

不同产地蒙古黄芪中 12 种药效成分含量差异及其与地理分布和气候因子相关性分析

李新星¹, 刘凤波^{1,2}, 王雅净¹, 周易¹, 陈万金¹, 阳定菲¹, 聂昕伟¹, 赵婷¹, 张媛^{1,2*}, 魏胜利^{1,2*}

1. 北京中医药大学中药学院, 北京 102488

2. 中药材规范化生产教育部工程研究中心, 北京 100102

摘要: 目的 探究不同产地蒙古黄芪 *Astragalus membranaceus* 主要药效成分的含量差异, 以及不同药效成分含量与经纬度、光照、温度、水分等地理气候因子的相关性。方法 基于 HPLC 法测定了甘肃定西、山西大同、陕西榆林等 7 个产地蒙古黄芪的黄芪甲苷、黄芪皂苷I等 4 种皂苷类成分和毛蕊异黄酮、芒柄花素等 8 种黄酮类成分的含量, 通过方差分析比较各产地蒙古黄芪成分含量的差异, 并采用相关性分析及通径分析探究地理气候因子与成分含量的相关性。结果 不同产地蒙古黄芪的 12 种药效成分含量均存在显著差异, 其中山西大同产黄芪的黄芪皂苷、黄酮苷类成分含量较高, 甘肃定西产黄芪的黄酮苷类成分含量较高。相关性分析结果表明, 在经度较高的地区有利于黄芪皂苷及黄酮苷类成分的积累, 在经度较低地区有利于黄酮苷类成分的积累。进一步通径分析结果表明, 经度对药效成分的影响主要与降水量和光照条件有关。此外, 9 月较高的太阳辐射和 4 月较少的降水量有利于黄酮苷类成分的积累。结论 皂苷及黄酮类成分含量在不同产地的蒙古黄芪间差异显著, 经度、9 月太阳辐射和 4 月降水量对上述成分的积累影响较大。

关键词: 蒙古黄芪; 多元统计分析; 黄酮; 皂苷; 黄芪甲苷; 黄芪皂苷III; 黄芪皂苷II; 黄芪皂苷I; 毛蕊异黄酮; 芒柄花素; 地理分布; 气候因子

中图分类号: R286.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-2670(2024)20-7085-08

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2024.20.023

Differences in content of 12 medicinal components of *Astragalus membranaceus* var. *mongolicus* from different regions and their correlation with geographical distribution and climate factors

LI Xinxing¹, LIU Fengbo^{1,2}, WANG Yajing¹, ZHOU Yi¹, CHEN Wanjin¹, YANG Dingfei¹, NIE Xinwei¹, ZHAO Ting¹, ZHANG Yuan^{1,2}, WEI Shengli^{1,2}

1. School of Chinese Materia Medica, Beijing University of Chinese Medicine, Beijing 102488, China

2. Engineering Research Center of Good Agricultural Practice for Chinese Crude Drugs of Ministry of Education, Beijing 100102, China

Abstract: Objective To explore the differences in the concentration of the primary medicinal components of *Astragalus membranaceus* var. *mongolicus* across diverse regions, and to explore the association between the content of these medicinal components and geographical or climatic factors, including longitude, latitude, altitude, light intensity, temperature, etc.. **Methods** HPLC was used to determine the content of four astragalus saponins and eight flavonoids in *A. membranaceus* var. *mongolicus* from seven production areas, including Dingxi City in Gansu Province, Datong City in Shanxi Province, and Yulin City in Shaanxi Province, China. These components include astragaloside IV, astragaloside I, calycosin, etc. This study compared and contrasted the differences in component content among *A. membranaceus* var. *mongolicus* harvested from these diverse regions. Furthermore, it investigated the relationship between the component content and geographical or climatic factors through correlation analysis and path analysis. **Results** The results revealed significant

收稿日期: 2024-03-02

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFC3501505)

作者简介: 李新星 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事中药资源研究。E-mail: 18811358211@163.com

*通信作者: 魏胜利, 博士, 教授, 从事中药资源定向培育及中药资源综合开发研究。E-mail: wsl7491@126.com

张媛, 博士, 教授, 从事中药药效物质基础及质量标准研究。E-mail: zhy0723@126.com

differences in the content of 12 medicinal components of *A. membranaceus* var. *mongolicus* across various regions. Specifically, the content of astragalus saponins and flavonoid glycosides in specimens from Datong City was relatively higher, and the content of the glycosidic components of flavonoid glycosides in specimens from Dingxi City is relatively higher. The correlation analysis further demonstrated that regions with higher longitude favored the accumulation of astragalus saponins and flavonoid glycosides, whereas regions with lower longitude were conducive to the accumulation of the glycosidic components of flavonoid glycosides. Further path analysis results indicated that the effect of longitude on these pharmacological components was mainly related to precipitation and lighting factors. In addition, higher solar radiation in September and less precipitation in April were conducive to the accumulation of flavonoid glycosides. The above research results have important guiding significance for the targeted cultivation of high-quality *A. membranaceus* var. *mongolicus*.

Conclusion There are significant differences in the content of saponins and flavonoids among *A. membranaceus* var. *mongolicus* from different regions. Factors such as longitude, solar radiation in September, and precipitation in April have significant effects on the accumulation of these components.

Key words: *Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge. var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao; multiple statistical analysis; flavonoids; saponins; astragaloside IV; astragalus saponin III; astragalus saponin II; astragalus saponin I; calycosin; geographical distribution; climate factors

黄芪为豆科植物蒙古黄芪 *Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge. var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao 或膜荚黄芪 *A. membranaceus* (Fisch.) Bunge 的干燥根^[1], 是临床常用的大宗药材, 目前蒙古黄芪是主要的种植品种。黄酮类和皂苷类成分是黄芪的主要药效成分^[2-3], 在改善心血管、免疫调节、抗肿瘤等方面具有明显的药理作用^[4-5]。皂苷类成分中的黄芪甲苷、黄芪皂苷 I~III 和黄酮类成分中的毛蕊异黄酮、芒柄花素、紫檀烷及其苷均为可入血成分且含量较高^[6-7], 可作为潜在的质量标志物。

黄芪在我国甘肃、山西、宁夏等省份均有种植^[8], 不同产地黄芪的成分含量差异显著^[9], 而地理气候因子是影响其成分积累的重要因素。然而黄芪种植户在换地时, 只能关注产量或植株生长情况, 而对哪种气候条件有利于黄芪药效成分的积累却了解不足。因此, 分析地理气候因子对药效成分含量的影响, 得到实用性结论, 对于黄芪种植意义重大。目前已有研究报道了相关方面内容, 李欣等^[10]发现黄芪异黄酮类成分与海拔呈负相关, 王宇等^[11]发现黑暗条件可促进黄芪甲苷的积累。但目前相关研究主要集中在成分含量与年度气象指标等大尺度的相关性分析, 鲜有研究探讨精确到月份的气象指标对黄芪药效成分含量的影响。此外, 相关研究所分析的成分种类尚不全面, 缺少对黄芪皂苷 I、黄芪皂苷 II、紫檀烷、异黄烷等主要药效成分含量的分析, 不足以全面揭示黄芪皂苷及黄酮类成分受地理气候因子的影响情况。本研究采集甘肃定西、山西大同、陕西榆林等 7 个道地产区或主产区^[8,12]主要流通的 2 年生蒙古黄芪, 比较不同产地 4 种主要的皂苷类成分和 8 种主要的黄酮类成分的含量差异, 并基于各采样点的经纬度、海拔、气

候数据, 采用相关性分析及通径分析探究地理气候因子对皂苷及黄酮类成分的影响。这些结果将为药材定向培育、黄芪生产种植实践提供基础研究资料。

1 材料

1.1 仪器

AL204 型分析天平 (梅特勒-托利多仪器有限公司); KQ-500 DE 型数控超声波清洗器 (昆山市超声仪器有限公司); HH-S8 型恒温水浴锅 (北京科伟有限公司); RE-3000 型旋转蒸发仪 (上海亚荣生化仪器有限公司); Agilent 1260 高效液相色谱仪 (安捷伦科技有限公司); AllChrom ELSD 6100 型蒸发光散射检测器 (埃文森科技有限公司); Waters 2695 高效液相色谱仪 (沃特世科技有限公司)。

1.2 试剂

黄芪甲苷 (批号 J04M8T30363)、黄芪皂苷 I (批号 YM328HA14)、黄芪皂苷 II (批号 J07HB173633)、黄芪皂苷 III (批号 P22D11F135291), 均购自上海源叶生物科技有限公司; 毛蕊异黄酮 (批号 DSTDM001201)、毛蕊异黄酮苷 (批号 DST201220-013)、芒柄花素 (批号 DSTDM001102)、芒柄花苷 (批号 DST211218-044)、紫檀烷 (批号 DST211110-092)、异黄烷苷 (批号 DST220411-107)、紫檀烷苷 (批号 DST200206-159)、异黄烷 (批号 DST220411-275), 均购于成都德思特生物技术有限公司; 上述对照品质量分数均 $\geq 98\%$ 。水为娃哈哈纯净水, 乙腈为色谱纯, 甲醇、醋酸乙酯均为分析纯。

1.3 药材

选择有代表性的仿野生生态种植与传统的集约

化种植区域，共收集 30 批样品（表 1），为确保样品年限的一致性，本研究均选用 2 年生样品。经北京中医药大学魏胜利教授鉴定为豆科植物蒙古黄芪 *A. membranaceus* (Fisch.) Bge. var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao.。所有样品统一 50 ℃烘干、打粉、过 4 号筛备用。

表 1 黄芪样品信息
Table 1 Sample information of *Astragali Radix*

编号	采集地点	经度/(°)	纬度/(°)	海拔/m
S1	陕西省榆林市子洲县三川口镇阳湾村	109.95	37.69	900
S2	陕西省榆林市子洲县三川口镇林兴庄村	109.91	37.70	993
S3	陕西省榆林市子洲县三川口镇毕家硷村	109.89	37.72	1 081
S4	山西省忻州市五寨县胡会乡军子村	111.60	39.08	1 372
S5	山西省大同市浑源县沙圪坨镇	113.83	39.78	1 380
S6	山西省大同市浑源县沙圪坨镇	113.83	39.78	1 380
S7	山西省大同市浑源县青磁窑镇	113.76	39.58	1 556
S8	山西省大同市浑源县青磁窑镇	113.76	39.58	1 556
S9	宁夏吴忠市盐池县青山乡旺四滩村	107.03	37.56	1 480
S10	宁夏吴忠市盐池县青山乡旺四滩村	106.98	37.55	1 480
S11	宁夏吴忠市盐池县青山乡旺四滩村	106.98	37.55	1 480
S12	宁夏吴忠市盐池县青山乡旺四滩村	106.98	37.55	1 480
S13	宁夏吴忠市盐池县青山乡旺四滩村	106.98	37.55	1 480
S14	宁夏固原市彭阳县城阳乡沟圈村	106.91	35.79	1 611
S15	宁夏固原市彭阳县白阳镇中庄村	106.71	35.93	1 590
S16	宁夏固原市彭阳县白阳镇白岔村	106.72	35.88	1 557
S17	宁夏固原市隆德县神林乡李家南湾村	105.94	35.58	1 845
S18	宁夏固原市隆德县沙塘镇申家沟村	106.06	35.57	1 950
S19	宁夏固原市隆德县沙塘镇马河村	106.03	35.58	1 950
S20	宁夏固原市隆德县联财镇太联村	105.85	35.51	1 792
S21	内蒙古呼和浩特市武川县乌兰不浪镇什拉图村	110.85	41.22	1 786
S22	内蒙古呼和浩特市武川县乌兰不浪镇什拉图村	110.85	41.22	1 786
S23	甘肃省定西市陇西县双泉镇牛家门村	104.41	35.17	2 000
S24	甘肃省定西市陇西县双泉镇高家湾村	104.38	35.17	2 000
S25	甘肃省定西市陇西县首阳镇新华村	104.52	35.03	1 852
S26	甘肃省定西市陇西县首阳镇李家营村	104.57	35.06	1 852
S27	甘肃省定西市陇西县德兴镇	104.49	35.24	2 297
S28	甘肃省定西市陇西县德兴镇	104.49	35.24	2 297
S29	甘肃省定西市陇西县德兴镇	104.49	35.24	2 297
S30	甘肃省定西市陇西县德兴镇	104.49	35.24	2 297

2 方法

2.1 黄芪皂苷类成分含量测定

2.1.1 供试品溶液的制备 精密称取黄芪粉末 3.0 g，加甲醇 40 mL，超声处理 80 min，以 9 000 r/min 的转速离心 5 min，倾倒入清液于 250 mL 圆底烧瓶中，残渣加 40 mL 甲醇重复上述超声、离心操作，合并 2 次上清液并滤过，65 ℃浓缩滤液至干。残渣加甲醇溶解，定容于 10 mL 量瓶，0.22 μm 微孔滤

膜滤过，即得。

2.1.2 对照品溶液的制备 分别精密称取黄芪甲苷及黄芪皂苷I、II、III对照品适量，用甲醇溶解，定容于 10 mL 量瓶中，制成质量浓度分别为 0.144、0.503、0.246、0.154 mg/mL 的对照品储备液，0.22 μm 微孔滤膜滤过，备用。

2.1.3 色谱条件 XTERRA®MS C₁₈ 色谱柱（250 mm×4.6 mm，5 μm）；流动相为乙腈（A）-水（B）；

梯度洗脱程序: 0~8 min, 30%~41% A; 8~12 min, 41%~45% A; 12~14 min, 45% A; 14~16 min, 45%~65% A; 16~18 min, 65% A; 18~20 min, 65%~30% A; 体积流量 1.0 mL/min; 漂移管温度 90 ℃; 氮气体积流量 2.8 L/min; 进样体积 20 μL。分离效果良好, 结果见图 1。

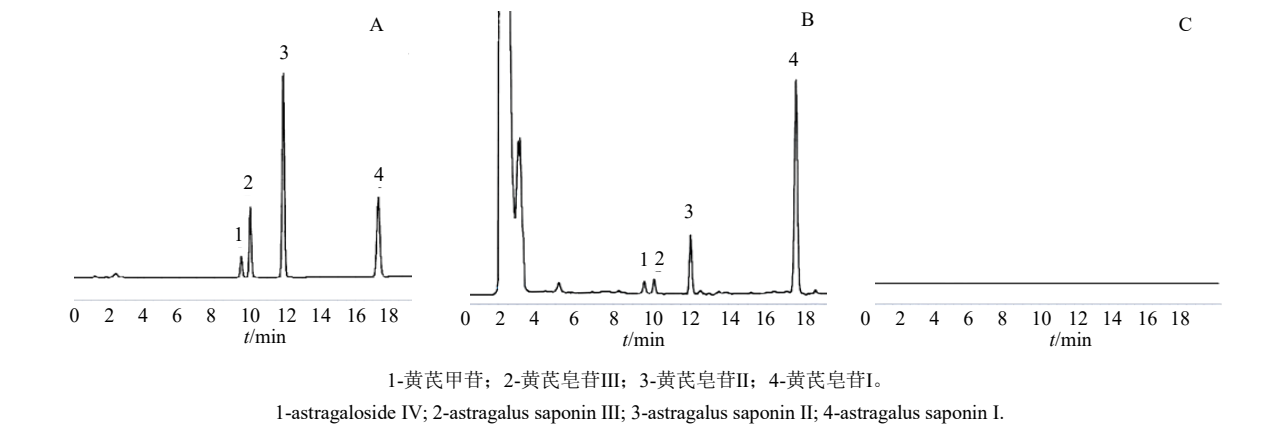


图 1 4 种黄芪皂苷成分对照品 (A)、黄芪样品 (B) 及空白溶剂 (C) 色谱图
Fig. 1 HPLC chromatograms of four kinds of astragalus saponins (A), *Astragali Radix* (B), and blank solvent (C)

2.1.4 专属性考察 分别取上述混合对照品溶液、供试品溶液及空白溶剂 (“2.1.1” 项中确定的溶剂) 各 20 μL, 以 “2.1.3” 项色谱条件进样测定, 结果同图 1, 可知供试品溶液中各成分的色谱峰分离度理想, 样品中的其他成分对 4 种黄芪皂苷类成分的检测无干扰, 表明该方法专属性良好。

2.1.5 线性考察 分别精密吸取 “2.1.2” 项中对照品溶液适量, 加甲醇定容, 得到黄芪甲苷质量浓度分别为 0.120、0.072、0.048、0.024、0.012 mg/mL 的

对照品储备液, 黄芪皂苷 I 质量浓度分别为 0.377、0.251、0.125、0.063、0.031 mg/mL 的对照品储备液, 黄芪皂苷 II 质量浓度分别为 0.148、0.099、0.049、0.025、0.010 mg/mL 的对照品储备液, 黄芪皂苷 III 质量浓度分别为 0.124、0.062、0.031、0.015、0.012 mg/mL 的对照品储备液。按照 “2.1.3” 项下色谱方法洗脱, 以进样量的自然对数为横坐标 (X)、峰面积的自然对数为纵坐标 (Y) 绘制标准曲线并计算回归方程, 结果见表 2。

表 2 黄芪皂苷类成分含量测定的回归方程、决定系数、线性范围

成分	回归方程	r^2	线性范围/μg
黄芪甲苷	$Y=1.268\ 4\ X+5.695\ 2$	0.999\ 5	0.120~1.44
黄芪皂苷 I	$Y=1.216\ 7\ X+7.974\ 3$	0.999\ 2	0.314~5.03
黄芪皂苷 II	$Y=1.382\ 9\ X+6.532\ 8$	0.999\ 3	0.099~2.46
黄芪皂苷 III	$Y=1.485\ 2\ X+6.430\ 6$	0.999\ 2	0.124~1.54

2.1.6 精密度考察 取 “2.1.1” 项制备的供试品溶液, 连续进样 6 次, 计算黄芪甲苷及黄芪皂苷 I、II、III 的质量分数, RSD 值分别为 2.16%、2.44%、2.96%、1.73%, 表明仪器精密度良好。

2.1.7 稳定性考察 取 “2.1.1” 项制备供试品溶液, 在 0、2、4、8、12、24 h 进样, 计算黄芪甲苷及黄芪皂苷 I、II、III 的质量分数, RSD 值分别为 2.52%、2.78%、2.49%、2.06%, 表明 24 h 内样品稳定性良好。

2.1.8 重复性考察 称取 6 份相同样品, 按 “2.1.1” 项平行制备供试品溶液, 分别测定并计算黄芪甲苷及黄芪皂苷 I、II、III 的质量分数, RSD 值分别为 2.18%、2.04%、2.77%、1.35%, 表明该方法的重复性良好。

2.1.9 加样回收率试验 取 6 份已测定的同一批次样品, 分别加入适量对照品, 按 “2.1.1” 项制备供试品溶液并进样检测, 黄芪皂苷 I、II、III、黄芪甲苷平均加样回收率分别为 100.4%、101.7%、

3.2 药效成分含量与不同产地地理气候因子的相关性研究

3.2.1 药效成分含量与地理气候因子的相关性分析
将 12 种成分含量与“2.5”项中获得的 26 种地理气候因子数据进行相关性分析,并对相关系数按照绝对值大小排序,筛选各成分对应的排名前 3 的地理气候因子,并进行共线性检查,选择共线性诊断特征值 <15 的因子,共筛选得到 8 个关键因子,分别为 4 月降水量(X_1)、7 月降水量(X_2)、7 月太阳辐射(X_3)、9 月太阳辐射(X_4)、6 月均温(X_5)、纬

度(X_6)、经度(X_7)、海拔(X_8)。

对 12 种成分含量与上述 8 种地理气候因子进行相关性分析,结果(图 2)表明,成分指标与地理气候因子多数具有显著相关性,其中黄芪皂苷Ⅱ、黄芪甲苷均与 9 月太阳辐射、经度、纬度呈显著正相关,与 4 月降水量呈显著负相关,而黄芪皂苷Ⅰ、黄芪皂苷Ⅲ与上述 4 种地理气候因子相关性不显著。4 种黄酮苷类成分均与 9 月太阳辐射、经度呈显著正相关,与 4 月降水量呈负相关。4 种黄酮苷元类成分均与经度呈显著负相关。

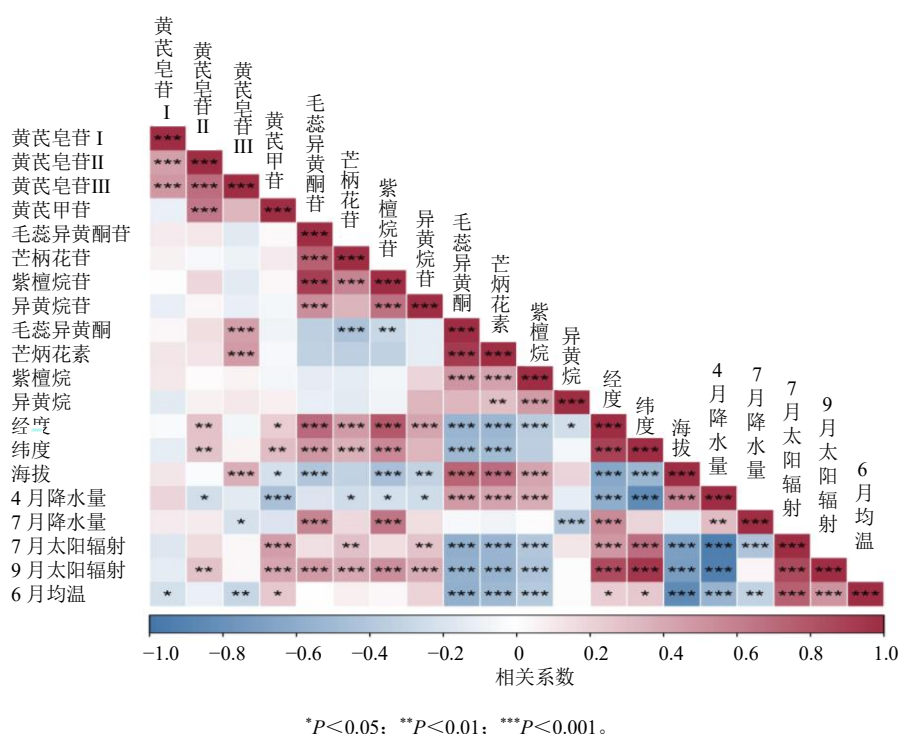


图 2 12 种成分含量与关键地理气候因子的相关性热图

Fig. 2 Heat map of correlation between 12 component contents and key climate factors

3.2.2 药效成分含量与地理气候因子的通径分析
各地理气候因子之间存在复杂的相互作用,经纬度和海拔可以通过影响气候因子进而对黄芪的质量产生影响,且不同气候因子之间也同样存在相互影响。然而,仅通过相关系数无法完全解释上述影响。而通径分析可进一步分解相关系数、阐明数据间的因果关系,可用于分析地理气候因子对成分含量的直接影响及间接影响^[14]。通径系数的绝对值大小可以用来衡量相应地理气候因子在成分积累过程中的重要性,直接与间接通径系数分别对应直接影响和间接影响。

分别计算 4 种黄芪皂苷、4 种黄酮苷、4 种黄酮苷元成分的总含量,并将其与 8 种地理气候因子进

行通径分析。结果表明(表 5),经度对黄芪皂苷、黄酮苷类成分的积累起正向影响、对黄酮苷元类成分的积累起负向影响,其直接通径系数分别为 1.89、1.46、-1.86,间接通径系数分别为 2.03、1.56、-1.99,且东经主要通过 4 月及 7 月降水量、7 月及 9 月太阳辐射对 3 类成分的积累产生间接影响(间接通径系数较大)。纬度对黄芪皂苷、黄酮苷、黄酮苷元类成分的积累起负向影响,直接通径系数分别为 -2.49、-0.93、-0.78,间接通径系数分别为 -1.87、-0.70、-0.58,且主要通过 7 月及 9 月太阳辐射对上述成分的积累产生间接影响。

此外,4 月降水量对黄芪皂苷类成分起较大的正向影响,对黄酮苷、黄酮苷元类成分起到较强的负向

表5 药效成分含量与地理气候因子的通径分析结果

Table 5 Path analysis results of content of medicinal ingredients and geographical climate factors

成分	地理气候因子	直接通径系数	间接通径系数								总和
			X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	
4种黄芪皂苷总量	X ₁	-1.76	1.00	-0.54	1.65	1.63	0.96	1.48	1.06	-0.99	3.55
	X ₂	0.29	0.09	1.00	-0.12	0.01	-0.09	0.06	0.15	-0.03	0.13
	X ₃	1.75	-1.64	-0.75	1.00	1.49	1.30	1.20	0.84	-1.22	-0.44
	X ₄	0.09	-0.08	0.00	0.08	1.00	0.05	0.09	0.08	-0.06	0.07
	X ₅	-0.45	0.24	0.15	-0.33	-0.23	1.00	-0.11	-0.10	0.38	0.28
	X ₆	-2.49	2.10	-0.49	-1.71	-2.36	-0.64	1.00	-2.23	1.32	-1.87
	X ₇	1.89	-1.14	1.03	0.91	1.60	0.43	1.70	1.00	-1.20	2.03
	X ₈	0.66	0.37	-0.08	-0.46	-0.46	-0.55	-0.35	-0.42	1.00	-1.50
4种黄酮苷总量	X ₁	2.05	1.00	0.63	-1.91	-1.90	-1.11	-1.72	-1.23	1.15	-4.11
	X ₂	-0.78	-0.24	1.00	0.33	-0.03	0.26	-0.15	-0.42	0.09	-0.32
	X ₃	0.96	-0.90	-0.41	1.00	0.81	0.71	0.66	0.46	-0.67	-0.25
	X ₄	2.97	-2.76	0.13	2.53	1.00	1.50	2.81	2.51	-2.08	1.82
	X ₅	-0.25	0.14	0.08	-0.19	-0.13	1.00	-0.07	-0.06	0.21	0.14
	X ₆	-0.93	0.78	-0.18	-0.64	-0.88	-0.24	1.00	-0.83	0.49	-0.70
	X ₇	1.46	-0.87	0.79	0.70	1.23	0.33	1.30	1.00	-0.92	1.56
	X ₈	0.27	0.15	-0.03	-0.19	-0.19	-0.23	-0.14	-0.17	1.00	-0.61
4种黄酮苷元总量	X ₁	2.42	1.00	0.74	-2.27	-2.25	-1.32	-2.04	-1.45	1.37	-4.88
	X ₂	-0.75	-0.23	1.00	0.32	-0.03	0.25	-0.15	-0.40	0.09	-0.30
	X ₃	-2.25	2.11	0.96	1.00	-1.92	-1.68	-1.54	-1.08	1.57	0.56
	X ₄	5.62	-5.22	0.25	4.79	1.00	2.84	5.32	4.75	-3.95	3.43
	X ₅	0.14	-0.08	-0.05	0.10	0.07	1.00	0.04	0.03	-0.12	-0.10
	X ₆	-0.78	0.66	-0.15	-0.53	-0.74	-0.20	1.00	-0.70	0.41	-0.58
	X ₇	-1.86	1.12	-1.01	-0.89	-1.57	-0.42	-1.67	1.00	1.18	-1.99
	X ₈	0.64	0.36	-0.08	-0.45	-0.45	-0.54	-0.34	-0.41	1.00	-1.46

影响，其直接通径系数分别为-1.76、2.05、2.42，间接通径系数分别为 3.55、-4.11、-4.88；其间接通径系数绝对值明显大于直接通径系数绝对值，整体作用方向明显。9月太阳辐射对黄酮苷、黄酮苷元类成分起到较强的正向影响，其直接通径系数分别为 2.97、5.62，间接通径系数分别为 1.82、3.43。7月太阳辐射对4种黄酮苷元总含量起到较强的负向影响，其直接通径系数为-2.25，间接通径系数总和为 0.56。

3.2.3 综合分析 相关性分析及通径分析均显示，经度与黄芪皂苷、黄酮苷类成分含量呈正相关关系，与黄酮苷元类成分含量呈负相关关系。即经度较大的地区有利于黄芪皂苷及黄酮苷类成分的积累，经度较小的地区有利于黄酮苷元类成分的积累。进一步通径分析表明，经度对药效成分含量的影响主要与4月及7月降水量、7月及9月太阳辐射有关。此外上述结果还表明，黄酮苷类成分含量与9月太阳辐射呈正相关关系，与4月降水量呈负相关关系。即较高的9月太阳辐射、较少的4月降水量有利于黄酮苷类成分的积累。

4 讨论

黄芪作为一种大宗药材，其需求量逐年增长，2020年其总产量已达到11万t^[15]。大量报道表明，黄芪中的黄芪皂苷及黄酮类成分在抗癌、抗氧化、免疫调节和保护心血管系统等方面具有明显的药理活性，且黄芪皂苷、黄酮苷、黄酮苷元3类成分的药理活性存在差异^[3,16-17]。故上述3类成分的高含量药材在开发中药制剂、保健品、中成药等领域存在巨大的潜在价值。黄芪中12种药效成分含量在不同产地间存在显著差异，这与经度关系密切。相关性分析显示，经度与黄芪皂苷、黄酮苷类成分含量存在正相关关系，与黄酮苷元类成分含量存在负相关关系。这与辛博^[18]得出的毛蕊异黄酮苷含量与经度呈正相关关系结果相一致。上述结果提示在本研究涉及产地范围内（东经104.48°~113.80°），地理位置上东部地区可能更有利于黄芪中黄芪皂苷及黄酮苷类成分的积累，西部区域可能更有利于黄芪皂苷元类成分的积累。

经度的变化会影响其他气候因子，通径分析表

明, 经度主要通过降水量及光照因子对黄芪中药有效成分的积累产生间接影响。相关性分析显示, 在上述经度范围内, 经度与 4 月降水量呈显著负相关、与 9 月太阳辐射均呈显著正相关。然而降水量与光照还受纬度、海拔等的影响, 由于黄芪产区分布有限, 该结果不能反映大尺度经度范围内降水量及光照的变化规律。相关性分析还显示, 黄酮苷类成分含量与 9 月太阳辐射呈正相关关系、与 4 月降水量呈负相关关系, 这与东经通过 4 月降水量及 9 月太阳辐射对黄酮苷类成分含量的间接影响结果相一致。相关研究也表明, 适当的干旱胁迫可以抑制黄芪地上部分的生长, 营养成分优先运向根部, 从而影响黄酮类成分的积累^[19-20]。王宇等^[11]也发现高光有利于黄芪幼苗中芒柄花苷的积累。但由于黄芪种植过程中人为因素、气候因素、土壤因素等均会对其质量产生影响, 多个影响因素的相关性分析存在一定局限性, 得到的结果还有待于进一步栽培试验的验证。

本研究还发现相同类别的气候因子与同一成分含量存在相关性不一致的情况, 如 7 月降水量对紫檀烷苷的影响情况与 4 月降水量相反, 这提示黄芪在不同月份对气候因子的需求和反应可能不同。所以研究气候因子对黄芪的影响时, 有必要精确到具体月份, 而不能仅使用全年的平均数据。上述结果提示种植户或企业在黄芪种植的选地、换地时, 应针对具体成分需求选择适当的种植环境。本研究可为不同产地黄芪种植实践、药材定向培育及中药制药工业精细化提供参考。

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. 2020: 315.
- [2] 向璐, 张巧艳, 赵琦明, 等. 黄芪-当归化学成分、药理作用及临床应用的研究进展 [J]. 中草药, 2022, 53(7): 2196-2213.
- [3] Auyeung K K, Han Q B, Ko J K. *Astragalus membranaceus*: A review of its protection against inflammation and gastrointestinal cancers [J]. *Am J Chin Med*, 2016, 44(1): 1-22.
- [4] 王祯, 张俊令, 焦宏基, 等. 黄芪有效成分的药理作用与质量控制研究进展 [J]. 药物评价研究, 2023, 46(4): 917-924.
- [5] 唐冕, 许晓芬. 药用黄芪皂苷类化学成分及药理作用研究进展 [J]. 中医药导报, 2018, 24(20): 117-122.
- [6] Li D, Liu Y, Qin X. Rapid quantitative analysis of 12 chemical constituents in wild-simulated and cultivated *Astragali Radix* based on UHPLC-MS [J]. *Chin Herb Med*, 2022, 14(3): 464-469.
- [7] 贾璐, 刘月涛, 秦雪梅. UHPLC-MS/MS 法测定大鼠血浆中黄芪建中汤 13 种成分浓度 [J]. 中国药理学与毒理学杂志, 2019, 33(10): 820.
- [8] 黄璐琦. 中国中药资源发展报告-2019 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2020: 253.
- [9] 赵晨光, 李存玉, 杨珊, 等. 基于道地产区蒙古黄芪的质量差异性分析 [J]. 中国中药杂志, 2020, 45(13): 3183-3190.
- [10] 李欣, 卓冰雨, 祁晓娟, 等. 黄芪异黄酮含量与气候因子的灰色关联度和通径分析 [J]. 中国中药杂志, 2020, 45(14): 3407-3413.
- [11] 王宇, 刘洋, 刘佳, 等. 不同光照强度对黄芪主要次生代谢物含量的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(5): 928-933.
- [12] 郑金生. 中华大典. 医药卫生典. 药学分典四 [M]. 成都: 四川出版集团巴蜀书社, 2012: 32.
- [13] 连天赐, 魏胜利, 冯紫薇, 等. 基于黄酮类成分含量差异的子洲黄芪产地判别模式研究 [J]. 北京中医药大学学报, 2023, 46(2): 281-288.
- [14] 陈昌婕, 苗玉焕, 方艳, 等. 不同艾种质资源矿物质元素含量及其与品质的关系 [J]. 中国中药杂志, 2022, 47(04): 880-888.
- [15] 周盛茂, 吴卫刚, 郭亮, 等. 中国黄芪产区变迁及栽培产业发展历程 [J]. 中国现代中药, 2023, 25(11): 2428-2433.
- [16] Li B, Wang F, Liu N T, et al. Astragaloside IV inhibits progression of glioma via blocking MAPK/ERK signaling pathway [J]. *Biochem Biophys Res Commun*, 2017, 491(1): 98-103.
- [17] 张鑫, 杨英杰, 吕庆章. 黄芪异黄酮类化合物抗氧化活性的密度泛函理论研究 [J]. 化学研究与应用, 2012, 24(11): 1662-1669.
- [18] 辛博. 产地气候、土壤因子及生长年限对黄芪药材质量的影响研究 [D]. 北京: 北京中医药大学, 2015.
- [19] 李光跃. 黄芪有效成分与生态因子相关性及干旱胁迫对黄芪黄酮类成分积累的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2017.
- [20] 梁建萍, 贾小云, 刘亚令, 等. 干旱胁迫对蒙古黄芪生长及根部次生代谢物含量的影响 [J]. 生态学报, 2016, 36(14): 4415-4422.

[责任编辑 时圣明]