

文章编号:1001-1498(2013)06-0759-07

南岭自然保护区常绿阔叶林优势树种叶片中 11种化学元素含量特征

许伊敏^{1,2}, 龚粤宁³, 习丹^{1,2}, 李炯¹, 旷远文^{1*}, 王发国¹

(1. 中国科学院华南植物园, 广东 广州 510650; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 南岭国家自然保护区, 广东 韶关 512727)

摘要:为探讨南岭自然保护区常绿阔叶林优势树种叶片营养特征及重金属含量水平,测定了保护区16个优势树种叶片中N、P、K、Ca、Al、Na、Mg、Mn、Ni、Cu和Pb共11种化学元素的含量,并分析了其在叶片中的变异特征和相关性。结果表明:该地区植物叶片N、P含量均低于我国陆生植物叶片含量的平均值,叶片Ca、K、Mg含量处于陆地植物叶片的正常范围,叶片Mn含量与广东植物叶片含量接近;16个优势树种叶片重金属含量均处于正常范围;南岭自然保护区优势树种受P限制强烈;尽管16个优势树种叶片暂未受到重金属和Al毒危害,但因华南地区酸沉降引发土壤重金属活化的风险仍存在,应加强对该地区森林土壤化学性质和树木叶片化学元素含量的定期监测研究。

关键词:南岭;常绿阔叶林;生态监测;化学元素含量;森林健康

中图分类号:S718.55

文献标识码:A

Chemical Element Contents in Leaves of 16 Dominant Species from Evergreen Broad-leaved Forest at Nanling Nature Reserve

XU Yi-min^{1,2}, GONG Yue-ning³, XI Dan^{1,2}, LI Jiong¹, KUANG Yuan-wen¹, WANG Fa-guo¹

(1. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, Guangdong, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Nanling National Nature Reserve, Shaoguan 512727, Guangdong, China)

Abstract: In order to evaluate the nutrient status and the heavy metal concentrations in the leaves of evergreen broad-leaved forest at Nanling Nature Reserve, the characteristics including contents, relationships and variations of N, P, K, Ca, Al, Na, Mg, Mn, Ni, Cu and Pb, were detected in the leaves of 16 dominant species in this reserve. The contents of N and P in leaves of the selected tree species were below the averages, while the concentrations of Ca, K and Mg were within its normal ranges of the terrestrial plants in China. The levels of Mn in the leaves detected were near the background values of Guangdong plants. Fortunately, the concentrations of Al, Ni, Cu, and Pb were within their respective normal ranges in plants. Based on the ratios of leaf N to P, the 16 species detected were all P-limited. Although these species are not suffering from Al, Ni, Cu and Pb at present, there is a potential risk from toxic metals activated by soil acidification caused by acid deposition in south China. Regular monitoring and research on the elemental concentrations in the leaves as well as forest soils in the reserve are scientifically necessary.

Key words: Nanling Nature Reserve; evergreen broad-leaved forest; ecological monitoring; chemical element contents; forest health

收稿日期:2013-04-27

基金项目:广东省林业科技创新专项资金项目(2010008)

作者简介:许伊敏(1988—),女,硕士研究生,研究方向为环境生态学和森林生态学。

* 通讯作者:E-mail: kuangyw@scbg.ac.cn

南岭是我国南方最大的横向构造带山脉,也是长江和珠江二大流域的分水岭。南岭山区处在中亚热带典型常绿阔叶林带的南缘和南亚热带季风常绿阔叶林带的北缘,是2个林带的交错区,野生动植物资源十分丰富,是中国具有国际意义的14个陆地生物多样性关键地区之一^[1]。国内很多学者对南岭国家级自然保护区的植被特征^[2-3]、珍稀濒危物种组成^[4]、植物多样性^[5]、优势种关联性^[6]及其生态位^[7]、常绿阔叶林枯立木现状^[8]及其自然灾害对生态服务功能的损失评估^[9]等开展了诸多研究。优势树种叶片的营养元素含量是反映森林健康状况的评价指标之一^[10],在欧洲甚至以此为依据之一来监测森林健康水平^[11]。中国也有不少学者利用森林群落优势种叶片营养元素来判断森林健康状况^[12-14],但对广东南岭自然保护区常绿阔叶林优势种叶片营养元素调查研究仍较少见。本研究分析了广东南岭自然保护区常绿阔叶林16个优势树种叶片的化学元素含量,以期了解南岭自然保护区内常绿阔叶林树种的营养状况和重金属毒害水平,同时为掌握南岭地区植物化学元素背景含量提供资料。

1 研究区概况

南岭国家级自然保护区位于广东省北部南岭山脉中心地带(112°30′~113°04′E,24°~24°57′N)。属中亚热带南部边缘,为亚热带湿润气候,春季多阴雨,夏季多雨水,秋旱而冬有霜冻;年均气温17.7℃,最高气温34.4℃,最低气温-4℃。年均降水量1705mm,相对湿度84%^[15],森林覆盖率达90.6%^[16],地带性植被为亚热带常绿阔叶林,多分布于海拔800m以下。保护区内有种子植物175科822属2292种,其中,裸子植物9科20属30种,被子植物166科802属2262种^[17],其中有许多为国家级重点保护种类。地带性土壤以红壤、黄壤为主,黄棕壤次之。

2 材料和方法

2.1 样品采集与处理

在保护区核心地带海拔800m左右的常绿阔叶林乔木层,采集了16个优势树种冠层的当年生成熟叶片(表1),每株样树按冠幅不同层次和方位混合采集叶片20~30片,每个树种采集3~5株作为重复,相同树种不同样树间距至少保证100m以上。叶片采集后分别装入纸袋封好,带回实验室,用湿润

纱布迅速擦拭干净叶表面灰尘,100℃杀青后在65℃下烘干至恒质量,用行星磨仪器(QM-3SP04)将叶片粉碎,装入玻璃瓶置于干燥器中,备分析。

表1 采集的16个优势树种

树种序号	树种
1	罗浮槭(<i>Acer fabri</i> Hance)
2	丝栗栲(<i>Castanopsis fargesii</i> Franch.)
3	五列木(<i>Pentaphylax euryoides</i> Gardn. et Champ.)
4	甜锥(<i>Castanopsis eyrei</i> (Champ.) Tutch.)
5	岭南槭(<i>Acer tutcheri</i> Duthie)
6	拟赤杨(<i>Alniphyllum fortunei</i> (Hemsl.) Makino)
7	马蹄荷(<i>Exbucklandia populnea</i> (R. Br.) R. W. Brown)
8	竹叶木姜子(<i>Litsea pseudoelongata</i> Lion)
9	阿丁枫(<i>Altingia chinensis</i> (Champ. ex Benth.) Oliv. ex Hance)
10	黄樟(<i>Cinnamomum parthenoxylon</i> (Roxb.) Kosterm.)
11	广东松(<i>Pinus kwangtungensis</i> Chun ex Tsiang)
12	水青冈(<i>Fagus longipetiolata</i> Seem.)
13	枫香(<i>Liquidambar formosana</i> Hance)
14	青榨槭(<i>Acer davidii</i> Franch.)
15	凤凰润楠(<i>Machilus phoenicis</i> Dunn)
16	岭南酸枣(<i>Spondias lakonensis</i> Pierre var. <i>lakonensis</i>)

2.2 样品分析

叶片化学元素含量分析方法参照中国生态系统研究网络《陆地生物群落调查观测与分析标准方法》^[18]进行。植物样品经浓HNO₃湿法消解后,用ICP-OES测定K、Na、Ca、Mg、Al、Mn、Cu、Ni、Pb等9个化学元素含量,用钼锑抗分光光度法测P含量,凯氏定N法测N含量。元素测定时用日本KAWO化学工业有限公司提供标准溶液配置系列浓度,绘制工作曲线,保证各工作曲线相关系数大于0.99,同时以试剂空白作对照,并按照中国生态系统研究网络野外观测数据要求,以国家一级标准物质杨树叶BGV07604-GSV-3作质量控制,标样化学元素含量测定结果均在标准值范围内。

2.3 数据处理

用统计软件SPSS18.0对数据进行描述统计,用Spearman相关秩次检验分析不同化学元素之间是否具有相关性。计算化学元素含量的比值,包括N/P、K/Mg质量分数比值和Ca/Al摩尔比值。

3 结果与讨论

3.1 叶片营养元素含量

16个优势树种叶片中N、P、K、Ca、Na、Mg、Mn 7种营养元素的平均含量见表2。7种营养元素在南岭自然保护区常绿阔叶林优势树种叶片中的平均值大小排列顺序为N>K>Ca>Mg>Mn>P>Na。我国陆生植物叶片N平均含量为20.2g·kg⁻¹,P平

均含量为 $1.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中, 常绿树种叶片 N、P 平均含量分别为 14.1 、 $0.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ [19]。南岭常绿阔叶林 16 个优势种叶片 N 平均含量为 $(15.6 \pm 3.0) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, P 平均含量为 $(0.6 \pm 0.2) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均低于我国陆生植物叶片 N、P 含量的平均值, 但叶片 N 平均含量略高于我国常绿树种叶片 N 平均值 [19]。与相近纬度的鼎湖山自然保护区常绿阔叶林相比, 南岭常绿阔叶林中优势树种叶片的 N、P 含量介于鼎湖山南亚热带常绿阔叶林植物叶片含量之间(南亚

热带常绿阔叶林叶片 N 含量为 $9.5 \sim 25.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, P 含量为 $0.3 \sim 1.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ [20]), 而均比海南热带常绿阔叶林植物叶片的 N、P 平均值 (其 N 平均含量为 $23.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, P 平均含量为 $2.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ [13]) 低; 与亚热带的喀斯特森林优势树种相比 [12], 叶片 N 含量比之高, 叶片 P 平均含量则与之相近。16 个优势树种叶片 P 含量特征揭示南岭常绿阔叶林可能存在 P 缺乏。

表2 南岭自然保护区常绿阔叶林 16 个优势树种叶片营养元素含量(平均值 \pm 标准差)

树种 序号	N		P		K		Ca		Na		Mg		Mn	
	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$													
1	18.43	± 0.67	0.738	± 0.038	9 343.46	± 984.91	13 906.85	$\pm 3 949.08$	157.04	± 56.25	2 609.16	± 246.31	650.38	± 204.79
2	13.34	± 3.27	0.581	± 0.180	8 272.42	$\pm 1 678.09$	10 704.88	$\pm 4 455.70$	105.91	± 36.71	1 675.68	± 258.71	842.77	± 438.00
3	12.83	± 2.14	0.308	± 0.065	6 202.32	$\pm 1 358.17$	8 445.87	$\pm 3 686.77$	156.48	± 25.41	1 093.25	± 260.91	950.43	± 640.33
4	14.61	± 1.87	0.583	± 0.062	8 414.73	± 981.81	7 265.05	$\pm 2 014.80$	88.31	± 29.51	1 341.24	± 143.07	608.41	± 174.80
5	18.72	± 2.73	0.956	± 0.160	9 149.03	± 363.11	9 891.85	$\pm 3 482.26$	102.08	± 14.78	1 374.76	± 221.56	1 160.19	± 785.73
6	18.75	± 2.40	0.695	± 0.170	19 883.47	$\pm 9 666.66$	8 265.83	± 240.46	122.90	± 51.50	1 849.08	± 424.64	1 245.87	± 662.31
7	12.26	± 1.29	0.449	± 0.051	4 289.19	± 609.82	5 347.15	$\pm 1 299.46$	109.60	± 20.42	2 274.94	± 542.97	816.76	± 341.27
8	16.99	± 1.96	0.599	± 0.120	11 020.16	$\pm 2 157.84$	5 990.59	$\pm 1 284.40$	121.59	± 56.74	883.87	± 165.82	964.60	± 333.84
9	12.90	± 1.16	0.455	± 0.059	8 360.22	$\pm 1 512.81$	6 626.49	± 731.09	106.73	± 33.78	1 969.49	± 568.70	1 119.48	± 341.99
10	14.21	± 0.95	0.590	± 0.066	10 000.85	$\pm 1 388.23$	5 398.95	$\pm 1 257.26$	85.52	± 34.54	1 406.25	± 268.83	367.70	± 96.27
11	13.83	± 1.70	0.727	± 0.220	5 843.48	$\pm 1 378.04$	4 434.35	$\pm 1 869.28$	104.31	± 48.01	756.55	± 123.74	196.14	± 159.31
12	18.08	± 2.66	0.509	± 0.078	6 858.52	$\pm 2 053.81$	5 670.47	$\pm 1 991.32$	121.58	± 28.45	1 372.53	± 268.20	854.12	± 267.51
13	14.63	± 1.69	0.530	± 0.110	9 628.00	± 593.43	7 033.78	$\pm 2 704.28$	126.29	± 31.87	1 553.60	± 198.74	1 041.37	± 404.76
14	22.68	± 4.47	1.265	± 0.190	12 040.22	$\pm 3 352.46$	17 324.14	$\pm 4 984.02$	97.28	± 7.17	1 809.32	± 79.53	374.83	± 118.37
15	11.88	± 1.58	0.500	± 0.034	8 775.09	± 836.88	3 680.90	± 111.83	77.14	± 36.03	847.12	± 157.36	513.92	± 198.85
16	15.72	± 2.39	0.579	± 0.088	8 727.98	± 568.48	10 553.66	$\pm 7 660.64$	41.71	± 11.99	1 749.12	± 601.78	77.72	± 10.26
平均	15.62	± 3.03	0.629	± 0.220	9 175.57	$\pm 3 452.45$	8 158.74	$\pm 3 624.96$	107.78	± 28.39	1 535.37	± 512.15	736.54	± 353.47

注:表中树种序号与表1相同,下同。

对照国家标准测定方法中给出的植物叶片化学元素含量参考范围 [21], 南岭自然保护区常绿阔叶林叶片 K、Ca 平均含量属中含量, 叶片 Na 平均含量属低含量, 叶片 Mg、Mn 属高含量。自 20 世纪开始, 植物叶片化学元素含量常用作诊断植物营养元素缺乏或重金属元素过量的依据, 并评判植物的健康状况 [22]。作为植物的必需元素, P、Ca、Mg、Mn 只能从土壤中吸收 [23]。植物缺乏这些营养元素, 都会影响植物叶片生理功能。有研究表明, 植物叶片 Mg、P、K 的含量与叶片寿命密切相关 [24], 这些元素的缺乏可能引发树木健康的衰退 [25]。对陆地植物而言, 其叶片 Mg 的正常含量为 $500 \sim 1 300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Ca 含量为 $2 300 \sim 5 000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [26]。南岭国家自然保护区 16 种植物 Mg 平均含量处于陆地植物叶片 Mg 含量正常范围的上限 [26], Mn 的平均含量为 736.54

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比中国 660 种陆生植物 Mn 的平均含量 $180 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [27] 高 3 倍左右。酸性土壤中 Mn 有效性高, 植物中 Mn 含量可能因此偏高。本实验中, 除广东松及岭南酸枣的 Mn 含量与全国平均值相近外, 其它植物 Mn 含量均高于正常值, 其中, 岭南槭、拟赤杨、阿丁枫和枫香叶片的 Mn 含量均超过 $1 000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与广东 13 个阔叶树叶片的 Mn 背景值接近 [28] ($1 383 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。叶片是 Mn 的累积部位, 过量的 Mn^{2+} 会抑制 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 的吸收和活性, 导致叶绿体结构破坏, 使光合速率降低 [29]。Mn 毒害在高度淋溶的热带土壤里较常见 [30], 南岭优势树种叶片 Mn 的高含量是否与土壤的淋溶程度和 Mn 含量高低相关, 需进一步研究。

Ca 在维持植物细胞壁和细胞膜功能、增加叶片抗冻害能力等具有非常重要的作用 [31-32], Ca 缺乏

将对森林健康带来严重的不利影响。南岭 16 种常绿阔叶林树木叶片的 Ca 含量远高于其它金属元素,也高于全球陆地植物的正常范围,其中,罗浮槭、丝栗栲、青榨槭和岭南酸枣叶片的 Ca 含量超过 10 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。叶片 Ca、Mg、Mn 含量在树种间存在差异,这体现了植物对土壤 Ca、Mg、Mn 吸收的特异性。Ca 是南岭常绿阔叶林优势树种叶片的主要营养元素之一,近年来,华南地区因酸沉降导致的土壤酸化造成土壤有效 Ca 流失,可能会引发植物叶片 Ca 缺乏的潜在风险,因此,对常绿阔叶林植物叶片的 Ca 含量进行长期监测十分必要。

3.2 叶片重金属元素含量

鉴于 Al 对植物的毒害性,将 Al 与 Cu、Ni 和 Pb 4 种重金属一起分析讨论。表 3 表明:16 个树种叶片 Al 的含量显著高于重金属 Cu、Ni、Pb 的含量,其中,五列木的 Al 含量尤高,超过 10 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。4 种元素在不同树种叶片中的浓度特征模式表明:即使在相同环境下,植物叶片中重金属含量不但受土壤中该元素含量的影响,还受树种本身生物学特性的影响。生长在相同环境下,树种对重金属元素的吸收存在着显著差异。

一般情况下,土壤 Al 以难溶性的硅酸盐或 Al_2O_3 的形式存在,对植物没有危害;但当土壤酸化后(pH 值 < 5),难溶性的 Al 变成可溶性的 Al 进入土壤溶液,对植物产生危害^[33]。目前,已有诸多研究揭示,土壤酸化会导致土壤 Al 活化,从而引发植物的 Al 毒害^[34-35]。土壤 Al 活化后,Al 与 Ca 竞争进入到植物体内,从而减少植物对 Ca 的吸收,造成植物体内 Ca 含量偏低^[36]。本研究中,除五列木外,其它树种 Al 的平均含量低于广西亚热带土山 16 个树种叶片 Al 的平均含量($976 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[37],说明该地区土壤酸化后受 Al、Ca 危害的风险较小,但仍存在。

低浓度 Cu 和 Ni 是植物必需的微量元素,植物体内 Cu 的正常含量为 $4 \sim 13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[38],Ni 的正常含量为 $0.1 \sim 10.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[39]。Pb 是植物非必需元素,对 Pb 的安全范围,不同的研究者给出了不同的阈值,有学者认为应低于 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[38],也有人认为应该小于 $3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[40]。华南地区 13 种阔叶树叶片的 Cu 的环境背景值为 $10.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[28]。对比南岭常绿阔叶林 16 个树种叶片 3 种重金属的平均含量发现:叶片 Cu、Ni、Pb 含量处于学者界定的安全阈值内,对植物的潜在危害风险较小。由于重

金属在土壤中的移动主要受土壤 pH 值的影响^[41],随着华南地区土壤酸化的加剧,重金属通过植物根系进入植物体内的风险仍然存在,加强对该地区土壤理化性质的监测分析,为树木健康评估提供预警信息,仍十分必要。

表 3 南岭自然保护区常绿阔叶林 16 个优势树种叶片重金属元素含量(平均值 \pm 标准差)

树种 序号	Al	Ni	Cu	Pb
	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$			
1	82.73 \pm 20.46	0.695 \pm 0.62	5.28 \pm 0.86	2.34 \pm 1.14
2	340.21 \pm 200.57	1.627 \pm 1.56	7.62 \pm 3.06	4.95 \pm 2.50
3	12 965.04 \pm 3 257.65	2.59 \pm 2.60	3.86 \pm 0.63	1.61 \pm 0.48
4	185.59 \pm 96.55	2.06 \pm 1.69	5.55 \pm 0.98	2.36 \pm 0.63
5	71.71 \pm 36.70	0.519 \pm 0.39	11.32 \pm 4.24	8.04 \pm 5.48
6	128.75 \pm 93.21	2.07 \pm 0.41	4.58 \pm 0.40	8.61 \pm 4.43
7	416.51 \pm 171.48	1.57 \pm 2.01	3.43 \pm 0.54	2.18 \pm 0.67
8	227.65 \pm 53.57	1.70 \pm 0.38	9.04 \pm 2.08	2.02 \pm 0.62
9	424.11 \pm 109.75	6.44 \pm 1.45	6.25 \pm 1.11	2.50 \pm 0.10
10	338.24 \pm 31.56	1.78 \pm 0.25	6.80 \pm 0.87	2.48 \pm 0.59
11	435.59 \pm 146.44	1.73 \pm 0.96	3.79 \pm 0.34	1.81 \pm 0.97
12	89.12 \pm 28.28	1.23 \pm 0.098	7.15 \pm 2.43	4.99 \pm 2.77
13	514.06 \pm 23.80	4.27 \pm 0.17	4.69 \pm 0.25	8.10 \pm 1.60
14	94.02 \pm 29.15	0.976 \pm 0.45	3.33 \pm 0.53	5.27 \pm 1.32
15	39.11 \pm 10.51	3.20 \pm 0.33	5.16 \pm 0.57	1.53 \pm 0.59
16	43.18 \pm 3.44	1.34 \pm 0.02	4.05 \pm 0.40	5.07 \pm 0.15
平均	1 024.73 \pm 3 188.14	2.11 \pm 1.48	5.74 \pm 2.21	3.99 \pm 2.49

3.3 叶片化学元素含量的种间变异及相关性分析

对叶片中 11 种化学元素的变异系数(CV,%)进行比较分析(表 4)发现:叶片中化学元素变异系数最大的是 Al(CV = 311.121 4%),变异系数最小的是 N(CV = 19.414 1%);不同元素的变异系数从大到小为 Al > Ni > Pb > Mn > Ca > Cu > K > P > Mg > Na > N。叶片中化学元素含量最大值与最小值比值大于 10 的有 Mn、Al、Ni,小于 5 的化学元素有 N、P、K、Ca、Na、Mg、Cu。叶片中元素含量最大值与最小值相差最大的是 Al 元素,五列木的 Al 元素含量最高,凤凰润楠的最低;相差最小的是 N,N 含量最高的青榨槭是含量最低的凤凰润楠的 2 倍左右。Al 元素较大的变异性主要来自五列木,其叶片 Al 含量超过 10 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,属于 Al 超积累植物^[42],可通过进一步实验分析其生长地点土壤的 Al 含量,综合其它因素考虑是否可用来修复 Al 毒害土壤。植物叶片元素含量由植物本身特点和环境因子共同决定,N、P、K、Ca、Na、Mg、Cu 元素在物种间小的变异程度表明:这些元素不受植物分类系统因素的显著影响,是植物必需的共性元素,而 Al、Ni、Pb 等金属元素则受植物种类的影响显著。

表 4 16 个优势树种叶片化学元素的变异特征

项目	元素										
	N	P	K	Ca	Na	Mg	Mn	Al	Ni	Cu	Pb
最大值/(mg · kg ⁻¹)	22 679.6	1 265.2	19 883.5	17 324.1	157.0	2 609.2	1 245.9	12 965.0	6.4	11.3	8.6
最小值/(mg · kg ⁻¹)	11 877.3	307.8	4 289.2	3 609.0	41.7	756.6	77.7	39.1	0.5	3.3	1.5
最大值/最小值	1.909 49	4.110 19	4.635 72	4.800 28	3.765 04	3.448 76	16.030 2	331.501 0	12.415 2	3.398 38	5.625 49
变异系数/%	19.414 1	35.646 4	37.626 5	44.430 3	26.343 7	33.356 7	47.990 4	311.121 4	70.223 9	38.490 8	62.312 1

对 16 个优势树种叶片中化学元素含量进行相关分析(表 5)表明:N、P、K 三者显著或极显著正相关,N 和 Pb 极显著正相关,Mn 和 Na、Ca 和 Pb、Al 和 Ni 显著正相关,Ni 和 N、P 显著负相关。植物对 N、P、K 的利用是协同进化的^[40]。面对重金属胁迫时,植物自身解毒机制一般与蛋白质有关^[43],而 N 是蛋白质的主要组成成分,这可能是本实验中 N 和 Pb 含量极显著相关的原因。Ni 是植物必须微量元素之一并作为脲酶的金属辅基参与 N 代谢^[44],这可解释实验中 Ni 和 N 为何呈负相关关系;脲酶合成及 N 代谢过程消耗较多 ATP,P 是 ATP 的重要组成成分,所以可能导致 Ni 和 P 也呈负相关关系。国外有研

究指出,Mg 的含量高低与 N 有关^[45],可能是因为高 N 情况下植物光合作用加强,而 Mg 能合成叶绿素并促进光合作用。也有其它研究得出,Mg 与 N 没有相关性的结论^[46],和本实验结果一致。海南热带植物元素相关性分析结果显示,5 种常量元素,即 N、P、K、Ca、Mg 之间具有显著相关性^[13];而长江三峡地区优势植物元素含量分析表明,Mg 和 Ni、Na 和 Mg、Na 和 P 之间都有相关关系^[47]。不同地区间的植物元素含量相关性不同且差异较大,因此,探究植物叶片元素含量相关性不能仅仅依靠数量统计方法,还应深入了解植物营养、土壤养分供给等机理以及植物耐受和解除重金属毒性的机制。

表 5 南岭国家自然保护区 16 个优势树种叶片化学元素含量间的相关性

	N	P	K	Ca	Na	Mg	Mn	Al	Ni	Cu	Pb
N	1.000										
P	0.765 **	1.000									
K	0.662 **	0.588 *	1.000								
Ca	0.341	0.150	0.191	1.000							
Na	0.144	-0.109	-0.003	-0.168	1.000						
Mg	0.250	0.050	0.176	0.132	0.238	1.000					
Mn	0.188	-0.115	0.174	0.185	0.621 *	0.168	1.000				
Al	-0.438	-0.359	-0.359	-0.003	0.438	-0.065	0.212	1.000			
Ni	-0.562 *	-0.550 *	-0.035	-0.141	0.082	-0.232	0.221	0.521 *	1.000		
Cu	0.132	0.115	0.159	-0.006	-0.009	-0.188	0.397	-0.218	-0.112	1.000	
Pb	0.676 **	0.341	0.471	0.588 *	0.012	0.471	0.365	-0.182	-0.206	0.115	1.000

注: * 表示 $p \leq 0.5$, ** 表示 $p \leq 0.01$ 。

3.4 16 个优势树种叶片化学元素的比值

根据南岭自然保护区常绿阔叶林 16 个树种叶片中化学元素含量值(表 2、3)计算 N 与 P、K 与 Mg 的质量分数比值和 Ca 与 Al 的摩尔浓度比值(表 6)。植物叶片的 N、P 含量由生境、生长阶段、植物功能群等因素决定^[4]。N/P 值可用于研究生态系统中营养结构变化、生物多样性和生物地球化学循环,植物体中 N/P 值可以体现 2 种元素的供应状况和相对有效性,是反映植物营养限制的重要指标^[48]。N/P < 14 时,植物受 N 限制,N/P > 16 时受 P 限制,在 14 < N/P < 16 时,则 N 和 P 都可能是限制因子^[49]。本研究 16 个优势树种中,N/P 值最大的是五列木(41.67),最小的是青榨槭(17.93),平均值是

26.28。因本实验中 16 种植物的 N/P 值均大于 16,故认为这 16 种植物都属于 P 限制型植物。鼎湖山南亚热带常绿阔叶林 N/P 值较高^[20],与本实验结果相近。相反,同处亚热带的贵州喀斯特地区优势植物 N/P 值为 5 ~ 7^[12],热带地区的海南植物 N/P 值远小于 14^[13],属 N 制约型植物。与世界平均水平相比,中国的 N/P 值偏高,与中国地区土壤普遍缺 P 有关。

在植物生长过程中,元素表现为拮抗作用和协同作用两方面。本实验中,16 种植物 K/Mg 比值变化不大,说明这些元素对树种的生长起协同作用;而叶片 Ca/Al 值变化很大,树种间 Ca/Al 比值存在显著差异。在欧洲,把 Ca/Al 摩尔比值作为判断植物

是否受到 Al 毒害的一个指标,当比值小于 12.5 时,认为植物有可能受到了 Al 的毒害^[50]。如果基于该阈值,南岭自然保护区常绿阔叶林多数树种还未受到 Al 毒潜在危害,其可能原因在于土壤高 Ca 含量的缓冲,这点可以从植物叶片的 Ca 含量水平得到佐证。相对系统分类而言,环境条件,尤其是土壤的理

化性质对植物叶片中化学元素积累的影响更强。若要对南岭自然保护区森林健康状况有更深入的认识,还要进行进一步的实验研究,探讨土壤 pH 值、化学元素含量与植物叶片中化学元素之间的关系和机理等问题。

表 6 16 个优势树种叶片中 N/P、K/Mg 质量分数比值、Ca/Al 摩尔浓度比值

项目	树种序号																平均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
N/P	24.97	22.97	41.67	25.03	19.59	26.98	27.32	28.39	28.34	24.10	19.02	35.53	27.63	17.93	23.78	27.16	26.28
K/Mg	3.58	4.93	5.67	6.27	6.66	10.75	1.89	12.47	4.25	7.11	7.72	5.00	6.20	6.66	10.36	5.00	6.53
Ca/Al	113.47	21.24	0.44	26.42	93.11	43.33	8.67	17.76	10.55	10.77	6.87	42.95	9.24	124.38	63.53	164.98	47.36

4 结论

南岭自然保护区常绿阔叶林 16 个优势树种叶片中化学元素的分析表明:该地区植物叶片 N、P 含量均低于我国陆生植物叶片含量的平均值,Ca、K、Mg 含量处于陆地植物叶片正常范围,叶片 Mn 含量与广东植物叶片含量接近,重金属 Cu、Ni、Pb 处于植物正常含量范围,但其中五列木 Al 含量偏高;南岭自然保护区优势树种受 P 限制强烈;叶片 N、P、K 存在显著或极显著正相关;尽管 16 个优势树种叶片暂未受到重金属和 Al 毒危害,但因华南地区酸沉降引发土壤重金属活化的风险仍存在,应加强对该地区森林土壤化学性质和树木叶片元素含量的定期监测研究,为南岭自然保护区常绿阔叶林持续健康评价提供更为精确的信息。

参考文献:

[1] 陈灵芝. 中国的生物多样性——现状及其保护对策[M]. 北京: 科学出版社,1993:31-70

[2] 陈林,董安强,王发国,等. 广东南岭国家级自然保护区疏齿木荷+福建柏群落结构与生物多样性研究[J]. 热带亚热带植物学报,2010,18(1):59-67

[3] 董安强,陈林,王发国,等. 广东南岭国家级自然保护区的植被研究[J]. 仲恺农业工程学院学报,2012,25(2):1-7

[4] 陈林,龚粤宁,谢国光,等. 广东南岭国际级自然保护区珍稀濒危植物及其保护[J]. 植物科学学报,2012,30(3):277-284

[5] 田怀珍,邢福武. 南岭国家级自然保护区兰科植物物种多样性的海拔梯度格局[J]. 生物多样性,2008,16(1):75-82

[6] 贺立静,张璐,苏志尧. 南岭国家级自然保护区不同保护条件下优势种群的种间联结性分析[J]. 华南农业大学学报,2011,32(1):73-77

[7] 张中峰,张璐,陈北光,等. 南岭国家级自然保护区广东松群落优势种群生态位研究[J]. 华南农业大学学报,2006,27(2):74-77

[8] 张璐,贺立静,区余端,等. 南岭自然保护区常绿阔叶林枯立木数量特征分析[J]. 福建林学院学报,2012,32(1):64-69

[9] 徐正春,安娜,高岚. 雨雪冰冻灾害造成自然保护区生态服务功能损失的经济评估——以南岭自然保护区乳阳林业局为例[J]. 西南林业大学学报,2011,31(2):33-43

[10] 张会儒,唐守正,王彦辉. 德国森林资源和环境监测技术体系及其借鉴[J]. 世界林业研究,2002,15(2):64-70

[11] Jürgen Franzaring, Ingo Holz, Jürgen Zipperle, et al. Twenty years of biological monitoring of element concentrations in permanent forest and grassland plots in Baden-Württemberg (SW Germany) [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2010, 17(1):4-12

[12] 旷远文,温达志,闫俊华,等. 贵州普定喀斯特森林 3 种优势树种叶片元素含量特征[J]. 应用与环境生物,2010,16(2):158-163

[13] 管东生,罗琳. 海南热带植物叶片化学元素含量特征[J]. 林业科学,2003,39(2):28-32

[14] 刘广全,土小宁,赵士洞,等. 秦岭松栎林带生物量及其营养元素分布特征[J]. 林业科学,2001,37(1):28-36

[15] 广东省林业勘测设计院. 广东南岭国家级自然保护区总体规划(1999-2010)[R]. 广州:广东省林业勘测设计院,1999:1-2

[16] 陈志明. 南岭国家级自然保护区生态系统功能及保护对策[J]. 陕西林业科技,2012(3):61-63

[17] 陈锡沐,李镇魁,冯志坚,等. 南岭国家级自然保护区种子植物区系分析[J]. 华南农业大学学报,1999,20(1):97-102

[18] 董鸣. 陆地生物群落调查、观测与分析[M]. 北京:中国标准出版社,1996:154-159

[19] Wen Xuan. Leaf Nitrogen and Phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. New Phytologist, 2005, 168(2):377-385

[20] 莫江明,张德强,黄忠良,等. 鼎湖山亚热带常绿阔叶林植物营养元素含量分配格局研究[J]. 热带亚热带植物学报,2000,8(3):198-206

[21] LY/T 1270—1999. 森林植物与森林枯枝落叶层全硅、铁、铝、钙、镁、钾、钠、磷、硫、锰、铜、锌的测定[S]

[22] Yang Z P, Gao J X, Ou Y H, et al. Characteristics of mineral ele-

- ment content of alpine vegetation in permafrost region on Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Sciences in cold and arid regions*, 2012, 4 (1): 34-39
- [23] Lawrence G B, Huntington T G. Soil-calcium depletion linked to acid rain and forest growth in the eastern United States [R]. Denver, CO: United States Geological Survey, 1999, Report WRIR 98-4267. 12 p
- [24] Lappu J, Huttunen S. Relations between Scots pine needle element concentrations and decreased needle longevity along pollution gradients [J]. *Environmental Pollution*, 2003, 112: 119-126
- [25] Huettl R F. Liming and fertilization as mitigation tools in declining forest ecosystems [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1989, 44: 93-118
- [26] Smidt S. Schadstoffe und Nährstoffe in Blattorbanen, Natürliche Gehalte und Grenzwerte [R]. Institut für Immissionsforschung und Forstchemie. Interner Bericht, 1988, 3: 1-18
- [27] 秦海, 李俊祥, 高三平, 等. 中国660种陆生植物8种元素含量特征 [J]. *生态学报*, 2010, 30(5): 1247-1257
- [28] 李健, 郑春江. 环境背景值数据手册 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989
- [29] 张玉秀, 李林峰, 柴团耀, 等. 锰对植物毒害及植物耐锰机理研究进展 [J]. *植物学报*, 2010, 45(4): 506-520
- [30] Han W X, Fang J Y, Reich P B, *et al.* Biogeography and variability of eleven mineral elements in plant leaves across gradients of climate, soil and plant functional type in China [J]. *Ecology Letters*, 2011, 14(8): 788-796
- [31] McLaughlin S B, Wimmer R. Calcium physiology and terrestrial ecosystem processes [J]. *New Phytologist*, 1999, 142: 373-417
- [32] White P J, Broadley M R. Calcium in plants [J]. *Ann Bot*, 92: 487-511
- [33] Rout G R, Samantaray S, Das P. Aluminium toxicity in plants: a review [J]. *Agronomic*, 2001, 21: 3-21
- [34] Cronan C S, Grigal D F. Use of calcium/aluminum ratios as indicators of stress in forest ecosystems [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24: 209-226
- [35] Blaser P, Walthert L, Pannatier E G. The sensitivity of Swiss forest soils to acidification and the risk of aluminum toxicity [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171: 605-612
- [36] Lawrence G B, David M B, Shortle W C. A new mechanism of calcium loss in forest-floor soils [J]. *Nature*, 1995, 378: 162-165
- [37] 梁其彪, 李瑞棠, 唐润琴, 等. 木论林区稀有濒危植物元素背景值初步分析 [J]. *广西植物*, 1998, 18(3): 229-236
- [38] Kabata-Pendias A, Piotrowska M. *Zanieczyszczenie Gleb i Roslin Uprawnych Pierwiaskami Sladowymi* [M]. Warszawa, Poland: CBR-opracowanie problemowe (In Polish), 1984
- [39] Allen S E, Grimshaw H M, Parkinson J A, *et al.* *Chemical analysis of ecological materials* [M]. Osney Mead. Oxford. UK: Blackwell Scientific Publications, 1974
- [40] SHI-BAO Z S, GAO Kun-fang. Leaf element concentrations of terrestrial plants across China are influenced by taxonomy and the environment [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, 21(8): 809-818
- [41] Brümmner G W, Gerth J, Herms U. Heavy metal species, mobility, and availability in soils [J]. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 1986, 149: 382-398
- [42] Osaki M, Watanabe T, Tadano T. Beneficial effects of aluminum on growth of plants adapted to low pH soils [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1997, 43(3): 552-563
- [43] 袁祖丽, 孙晓楠, 刘秀敏. 植物耐受和解除重金属毒性研究进展 [J]. *生态环境*, 2008, 17(6): 2494-2502
- [44] 龙新宪, 杨肖娥. 植物镍营养 [J]. *土壤通报*, 2000, 31(1): 39-42
- [45] Vries W de, Vel E, Reinde G J, *et al.* Intensive monitoring of forest ecosystems in Europe I. Objectives, set-up and evaluation strategy [J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 174(1-3): 77-95
- [46] Osaki M, Yamada S, Ishizawa T, *et al.* Mineral characteristics of the leaves of 166 plant species with different phylogeny in the temperate region [J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2003, 58(2): 139-152
- [47] 贺金生, 陈伟烈, 王其兵. 长江三峡地区优势植物的化学元素含量特征 [J]. *植物学报*, 1998, 4(5): 453-460
- [48] 邬畏, 何兴东, 周启星. 生态系统氮磷比化学计量特征研究进展 [J]. *中国沙漠*, 2010, 30(2): 296-302
- [49] Koreselman W, Meuleman A M. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the Nature of nutrient limitation [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33(6): 1441-1450
- [50] Rengel Z. Role of calcium in aluminum toxicity [J]. *New Phytologist*, 1992, 121: 499-513