

不同林型下金毛狗蕨生长区的土壤养分特征

李思敏, 丁华平, 黎小清, 许木果, 刘忠妹, 肖 怡, 李惠波*

(云南省热带作物科学研究所, 云南景洪 666100)

[摘要]以金毛狗蕨为研究对象,通过测定并分析天然林与橡胶林林下金毛狗蕨生长区的土壤养分含量变化,探讨了养分指标之间、养分与地形因子间的相关性,进而评估林下种植金毛狗蕨对土壤养分的影响。结果表明:与对照区相比,两类林下金毛狗蕨生长区土壤氮、磷、钾含量平均增幅为51.1%、47.3%和37.1%,增幅最高的为橡胶林下的有效磷(196.4%);中量元素钙、镁平均增幅为17.6%和46.3%,增幅最高的为天然林下的交换性镁168.7%;而微量元素含量则普遍低于对照区,平均降幅最低为3.5%,最高为32.9%。两类林下金毛狗蕨生长区土壤养分分级得分均高于对照区,并出现明显的等级提升。综上,金毛狗蕨在林下的生长活动显著提高了土壤大量元素含量,有助于提升土壤肥力,该研究结果为推广金毛狗蕨林下栽培提供了理论依据。

[关键词]金毛狗蕨;林下土壤;养分变化

中图分类号:S567.1 文献标识码:A 文章编号:1672-450X(2026)03-0069-09

Characteristics of Soil Nutrients in *Cibotium barometz* Growing Areas under Different Forest Types

LI Simin, DING Huaping, LI Xiaoqing, XU Muguo, LIU Zhongmei, XIAO Yi, LI Huibo*

Yunnan Institute of Tropical Crops, Jinghong 666100, China

Abstract: This study focuses on the *Cibotium barometz* as the research subject. By measuring and analyzing the changes in soil nutrient content in the growth areas of *C. barometz* under natural forests and rubber plantations, the correlation between nutrient indicators and between nutrients and topographic factors was explored, and the impact of *C. barometz* growth on soil nutrients was further evaluated. The results showed that compared to the control area, the average increase in soil nitrogen, phosphorus, and potassium content in the growth areas of *C. barometz* in both types of understory environments was 51.1%, 47.3%, and 37.1%, respectively. The highest increase was available phosphorus under rubber forest (196.4%); the average increase in medium-level elements calcium and magnesium was 17.6% and 46.3%, respectively, with the highest increase being exchangeable magnesium under natural forest (168.7%); while the content of trace elements was generally lower than that in the control area, with the lowest average decrease being 3.5% and the highest being 32.9%. The soil nutrient grading scores in the growth areas of both types of understory *C. barometz* were higher than those in the control area, showing a significant improvement in grade. In summary, the growth activity of *C. barometz* in the understory significantly increases the content of soil macronutrients, contributing to the improvement of soil fertility. This research provides a theoretical basis for promoting the understory cultivation of *C. barometz*.

Key words: *Cibotium barometz*; understory soil; nutrient variation

金毛狗蕨(*Cibotium barometz*)别称金毛狗,其等,是蚌壳蕨科金毛狗属多年生大型蕨类植物,干燥根茎作为中药材习称金毛狗脊、狗脊、狗青也是该科属在我国分布的唯一物种^[1-3],株高可

收稿日期:2026-03-11

基金项目:西双版纳州科技计划项目(2024532812000724);

云南省热带作物科学研究所青年人才成长基金项目(QNCZ2025-8)

作者简介:李思敏(1995—),女,助理研究员,硕士,研究方向为植物营养及检测分析。E-mail:1030207478@qq.com

*通信作者:李惠波(1977—),男,副研究员,硕士,研究方向为热带作物育种。E-mail:Hboli1125@163.com

达2~3 m,叶片大型,根状茎粗大卧伏,因表面密被金黄色柔软长茸毛,形似金毛狗头而得名^[1,4]。金毛狗蕨广泛分布于亚热带与热带,自然分布于我国云南、贵州、四川、广东、广西、福建、浙江等省份^[3],多生于海拔900 m以下山沟、溪边或林下的酸性土壤中。由于历史上过度采挖及生境破坏,该物种野生种群目前已处于濒危状态,现属国家二级野生保护植物及限制出口物种^[5]。其根状茎即为传统中药“狗脊”^[6],是一类兼具“扶正”与“祛邪”功效的经典药材,有机结合了“祛风湿”的攻邪作用与“补肝肾、强筋骨”的扶正作用,尤其适用于年老或体虚引起的腰膝风湿痹痛。作为西双版纳地区的原生蕨类植物,金毛狗蕨在傣医学中也占有重要地位,其叶片被认为具有利尿通淋、清热凉血之效,常用于治疗肠炎、痢疾等疾病^[7]。此外,金毛狗蕨富含蕨素、黄酮和多酚类成分,具抗氧化与抗癌潜力,金黄色茸毛外用止血效果显著,根状茎淀粉含量较高(约30%),具备药食同源的特点,具有重要的经济价值^[8]。

金毛狗蕨作为喜肥植物,对土壤肥力要求较高,土壤养分状况直接制约其生长发育。然而,目前关于金毛狗蕨的研究多集中于组培^[9-10]、人工繁育与栽培技术^[11-12]、成分分析^[13-16]、加工工

艺^[17-18]以及金毛狗蕨对重金属富集^[19-20]和稀土元素的吸附^[21]等方面。林下种植可充分利用林冠下的荫蔽环境、较高湿度及酸性土壤等自然条件,有效契合喜阴植物的生态习性,能显著提高移栽植株的存活率与生长质量。从保护生物学角度而言,林下种植也有助于缓解野外种群盗挖压力,为金毛狗蕨提供了一条迁地保护与种群复壮的有效途径。目前关于林下种植金毛狗蕨对林下生境下土壤养分的影响仍较为缺乏,相关数据支撑不足。为此,本研究开展林下金毛狗蕨生长对土壤养分影响的研究,以有助于指导其科学种植,促进林下经济协调发展,推进狗脊药材的规范化、规模化与生态友好型生产,缓解药材需求与生态保护之间的矛盾。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

以云南省普洱市孟连县的天然林、西双版纳傣族自治州景洪市的橡胶林作为研究区,分别采集生长区(有金毛狗蕨生长)和对照区(自然状态,无金毛狗蕨生长)土壤样品。在孟连、景洪均设置3个采样点,采样点地理位置、气候条件和生态环境状况如表1所示。

表1 试验采样区气候条件、生态环境状况

试验区	序号	经纬度	海拔/ m	坡度/ °	气候类型	温度/℃			年均降雨量/ mm	湿度/ %	年日照时数/ h
						年均气温	最热月	最冷月			
孟连 (天然林)	1	22° 20' 57" N 99° 38' 33" E	997.3	44	亚热带 季风气候	19~21	24~26 (6/7月)	12~14 (1月)	1 300~1 600	70~80	2 000~2 200
	2	22° 18' 54" N 99° 34' 19" E	964.6	59							
	3	22° 18' 47" N 99° 34' 22" E	926.2	69							
景洪 (橡胶林)	1	22° 0' 46" N 100° 46' 52" E	657.1	41	热带 季风气候	21~22	33~36 (4/5月)	15~16 (1月)	1 200~1 600	80~85	1 800~2 200
	2	22° 2' 40" N 100° 47' 56" E	689.3	40							
	3	22° 2' 47" N 100° 47' 54" E	713.2	39							

1.2 样品采集与测定

每个采样区域取生长区、对照区土壤各一份,每个采样点做3次平行。采集0—20 cm土层土壤

样品,以五点取样法采集土样,混合均匀后带回实验室测定。土壤理化性质测定^[22]:pH值测定采用电极电位法(水:土=2.5:1),有机质(OM)测

定采用重铬酸钾法,全氮(TN)测定采用凯氏定氮法,水解氮(HN)测定用碱解扩散法,有效磷(AP)测定采用钼锑抗显色,速效钾(AK)测定采用中性醋酸铵提取-火焰光度法,交换性钙(Ex-Ca)和交换性镁(Ex-Mg)测定采用原子吸收法,微波消解样品后用ICP-OES测定有效铜(Cu)、锌(Zn)、铁(Fe)、锰(Mn)、硼(B)含量。

1.3 数据分析

采用 IBM SPSS Statistics 25 软件进行描述性统计、*t* 检验和相关性数据分析,Origin 2024 绘图。以《全国第二次土壤普查养分分级标准》^[23]对研究区土壤各养分指标进行 V ~ I 级分级,并按养分级别从高至低分别赋 1 ~ 5 分(表 2)。

表 2 养分指标分级(评分)标准

养分指标	V (1)	IV (2)	III (3)	II (4)	I (5)
pH		<4.5	4.5~5.5	>5.5~6.5	>6.5
OM/%	<1	1~2	>2~3	>3~4	>4
TN/%	<0.07	0.07~0.10	>0.10~0.15	>0.15~0.20	>0.20
HN/(mg·kg ⁻¹)	<60	60~90	>90~120	>120~150	>150
AP/(mg·kg ⁻¹)	<5	5~10	>10~20	>20~40	>40
AK/(mg·kg ⁻¹)	<50	50~100	>100~150	>150~200	>200
Ex-Ca/(mg·kg ⁻¹)	<50	50~100	>100~150	>150~200	>200
Ex-Mg/(mg·kg ⁻¹)	<50	50~100	>100~200	>200~300	>300
Cu/(mg·kg ⁻¹)	<0.10	0.10~0.20	>0.20~1.00	>1.00~1.80	>1.80
Zn/(mg·kg ⁻¹)	<0.3	0.3~0.5	>0.5~1.0	>1.0~3.0	>3.0
Fe/(mg·kg ⁻¹)	<2.6	2.6~4.5	>4.5~10.0	>10.0~20.0	>20.0
Mn/(mg·kg ⁻¹)	<1.1	1.1~5.0	>5.0~15.0	>15.0~30.0	>30.0
B/(mg·kg ⁻¹)	<0.2	0.2~0.5	>0.5~1.0	>1.0~2.0	>2.0

2 结果与分析

2.1 金毛狗蕨生长对土壤养分含量特征的影响

结果表明,不同林型下金毛狗蕨生长区与对照区土壤养分特征存在明显差异(表 3)。天然林与橡胶林土壤各指标的变异系数分别介于 7.67% ~ 99.03% 和 4.32% ~ 96.04%。两类林下的 pH 值变异性均较小(变异系数 < 10%),说明林下金毛狗蕨生长区土壤 pH 比较稳定。除橡胶林下的 Ex-Ca 亦属弱变异外,其余土壤养分指标多呈中等程度以上变异(变异系数 10% ~ 100%)。其中:Fe 在两类林区下土壤中的变异系数均超过 80%;天然林下土壤中,OM、Ex-Ca、Ex-Mg、Cu、Fe 和 B 变异系数介于 51.06% ~ 99.03%(多数高于 70%),Ex-Ca 甚至超过 90%,B 在生长区与对照区之间的差异最大,差值达 81.6%。除 OM 外,这些指标变异程度在种植金毛狗蕨后均有所增加。橡胶林下土壤中 OM、HN、AP、AK、Ex-Mg、Zn、Fe

和 B 的变异系数介于 53.3% ~ 96.0%(多集中在 60%左右,平均 67.2%),其中 Zn 和 Fe 在生长后变异系数上升,其余指标略降但仍处于中等变异水平。

金毛狗蕨生长区土壤 pH 较对照区下降 0.6% ~ 3.9%,OM、TN、HN、AP、AK、Ex-Ca 和 Ex-Mg 在生长区含量均高于对照区,平均涨幅依次为 56.5%、40.1%、51.1%、47.3%、37.1%、17.6% 和 46.3%。其中,天然林下的 OM 和 Ex-Mg、橡胶林下的 AP 和 AK 在生长区比对照区高出 1 倍以上,增幅尤为显著。与此相反,Cu、Zn、Fe、Mn 和 B 等微量元素在生长区含量均低于对照区。

2.2 金毛狗蕨生长区与对照区土壤养分含量差异分析

采用 *t* 检验对两类林型下(天然林与橡胶林)金毛狗蕨生长区与对照区土壤的理化指标进行配对比较分析(表 4),结果表明:

(1)多数指标在生长区与对照区间存在显著差异。天然林、橡胶林下生长区土壤中 OM、HN、

AK、Fe 均与对照区在 0.001 水平上差异显著;天然林下生长区土壤中 pH、TN、Cu 和橡胶林下生长区土壤中 TN、Ex-Mg 与对照区在 0.01 水平上差异显著;天然林下生长区土壤中 AP、Cu、Ex-Mg、Mn、B 和橡胶林下生长区土壤中 pH、AP、Mn 与对照区在 0.05 水平上差异显著。然而,天然林下生长区土壤中 Ex-Ca、Zn 和橡胶林下生长区土壤中 Ex-Ca、Cu、Zn、B 与对照区未表现出显著差异。

(2)两类林下金毛狗蕨生长区与对照区的土壤养分含量差值显示,大量元素均值差为正数,pH 和微量元素均值差为负数,表明金毛狗蕨生长区土壤的大量元素含量高于对照区,pH 和微量元素含量低于对照区,金毛狗蕨的生长可以促进土壤大量元素含量的增加,对提高土壤肥力起到积极作用。

表 3 林下金毛狗蕨生长区与对照区土壤养分指标特征

林型	理化指标	最小值		最大值		平均值		标准差		变异系数/%	
		生长区	对照区	生长区	对照区	生长区	对照区	生长区	对照区	生长区	对照区
天然林	pH	4.04	4.16	4.99	5.09	4.41	4.56	0.36	0.35	8.18	7.67
	OM/(g · kg ⁻¹)	14.15	6.58	62.47	40.15	43.11	26.72	22.01	15.37	51.06	57.54
	TN/(g · kg ⁻¹)	0.78	0.39	2.88	1.65	1.88	1.20	0.85	0.54	45.51	45.35
	HN/(mg · kg ⁻¹)	71.38	33.08	149.82	103.50	114.70	76.01	33.21	30.54	28.96	40.18
	AP/(mg · kg ⁻¹)	1.55	1.49	5.06	3.48	3.30	2.69	1.39	0.83	42.02	30.99
	AK/(mg · kg ⁻¹)	31.33	29.01	58.98	49.82	45.11	39.05	9.13	7.65	20.24	19.60
	Ex-Ca/(mg · kg ⁻¹)	20.13	13.28	242.95	186.56	100.59	74.09	99.62	67.26	99.03	90.79
	Ex-M/(mg · kg ⁻¹)	7.47	5.78	55.71	21.19	23.52	11.26	21.87	6.33	92.96	56.22
	Cu/(mg · kg ⁻¹)	0.07	0.09	0.67	0.75	0.40	0.45	0.25	0.26	62.66	58.69
	Zn/(mg · kg ⁻¹)	0.31	0.35	0.75	0.79	0.56	0.58	0.17	0.17	30.19	29.42
	Fe/(mg · kg ⁻¹)	5.68	8.42	90.02	95.16	44.43	50.24	36.41	36.99	81.96	73.64
	Mn/(mg · kg ⁻¹)	6.49	7.01	18.63	20.16	13.10	14.32	4.87	5.20	37.18	36.30
	B/(mg · kg ⁻¹)	0.06	0.67	1.06	1.08	0.48	0.95	0.47	0.15	97.14	15.57
橡胶林	pH	4.37	4.38	4.96	5.01	4.66	4.73	0.20	0.20	4.32	4.32
	OM/(g · kg ⁻¹)	6.55	3.45	22.64	22.15	16.05	13.91	7.18	8.13	44.75	58.44
	TN/(g · kg ⁻¹)	0.89	0.76	1.94	1.57	1.44	1.22	0.38	0.32	26.47	25.98
	HN/(mg · kg ⁻¹)	60.43	31.84	129.73	124.30	86.69	69.12	30.37	38.108	35.03	55.24
	AP/(mg · kg ⁻¹)	2.96	1.05	5.08	5.16	3.94	2.90	0.76	1.64	19.19	56.41
	AK/(mg · kg ⁻¹)	44.62	17.91	249.47	195.13	128.20	92.02	90.62	71.58	70.68	77.79
	Ex-Ca/(mg · kg ⁻¹)	199.59	172.09	252.48	228.83	216.53	209.03	16.59	18.80	7.66	8.99
	Ex-M/(mg · kg ⁻¹)	31.43	30.11	118.10	119.58	73.50	64.77	35.04	34.54	47.67	53.32
	Cu/(mg · kg ⁻¹)	0.21	0.18	0.58	0.70	0.41	0.41	0.13	0.20	32.62	49.19
	Zn/(mg · kg ⁻¹)	0.25	0.22	1.04	0.85	0.53	0.55	0.36	0.25	68.27	45.47
	Fe/(mg · kg ⁻¹)	6.37	14.57	91.34	97.05	40.45	46.79	38.85	38.13	96.04	81.50
	Mn/(mg · kg ⁻¹)	5.19	8.59	12.31	14.48	8.44	12.08	3.14	2.29	37.25	18.93
	B/(mg · kg ⁻¹)	0.08	0.07	0.16	0.26	0.12	0.14	0.03	0.08	24.61	54.28

2.3 林下金毛狗蕨生长区与对照区土壤养分级别差异

结果表明(图 1),两类林中出现了主要养分指标的评分跃升现象(如天然林下生长区土壤中 OM、TN、HN、Ex-Ca 和橡胶林下生长区土壤中 AK 的评分相较于对照提升 1~2 分),进一步证实了金毛狗蕨生长对土壤养分的正向促进作用。此外,天然林下土壤中 pH、AK、Ex-Ca、Ex-Mg 的评

分低于橡胶林,而 OM、TN、HN、B 的评分较高。除林分组成导致的土壤养分差异外,土壤 pH 评分在两类林型生长区与对照区之间的变动幅度分别为 3.3%和 1.6%,与描述性统计中相应的变异系数(天然林 7.7%~8.2%,橡胶林 4.3%,属低变异性)一致。天然林区土壤 pH 变异程度约为橡胶林的 2.0 倍,说明橡胶林下金毛狗蕨生长所引起的土壤 pH 变化更小。

表 4 林下金毛狗蕨生长区与对照区土壤养分指标成对样本 *t* 检验结果

指标	天然林下金毛狗蕨生长区-对照区								橡胶林下金毛狗蕨生长区-对照区							
	均值差	标准偏差	差值 95%		<i>t</i>	自由度	双尾	显著性	均值差	标准偏差	差值 95%		<i>t</i>	自由度	双尾	显著性
			下限	上限							下限	上限				
pH	-1.500	0.115	-0.238	-0.062	-3.924	8	0.004	**	-0.074	0.074	-0.121	-0.018	-3.031	8	0.016	*
OM	16.390	9.633	8.986	23.794	5.105	8	0.001	***	2.144	1.248	1.185	3.104	5.154	8	0.001	***
TN	0.677	0.459	0.324	1.029	4.426	8	0.002	**	0.220	0.187	0.076	0.364	3.530	8	0.008	**
HN	38.690	7.456	32.959	44.421	15.568	8	0.000	***	17.572	10.091	9.815	25.329	5.224	8	0.001	***
AP	0.603	0.732	0.041	1.166	2.474	8	0.038	*	1.042	1.091	0.204	1.881	2.866	8	0.021	*
AK	6.064	2.770	3.935	8.194	6.568	8	0.000	***	36.178	22.132	19.166	53.190	4.904	8	0.001	***
Ex-Ca	26.502	35.639	-0.892	53.897	2.231	8	0.056		7.502	15.313	-4.268	19.273	1.470	8	0.180	
Ex-Mg	12.259	15.824	0.095	24.423	2.324	8	0.049	*	8.737	6.625	3.645	13.829	3.956	8	0.004	**
Cu	-0.049	0.036	-0.076	-0.021	-4.090	8	0.003	**	0.004	0.140	-0.103	0.112	0.095	8	0.927	
Zn	-0.023	0.060	-0.069	0.022	-1.175	8	0.274		-0.167	0.208	-0.177	0.144	-0.240	8	0.816	
Fe	-5.809	3.203	-8.271	-3.347	-5.441	8	0.001	***	-6.332	1.840	-7.747	-4.918	-10.325	8	0.000	***
Mn	-1.223	1.325	-2.242	-0.205	-2.769	8	0.024	*	-3.644	4.240	-6.904	-0.385	-2.579	8	0.033	*
B	-0.466	0.491	-0.843	-0.088	-2.842	8	0.022	*	-0.023	0.054	-0.065	0.018	-1.306	8	0.228	

注: * 表示在 0.05 级别(双尾)差异显著, ** 表示在 0.01 级别(双尾)差异显著, ***表示在 0.001 级别(双尾)差异显著,下同。

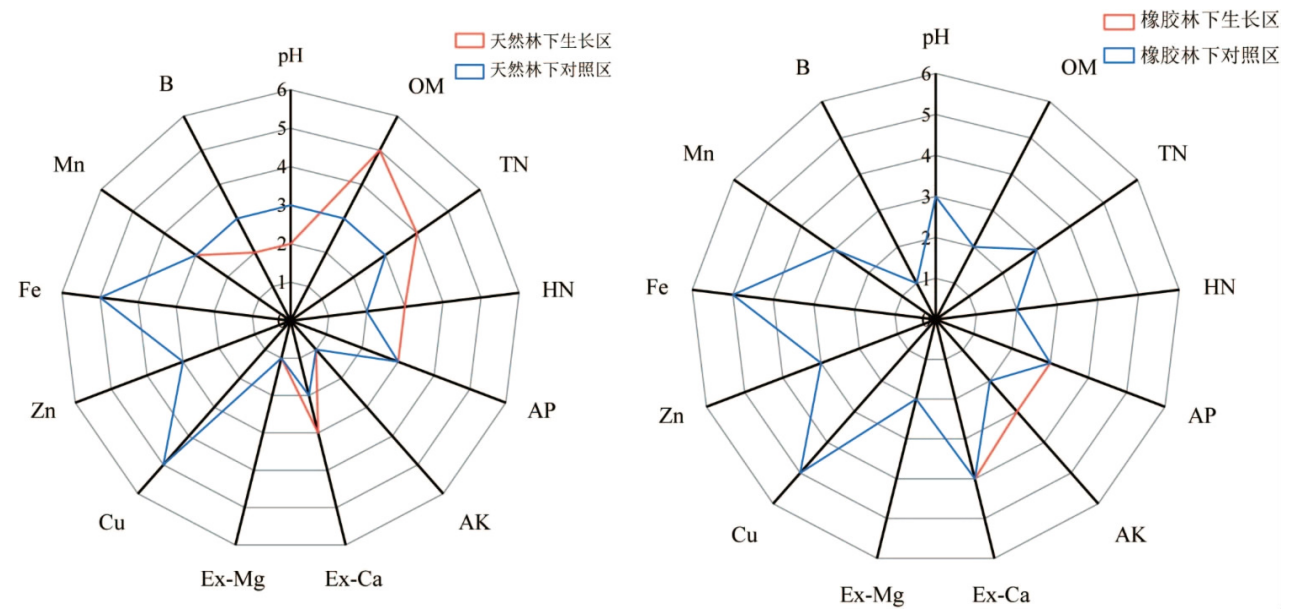


图 1 林下金毛狗蕨生长区-对照区土壤养分级评分分别雷达图

2.4 林下金毛狗蕨生长区与对照区土壤养分指标间相关性分析

总体而言,土壤养分指标相关性在不同林型及植被覆盖条件下呈现差异。本研究分别对天然林、橡胶林下金毛狗蕨生长区及对照区土壤养分指标进行相关性分析(图2),发现由对照区到生长区,养分间相关性的变化存在共同趋势:部分土壤养分指标间的相关性由负相关转为正相

关,或由强负相关减弱为弱负相关,表明金毛狗蕨的林下生长有助于土壤养分间正向关系的发展。对比不同林型,橡胶林下土壤养分指标间的正相关性整体强于天然林。此外,由对照区到橡胶林下生长区,土壤中Cu、Mn和B等原本负相关性较强的元素,均表现出向弱负相关或正相关转变的趋势,表明相比天然林下,橡胶林下金毛狗蕨的生长活动对土壤养分协调性的提升作用更强。

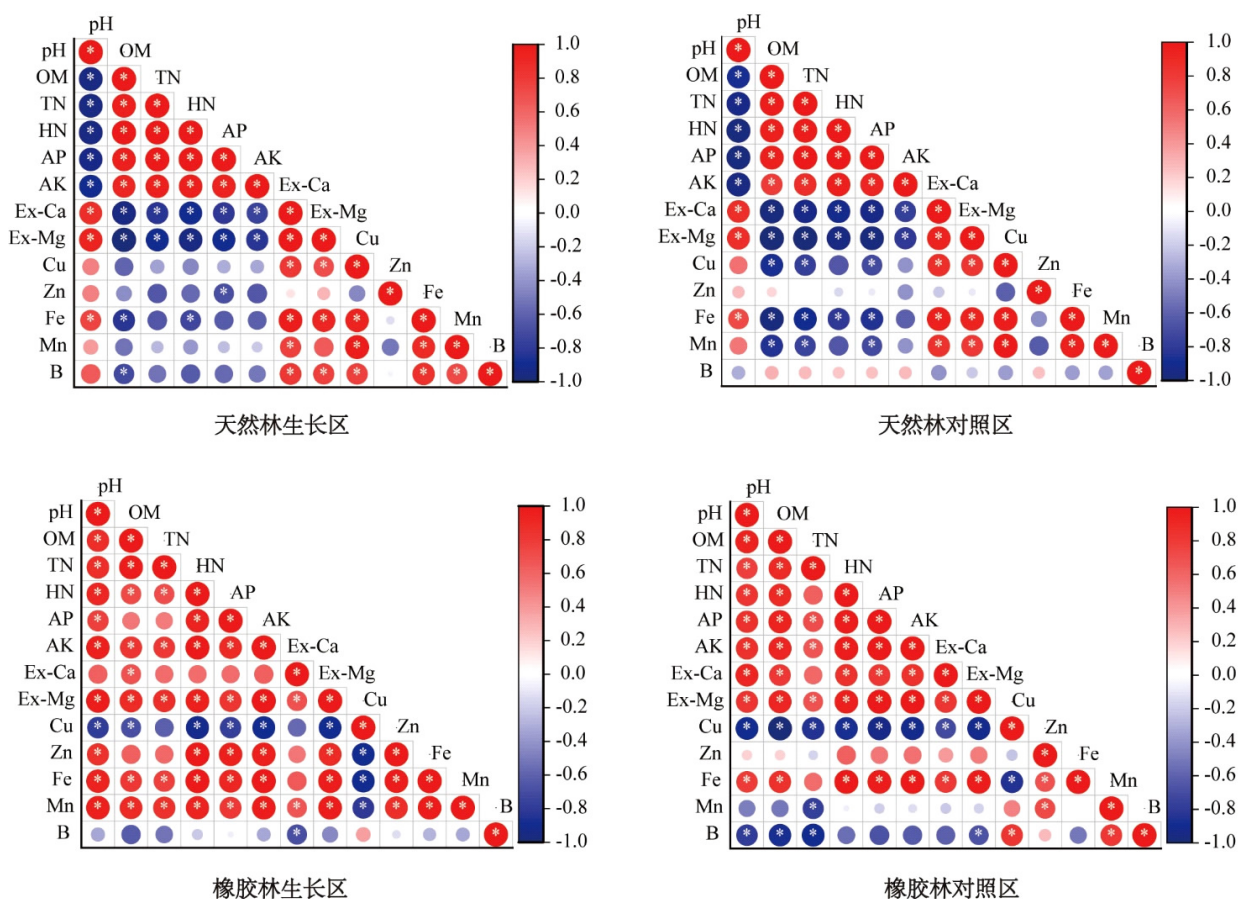


图2 林下金毛狗蕨生长的土壤养分相关性

注: *表示显著相关; 红色代表正相关, 蓝色代表负相关。

2.5 林下金毛狗蕨生长区与对照区地形因子与土壤养分的关系

林下金毛狗蕨生长区与对照区土壤养分受地形因子影响。由表5可知,除个别区域养分指标外,多数指标与地形因子均呈强相关($|r| > 0.5$)。两类林型中,金毛狗蕨生长区土壤养分与地形因子的负相关性均较对照区有所下降,表明海拔和坡度对养分指标的影响减弱。相比之下,对照区土壤养分与地形因子的相关性更为显著,更容易随地形地貌变化而发生波动,说明金毛狗蕨的生长有助于缓解地形因子对土壤养分的负面制约,反映出其生长区内土壤环境更为稳定。从具体相关性来看,土壤OM、TN、HN、AP、AK、Zn与海拔呈正相关,与坡度呈负相关;土壤Cu、Mn、B则与坡度正相关,与海拔负相关。土壤pH、Ex-Ca、Ex-Mg、Fe与地形因子的相关性在两类

林型中表现不一致:在天然林下,这些指标与坡度正相关、与海拔负相关;而在橡胶林下则呈现相反趋势。天然林区地形因子对养分指标的影响程度总体表现为海拔>坡度,且相关性方向不一;橡胶林下两种地形因子的影响程度接近,养分指标大多与海拔呈正相关,与坡度呈负相关。总体来看,橡胶林下土壤养分与地形因子之间的规律性更为明显,可能因为橡胶林多分布于低纬度热带/亚热带山地的阶梯式种植区,在维持一定海拔的同时有效避免了坡度过大对土壤养分的消极影响。

3 讨论

3.1 金毛狗蕨生长区土壤养分优势

在天然林与橡胶林下种植金毛狗蕨均有利于土壤养分的积累,对提升土壤肥力具有积极作用。本研究中金毛狗蕨的生长显著提高了土壤

中有机质、全氮、水解氮、有效磷、速效钾及交换性钙、镁等大中量元素含量,这一结果与索炎炎等^[24]关于花生(*Arachis hypogaea* L.)种植对土壤肥力影响的研究结论相似。此外,腐殖质和有机胶体的增加,土壤阳离子交换量得以提高,有助于减少养分淋失;磷-钙-镁、钾-镁等元素组合的协同管理,能够进一步增强土壤的保水保肥能力、

缓冲性能及通透性^[25]。金毛狗蕨持续输入的植物残体以及根系分泌物的积累也在这一过程中发挥重要作用。上述综合效应最终显著提高了土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾的含量。氮、磷、钾作为植物生长必需的三大营养元素,其有效性的提升和循环的促进有助于全面改善土壤养分状况,从而实现土壤肥力的整体增强^[26-27]。

表 5 林下金毛狗蕨生长区与对照区土壤养分与地形因子的相关性分析

类型	区域	地形因子	pH	OM	TN	HN	AP	AK
天然林	生长区	海拔	-0.685*	0.783*	0.577	0.670*	0.552	0.525
		坡度	0.570	-0.675*	-0.442	-0.546	-0.415	-0.394
	对照区	海拔	-0.714*	0.958**	0.888**	0.810**	0.844**	0.592
		坡度	0.600	-0.901**	-0.807**	-0.709*	-0.752*	-0.463
橡胶林	生长区	海拔	0.933**	0.976**	0.947**	0.855**	0.692*	0.931**
		坡度	-0.947**	-0.954**	-0.925**	-0.896**	-0.746*	-0.958**
	对照区	海拔	0.922**	0.993**	0.849**	0.928**	0.967**	0.953**
		坡度	-0.911**	-0.980**	-0.808**	-0.955**	-0.984**	-0.974**

类型	区域	地形因子	Ex-Ca	Ex-Mg	Cu	Zn	Fe	Mn	B
天然林	生长区	海拔	-0.934**	-0.866**	-0.963**	0.216	-0.995**	-0.931**	-0.836**
		坡度	0.867**	0.777*	0.991**	-0.365	0.967**	0.971**	0.813**
	对照区	海拔	-0.949**	-0.924**	-0.972**	0.444	-1.000**	-0.963**	0.358
		坡度	0.898**	0.857**	0.994**	-0.578	0.985**	0.988**	-0.368
橡胶林	生长区	海拔	0.706*	0.968**	-0.791*	0.774*	0.914**	0.951**	-0.545
		坡度	-0.702*	-0.985**	0.824**	-0.825**	-0.945**	-0.966**	0.503
	对照区	海拔	0.827**	0.950**	-0.980**	0.301	0.902**	-0.418	-0.807**
		坡度	-0.839**	-0.968**	0.969**	-0.381	-0.935**	0.340	0.760*

注: *表示显著相关, **表示极显著相关。

3.2 金毛狗蕨对土壤酸化影响

研究发现,金毛狗蕨生长后土壤pH呈下降趋势,可能与植株的选择性吸收、根系及微生物代谢产酸等因素有关^[28]。该结果印证了金毛狗蕨对酸性生境的偏好,与刘光华^[29]的研究结果一致。土壤pH是调控土壤养分有效性的关键因子,适当调节土壤酸碱度可优化pH依赖性养分(如磷、钙、镁)与有机质驱动型养分(如氮、钾)之间的协同与拮抗关系。本研究还发现,两类林下金毛狗蕨生长所引起的土壤pH变化幅度较小,结合生长区与对照区pH的均值差来看(天然林下均值差约是橡胶林下的2.0倍),橡胶林下土壤酸碱度更为稳定,土壤环境缓冲与自适应能力强,更适合种植金毛狗蕨。

3.3 地形因子与土壤养分的相关性

在金毛狗蕨生长区,两类林下土壤养分指标

均与地形因子表现出强相关性,地形因子与土壤养分间的负相关性较对照区呈现出下降趋势,说明金毛狗蕨的生长缓解了地形因子造成的土壤养分流失,可能得益于其发达庞大的根系、分泌物、枯枝落叶和生长效应等使生长区土壤环境更加稳定。对比两类林型,橡胶林多分布于低纬度热带/亚热带山地,阶梯式种植在很大程度上缓解了坡度过大对土壤养分的负面影响^[30-31]。与天然林区相比,橡胶林下更有利于金毛狗蕨的稳定生长。

3.4 微量元素吸附与生态修复

两类林下金毛狗蕨生长区均出现土壤微量元素含量低于对照区的情况,除因金毛狗蕨植物生长消耗和吸收富集作用外,也与土壤性质(如pH、有机质和质地)及淋溶作用等因素有关。微量元素缺乏会影响植物的正常生长发育,在林下

种植管理过程中应适度补充,补充方法可参考安晓静等^[32]的微量元素配施,朱瀚卿等^[33]的差异化施肥策略。值得注意的是,微量元素中Cu既是生命必需的微量元素又具有潜在的重金属毒性,相关研究也表明金毛狗蕨对重金属元素存在一定的吸附富集作用^[19-20, 34],这将为金毛狗蕨用于土壤改良提供新的思路。

4 展望

金毛狗蕨的林下种植是一种兼顾生态与经济效益的可持续模式,“仿野生”栽培使其药用部位(根状茎)能更有效地积累酚类、黄酮类、蕨素类等活性成分,药材品质更接近野生种群,符合中医药“道地药材”的理念。同时,该栽培模式还能高效利用林下空间、增强水土保持能力并促进生物多样性,在构建稳定微生境和形成生物多样性关键节点方面发挥重要作用,是实现生态保护与经济效益协同发展的有效途径。

参考文献:

- [1] 秦仁昌. 中国植物志:第二卷[M]. 北京:科学出版社, 1959.
- [2] 叶红环,董燕,韩见宇,等. 珍稀濒危蕨类植物金毛狗的研究进展[J]. 贵州科学,2020,38(5):28-31.
- [3] 陈东亮,钟楚,密克,等. 濒危药用植物金毛狗脊的资源现状与保育研究进展[J]. 贵州农业科学,2022,50(12):122-129.
- [4] 陆树刚. 蕨类植物学[M]. 北京:高等教育出版社, 2007.
- [5] 国家林业局,农业部. 国家重点保护野生植物名录(第一批)[EB/OL]. 1999-09-09. https://www.gov.cn/gongbao/content/2000/content_60072.htm.
- [6] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(2015年版)一部[M]. 北京:中国医药科技出版社,2015.
- [7] 里二,马洁,杨春勇,等. 傣族药食植物金毛狗栽培方法及采收加工[J]. 中国民族医药杂志,2005(4):15-16.
- [8] 项东宇,袁国卿,陈婷. 药用植物识别技术[M]. 北京:化学工业出版社,2024:215.
- [9] YU QL, LIN W, YU XJ, et al. Research on the rapid tissue breeding technology of the endangered plant *Cibotium barometz* (L.) J. Sm. [J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC), 2024, 158(2): 38-38.
- [10] Praptosuwiryo NT, Pribadi OD, Rugayah. Growth, development and morphology of gametophytes of golden chicken fern (*Cibotium barometz* (L.) J. Sm.) in natural media[J]. Biodiversitas, 2015, 16(2): 303-310.
- [11] 林志楷,甘祎恣,林文珍,等. 低温胁迫对金毛狗叶片逆境生理及总黄酮含量的影响[J]. 热带作物学报, 2025, 46(6): 1441-1448.
- [12] 赵立涛,林德祥,李斌. 金毛狗蕨人工繁育与高效栽培技术[J]. 林业科技通讯, 2025(1): 63-66.
- [13] SUN JY, ZHANG YQ, LIU F, et al. Polysaccharides isolated from *Cibotium barometz* attenuate chronic inflammatory pain: molecular chemical structure and role of phenylalanine [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 297: 139911.
- [14] JI ZJ, FAN BL, CHEN YD, et al. Functional characterization of triterpene synthases in *Cibotium barometz* [J]. Synthetic and Systems Biotechnology, 2023, 8(3): 437-444.
- [15] DVORAKOVA M, SOUDEK P, PAVICIC A, et al. The traditional utilization, biological activity and chemical composition of edible fern species [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2024, 324: 117818.
- [16] HENG WY, BAN JJ, KHOO SK, et al. Biological activities and phytochemical content of the rhizome hairs of *Cibotium barometz* (Cibotiaceae) [J]. Industrial Crops and Products, 2020, 153: 112612.
- [17] 徐钢,孙娜,赵敏杰,等. 狗脊不同炮制品水煎液抗维甲酸致雄性大鼠骨质疏松症研究[J]. 中国中药杂志, 2014, 39(6): 1011-1015.
- [18] 徐钢,裴启洋,鞠成国,等. CCK-8法检测狗脊不同炮制品对成骨细胞的影响[J]. 中国中药杂志, 2013, 38(24): 4319-4323.
- [19] 于海玲,谢国光,王发国,等. 金毛狗对重金属的富集特性的研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2015, 23(1): 8.
- [20] QIAN XL, WU YG, ZHOU HY, et al. Total mercury and methylmercury accumulation in wild plants grown at wastelands composed of mine tailings: insights into potential candidates for phytoremediation [J]. Environmental Pollution, 2018, 239(1): 757-767.
- [21] WANG YY, HE LQ, DONG SY, et al. Accumulation, translocation, and fractionation of rare earth elements (REEs) in fern species of hyperaccumulators and non-hyperaccumulators growing in urban areas [J]. The Science of The Total Environment, 2023, 905: 167344.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [23] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.

- 出版社,1998.
- [24] 索炎炎,张翔,司贤宗,等. 砂姜黑土区花生田种植前后土壤肥力空间变异特征分析及评价[J]. 核农学报, 2021,35(4):933-941.
- [25] 周龙,彭晓云,汤利,等. 普洱市茶园土壤 pH,有机质和中微量养分分析及肥力综合评价[J]. 南方农业学报, 2024,55(6):1628-1638.
- [26] 朱悦蕊,胡云飞,梁扬雪,等. 钾,镁肥处理下酸化茶园土壤钾镁的交互效应[J]. 江苏农业科学,2023,51(9): 240-246.
- [27] FUJII K. Plant strategy of root system architecture and exudates for acquiring soil nutrients[J]. Ecological Research,2024,39(5):623-633.
- [28] 陈超,董新姣,潘家浩,等. 糯米山药种植前后土壤理化性质及生物指标变化研究[J]. 温州大学学报(自然科学版),2024,45(3):62-70.
- [29] 刘光华. 保护植物金毛狗(*Cibotium barometz*)配子体发育与种群、群落结构研究[D]. 重庆:西南大学,2007.
- [30] ZHANG Y, WANG Q, MAO JT, et al. Soil nutrient redistribution in sloping farmland of dry-hot valleys in the upper Red River[J]. Catena,2024,244:18273.
- [31] 王晓宇,袁宇奇,李毅杰,等. 地形对红壤区马尾松林土壤特性与生态化学计量的影响[J]. 森林与环境学报, 2026,46(1):30-39.
- [32] 安晓静,刘尚年,王海英,等. 中微量营养元素在药用植物栽培中的应用进展[J]. 中药材,2024,47(4):1045-1052.
- [33] 朱瀚卿,丁苏雅,马姜明,等. 毛竹林林下种植中药材对土壤有效态中、微量营养元素的影响[J]. 南方农业学报,2024,55(3):794-802.
- [34] 朱书生,杨敏,黄惠川,等. 药用植物林下生态种植的理论和技术创新与实践[J]. 植物保护学报,2025,52(2): 253-266.