

神农架林区不同海拔红桦树成分含量差异

岳发号^{1*}, 李晴², 向丹¹, 李军², 王洪政², 唐中华²

¹神农架林区林业投资开发集团有限责任公司, 湖北 神农架

²东北林业大学化学化工与资源利用学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2025年5月17日; 录用日期: 2025年7月10日; 发布日期: 2025年7月21日

摘要

为探讨神农架林区红桦各部位活性成分含量差异及主要活性成分含量与海拔、土壤矿质元素以及树皮颜色之间的关系, 本论文对比研究了神农架林区不同海拔红桦树不同部位的黄酮、多酚、可溶性糖和萜类化合物含量差异, 并探讨了土壤矿质元素的影响, 以及红桦树皮颜色与萜类化合物含量的关系。研究发现, 低海拔的天燕景区红桦树皮和根中黄酮、多酚和萜类含量以及树皮和枝条中可溶性糖含量均普遍高于高海拔的温水林场, 而枝条中黄酮、多酚和萜类含量则与此相反。红桦树皮萜类化合物含量与L值和 ΔE 值呈显著负相关。两地红桦和土壤中富含多种必需元素, 且土壤与红桦样品中各元素含量具有较好的相关性。

关键词

神农架, 红桦, 活性物质, 树皮颜色, 矿质元素

Differences in the Component Content of *Betula albosinensis* at Different Altitudes in the Shennongjia Forest Area

Fahao Yue^{1*}, Qing Li², Dan Xiang¹, Jun Li², Hongzheng Wang², Zhonghua Tang²

¹Shennongjia Forest Area Forestry Investment and Development Group LLC, Shennongjia Hubei

²College of Chemistry, Chemical Engineering and Resource Utilization, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang

Received: May 17th, 2025; accepted: Jul. 10th, 2025; published: Jul. 21st, 2025

*通讯作者。

文章引用: 岳发号, 李晴, 向丹, 李军, 王洪政, 唐中华. 神农架林区不同海拔红桦树成分含量差异[J]. 植物学研究, 2025, 14(4): 234-245. DOI: 10.12677/br.2025.144027

Abstract

In order to explore the differences in the content of active ingredients in different parts of red birch trees in the Shennongjia forest area and the relationship between the content of main active ingredients and altitude, soil mineral elements, and bark color, this paper compared and studied the differences in the content of flavonoids, polyphenols, soluble sugars, and terpenoids in different parts of red birch trees at different altitudes in the Shennongjia forest area, and explored the influence of soil mineral elements, as well as the relationship between the color of red birch bark and the content of terpenoids. Research has found that the content of flavonoids, polyphenols, and terpenes in the bark and roots of red birch trees at low altitudes, as well as the content of soluble sugars in the bark and branches, are generally higher than those in high-altitude warm water forest farms, while the content of flavonoids, polyphenols, and terpenes in the branches is the opposite. The content of terpenoids in birch bark is significantly negatively correlated with L value and ΔE value. The red birch and soil in both places are rich in various essential elements, and there is a good correlation between the content of each element in the soil and red birch samples.

Keywords

Shennongjia Forestry Area, Honghua, Active Substance, Bark Color, Mineral Elements

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

红桦(*Betula albosinensis* Burkill), 是桦木科桦木属的大乔木植物。“红桦”因其树皮呈淡红棕色或紫红色而得名。主要分布于暖温带和亚热带的山地林区, 在我国主要分布于青海、湖北、四川和云南等省份, 红桦枝叶繁茂、根系较为发达, 生长状况不易受到外界环境干扰, 抗病虫害能力强, 且耐湿、耐寒与耐土壤瘠薄, 因而常常被当作荒地造林和森林更新的树种, 对维护林区生态系统的平衡和生态系统恢复重建有重要意义, 是森林的主要建群树种和造林先锋树种之一[1][2]。红桦树具有多种用途, 其桦树汁含有人体所需的 20 种微量元素与 17 种氨基酸, 常用于制作保健饮品; 其木材坚硬、质地优良可作为建筑材料。红桦树皮薄层且光泽度好, 具有药用价值, 有清热利湿、祛痰止咳和解毒消肿的功效; 也可治疗关节炎、风湿病和脚气等顽症; 此外由于其颜色鲜艳具有极高的观赏价值, 红桦树是集多种经济效益和绿化、美化环境于一体的珍贵树种。

目前国内外针对桦树科植物的研究主要集中于白桦等种属的化学成分及其活性的研究[3]-[5]。而少量对于红桦的研究也主要集中于种群结构、群落分布等宏观角度和关于红桦生长情况、生理生化以及对环境适应性机制的研究[6]-[9]。研究中药材各有效成分以及药材土壤微量元素与药材生长的意义, 是一个涉及中医药理论、现代药理学、农业生态学及环境科学的综合性课题。中药材的临床疗效源于其复杂的化学成分, 而药材的生长环境, 尤其是土壤中的微量元素, 直接影响其有效成分的合成与积累。因此, 深入探讨红桦有效成分含量与土壤环境因素的关系, 不仅有助于提升中药材的质量和疗效, 还能为科学种植、资源保护和可持续发展提供理论依据。由于红桦树皮颜色差异显著, 且目前缺少红桦树皮颜色差异与物质含量的研究, 故对其颜色差异进行研究。色泽作为中药材及中药饮片质量鉴定的关键指标, 其传统评价方法存在明显局限性: 一方面主观判断易受个体差异影响, 另一方面对色度差异的敏感性不足

[10]。虽然 UPLC-MS/MS [11]、氢核磁共振代谢组学技术[12]和 HPLC 指纹图谱法等[13]可提供精确数据，但其高昂成本和操作复杂限制了实际应用。现代研究已表明，中药色泽与内在品质具有一定的相关性[14]-[19]。因此进一步开展对红桦活性物质研究，系统分析样品颜色差异与有效成分含量的关联性，不仅可填补该物种物质基础的研究，更能为红桦植物资源的科学开发与合理利用提供理论依据。

本文以神农架林区的天燕景区与温水林场的红桦资源为样品，探究不同海拔与不同部位的黄酮、多酚、可溶性糖及萜类的含量差异，以及萜类成分含量与红桦树皮颜色差异之间的关系，并对两地红桦生长环境中的矿质元素与活性成分之间的关系进行了研究。

2. 实验与方法

2.1. 实验材料和实验设计

本实验中红桦采集于湖北省神农架林区的天燕景区与温水林场，两地海拔分别为 2054 m 和 2512 m。选取质地均一且完整的桦树皮、桦树枝条、桦树根及两地土壤样品。采用超声波辅助提取法，通过紫外分光光度法定量分析红桦中黄酮、多酚、可溶性糖及萜类含量。着重对萜类成分含量与红桦树皮颜色差异之间的关系进行研究，并检测红桦生长环境中的微量元素。

2.2. 方法

2.2.1. 总黄酮含量检测

桦树皮、桦树枝条、桦树根与土壤样品放入 80℃烘箱中，烘干至恒重，研磨。精确称量样品粉末 1.5 g，60%的乙醇超声提取 30 min (料液比 1:20)，重复提取 3 次，合并提取液。10,000 g/min，离心 20 min，取上清液。采用亚硝酸钠 - 硝酸铝法检测总黄酮含量[20]。精密吸取适宜体积的待测液，加蒸馏水定容至 4 ml，加入 0.2 mL5%的 NaNO_2 溶液，摇匀，静置 6 min。再加入 0.2 mL10%的 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 溶液，摇匀，静置 6 min。最后加入 0.6 mL4%的 NaOH 试液，摇匀，静置 40 min，在 510 nm 波长下读取吸光度值。标准曲线按同样方法制作(浓度为 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 芦丁标准品溶液)。

2.2.2. 总酚含量检测

按照 2.2.1.项制备待测液，采用 Folin-Ciocalteus 比色法测定总酚含量[21]。精密吸取适宜体积的待测液，加水定容至 6 ml，加入 1 ml 的 FC 显色剂和 3 ml7.5%的 Na_2CO_3 溶液，摇匀后，在室温下避光反应 60 min。在 765 nm 波长下读取吸光度值。标准曲线按同样方法制作(浓度为 50 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的没食子酸标准品溶液)。

2.2.3. 可溶性糖含量检测

按照 2.2.1.项制备待测液，采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量[22]。精密吸取适宜体积的待测液，分别加水定容至 2 ml，加入 0.5 mL2%的蒽酮乙酸乙酯，摇匀，加 5 mL 浓硫酸后摇匀。在 630 nm 波长下读取吸光度值。标准曲线按同样方法制作(浓度为 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的葡萄糖标准品溶液)。

2.2.4. 总萜含量检测

按照 2.2.1.项制备待测液，采用香草醛 - 冰醋酸法测定总萜含量[23]。精密吸取适宜体积的待测液，将其放入真空旋转蒸发器中 50℃挥干，加入 0.2 ml 香草醛 - 冰醋酸，0.8 ml 高氯酸，摇匀，80℃水浴加热 15 min，再加 5 ml 冰醋酸摇匀后，冷水流冲洗 2 min。在 550 nm 波长下读取吸光度值。标准曲线按同样方法制作(浓度为 200 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的齐墩果酸标准品溶液)。

2.2.5. 不同区域红桦树皮颜色与萜类含量关系

选取各区域质量均一且表面平整的红桦树皮，采用分光测色仪，起止波长为 350~750 nm，观察角为 10°，测量光源为 D65。仪器经校准后(校准有效期 8 h)，将样品铺平至其底部完全不透光进行测定，记录

样品的色度值数据 L^* (明度)、 a^* (红绿色)和 b^* (黄蓝色)。每个区域测量 10 个点, 取平均值。并按色差公式 $\Delta E^* = \left[(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 \right]^{1/2}$, 分别计算各样品的总色差值 ΔE^* , 根据 2.2.4.项下的方法测量萜类化合物含量。

2.2.6. 微量元素检测

精密称取桦树皮、桦树枝条、桦树根及两地土样 0.2 g, 置聚四氟乙烯消解罐中, 加无铅硝酸 5 ml, 升温至 150℃开始消解, 消解时间约为 4 h。消解后使用 2%的硝酸溶液复溶, 定容至 50 ml 容量瓶中, 定容后溶液稀释 500 倍, 经 0.45 μm 水系滤膜过滤后上样检测。待测样品采用电感耦合等离子发射光谱仪进行微量元素测定。

3. 结果

3.1. 红桦样品总黄酮含量检测结果

以吸光值(OD_{510})为纵坐标, 以标准品溶液中芦丁含量(μg)为横坐标绘制标准曲线。线性方程为 $Y = 0.0022X - 0.0175$, $R^2 = 0.9995$ 。总黄酮类化合物含量具体检测结果见“表 1”, 可以看出, 两个地点的红桦树皮、枝条和根中含有 1.4%~2.6%左右的黄酮类化合物, 其中天燕景区红桦树皮和根中的总黄酮含量高于温水林场, 而枝条中总黄酮含量则是温水林场高于天燕景区。

Table 1. Detection results of total flavonoid content in red birch samples (mg/g)

表 1. 红桦样品总黄酮含量检测结果(mg/g)

区域	桦树皮	桦树枝条	桦树根
天燕景区	20.30	13.87	25.77
温水林场	15.89	21.10	22.94

3.2. 红桦样品总酚含量检测结果

以吸光值(OD_{765})为纵坐标, 以标准品溶液中没食子酸含量(μg)为横坐标绘制标准曲线。线性方程为 $Y = 0.0093X + 0.0095$, $R^2 = 0.9999$ 。总酚类化合物含量具体检测结果见“表 2”, 可以看出, 两个地点的红桦树皮、枝条和根中含有 0.7%~1.9%左右的酚类化合物, 其中天燕景区红桦树皮和根中的总酚含量高于温水林场, 而枝条中总酚含量则是温水林场高于天燕景区。

Table 2. Detection results of the total phenol content of the red birch samples (mg/g)

表 2. 红桦样品总酚含量检测结果(mg/g)

区域	桦树皮	桦树枝条	桦树根
天燕景区	10.90	8.25	18.53
温水林场	7.10	12.88	13.55

3.3. 红桦样品总可溶性糖含量检测结果

以吸光值(OD_{630})为纵坐标, 以标准品溶液中葡萄糖含量(μg)为横坐标绘制标准曲线。线性方程为 $Y = 0.0065X + 0.032$, $R^2 = 0.9972$ 。萜类化合物含量具体检测结果见“表 3”, 可以看出, 两个地点的红桦树皮、枝条和根中含有 0.3%~6.3%左右的可溶性糖, 其中天燕景区红桦树皮和枝条中的可溶性糖含量高于温水林场, 而根中可溶性糖含量则温水林场稍高于天燕景区。同时还发现, 两个地点红桦枝条和根中

可溶性糖的含量远高于树皮。

Table 3. Detection results of the total soluble sugar content in red birch samples (mg/g)

表 3. 红桦样品总可溶性糖含量检测结果(mg/g)

区域	桦树皮	桦树枝条	桦树根
天燕景区	4.50	63.05	46.15
温水林场	3.21	46.43	48.18

3.4. 红桦样品总萜含量检测结果

以吸光值(OD550)为纵坐标, 以反应液中齐墩果酸含量(μg)为横坐标, 绘制标准曲线。线性方程为 $Y = 0.0027X + 0.0432$, $R^2 = 0.9980$ 。萜类化合物含量具体检测结果见“表 4”, 可以看出, 两个地点的红桦树皮、枝条和根中含有 6.4%~13.9%左右的萜类化合物, 其中天燕景区红桦树皮和根中的萜类化合物含量高于温水林场, 而枝条中则温水林场高于天燕景区。

Table 4. Detection results of total terpene content in red birch samples (mg/g)

表 4. 红桦样品总萜含量检测结果(mg/g)

区域	桦树皮	桦树枝条	桦树根
天燕景区	139.73	60.64	72.64
温水林场	101.96	80.98	63.87

3.5. 红桦树皮颜色与总萜类成分含量关系

由于两地红桦树皮中萜类含量较高, 故对两地三种不同色度的红桦树皮的色度参数及色度差进行检测, 具体检测结果见“表 5”。对两地点的红桦树皮中萜类化合物含量进行检测, 具体检测结果见“表 6”。可以看出 a 类树皮萜类含量最高, b 类次之, c 类树皮萜类含量最低。

Table 5. Parameters and color difference results of red birch bark color measured by colorimeter in different regions

表 5. 基于色度仪测定的不同区域红桦树皮颜色的参数及色度差结果

样品	L*	a*	b*	ΔE^*
天燕景区 a	40.178	14.472	16.86	45.91264
天燕景区 b	48.221	14.479	24.199	55.86142
天燕景区 c	61.679	4.125	16.106	63.8805
温水林场 a	38.332	12.363	11.63	41.92187
温水林场 b	42.93	14.935	19.031	49.27695
温水林场 c	68.514	3.351	19.933	71.43334

Table 6. Results of total terpenoid content in different red birch bark colors in different regions (mg/g)

表 6. 不同区域不同红桦树皮颜色的总萜类化合物含量结果(mg/g)

区域	a	b	c
天燕景区	73.936524	51.87724118	32.96052632
温水林场	78.54872759	41.09297282	24.40211105

由“图 1”可看出,天燕景区的萜类含量与 ΔE 值有显著的负相关($P < 0.05$)。而温水林场萜类含量与色度参数之间没有相关性。

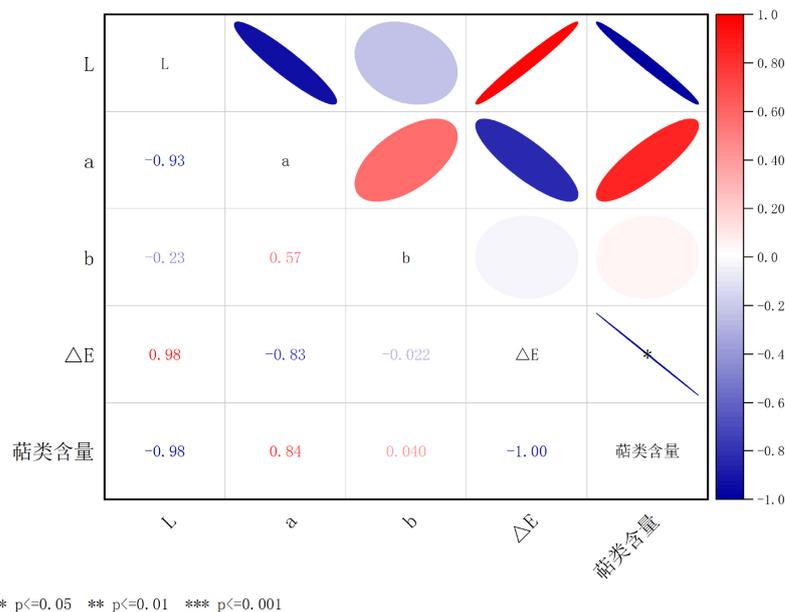


Figure 1. Correlation between terpene content and chromaticity parameters in TianYan scenic area

图 1. 天燕景区的萜类含量与色度参数之间的相关性

由“图 2”可以看出,两地区的萜类含量与 L 值和 ΔE 值有显著性的负关系($P < 0.05$),而 ΔE 与 L 有极显著的正相关($P < 0.001$), ΔE 与 a 值有显著的负相关($P < 0.05$), L 值与 a 值有显著的负相关($P < 0.05$)。

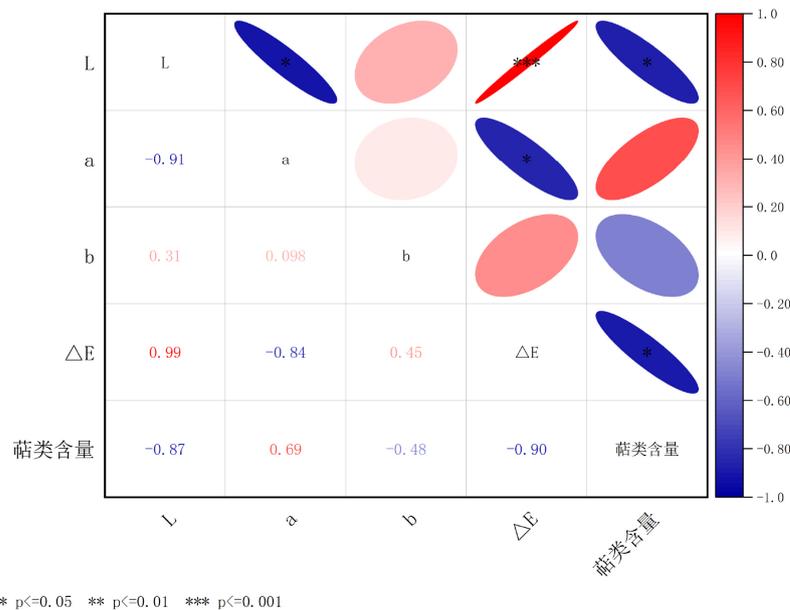


Figure 2. Correlation between terpenoid content and chromaticity parameters in the two regions

图 2. 两地区的萜类含量与色度参数之间的相关性

3.6. 微量元素检测

3.6.1. 天燕景区红桦样品矿质元素含量检测结果

Table 7. Mineral element content results of red birch samples in TianYan scenic area (mg/kg)

表 7. 天燕景区红桦样品矿质元素含量结果(mg/kg)

元素	树皮	枝条	根	土
Ca	2658.250	6237.000	4581.000	11278.250
K	2867.500	3722.750	1450.875	53982.500
Mg	991.100	1542.650	639.650	15409.500
Na	1254.625	195.575	133.650	27262.500
Fe	2049.750	42.075	350.150	30524.275
Cu	14.400	11.325	3.925	35.850
Mn	122.725	16.075	11.675	998.475
Zn	137.325	89.500	43.725	155.675
Mo	0.425	0.875	0.350	0.100
B	18.750	11.250	3.250	47.500
Ni	2.075	0.000	0.800	43.950
Se	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	5950.475	124.625	477.475	103607.925
Cd	0.000	0.000	0.000	0.000
Pb	1.813	1.213	2.013	29.563
AS	0.023	0.028	0.024	0.044
Hg	0.000	0.000	0.000	0.000

3.6.2. 温水林场红桦样品矿质元素含量检测结果

Table 8. Results of mineral element content in red birch samples from WenShui forest farms (mg/kg)

表 8. 温水林场红桦样品矿质元素含量结果(mg/kg)

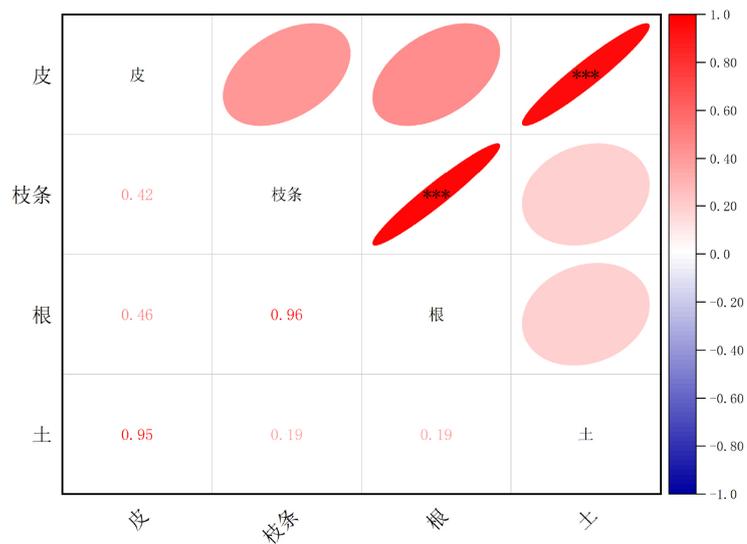
元素	树皮	枝条	根	土
Ca	1869.125	4478.750	3036.000	16421.000
K	759.175	3363.000	1570.500	51535.000
Mg	168.125	1235.850	505.950	14980.250
Na	165.800	226.575	145.900	24261.500
Fe	174.075	69.650	71.575	30311.775
Cu	10.600	9.450	2.625	40.400
Mn	287.750	32.125	24.475	1067.925

续表

Zn	75.900	98.600	31.500	115.525
Mo	0.325	0.125	0.100	1.475
B	24.500	35.000	16.000	35.000
Ni	0.000	0.000	0.000	41.175
Se	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	204.600	131.075	119.125	125898.550
Cd	0.000	0.625	0.000	0.400
Pb	1.413	1.613	0.000	26.713
AS	0.021	0.030	0.024	0.067
Hg	0.000	0.000	0.000	0.000

从“表 7”与“表 8”的检测结果可以看出,除了未检出 Se 外,红桦树皮、枝条和根中均含有较多的 Ca、K、Mg、Na 和 Fe 等对人体有益的必需元素,且天燕景区红桦树各部位人体必需元素的含量大多要高于温水林场。天燕景区和温水林场桦树各部位样品中均未检出高含量的 Cd、Pb、As 和 Hg 等有害重金属元素。天燕景区和温水林场红桦树生长土壤环境中除了未检出 Se 外,土壤中也含有丰富的 Ca、K、Mg、Na 和 Fe 等大量元素以及 Cu、Mn、Zn、Mo、B 等微量元素,且天燕景区与温水林场各元素的含量差别不大。此外,天燕景区和温水林场桦树生长土壤环境中均未检出高含量的 Cd、Pb、As 和 Hg 等有害重金属元素。

由“图 3”可以得出,天燕景区的桦树土与桦树皮的微量元素含量之间有极显著的正相关($P < 0.001$),桦树根与桦树枝条的微量元素含量之间有极显著的正相关($P < 0.001$)。

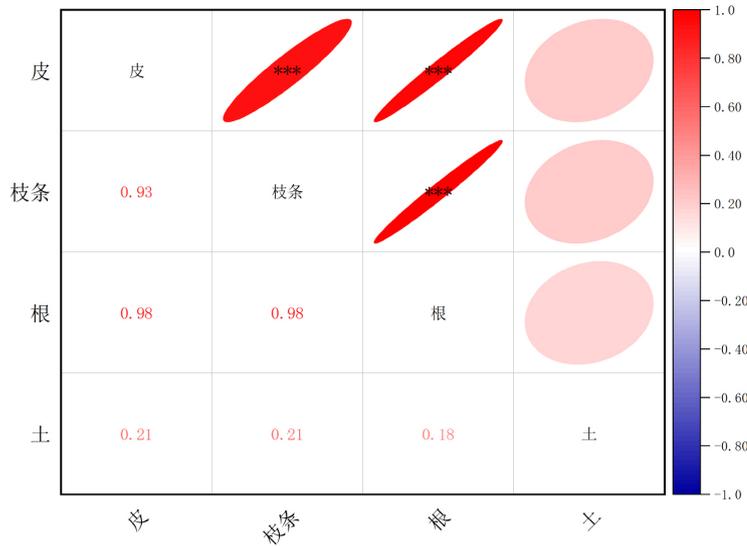


* $p < 0.05$ ** $p < 0.01$ *** $p < 0.001$

Figure 3. The relationship between trace elements in different parts of birch tree samples from the TianYan scenic area

图 3. 天燕景区不同桦树样品部位微量元素之间的关系

由“图 4”可以得出，温水林场的桦树根与桦树皮和桦树枝条的微量元素含量之间有极显著的正相关($P < 0.001$)，桦树枝条与桦树皮的微量元素含量之间有极显著的正相关($P < 0.001$)。

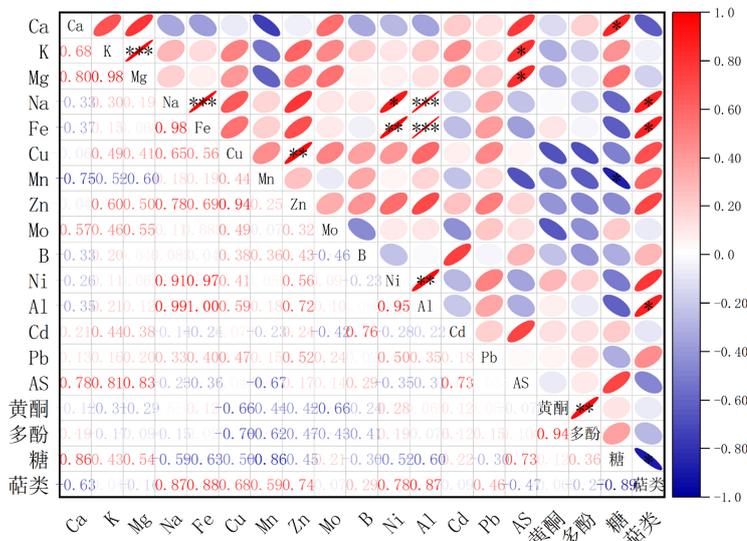


* $p < 0.05$ ** $p < 0.01$ *** $p < 0.001$

Figure 4. Relationship between trace elements in different birch sample sites in WenShui forest farms

图 4. 温水林场不同桦树样品部位微量元素之间的关系

由“图 5”可以得出植物体微量元素 Ca 与可溶性糖含量成正相关($P < 0.05$)，Na、Fe、Al 与萜类含量成正相关($P < 0.05$)。



* $p < 0.05$ ** $p < 0.01$ *** $p < 0.001$

Figure 5. The relationship between trace elements in plant bodies and the content of various active ingredients

图 5. 植物体微量元素与各有效成分含量之间的关系

由“图 6”可以得出土壤微量元素 AS 与多酚含量成正相关($P < 0.05$)。

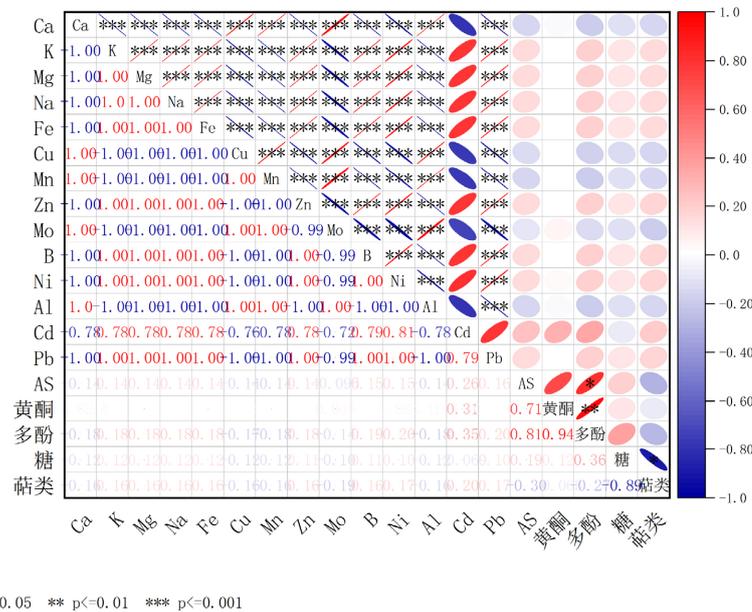


Figure 6. The relationship between soil trace elements and the content of various effective components

图 6. 土壤微量元素与各有效成分含量之间的关系

4. 讨论

本研究发现，两地区各有效成分含量之间有较大差异，根据天燕景区海拔为 2054 m，温水林场海拔为 2512 m，两地相差近 460 m 海拔差可知，两区域海拔差异造成了气温差异。已有研究表明气温差异会影响有效成分含量的积累[24]，本研究两地红桦含量差异存在与其结果表述相一致。研究中还发现桦树皮颜色差异造成了蒽类化合物含量的差异。近年来，中药材质量评价逐渐引入了数字化颜色分析方法，有效规避了经验式判别带来的主观性偏大的问题。已有研究通过数字化颜色参数与有效成分含量的相关性分析，为中药材质量评价提供了新的思路[25]-[29]。因此，构建一个涵盖有效成分和与红桦树皮颜色之间的质量评价体系，对于提升红桦资源评价的科学性和全面性具有重要意义。本研究通过数字化颜色分析方法获取红桦树皮 L^* 、 a^* 和 b^* 值并计算出总色差 ΔE^* ，发现红桦树皮红色程度与 L^* (亮度) 有关，红桦树皮 L^* (亮度) 越小，则 ΔE^* 越小。可以通过红桦树皮的数字化颜色参数把模糊的主观判断进行量化，使评价结果更加客观、科学。根据 OriginPro 2025 函数绘图软件对红桦树皮的数字化颜色参数与其蒽类有效成分含量绘制可视化热图。结果表明，红桦树皮 L^* 越小， ΔE^* 越小，其蒽类有效成分含量越高，反之，红桦树皮 L^* 越大， ΔE^* 越大，其蒽类有效成分含量越低。天燕景区的蒽类含量与 ΔE 值有显著的负相关($P < 0.05$)，而温水林场蒽类含量与色度参数之间没有相关性。但两地区的蒽类含量与 L 值和 ΔE 值有显著的负相关($P < 0.05$)。

已有研究表明地下部土壤成分对于植物体地上部微量元素及有效成分含量具有一定的影响[30]-[32]。本研究天燕景区的桦树土与桦树皮微量元素含量之间，桦树根与桦树枝条微量元素含量之间有极显著的正相关($P < 0.001$)，温水林场的桦树根与桦树皮和桦树枝条的微量元素含量之间，桦树枝条与桦树皮的微量元素含量之间有极显著的正相关($P < 0.001$)。即在一定范围内红桦生长环境的土壤中微量元素越多，红桦树的地上部微量元素含量越多。其中植物体内的 Ca 与可溶性糖含量成正相关($P < 0.05$)，植物体内的

Na、Fe、Al 与萜类含量成正相关($P < 0.05$), 且土壤中少量 AS 对多酚起到促进作用, 相比于土壤中的元素, 植物体本身的元素含量与有效成分的积累有多的相关性。

本研究基于数字化颜色参数与统计学分析相结合, 探究红桦树皮颜色与有效成分含量的相关性, 及各部位微量元素之间的相关性。实现了从药材资源的源头进行红桦树皮的质量控制, 建立并丰富了精准的红桦树皮药材颜色特征、有效成分及微量元素之间的资料。

5. 结论

红桦各部位含有 1.4%~2.6%左右的黄酮类化合物, 0.7%~1.9%左右的酚类化合物, 0.3%~6.3%左右的可溶性糖和较高的萜类化合物含量为 6.4%~13.9%。其中天燕景区的桦树皮与桦树根的黄酮、多酚和萜类含量高于温水林场, 只有桦树枝低于温水林场。而可溶性糖的含量, 则是天燕景区的桦树皮与桦树枝条高于温水林场, 而根中可溶性糖含量则温水林场稍高于天燕景区。同时还发现, 两个地点红桦树枝条和根中可溶性糖的含量远高于皮。其中两地区的萜类含量与 L 值和 ΔE 值有显著性的负相关。

微量元素检测发现, 除了未检出 Se 外, 红桦树皮、枝条、根和土壤中均含有较多的 Ca、K、Mg 和 Fe 等对人体有益的必需元素, 且天燕景区红桦树各部位人体必需元素的含量大多要高于温水林场, 但土壤中除了上诉元素外, 还检测出含有 Cu、Mn、Zn、Mo、B 等微量元素, 且天燕景区与温水林场各元素的含量差别不大。此外, 天燕景区和温水林场桦树各部位与生长土壤中均未检出高含量的 Cd、Pb、As 和 Hg 等有害重金属元素。土壤中含有的微量元素对地上部微量元素的含量具有一定促进作用。其中植物体内的 Ca 对可溶性糖含量, Na、Fe、Al 对萜类含量积累有促进作用, 且土壤中少量 AS 对多酚含量积累也起到促进作用。

致 谢

感谢神农架林区林业投资开发集团有限责任公司的资金支持。

参考文献

- [1] 毛艳燕. 小陇山林区红桦树科学种植技术及其实践应用效果的探讨[J]. 种子世界, 2025(3): 177-179.
- [2] 宿昊, 申耀荣, 蔡靖, 等. 不同种源红桦种子的萌发特性[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(3): 109-114.
- [3] Blondeau, D., St-Pierre, A., Bourdeau, N., et al. (2020) Antimicrobial Activity and Chemical Composition of White Birch (*Betula papyrifera* Marshall) Bark Extracts. *MicrobiologyOpen*, **9**, e00944.
- [4] Iguchi, T., Kuroda, M., Akiyama, N., Hashimoto, M. and Mimaki, Y. (2020) Chemical Constituents and Aldose Reductase Inhibitory Activities of *Betula alba* Bark and Leaves. *Natural Product Research*, **36**, 1004-1008. <https://doi.org/10.1080/14786419.2020.1839455>
- [5] So, H.M., Eom, H.J., Lee, D., Kim, S., Kang, K.S., Lee, I.K., et al. (2018) Bioactivity Evaluations of Betulin Identified from the Bark of *Betula platyphylla* var. *japonica* for Cancer Therapy. *Archives of Pharmacal Research*, **41**, 815-822. <https://doi.org/10.1007/s12272-018-1064-9>
- [6] Guo, Y., Zhao, P. and Yue, M. (2019) Canopy Disturbance and Gap Partitioning Promote the Persistence of a Pioneer Tree Population in a Near-Climax Temperate Forest of the Qinling Mountains, China. *Ecology and Evolution*, **9**, 7676-7687. <https://doi.org/10.1002/ecc3.5319>
- [7] Yan, X., Li, Q., Deng, Y., Gao, L. and Gou, X. (2021) Warming-Induced Radial Growth Reduction in *Betula albosinensis*, Eastern Qilian Mountains, China. *Ecological Indicators*, **120**, Article ID: 106956. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106956>
- [8] Gao, H.Z., et al. (2022) Structure and Dynamic Characteristics of *Betula albosinensis* Populations in Two Regions in the Qinling Mountains of Northwestern China. *Journal of Beijing Forestry University*, **44**, 12-20.
- [9] Guo, Y.X., Hu, Y.N., Li, G., et al. (2014) Spatial Pattern and Spatial Association of *Betula albosinensis* at Different Developmental Stages at Taibai Mountain. *Scientia Silvae Sinicae*, **50**, 9-14.
- [10] 章璐璐, 楼招欢, 朱雪梅, 等. 微性状鉴定法在医疗机构中药饮片质量验收中的应用[J]. 中国药师, 2024, 27(8):

- 1309-1319.
- [11] 武宝爱, 闫锋, 申晨曦, 等. UPLC-MS/MS 法结合化学计量学法分析酸枣仁和理枣仁中多指标成分[J]. 中草药, 2021, 52(8): 2400-2407.
- [12] 申晨曦, 杜晨晖, 李震宇, 等. 基于氢核磁共振与偏小二乘法对酸枣仁及其掺伪品的鉴别[J]. 食品科学, 2020, 41(8): 275-281.
- [13] 田莹莹, 谢茵, 黄斌, 等. 基于 UPLC 指纹图谱及多指标成分含量测定的前胡真伪鉴别和质量评价研究[J]. 中药材, 2025(3): 694-699.
- [14] 马婷婷, 龚慕辛, 王智民, 等. 甘草色泽与有效成分含量的相关性研究[J]. 中国中药杂志, 2017, 42(19): 3776-3785.
- [15] 戴辉, 苏杭, 蔡鹏飞, 等. 五味子醋蒸前后颜色及 8 种木脂素变化[J]. 中成药, 2019, 41(5): 1091-1096.
- [16] 何晓凤, 阮豪南, 王露露, 等. 鹿茸规格与其颜色及化学成分的相关性研究[J]. 中国药学杂志, 2019, 54(15): 1226-1230.
- [17] 刘伟, 周冰谦, 王晓, 等. 丹参药材粉末色泽与有效成分含量的相关性[J]. 中华中医药杂志, 2019, 34(4): 1466-1470.
- [18] Fei, C., Dai, H., Wu, X., Li, L., Lu, T., Li, W., *et al.* (2017) Quality Evaluation of Raw and Processed *Crataegi fructus* by Color Measurement and Fingerprint Analysis. *Journal of Separation Science*, **41**, 582-589. <https://doi.org/10.1002/jssc.201700575>
- [19] 张建逵, 李云静, 孙智, 等. 基于断面色泽测定的条苓饮片分级研究[J]. 中国中药杂志, 2017, 42(21): 4115-4119.
- [20] 胡晓安, 周志云, 吴晗, 等. 不同来源黄芪总黄酮含量测定及其抗氧化活性研究[J]. 世界最新医学信息文摘, 2019, 19(64): 131-132.
- [21] 许海棠, 马少妹, 张金彦. 青天葵 4 种提取物抗氧化活性与其总黄酮和总酚含量的相关性[J]. 中成药, 2017, 39(1): 121-125.
- [22] 周佩珍. 植物生理学研究趋向[J]. 世界农业, 1985(2): 18-19.
- [23] Zhang, M., Zhang, Y., Guo, X., Chen, Y., Li, H., Zhou, G., *et al.* (2024) Extraction, Purification and Anticancer Activity Studies on Triterpenes from Pomegranate Peel. *Food & Function*, **15**, 6914-6928. <https://doi.org/10.1039/d4fo00183d>
- [24] 杨旭, 杨志玲, 王依清. 不同种源木姜叶柯活性成分差异与气候土壤因子的耦合研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(7): 34-41.
- [25] 贺方良, 程显隆, 李明华, 等. 基于颜色数字化结合熵权法分析防风色度值与内在成分的相关性[J]. 中药材, 2024, 47(3): 638-646.
- [26] 王亚顺, 拱健婷, 崔阳, 等. 基于数字化颜色和气味阐释五味子“辨状论质”的内涵[J]. 中华中医药杂志, 2024, 39(7): 3611-3618.
- [27] 邹婷, 王晶, 武旭, 等. 基于颜色-成分关联探讨金银花“炒炭存性”的科学内涵[J]. 中国实验方剂学杂志, 2024, 30(4): 175-182.
- [28] 朱新甜, 欧阳少琴, 王语诗, 等. 基于粉末颜色数字化的黄芩生长方式判别分析及主要药效成分含量的准确预测[J]. 中草药, 2025, 56(3): 1008-1015.
- [29] 武艳雪, 翁丽丽, 姜雨昕, 等. 基于色差原理分析黄芩化学成分含量与色度相关性[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2020, 22(8): 2839-2844.
- [30] Pinto, E., Almeida, A.A., Aguiar, A. and Ferreira, I. (2014) Changes in Macrominerals, Trace Elements and Pigments Content during Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Growth: Influence of Soil Composition. *Food Chemistry*, **152**, 603-611. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.12.023>
- [31] 高成林. 农田栽参土壤微生态环境及其对人参皂苷等有效成分的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林农业大学, 2020.
- [32] 王吉. 生物炭对稻田土壤微量元素有效性的影响及作用机制[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2023.