

## 锁阳有效成分含量的产地差异及对环境因子的响应规律

张锐<sup>1</sup>, 顾志荣<sup>2\*</sup>, 郭燕<sup>1</sup>, 祁梅<sup>2</sup>, 吕鑫<sup>1</sup>, 毛小文<sup>1</sup>, 葛斌<sup>1,2\*</sup>

(1. 甘肃中医药大学药学院, 兰州 730000; 2. 甘肃省人民医院, 兰州 730000)

**[摘要]** 目的:探讨锁阳中没食子酸、原儿茶酸、儿茶素、总黄酮、总多糖等有效成分的产地差异及有效成分与环境因子的相关性。方法:采集甘肃、内蒙古、新疆、青海、宁夏5个省(自治区)的12个市(地区/州/旗)主产区的95批锁阳样本,记录海拔、经纬度、气候类型、年平均无霜期、年降雨量、全年日照时数、年平均气温、年平均蒸发量等地理-气候因子,采用高效液相色谱法(HPLC)测定锁阳中没食子酸、原儿茶酸、儿茶素等3种主要成分含量,优化并建立化学成分含量与各环境因子的相关性数学模型。结果:皮尔逊(Pearson)相关性分析表明,锁阳中原儿茶酸含量随年平均无霜期和年平均气温升高而增加,儿茶素含量随年平均无霜期、全年日照时数和年平均蒸发量升高而增加,总多糖含量随海拔升高而降低。冗余分析(RDA)结果表明,年平均无霜期、年平均蒸发量、全年日照时数及海拔对锁阳有效成分含量的影响较大。曲线拟合表明,锁阳的最佳生长海拔800~2 000 m,最佳年平均无霜期80~110 d,最佳年降雨量110~300 mm,最佳全年日照时数2 400~3 000 h,最佳年平均气温2.2~8.8 °C,最佳年平均蒸发量1 700~2 500 mm。结论:锁阳有效成分含量具有显著的产地差异,对环境因子具有明确的响应规律,其适宜生长及栽培引种的地区为海拔高、年平均无霜期短、年降雨量少、平均蒸发量大、全年日照时数长、年平均气温低的区域。

**[关键词]** 锁阳;有效成分;产地;地理因子;气候因子;相关性

**[中图分类号]** R284.2;R289;R22;R2-031;R33 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-9903(2022)07-0142-09

**[doi]** 10.13422/j.cnki.syfjx.20220512

**[网络出版地址]** <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3495.R.20220209.1509.007.html>

**[网络出版日期]** 2022-02-09 15:59

### Content Difference of Effective Components of Cynomorii Herba Between Different Producing Areas and Its Response to Environmental Factors

ZHANG Rui<sup>1</sup>, GU Zhi-rong<sup>2\*</sup>, GUO Yan<sup>1</sup>, QI Mei<sup>2</sup>, LYU Xin<sup>1</sup>, MAO Xiao-wen<sup>1</sup>, GE Bin<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Pharmacy, Gansu University of Chinese Medicine, Lanzhou 730000, China;  
2. Gansu Provincial People's Hospital, Lanzhou 730000, China)

**[Abstract]** **Objective:** To explore the content difference of gallic acid, protocatechuic acid, catechin, total flavonoids, and total polysaccharides in Cynomorii Herba between different producing areas and the correlation between effective components and environmental factors. **Method:** Ninety-five batches of Cynomorii Herba samples were collected from 12 major producing areas in five provinces (autonomous regions), including Gansu, Inner Mongolia, Xinjiang, Qinghai, and Ningxia, and the geographical-climatic factors such as altitude, longitude and latitude, climate type, annual average frost-free period, annual rainfall, annual sunshine hours, annual average temperature, and annual average evaporation were recorded. The content

**[收稿日期]** 2021-11-19

**[基金项目]** 甘肃省青年科技基金计划项目(21JR7RA634);甘肃省自然科学基金项目(20JR5RA154);甘肃省人民医院青年项目(20GSSY4-29);“白求恩·求索-药学科能力建设”项目(B-19-H-20200622);甘肃省中药质量与标准研究重点实验室基金项目(ZYZL18-004);甘肃省中药药理与毒理学重点实验室基金项目(ZDSYS-KJ-2018-010)

**[第一作者]** 张锐,在读硕士,从事中药制药工艺研究,E-mail:zrr082300@163.com

**[通信作者]** \*顾志荣,硕士,主管药师,从事中药化学与中药药理学研究,Tel:0931-8281933,E-mail:guzr8817@163.com;

\*葛斌,主任药师,从事中药制剂工艺与质量控制研究,Tel:0931-8281345,E-mail:gjy0630@163.com

of gallic acid, protocatechuic acid, and catechin in *Cynomorii Herba* was determined by high-performance liquid chromatography (HPLC), and the mathematical model of the correlation between the content of chemical components and environmental factors was optimized and established. **Result:** Pearson correlation analysis showed that protocatechuic acid content in *Cynomorii Herba* increased with the increase in annual average frost-free period and annual average temperature, and catechin content increased with the increase in the annual average frost-free period, annual sunshine hours, and annual average evaporation, while total polysaccharides content decreased with the increase in altitude. Redundancy analysis (RDA) showed that the annual average frost-free period, annual average evaporation, annual sunshine hours, and altitude had great influences on the content of effective components in *Cynomorii Herba*. Curve fitting showed that the optimal conditions for the growth of *Cynomorii Herba* were as follows: altitude of 800-2 000 m, annual average frost-free period of 80-110 d, annual rainfall of 110-300 mm, annual sunshine hours of 2 400-3 000 h, annual average temperature of 2.2-8.8 °C, and annual average evaporation of 1 700-2 500 mm. **Conclusion:** The content of effective components in *Cynomorii Herba* is diverse in terms of producing areas and shows a clear response rule to environmental factors. The areas suitable for growing and artificial cultivation introduction are those with high altitude, short annual average frost-free period, low annual rainfall, large average evaporation, long sunshine hours, and low annual average temperature.

**[Keywords]** *Cynomorii Herba*; effective components; producing area; geographical factors; climatic factors; correlation

锁阳主要分布在内蒙古、甘肃、新疆、青海等地的沙漠和半沙漠地带<sup>[1-2]</sup>,如浑善达克沙地西部、毛乌素沙地西部、河西走廊沙地、腾格里沙漠等地<sup>[3]</sup>。锁阳具有补肾阳、益精血、润肠通便的功能,是中医、藏族医及蒙古族医的常用药材。锁阳含黄酮、三萜、多糖、有机酸、鞣质等多类的化学成分<sup>[4-5]</sup>,具有改善性功能、防止心血管疾病、抗氧化、清除自由基等多种药理作用<sup>[6-7]</sup>。近年来,以锁阳为原料的功能保健食品引起了人们的广泛关注与喜爱,如锁阳油饼、锁阳多糖咀嚼片、锁阳酒等<sup>[8]</sup>。

中药药性与功效的发挥是通过药材得以体现的,而药材品质的形成受到外部环境的影响,包括生长温度、湿度、降水、风、地形、土壤、微生物等诸多因素<sup>[9]</sup>。中药材的产地适宜性研究、道地性与环境因子相关性研究,是近年来中药研究的热点。目前关于中药有效成分积累与产地环境因子的研究多局限于某一个环境因子或小范围的模拟实验,未能系统、定量或半定量分析各环境因子对药材有效成分含量的影响。本实验系统研究锁阳有效成分含量的产地差异及对环境因子的相关性,尝试建立并优化了锁阳中多种化学成分含量与环境因子的定量相关数学模型,以期更为精确地揭示锁阳化学成分与环境因子的一般响应规律,为锁阳的植物生理生化研究、道地区划及人工引种栽培等提供参考资料。

## 1 材料

锁阳样本95批,采集于甘肃、内蒙古、新疆、青海、宁夏5个省(自治区)的12个市(地区/州/旗),包括武威、酒泉、敦煌、张掖、阿拉善右旗、阿拉善左旗、喀什、和田、阿勒泰、海西、海南及石嘴山。所有样品均经甘肃中医药大学中药鉴定教研室李硕副教授鉴定为锁阳科多年生肉质寄生草本植物锁阳 *Cynomorium songaricum* 的干燥肉质茎。将样品晒至完全干透,粉碎至过80目筛,冷藏备用。气候因子数据来源为国家气象信息中心的中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),海拔、经纬度等地理因子数据为采挖药材时以GPS实时定位并记录。见表1。

对照品D-无水葡萄糖、芦丁、没食子酸、原儿茶酸、儿茶素(成都克洛玛生物科技有限公司,批号分别为CHB180115、CHB170303、CHB171107、CHB170822、CHB170313,纯度均≥98%);甲醇、甲酸(色谱纯,天津大茂化学试剂厂);其他试剂均为分析纯;水为纯化水。

LC-16型高效液相色谱仪(岛津仪器有限公司,配置SIL-16型自动进样器、SPD-16型紫外-可见检测器、CTO-16型柱温箱、Lab Solutions化学工作站),UV8100A型紫外-可见分光光度计(北京莱伯泰科仪器公司),AL204型1/1万电子天平(瑞士梅特勒-托利多公司),SB25-12DTD型超声波清洗机(宁波新芝生物科技公司),HH-6型数显恒温水浴锅

表1 锁阳样品信息

Table 1 Sample information of *Cynomorii Herba*

采样地	海拔/m	经度	纬度	气候类型
甘肃	964~3 154	E94°0'0.89"~E103°8'12.27"	N38°32'57.83"~N41°4'22.01"	温带大陆性气候、温带大陆性荒漠气候、大陆性暖温带极干旱气候、暖温带干旱性气候
内蒙古	789~1 541	E104°5'15.32"~E104°13'9.20"	N40°9'13.37"~N41°13'9.20"	中温带大陆性气候、温带大陆性气候
宁夏	1 103~1 247	E106°41'19.17"~E106°41'35.66"	N38°48'40.92"~N38°49'34.62"	温带大陆性气候
新疆	813~3 436	E75°51'25.45"~E88°15'9.54"	N36°17'52.87"~N48°0'46.42"	暖温带大陆性干旱气候、温带大陆性气候、温带极端干旱荒漠气候
青海	2 815~3 266	E97°8'22.37"~E100°37'8.61"	N35°15'44.68"~N37°20'59.36"	高原大陆性气候区、荒漠、半荒漠大陆性气候

采样地	年平均无霜期/d	年降雨量/mm	全年日照时数/h	年平均气温/°C	年平均蒸发量/mm
甘肃	80~190	39.9~300	2 400~3 360	2~10	1 749.4~3 140.6
内蒙古	150	75~90	2 880~3 100	7.2~8.4	3 050~3 100
宁夏	159	173.2	3 008.6	8.8	1 756.4
新疆	151~220	50~199	2 735~2 923.7	4.5~12	1 769~2 537.8
青海	无绝对无霜期	41.5~440	2 655~3 358	0.5~4	1 452~3 000

注:甘肃样品1~43,内蒙古样品44~59,宁夏样品60~64,新疆样品65~86,青海样品87~95

(西安超杰仪器公司),DZF-6090型真空干燥箱(上海一恒公司),DD-5M型低速大容量离心机(湘仪离心机仪器公司)。

## 2 方法

### 2.1 3种有效成分测定<sup>[10]</sup>

**2.1.1 混合对照品溶液制备** 分别精密称取没食子酸、原儿茶酸、儿茶素对照品适量,以纯化水超声使完全溶解,制成没食子酸、原儿茶酸、儿茶素质量浓度分别为0.11、0.01、0.40 g·L<sup>-1</sup>的混合对照品溶液,于4℃保存备用。

**2.1.2 供试品溶液制备** 取锁阳粉末约2.0 g,精密加入纯化水10 mL,称定质量,超声(功率500 W,频率40 kHz)提取60 min,放冷,再称定质量,补足减失的质量,4 000 r·min<sup>-1</sup>离心(r=10 cm,下同),上清液经0.45 μm微孔滤膜滤过,取续滤液,即得<sup>[11]</sup>。

**2.1.3 色谱条件** WondaSil C<sub>18</sub>-WR色谱柱(4.6 mm×150 mm,5 μm),流动相为甲醇-0.1%甲酸水溶液(9:91),体积流量0.8 mL·min<sup>-1</sup>,柱温30℃,检测波长258 nm,进样体积10 μL。色谱图见增强出版附加材料。

**2.1.4 样品测定** 按2.1.2项下方法制备样品溶液,按2.1.3项下色谱条件测定各样品中3种成分含量。

### 2.2 粗多糖含量测定<sup>[12]</sup>

**2.2.1 对照品溶液制备** 精密称取D-无水葡萄糖对照品5.0 mg,置于50 mL量瓶中,加纯化水溶解并定容至刻度,摇匀,得到每1 mL含D-无水葡萄糖0.1 mg的对照品溶液,于4℃保存备用。

**2.2.2 供试品溶液制备** 精密称取锁阳干燥粉末2 g,以三氯甲烷脱脂2次,每次1 h;药渣挥干溶剂后,以80%乙醇回流提取2次,每次2 h;药渣挥干溶剂,加入纯化水30 mL,煎煮2次,每次1.5 h;合并2次滤液,浓缩至20 mL,置锥形瓶中,加入无水乙醇,边加边搅拌,使乙醇体积分数达80%,静置过夜;于4 000 r·min<sup>-1</sup>离心10 min,残渣用热水溶解,以三氯甲烷-正丁醇(5:1)除蛋白,4 000 r·min<sup>-1</sup>离心10 min;上清液加入无水乙醇,边加边搅拌,使乙醇体积分数达80%,静置过夜,于4 000 r·min<sup>-1</sup>离心10 min,残渣用热水溶解,置于250 mL量瓶中,以纯化水定容,于4℃保存备用<sup>[13]</sup>。

**2.2.3 检测波长的选择** 精密吸取对照品与供试品溶液各1 mL,分别置于2个20 mL具塞试管中,加入5%苯酚溶液1 mL,混匀,再精密加入浓硫酸5 mL,迅速放入沸水浴中加热15 min,迅速取出后于冰水混合液中冷却5 min,停止反应。另精密吸取纯化水1 mL于20 mL具塞试管中,同法制备得空白对照溶液。分别在200~800 nm进行全波长扫描,结果D-无水葡萄糖对照品溶液和供试品溶液均在486 nm处有最大吸收。

**2.2.4 样品测定** 按2.2.1项下方法制备样品溶液,按2.2.2项下方法测定。

### 2.3 总黄酮含量测定<sup>[12]</sup>

**2.3.1 对照品溶液制备** 精密称取芦丁对照品10 mg,置于50 mL量瓶中,加60%乙醇完全溶解并定容至刻度,摇匀,得到每1 mL含芦丁0.2 mg的对

照品溶液,于4℃保存备用。

**2.3.2 供试品溶液制备** 精密称取锁阳干燥粉末2 g,加入60%乙醇30 mL,回流提取3 h,离心10 min (4 000 r·min<sup>-1</sup>, r=10 cm),取上清液,定容于500 mL量瓶中,于4℃保存备用。

**2.3.3 检测波长的选择** 精密吸取对照品与供试品溶液各1 mL,分别置于2个25 mL量瓶中,加纯化水至9 mL,加入5%亚硝酸钠(NaNO<sub>2</sub>)溶液1 mL,混匀,放置6 min,加入10%硝酸铝[Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>]溶液1 mL,混匀,放置6 min,加入10%氢氧化钠(NaOH)溶液10 mL,混匀,放置15 min。另精密吸取1 mL纯化水于25 mL量瓶中,同法制备得空白对照溶液,在波长200~800 nm进行全波长扫描,两者均在510 nm处有最大吸收<sup>[14]</sup>。

**2.3.4 样品测定** 按2.3.2项下方法制备样品溶液,按2.3.3项下方法测定。

### 3 结果

**3.1 含量测定结果** 锁阳中没食子酸、原儿茶酸、

儿茶素、总黄酮、粗多糖的质量分数分别在0.031 3~7.031 6、0.025 5~0.396 3、0.003 5~0.793 4、2.530 9~19.365 0、19.540 2~154.432 8 mg·g<sup>-1</sup>。

**3.2 锁阳有效成分含量的产地差异比较** 以市级产区对锁阳有效成分含量进行比较,结果见表2。不同市级产区锁阳中没食子酸含量存在差异,其中没食子酸含量由高到低依次为内蒙古阿拉善左旗、新疆和田、甘肃张掖、敦煌(P<0.05),其他产区较低且差异无统计学意义。新疆喀什锁阳中原儿茶酸含量最高,与甘肃敦煌和新疆和田差异无统计学意义外,与其他产区均有统计学意义(P<0.05),内蒙古阿拉善左旗和青海海西州两产区含量较低。内蒙古阿拉善左旗和甘肃武威锁阳中儿茶素含量较高,其次是甘肃敦煌、张掖和酒泉,新疆阿勒泰、青海海西州、新疆喀什和宁夏石嘴山较低且该4个市级产区之间差异无统计学意义。甘肃武威锁阳中总黄酮含量最高,其他产区含量较低。甘肃酒泉锁阳中总多糖的含量最高(P<0.05),其他产区较低且差异无统计学意义。

表2 不同市级产区锁阳有效成分含量比较( $\bar{x}\pm s$ )

市(地区/州/旗)	编号	没食子酸	原儿茶酸	儿茶素	总黄酮	总多糖
张掖	1~8	1.319 5±1.039 7 <sup>bc</sup>	0.126 5±0.078 2 <sup>bcd</sup>	0.282 3±0.147 4 <sup>ab</sup>	7.300 6±1.311 2 <sup>bcd</sup>	69.194 5±21.991 4 <sup>ab</sup>
酒泉	9~29	0.828 0±0.717 2 <sup>c</sup>	0.147 3±0.085 3 <sup>bcd</sup>	0.272 5±0.177 3 <sup>ab</sup>	9.737 1±4.338 1 <sup>abcd</sup>	75.680 9±33.506 9 <sup>a</sup>
敦煌	30~36	1.094 0±0.315 4 <sup>bc</sup>	0.174 4±0.121 9 <sup>ab</sup>	0.323 3±0.091 3 <sup>ab</sup>	10.390 4±4.104 7 <sup>abc</sup>	66.872 8±22.437 8 <sup>ab</sup>
武威	37~43	0.617 6±0.410 4 <sup>c</sup>	0.100 7±0.062 2 <sup>bcd</sup>	0.409 7±0.180 3 <sup>a</sup>	12.077 5±3.865 5 <sup>a</sup>	51.857 0±24.262 5 <sup>ab</sup>
阿拉善左旗	44~53	2.151 6±1.248 3 <sup>ab</sup>	0.060 2±0.017 7 <sup>d</sup>	0.437 5±0.080 1 <sup>a</sup>	11.244 5±1.479 7 <sup>ab</sup>	50.883 4±18.300 2 <sup>ab</sup>
阿拉善右旗	54~59	0.749 9±0.190 7 <sup>c</sup>	0.071 5±0.006 3 <sup>cd</sup>	0.204 7±0.020 6 <sup>bc</sup>	8.560 9±0.566 5 <sup>abcd</sup>	54.929 4±28.468 5 <sup>ab</sup>
石嘴山	60~64	0.385 2±0.159 2 <sup>c</sup>	0.143 8±0.056 7 <sup>bcd</sup>	0.066 3±0.069 5 <sup>c</sup>	5.808 3±2.816 2 <sup>b</sup>	47.207 8±22.764 3 <sup>ab</sup>
喀什	65~69	0.749 9±0.472 1 <sup>c</sup>	0.256 3±0.072 8 <sup>a</sup>	0.068 1±0.020 4 <sup>c</sup>	7.339 7±1.148 8 <sup>bcd</sup>	63.285 9±29.238 4 <sup>ab</sup>
阿勒泰	70~78	0.773 6±0.436 0 <sup>c</sup>	0.144 8±0.093 2 <sup>bcd</sup>	0.078 3±0.036 0 <sup>c</sup>	6.870 6±2.346 1 <sup>cd</sup>	63.509 0±17.359 5 <sup>ab</sup>
和田	79~86	2.648 2±2.271 6 <sup>a</sup>	0.159 5±0.039 7 <sup>abc</sup>	0.158 9±0.038 9 <sup>bc</sup>	8.648 6±3.889 2 <sup>abcd</sup>	43.407 1±10.939 1 <sup>ab</sup>
海南藏族自治州	87~91	0.513 4±0.135 4 <sup>c</sup>	0.076 7±0.008 6 <sup>bcd</sup>	0.200 8±0.055 3 <sup>bc</sup>	9.535 4±1.213 4 <sup>abcd</sup>	59.214 2±26.495 3 <sup>ab</sup>
海西蒙古族藏族自治州	92~95	0.474 6±0.494 7 <sup>c</sup>	0.053 3±0.033 6 <sup>d</sup>	0.077 3±0.102 5 <sup>c</sup>	6.340 4±3.129 0 <sup>cd</sup>	35.471 0±7.625 9 <sup>b</sup>

注:同列中不同的小写字母表示差异有统计学意义(P<0.05)

**3.3 锁阳有效成分含量与环境因子的Pearson相关性** 对锁阳中各有效成分含量分别与各环境因子进行Pearson相关性分析<sup>[15]</sup>,结果见表3。可见,总多糖含量与海拔呈显著负相关(P<0.05),即海拔低的产区锁阳总多糖含量较高;原儿茶酸、儿茶素含量与年平均无霜期呈极显著正相关(P<0.01),即年平均无霜期长的产区锁阳原儿茶酸、儿茶素含量较高;儿茶素含量与全年日照时数呈显著正相关(P<

0.05),即全年日照时数长的产区锁阳儿茶素含量较高;原儿茶酸含量与年平均气温呈极显著正相关(P<0.01),即年平均气温高的产区锁阳原儿茶酸含量较高;儿茶素含量与年平均蒸发量呈极显著正相关(P<0.01),即年平均蒸发量大的产区锁阳儿茶素含量较高。锁阳中原儿茶酸含量随年平均无霜期和年平均气温升高而增加,锁阳中儿茶素含量随年平均无霜期、全年日照时数和年平均蒸发量升高而

增加,锁阳中总多糖含量随海拔升高而降低。

表3 锁阳有效成分含量与环境因子的Pearson相关性分析

Table 3 Correlation analysis between content of effective components in *Cynomorii Herba* and environmental factors

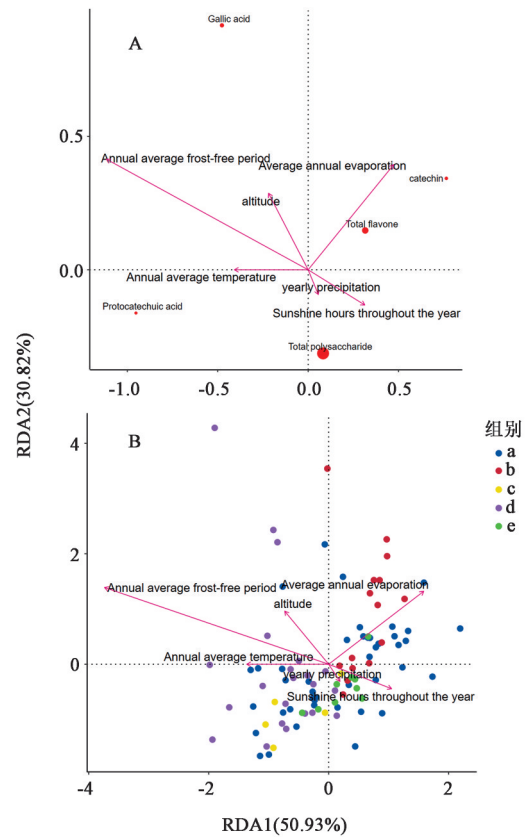
指标	没食子酸	原儿茶酸	儿茶素	总黄酮	总多糖
海拔	0.197	-0.067	-0.085	-0.037	-0.255 <sup>1)</sup>
年平均无霜期	0.210	0.313 <sup>2)</sup>	0.458 <sup>2)</sup>	-0.200	-0.089
年降雨量	-0.103	-0.124	-0.121	-0.097	0.029
全年日照时数	-0.158	-0.012	0.220 <sup>1)</sup>	0.174	0.102
年平均气温	0.041	0.353 <sup>2)</sup>	-0.073	-0.008	0.113
年平均蒸发量	0.155	-0.150	0.351 <sup>2)</sup>	0.163	0.021 0

注:水平相关性<sup>1)</sup> $P < 0.05$ ,<sup>2)</sup> $P < 0.01$

**3.4 锁阳有效成分含量与环境因子的冗余分析(RDA)** 当数据指标较多时,降低数据维数有助于在低维进行观察和分析,有利于更直接了解数据之间的关系,RDA是常用的对多指标进行降维的分析方法<sup>[16]</sup>。本实验对锁阳有效成分含量与环境因子的关系进行RAD,环境因子用箭头表示,箭头越长表示相关性越大;环境因子之间的夹角为锐角时表示正相关,钝角时为负相关;每个点代表一个有效成分,点的大小代表有效成分含量的高低, $P$ 值表示总模型的显著性。RDA结果表明,第一和第二排序轴累计解释率分别为50.93%和30.82%,RDA前两个排序轴保留了锁阳有效成分含量数据总方差的81.75%,见图1。结果表明,年平均无霜期、年平均蒸发量、全年日照时数及海拔对锁阳有效成分含量的影响较大,儿茶素、没食子酸、原儿茶酸、总黄酮和总多糖与海拔的夹角较小且方向一致,均呈正相关;儿茶素、没食子酸、总黄酮与年平均蒸发量的夹角较小且方向一致,均呈正相关;总黄酮、总多糖与全年日照时数夹角的较小且方向一致,均呈正相关;儿茶素、没食子酸、原儿茶酸和总黄酮与年降雨量夹角的较大且方向相反,均呈负相关关系;儿茶素、没食子酸、总黄酮和总多糖与年平均气温的夹角较大且方向相反,均呈负相关;儿茶素、总黄酮和总多糖与年平均无霜期的夹角较大且方向相反,均呈负相关。总结可知,锁阳适宜在海拔高、年平均无霜期短、年降雨量少、平均蒸发量大、全年日照时数长、年平均气温低的区域生长及栽培引种。

**3.5 锁阳有效成分含量对环境因子响应数学模型**

通过曲线拟合建立锁阳有效成分含量与环境因子响应的数学模型,得到各关系模型的相关系数( $R$ )及标准差( $S$ )。其中相关系数 $R > 0.3$ 的模型拟合



注: Annual average frost-free period. 年平均无霜期; Average annual evaporation. 年平均蒸发量; Altitude. 海拔; Annual average temperature. 年平均气温; Yearly precipitation. 年降雨量; Sunshine hours throughout the year. 全年日照时数; Catechin. 儿茶素; Gallic acid. 没食子酸; Protocatechuic acid. 原儿茶酸; Total flavone. 总黄酮; Total Polysaccharide. 总多糖; a. 甘肃; b. 内蒙古; c. 宁夏; d. 新疆; e. 青海

图1 锁阳有效成分含量与环境因子的RDA

Fig. 1 RDA of environmental factors on content of effective components in *Cynomorii Herba*

度较好,具有科学意义,可较为准确地预测出锁阳有效成分含量与环境因子的一般响应规律。各关系模型及评价指标见表4。

**3.5.1 锁阳有效成分含量对海拔响应的数学模型**

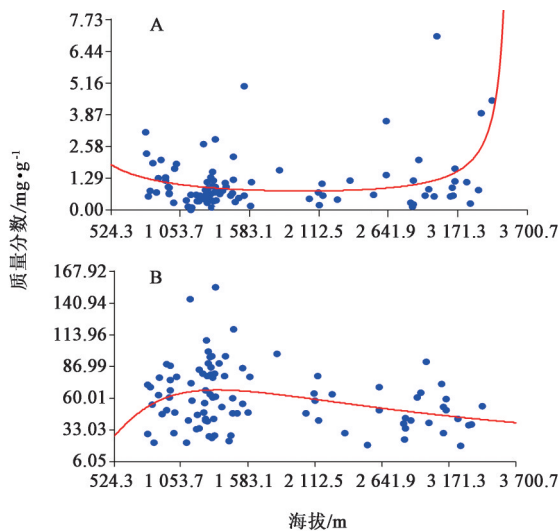
95批锁阳样本中没食子酸和总多糖含量随海拔的分布及曲线拟合结果见图2。对 $Y_1$ 模型表达式求导可知,以 $X=1999\text{ m}$ 为节点,当 $X$ 在 $789\sim 1999\text{ m}$ 时,锁阳中没食子酸含量随海拔升高而降低,直到达到理论最低值 $0.7820\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ;当 $X > 1999\text{ m}$ 时,没食子酸含量随海拔升高而增加。对 $Y_2$ 模型表达式求导可知,当海拔 $X$ 在 $789\sim 1341\text{ m}$ 时,总多糖含量随海拔的升高而增加,当 $X=1341\text{ m}$ 时,锁阳中总多糖含量达到理论最大值 $67.1963\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ;当 $X > 1341\text{ m}$ 时,总多糖含量随海拔升高而逐渐降低。综合分析

表4 锁阳有效成分含量与环境因子的关系模型及评价

Table 4 Relationship model and evaluation between content of effective components in Cynomorii Herba and environmental factors

关系模型	模型表达式	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>R</i>	<i>S</i>
海拔-没食子酸	$Y_1=(a+bx)/(1+cx+dx^2)$	$6.84 \times 10^3$	$-7.03 \times 10^{-1}$	7.85	$-2.19 \times 10^{-3}$	0.357 4	1.050 2
海拔-总多糖	$Y_2=e^{a+\frac{b}{x}+c \ln x}$	$1.58 \times 10$	$-1.89 \times 10^3$	-1.41		0.311 3	25.141 1
年平均无霜期-儿茶素	$Y_3=a+b \cos (cx+d)$	$2.52 \times 10^{-1}$	$1.57 \times 10^{-1}$	$3.37 \times 10^{-2}$	-3.43	0.483 9	0.149 5
年平均无霜期-没食子酸	$Y_4=a+bx+cx^2+dx^3$	$-2.17 \times 10$	$5.33 \times 10^{-1}$	$-3.87 \times 10^{-3}$	$8.83 \times 10^{-6}$	0.410 4	1.059 3
年平均无霜期-原儿茶酸	$Y_5=a+bx+cx^2+dx^3$	$2.05 \times 10^{-1}$	$-2.61 \times 10^{-3}$	$1.92 \times 10^{-5}$	$-3.47 \times 10^{-8}$	0.326 2	0.080 9
年平均气温-儿茶素	$Y_6=1/(a+b \ln x)$	-1.07	4.30			0.906 0	0.223 7
年平均气温-没食子酸	$Y_7=(a+bx)/(1+cx+dx^2)$	$2.73 \times 10^{-1}$	$-1.83 \times 10^{-2}$	$-2.61 \times 10^{-1}$	$1.81 \times 10^{-2}$	0.384 5	1.038 0
年平均气温-原儿茶酸	$Y_8=a+bx+cx^2+dx^3$	$8.44 \times 10^{-2}$	$1.56 \times 10^{-2}$	$-4.12 \times 10^{-3}$	$3.41 \times 10^{-4}$	0.464 1	0.074 5
年平均蒸发量-儿茶素	$Y_9=a+bx+cx^2+dx^3$	3.72	$-5.14 \times 10^{-3}$	$2.35 \times 10^{-6}$	$-3.39 \times 10^{-10}$	0.418 5	0.152 2
年平均蒸发量-原儿茶酸	$Y_{10}=a+bx+cx^2+dx^3$	-2.34	$3.18 \times 10^{-3}$	$-1.29 \times 10^{-6}$	$1.69 \times 10^{-10}$	0.372 2	0.078 1
全年日照时数-儿茶素	$Y_{11}=1/(a+b \ln x)$	$-3.48 \times 10^2$	$4.45 \times 10^1$			0.916 4	0.224 8
全年日照时数-总黄酮	$Y_{12}=a+b \cos (cx+d)$	8.89	$1.81 \times 10^0$	$9.81 \times 10^{-3}$	$-2.48 \times 10$	0.348 9	3.294 8

可知,从化学成分含量考虑,锁阳的最佳生长及栽培引种海拔宜在800~2 000 m。



注:A. 没食子酸;B. 总多糖

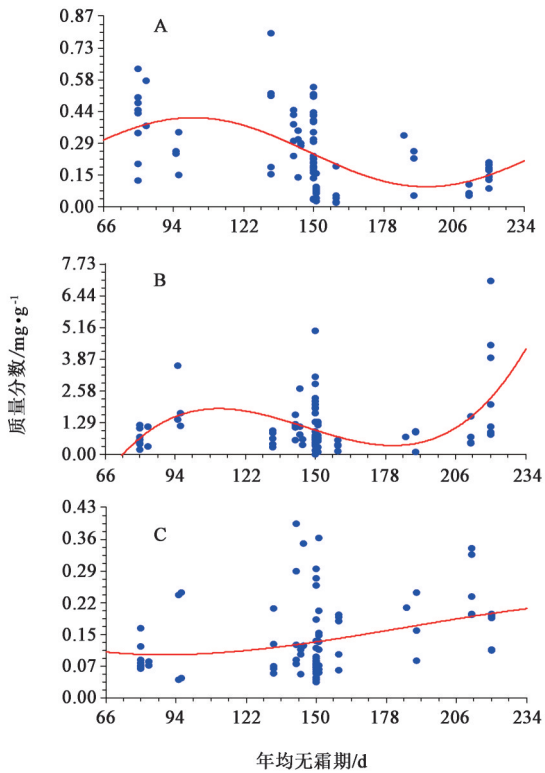
图2 锁阳有效成分含量随海拔的分布及曲线拟合

Fig. 2 Distribution of effective components in Cynomorii Herba with altitude and curve fitting results

**3.5.2 锁阳有效成分含量对年平均无霜期响应的数学模型** 95批锁阳样本中儿茶素、没食子酸及原儿茶酸含量随年平均无霜期(*X*)的分布及曲线拟合结果见图3。可知, $Y_3$ 是周期函数,且周期为186。对 $Y_3$ 模型表达式求导可知,当 $X=102$  d时为极大值点,其 $Y_{3极大}=0.408 9 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $X=195$  d时为极小值点,其 $Y_{3极小}=0.094 5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。当 $X$ 在80~102 d时,锁阳中儿茶素含量随年平均无霜期增加而逐渐增加;当 $X$ 在102~195 d时,儿茶素含量随年平均无霜期增加

而降低;当 $X>195$  d时,儿茶素含量随年平均无霜期增加而逐渐增加。 $Y_4$ 模型表达式求导可知, $Y_4$ 曲线存在2个极值点,当 $X=111$  d, $Y_{4极大}=1.868 0 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;当 $X=181$  d时, $Y_{4极小}=0.375 9 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。以2个极值点为节点,当年平均无霜期 $X$ 在80~111 d时,锁阳中没食子酸含量随年平均无霜期增加而逐渐增加;当 $X$ 在111~181 d时,没食子酸含量随年平均无霜期增加而减小;当 $X>181$  d时,没食子酸含量随年平均无霜期增加而增加。对 $Y_5$ 模型表达式求导可知,当 $X=89$  d时为极小值点,其 $Y_{5极小}=0.101 0 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。当 $X$ 在80~89 d时,锁阳中原儿茶酸含量随年平均无霜期增加而降低;当 $X>89$  d时,原儿茶酸含量随年平均无霜期增加而逐渐增加。综合分析可知,从化学成分含量考虑,锁阳的最佳生长及栽培引种年平均无霜期宜在80~110 d。

**3.5.3 锁阳有效成分含量对年平均气温响应的数学模型** 95批锁阳样本中儿茶素、没食子酸、原儿茶酸、总多糖及总黄酮含量随年平均气温( $X$ )的分布及曲线拟合结果见图4。在本实验研究的年平均气温 $X$ 在0.5~12 °C时, $Y_6$ 的模型表达式为单调递减函数,即锁阳中儿茶素含量随年平均气温升高而减少,且 $X$ 在4 °C以后减少幅度较小。 $Y_7$ 模型表达,以 $X=6.9$  °C为节点,当 $X$ 在0.5~6.9 °C时,锁阳中没食子酸含量随年平均气温升高而增加,直到达到理论最大值 $2.245 0 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;当 $X>6.9$  °C时,没食子酸含量随年平均气温升高而减少。对 $Y_8$ 模型表达式求导可知, $Y_8$ 曲线存在两个极值点,当 $X=3$  °C时, $Y_{8极大}=0.103 0 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;当 $X=4$  °C时, $Y_{8极小}=0.102 8 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。



注:A. 儿茶素;B. 没食子酸;C. 原儿茶酸(图4同)  
图3 锁阳有效成分含量随年平均无霜期的分布及曲线拟合  
Fig. 3 Distribution of effective components in *Cynomorii Herba* with annual average frost-free period and curve fitting results

以2个极值点为节点,当年平均气温 $X$ 在 $0.5\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,锁阳中原儿茶酸含量随年平均气温升高而逐渐增加,但增加幅度较小;当 $X$ 在 $3\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,原儿茶酸含量随年平均气温升高而逐渐减小;当 $X>4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,原儿茶酸含量随年平均气温升高而增加,且增加幅度较大。从化学成分含量考虑,锁阳的最佳生长及栽培引种年平均气温宜在 $2.2\sim 8.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

**3.5.4 锁阳有效成分含量对年平均蒸发量响应的数学模型** 95批锁阳样本中儿茶素和原儿茶酸含量随年平均蒸发量( $X$ )的分布及曲线拟合结果见图5。 $Y_9$ 模型表达式存在两个极值点,当 $X=177.8\text{ mm}$ 时, $Y_{9\text{极小}}=0.1055\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ;当 $X=2837\text{ mm}$ 时, $Y_{9\text{极大}}=0.3071\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。以两个极值点为节点,当年平均蒸发量 $X$ 在 $1452\sim 1778\text{ mm}$ 时,锁阳中儿茶素含量随年平均蒸发量增加而减少;当 $X$ 在 $1778\sim 2837\text{ mm}$ 时,儿茶素含量随年平均蒸发量增加而增大;当 $X>2837\text{ mm}$ 时,儿茶素含量随年平均蒸发量增加而减少。对 $Y_{10}$ 模型表达式求导可知,当 $X=2052\text{ mm}$ 时为极大值点, $Y_{10\text{极大}}=0.1890\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ; $X=3055\text{ mm}$ 时为极小值点,其 $Y_{10\text{极小}}=0.1030\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。当 $X$ 在 $1452\sim 2052\text{ mm}$ 时,锁阳中原儿茶酸含量随年平均蒸发量增加而增加;当 $X$ 在 $2052\sim 3055\text{ mm}$ 时,原

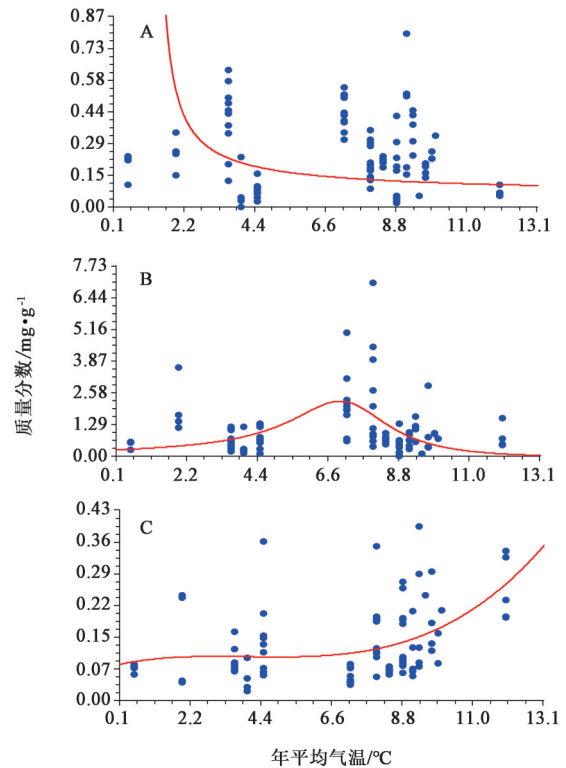
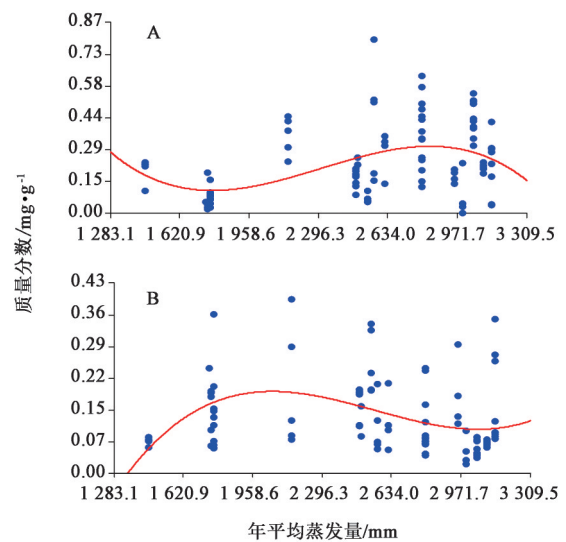


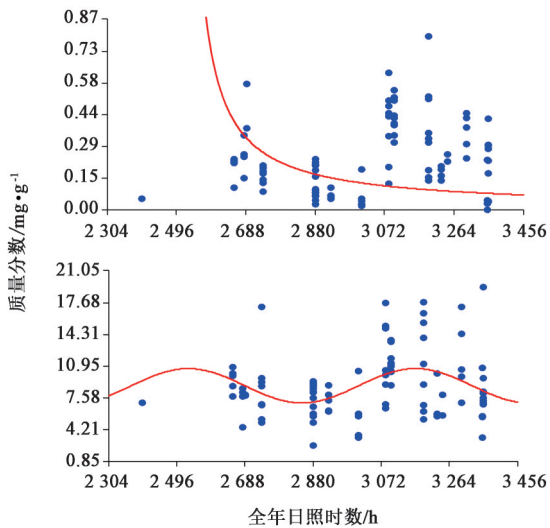
图4 锁阳有效成分含量随年平均气温的分布及曲线拟合  
Fig. 4 Distribution of effective components in *Cynomorii Herba* with annual average temperature and curve fitting results

儿茶酸含量随年平均蒸发量增加而降低;当 $X>3055\text{ mm}$ 时,原儿茶酸含量随年平均蒸发量增加而增加。综合分析可知,从化学成分含量考虑,锁阳的最佳生长及栽培引种年平均蒸发量宜在 $1700\sim 2500\text{ mm}$ 。



注:A. 儿茶素;B. 原儿茶酸  
图5 锁阳有效成分含量随年平均蒸发量的分布及曲线拟合  
Fig. 5 Distribution and curve fitting results of effective component content of *Cynomorium herba* with annual average evaporation

**3.5.5 锁阳有效成分含量对全年日照时数响应的数学模型** 95批锁阳样本中儿茶素和总黄酮含量随全年日照时数( $X$ )的分布及曲线拟合结果见图6。由 $Y_{11}$ 模型表达式可知,在本实验研究的全年日照时数 $X$ 在2 400~3 360 h时, $Y_{11}$ 的模型表达式为单调递减函数,即锁阳中儿茶素含量随药材全年日照时数增加而减少。 $Y_{12}$ 是周期函数,且周期为640。对 $Y_{12}$ 模型表达式求导可知,当 $X=2 527$  h时为极大值点,其 $Y_{12\text{极大}}=10.701 5 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ;  $X=2 848$  h时为极小值点,其 $Y_{12\text{极小}}=7.078 6 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。当 $X$ 在2 400~2 527 h时,锁阳中总黄酮含量随全年日照时数增加而增加;当 $X$ 在2 527~2 848 h时,总黄酮含量随全年日照时数增加而降低;当 $X$ 在2 848~3 167 h时,总黄酮含量随全年日照时数增加而增加,以此为周期循环, $X=3 360$  h时停止。从化学成分含量考虑,锁阳的最佳生长及栽培引种全年日照时数宜在2 400~3 000 h。



注:A. 儿茶素;B. 总黄酮

图6 锁阳有效成分含量随全年日照时数的分布及曲线拟合

Fig. 6 Distribution of effective components in *Cynomorii herba* with annual sunshine hours and curve fitting results

#### 4 讨论

中药品质的道地性理论源远流长,《神农本草经》最早对中药品质与其生长环境的关系进行了理论阐述:“药有……采治(造)时月;生熟,土地所出”。《新修本草》云:“(药)离其本土,则质同而效异”。古代本草学家认为,天地、四时、阴阳、五行等均与中药品质相关,中药品质得自于天地四时之气,并随自然界的四季变化及地域环境而有所不同。生态环境是中药品质形成的重要影响因素,自然环境中光照、温度、水分等对中药品质影响最大<sup>[17]</sup>。目前,关于环境因子对药用植物光合作用的

影响已有广泛研究<sup>[18-20]</sup>,但自然条件下环境因子对药材有效成分含量的影响研究较少。本实验系统、定量研究了锁阳有效成分含量的产地差异及与环境因子的相关性,以期更为精确地揭示锁阳化学成分对环境因子的响应规律,为锁阳的植物生理生化研究、道地区划及人工引种栽培等提供基础资料。

锁阳有效成分含量具有显著的产地差异,对环境因子具有明确的响应规律,其适宜生长及栽培引种的地区为海拔高、年平均无霜期短、年降雨量少、平均蒸发量大、全年日照时数长、年平均气温低的区域。总体来看,内蒙古、甘肃所产锁阳质量最优,新疆所产锁阳质量次之,青海、宁夏所产锁阳质量较差。各产区锁阳中有效成分含量差异较大,是不同产区生态环境因子差异,导致其次生代谢产物有较大差别。甘肃酒泉所产锁阳中总多糖、儿茶素、总黄酮含量均显著高于其他产区,这与“瓜州锁阳甲天下”的说法一致。甘肃酒泉、敦煌、武威与内蒙古阿拉善左旗所产锁阳中儿茶素、总黄酮含量较高,推测可能与4个市级产区年降雨量少、全年日照时数长、年平均蒸发量较大等有关。甘肃敦煌、新疆和田所产锁阳中没食子酸、原儿茶酸含量较高,推测可能与该两市均处于极干旱气候区,且年降雨量少、年平均蒸发量较大有关<sup>[21]</sup>。本研究通过Pearson相关性分析发现锁阳中儿茶素、原儿茶酸含量与年平均气温、全年日照时数和年平均蒸发量成正比;RAD也显示年平均蒸发量、全年日照时数对锁阳有效成分含量的影响较大;曲线拟合结果得出锁阳的最佳年降雨量在110~300 mm,最佳全年日照时数在2 400~3 000 h,最佳年平均气温在2.2~8.8 °C,最佳年平均蒸发量在1 700~2 500 mm。黄林芳等<sup>[22]</sup>对锁阳的产地适宜性进行定量评价,得出锁阳的适宜气候条件为喜干旱而不耐湿润。特殊的地理位置及独特的环境胁迫是锁阳药材品质及道地性形成的主导因素。

本研究首次尝试建立并优化锁阳中多种化学成分含量与环境因子的关系数学模型,为定量、精确揭示药用植物对生态-环境因子的响应规律提供技术示范。对锁阳有效成分含量与环境因子分别进行Pearson相关性分析、RAD及曲线拟合,所得结果不完全一致,但相互补充。Pearson相关分析分别代表从完全负线性相关到完全正线性相关的情况;RAD可通过数据降维,分析特定的环境因子对样品的影响。对于锁阳有效成分含量与各环境因子的复杂线性关系,在各模型研究中得出的各有效成分

的理论最大值与最小值,只表明了相应批次锁阳样本中这些有效成分含量最大值与最小值的集中趋势,在实际中并非绝对如此。从拟合曲线可以看出,各成分都存在实际含量高于或低于理论最大值或最小值的样本,其中以总多糖含量与各环境因子的模型存在的此类样本较多,这也体现为其模型拟合的标准差最大,拟合精度最低。

锁阳有效成分含量与环境因子的关系模型拟合效果令人满意,但用来较为精确地估算锁阳样本中化学成分含量则尚难实现。曲线拟合有明显的“共线性”现象,这可能与同一产区环境因子相似,采样点太集中等原因有关,导致关系模型相关系数较小,标准差较大,拟合精度较低。本研究的曲线拟合只是趋势反映,有一定局限性,尚未考虑各环境因子之间的交互耦合作用。因此各有效成分随环境因子的变化趋势只适用于曲线所推断的范围,而该曲线范围之外的变化趋势,尚需采集更多相应样本做进一步的验证。

[利益冲突] 本文不存在任何利益冲突。

#### [参考文献]

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部[M]. 北京:中国医药科技出版社,2020:360.

[2] 郑燕,孙晓,缪雨静,等. 艾比湖盐碱地肉苁蓉与锁阳土壤微生物群落分析[J]. 药学学报,2021,56(4):1178-1187.

[3] 王进,罗光宏,陈叶,等. 锁阳寄主植物的一个国内新记录——多裂骆驼蓬[J]. 中国中药杂志,2011,36(23):3244-3246.

[4] XIE Y, LI X, XU J, et al. Two phenolic antioxidants in Suoyang enhance viability of  $\bullet$ OH-damaged mesenchymal stem cells: comparison and mechanistic chemistry[J]. Chem Cent J, 2017, 11(1):84.

[5] MENG H C, WANG S, LI Y, et al. Chemical constituents and pharmacologic actions of *Cynomorium* plants[J]. Chin J Nat Med, 2013, 11(4):321-329.

[6] CUI J L, ZHANG Y Y, VIJAYAKUMAR V, et al. Secondary metabolite accumulation associates with ecological succession of endophytic fungi in *Cynomorium songaricum* Rupr [J]. J Agric Food Chem, 2018, 66(22):5499-5509.

[7] 任梦云,杨光,杜乐山,等. 药用植物锁阳的研究进展[J]. 生物学杂志,2018,35(5):95-98.

[8] 王友华,田振军. 有氧运动和锁阳多糖干预对糖尿病大鼠主动脉舒张功能的影响及其机制研究[J]. 陕西师范大学学报:自然科学版,2017,45(5):117-124.

[9] 唐仕欢,杨洪军,黄璐琦. 论自然环境因子变化对中药药性形成的影响[J]. 中国中药杂志,2010,35(1):126-128.

[10] 马天翔,顾志荣,许爱霞,等. 基于 OPLS 结合熵权 TOPSIS 法对不同产地锁阳的鉴别与综合质量评价[J]. 中草药,2020,51(12):3284-3291.

[11] 马转霞,孙岚萍,顾志荣,等. 基于灰色关联度分析与 TOPSIS 模型的不同产地锁阳综合质量评价[J]. 中成药,2020,42(10):2680-2686.

[12] 马转霞,孙岚萍,马天翔,等. 不同产区锁阳粗多糖与总黄酮的测定及比较分析[J]. 时珍国医国药,2020,31(2):428-430.

[13] 刘宏炳,郭卉,燕雪花,等. 新疆锁阳多糖的提取及含量测定[J]. 光谱实验室,2011,28(2):556-558.

[14] 刘爱朋,焦倩,郑玉光,等. 皂角刺总黄酮提取工艺的优化及其抗氧化活性[J]. 中成药,2018,40(3):722-725.

[15] 魏民,张亚静,汪涛,等. 野菊花蒙花苷含量与其产地气候因子相关性分析[J]. 中国中药杂志,2021,46(9):2167-2172.

[16] 刘慧霞,董乙强,崔雨莹,等. 新疆阿勒泰地区荒漠草地土壤有机碳特征及其环境影响因素分析[J]. 草业学报,2021,30(10):41-52.

[17] 黄璐琦,郭兰萍. 中药资源生态学[M]. 上海:上海科学技术出版社,2009:125.

[18] 张永刚,韩梅,姜雪,等. 环境因子对黄芩光合生理和黄酮成分影响研究[J]. 中国中药杂志,2014,39(10):1761-1766.

[19] 王景燕,龚伟,包秀兰,等. 水肥耦合对汉源花椒幼苗叶片光合作用的影响[J]. 生态学报,2016,36(5):1321-1330.

[20] 孙安安,智颖飙,姜平平,等. 西鄂尔多斯4种荒漠植物光合作用特征与差异性[J]. 生态学报,2019,39(13):4944-4952.

[21] LIU G D, CHEN G L, LI W, et al. Genetic and phytochemical diversities of *Cynomorium songaricum* Rupr. in Northwest China indicated by ISSR markers and HPLC-fingerprinting [J]. Biochem Syst Ecol, 2013, 48(48):34-38.

[22] 黄林芳,谢彩香,陈士林,等. 沙生药用植物锁阳产地适宜性的定量评价[J]. 植物学报,2010,45(2):205-211.

[责任编辑 顾雪竹]