

林下参皂苷含量与生态因子的相关性研究

陈雅茹, 韩梅, 程林*, 杨利民*

吉林农业大学中药材学院 吉林 长春 130118

摘要: 目的 研究林下参 *Panax ginseng* 皂苷含量与生态因子的关系, 明确影响林下参皂苷积累的主导生态因子, 为林下参的生态种植提供理论依据。方法 以吉林省和龙市 12 个样地林下参为研究对象, 采用 HPLC 法测定林下参 7 种单体皂苷含量, 并测定土壤含水量、有机质、空气温湿度、透光率等 14 个生态因子, 运用相关性分析、灰色关联度分析、逐步回归分析等统计方法, 探讨人参皂苷含量与生态因子的关系。结果 不同样地林下参皂苷含量存在显著差异, 其中各样地含人参皂苷 Rb_1 为 2.93~6.13 mg/g, 均超出《中国药典》2020 年版标准 (人参皂苷 Rb_1 不少于 0.20%), 而人参皂苷 Rg_1 与人参皂苷 Re 之和为 1.23~5.61 mg/g, 有 5 个样地未达到药典标准 (人参皂苷 Rg_1 与人参皂苷 Re 之和不少于 0.30%), 可见不同生境条件对林下参皂苷含量积累具有较大影响; 综合多项数学统计结果, 土壤含水量、有机质含量、碱解氮含量、空气温度和适中的透光率等 5 个生态因子对林下参皂苷含量存在明显的正向影响, 土壤容重存在明显的负面影响, 而其他 8 个生态因子的影响未得到一致性支持; 三醇型人参皂苷受生态因子变化的影响较大, 而二醇型人参皂苷具有较高的生态稳定性, 这一现象值得深入研究。结论 土壤含水量、土壤有机质、土壤碱解氮、空气温度和透光率对林下参皂苷的合成积累具有较大影响, 在林下参生态种植基地选择与管理中应给予重视。

关键词: 林下参; 人参皂苷 Rg_1 ; 人参皂苷 Re ; 生态因子; 土壤含水量; 土壤有机质; 土壤碱解氮; 空气温度; 透光率

中图分类号: R286 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2023)08-2588-08

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2023.08.026

Correlation between ginsenoside content and ecological factors in *Panax ginseng*

CHEN Ya-ru, HAN Mei, CHENG Lin, YANG Li-min

College of Chinese Medicinal Materials, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China

Abstract: Objective This paper studied the relationship between the content of ginsenosides and ecological factors in *Panax ginseng*, in order to clarify the dominant ecological factors affecting the accumulation of ginsenosides and provide theoretical basis for the ecological planting of *P. ginseng*. **Methods** Twelve sample plots of *P. ginseng* from different habitats in Helong City, Jilin Province were studied, the content of seven kinds of ginsenosides were analyzed by HPLC, and 14 ecological factors such as soil water content, organic matter, air temperature and humidity, light transmittance were also measured. The relationship between the the content of ginsenosides and ecological factors was explored by correlation analysis, grey correlation analysis, stepwise regression analysis and other statistical methods. **Results** The content of ginsenosides had significantly different from different sample plots. The content of Rb_1 ranged from 2.93 mg/g to 6.13 mg/g and exceeded the standard of Chinese Pharmacopoeia (2020 edition), while the total content of Rg_1 and Re ranged from 1.23 mg/g to 5.61 mg/g, five sample plots failed to meet the standard of pharmacopoeia. The conditions of habitat had a great influence on the accumulation of ginsenosides. Based on the results of mathematical statistics, soil water content, organic matter content, alkali hydrolyzed nitrogen content, air temperature and moderate light transmittance had significant positive effects on the content of ginsenosides, soil bulk density had significant negative effects on the content of ginsenosides, while the effects of the other eight ecological factors had not been consistently supported. Triol ginsenosides were influenced greatly by the change of ecological factors, while diol ginsenosides had high ecological stability, which was worth of further study. **Conclusion** Soil water content, soil organic matter, soil alkali hydrolyzed nitrogen, air temperature and light transmittance have great influence on the synthesis and accumulation of ginsenosides, which should be paid attention in selecting and managing on the ecological planting base of *P. ginseng*.

Key words: *Panax ginseng* C. A. Mey.; ginsenoside Rg_1 ; ginsenoside Re ; ecological factors; soil water content; soil organic matter; soil alkali hydrolyzed nitrogen; air temperature; light transmittance

收稿日期: 2022-11-03

基金项目: 吉林省重大科技专项(20200504002YY); 吉林省重点科技研发项目(20180201038YY); 国家中药材产业技术体系建设专项(CARS-21)

作者简介: 陈雅茹(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为植物生态学。E-mail: 1311857704@qq.com

*通信作者: 杨利民(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为中药资源生态与药材质量调控。E-mail: ylmh777@126.com

程林(1988—), 男, 博士, 研究方向为药用植物次生代谢生态调控研究。E-mail: idream9999@126.com

人参 *Panax ginseng* C. A. Mey. 为五加科多年生草本植物, 是我国名贵中药材, 具有大补元气、固脱生津、安神等功效^[1]。目前, 野生人参资源已濒临枯竭, 农田栽培和林下护育是人参的主要生产模式^[2]。与农田栽培相比, 林下参采用仿野生护育模式, 生长过程中人为干预少, 生长周期较长^[3], 其“五形六体”发育及品质可与野生人参媲美^[4]。《中国药典》2020 版规定, 播种在山林野生状态下自然生长的人参称为“林下山参”^[5], 常称为林下参。人参皂苷是林下参的主要药效成分, 其种类和含量是评价林下参品质的重要指标。生态环境是影响中药材质量的重要因素之一, 气候、土壤、地形等生态因子是生态环境中重要的组成部分, 不同程度的影响着药材的品质^[6-9]。在药用植物生长过程中, 土壤提供生长必需的水分和营养物质, 有研究表明土壤含水量^[10-12], 氮、磷、钾等土壤元素^[13-15]可以对药用植物的活性成分产生重要影响。温度、水分、光照、海拔等生态因子也直接或间接影响着药材品质^[16-19]。因此, 研究林下参主要药效成分与生态因子的相关性, 对指导林下参生态种植具有重要意义。有研究表明, 林下参生长的林下环境非常多样, 不同生态环境下生长的林下参质量差异较大^[20-22], 但未对生态因子影响进行实质性分析研究。本研究以吉林省和龙市林下参培育基地 12 个样地林下参的人参皂苷含量与各样地 14 个生态因子为指标, 采用相关性分析、灰色关联度分析、逐步回归分析等统计方法, 阐释林下参皂苷含量与生态因子的关系, 探讨影响林下参皂苷积累的主导生态因子, 为林下参规范化生态种植提供理论依据。

1 仪器与材料

1.1 仪器和试剂

Agilent 1260 型高效液相色谱仪 (美国 Agilent 公司); SevenMulti 型离子综合测试仪 [梅特勒-托利

多仪器 (上海) 有限公司]; EH20A plus 电热板 (北京莱伯泰科实验室应用技术有限公司); BPH-9272 恒温培养箱 (上海一恒科学仪器有限公司); AU220 型电子天平、UV-1700 型紫外分光光度计、AA-6300 型原子吸收分光光度计 (日本岛津公司) 等。对照品人参皂苷 Rg₁ (批号 Z26S7X21730)、人参皂苷 Re (批号 B10M8S35243)、人参皂苷 Rf (批号 P09M8F31017)、人参皂苷 Rb₁ (批号 Z06M8L30693)、人参皂苷 Rc (批号 M27J8S40364)、人参皂苷 Rb₂ (批号 P09M8F35575)、人参皂苷 Rd (批号 Z27F8X30060) 购自上海源叶生物科技有限公司 (质量分数 ≥ 98%)。甲醇、乙腈 (色谱纯, Fisher Scientific 公司)。

1.2 材料

试验地位于吉林省和龙市国家级林下参培育基地, 地理坐标为北纬 41°59'44" 至 42°57'15", 东经 128°22'42" 至 129°24'17", 在该基地根据微地形、透光率、地被层和伴生植物种类等差异设置 12 个样地, 每个样地随机设定 5 个取样点, 于 2019 年 8 月 8~10 日 11:00~13:00 时同一时间段内, 测定空气温湿度、透光率、地被层厚度、土壤温度计算平均值, 得到各样地生境信息 (表 1), 并采集各样地 10 年生林下参样品, 经吉林农业大学杨利民教授鉴定为五加科植物人参 *P. ginseng* C. A. Mey. 的根和根茎。将完整的林下参植株放入自封袋, 放入装有冰袋的保温箱中带回实验室。取林下参根, 洗净后用滤纸吸干水分, 将其放入烘箱 60 °C 烘干, 粉碎机磨粉, 用于测定林下参皂苷含量。土壤样品的采集采用 5 点取样法, 去除土壤表层枯枝落叶等杂质, 将 5 点土样混匀, 用自封袋封好迅速放入装有冰袋的保温箱中带回实验室, 自然晾干, 过 20 目筛, 用于理化性质的测定。

表 1 样地生境信息

Table 1 Habitat information of sample plots

编号	海拔/m	坡度/°	坡向	空气温度/°C	空气湿度/%	透光率/%	地被层厚度/cm	土壤温度/°C
LXS-1	624	30	东南坡	23.4	63.6	2.73	3	22.0
LXS-2	617	30	东南坡	23.3	67.4	2.34	4	21.7
LXS-3	620	40	东南坡	23.7	65.7	2.93	6	24.3
LXS-4	619	40	南坡	25.0	62.9	1.31	3	20.0
LXS-5	661	40	南坡	25.0	60.1	3.18	5	21.7
LXS-6	613	35	东南坡	25.0	61.4	2.72	7	20.3
LXS-7	627	40	南坡	26.7	55.8	77.46	4	22.7
LXS-8	672	30	西坡	25.7	50.7	1.69	2	21.0
LXS-9	663	40	西南坡	26.0	58.9	9.51	4	22.0
LXS-10	674	30	西坡	25.3	54.2	8.28	6	19.8
LXS-11	668	30	西坡	25.8	56.8	1.37	3	20.0
LXS-12	663	25	西南坡	25.0	60.8	4.30	4	20.0

2 方法

2.1 林下参皂苷含量测定

2.1.1 对照品溶液的制备 称取7种人参皂苷单体对照品,加甲醇制成含人参皂苷 Rg₁、Re、Rf、Rb₁、Rc、Rb₂、Rd 为0.6 mg/mL 对照品混合液,过0.22 μm 膜后放置于4 °C 冰箱保存。

2.1.2 供试品溶液的制备 精密称取林下参根粉末0.2 g 置于圆底烧瓶中,加入甲醇溶液15 mL 回流提取2 h,滤过至蒸发皿中,置于60 °C 水浴蒸发浓缩,最后以甲醇定容于5 mL 量瓶中,过0.22 μm 针孔过滤器,制得供试品溶液。

2.1.3 色谱条件 依利特 Hypersil ODS₂ (250 mm×4.6 mm, 5 μm) 色谱柱;流动相为乙腈-水溶液,进行梯度洗脱, 0~24 min, 19%~22% 乙腈; 24~26 min, 22%~26% 乙腈; 26~30 min, 26%~32% 乙腈; 30~50 min, 32%~34% 乙腈; 50~60 min, 34%~80% 乙腈; 体积流量1.0 mL/min; 检测波长203 nm; 柱温25 °C, 进样量10 μL。

2.1.4 标准曲线的建立 取“2.1.1”制备的对照品溶液,将其按一定梯度稀释成0.3、0.15、0.075、0.037 5、0.0187 5 mg/mL 的对照品混合液,按照上述色谱条件,依次进样10 μL,以峰面积为纵坐标(Y),溶液质量浓度为横坐标(X),绘制标准曲线,7种人参皂苷标准曲线如表2所示。

表2 7种人参皂苷的回归方程

Table 2 Linear regression equations of seven ginsenosides

成分	回归方程	R ²
人参皂苷 Rg ₁	$Y=4\ 303.9 X+7.161\ 5$	0.999 5
人参皂苷 Re	$Y=3\ 625.8 X+7.000\ 7$	0.999 6
人参皂苷 Rf	$Y=4\ 179.7 X+10.204\ 0$	0.999 6
人参皂苷 Rb ₁	$Y=2\ 387.9 X+2.744\ 5$	0.999 6
人参皂苷 Rc	$Y=2\ 827.4 X+2.576\ 5$	0.999 3
人参皂苷 Rb ₂	$Y=3\ 144.9 X+5.574\ 2$	0.999 5
人参皂苷 Rd	$Y=3\ 585.4 X+4.808\ 4$	0.999 4

2.1.5 方法学考察 精密度、稳定性、重复性及加样回收率试验考察符合要求, RSD 均小于3%。

2.1.6 人参皂苷含量测定 取“2.1.2”制备的供试品溶液,过0.22 μm 针孔过滤器,按照上述色谱条件进样10 μL,将峰面积带入标准曲线,求得各单体皂苷含量。总皂苷含量为人参皂苷 Rg₁、Re、Rf、Rb₁、Rc、Rb₂、Rd 含量之和。

2.2 生态因子的测定

共测定14个主要生态因子,包括土壤理化性质

指标:土壤含水量、容重、pH 值、有机质、碱解氮、速效磷、速效钾;地形和气象等指标:海拔、坡度、空气温度、空气湿度、透光率、地被层厚度、土壤温度。

土壤含水量和土壤容重采用环刀法测定;土壤 pH 值采用国际标准的1:5 土水比,应用离子测定仪(Seven Multi)测定;土壤有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定;土壤碱解氮含量采用碱解扩散法测定;土壤速效磷含量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;土壤速效钾含量采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定;具体操作参考《土壤农化分析》^[23]。空气温湿度采用温湿度计测定,海拔采用 GPS 定位仪测定,透光率采用照度计测定,土壤温度采用地温计测定,地被层厚度采用卷尺测定。

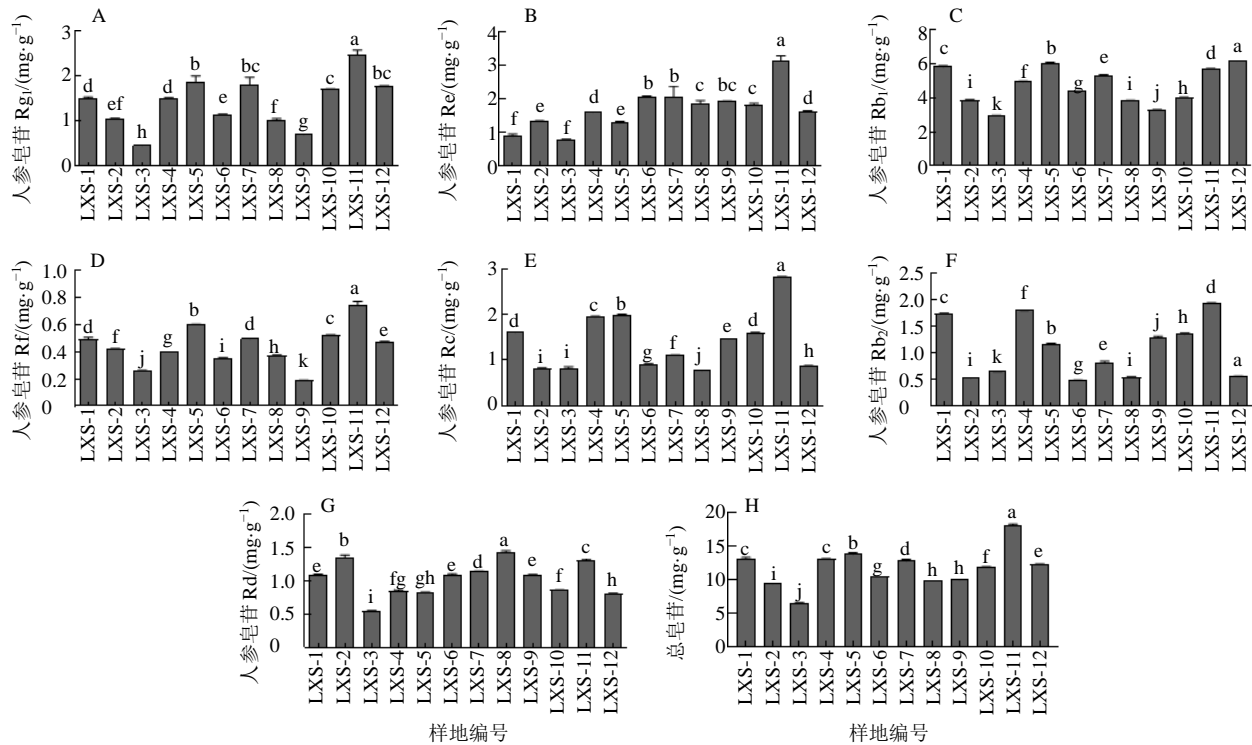
2.3 数据处理

采用 Excel 2016 对调查及测定数据进行整理、计算,用 SPSS 24.0 和 DPS 7.05 进行统计分析,再用 GraphPad Prism 8 和 Excel 2016 绘制图表。

3 结果

3.1 林下参皂苷含量分析

利用 HPLC 法测定了不同样地林下参7种单体皂苷含量。图1-A、B 分别为不同样地人参皂苷 Rg₁、人参皂苷 Re 含量,其中,样地 LXS-11 的人参皂苷 Rg₁、人参皂苷 Re 质量分数最高,为2.47、3.14 mg/g;样地 LXS-3 的人参皂苷 Rg₁、人参皂苷 Re 含量最低,为0.46、0.77 mg/g。图1-C 为不同样地人参皂苷 Rb₁ 含量,在7种单体皂苷中,人参皂苷 Rb₁ 质量分数最高,为2.93~6.13 mg/g。从12个样地的人参皂苷 Rb₁ 含量来看,各样地均超出药典标准,样地 LXS-12 的 Rb₁ 含量最高,是药典标准的3.06倍。图1-D 为不同样地人参皂苷 Rf 含量,样地 LXS-11 质量分数最高,为0.74 mg/g,样地 LXS-9 质量分数最低,为0.19 mg/g。图1-E 为不同样地人参皂苷 Rc 含量,样地 LXS-11 质量分数最高,为2.82 mg/g,样地 LXS-2、LXS-3 和 LXS-8 质量分数较低,为0.77~0.82 mg/g。图1-F 为不同样地人参皂苷 Rb₂ 含量,其中以样地 LXS-1、LXS-4 和 LXS-11 质量分数较高,为1.73~1.93 mg/g, LXS-2、LXS-8 和 LXS-12 质量分数较低,为0.52~0.55 mg/g。图1-G 为不同样地人参皂苷 Rd 含量,样地 LXS-2、LXS-8 和 LXS-11 质量分数较高,在1.30~1.42 mg/g 范围内,样地 LXS-3 质量分数最低,为0.54 mg/g。总皂苷含量以上述7种单体皂苷含量之和表示,结果见图1-H,总皂苷量为6.42~18.06 mg/kg,



不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同
 Different letters indicate significant differences ($P < 0.05$), same as below

图1 不同样地林下参皂苷含量 ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

Fig. 1 Content of ginsenosides in different plots ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

除样地 LXS-3 外, 其他样地的总皂苷含量均在较高值, 其中以样地 LXS-11 的总皂苷含量最高。综合上述分析, 不同样地间林下参皂苷含量存在明显差异。在《中国药典》2020 年版规定的人参皂苷 Rg₁ + 人参皂苷 Re 含量和人参皂苷 Rb₁ 含量 2 项标准中 (人参皂苷 Rg₁ 与 人参皂苷 Re 之和不少于 0.30%, 人参皂苷 Rb₁ 不少于 0.20%), 人参皂苷 Rg₁ 与 人参皂苷 Re 含量之和有 5 个样地未达到标准, 而 12 个样地的 Rb₁ 含量均超出标准且有明显差异, 可见不同生境条件对林下参皂苷含量积累具有较大的影响。以林下参皂苷成分为指标对各样地进行系统聚类分析 (图 2), 结果表明, 12 个样地主要分成 2 大类: 第一类包括样地 LXS-2、LXS-3、LXS-6、LXS-8、LXS-9, 这些样地的人参皂苷含量较低; 第二类包括样地 LXS-1、LXS-4、LXS-5、LXS-7、LXS-10、LXS-11、LXS-12, 这些样地的人参皂苷含量较高, 且以样地 LXS-11 的皂苷含量最高。

3.2 林下参土壤理化性质分析

各样地土壤环境存在差异, 图 3-A、B 分别为不同样地土壤含水量及土壤容重, 由图可知, 土壤含水量为是 25.07%~53.82%, 以样地 LXS-11 土壤

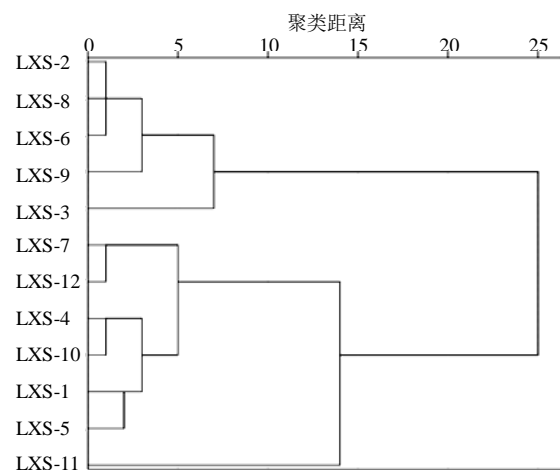


图2 林下参皂苷成分的聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of ginsenosides in *P. ginseng*

含水量最高, 样地 LXS-3、LXS-9 土壤含水量较低; 土壤容重在 0.56~1.05 g/cm³, 以样地 LXS-3、LXS-6 容重较大, 样地 LXS-11 容重最小。图 3-C 为不同样地土壤 pH 值, 为 5.06~5.85, 12 个样地均为酸性土壤, 与适宜人参生长的 pH 值范围 5.5~6.5 基本一致^[24]。图 3-D 为不同样地土壤有机质含量, 样

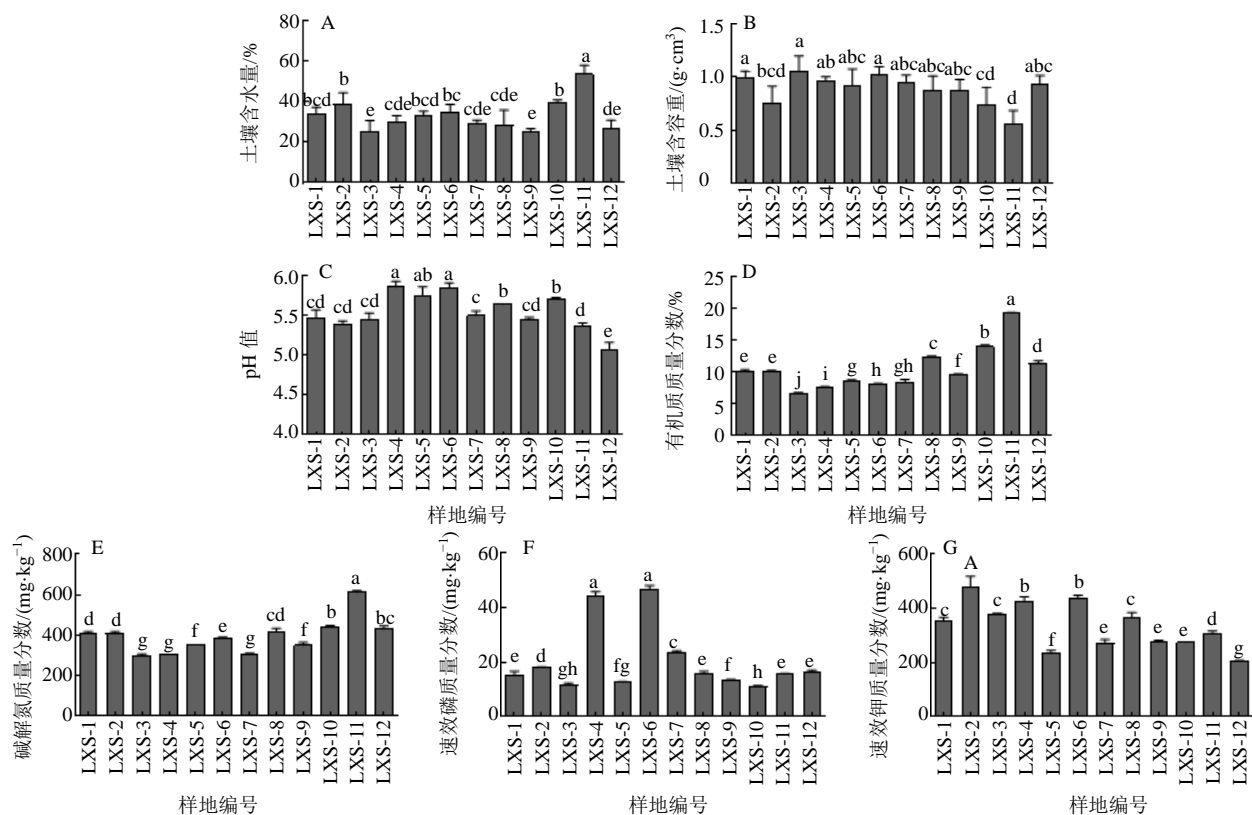


图3 不同样地土壤理化性质

Fig. 3 Physical and chemical properties of soil in different plots

地间有机质含量存在显著差异, 样地 LXS-11 有机质含量最高, 达 19.19%, 是样地 LXS-3 (6.64%) 的 2.89 倍。图 3-E 为不同样地土壤碱解氮含量, 各样地均在较高水平, 范围为 298.67~611.33 mg/kg, 以样地 LXS-11 含量最高。图 3-F 为不同样地土壤速效磷含量, 样地 LXS-4、LXS-6 速效磷含量显著高于其他样地, 质量分数分别为 44.21、46.73 mg/kg, 其他样地含量范围在 10.95~15.73 mg/kg。图 3-G 为不同样地土壤速效钾含量, 样地 LXS-2、LXS-4、LXS-6 的速效钾质量分数较高, 在 426.36~482.10 mg/kg, 样地 LXS-5、LXS-12 的速效钾含量较低, 分别为 233.38、206.40 mg/kg。

3.3 林下参皂苷含量与生态因子的相关性分析

对林下参皂苷含量与生态因子进行相关性分析, 当 $P < 0.05$ 或 $P < 0.01$ 时, 表明变量间存在显著或极显著相关关系, 此时相关系数具有统计学意义, 且相关系数绝对值越大, 相关性越高, 正数表示正相关, 负数表示负相关。由表 3 可知, 人参皂苷 Rg_1 含量与土壤含水量、有机质含量呈显著正相关; 人参皂苷 Re 含量与空气温度呈极显著正相关, 与土壤含水量、有机质含量、碱解氮含量呈显著正相关, 与土壤容重、

空气湿度呈显著负相关; 人参皂苷 Rf 含量与土壤含水量呈极显著正相关, 与有机质含量、碱解氮含量呈显著正相关, 与土壤容重呈显著负相关; 人参皂苷 Rc 含量与土壤含水量呈显著正相关; 总皂苷含量与土壤含水量、有机质含量、碱解氮含量呈显著正相关; 而人参皂苷 Rb_1 、 Rb_2 、 Rd 含量与 14 个生态因子的相关性不显著。综合上述分析, 土壤含水量、有机质含量和碱解氮含量与林下参皂苷 Rg_1 、 Re 、 Rf 、 Rc 含量存在显著或极显著正相关, Re 含量明显受空气温度的正向影响, 而土壤容重起到负向作用。土壤容重是度量土壤物理结构的孔隙度和透气性的指标, 这一研究结果表明, 林下参更适合在土壤容重低而透气性良好, 有机质含量较高的生境中种植。

3.4 林下参皂苷含量与生态因子的灰色关联度分析

分别以林下参 8 种人参皂苷为母因素, 以生态因子为子因素对原始数据标准化后, 进行灰色关联度分析。灰色关联分析是评价 2 个系统之间一个系统的变化随着另一个系统的变化而变化的关联性大小的度量。研究结果表明, 林下参 7 种单体皂苷及总皂苷含量与 14 个生态因子的关联系数在 0.60~0.82, 存在较高的关联性, 又有明显差异。

表3 人参皂苷与生态因子的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of ginsenosides and ecological factors

生态因子	相关系数							
	人参皂苷 Rg ₁	人参皂苷 Re	人参皂苷 Rf	人参皂苷 Rb ₁	人参皂苷 Rc	人参皂苷 Rb ₂	人参皂苷 Rd	总皂苷
土壤含水量	0.647*	0.577*	0.768**	0.291	0.654*	0.459	0.402	0.671*
土壤容重	-0.525	-0.664*	-0.590*	-0.082	-0.531	-0.352	-0.513	-0.539
土壤 pH 值	-0.080	-0.014	-0.080	-0.169	0.154	0.161	-0.061	-0.029
土壤有机质	0.602*	0.697*	0.644*	0.233	0.541	0.397	0.463	0.629*
土壤碱解氮	0.569	0.626*	0.645*	0.299	0.485	0.319	0.481	0.607*
土壤速效磷	-0.012	0.174	-0.162	0.074	-0.050	-0.025	0.026	0.042
土壤速效钾	-0.459	-0.175	-0.328	-0.452	-0.264	-0.153	0.278	-0.381
海拔	0.351	0.417	0.314	0.124	0.321	0.177	0.126	0.339
坡度	-0.303	-0.157	-0.359	-0.263	0.094	0.099	-0.356	-0.206
空气温度	0.357	0.727**	0.141	0.122	0.234	0.094	0.232	0.373
空气湿度	-0.325	-0.580*	-0.240	-0.049	-0.148	-0.060	-0.358	-0.297
透光率	0.195	0.183	0.070	0.140	-0.150	-0.147	0.113	0.085
地被层厚度	-0.242	-0.174	-0.218	-0.297	-0.246	-0.354	-0.557	-0.383
土壤温度	-0.553	-0.551	-0.415	-0.372	-0.360	-0.275	-0.232	-0.545

*相关性显著 (P<0.05); **相关性极显著 (P<0.01)

*Correlation is significant (P<0.05); **Correlation is highly significant (P<0.01)

除人参皂苷 Rb₁ 外, 其余 6 种单体皂苷及总皂苷含量均与土壤含水量密切相关, 关联系数均大于 0.74; 除总皂苷含量与土壤容重关联系数较高外, 其余 7 种单体皂苷含量与土壤容重关联系数均低于 0.72; 除人参皂苷 Rc 含量与土壤 pH 关联系数较高外, 其余 6 种单体皂苷及总皂苷含量与土壤 pH 关联系数均低于 0.71; 人参皂苷 Rg₁、Re、Rf、Rc 和总皂苷含量与土壤有机质和碱解氮含量关联系数大于 0.75, 而人参皂苷 Rb₁、Rb₂ 和 Rd 与土壤有机质和碱解氮含量关联系数小于

0.73; 人参皂苷 Re 含量与空气温度、透光率的关联系数大于 0.76, 而空气温度、透光率与其它单体皂苷及总皂苷含量关联系数均小于 0.74; 另外, 所有单体皂苷和总皂苷含量与土壤速效磷、速效钾、土壤温度, 以及样地海拔高度、坡度、地被层厚度和空气湿度的关联系数均低于 0.75, 且多数低于 0.70。综合上述分析, 14 个生态因子中土壤含水量、有机质含量、碱解氮含量、空气温度和透光率与林下参皂苷含量变化关联性更高, 结果见表 4。

表4 人参皂苷与生态因子的灰色关联度分析

Table 4 Grey correlation analysis of ginsenosides and ecological factors

生态因子	关联系数							
	人参皂苷 Rg ₁	人参皂苷 Re	人参皂苷 Rf	人参皂苷 Rb ₁	人参皂苷 Rc	人参皂苷 Rb ₂	人参皂苷 Rd	总皂苷
土壤含水量	0.777 6	0.762 5	0.809 4	0.683 2	0.810 0	0.750 1	0.742 0	0.777 0
土壤容重	0.691 6	0.722 1	0.691 9	0.697 1	0.714 9	0.677 4	0.659 8	0.763 7
土壤 pH 值	0.699 4	0.708 9	0.692 8	0.641 1	0.758 1	0.712 8	0.624 4	0.715 5
土壤有机质	0.749 5	0.799 3	0.806 8	0.643 2	0.781 8	0.708 7	0.720 5	0.772 2
土壤碱解氮	0.763 8	0.793 1	0.797 4	0.661 2	0.762 3	0.691 6	0.729 4	0.777 2
土壤速效磷	0.674 4	0.741 7	0.709 4	0.663 7	0.702 3	0.672 9	0.692 5	0.726 5
土壤速效钾	0.612 1	0.669 5	0.622 0	0.605 6	0.684 7	0.637 9	0.717 8	0.659 6
海拔	0.718 3	0.720 2	0.714 8	0.667 5	0.753 7	0.735 3	0.683 6	0.715 1
坡度	0.692 9	0.694 5	0.667 1	0.705 7	0.733 8	0.674 1	0.649 0	0.711 4
空气温度	0.719 4	0.821 9	0.723 0	0.683 9	0.711 4	0.685 6	0.702 8	0.733 5
空气湿度	0.638 5	0.649 9	0.650 5	0.644 8	0.695 5	0.660 4	0.675 0	0.706 8
透光率	0.715 1	0.766 2	0.740 1	0.671 2	0.729 0	0.676 1	0.697 0	0.742 7
地被层厚度	0.664 0	0.711 0	0.689 6	0.599 3	0.696 1	0.646 4	0.628 3	0.687 1
土壤温度	0.668 2	0.681 1	0.701 3	0.643 6	0.709 2	0.683 4	0.715 1	0.699 9

3.5 林下参皂苷含量与生态因子的多元逐步回归分析

在相关性分析、灰色关联分析的基础上, 通过逐步回归分析剔除不显著变量, 以 14 个生态因子为自变量, 自变量安排如下: 土壤含水量(X₁)、土壤容重(X₂)、土壤 pH 值(X₃)、土壤有机质(X₄)、土壤碱解氮(X₅)、土壤速效磷(X₆)、土壤速效钾(X₇)、海拔高度(X₈)、地形坡度(X₉)、空气温度(X₁₀)、空气湿度(X₁₁)、

透光率(X₁₂)、地被层厚度(X₁₃)、土壤温度(X₁₄), 林下参的 7 种单体皂苷和总皂苷含量为因变量(Y), 得出回归方程如表 5 所示。由表可见, 人参皂苷含量与各生态因子间呈现较好的多元相关性, 回归模型决定系数 r>0.5, 表明多元逐步回归的方法可较好的模拟人参皂苷与生态因子之间的关系。

为更加明确多元回归所确定的生态因子对林下参中人参皂苷含量作用的大小, 对其进行通径分析(表 6)。

表5 人参皂苷与生态因子的逐步回归分析

Table 5 Stepwise regression analysis of ginsenosides and ecological factors

指标	回归方程	r	F	P值
人参皂苷 R _{g1}	$Y=0.927\ 6+0.052\ 4\ X_1+0.019\ 9\ X_6-0.005\ 0\ X_7$	0.832 0	13.205 7	0.001 8
人参皂苷 R _e	$Y=-21.061\ 0+0.003\ 5\ X_1+0.004\ 9\ X_5+0.002\ 4\ X_7+0.679\ 2\ X_{10}+0.046\ 3\ X_{11}+0.035\ 5\ X_{13}$	0.999 8	3 623.171 6	0
人参皂苷 R _f	$Y=0.178\ 6+0.014\ 9\ X_1-0.000\ 7\ X_7$	0.761 7	14.381 5	0.001 6
人参皂苷 R _{b1}	$Y=-72.993\ 2+0.290\ 2\ X_1+13.538\ 1\ X_2-2.042\ 3\ X_3-0.250\ 2\ X_4+0.104\ 1\ X_6+0.126\ 4\ X_8-0.921\ 1\ X_{10}+0.177\ 4\ X_{11}+0.065\ 7\ X_{12}-0.421\ 6\ X_{13}$	0.999 9	9 488.333 2	0.008 0
人参皂苷 R _c	$Y=-1.624\ 7+0.069\ 1\ X_1-0.003\ 5\ X_7+0.076\ 9\ X_9-0.010\ 1\ X_{12}-0.148\ 4\ X_{13}$	0.903 7	11.260 1	0.005 2
人参皂苷 R _{b2}	$Y=-72.634\ 8-0.240\ 0\ X_1+7.858\ 8\ X_3+0.786\ 7\ X_4+0.008\ 2\ X_5-0.005\ 4\ X_7+0.427\ 5\ X_{11}+0.0380\ 4\ X_{12}-0.137\ 9\ X_{13}+0.150\ 0\ X_{14}$	0.999 5	455.347 0	0.002 2
人参皂苷 R _d	$Y=-11.078\ 5-0.182\ 7\ X_4+0.007\ 5\ X_5+0.003\ 9\ X_7+0.015\ 4\ X_8+0.013\ 1\ X_{12}-0.064\ 6\ X_{13}$	0.937 7	12.537 6	0.007 0
总皂苷	$Y=13.958\ 8+0.391\ 5\ X_1-0.379\ 3\ X_4+0.107\ 0\ X_6-0.028\ 3\ X_7-0.964\ 5\ X_{13}$	0.986 1	85.268 6	0

表6 人参皂苷与生态因子的通径分析

Table 6 Path analysis of ginsenosides and ecological factors

成分	变量	直接系数	间接系数														
			X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	
人参皂苷 R _{g1}	X ₁	0.748						-0.018	-0.083								
	X ₆	0.430	-0.031						-0.410								
	X ₇	-0.769	0.081					0.229									
人参皂苷 R _e	X ₁	0.045				0.555		0.035			-0.016	-0.035		-0.006			
	X ₅	0.675	0.037					-0.042			0.088	-0.108		-0.024			
	X ₇	0.328	0.005					-0.087			-0.592	0.169		0.002			
	X ₁₀	1.143	-0.001				0.052		-0.170			-0.285		-0.012			
	X ₁₁	0.359	-0.004				-0.202		0.154			-0.907		0.021			
	X ₁₃	0.086	-0.003				-0.188		0.007			-0.163	0.088				
人参皂苷 R _f	X ₁	0.813						-0.045									
	X ₇	-0.416	0.088														
人参皂苷 R _{b1}	X ₁	2.100		-1.392	-0.007	-0.595		-0.048		0.512		0.012	-0.077	-0.256	0.042		
	X ₂	1.719	-1.701		-0.101	0.685		0.396		-1.533		0.200	0.261	0.153	-0.160		
	X ₃	-0.422	0.034	0.410		0.231		0.621		-0.581		-0.098	-0.122	-0.088	-0.155		
	X ₄	-0.774	1.614	-1.522	0.126			-0.410		1.884		-0.246	-0.393	-0.245	0.199		
	X ₆	1.141	-0.088	0.596	-0.230	0.278				-1.663		-0.071	0.150	0.042	-0.082		
	X ₈	2.837	0.379	-0.929	0.086	-0.514		-0.669				-0.444	-0.564	-0.196	0.135		
	X ₁₀	-0.874	-0.030	-0.394	-0.047	-0.217		0.092		1.440			-0.616	0.686	0.082		
	X ₁₁	0.776	-0.207	0.578	0.066	0.392		0.220		-2.061		0.694		-0.367	-0.141		
	X ₁₂	1.269	-0.424	0.207	0.029	0.150		0.038		-0.438		-0.473	-0.224		0.007		
	X ₁₃	-0.575	-0.152	0.478	-0.114	0.267		0.163		-0.664		0.124	0.190	-0.016			
	人参皂苷 R _c	X ₁	0.877						-0.052			-0.266		0.069	0.026		
		X ₇	-0.486	0.094								0.038		0.097	-0.007		
		X ₉	0.676	-0.345					-0.027					-0.116	-0.094		
X ₁₂		-0.343	-0.177					0.137			0.229			0.004			
X ₁₃		-0.355	-0.063					-0.010			0.178			0.004			
人参皂苷 R _{b2}	X ₁	-3.523			0.054	3.794	1.051	-0.093				-0.375	-0.301	0.028	-0.175		
	X ₃	3.297	-0.058			-1.476	-0.427	-0.312				-0.595	-0.104	-0.103	-0.062		
	X ₄	4.934	-2.709		-0.986		1.212	0.231				-1.923	-0.288	0.132	-0.206		
	X ₅	1.279	-2.896		-1.101	4.677		0.111				-1.137	-0.510	0.106	-0.211		
	X ₇	-0.863	-0.379		1.192	-1.323	-0.164					1.787	-0.421	-0.008	0.026		
	X ₁₁	3.794	0.348		-0.517	-2.501	-0.383	-0.407					-0.431	-0.093	0.130		
	X ₁₂	1.490	0.712		-0.229	-0.954	-0.438	0.244				-1.097		0.005	0.121		
	X ₁₃	-0.382	0.255		0.886	-1.706	-0.357	-0.017				0.929	-0.018		0.056		
	X ₁₄	0.375	1.645		-0.549	-2.707	-0.718	-0.059				1.314	0.480	-0.057			
	人参皂苷 R _d	X ₄	-2.403				2.314		-0.347	0.978				-0.207	0.130		
X ₅		2.441				-2.278		-0.166	0.748				-0.368	0.105			
X ₇		1.296				0.644	-0.313		-1.038				-0.303	-0.008			
X ₈		1.473				-1.595	1.239		-0.913				-0.165	0.088			
X ₁₂		1.073				0.465	-0.836		-0.366	-0.227				0.005			
X ₁₃		-0.375				0.831	-0.681		0.026	-0.345			-0.013				
X ₁₄		1.093				-0.348		-0.019	-0.092						0.037		
总皂苷	X ₄	-0.452	0.840					-0.163	0.228						0.176		
	X ₆	0.452	-0.046			0.163			-0.454						-0.073		
	X ₇	-0.851	0.118			0.121		0.241							-0.010		
	X ₁₃	-0.508	-0.079			0.156		0.065	-0.017								

结果表明, 人参皂苷 Rg_1 含量与土壤含水量呈显著正相关, 与土壤速效钾呈显著负相关; 人参皂苷 Re 含量与空气温度呈显著正相关; 人参皂苷 Rf 、 Rc 和总皂苷含量与土壤含水量呈显著正相关; 而人参皂苷 Rb_1 、 Rb_2 和 Rd 比较复杂, 分析结果表明多数生态因子对其含量产生较大的影响, 但是, 上面的相关性分析和灰色关联度分析结果均未给予支持, 有待进一步研究。

4 讨论

本研究通过对 12 个样地林下参的 7 种单体人参皂苷和总皂苷含量与 14 个生态因子的相关性分析、灰色关联分析及逐步回归分析, 从多个角度阐释了生态因子对林下参皂苷含量的影响。综合多项数学统计结果, 土壤含水量、有机质含量、碱解氮含量、空气温度和适中的透光率等 5 个生态因子对林下参皂苷含量存在明显的正向影响, 土壤容重存在显著的负面影响, 而其它 8 个生态因子的影响未得到一致性支持。本研究分析的 7 种人参单体皂苷中, 人参皂苷 Rb_1 、 Rb_2 、 Rc 、 Rd 为二醇型人参皂苷, 而 Rg_1 、 Re 、 Rf 为三醇型人参皂苷。从研究结果看, 似乎三醇型人参皂苷受生态因子变化的影响较大, 而二醇型人参皂苷中 Rb_1 、 Rb_2 、 Rd 均有较高的生态稳定性, 这一结果与林红梅的吉林省栽培人参(园参)全产区 127 个样地大尺度研究结果具有相似性^[25], 这一现象值得深入研究。中药材质量的形成是一个非常复杂的问题, 林下参更加复杂的生境条件也增加了研究难度, 导致目前研究还比较薄弱。虽然本研究仅是夏季采集的林下参人参皂苷含量和生态因子信息, 但是, 高度重视研究对象的可比性, 所有相关数据的采集严格控制在同一时段进行。本研究对林下参生态种植基地的选择提供了可参考的依据。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

[1] 南京中医药大学. 中药大辞典 [M]. 2 版. 上海: 上海科学技术出版社, 2006: 38.
 [2] 严珺, 孙海, 蒋燊, 等. 桓仁地区林下参土壤肥力评价 [J]. 特产研究, 2018, 40(2): 1-7.
 [3] 李想, 范航, 徐源, 等. 林下参的栽培及管理技术 [J]. 林业科技通讯, 2016(9): 70-74.
 [4] 晏马成, 缪细泉, 梁路. 野山人参的性状和商品等级的研究 [J]. 中国现代应用药学, 2001, 18(S1): 11-14.
 [5] 中国药典 [S]. 一部. 2020: 8-9.
 [6] 杨利民, 张永刚, 林红梅, 等. 中药材质量形成理论与控制技术研究进展 [J]. 吉林农业大学学报, 2012, 34(2): 119-124.
 [7] 张甜, 程林, 杨林林, 等. 生态因子及关键酶基因表达

对秋季黄芩采收期主要药效成分合成的影响 [J]. 中草药, 2019, 50(4): 936-944.

[8] 郭杰, 张琴, 孙成忠, 等. 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.
 [9] 尚雪, 董丽君, 文路军, 等. 基于遥感与 GIS 的四川省川牛膝资源适宜性分布研究 [J]. 中草药, 2016, 47(24): 4445-4451.
 [10] 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.
 [11] 韩晓伟, 严玉平, 贾河田, 等. 干旱胁迫对柴胡皂苷合成途径关键酶基因表达的影响 [J]. 中药材, 2017, 40(12): 2772-2774.
 [12] 程林. 干旱胁迫黄芩生理生态变化及其黄芩苷生物合成的分子生态机制 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2018.
 [13] 刘岩, 李连泰, 计小清, 等. 土壤中无机元素对不同产地黄芩中无机元素和黄芩苷量的影响 [J]. 中草药, 2017, 48(6): 1225-1228.
 [14] 沈晓凤, 张琦, 严铸云, 等. 根际土壤元素有效性与丹参质量的相关性分析 [J]. 中国中药杂志, 2016, 41(7): 1212-1217.
 [15] 王长林, 郭巧生, 程搏幸. 明党参及其土壤中矿质元素特征分析 [J]. 中国中药杂志, 2018, 43(8): 1579-1587.
 [16] 罗燕, 张永刚, 杨利民, 等. 光照强度对朝鲜淫羊藿生长、光合和叶绿素荧光参数特征的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2018, 46(7): 44-48.
 [17] 张涛. 人参与其皂苷生物合成对低温的生理生态响应机制研究 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2019.
 [18] 韦赫, 程林, 吴培, 等. 黄芪皂苷生物合成对短期水分变化的响应 [J]. 中国中药杂志, 2019, 44(3): 441-447.
 [19] 赵俊阳, 张魏圆, 李颖, 等. 海拔对柴胡主、侧根皂苷含量的影响 [J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2017, 53(5): 603-608.
 [20] 阮晓佳, 郜玉钢, 赵岩, 等. 不同林型、产地、参龄及坡向对林下参 20 种单体皂苷含量的影响 [J]. 食品科学, 2018, 39(24): 195-202.
 [21] 刘元. 林下参培育关键影响因子研究综述 [J]. 吉林林业科技, 2019, 48(3): 35-37.
 [22] 李星硕. 不同立地条件对林下参生长的影响 [J]. 现代园艺, 2019(3): 9-10.
 [23] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-107.
 [24] 程海涛, 张亚玉, 张连学, 等. 土壤环境与人参生长关系的研究进展 [J]. 中药材, 2011, 34(2): 313-317.
 [25] 林红梅. 生态因子对人参皂苷含量及其生物合成关键酶基因表达的影响 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2016.

[责任编辑 时圣明]