月平均水汽压在甘肃样点中最低，且与四川康定的数值比较接近。而月平均太阳辐射量和月平均降水量则相差不大。在掌叶大黄关键生长时期的 3 – 11 月，迭部的每月平均气温比甘肃其它样点要低 5℃左右；而水汽压平均低 2~5 kPa，而结合蒽醌类物质含量与月平均水汽压和月平均气温均呈正相关，因此迭部样点的结合蒽醌类物质含量明显少于其它甘肃采样点。由此推断气温和水汽压可能是造成掌叶大黄品质空间变异的主要原因，地域内的药用植物品质与气候因子息息相关。

### 3.2 多尺度气候因子可准确反映化学成分与气候因子间的响应动态变化

根据掌叶大黄化学成分与年-季-月多层次气候因子的相关性可知, 在测定的4种掌叶大黄化学成分中, 结合蒽醌类物质、游离蒽醌类物质和蒽酮类物质受气候影响比较大, 而多酚类物质对气候响应较弱。同时, 通过年-季-月多层次气候因子的研究体系可精准判断掌叶大黄各化学成分累积的关键时间窗口, 以及与气候间响应关系的动态变化。

结合蒽醌与年均气温呈正相关, 与年均降水呈负相关; 季度因子进一步显示结合蒽醌和最湿季平均温度为正相关, 与最冷月份最低温为强正相关, 与降水因子最湿月降雨量为负相关; 最终月均因子精准显示, 结合蒽醌在3-11月均与月均温显著正相关, 而与6-9月降水量显著负相关。蒽酮类与年均气温为强负相关, 与年均降水呈正相关; 季度因子进一步显示与最湿季平均温度和最冷月份最低温为强负相关, 与最干季平均温度为负相关; 最终月均因子精准显示, 蒽酮类物质与每月气温均呈强负相关, 而与6-9月降水量呈显著正相关。说明气温对蒽酮类物质形成的影响大于降水量的影响。可见多层次气候因子深度剖析了气候因子对化学成分累积的影响, 可准确研判出化学成分累积的关键时间窗口, 这有待于后续代谢组学的深入研究。

### 3.3 研究的局限性和未来展望

本研究结果表明, 药用植物中有些化学成分与生态环境息息相关, 这与肖小河等<sup>[35]</sup>提出有些道地药材是生态环境主导型相一致。药用植物品质空间变异的影响机制非常复杂<sup>[36,37]</sup>, 但本文没有涉及种质遗传、生态环境、人文等方面对掌叶大黄品质的影响, 而只是在药用植物品质空间变异的气候成因上提出新的研究思路和技术路线。后续将进行掌叶大黄在不同生长阶段的采样和化学成分进行测定, 同时通过代谢组学或者基因组学技术研究掌叶大黄在不同生长发育阶段的代谢物差异及生物合成的相关基因<sup>[36]</sup>, 为探究高品质药材的形成机制提供基础<sup>[38]</sup>。

### 参考文献:

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 一部[S]. 北京: 中国医药科技出版社, 2015: 248.
- [2] 李锋, 王胜春, 王新, 任秦有, 王文, 等. 大黄泻下效应的药

理学新解释[J]. 中国中药杂志, 2008, 33(4): 481-484.

Li F, Wang SC, Wang X, Ren QY, Wang W, et al. Novel exploration of cathartic pharmacology induced by rhubarb [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2008, 33(4): 481-484.

- [3] 杨滢. 大黄药效成分及其药理活性研究进展[J]. 中医临床研究, 2018, 10(5): 142-144.

Yang Y. A review on pharmacodynamic components and pharmacological activities of Dahuang[J]. *Clinical Journal of Chinese Medicine*, 2018, 10(5): 142-144.

- [4] 侯学煜. 中国植被地理[M]. 北京: 科学出版社, 1988.

- [5] Wang XM, Hou XQ, Zhang YQ, Li Y. Distribution pattern of genuine species of rhubarb as traditional Chinese medicine[J]. *Journal of Medicinal Plants Research*, 2010, 4(18): 2246-2253.

- [6] 商彤, 胡会娟, 孟磊, 丁一明, 李永杰, 等. 遗传和环境对唐古特大黄功效成分含量的影响研究[J]. 中国中药杂志, 2018, 43(11): 2246-2253.

Shang T, Hu HJ, Meng L, Ding YM, Li YJ, et al. Genotype, environment and their interactions of functional components in *Rheum tanguticum*[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2018, 43(11): 2246-2253.

- [7] 杨敏, 潘兴娇, 江静, 姚玉婷, 赵洋, 等. 不同产地栽培掌叶大黄中游离蒽醌、结合蒽醌和总蒽醌量的差异分析[J]. 大理大学学报, 2016, 1(10): 9-13.

Yang M, Pan XJ, Jiang J, Yao YT, Zhao Y, et al. Difference analysis of free anthraquinones, combined anthraquinones and total anthraquinones in cultivated *Rheum palmatum* L. in different producing areas[J]. *Journal of Dali University*, 2016, 1(10): 9-13.

- [8] 李磊, 孙平, 冯成强. 不同产地野生与栽培掌叶大黄中蒽醌类成分含量的比较[J]. 时珍国医国药, 2010, 21(9): 2251-2253.

Li L, Sun P, Feng CQ. Comparison of the contents of Anthraquinones between cultivated and wild *Rheum palmatum* [J]. *Lishizhen Medicine and Materia Medica Research*, 2010, 21(9): 2251-2253.

- [9] 冯素香, 王哲, 郝蕊, 张蕾, 李先贺, 等. HPLC法同时测定不同产地掌叶大黄中10个蒽醌类化合物[J]. 药物分析杂志, 2017, 37(5): 783-788.

Feng SX, Wang Z, Hao R, Zhang L, Li XH, et al. Simultaneous determination of ten anthraquinones in *Rheum palmatum* L. from different habitats by HPLC[J]. *Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis*, 2017, 37(5): 783-788.

- [10] 敬勇, 李敏, 齐景梁, 林秋霞, 杨昭武, 等. 大黄游离蒽醌含量与产地及生长年限的相关性研究[J]. 中药材, 2012, 35(10): 1568-1571.

- [11] 侯小琪. 掌叶大黄不同居群主要药用成分的变异及其与生长环境的相关性分析[D]. 西安: 陕西师范大学, 2012.



- [12] 张小波, 周涛, 郭兰萍, 黄璐琦, 江维克, 等. 苗药大果木姜子挥发油成分变化及其地理分布[J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5299–5306.
- Zhang XB, Zhou T, Guo LP, Huang LQ, Jiang WK, *et al.* Volatile oil contents correlate with geographical distribution patterns of the miao ethnic herb *Fructus cinnamomi*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5299–5306.
- [13] 孙晓, 钱秋玉, 郑司浩, 陈海梅, 黄林芳. 基于遗传-化学-生态特征的西洋参品质生态型研究[J]. 药学报, 2019, 54(9): 1695–1705.
- Sun X, Qian QY, Zheng SH, Chen HM, Huang LF. Quality ecotype of *Panax quinquefolium* L. based on heredity-chemistry-ecology characteristics[J]. *Acta Pharmaceutica Sinica*, 2019, 54(9): 1695–1705.
- [14] 卢晓. 土壤因子对中药材产区预测分析的影响研究[D]. 北京: 北京协和医学院, 2018.
- [15] 李琳. 基于化学-遗传-生态特征的中药材品质变异研究[D]. 北京: 北京协和医学院, 2018.
- [16] 郭杰, 张琴, 孙成忠, 文检, 谢彩香. 人参药材中人参皂苷的空间变异性及影响因子[J]. 植物生态学报, 2017, 41(9): 995–1002.
- Guo J, Zhang Q, Sun CZ, Wen J, Xie CX. Spatial variations of ginsenosides in *Panax ginseng* and their impact factors[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 41(9): 995–1002.
- [17] 李金花, 曾锐, 李文涛, 黄林芳. 秦艽品质与气候因子相关性分析[J]. 世界中医药, 2016, 11(5): 801–806.
- Li JH, Zeng R, Li WT, Huang LF. Correlation analysis between quality of *Gentiana macrophylla* Pall. and climatic factors[J]. *World Chinese Medicine*, 2016, 11(5): 801–806.
- [18] 李倩, 梁宗锁, 董娟娥, 付亮亮, 蒋传中. 丹参品质与主导气候因子的灰色关联度分析[J]. 生态学报, 2010, 30(10): 2569–2575.
- Li Q, Liang ZS, Dong JE, Fu LL, Jiang CZ. Grey correlation for main climatic factors and quality of Danshen (*Salvia miltiorrhiza* Bunge)[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(10): 2569–2575.
- [19] 贾光林, 黄林芳, 索风梅, 宋经元, 谢彩香, 等. 人参药材中人参皂苷与生态因子的相关性及人参生态区划[J]. 植物生态学报, 2012, 36(4): 302–312.
- Jia GL, Huang LF, Suo FM, Song JY, Xie CX, *et al.* Correlation between ginsenoside contents in *Panax ginseng* roots and ecological factors, and ecological division of ginseng plantation in China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(4): 302–312.
- [20] 黄林芳, 索风梅, 宋经元, 温美佳, 贾光林, 等. 中国产西洋参品质变异及生态型划分[J]. 药学报, 2013, 48(4): 580–589.
- Huang LF, Suo FM, Song JY, Wen MJ, Jia GL, *et al.* Quality variation and ecotype division of *Panax quinquefolium* in China[J]. *Acta Pharmaceutica Sinica*, 2013, 48(4): 580–589.
- [21] 谢彩香, 索风梅, 贾光林, 宋经元, 黄林芳, 等. 人参皂苷与生态因子的相关性[J]. 生态学报, 2011, 31(24): 7551–7563.
- Xie CX, Suo FM, Jia GL, Song JY, Huang LF, *et al.* Correlation between ecological factors and ginsenosides[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(24): 7551–7563.
- [22] 刘佳, 李莉, 胡会娟, 商彤, 孟磊, 等. 不同道地产区大黄功效组分含量的差异分析[J]. 中国现代中药, 2017, 19(5): 662–669.
- Liu J, Li L, Hu HJ, Shang T, Meng L, *et al.* Analysis on functional components content of *Radix et Rhizoma Rhei* in different geo-authentic habitat[J]. *Modern Chinese Medicine*, 2017, 19(5): 662–669.
- [23] 刘何春, 周国英, 聂秀青, 熊丰. 栽培唐古特大黄中多糖和蒽醌含量的动态变化研究[J]. 药物分析杂志, 2018, 38(5): 782–789.
- Liu HC, Zhou GY, Nie XQ, Xiong F. Dynamic change of polysaccharides and anthraquinones in cultivated *Rheum tanguticum*[J]. *Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis*, 2018, 38(5): 782–789.
- [24] 龚小红, 赵梦杰, 党珏, 罗林, 彦培傲, 等. 基于主成分分析不同产地大黄 13 个成分量的比较研究[J]. 中草药, 2017, 48(23): 4994–4999.
- Gong XH, Zhao MJ, Dang J, Luo L, Yan PA, *et al.* Comparison of contents of thirteen components in different origins of *Rhei Radix et Rhizoma* based on principal component analysis[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2017, 48(23): 4994–4999.
- [25] 黄凤, 尹显梅, 唐国琳, 连艳, 刘晓芬, 等. 基于 PCA 及 CA 的唐古特大黄蒽醌类、二蒽酮类及鞣质类含量研究[J]. 中国中药杂志, 2019, 44(5): 920–926.
- Huang F, Yin XM, Tang GL, Lian Y, Liu XF, *et al.* Research on contents of anthraquinones, dianthrone and tannins in *Rheum tanguticum* on PCA and CA[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2019, 44(5): 920–926.
- [26] 拱健婷, 李莉, 邹慧琴, 张金霞, 徐东, 等. 基于灰色关联分析和功效组分的大黄药材质量评价[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2018, 20(10): 1808–1815.
- Gong JT, Li L, Zou HQ, Zhang JX, Xu D, *et al.* Quality evaluation of *Radix et Rhizoma Rhei* based on gray correlational analysis and functional components[J]. *World Science and Technology/Modernization of Traditional Chinese Medicine and Materia Medica*, 2018, 20(10): 1808–1815.
- [27] 刘何春, 姚小波, 雷雪萍, 周国英, 聂秀青, 等. 切片厚度和烘干温度对唐古特大黄蒽醌含量影响的研究[J]. 天然产物

- 研究与开发, 2019, 31: 2098–2104.
- Liu HC, Yao XB, Lei XP, Zhou GY, Nie XQ, *et al.* Study on the effect of concentrations of anthraquinone derivatives detected in different thickness and drying temperature of the *Rheum tanguticum* Maxim. ex Balf[J]. *Natural Product Research and Development*, 2019, 31: 2098–2104.
- [28] Li P, Tian WX, Wang XY, Ma XF. Inhibitory effect of desoxyrhaponticin and rhaponticin, two natural stilbene glycosides from the Tibetan nutritional food *Rheum tanguticum* Maxim. ex Balt, on fatty acid synthase and human breast cancer cells[J]. *Food Funct*, 2014, 5(2): 251–256.
- [29] Zhao XH, Han F, Li YL, Yue HL, Zhao XH. Preparative isolation and purification of three stilbene glycosides from the tibetan medicinal plant *Rheum tanguticum* Maxim. Ex Balf. by high-speed counter-current chromatography[J]. *Phytochem Analysis*, 2013, 24(2): 171–175.
- [30] 李磊, 孙平, 冯成强. 气象因子对唐古特大黄蒽醌类成分含量的影响分析[J]. 中国药房, 2010, 21(43): 4105–4107.
- Li L, Sun P, Feng CQ. Effects of climate factors on the contents of anthraquinones in *Rheum tanguticum*[J]. *China Pharmacy*, 2010, 21(43): 4105–4107.
- [31] 黄凤, 蒋桂华. 大黄栽培研究进展[J]. 中药材, 2019, 42(1): 230–234.
- [32] 张峰. 唐古特大黄不同居群药用部位化学成分差异与环境因子的相关性分析[D]. 西安: 陕西师范大学, 2012.
- [33] 魏全嘉, 刘占厚, 张华, 陈湘宏, 徐达宇, 等. 青海不同生境大黄质量研究[J]. 中药材, 2007, 30(12): 1494–1497.
- Wei QJ, Liu ZH, Zhang H, Chen XH, Xu DY, *et al.* Study of quality on rhubarb from different habitats in Qinghai province[J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2007, 30(12): 1494–1497.
- [34] 李莉. 不同道地产区大黄资源现状与药材质量特征及其形成机制研究[D]. 长春: 长春中医药大学, 2014.
- [35] 肖小河, 陈士林, 黄璐琦, 肖培根. 中国道地药材研究 20 年概论[J]. 中国中药杂志, 2009, 34(5): 519–523.
- Xiao XH, Chen SL, Huang LQ, Xiao PG. Survey of investigation on Daodi Chinese medicinal materials in China since 1980s[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2009, 34(5): 519–523.
- [36] 李欢, 张娜, 李依民, 黑小斌, 李元敏, 等. 利用转录组测序挖掘掌叶大黄蒽醌类生物合成相关基因[J]. 药学报, 2018, 53(11): 1908–1917.
- Li H, Zhang N, Li YM, Hei XB, Li YM, *et al.* High-throughput transcriptomic sequencing of *Rheum palmatum* L. seedlings and elucidation of genes in anthraquinone biosynthesis[J]. *Acta Pharmaceutica Sinica*, 2018, 53(11): 1908–1917.
- [37] 鄢丹, 王伽伯, 李俊贤, 马丽娜, 肖小河. 论道地药材品质辨识及其与生态环境的相关性研究策略[J]. 中国中药杂志, 2012, 37(17): 2672–2675.
- Yan D, Wang JB, Li JX, Ma LN, Xiao XH. Strategy for research on quality identification and ecological environment-related of Dao-di herb[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2012, 37(17): 2672–2675.
- [38] 陈江, 王洁, 吴清华, 马云桐, 裴瑾. 原生质体及其在中药品质形成分子机制中的应用[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(19): 4555–4560.
- Chen J, Wang J, Wu QH, Ma YT, Pei J. Protoplast and its application in molecular mechanism of quality formation of traditional Chinese medicine[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2020, 45(19): 4555–4560.

(责任编辑: 周媛)