

# 宁夏不同生态区对杠柳的药用有效成分的影响

牟亚宁<sup>1</sup> 朱林<sup>2</sup> 李林傲<sup>3</sup>

(1.宁夏大学 银川 750000 2.宁夏大学生态环境学院 银川 750000 3.东华生态规划院有限公司 合肥 230000)

**摘要:**【目的】研究杠柳的药用有效成分主要受生境中哪些因子的影响【方法】选取宁夏区域的四个不同生境样地,进行野外调查和样品采集。查阅各区域地理、气象数据。最后通过室内生化试验得出数据后并进行分析。【结果】样地根皮中总黄酮含量其含量高低顺序为: Site 1 (50.02 mg·g<sup>-1</sup>) > Site 3 (43.77 mg·g<sup>-1</sup>) > Site 2 (43.63 mg·g<sup>-1</sup>) > Site 1 (27.64 mg·g<sup>-1</sup>); 平均含量为 41.27 mg·g<sup>-1</sup>; 总多糖其含量高低顺序为: Site 3 (1.57 mg·g<sup>-1</sup>) > Site 4 (1.12 mg·g<sup>-1</sup>) > Site 2 (1.09 mg·g<sup>-1</sup>) > Site 1 (0.47 mg·g<sup>-1</sup>); 平均含量为 1.06 mg·g<sup>-1</sup>; 皂苷其含量高低顺序为: Site 3 (57.53 mg·g<sup>-1</sup>) > Site 1 (57.04 mg·g<sup>-1</sup>) > Site 4 (37.14 mg·g<sup>-1</sup>) > Site 2 (37.00 mg·g<sup>-1</sup>); 平均含量为 47.18 mg·g<sup>-1</sup>; 杠柳毒苷其含量高低顺序为: Site 3 (1.46 mg·g<sup>-1</sup>) > Site 2 (1.36 mg·g<sup>-1</sup>) > Site 1 (1.22 mg·g<sup>-1</sup>) > Site 4 (0.48 mg·g<sup>-1</sup>); 平均含量为 1.13 mg·g<sup>-1</sup>; 4 个样地根皮中 4-甲氧基水杨醛其含量高低顺序为: Site 2 (12.15 mg·g<sup>-1</sup>, 1.22 %) > Site 4 (7.98 mg·g<sup>-1</sup>, 0.80 %) > Site 3 (5.91 mg·g<sup>-1</sup>, 0.59 %) > Site 1 (0.83 mg·g<sup>-1</sup>, 0.08 %), 平均含量为 6.72 mg·g<sup>-1</sup> (0.67 %)。【结论】不同生境杠柳根皮中药用有效成分含量差异较大, Site 2 (1.22 %)、Site 3 (0.59 %)、Site 4 (0.80 %) 样地的杠柳根皮中 4-甲氧基水杨醛的含量均符合药典标准,说明这 3 个生态区域的杠柳根皮(香加皮)的品质可能更好。杠柳和生境各生态因子的关系研究表明,海拔、降水量、温度、蒸散量、土壤因子与杠柳生物学特性、有效成分具有很高的相关度,这和杠柳的生长习性密切相关。综合分析可以说明一定范围的海拔高度,弱碱性土壤、光照良好的环境是杠柳生长的重要条件,此外充足的水分条件和适宜磷、钾元素更有利于杠柳的生长发育及化学成分合成。因此,在进行杠柳野化抚育和生态种植基地地址选择时,应充分考虑并选择适宜生态让杠柳生长,同时结合产地实际状况,合理有效地开展药材生产布局。(3) 不同生态地区杠柳品质存在较大差异化,其中红寺堡区域的杠柳(香加皮)药材品质较好,可以作为野生抚育资源,建立杠柳仿野生栽培及药材生产基地,而在分布地区较偏远,气候湿润、资源蕴含量丰富的南部山区,可以建立生态种植基地。

**关键词:**宁夏; 杠柳; 生境; 药用有效成分; 4-甲氧基水杨醛;

## Effect of Different Ecological Regions in Ningxia on the Medicinal Active Ingredients of *Periploca sepium*

**Abstract:** 【Objective】 To investigate the main factors influencing the medicinal active ingredients of *Periploca sepium* in its habitats. 【Method】 Four different habitat sites in Ningxia region were selected for field investigation and sample collection. Geographical and meteorological data of each region were reviewed. Data were obtained through indoor biochemical experiments and analyzed subsequently. 【Result】 The total flavonoid content in the root bark followed this order: Site 1 (50.02 mg·g<sup>-1</sup>) > Site 3 (43.77 mg·g<sup>-1</sup>) > Site 2 (43.63 mg·g<sup>-1</sup>) > Site 4 (27.64 mg·g<sup>-1</sup>), with an average content of 41.27 mg·g<sup>-1</sup>. The total polysaccharide content was in the order: Site 3 (1.57 mg·g<sup>-1</sup>) > Site 4 (1.12 mg·g<sup>-1</sup>) > Site 2 (1.09 mg·g<sup>-1</sup>) > Site 1 (0.47 mg·g<sup>-1</sup>), averaging 1.06 mg·g<sup>-1</sup>. The saponin content ranked as: Site 3 (57.53 mg·g<sup>-1</sup>) > Site 1 (57.04 mg·g<sup>-1</sup>) > Site 4 (37.14 mg·g<sup>-1</sup>) > Site 2 (37.00 mg·g<sup>-1</sup>), with an average of 47.18 mg·g<sup>-1</sup>. The periplocoside content was: Site 3 (1.46 mg·g<sup>-1</sup>) > Site 2 (1.36 mg·g<sup>-1</sup>) > Site 1 (1.22 mg·g<sup>-1</sup>) > Site 4 (0.48 mg·g<sup>-1</sup>), averaging 1.13 mg·g<sup>-1</sup>. The 4-methoxysalicylaldehyde content in the root bark of the four sites was: Site 2 (12.15 mg·g<sup>-1</sup>, 1.22%) > Site 4 (7.98 mg·g<sup>-1</sup>, 0.80%) > Site 3 (5.91 mg·g<sup>-1</sup>, 0.59%) > Site 1 (0.83 mg·g<sup>-1</sup>, 0.08%), averaging 6.72 mg·g<sup>-1</sup> (0.67%). 【Conclusion】 There are significant differences in the content of medicinal active ingredients in the root bark of *Periploca sepium* grown in different habitats. The content of 4-methoxysalicylaldehyde in the root bark of Sites 2 (1.22%), 3 (0.59%), and 4 (0.80%) meets the pharmacopoeia standards, suggesting that the quality of *Periploca sepium* (Xiangjiapi) in these three ecological regions may be better. Studies on the relationship between *Periploca sepium* and various ecological factors in its habitats indicate that altitude, precipitation, temperature, evapotranspiration, and soil factors are highly correlated with the biological characteristics and active ingredients of *Periploca sepium*, which is closely related to its growth habits. Comprehensive analysis suggests that a certain range of altitude, weakly alkaline soil, and well-lit environments are important conditions for the growth of *Periploca sepium*. Moreover, sufficient water conditions and appropriate phosphorus and potassium elements are more conducive to the growth and development of *Periploca sepium* as well as the synthesis of

its chemical components. Therefore, when selecting sites for the wild cultivation and ecological planting bases of *Periploca sepium*, suitable ecological conditions for its growth should be fully considered, and rational and effective layouts for medicinal material production should be carried out in combination with the actual conditions of the producing areas. (3) There are significant differences in the quality of *Periploca sepium* in different ecological regions. Among them, the quality of *Periploca sepium* (Xiangjiapi) in the Hongsipu area is better and can be used as a wild cultivation resource to establish wild-simulated cultivation and medicinal material production bases. In the southern mountainous areas, which are relatively remote and have a humid climate with abundant resource reserves, ecological planting bases can be established.

**Keywords:** Ningxia; *Periploca sepium*; habitat; medicinal active ingredients; 4-methoxysalicylaldehyde

为了杠柳在宁夏地区更好地合理药用开发及利用, 以及可以为当地生态环境的恢复提供理论依据, 对于增进宁夏沙产业的发展和中部干旱带生态恢复物种等具有实际指导意义。杠柳 (*Periploca sepium* Bunge), 原属萝藦科 (Asclepiadaceae), 现属夹竹桃科 (Apocynaceae)、杠柳属 (*Periploca*) 落叶蔓生性灌木植物, 广泛分布于我国东北、华北、西北、西南等地区<sup>[1]</sup>。主要生长在平原和低山丘的林缘、沟坡、河边沙质地等处, 根系发达, 对低温、干旱、风蚀、沙埋及土壤贫瘠具有较强的抵抗能力, 适应性能力极强, 是黄土丘陵地区优良的固沙和水土保持树种, 在恢复生态环境稳定方面具有重要意义<sup>[2]</sup>。杠柳根皮即著名中药“香加皮”, 为治疗类风湿性关节炎的传统中药, 具有悠久的药用历史, 现代临床表明该药材具有抗炎及免疫调节、抗肿瘤活性等作用<sup>[3]</sup>。香加皮中含总黄酮、总多糖、总皂苷、4-甲氧基水杨醛、杠柳毒苷等 100 多种化学成分, 其药理作用主要有强心、抗炎、抗癌、神经生长因子促进剂、细胞分化诱导剂<sup>[4-7]</sup>。目前, 对杠柳的研究主要集中在药用价值、药理成分和抗逆性等方面<sup>[8, 9]</sup>, 然而, 杠柳随着生态环境条件的演变形成了明显的地理分布格局, 以适应不同生境, 不同分布区所处的生态环境差异是否会对杠柳种群的有效成分含量产生影响仍不清楚<sup>[10]</sup>。沙产业是指利用沙地、荒漠半荒漠地区的独特优势进行经济开发, 由社会投资并实现循环的经济运行活动<sup>[11]</sup>。杠柳的药用有效成分与所处的生态环境密切相关, 研究杠柳的药用有效成分主要受生境中哪些因子的影响。通过对比不同生态地区杠柳品质差异化, 掌握杠柳最适宜生长环境, 选择好既可以作为抚育资源, 建立杠柳仿野生栽培及药材生产基地的地区进行种植又可以改善当地生态环境, 最终促进宁夏沙产业的发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

研究时间: 2022 年 7 月底至 8 月初

研究地点: 在宁夏回族自治区银川市灵武市崇兴镇海子敦 (Site1)、宁夏回族自治区吴忠市红寺堡区红寺堡镇洪沟 (Site 2)、宁夏回族自治区中卫市沙坡头区迎水桥镇新河滩 (Site 3)、宁夏回族自治区固原市泾源县兴盛乡东山龙头 (Site 4), 海拔分别为 1107.89、1316.02、1187.21、2020.19。(如图 1、表 1, 区域气候概况来源宁夏统计年鉴)

样地生境如图 1 所示, 在每个样地按五点取样法设置样点进行野外调查和样品采集, 每个样方随机采集杠柳 (*Periploca sepium* Bunge) 单株样品 5-10 株, 将采集好的杠柳植株按主根、茎、叶分离后, 叶片迅速装入 PE 自封袋, 保存于液氮中、主根样品保存于冰盒箱中, 带回实验室进行植物生理特性和有效成分的测定。土壤样品随杠柳植株一同采集, 以根部土壤为主。在每个样方内随机取样, 采用多点混合法分别采集 0 ~ 30 cm (去表土)、30 ~ 60 cm 深的土壤样品, 去除凋落物、植物根系等杂物后, 装入自塑料袋中带回实验室。自然风干后, 分别过 2 mm 和 0.149 mm 筛用于土壤理化性质和酶活性的测定。

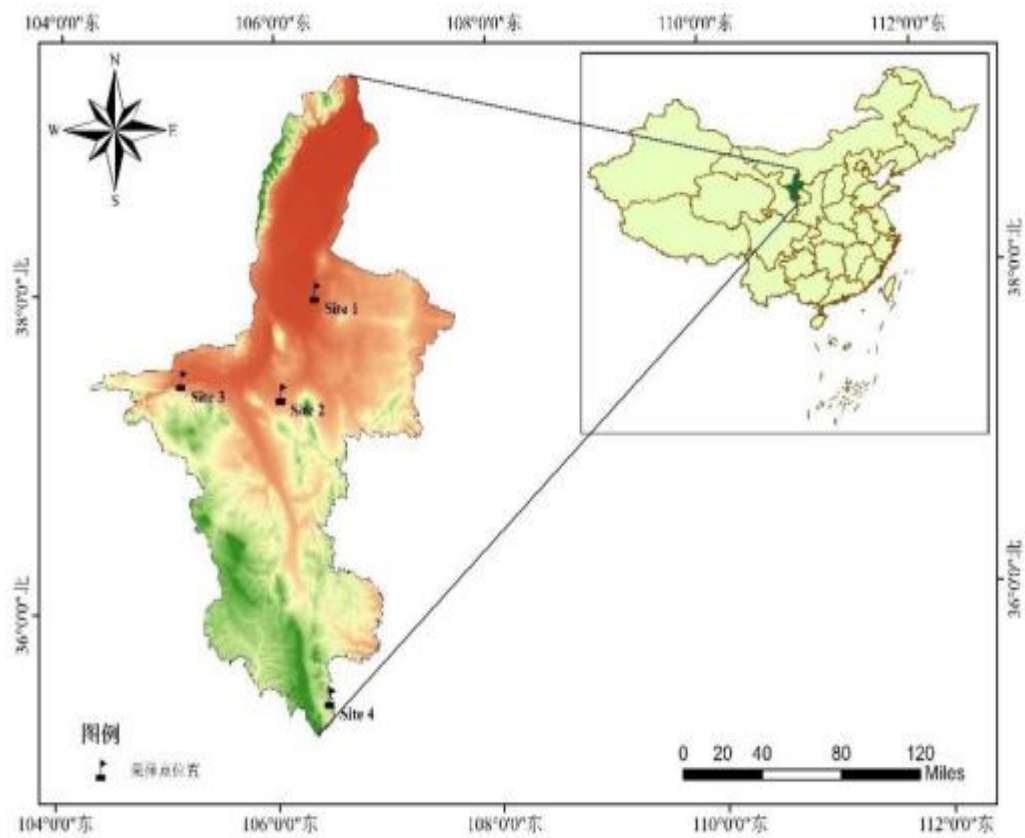


图 1 位置图

Fig 1 Location of the study plots



图 2 杠柳生境概况

Fig 2 Overview of the habitat of Periploca sepium Bunge

基金项目：宁夏回族自治区重点研发计划项目“宁夏沙区特色药用植物资源优选及生态栽培模式研究与示范”(2022BEG0 2012)。

\*作者 2 为通讯作者。

表 1 不同生境样地概况

Table 1 General situation of the plots under different habitats

| Plotcode | Sampling Location | Longitude (°E) | Latitude (°N) | Population coverage (%) | Agrotype   | Soil bulk density (g/cm <sup>3</sup> ) | Soil moisture Content (%) |
|----------|-------------------|----------------|---------------|-------------------------|------------|----------------------------------------|---------------------------|
| Site 1   | 灵武市海子敦            | 106°22'11.45"  | 38°1'37.65"   | 43.67                   | 灰钙土        | 1.61±0.05                              | 2.75±0.36                 |
| Site 2   | 红寺堡区洪沟            | 106°2'51.89"   | 37°23'31.52"  | 32.67                   | 灰钙土        | 1.67±0.03                              | 3.68±0.91                 |
| Site 3   | 沙坡头区新河滩           | 105°7'41.88"   | 37°28'48.29"  | 37.33                   | 灰钙土<br>风沙土 | 1.37±0.02                              | 5.18±1.36                 |
| Site 4   | 泾源县东山龙头           | 106°27'47.56"  | 35°28'22.36"  | 71.67                   | 黑垆土        | 1.37±0.03                              | 12.94±1.09                |

## 1.2 研究方法

1.2.1 样地选择与样地调查 根据宁夏不同地区杠柳的情况，结合前期实地调研和文献阅读，以 4 个宁夏不同地区 5 年生的杠柳种群为研究对象。采用样方调查法，在每块地区选取生境较为适宜的地段，随机选取 3 个长、宽为 10m 的样方作为研究样地，利用 GPS 定位样地经纬度和海拔高度，记下种群盖度、种群密度、土壤类别，从中国气象科学数据服务官方网站气象数据库获取样地气象数据。

1.2.2 土壤理化性质的测定 使用烘干法测量土壤水分 (S-WC)；使用经典环刀法测量土壤容重 (S-BD)；使用半微量凯氏法测量土壤全氮 (STN)；使用 HClO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 消煮-钼锑抗比色法测量土壤全磷 (S-TP)；使用 NaOH 熔融-火焰光度法测量土壤全钾 (S-TK)；使用乙酸铵溶液浸提-火焰光度法测量土壤速效钾 (S-AK)；使用 NaHCO<sub>3</sub> 溶液浸提-钼锑抗比色法测量土壤有效磷 (S-AP)；使用碱解扩散法测量土壤碱解氮 (SAN)；使用重铬酸钾容量法测量土壤有机质 (S-OM)；使用电导法测量土壤水溶性盐总量 (S-WS)；使用水浸提酸度计法 (水:土为 2.5:1) 测量土壤 PH 值，各数值测量以土壤深度 0-60cm 为准，多次测量取平均值。土壤理化指标详细信息见表 3。

(1) 在碱性环境中土壤碱性磷酸酶 (S-AKP/ALP) 能够催化磷酸苯二钠水解生成苯酚和磷酸氢二钠，用分光光度计测定 660 nm 波长下的吸光值，37°C 中每 g 土壤每天释放 1 μmol 酚为 1 个酶活力单位，通过酚的生成量即可计算出土壤碱性磷酸酶的活性。

(2) 使用 3,5-二硝基水杨酸比色法试剂盒测定土壤蔗糖酶 (S-SC)，S-SC 催化蔗糖降解生成还原糖，进一步与 3,5-二硝基水杨酸反应，生成棕红色氨基化合物，测出反应产物在 510 nm 处的吸光值；标准条件下得出的回归方程为： $y=4.9x-0.062$ ，x 为标准品浓度 (mg/mL)，y 为吸光值，每天每 g 土样中产生 1mg 还原糖定义为 1 个酶活力单位。

(3) 使用靛酚蓝比色法试剂盒测出土壤脲酶 (S-UE)，尿素被脲酶水解产生的 NH<sub>3</sub>-N，用分光光度计测定 578 nm 波长下的吸光值；标准条件下得出的回归方程为： $y=0.0915x+0.0373$ ，x 为标准品浓度 (μg/mL)，y 为吸光值，每天每 g 土样中产生 1 μg NH<sub>3</sub>-N 定义为 1 个酶活力单位。

(4) 使用紫外吸收法试剂盒测出土壤过氧化氢酶 (S-CAT)，H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 在 240 nm 波长下有特征吸收峰，CAT 能够分解 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>，每天每 g 风干土样催化 1 μmol H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 降解定义为 1 个酶活力单位，根据吸光值的变化率可计算出 S-CAT 活性，土壤酶活性详细信息见表 4。

1.2.3 有效成分的测定 香加皮（杠柳的干燥根皮）中总黄酮、总多糖、总皂苷的含量可以使用超声提取分光光度法测定，4-甲氧基水杨醛、杠柳毒苷的含量要使用高效液相色谱（HPLC）法测出；以标准品浓度（mg/ml）作为标准曲线图横坐标（X），以吸光值  $\Delta A$  作为标准曲线图纵坐标（Y），分别绘制总黄酮、总多糖、总皂苷的标准曲线图，回归方程如表 5 所示

表 2 有效成分回归方程

Table 2 Table Standard curves of five flavonoids

| Composition              | Regression Equation | R <sup>2</sup> | Linear range (ug) |
|--------------------------|---------------------|----------------|-------------------|
| TFH                      | $y=1.1936x-0.0098$  | 0.9994         | 0.005-0.25        |
| Total polysaccharides    | $y=6.2571x-0.05$    | 0.9901         | 0.005-0.25        |
| Total saponins           | $y=1.0233x-0.0016$  | 0.9983         | 0.005-0.25        |
| 4-Methoxysalicylaldehyde | $y=74.758x-179.58$  | 0.9997         | 0.005-0.25        |
| Periplocin               | $y=22.838x-8.2251$  | 0.9999         | 0.005-0.25        |

（1）总黄酮的测量方法:芦丁作为参照品，采用硝酸铝比色法试剂盒测试出总黄酮的含量，在碱性亚硝酸盐溶液中，黄酮类化合物与铝离子产出在 510 nm 处有特征吸收峰的红色络合物，然后测定在 510 nm 处的吸光值。

（2）总多糖的测量方法:把葡萄糖作为参照物，运用水提醇沉法提取样品中的总多糖，采用苯酚-硫酸法试剂盒测定总多糖的储存量，测出反应产物在 490 nm 处的吸光值。

（3）总皂苷的测量方法：以薯蓣皂苷元为参照物，使用超声波进行取样皂苷，采用香草醛-高氯酸比色法试剂盒测定总皂苷的储存量，测定反应产物在 589 nm 处的吸光值。

（4）4-甲氧基水杨醛、杠柳毒苷的测量方法：以相应标准品为参照物，运用高效液相色谱法（HPLC）进行测量。

色谱条件：色谱柱为 Shim-Nex CS C18（250 mm×4.6 mm, 5 $\mu$ m）；检测波长：220 nm；流速：1.0 ml/min；以乙腈—水（27:73）为流动相；进样体积：10 $\mu$ l；柱温：30℃；洗脱方式：等梯度洗脱。

参照物溶液制备：准确量取 4-甲氧基水杨醛、杠柳毒苷参照物适量，加入甲醇（色谱纯）溶液，精确配制成浓度为 4 mg/ml 的 4-甲氧基水杨醛参照物溶液和浓度为 2 mg/ml 杠柳毒苷参照物溶液，备用；分别精确吸取参照物溶液置于容量瓶中，将甲醇溶液到至刻度线，摇匀过滤，取得滤液，获得稀释质量浓度分别为 1、5、10、50、100、500  $\mu$ g/ml 的 4-甲氧基水杨醛对照品溶液和质量浓度分别为 0.5、2、5、10、50、100  $\mu$ g/ml 的杠柳毒苷参照物溶液。依照色谱条件记录色谱峰面积，以峰面积为纵坐标（Y），质量浓度（ $\mu$ g/ml）为横坐标（X），绘制标准曲线图，回归方程如表 2-6 所示。

样品溶液制备：准确称取样品粉末约 0.5 g 左右，倒入 15 ml 离心管中，加入 50%浓度乙醇水溶液 5 ml，涡旋摇晃均匀 1min，超声（功率 250 W，频率 40 kHz）提取 40 min，4000 r/min 离心 10 min，将上清液倒至新的离心管中，用 0.22 微孔滤膜滤过，取续滤液即得供试品溶液。

### 1.3 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2016 软件对数据进行统计，数据分析采用 SPSS 22.0、Origin 2021 软件进行单因素方差分析（ANOVA），用最小显著差数法（Least-significant difference, LSD）进行显著性检验（P<0.05），使用 Origin 2021 软件进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤因子对杠柳有效成分含量的影响

#### 2.1.1 不同地区生境下土壤理化性质

表 3 不同生境土壤理化性质平均值

Table 3 Soil physicochemical properties in different habitats

| Plotcode | Total-nitrogen (S-TN)<br>g/kg<br>氮 | Total-potassium (S-TK)<br>g/kg<br>钾 | Total-phosphorus (S-TP)<br>g/kg<br>磷 | Alkali-hydrolyzed nitrogen (S-AN)<br>mg/kg<br>碱性氮 | water-soluble salts (S-WSS)<br>g/kg<br>融性盐 | Organicmatter (S-OM) g/kg<br>有机质 | AvailablePhosphorus (S-AP)<br>mg/kg<br>有效磷 | AvailablePotassium (S-AK)<br>mg/kg<br>速效钾 | pH       |
|----------|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|----------|
| Site1    | 0.17±0.06t                         | 15.26±0.38a                         | 0.26±0.01ab                          | 4.23b                                             | 2.97±0.28a                                 | 5.96±4.24b                       | 2.73±2.33b                                 | 29.79±6.94b                               | 8.5b     |
| Site2    | 0.08±0.01t                         | 17.64±0.39a                         | 0.16±0.06b                           | 9.52±2.50b                                        | 0.95±0.18b                                 | 1.96±0.1b                        | 1.16±0.17b                                 | 88.99±10.13b                              | .6±0.06a |
| Site3    | 0.195±0.26                         | 15.275±3.78a                        | 0.405±0.12a                          | 12.69±11.96b                                      | 2.15±0.85ab                                | 4.23±1.69b                       | 3.62±1.90ab                                | 79.72±23.27ab                             | .2±0.06c |
| Site4    | 1.24±0.38t                         | 19.03±0.86a                         | 0.395±0.05a                          | 87.2±24.23a                                       | 2.15±0.03ab                                | 21.16±6.26a                      | 7.68±1.7a                                  | 124.67±24.5a                              | 8.0d     |

土壤因子是影响作物品质、产量的重要因子，其氮、磷、钾及有机质等微量元素是植物生长的主要营养成分。对不同地区生境土壤理化性质测定结果，从表 3 不同生境土壤理化性质，通过对不同地区生境土壤全氮含量分析对比，Site 4 样地土壤全氮含量明显不低于其他 3 个样地。土壤全氮含量由高到低进行排序：Site 4 > Site 1 > Site 3 > Site 2 样地；通过对不同地区生境土壤全磷含量分析对比，Site 3、Site 4 样地中土壤全磷含量明显高于 Site 1、Site 2 样地。土壤全磷含量由高到低排序：Site 3 > Site 4 > Site 1 > Site 2 样地；通过对不同地区生境土壤全钾含量分析对比，Site 1，Site 4 样地中深度的土壤全钾含量均呈现明显差异，Site 2，Site 4 样地中的土壤全钾含量明显高于其他 3 个样地地区。土壤全钾含量由高到低排序：Site 4 > Site 2 > Site 3 > Site 1 样地。通过对不同地区生境土壤速效钾含量分析对比，Site 1 - Site 4 样地中的土壤速效钾含量均呈现明显差异化。土壤速效钾含量由高到低排序：Site 4 > Site 2 > Site 3 > Site 1 样地。通过对不同地区生境土壤有效磷含量分析对比，Site 1 - Site 4 样地中土壤有效磷含量均呈现明显差异化，Site 4 样地的土壤有效磷含量明显高于其他 3 个样地。土壤有效磷含量由高到低排序：Site 4 > Site 3 > Site 1 > Site 2 样地。通过对不同地区生境土壤碱解氮含量分析对比，Site 4 样地中土壤碱解氮含量明显高于其他 3 个地区样地。土壤碱解氮含量由高到低排序：Site 4 > Site 3 > Site 2 > Site 1 样地；通过对不同地区生境土壤有机质含量分析对比，Site 1 - Site 4 样地中的土壤有机质含量均呈现明显差异化。土壤有机质含量由高到低排序：Site 4 > Site 1 > Site 3 > Site 2 样地。通过对不同地区生境土壤水溶性盐含量分析对比，Site 1 - Site 4 样地中深度的土壤水溶性盐含量均呈现明显差异化，Site 1、Site 3 样地中深度的土壤水溶性盐含量显著高于其他 2 个地区样地。土壤水溶性盐含量由高到低 Site 1 > Site 3 = Site 4 > Site 2 样地。通过对不同地区生境土壤 pH 值分析对比，结果显示各地区生境 pH 值有一定差别，不同地区生境土壤 pH 值大体 8.06 - 8.65 在之间，属于弱碱性土壤，说明杠柳适宜生长在弱碱性土壤中。Site 4 样地中的土壤 pH 值明显低于其他 3 个地区样地 ( $P < 0.05$ )，该地区生境在山区南方森林边缘，土壤类型是黑垆土，隶属于森林壤土。土壤 pH 值由高到低排序：Site 2 > Site 1 > Site 3 > Site 4。

### 2.1.2 不同地区生境土壤酶活性

表 4 不同生境土壤酶活性平均值

Table 4 soil enzyme activities in different habitats

| Plotcode | Soil alkaline phosphatase (S-AKP)<br>(U·g <sup>-1</sup> ) | Invertase (S-SC)<br>(U·g <sup>-1</sup> ) | Urease (S-UE)<br>(U·g <sup>-1</sup> ) | catalase (S-CAT)<br>(U·g <sup>-1</sup> ) |
|----------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------|
| Site1    | 1.895±0.21b                                               | 5.225±1.72a                              | 20.275±18.75b                         | 5.225±1.72bc                             |
| Site2    | 1.78±0.41b                                                | 1.57±0.07a                               | 1.76±0.09b                            | 2.28±0.18c                               |
| Site3    | 2.465±0.08b                                               | 1.69±0.39a                               | 21.59±21.42b                          | 7.44±2.04b                               |
| Site4    | 4.27±1.24a                                                | 19.905±13.95a                            | 262.525±57.27a                        | 23.645±0.59a                             |

从表 4 不同生境土壤酶活性, 不同地区样地土壤中碱性磷酸酶的活性变化均不一样。土壤碱性磷酸酶活性由高到低排序: Site 4>Site 3>Site 1>Site 2 样地, Site 4 样地土壤蔗糖酶明显高于其他样地。土壤蔗糖酶活性由高到低排序: Site 4>Site3>Site1>Site2 样地。Site 1- Site 4 样地深土壤脲酶差异明显。深度的土壤脲酶活性由高到低排序: Site 4>Site 1>Site 3>Site 2 样地 Site 1 - Site 4 样地、土壤过氧化氢酶均呈现明显差异化。深度的土壤过氧化氢酶活性由高到低排序: Site 4>Site 3>Site 1>Site 2 样地。

### 2.1.3 土壤各因子与杠柳有效成分相关性分析

将杠柳根皮中中药用有效成分含量与 4 个地区样地的土壤理化性质和土壤酶活性进行相关性分析, 由图 2 可知, 杠柳根皮中总黄酮含量与土壤 pH 值呈极明显正相关 ( $P<0.01$ ), 与土壤全氮、土壤碱解氮、土壤全钾、土壤速效钾、土壤有效磷、土壤蔗糖酶、土壤脲酶、土壤过氧化氢酶、土壤有机质、呈极明显负相关 ( $P<0.01$ ), 与土壤碱性磷酸酶呈明显负相关 ( $P<0.05$ ); 总多糖含量与土壤速效钾呈明显正相关 ( $P<0.05$ ), 和其他土壤因子指标相关性不明显; 总皂苷含量与土壤水溶性盐呈明显正相关 ( $P<0.05$ ), 与土壤全钾、土壤速效钾呈明显负相关 ( $P<0.01$ ), 与土壤碱解氮呈明显负相关 ( $P<0.05$ ); 杠柳毒苷含量与土壤 pH 值呈极明显正相关 ( $P<0.01$ ), 与土壤全氮、土壤碱解氮、土壤全钾、土壤有效磷、土壤蔗糖酶、土壤脲酶、土壤过氧化氢酶、土壤有机质、氢酶呈极明显负相关 ( $P<0.01$ ), 与土壤速效钾、土壤碱性磷酸酶呈明显负相关 ( $P<0.05$ ); 4-甲氧基水杨醛含量与土壤全钾呈明显正相关 ( $P<0.05$ ), 与土壤速效钾呈极明显正相关 ( $P<0.01$ ), 与土壤水溶性盐呈极明显负相关 ( $P<0.01$ )。植物次生代谢物的形成受多种因素的控制, 除气候、海拔及土壤理化性质外, 植物自身的代谢过程也会影响化学成分的形成。

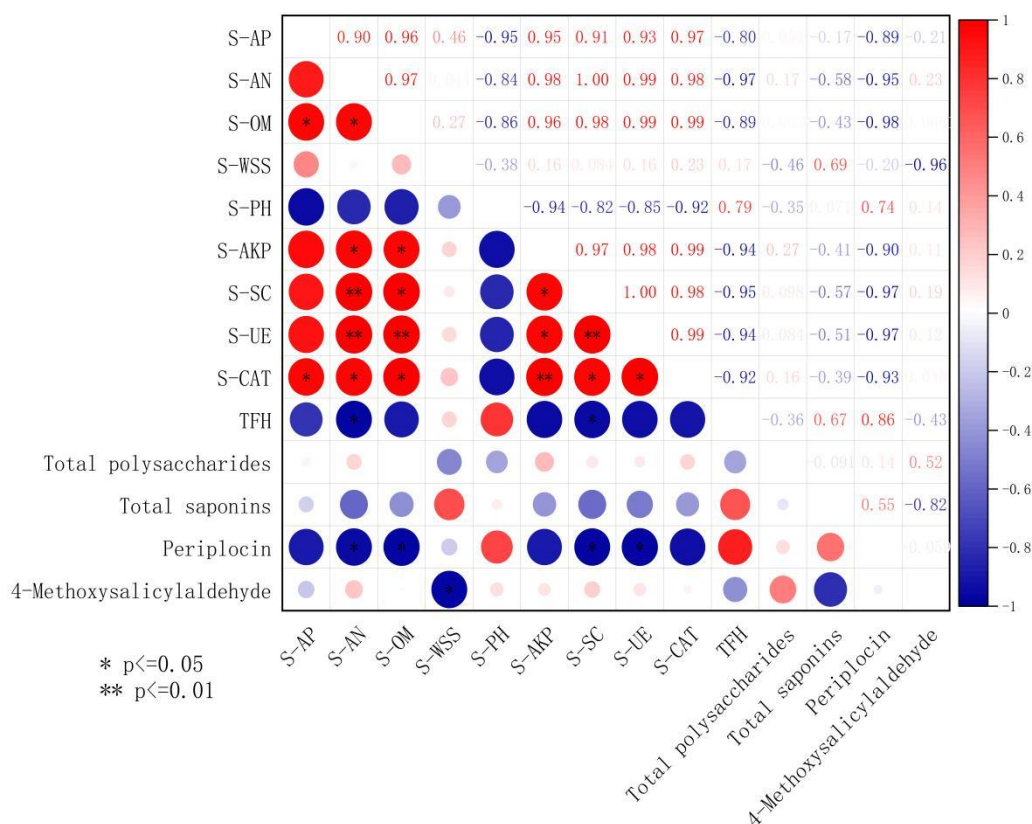


图 3 杠柳有效成分与土壤因子的相关性

Fig 3 Correlation between effective components of Periploca sepium Bunge and soil factors

\*表示显著 ( $P<0.05$ ), \*\*表示极显著 ( $P<0.01$ ). \* indicates significant ( $P<0.01$ )

2.2 气候、海拔对杠柳有效成分含量的影响

2.2.1 不同地区的气候因子

表 5 不同采样地气候因子数据

Table 5 Climatic factor data at different sampling sites

| Plotcode | Sampling Location | Annual average temperature (°C) | Precipitation (mm) | Annual average relative humidity (%) | Sunlight hours (h) | Annual average wind speed (m/s) | Evapotranspiration (mm) |
|----------|-------------------|---------------------------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------|---------------------------------|-------------------------|
| Site 1   | 灵武市海子敦            | 11.25                           | 262.26             | 47.14                                | 1867.91            | 5.29                            | 193.48                  |
| Site 2   | 红寺堡区洪沟            | 10.26                           | 324.36             | 48.73                                | 1883.63            | 5.76                            | 215.95                  |
| Site 3   | 沙坡头区新河滩           | 10.84                           | 255.26             | 46.61                                | 1890.31            | 5.80                            | 193.80                  |
| Site 4   | 泾源县东山龙头           | 6.17                            | 899.63             | 64.85                                | 1827.33            | 5.20                            | 479.73                  |

2.2.2 气候、海拔与杠柳有效成分相关性分析 将杠柳根皮中有效成分含量与宁夏 4 个不同地区的样地的气象、海拔数据资料（1982-2022 年平均值）进行相关性分析，由图 1 可知，杠柳根皮中总黄酮含量与年均温度、日照时数、地面气压呈极明显正相关（ $P<0.01$ ），与海拔、降水量、年均湿度呈极明显负相关（ $P<0.01$ ）；总多糖含量与年均风速呈明显正相关（ $P<0.05$ ），和其他指标相关性不明显；总皂苷含量与地面气压呈极明显正相关（ $P<0.01$ ），与年均温度呈明显正相关（ $P<0.05$ ），与海拔呈极明显负相关（ $P<0.01$ ），与降水量、年均湿度、蒸散量呈明显负相关（ $P<0.05$ ）；杠柳毒苷含量与地面气压、年均温度、日照时数、年均风速呈极明显正相关（ $P<0.01$ ），与海拔、降水量、年均湿度、蒸散量呈极明显负相关（ $P<0.01$ ）；4-甲氧基水杨醛含量与气候、海拔因子各指标间无明显相关性（ $P>0.05$ ），其各项积累量变化规律可逐步研究。

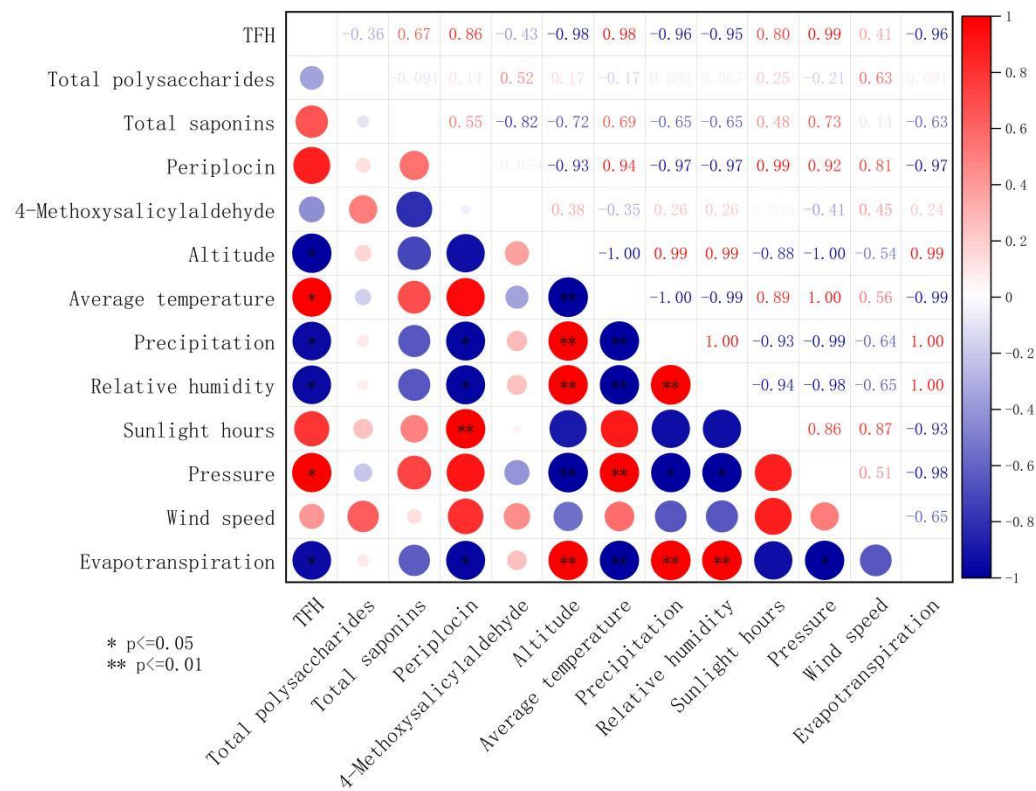


图 4 杠柳有效成分与气候、海拔因子的相关性  
Fig4 Correlation of effective components of Periploca sepium Bunge with climate and altitude factors

\*表示显著 (P<0.05)。 \* indicates significant (P<0.01).

2.3 宁夏不同地区下杠柳有效成分的差异性

从表 6 不同生境杠柳有效成分含量平均值及差异显著性，可知不同地区生境下杠柳根皮有效成分含量变化，不同生态地区样地杠柳根皮中不同有效成分差异性明显。Site 2 和 Site 3 样地区域差距不明显，Site 1 样地总黄酮含量明显高于其余样地，四个地区样地总黄酮含量高低排序为：Site 1>Site 3>Site 2>Site 1；平均含量为 41.27 mg·g<sup>-1</sup>；Site 3 样地根皮中总多糖含量明显高于其他样地，Site 4 和 Site 2 样地之间总多糖差异不明显，其含量由高到低排序：Site 3>Site 4>Site 2>Site 1；平均含量为 1.06 mg·g<sup>-1</sup>；Site 2、Site 4 样地根皮中总皂苷含量明显低于 Site 3、Site 5 样地，其含量由高到低排序：Site 3>Site 1>Site 4>Site 2；平均含量为 47.18 mg·g<sup>-1</sup>。4 个样地杠柳毒苷含量差异性明显，Site 3 样地明显高于 Site 1、Site 2 和 Site 4 样地，其含量由高到低排序：Site 3>Site 2>Site 1>Site 4；平均含量为 1.13 mg·g<sup>-1</sup>；4-甲氧基水杨醛作为杠柳根皮（香加皮）的唯一的质 量 控 制 标 准，2020 版《中华人民共和国药典》中明确规定香加皮 4-甲氧基水杨醛含量不能少于 0.2 %。由图 3-10-E 可知，4 个样地中 4-甲氧基水杨醛含量差异性明显，Site 2 样地明显高于 Site 1、Site 3 和 Site 4 样地，其含量由高到低排序为：Site 2（1.22 %）>Site 4（0.80 %）>Site 3（0.59 %）>Site 1（0.08 %），平均含量为 6.72 mg·g<sup>-1</sup>，其中 Site 1 样地中 4-甲氧基水杨醛含量太低，完全达不到药典中规定标准。因此，从药典的规定指标比较，Site 2、Site 4、Site 3 样地的香加皮的药用品质逐渐下降。

表 6 不同生境杠柳有效成分含量平均值及差异显著性

Table 6 The average value and significance of the content of effective components in *Periploca sepium* Bunge in different habit

| ats                                             |             |             |             |             |                              |
|-------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------------------------|
| Active ingredient                               | Site 1      | Site 2      | Site 3      | Site 4      | Source of variation (d.f.=3) |
| Total flavonoids (mg·g <sup>-1</sup> )          | 50.02±1.73a | 43.63±1.67b | 43.77±0.11b | 27.64±1.23c | 150.19**                     |
| Total polysaccharide (mg·g <sup>-1</sup> )      | 0.47±0.03   | c1.09±0.15b | 1.57±0.04a  | 1.12±0.01b  | 100.84**                     |
| Total saponins (mg·g <sup>-1</sup> )            | 57.04±1.36a | 37.00±0.23b | 57.53±0.35a | 37.14±0.91b | 572.32**                     |
| Periplocin (mg·g <sup>-1</sup> )                | 1.22±0.03c  | 1.36±0.00b  | 1.46±0.01a  | 0.48±0.02d  | 1572.21**                    |
| 4-Methoxy salicylaldehyde (mg·g <sup>-1</sup> ) | 0.83±0.02d  | 12.15±0.09a | 5.91±0.11c  | 7.98±0.01b  | 12968.28**                   |

同一行的不同小写字母表示不同生境之间差异显著 (P < 0.05); \*\*表示同一组数据间差异极显著 (P < 0.01)。Different lowercase letters on the same line indicate significant differences between different habitats (P<0.05); \*\* Indicates significant difference between the same set of data (P<0.01).

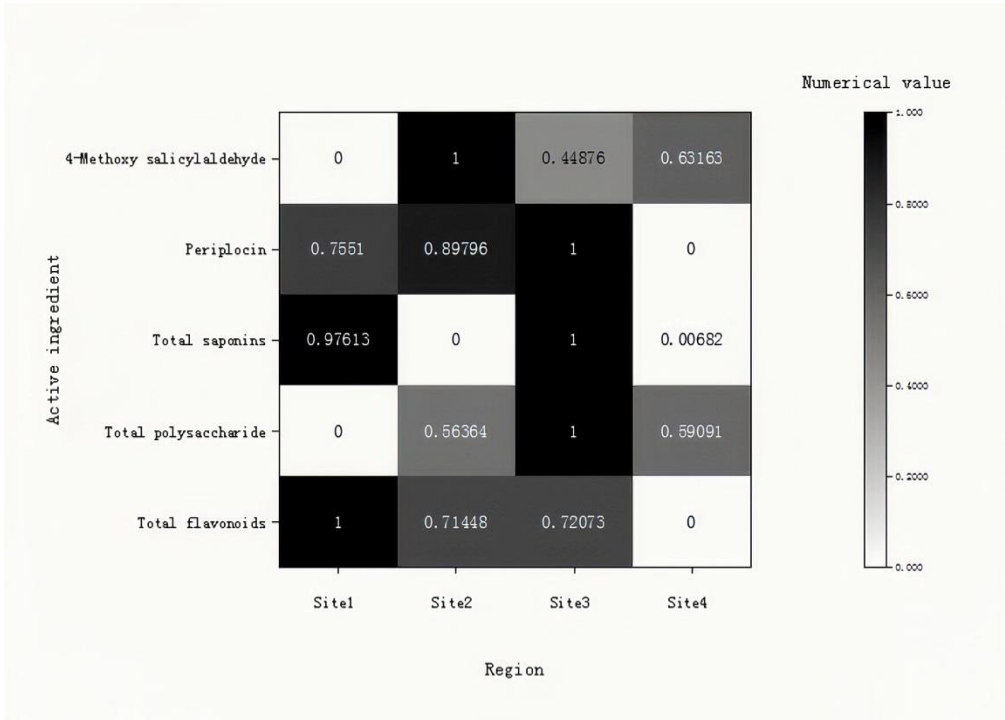


图 5 不同生境杠柳有效成分含量平均值的差异性

Figure 5 The difference in the average content of active ingredients in *Periploca sepium* from different habitats

3 讨论

3.1 气候、海拔因子对杠柳有效成分含量的影响

生态因子是影响药用植物主成分的重要因素，许多研究表明气候、地理位置对药用植物次生代谢产物的形成具有较深作用。本次调研过程中，杠柳植株生长发育会受不同地区气候条件的差异造成影响，致使不同

生境杠柳根皮中有效成分含量存在明显性地区差异。

杠柳药用有效成分含量与气候、海拔相关性分析,杠柳根皮中总黄酮含量与日照时数、年均温度、地面气压呈正相关,与海拔、降水量、年均湿度呈负相关;总多糖含量与年均风速呈正相关,与其他各项指标间无明显相关性;总皂苷含量与地面气压、年均温度呈正相关,与海拔、降水量、年均湿度、蒸散量呈负相关;杠柳毒苷含量与年均温度、日照时数、地面气压、年均风速呈正相关,与海拔、降水量、年均湿度、蒸散量呈负相关;4-甲氧基水杨醛含量与气候、海拔因子各指标间无明显相关性,说明气候对4-甲氧基水杨醛含量的影响小于土壤因子对其的影响。

海拔高度不同会造成其他环境因子改变,如温度、湿度、降水及光照强度的变化。研究表明,海拔高度每升高100 m,温度就降低大约0.6℃,温度随着海拔升高而降低[12]。通过研究不同生态区域气候、海拔对杠柳药用有效成分的影响,分析可知海拔、降水量、年均湿度、蒸发量与杠柳根皮有效成分中总黄酮含量、总皂苷含量、杠柳毒苷含量呈明显的负相关,表示杠柳生长发育需要在一定的海拔范围内,但过高的海拔高度将不会促使其根皮中总黄酮含量、总皂苷含量、杠柳毒苷含量的积累。杠柳根皮中总黄酮含量、杠柳毒苷含量与年均温度、日照时数、地面气压呈极明显正相关,可以得知杠柳有效成分含量对生境的温度和光照变化很敏感,很易受到影响。4个不同地区生境样地年平均温度范围为6.17℃~11.25℃,属于低温区域,适宜的温度和光照能促进杠柳根皮中总黄酮含量、杠柳毒苷含量的积累速度。杠柳根皮中总多糖含量和4-甲氧基水杨醛含量与气候、海拔各指标间相关性很小,而4-甲氧基水杨醛作为杠柳根皮(香加皮)的唯一的质控标准,侧面可以说明杠柳作为耐干旱、耐盐碱、耐贫瘠的药用植物,对各种不同立地生境的适应能力很强,在我国南北方地区通常有大量的分布。

### 3.2 土壤因子对杠柳有效成分含量的影响

土壤是植物赖以生存的基地,是植物吸收养分和水分的最主要场所,土壤理化性质和无机元素对植物生长发育和药效成分具有重要的影响<sup>[13]</sup>。不同药用植物对土壤质地也有不同的要求,尤其是对土壤pH值需求也不同,本次研究在不同地区生境土壤pH值大体8.06~8.65之间,属于弱碱性土壤,说明杠柳适宜生长在弱碱性土壤中。氮、磷、钾等多种元素是药用植物生长不可或缺的,土壤中无机元素对药用植物生长发育和药材品质产生重大影响<sup>[14,15,16]</sup>。

4个不同地区生境样地采集的杠柳根皮中,Site 1地区样地杠柳根皮中总黄酮含量高,明显高于其他3个样地;Site 3地区样地杠柳根皮中总多糖含量、总皂苷含量、杠柳毒苷含量明显高于其他3个样地,Site 2地区样地杠柳根皮中4-甲氧基水杨醛含量明显高于其他3个样地。对不同地区样地生境的土壤理化性质分析中,Site 4地区样地的土壤养分含量明显高于其他3个样地,通过地理位置分析可知南部山区生境的土壤状况要比河东沙地、中部干旱带、引黄灌区的沙地生境好一些。

经过分析土壤理化性质与杠柳有效成分之间相关性,结果表明杠柳根皮中总黄酮含量、杠柳毒苷含量与土壤pH值呈正相关,与土壤全氮、全钾、速效钾、有效磷、碱解氮、有机质、碱性磷酸酶、蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶表现为负相关;总皂苷含量与土壤水溶性盐呈正相关,与土壤全钾、速效钾、碱解氮呈负相关;4-甲氧基水杨醛含量与土壤全钾、速效钾呈正相关,与土壤水溶性盐呈负相关,总多糖含量与土壤速效钾呈正相关,说明土壤中钾元素对4-甲氧基水杨醛含量和总多糖含量的积累速度影响较大,适量的钾元素有利于杠柳品质的提升。总多糖含量和其他土壤各项指标相关性不明显,其原因可能是杠柳有效成分中总多糖含量与土壤因子没有相关性。

土壤pH值的变化会间接影响土壤的物理结构,pH越高,土壤很容易板结,有机质含量逐渐降低,速效钾与土壤紧密合成导致其含量变少,过酸过碱的条件都会使速效磷被土壤固定住,因此植物吸收利用的速效磷不会太多,微量元素的有效性也会发生较大改变,植物生长过程会受到制约<sup>[17]</sup>。4个样地中,Site 4地区样地的土壤pH值相对较小,而土壤全氮、碱解氮、全钾、速效钾、有效磷、有机质明显比其他3个地区样地含量高,而且Site 4地区样地中所含4种酶活性最多,与该地区中有机质含量最多相符合。土壤酶活性是土壤中一项重要指标,土壤酶是土壤进行生化功能的关键成分<sup>[18]</sup>。研究表明,土壤酶活性与有机碳含量相关性较大,有机碳含量制约着微生物转化这些有机元素,且土壤的有机质中含有促进酶合成的底物<sup>[19]</sup>。土壤脲酶对有机氮矿化起重要作用,调节氮的动态平衡;土壤磷酸酶参与元素磷的循环过程,其活性强弱受到土壤速效磷的消耗和无机磷的

吸收<sup>[20]</sup>。研究表明土壤中低分量的总磷和高分量的速效钾、锌成分能促使大黄中蒽酮的形成<sup>[21]</sup>。土壤中营养元素不足时,土壤中各因子对植物生长影响小于气候条件对植物发育的影响。

综合分析,不同的外部环境不同程度上刺激影响着杠柳生长发育及化学成分组成,在植物的生长发育过程中,植物通过改变自身形态特征和生理特性来逐渐适应不同生境。气候、海拔、土壤对杠柳生长的影响是不同的,要综合考虑温度、降水、日照时数、土壤养分等因素。了解到药典中明确规定以 4-甲氧基水杨醛含量作为杠柳根皮(香加皮)的唯一的质控制标准,所以从提升杠柳根皮(香加皮)品质和水量少发展沙产业方面考虑,Site 2 地区样地(红寺堡)更适合作为杠柳种群的野生抚育资源和建立生态种植基地。

## 4 结论

本文以宁夏不同地区的杠柳种群为研究对象,运用现代植物化学技术和高效液相色谱(HPLC)法对杠柳药用有效成分含量研究,分析 4 个不同地区环境条件下生态因子(气候、海拔、土壤)与药用有效成分含量的差异,研究宁夏不同地区生境对杠柳和有效成分的影响,主要研究结论如下:

(1) 宁夏不同地区生境杠柳根皮中药用有效成分含量差异较大,其中 Site 2 (1.22 %)、Site 3 (0.59 %)、Site 4 (0.80 %)样地的杠柳根皮中 4-甲氧基水杨醛的含量都符合药典标准,说明这 3 个生态区域的杠柳根皮(香加皮)的品质可能更好。

(2) 杠柳和生境各生态因子的关系研究表明,海拔、降水量、温度、蒸散量、土壤因子与杠柳生物学特性、有效成分具有很高的相关度,这和杠柳的生长习性密切相关。综合分析可以说明一定范围的海拔高度,弱碱性土壤、光照良好的环境是杠柳生长的重要条件,此外充足的水分条件和适宜磷、钾元素更有利于杠柳的生长发育及化学成分合成。因此,在进行杠柳野化抚育和生态种植基地地址选择时,应充分考虑并选择适宜生态让杠柳生长,同时结合产地实际状况,合理有效地开展药材生产布局。

综上所述,可以知道在水分条件相对干旱、土壤相对贫瘠的生境条件下,杠柳可通过减缓生长速度,改变叶片及根系功能性状,调节抗氧化系统等途径应对生境的变化。杠柳药用有效成分受海拔、降水量、温度、蒸散量、土壤因素的影响,不同生态地区杠柳品质存在较大差异化,其中红寺堡区域的杠柳(香加皮)药材品质较好,可以作为野生抚育资源,建立杠柳仿野生栽培及药材生产基地,而在分布地区较偏远,气候湿润、资源蕴含量丰富的南部山区,可以建立生态种植基地。

## 参 考 文 献

- 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志-第六十三卷[M]. 科学出版社, 1977: 273.  
(中国科学院中国植物志编辑委员会. Flora of China - Volume 63 [M]. Science Press, 1977: 273.)  
瞿晴. 黄土丘陵区草灌演替过渡阶段不同植物物种生态位特征及影响因素[D].西北农林科技大学,2021.  
(Qu Qing. Ecological Niche Characteristics and Influencing Factors of Different Plant Species During the Grass-Shrub Succession Transition Stage in the Loess Hilly Region [D]. Northwest A&F University, 2021.)  
张辉云, 贺清华, 童珊珊, 等. 香加皮活性成分及其药理作用研究进展[J]. 药学进展, 2013,37(09): 449-453.  
(Zhang Huiyun, He Qinghua, Tong Shanshan, et al. Research Progress on Active Components and Pharmacological Effects of Cortex Periplocacae [J]. Pharmaceutical Progress, 2013, 37(09): 449-453.)  
李莉, 张蕾, 高钧, 等. 香加皮脂肪酸化学成分分析[J]. 中草药, 2008,39(09): 1306-1307.  
(Li Li, Zhang Lei, Gao Jun, et al. Analysis of Fatty Acid Chemical Constituents in Cortex Periplocacae [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2008, 39(09): 1306-1307.)  
王宁, 陈书红, 任风芝, 等. 香加皮的化学成分研究: 2008 年中国药学会学术年会暨第八届中国药师周[C], 中国河北石家庄, 2008.  
(Wang Ning, Chen Shuhong, Ren Fengzhi, et al. Research on Chemical Constituents of Cortex Periplocacae: Proceedings of the 2008 Annual Meeting of the Chinese Pharmaceutical Association and the 8th China Pharmacist Week [C], Shijiazhuang

ng, Hebei, China, 2008.)

王利萍, 刘建利. 香加皮的化学成分和药理作用研究进展[J]. 中草药, 2009,40(03): 493-496.

(Wang Liping, Liu Jianli. Research Progress on Chemical Constituents and Pharmacological Effects of Cortex Periplocae [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2009, 40(03): 493-496.)

李金楠, 赵丽迎, 于静, 等. 香加皮化学成分的研究[J]. 中成药, 2010,32(09): 1552-1556

(Li Jinnan, Zhao Liying, Yu Jing, et al. Studies on Chemical Constituents of Cortex Periplocae [J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2010, 32(09): 1552-1556.)

Sun J K, Li T, Xia J B, et al. Influence of salt stress on ecophysiological parameters of periploca sepium bunge[J]. Plant, soil and environment, 2011,57(4): 139-144.

Li Y, Zeng X N, Wang W Z, et al. Chemical constituents from the roots of periploca sepium with insecticidal activity[J]. Journal of asian natural products research, 2012,14(8): 811-816.

周红兵. 不同生境蒙古扁桃药材品质及生理生态适应机制研究[D]. 内蒙古大学, 2015.

(Zhou Hongbing. Research on the Quality and Physiological and Ecological Adaptation Mechanism of Mongolian Apricot Medicinal Materials in Different Habitats [D]. Inner Mongolia University, 2015.)

刘恕. 留下阳光是沙产业立意的根本——对沙产业理论的理解[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2009,29(02): 40-44.

(Liu Shu. Leaving Sunshine Is the Fundamental Idea of Sand Industry: Understanding the Theory of Sand Industry [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences), 2009, 29(02): 40-44.)

Korner, Christian. Alpine Plant Life: Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems[M]. Alpine plant life: functional plant ecology of high mountain ecosystems, 2001.

孙向阳. 土壤学[M]. 中国林业出版社, 2021.

(Sun Xiangyang. Soil Science [M]. China Forestry Publishing House, 2021.)

刘振成. 生态因子对朝鲜淫羊藿生长发育及其药材质量的影响[D]. 吉林农业大学, 2020.

(Liu Zhencheng. Effects of Ecological Factors on the Growth and Development of Epimedium koreanum and Its Medicinal Quality [D]. Jilin Agricultural University, 2020.)

郝佳, 刘宇航, 殷洁, 等. 不同磷浓度对土壤理化性质及防风生长和药材品质的影响[J]. 华南农业大学学报, 2022,43(03): 59-67.

(Hao Jia, Liu Yuhang, Yin Jie, et al. Effects of Different Phosphorus Concentrations on Soil Physical and Chemical Properties, Growth, and Medicinal Quality of Saposhnikovia divaricata [J]. Journal of South China Agricultural University, 2022, 43(03): 59-67.)

白洋, 王英哲, 姜大成, 等. 不同产地朝鲜淫羊藿的土壤因子与药材质量相关性分析[J]. 时珍国医国药, 2022,33(01): 215-218

(Bai Yang, Wang Yingzhe, Jiang Dacheng, et al. Correlation Analysis of Soil Factors and Medicinal Quality of Epimedium koreanum from Different Producing Areas [J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2022, 33(01): 215-218.)

唐琨, 朱伟文, 周文新, 等. 土壤 pH 对植物生长发育影响的研究进展[J]. 作物研究, 2013,27(02): 207-212.

(Tang Kun, Zhu Weiwen, Zhou Wenxin, et al. Research Progress on the Effects of Soil pH on Plant Growth and Development [J]. Crop Research, 2013, 27(02): 207-212.)

Liu C A, Zhou L M, et al. Soil organic carbon sequestration and fertility response to newly-built terraces with organic manure and mineral fertilizer in a semi-arid environment[J]. Soil and Tillage Research, 2017,172: 39-47.

Jiang J P, Xiong Y C, Jiang H M, et al. Soil Microbial Activity During Secondary Vegetation Succession in Semiarid Abandoned Lands of Loess Plateau[J]. Pedosphere, 2009,19(6): 735-747.

Zhang C, Xue S, Liu G B. A comparison of soil qualities of different revegetation types in the Loess Plateau, China[J]. 2011,32(1-2): 163-178.

Ren G X, Li L, Hu H J, et al. Influence of the Environmental Factors on the Accumulation of the Bioactive Ingredients in Chinese Rhubarb Products[J]. Plos One, 2016,11(5): 1371.