

## 云南不同产区三七品质分析及其综合评价

张巨强<sup>1,2,3</sup>, 孟珍贵<sup>1,2,3</sup>, 洪杰<sup>1,2,3</sup>, 张金燕<sup>1,2,3</sup>, 高丽琳<sup>1,2,3</sup>, 杨靖<sup>1,2,3</sup>, 张王顺<sup>1,2,3</sup>, 陈严平<sup>1</sup>, 陈军文<sup>1,2,3</sup>, 寸竹<sup>1,2,3\*</sup>

1. 云南农业大学农学与生物技术学院, 云南 昆明 650201
2. 云南农业大学 西南中药材种质创新与利用国家地方联合工程研究中心, 云南 昆明 650201
3. 云南农业大学 云南省药用植物生物学重点实验室, 云南 昆明 650201

**摘要:** **目的** 比较分析云南不同产区根茎类药用植物三年生三七 *Panax notoginseng* 的品质, 并为高海拔产区三七的质量评价提供科学依据。**方法** 通过测定比较分析云南 9 个产区(红河建水、保山施甸、玉溪红塔、版纳勐海、文山砚山、楚雄禄丰、曲靖沾益、昆明寻甸、大理宾川, 海拔跨度 1475~2615 m) 三年生三七的农药残留、重金属含量、灰分含量、浸出物含量、皂苷含量等指标, 并进行综合评价。**结果** 所有产区三七中均未检测出《中国药典》2020 年版规定的 33 项农药残留物, 三七在部分中海拔产区(版纳勐海、保山施甸)中检测出苯醚甲环唑、腈菌唑、肟菌酯、戊唑醇、烯唑醇等农药残留, 但未超过《GB 23200.113-2018 食品安全国家标准》规定的限量。所有产区三七重金属(镉、汞、铅、铜、砷)含量都远低于《中国药典》2020 年版规定的限量, 且楚雄禄丰、曲靖沾益、大理宾川等高海拔产区三七中镉和铅含量较低。所有产区三七灰分含量都低于《中国药典》2020 年规定的 6%, 且产区海拔与三七灰分含量呈正相关。所有产区三七浸出物含量都超过《中国药典》2020 年版规定的 16%, 其中传统道地产区(文山)三七浸出物含量最高, 中海拔产区(玉溪红塔、版纳勐海)三七浸出物含量最低。楚雄禄丰、曲靖沾益、昆明寻甸等高海拔产区的三七单体皂苷及总皂苷含量显著高于红河建水、保山施甸、玉溪红塔和版纳勐海等中海拔产区, 所有产区三七中三七皂苷  $R_1$ +人参皂苷  $R_{g_1}$ +人参皂苷  $R_{b_1}$  皂苷含量均高于《中国药典》2020 年版规定的 5%, 且高海拔产区三七高于中海拔产区三七。**结论** 高海拔产区三七的农药残留量低, 灰分与浸出物含量高, 有效成分皂苷的积累高, 因此高海拔种植三七有利于提高药材品质。

**关键词:** 产区; 高海拔; 农药残留; 重金属; 皂苷; 三七

中图分类号: R286.2 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2025)14-5213-12

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.14.024

## Quality analysis and comprehensive evaluation of *Panax notoginseng* from different producing areas in Yunnan province

ZHANG Juqiang<sup>1,2,3</sup>, MENG Zhengui<sup>1,2,3</sup>, HONG Jie<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Jinyan<sup>1,2,3</sup>, GAO Lilin<sup>1,2,3</sup>, YANG Jing<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Wangshun<sup>1,2,3</sup>, CHEN Yanping<sup>1</sup>, CHEN Junwen<sup>1,2,3</sup>, CUN Zhu<sup>1,2,3</sup>

1. College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China
2. National & Local Joint Engineering Research Center on Germplasm Innovation & Utilization of Chinese Medicinal Materials in Southwestern China, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China
3. Key Laboratory of Medicinal Plant Biology of Yunnan Province, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China

**Abstract: Objective** To conduct a comparative analysis of the quality of three-year-old *Panax notoginseng* from different producing areas in Yunnan province, and to provide a scientific basis for quality evaluation of *P. notoginseng* grown in high-altitude areas.

**Methods** This study conducts a comprehensive evaluation by measuring and analyzing pesticide residues, heavy metal contents, ash contents, leachate contents and saponin contents of three-year-old *P. notoginseng* from nine producing areas in Yunnan province (Jianshui of Honghe, Shidian of Baoshan, Hongta of Yuxi, Menghai of Banna, Yanshan in Wenshan, Lufeng in Chuxiong, Zhanyi in

收稿日期: 2025-01-03

基金项目: 云南省科技重大专项项目(202102AA310048); 国家重点研发计划项目(2021YFD1601003); 国家自然科学基金资助项目(81860676, 32160105)

作者简介: 张巨强, 硕士研究生, 研究方向为药用植物生理生态。E-mail: 1139440774@qq.com

\*通信作者: 寸竹, 讲师, 研究方向为药用植物生理与分子生物学。E-mail: 1763318006@qq.com

Qujing, Xundian in Kunming and Binchuan in Dali), with the altitudes spanning from 1 475 m to 2 615 m. **Results** None of the 33 pesticide residues specified in the *Pharmacopoeia of the People's Republic of China* (2020 Edition, ChP) were detected in *P. notoginseng* from all producing areas. However, pesticide residues such as difenoconazole, myclobutanil, enestrobur, mesotrione, diniconazole and other pesticides were detected in medium-altitude regions like Menghai of Banna and Shidian of Baoshan, but the levels did not exceed limits specified in *GB 23200.113-2018 National Food Safety Standard*. The contents of heavy metals (cadmium, mercury, lead, copper and arsenic) in *P. notoginseng* from all producing areas were far below the limits specified by ChP, and the contents of cadmium and lead in *P. notoginseng* in the high-altitude producing areas of Lufeng of Chuxiong, Zhanyi of Qujing and Binchuan of Dali were relatively lower. The ash content in *P. notoginseng* from all producing areas was below the 6% limit specified by ChP, which there was a positive correlation between the altitude of production areas and the ash content of *P. notoginseng*. The leachate content of *P. notoginseng* from all production areas exceeded the 16% stipulated in ChP, the highest leachate content was found in the traditional genuine producing area (Wenshan), while the lowest was in the medium-altitude production areas (Hongta of Yuxi and Menghai of Banna). The contents of monomer saponin and total saponins in *P. notoginseng* from the high-altitude producing areas like Lufeng of Chuxiong, Zhanyi of Qujing, and Xundian of Kunming were significantly higher than from the medium-altitude producing areas like Jianshui of Honghe, Shidian of Baoshan, Hongta of Yuxi, and Menghai of Banna. the percentage of notoginsenoside R<sub>1</sub>, ginsenoside Rg<sub>1</sub> and ginsenoside Rb<sub>1</sub> in *P. notoginseng* from all producing areas was higher than 5% as specified in the ChP, with that from high-altitude areas being higher than that from medium-altitude areas. **Conclusion** *P. notoginseng* in high-altitude production areas has low pesticide residue, high ash and leachate content, and high accumulation of the active ingredient saponin. Therefore, cultivating *P. notoginseng* at high altitudes is conducive to improving the quality of the medicinal herbs.

**Key words:** producing area; high altitude; pesticide residue; heavy metal; saponin; *Panax notoginseng* (Burk) F. H. Chen

海拔是影响药用植物生长和品质的重要生态因子<sup>[1]</sup>。前人研究发现,海拔与药用植物次生代谢产物的含量呈正相关关系<sup>[2]</sup>,高海拔栽培的竹节参 *Panax japonicus* (T. Nees) C. A. Meyer 中人参皂苷含量显著高于低海拔栽培的竹节参<sup>[3]</sup>。然而,在药用植物山萮蓂 *Anisodus tanguticus* (Maxim.) Pascher 中却发现山萮蓂碱的含量随海拔升高而降低<sup>[4]</sup>。因此,海拔对药用植物次生代谢的影响存在物种特异性。同一药用植物在不同海拔栽培,其生长代谢活性和病虫害发生率均存在差异,从而影响生产的中药材灰分、浸出物以及农药残留量、重金属积累等<sup>[5-7]</sup>。茯苓 *Wolfiporia cocos* (F.A. Wolf) Ryvardeen & Gilb 中农药残留量随着海拔升高显著降低<sup>[8]</sup>。薏苡 *Coix lacryma-jobi* L.籽粒中总灰分含量随着海拔升高呈现先降低后升高的趋势,在中海拔区域灰分含量最低<sup>[9]</sup>。瓦松 *Orostachys fimbriata* (Turcz.) A. Berger 浸出物含量与海拔呈正相关关系<sup>[10]</sup>。高海拔地区冬虫夏草 *Stachys geobombycis* C. Y. Wu 的重金属含量显著降低<sup>[11]</sup>。《中国药典》2020年版除了规定药材的有效成分含量外,还对药材灰分、浸出物、农药残留、重金属等指标进行限定<sup>[12]</sup>。

三七 *Panax notoginseng* (Burk.) F. H. Chen 为五加科人参属多年生根茎类药用植物<sup>[13]</sup>。三七富含皂苷、多糖、黄酮等活性成分,在促进血液循

环、止血、减轻炎症以及治疗心血管疾病等方面具有很高的药用价值<sup>[14-15]</sup>。皂苷、多糖、黄酮等成分的含量和比例直接影响着三七的药效和品质<sup>[16-18]</sup>。

《中国药典》2020年版规定,药材三七中(三七皂苷 R<sub>1</sub>+人参皂苷 Rg<sub>1</sub>+人参皂苷 Rb<sub>1</sub>)含量不得低于5%<sup>[12]</sup>。此外,《中国药典》2020年版还对三七农药残留限量、重金属限量、灰分含量、浸出物含量等做出相关规定<sup>[12]</sup>。近年来,由于三七严重的连作障碍<sup>[19]</sup>,加之市场经济利益驱动,导致三七产区由云南文山传统道地产区向云南其他三七适宜区不断扩大<sup>[20]</sup>。研究团队在前期调查研究中发现,商品三七种植80%以上都在海拔2 000 m以上,传统的文山种植区成为了三七种子种苗生产集散地。在中海拔种植区,由于气候温和,三七植株往往生长更为旺盛,叶片较大,根系发育良好;在高海拔种植区,三七植株通常较矮,叶片较小,根系发达程度相对较低<sup>[21]</sup>。1 500~2 000 m的海拔提供了适宜的温度和较强的紫外线辐射,有利于三七中人参皂苷积累<sup>[22]</sup>。当海拔超过2 500 m时,极端的环境条件可能会抑制三七生长,降低其活性成分的含量<sup>[23]</sup>。研究发现三七种植地的海拔与三七块茎中三七皂苷 R<sub>1</sub>、人参皂苷 Rg<sub>1</sub>、人参皂苷 Rb<sub>1</sub>及皂苷总量均成负相关<sup>[24]</sup>。但 Zhang 等<sup>[25]</sup>基于自身的研究结果指出,三七中总皂苷含量随海拔升高显著升高的观点。高海拔产

区的低温环境有助于减缓病虫害的发病率,这不仅能减少生产中农药施用频次和降低三七中农药残留量,还能使有效成分得以充分累积<sup>[26]</sup>。从现有的研究来看,一是前人多基于皂苷含量去评价海拔对三七品质的影响,极少从重金属含量、农药残留量、灰分、浸出物含量与皂苷含量等多维度做综合分析;二是海拔对三七皂苷积累的影响存在争议,皂苷积累对海拔的响应还需要更多的研究;三是前人多基于高低海拔 2 个产区去衡量三七品质,未系统评价云南不同海拔梯度的多产区之间的三七品质。因此,关于云南境内不同海拔的产区间三七品质的比较分析还缺乏系统研究。本研究以不同海拔的产区的三年生三七为实验材料,分别对 208 项农药残留、重金属含量、灰分含量、

浸出物含量及皂苷含量等指标进行比较分析,以期对三七产区扩大后三七的品质评价提供科学数据。

## 1 材料和仪器

### 1.1 材料

在云南不同产区基地采取三年生三七样品,经云南农业大学孟珍贵副教授鉴定为五加科植物三七 *P. notoginseng* (Burk.) F. H. Chen。采样区包括红河建水、保山施甸、玉溪红塔、版纳勐海、文山砚山(传统道地产区)、楚雄禄丰、曲靖沾益、昆明寻甸和大理宾川(表 1) 9 个产区,海拔梯度在 1 475~2 615 m。将道地产区(文山砚山,海拔 1 675 m)作为参照,海拔高于文山砚山的产区为高海拔产区,海拔低于文山砚山的产区为中海拔产区。

表 1 云南省各采样地情况

Table 1 Information of sampling sites in Yunnan province

产地	经纬度	气候类型	年降水量/mm	年均温/℃	海拔/m
红河建水	23°49'~24°2'N 102°39'~102°51'E	南亚热带季风气候	800	18.00	1 475
保山施甸	24°16'~25°00'N 98°54'~99°21'E	山地季风气候	950	13.80	1 580
玉溪红塔	24°08'~24°32'N 102°17'~102°41'E	中亚热带湿润季风气候	920	16.58	1 630
版纳勐海	21°28'~22°28'N 99°56'~100°41'E	热带、亚热带西南季风气候	1 340	18.70	1 670
文山砚山	23°19'~23°59'N 103°35'~104°45'E	亚热带季风气候	960	18.58	1 675
楚雄禄丰	24°51'~25°30'N 101°38'~102°35'E	中亚热带季风气候	910	16.20	1 722
曲靖沾益	25°31'~26°06'N 103°29'~104°14'E	高原季风气候	650	15.15	1 884
昆明寻甸	25°20'~26°01'N 102°41'~103°33'E	北亚热带季风气候	1 050	15.30	2 250
大理宾川	25°54'~26°02'N 100°29'~100°40'E	亚热带季风性气候	930	17.50	2 615

### 1.2 仪器

350X 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS),购于 PerkinElmer 公司; TQS 8000 evo 型气相色谱质谱联用仪(GS-MS-MS),购于 Thermo 公司; TQS 9610 型三重四极杆气质联用仪,购于 Thermo scientific 公司; Agilent 1200 型高效液相色谱仪,美国安捷伦公司。

## 2 方法

### 2.1 农药残留的测定

参考《GB5009.268-2016 食品安全国家标准食品中多元素的测定》<sup>[27]</sup>、《GB23200.113-2018 食品

安全国家标准》<sup>[28]</sup>进行测定。称取供试样品,粉碎成粉末(过三号筛),取约 2 g,精密称定,置 100 mL 具塞锥形瓶中,加水 20 mL 浸泡过夜,丙酮 40 mL,称定质量,超声处理 30 min,放冷,再称定质量,用丙酮补足失去的质量,再加氯化钠约 6 g,二氯甲烷 30 mL,称定质量,超声 15 min,再称定质量,用二氯甲烷补足失去的质量,静置(使分层),将有机相迅速移入装有适量无水硫酸钠的 100 mL 具塞锥形瓶中,放置 4 h。精密量取 35 mL,于 40 ℃ 水浴上减压浓缩至近干,加少量石油醚(60~90 ℃)如前反复操作至二氯甲烷及丙酮除净,用石油醚

(60~90℃)溶解并转移至10 mL具塞刻度离心管中,加入石油醚(60~90℃)精密稀释至5 mL,加入硫酸1 mL,振摇1 min,离心(3 000 r/min)10 min,精密量取上清液2 mL,放置在具有刻度的浓缩瓶中,连接旋转蒸发器,40℃下(或用氮气)将溶液浓缩至适量,精密稀释至1 mL,即得。分别精密吸取供试样品溶液和与之相对应浓度的混合对照品溶液各1 μL,注入气相色谱仪,按外标法计算供试样品中农药残留量。

## 2.2 重金属含量的测定

### 2.2.1 铅的测定(石墨炉法)<sup>[29]</sup>

(1) 对照品溶液的制备:分别精密量取铅标准贮备液适量,用2%硝酸溶液制成含铅0、5、20、40、60、80 ng/mL的对照品溶液。

(2) 供试样品溶液的制备 称取供试样品粗粉0.5 g,精密称定,置聚四氟乙烯消解罐内,加硝酸3~5 mL,混匀,浸泡过夜,盖好内盖,旋紧外套,置适宜的微波消解炉内,进行消解。消解完全后,取消解罐置电热板上缓缓加热至红棕色蒸气挥尽,并继续缓缓浓缩至2~3 mL,放冷,用水转入25 mL量瓶中,并稀释至刻度,摇匀,即得。同法同时制备试剂空白溶液。

(3) 标准曲线方程的绘制 分别精密量取“2.2.1(1)”项对照品溶液1 mL,加1%磷酸二氢铵和0.2%硝酸镁的溶液0.5 mL,混匀,精密吸取20 μL注入石墨炉原子化器,测定吸光度( $A$ )值,以 $A$ 值为纵坐标( $Y$ ),质量浓度为横坐标( $X$ ),绘制标准曲线,标准曲线为 $Y=0.015X+0.0001$ 。

(4) 样品测定 精密量取空白溶液与供试样品溶液各1 mL,加1%磷酸二氢铵和0.2%硝酸镁的溶液0.5 mL,混匀,精密吸取10~20 μL,按照标准曲线的制备项下方法测定 $A$ 值,从标准曲线上读出供试样品溶液中铅的含量,计算,即得。

### 2.2.2 镉的测定(石墨炉法)<sup>[30]</sup>

(1) 对照品溶液的制备:分别精密量取镉标准贮备液适量,用2%硝酸溶液稀释制成分别含镉0、0.8、2.0、4.0、6.0、8.0 ng/mL的溶液。

(2) 供试样品溶液的制备:同“2.2.1(2)”项下供试样品溶液的制备。

(3) 标准曲线方程的绘制:分别精密吸取“2.2.2(1)”项对照品溶液10 μL,注入石墨炉原子化器,测定 $A$ 值,以 $A$ 值为纵坐标( $Y$ ),质量浓度为横坐标( $X$ ),绘制标准曲线,标准曲线为 $Y=0.006X+0.0002$ 。

(4) 样品测定:精密吸取空白溶液与供试样品溶液各10~20 μL,按照标准曲线的制备项下方法测定 $A$ 值,从标准曲线上读出供试样品溶液中镉的含量,计算,即得。

### 2.2.3 砷的测定(氢化物法)<sup>[31]</sup>

(1) 对照品溶液的制备:分别精密量取砷标准贮备液适量,用2%硝酸溶液稀释制成含砷0、5、10、20、30、40 ng/mL的溶液。

(2) 供试样品溶液的制备:同铅测定项下供试样品溶液的制备。

(3) 标准曲线方程的绘制:分别精密量取“2.2.3(1)”项对照品溶液10 mL,置25 mL量瓶中,加25%碘化钾溶液(临用前配制)1 mL,摇匀,加10%抗坏血酸溶液(临用前配制)1 mL,摇匀,用盐酸溶液(20%→100%)稀释至刻度,摇匀,密塞,置80℃水浴中加热3 min,取出,放冷。取适量,吸入氢化物发生装置,测定吸收值,以 $A$ 值为纵坐标( $Y$ ),浓度为横坐标( $X$ ),绘制标准曲线,标准曲线为 $Y=0.015X+0.0003$ 。

(4) 样品测定:精密吸取空白溶液与供试样品溶液各10 mL,照标准曲线的制备项下,自“加25%碘化钾溶液(临用前配制)1 mL”起,依法测定。从标准曲线上读出供试样品溶液中砷的含量,计算,即得。

### 2.2.4 汞的测定<sup>[32]</sup>

(1) 对照品溶液的制备:分别精密量取汞标准贮备液0、0.1、0.3、0.5、0.7、0.9 mL/mL,置50 mL量瓶中,加20%硫酸溶液10 mL、5%高锰酸钾溶液0.5 mL,摇匀,滴加5%盐酸羟胺溶液至紫红色恰消失,用水稀释至刻度,摇匀。

(2) 供试样品溶液的制备:称取供试样品粗粉0.5 g,精密称定,置聚四氟乙烯消解罐内,加硝酸3~5 mL,混匀,浸泡过夜,盖好内盖,旋紧外套,置适宜的微波消解炉内进行消解(按仪器规定的消解程序操作)。消解完全后,取消解内罐放置于电热板上,于120℃缓缓加热至红棕色蒸气挥尽,并继续浓缩至2~3 mL,放冷,加20%硫酸溶液2 mL、5%高锰酸钾溶液0.5 mL,摇匀,滴加5%盐酸羟胺溶液至紫红色恰消失,转入10 mL量瓶中,用水洗涤容器,洗液合并于量瓶中,并稀释至刻度,摇匀,必要时离心,取上清液,即得。同法制备试剂空白溶液。

(3) 标准曲线方程的绘制:取“2.2.4(1)”项

对照品溶液适量,吸入氢化物发生装置,测定 $A$ 值,以 $A$ 值为纵坐标( $Y$ ),质量浓度为横坐标( $X$ ),绘制标准曲线,标准曲线为 $Y=0.003X+0.0002$ 。

(4) 样品测定:精密吸取空白溶液与供试样品溶液适量,按照标准曲线制备项下的方法测定。从标准曲线上读出供试样品溶液中汞的含量,计算,即得。

### 2.2.5 铜的测定(火焰法)<sup>[33]</sup>

(1) 对照品溶液的制备:分别精密量取铜标准贮备液适量,用2%硝酸溶液制成分别含铜0、0.05、0.2、0.4、0.6、0.8  $\mu\text{g/mL}$ 的溶液。

(2) 供试样品溶液的制备:同铅测定项下供试样品溶液的制备。

(3) 标准曲线方程的绘制:取“2.2.5(1)”项对照品溶液适量,依次喷入火焰,测定 $A$ 值,以 $A$ 值为纵坐标( $Y$ ),质量浓度为横坐标( $X$ ),绘制标准曲线,标准曲线为 $Y=0.013X$ 。

(4) 样品测定:精密吸取空白溶液与供试样品溶液适量,按照标准曲线的制备项下的方法测定。从标准曲线上读出供试样品溶液中铜的含量,计算,即得。

## 2.3 灰分含量的测定<sup>[34]</sup>

测定用的供试样品须粉碎,使能通过二号筛,混合均匀后,称取供试样品2~3g,置炽灼至恒定质量的坩埚中,称定质量(准确至0.01g),缓缓炽热,注意避免燃烧,至完全炭化时,逐渐升高温度至500~600 $^{\circ}\text{C}$ ,使完全灰化并至恒定质量。根据残渣质量,计算供试样品中总灰分的含量。如供试样品不易灰化,可将坩埚放冷,加热水或10%硝酸铵溶液2mL,至坩埚内容物完全灰化。

## 2.4 水溶性浸出物含量的测定<sup>[35]</sup>

测定用的供试样品需粉碎,使能通过二号筛,并混合均匀。称取供试样品约2~4g,精密称定,置100~250mL的锥形瓶中,精密加水50~100mL,密塞,称定质量,静置1h后,连接回流冷凝管,加热至沸腾,并保持微沸1h。放冷后,取下锥形瓶,再称定质量,用水补足减失的质量,摇匀,用干燥滤器滤过,精密量取滤液25mL,置已干燥至恒定质量的蒸发皿中,在水浴上蒸干后,于105 $^{\circ}\text{C}$ 干燥3h,置干燥器中冷却30min,迅速精密称定质量。除另有规定外,以干燥品计算供试样品中水溶性浸出物的含量。

## 2.5 皂苷含量的测定

参考《中国药典》2020年版<sup>[12]</sup>测定三七皂苷 $R_1$

和人参皂苷 $R_{g_1}$ 、 $R_e$ 、 $R_{b_1}$ 、 $R_d$ 5种皂苷的含量。

2.5.1 对照品溶液的制备 精密称取适量三七皂苷 $R_1$ 和人参皂苷 $R_{g_1}$ 、 $R_e$ 、 $R_{b_1}$ 、 $R_d$ 对照品,甲醇溶解定容至10mL,混匀,得三七皂苷 $R_1$ 和人参皂苷 $R_{g_1}$ 、 $R_e$ 、 $R_{b_1}$ 、 $R_d$ 质量浓度为0.4、0.4、0.2、0.1、0.1mg/mL的混合对照品溶液,并4 $^{\circ}\text{C}$ 保存备用。

2.5.2 供试品溶液的制备 以《中国药典》2020年版<sup>[12]</sup>关于三七皂苷含量测定的方法,称取三七粉样品0.30g,30mL甲醇浸泡30min,超声1h,甲醇定容至50mL,混匀,静置30min,有机滤膜过滤,取滤液得供试样品溶液。

2.5.3 色谱条件 使用Agilent Zorbax SB-C<sub>18</sub>(250mm $\times$ 4.6mm,5 $\mu\text{m}$ )色谱柱在安捷伦高效液相色谱仪(Agilent 1260,美国)对样品三七皂苷含量测定,流动相为水(A)-乙腈(B),梯度洗脱;0~3min,85%A,3~20min,85%~79%A,20~47min,79%~45%A,47~55min,45%~15%A。体积流量0.5mL/min;柱温35 $^{\circ}\text{C}$ ;进样量5 $\mu\text{L}$ 。

2.5.4 样品的测定 按照外标法计算样品中三七皂苷 $R_1$ 和人参皂苷 $R_{g_1}$ 、 $R_e$ 、 $R_{b_1}$ 、 $R_d$ 5种皂苷的含量。

## 2.6 数据处理

用SPSS26.0软件对数据进行单因素方差分析(One-way-ANOVA),差异性显著分析及进行聚类分析,GraphPad Prism 8和Origin 2021等软件作图。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同产区三七农药残留量比较分析

所有产区三七中均未检测出《中国药典》2020年版规定的禁用33项农药残留。部分产区检测出苯醚甲环唑、啶酰菌胺、腐霉利、腈菌唑、肟菌酯、戊唑醇、烯唑醇、异菌脲等农药残留,但农药残留量均未超过《GB 23200.113-2018 食品安全国家标准》规定的限量(表2)。

### 3.2 不同产区三七重金属含量评价

9个产区采集到的三七样品中重金属(镉、汞、铅、铜、砷)含量都远低于《中国药典》2020年版规定的限量。不同产区三七重金属积累也存在差异(表3)。昆明寻甸产区三七中镉(0.53mg/kg)、铅(2.45mg/kg)、砷(1.56mg/kg)的含量最高;楚雄禄丰产区三七中铜(2.16mg/kg)、砷(0.11mg/kg)含量最低;版纳勐海产区三七中铜含量(11.43mg/kg)最高,但镉(0.05mg/kg)含量最低。

表 2 不同产区检测出的农药残留情况

Table 2 Pesticide residues detected in different producing areas

产地	质量分数/(mg·kg <sup>-1</sup> )							
	苯醚甲环唑	啉酰菌胺	腐霉利	腈菌唑	肟菌酯	戊唑醇	烯唑醇	异菌脲
红河建水		0.03	0.03					
保山施甸			0.04					0.04
玉溪红塔		0.03	0.03					
版纳勐海	0.03	0.04	0.02	0.04	0.01	0.03	0.03	0.01
文山砚山			0.03					0.03
楚雄禄丰		0.04	0.04					
曲靖沾益			0.04					0.03
昆明寻甸		0.03	0.04					
大理宾川			0.04				0.10	0.01
限量	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

表 3 不同产区重金属情况

Table 3 Heavy metals in different producing areas

产地	质量分数/(mg·kg <sup>-1</sup> )				
	镉	汞	铅	铜	砷
红河建水	0.45	0.02	2.13	4.70	0.10
保山施甸	0.21	0.01	0.19	2.45	0.19
玉溪红塔	0.41	0.02	2.33	4.92	1.10
版纳勐海	0.05	0.01	0.39	11.43	0.77
文山砚山	0.19	0.01	0.17	3.26	0.22
楚雄禄丰	0.11	0.01	0.19	2.16	0.11
曲靖沾益	0.25	0.01	0.13	3.55	0.19
昆明寻甸	0.53	0.02	2.45	5.12	1.56
大理宾川	0.07	0.01	0.55	6.63	0.31
限量	1.00	0.20	5.00	20.00	2.00

### 3.3 不同产区对三七灰分含量的影响

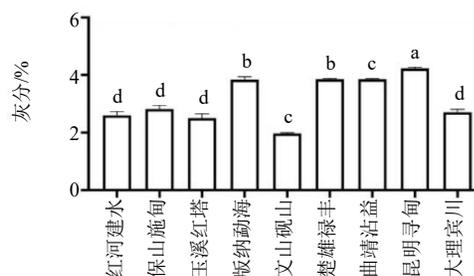
9个产区三七中灰分含量均低于《中国药典》2020年版的规定(6%)。根据不同产区灰分含量占比情况看,昆明寻甸三七中灰分含量最高,达到4.2%,传统道地产区文山砚山中三七的灰分含量最低,为2.3%(图2)。

### 3.4 不同产区间三七水溶性浸出物评价

在不同产区三七的水溶性浸出物含量都大于《中国药典》2020年版规定的16%,其中传统产区文山砚山三七中溶性浸出物最高(26%),曲靖沾益产区三七最低(17%)(图3)。总之,传统道地产区文山三七的水溶性浸出物含量都远远高于其他产区三七,昆明寻甸、大理宾川等高海拔产区三七的水溶性浸出物含量都是显著高于玉溪红塔、版纳勐海等中海拔产区。

### 3.5 不同产区间三七主根皂苷含量评价

不同产区间三七皂苷积累存在显著差异(表4,



不同字母表示差异显著,  $P < 0.05$ , 下同。

Different letters showed significant difference,  $P < 0.05$ , same as below.

图 2 不同产区灰分含量占比

Fig. 2 Percentage of ash content in different producing areas

图4、5)。昆明寻甸、楚雄禄丰、曲靖沾益等高海拔产区三七的三七皂苷  $R_1$  的含量显著高于其他产区(表4)。昆明寻甸、楚雄禄丰、曲靖沾益等高海拔产区三七的三七皂苷  $R_{g1}$  的含量显著高于红河建

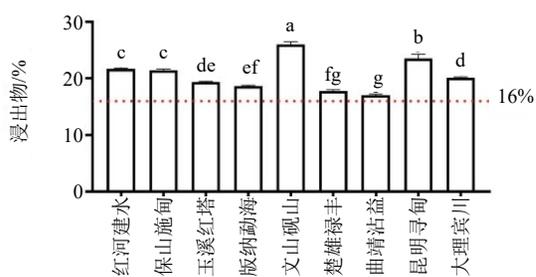


图3 不同产区浸出物含量占比

Fig. 3 Percentage of leachate content from different producing areas

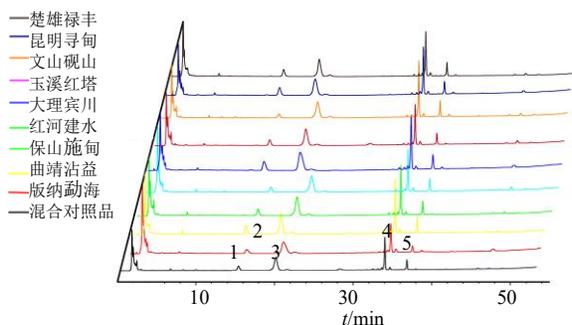
表4 三七不同产区皂苷含量

Table 4 Saponin contents of *P. notoginseng* from different producing areas

采样地	三七皂苷 R <sub>1</sub> /%	人参皂苷 R <sub>g<sub>1</sub></sub> /%	人参皂苷 Re/%	人参皂苷 R <sub>b<sub>1</sub></sub> /%	人参皂苷 R <sub>d</sub> /%
红河建水	1.03±0.05 cd	2.03±0.11 b	0.24±0.01 c	1.88±0.10 d	0.21±0.01 c
保山施甸	1.25±0.01 bc	2.13±0.02 b	1.25±0.01 a	2.14±0.02 c	0.22±0.01 c
玉溪红塔	0.85±0.03 d	1.99±0.03 bc	0.23±0.01 c	2.60±0.04 bc	0.27±0.01 b
版纳勐海	1.02±0.01 cd	1.88±0.03 c	0.37±0.11 c	1.91±0.04 cd	0.18±0.01 d
文山砚山	1.11±0.01 c	1.96±0.02 bc	0.18±0.01 d	1.86±0.02 d	0.22±0.01 c
楚雄禄丰	1.92±0.06 ab	2.92±0.06 a	0.52±0.02 b	2.85±0.06 b	0.25±0.01 b
曲靖沾益	1.18±0.04 c	2.65±0.05 ab	0.31±0.01 c	3.02±0.07 a	0.35±0.01 a
昆明寻甸	2.11±0.48 a	2.93±0.36 a	0.30±0.04 c	2.22±0.08 c	0.21±0.04 c
大理宾川	1.25±0.02 bc	1.67±0.09 d	0.70±0.06 b	1.77±0.02 d	0.18±0.01 d

同一列不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Different letters in the same column indicate significant differences ( $P < 0.05$ ).



1-三七皂苷 R<sub>1</sub>; 2-人参皂苷 R<sub>g<sub>1</sub></sub>; 3-人参皂苷 Re; 4-人参皂苷 R<sub>b<sub>1</sub></sub>; 5-人参皂苷 R<sub>d</sub>。

1-notoginsenoside R<sub>1</sub>; 2-ginsenoside R<sub>g<sub>1</sub></sub>; 3-ginsenoside Re; 4-ginsenoside R<sub>b<sub>1</sub></sub>; 5-ginsenoside R<sub>d</sub>。

图4 不同产区三七皂苷含量测定的 HPLC 色谱图

Fig. 4 HPLC chromatograms for determination of saponin contents in *P. notoginseng* from different producing areas

规定的 5%<sup>[12]</sup>。曲靖沾益、楚雄禄丰、昆明寻甸、文山砚山、大理宾川等产区(三七皂苷 R<sub>1</sub>+人参皂苷 R<sub>g<sub>1</sub></sub>+人参皂苷 R<sub>b<sub>1</sub></sub>)含量显著高于保山施甸、玉溪红塔、红河建水和版纳勐海等产区。(三七皂苷 R<sub>1</sub>+人参皂苷 R<sub>g<sub>1</sub></sub>+人参皂苷 R<sub>b<sub>1</sub></sub>)含量整体上呈现高海

水、玉溪红塔等中海拔产区。保山施甸、大理宾川产区三七的三七皂苷 Re 的含量显著高于其他产区。曲靖沾益、昆明寻甸高海拔产区三七的三七皂苷 R<sub>b<sub>1</sub></sub> 的含量显著高于其他产区。昆明寻甸、曲靖沾益等高海拔产区三七的三七皂苷 R<sub>d</sub> 的含量显著高于版纳勐海等中海拔产区。总之，楚雄禄丰、昆明寻甸、曲靖沾益等高海拔产区三七中三七皂苷 R<sub>1</sub>、人参皂苷 R<sub>g<sub>1</sub></sub>、Re、R<sub>b<sub>1</sub></sub>、R<sub>d</sub> 含量都显著高于版纳勐海、红河建水等中海拔产区。

不同产区三七中(三七皂苷 R<sub>1</sub>+人参皂苷 R<sub>g<sub>1</sub></sub>+人参皂苷 R<sub>b<sub>1</sub></sub>)含量都高于《中国药典》2020 年版

拔产区三七大于中海拔产区三七，高海拔产区三七中(三七皂苷 R<sub>1</sub>+人参皂苷 R<sub>g<sub>1</sub></sub>+人参皂苷 R<sub>b<sub>1</sub></sub>)含量均在 5.31%~7.69% (图 5-A)。曲靖沾益、楚雄禄丰、昆明寻甸等高海拔产区三七中总皂苷含量(三七皂苷 R<sub>1</sub>+人参皂苷 R<sub>g<sub>1</sub></sub>+人参皂苷 R<sub>b<sub>1</sub></sub>+人参皂苷 Re+人参皂苷 R<sub>d</sub>)远高于其他产区，但大理宾川产区(高海拔)三七其总皂苷含量略低于曲靖沾益、楚雄禄丰和昆明寻甸产区。

### 3.6 不同产区对各指标的综合分析

基于云南 9 个产区三七重金属、灰分、浸出物、皂苷等数据进行聚类分析(图 6)。9 个产区依据重金属含量大致分为 3 个类群，类型 I 主要分布在楚雄禄丰、昆明寻甸、保山施甸等高海拔产区；类型 II 主要分布在大理宾川、版纳勐海、文山砚山、曲靖沾益等产区，主要特点是三七重金属(如铜、砷)含量较高；类型 III 主要分布在红河建水、玉溪红塔等产区，主要特点是三七重金属(如汞、铅)含量较高(图 6-A)。9 个产区依据灰分含量大致分为 3 个类群，类型 I 主要分布在楚雄禄丰、曲靖沾益、保山施甸、玉溪红塔、版纳勐海和红河建水等产区，其

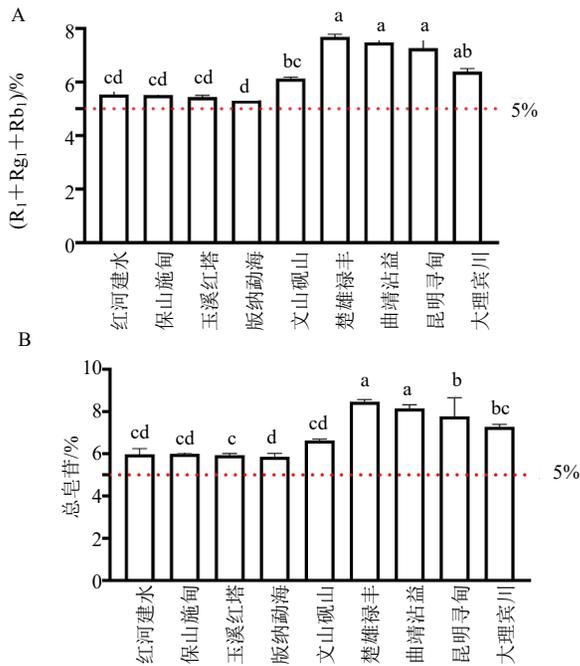
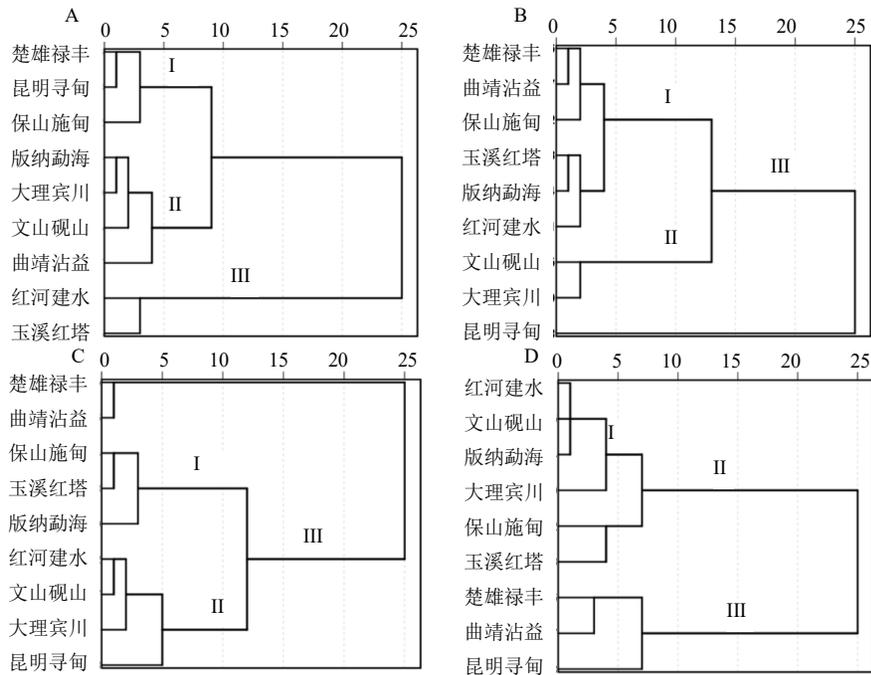


图5 三七不同产区皂苷百分含量

Fig. 5 Percentage of saponins in *P. notoginseng* from different producing areas

主要特点是三七灰分含量接近所有产区三七的平均值；类型II主要分布在文山砚山和大理宾川等产区，其主要特点是三七灰分含量低；类型III主要分布在昆明寻甸，其三七灰分含量远高于其他产区（图6-B）。9个产区的依据浸出物含量大致分为3个类群，类型I主要分布在昆明寻甸、版纳勐海、大理宾川等产区，其主要特点是三七浸出物含量接近所有产区的平均值；类型II主要分布在保山施甸、曲靖沾益、红河建水和玉溪红塔等产区，主要特点是三七浸出物含量相对较低；类型III主要分布在楚雄禄丰和文山砚山产区，主要特点是三七浸出物含量最高（图6-C）。在9个产区皂苷含量（图6-D）聚类分析中，类型I主要分布在红河建水、文山砚山、版纳勐海、大理宾川等产区，其主要特点是三七皂苷含量较为平均，接近所有产区三七的平均值；类型II主要分布在玉溪红塔和保山施甸产区，其主要特点是三七皂苷含量较低；类型III主要分布楚雄禄丰、曲靖沾益、昆明寻甸等高海拔产区，其主要特点是三七皂苷含量最高。从整个聚类分析上看，云南9



A-重金属; B-灰分; C-浸出物; D-皂苷。  
A-heavy metals; B-ash; C-leachate; D-saponin.

图6 三七不同产区各参数聚类分析

Fig. 6 Cluster analysis of various parameters of *P. notoginseng* from different producing areas

个产区三七重金属、灰分、浸出物、皂苷聚类分析中，大理宾川、昆明寻甸等高海拔产区聚为一簇，红河建

水，版纳勐海、玉溪红塔等中海拔产区聚为一簇。进一步分析三七不同产区间重金属、农药残留（只分析

检测出的 8 项农残)、皂苷、灰分、浸出物之间的相关性(图 7)。结果表明, 腐霉利与汞, 啶酰菌胺与三七皂苷  $R_1$ 、人参皂苷  $R_{g1}$ , 灰分含量与  $R_1$ 、 $R_{g1}$ , 啶酰菌胺与灰分含量, 灰分含量与总皂苷含量之间存在正相关关系。皂苷与农残、灰分之间的正相关性较高。汞与异菌脲存在显著负相关关系。 $R_{b1}$ 与镉、铜、砷, 灰分含量与铜之间也存在负相关关系。

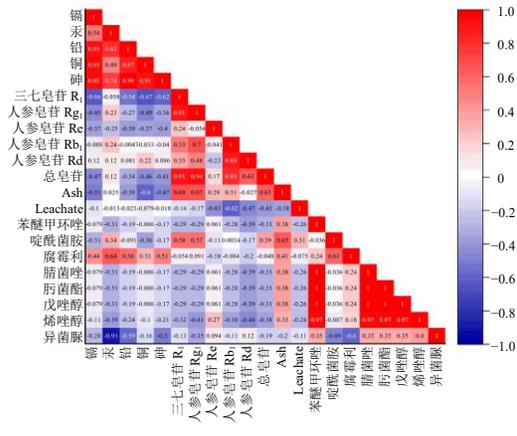


图 7 不同产区下三七各参数的相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis of various parameters of *P. notoginseng* from different producing areas

选取 23 个指标进行主成分分析, 贡献率分别为 PC1 (31.0%) 和 PC2 (24.1%)。皂苷含量、农药残留量和重金属含量的权重系数较大, 其中,  $R_1$ 、 $R_{g1}$ 、 $R_1+R_{g1}+R_{b1}$  和总皂苷含量与 PC1 呈正相关, 对 PC1 贡献较大, 农药残留与 PC1 呈负相关; 重金属含量与 PC2 呈负相关, 对 PC2 贡献较大。通过主成分分析表明不同产区海拔对三七皂苷含量的影响最大(图 8)。

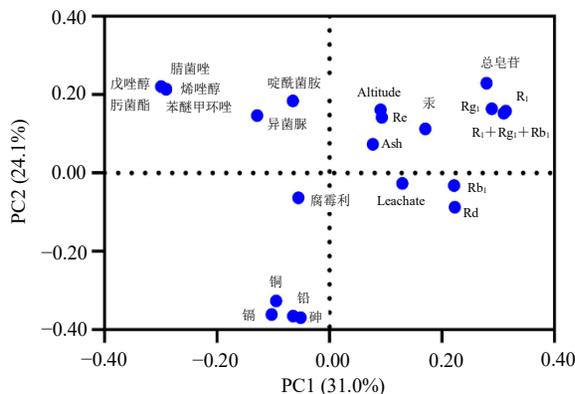


图 8 不同产区下三七中各参数的 PCA

Fig. 8 PCA of various parameters of *Panax notoginseng* from different producing areas

## 4 讨论

### 4.1 高海拔三七农药残留量低

《中国药典》2020 年版规定药材及饮片(植物类)中甲胺磷、甲基对硫磷、对硫磷、六六六等 33 种禁用农药不得检出, 并对其限量进行规定<sup>[12]</sup>。在本研究中, 云南 9 个产区三七中均未检测出《中国药典》2020 年版禁用的 33 项农药残留。部分产区检测出苯醚甲环唑、啶酰菌胺、腐霉利、腈菌酯、戊唑醇、烯唑醇、异菌脲等农药残留, 但农药残留量均未超过《GB 23200.113-2018 食品安全国家标准》规定的限量(表 2)。这与前人研究发现高海拔产区灵芝 *Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst、烟草 *Nicotiana tabacum* L.、人参 *Panax ginseng* C. A. Mey 的农药残留量显著低于中、低海拔产区药材的研究结果一致<sup>[36-38]</sup>。推测这可能是由于高海拔产区的气候条件干燥, 气温较低, 降雨量较少, 减少了病虫害的发病率, 减少了栽培过程中农药使用量和频率减少, 从而降低高海拔产区药材农药残留量<sup>[39]</sup>。低温降低药用植物的发病率, 这在药用植物丹参 *Salvia miltiorrhiza* Bunge、黄花蒿 *Artemisia annua* L. 中均得证实<sup>[40]</sup>。同时, 前人在高海拔种植的伸筋草 *Pothos chinensis* (Raf.) Merr 中发现农药使用量和频率显著低于低海拔种植的伸筋草<sup>[41]</sup>。因此, 高海拔低温环境可能降低三七的发病率, 减少三七的农药残留量, 从而提高三七的品质。

### 4.2 产区海拔对三七重金属残留量无显著影响

《中国药典》2020 年版对三七重金属含量(铅 $\leq 5$  mg/kg、镉 $\leq 1$  mg/kg、砷 $\leq 2$  mg/kg、汞 $\leq 0.2$  mg/kg、铜 $\leq 20$  mg/kg)做出限定<sup>[12]</sup>。9 个产区三七的重金属含量均未超过《中国药典》2020 年版标准, 昆明寻甸高海拔产区三七中镉、铅、砷含量最高, 版纳勐海中海拔产区三七中铜含量最高、镉含量最低(表 3)。然而, 本研究中不同产区三七中都检测出不同种类重金属含量, 这可能是云南作为重金属王国, 土壤本身重金属含量高所导致<sup>[42]</sup>。这在云南道地药用植物灯盏花 *Erigeron breviscapus* (Vaniot) Hand.-Mazz、云当归 *Angelica sinensis* (Oliv.) Diels 中均发现重金属含量高这一特性, 特别是镉含量较高<sup>[43-44]</sup>。前人研究发现, 当海拔高于 1 000 m, 茶叶 *Camellia sinensis* (L.) Kuntze 中铅含量会显著降低<sup>[45]</sup>。高海拔产区种植桔梗 *Platycodon grandiflorus* (Jacq.) A. DC 会降低桔梗的砷、汞、铅、铜、镉等重金属的含量<sup>[46]</sup>。而低海拔种植的全草类药用植物山银花

*Lonicera confuse* (Sweet) DC.、桔梗中砷、镉、铜等重金属含量显著高海拔种植<sup>[47-48]</sup>。因此,海拔对药材的影响受药材产地土壤重金属特性、药材种类(如根茎类或全草类)等诸多因素的影响。

#### 4.3 高海拔昼夜温差较大可能提高三七灰分与浸出物含量

《中国药典》2020年版对三七灰分( $\leq 6\%$ )和浸出物( $\geq 16\%$ )做出限定<sup>[12]</sup>。本研究9个产区灰分和浸出物均符合《中国药典》2020年版标准。高海拔产区(如昆明寻甸、楚雄禄丰)三七灰分含量显著高于中海拔产区,而且高海拔产区昆明寻甸及传统道地产区文山砚山三七浸出物含量远高于中海拔产区(图2、3)。这与前人研究表明委陵菜 *Potentilla chinensis* Ser. 和兔耳草 *Lagotis glauca* Gaertn 中灰分含量与浸出物含量随海拔的升高而增加的这一研究结果类似<sup>[49-50]</sup>。高海拔产区气温低,昼夜温差大,有利于药用植物体内灰分与浸出物等物质的积累,这在药用植物小檗 *Berberis amurensis* Rupr. 中均得到证实<sup>[51]</sup>。因此,海拔与药用植物灰分和浸出物呈正相关关系。高海拔较大的昼夜温差能提高三七灰分和浸出物含量,且均符合《中国药典》2020年版规定。

#### 4.4 皂苷高积累是三七适应高海拔环境的生存策略

海拔能影响植物次生代谢物合成和积累<sup>[52]</sup>。高海拔地区昼夜温差大,光照充足,紫外线强烈,能促进淫羊藿 *Epimedium brevicornu* Maxim 黄酮含量积累<sup>[53]</sup>。高海拔环境促进葛根 *Pueraria edulis* Pamp 中多糖的合成与积累<sup>[54]</sup>。同时,在对不同海拔的滇黄精 *Polygonatum kingianum* Collett & Hemsl 与柴胡 *Bupleurum chinense* Franch 皂苷含量比较时发现,低海拔地区皂苷显著低于高海拔地区<sup>[55-56]</sup>。因此,高海拔产区低温、低氧、高紫外线等环境胁迫更有利于药用植物次生代谢产物的积累。在本研究中发现,楚雄禄丰、昆明寻甸、曲靖沾益等高海拔产区三七皂苷 R<sub>1</sub>、人参皂苷 Rg<sub>1</sub>、Re、Rb<sub>1</sub>、Rd 含量都显著高于版纳勐海、红河建水等中海拔产区,总皂苷含量在曲靖沾益和楚雄禄丰产区最高(表4和图4、图5)。云南9个产区三七皂苷含量均高于《中国药典》2020年版限量5%<sup>[12]</sup>,且高海拔产区三七皂苷含量显著高于中海拔产区(图5)。这与周建松等<sup>[57]</sup>研究发现高海拔(1800 m)三七中总皂苷含量显著高于低海拔(1200 m)三七,表明高海拔三七品质更好的结果一致。高海拔种植能提高药用植物

体内次生代谢产物皂苷的积累这一研究结果在人参属药用植物西洋参 *Panax quinquefolius* L.、人参中均得已证实<sup>[58-60]</sup>

近年来,越来越多的研究表明,合成和积累次生代谢产物是药用植物最重要的防御环境胁迫的策略<sup>[61-62]</sup>。UV-B 辐射可显著促进银杏 *Ginkgo biloba* L. 中类黄酮的积累,增强抗逆性<sup>[63]</sup>。植物体内黄酮类和萜类化合物的积累,有利于植物适应低温环境<sup>[64]</sup>。本研究中,高海拔产区三七皂苷含量显著高于中海拔产区(图5)。推测高海拔产区的三七中较高皂苷积累可能是为了适应高海拔低温、低氧、高辐射的环境胁迫,增强三七的抗逆性。同时,前人研究发现青藏高原野生种质资源丹参近缘种栗色鼠尾草 *Salvia castanea* Diels 通过次生代谢物丹参酮 II<sub>A</sub> 和迷迭香酸的高积累实现了其高原适应性<sup>[65]</sup>。因此,三七通过皂苷的高积累来适应高海拔低温、低氧、高紫外线、强光照的环境。

不同产区的海拔高度显著影响三七的品质。高海拔产区三七的农药残留量低,灰分与浸出物含量较高,但产区海拔对三七重金属残留量无显著影响;高海拔更有利于三七有效成分皂苷的积累。因此,三七种植区从传统道地产区(文山)向高海拔产区转移,不仅没有降低三七的品质,还缓解了传统产区的用地压力。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

#### 参考文献

- [1] 王树生, 杨军文, 邓重梨, 等. 仙茅有效成分含量与土壤因子相关性研究 [J]. 中国野生植物资源, 2023, 42(9): 53-60.
- [2] 于靖. 杜仲种质资源及其果实质量评价 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [3] 张文丽, 吴浩, 梅宇晨, 等. 基于稳定同位素技术的竹节参产地识别研究 [J]. 中草药, 2020, 51(23): 6070-6076.
- [4] 乔传卓, 苏中武. 影响生药品质的几个生物学因素 [J]. 国外医学. 药学分册, 1985, 12(4): 197-204.
- [5] 苏宏娜. 伊血安颗粒的方中药材“滇桂艾纳香”质量评价研究 [D]. 成都: 西南民族大学, 2022.
- [6] 潘晨曦, 陈健苗, 吕伟旗. 柳叶白前多糖、醇溶性浸出物含量测定与相关性分析 [J]. 浙江中西医结合杂志, 2017, 27(6): 531-535.
- [7] 钟兰. 复方鲜竹沥液挥发性成分及质量标准提升研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- [8] 陈丹红. 茯苓松茸栽培中农药残留控制研究 [J]. 中国

- 食用菌, 2017, 36(1): 75-79.
- [9] 敖茂宏, 宋智琴. 不同海拔高度对薏苡农艺性状及药用品质的影响 [J]. 时珍国医国药, 2022, 33(11): 2743-2745.
- [10] 李梦璐, 陈芝华, 吕伟旗, 等. 23 个产地瓦松槲皮素、山柰素与醇溶性浸出物含量测定 [J]. 浙江中西医结合杂志, 2018, 28(9): 801-804.
- [11] 王钢力, 金红宇, 韩小萍, 等. 冬虫夏草药材的质量研究及存在问题 [J]. 中草药, 2008, 39(1): 115-118.
- [12] 中国药典 [S]. 四部. 2020: 56.
- [13] Qian H H, Zhao Y M, Wang Y M, *et al.* ATR induces hepatic lipid metabolism disorder in rats by activating IRE1 $\alpha$ /XBP1 signaling pathway [J]. *Toxicology*, 2024, 501: 153696.
- [14] Liu H B, Lu X Y, Hu Y, *et al.* Chemical constituents of *Panax ginseng* and *Panax notoginseng* explain why they differ in therapeutic efficacy [J]. *Pharmacol Res*, 2020, 161: 105263.
- [15] 陈卓彬. 三七皂苷 R<sub>1</sub> 防治心血管疾病的研究进展 [J]. 现代药物与临床, 2023, 38(4): 1003-1007.
- [16] 冯晓异, 赵微, 何朋伦, 等. 三七总皂苷调节 iNOS-NO-NF- $\kappa$ B 信号通路抑制 LPS 诱导的 RAW246.7 细胞炎症研究 [J]. 药物评价研究, 2020, 43(4): 670-675.
- [17] Zheng Y J, Xia P G, Zhao H G, *et al.* Suitable soil moisture contents for water use efficiency and saponins accumulation in *Panax notoginseng* [J]. *Chin Herb Med*, 2021, 13(2): 267-273.
- [18] 刘永姝, 李新, 韩梁, 等. “伤科要药” 三七在骨伤与创伤中的研究进展 [J]. 中草药, 2024, 55(5): 1738-1750.
- [19] Qiao Y J, Zhang J J, Shang J H, *et al.* GC-MS-based identification, and statistical analysis of liposoluble components in the rhizosphere soils of *Panax notoginseng* [J]. *RSC Adv*, 2019, 9(36): 20557-20564.
- [20] Liu P, Wang J, Li Q, *et al.* Rapid identification, and quantification of *Panax notoginseng* with its adulterants by near infrared spectroscopy combined with chemometrics [J]. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*, 2019, 206: 23-30.
- [21] 郑冬梅, 王丽, 欧小宏, 等. 三七传统产区和新产区植株农艺性状比较及相互关系研究 [J]. 中国中药杂志, 2014, 39(4): 558-565.
- [22] 杨鹤, 宋述尧, 许永华, 等. 人参三萜皂苷的研究进展及其生态学作用 [J]. 中草药, 2017, 48(8): 1692-1698.
- [23] 杨勇, 梁文, 赵亮庆, 等. 不同产地三七总皂苷和土壤矿质元素、水质的相关性分析 [J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2023, 45(6): 1331-1339.
- [24] Mohanan P, Subramaniam S, Mathiyalagan R, *et al.* Molecular signaling of ginsenosides Rb<sub>1</sub>, Rg<sub>1</sub>, and Rg<sub>3</sub> and their mode of actions [J]. *J Ginseng Res*, 2018, 42(2): 123-132.
- [25] Zhang F X, Tang S J, Zhao L, *et al.* Stem-leaves of *Panax* as a rich and sustainable source of less-polar ginsenosides: Comparison of ginsenosides from *Panax ginseng*, American ginseng, and *Panax notoginseng* prepared by heating and acid treatment [J]. *J Ginseng Res*, 2021, 45(1): 163-175.
- [26] 王乐意, 李长河, 刘明政, 等. 中药材干燥技术与装备研究现状 [J/OL]. 农业工程学报: 1-27 [2024-03-02]. <https://cn.bing.com/search?q>.
- [27] 食品安全国家标准 [S]. 2017: 26.
- [28] 食品安全国家标准 植物源性食品中 208 种农药及其代谢物残留量的测定 气相色谱-质谱联用法 [S]. 2018: 56.
- [29] Liu D H, Xu N, Wang L, *et al.* Effects of different cleaning treatments on heavy metal removal of *Panax notoginseng* (Burk) F. H. Chen [J]. *Food Addit Contam Part A*, 2014, 31(12): 2004-2013.
- [30] 王姣姣, 徐迪辉, 周婧, 等. 电感耦合等离子体质谱分析不同来源珍珠粉中无机元素含量 [J]. 中药材, 2021, 44(11): 2612-2617.
- [31] 王书娟, 胡军华, 姚雪, 等. 地龙药材及其处方制剂散寒化湿颗粒中总砷及砷形态研究 [J]. 中草药, 2024, 55(5): 1502-1509.
- [32] 冯光泉, 张文斌, 陈中坚, 等. 三七及其栽培土壤中几种重金属元素含量的测定 [J]. 中草药, 2003, 34(11): 1051-1054.
- [33] 段娜环. 基于三七趁鲜蒸制饮片的产品开发及其质量评价 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023.
- [34] 刘淑聪, 王小营, 张丽, 等. 三七总灰分与酸不溶性灰分的标准值及不确定度评价 [J]. 医药导报, 2012, 31(2): 195-198.
- [35] 王苗苗, 周雅倩, 顾涓, 等. 中药特色临方炮制品种挖掘: 胆黄连饮片的炮制工艺及质量标准研究 [J]. 中草药, 2023, 54(22): 7421-7428.
- [36] 董林林, 张照宇, 刘丛盛, 等. 以人参和三七为例浅析品质中药材质量标准现状 [J]. 环球中医药, 2022, 15(12): 2289-2296.
- [37] 陈初. 现代烟草农业基地单元评价筛选模式研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014.
- [38] 马伟, 王振月, 张连学, 等. 影响人参药材品质的因素分析 [J]. 中国现代中药, 2012, 14(9): 44-47.
- [39] 贾湃湃, 李佳媚, 李继荣, 等. 不同地区青裸的农药残留分析及慢性膳食暴露评估 [J]. 现代食品科技, 2021, 37(9): 305-312.
- [40] 安昌, 陆琳, 沈梦千, 等. 植物 bHLH 基因家族研究进

- 展及在药用植物中的应用前景 [J]. 生物技术通报, 2023, 39(10): 1-16.
- [41] 邹桂欣, 尤献民, 王光函. 伸筋草中重金属和农药残留量分析 [J]. 中国药业, 2012, 21(24): 49-50.
- [42] Cakaj A, Drzewiecka K, Hanć A, *et al.* Plants as effective bioindicators for heavy metal pollution monitoring [J]. *Environ Res*, 2024, 256: 119222.
- [43] 鲁泽刚, 卢迎春, 龙光强, 等. 云南省灯盏花重金属污染现状调查分析 [J]. 中药材, 2018, 41(1): 37-42.
- [44] 张兴盈. 云当归冻干加工工艺及质量标准研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- [45] 王刚. 西湖区不同茶园茶叶铅含量及其来源研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [46] 姜登军, 黄娇. 三峡库区不同海拔高度桔梗中重金属的含量测定与分析 [J]. 中国药房, 2017, 28(12): 1687-1691.
- [47] 黄娇, 姜登军. 多指标综合评价重庆不同产区桔梗药材的质量 [J]. 江苏农业科学, 2016, 44(6): 389-393.
- [48] 周蓓. 重庆道地药材山银花、青蒿和黄连主要有效成分与微量元素含量评价及相关性分析 [D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [49] 王海霞, 苑祥, 邢书银, 等. 藏药短管兔耳草质量控制方法研究 [J]. 时珍国医国药, 2016, 27(10): 2353-2356.
- [50] 林洁, 赵致, 罗春丽, 等. 贵州引种三七的品质分析 [J]. 时珍国医国药, 2020, 31(9): 2226-2228.
- [51] 向前胜, 张登山, 王宁, 等. 不同海拔对西北小檗体内小檗碱含量的影响研究 [J]. 青海农林科技, 2023(2): 17-20.
- [52] Liu Y H, Li Y M, Liu Z, *et al.* Integrated transcriptomic and metabolomic analysis revealed altitude-related regulatory mechanisms on flavonoid accumulation in potato tubers [J]. *Food Res Int*, 2023, 170: 112997.
- [53] 张丽, 党强维, 鲁会杰, 等. 淫羊藿中异戊烯基黄酮的鉴别和含量测定的综合实验设计 [J]. 甘肃高师学报, 2024, 29(2): 73-78.
- [54] 裴莉昕, 陈琳, 王锴乐, 等. 基于“气候因子-成分含量-抗氧化能力”评价不同产地葛根品质关系 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2024, 30(10): 140-148.
- [55] 刘嘉灏. 不同产地滇黄精品质与生态因子和根际微生物相关性研究 [D]. 大理: 大理大学, 2023.
- [56] 刘计权, 刘佳宁, 王宇, 等. 山西不同产地柴胡皂苷含量与生态因子的相关性研究 [J]. 中国野生植物资源, 2023, 42(2): 57-61.
- [57] 周建松, 胡展育, 詹云静, 等. 地形因素与三七的皂苷含量关系分析 [J]. 红河学院学报, 2020, 18(5): 153-156.
- [58] Zhou X, Chen L L, Xie R F, *et al.* Chemosynthesis pathway and bioactivities comparison of saponins in Radix and flower of *Panax notoginseng* (Burk.) F.H. Chen [J]. *J Ethnopharmacol*, 2017, 201: 56-72.
- [59] 李春燕. 林下西洋参生长发育及人参皂苷积累进程研究 [D]. 昆明: 云南农业大学, 2023.
- [60] 达热卓玛, 徐一达, 沈婧. 韭菜子皂苷的提取与抗疲劳作用 [J]. 中华养生保健, 2023(18): 8-12.
- [61] Li Q Q, Duncan S S, Li Y P, *et al.* Decoding plant specialized metabolism: New mechanistic insights [J]. *Trends Plant Sci*, 2024, 29(5): 535-545.
- [62] Pang Z Q, Chen J, Wang T H, *et al.* Linking plant secondary metabolites and plant microbiomes: A review [J]. *Front Plant Sci*, 2021, 12: 621276.
- [63] 冯凯, 陈颖, 刘瑞, 等. 银杏类黄酮代谢研究进展 [J]. 西南林业大学学报: 自然科学, 2022, 42(1): 178-188.
- [64] 郭兰萍, 周良云, 康传志, 等. 药用植物适应环境胁迫的策略及道地药材“拟境栽培” [J]. 中国中药杂志, 2020, 45(9): 1969-1974.
- [65] Xu L, Cao M T, Wang Q C, *et al.* Insights into the plateau adaptation of *Salvia castanea* by comparative genomic and WGCNA analyses [J]. *J Adv Res*, 2022, 42: 221-235.

[责任编辑 时圣明]