

# 贵州普定喀斯特森林3种优势树种叶片元素含量特征\*

旷远文<sup>1\*\*</sup> 温达志<sup>1</sup> 闫俊华<sup>1</sup> 刘世忠<sup>1</sup> 褚国伟<sup>1</sup> 周传艳<sup>2</sup> 王国勤<sup>3</sup> 张倩媚<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院华南植物园 广州 510650)  
(<sup>2</sup>贵州省喀斯特资源环境与发展研究中心 贵阳 550001)  
(<sup>3</sup>中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101)

**摘要** 为探讨喀斯特森林优势树种叶片营养特征及环境变化对其可能带来的重金属胁迫,测定了贵州普定山区喀斯特森林3个优势乔木树种——大叶栎 (*Quercus griffithii*)、猴樟 (*Cinnamomum bodinieri*) 和刺楸 (*Kalopanax septemlobus*) 的叶片元素 (N、P、K、Ca、Mg、Mn、Cu、Zn、Cr、Ni、Pb和Al) 含量,并分析了N、P、Ca、K、Mg和Al含量比值。结果表明,3种优势乔木叶片营养元素含量特征均表现为Ca>K>Mg>N>P>Mn型,重金属元素含量特征均为Al>Zn>Cu>Ni>Pb>Cr型;Ca和K是喀斯特森林乔木最主要的营养元素,根据叶片Ca+Mg含量,3种优势乔木均属于随遇型喀斯特植物;3个优势树种叶片的重金属含量均处于正常范围,但大叶栎叶片Cu、Zn、Ni和Pb含量已接近其在植物正常范围的上限;对叶片元素含量比值的分析表明,喀斯特山区森林优势树种都属于N制约性植物,其叶片还未受到Al毒的潜在危害。图3 表1 参43

**关键词** 喀斯特森林; 叶片元素含量; 大叶栎; 猴樟; 刺楸  
CLC S718.43 (273)

## Characteristics of Element Contents in Leaves of 3 Dominant Species in Karst Forest in Puding, Guizhou, China\*

KUANG Yuanwen<sup>1\*\*</sup>, WEN Dazhi<sup>1</sup>, YAN Junhua<sup>1</sup>, LIU Shizhong<sup>1</sup>, CHU Guowei<sup>1</sup>, ZHOU Chuanyan<sup>2</sup>,  
WANG Guoqin<sup>1</sup> & ZHANG Qianmei<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)  
(<sup>2</sup>Research Center of Karst Resources Environment and Development, Guizhou Academy of Sciences, Guiyang 550001, China)  
(<sup>3</sup>Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract** In order to assess the nutrient characteristics of the dominant species in karst forest and the environmental changes-induced metal stress on the forest health, the contents of nutrient elements (N, P, Ca, K, Mg, Mn, Cu, Zn, Cr, Ni, Pb, Al) and ratios of N/P, K/Ca, K/Mg and Ca/Al in the leaves of 3 species (*Quercus griffithii*, *Cinnamomum bodinieri* and *Kalopanax septemlobus*) in karst forest in Puding, Guizhou, China were determined and analyzed. The patterns of the nutrient contents in the leaves of the 3 species were all revealed as Ca > K > Mg > N > P > Mn, while those of the metals as Al > Zn > Cu > Ni > Pb > Cr. Calcium and potassium were determined the most dominant nutrients in the leaves of the karst forest trees. According to the contents of Ca+Mg in their leaves, the 3 species could be all classified as indifferent karst plants. The Cu, Zn, Ni and Pb in *Quercus griffithii* leaves was found close to the higher limit of their normal levels in plants, suggesting that there was a potential risk of heavy metals on the karst forest. The 3 dominant species were all defined as N limited plants, and potential Al toxicity in their leaves were not yet confirmed based on the ratios of the elements in the leaves. Fig 3, Tab 1, Ref 43

**Keywords** Karst forest; element content; *Quercus griffithii*; *Cinnamomum bodinieri*; *Kalopanax septemlobus*  
CLC S718.43 (273)

喀斯特系统是地球表层系统的重要组成部分。贵州是我国乃至世界热带、亚热带喀斯特发育最典型、最复杂、分布面积最大的片区,全省95%的县(市)都有喀斯特分布,占全省土地总面积的73.8%<sup>[1]</sup>。喀斯特石漠化(Karst rocky desertification)已经成为中国西南最严重的生态地质环境问

题<sup>[2]</sup>。研究表明,贵州已经成为我国西南地区石漠化最严重的省份<sup>[3]</sup>。借助卫星图像对贵州土地利用和土地覆盖变化的研究表明,1991~2001年期间,贵州省耕地面积大幅减少,城市面积大幅扩增,土地利用和植被盖度的变化已显著影响到喀斯特地区地表温度<sup>[4]</sup>。喀斯特森林由可溶性碳酸盐发育的喀斯特地貌上发育而来,对改善生态环境、防止石漠化具有重要的作用。在生态退化成为全球面临的主要生态问题之一的背景下,开展喀斯特地区植被变化及其对喀斯特生境的适应性研究,可为喀斯特生态脆弱区现存森林保护与严重退化区植被重建过程中树种的选择提供科学依据。

贵州喀斯特森林属于亚热带地区的喀斯特森林生态系

收稿日期: 2009-03-11 接受日期: 2009-05-15

\*中国科学院青年人才领域前沿项目(No. 200719)、广东省自然科学基金项目(No. 8451065005001317)和贵州省社会发展公关项目(黔科合S字[2007]1023)资助 Supported by the Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (No. 200719), the Natural Science Foundation of Guangdong, China (No. 8451065005001317), and the Social Development Project of Guizhou, China (No. [2007]1023)

\*\*通讯作者 Corresponding author (E-mail: kuangyw@scbg.ac.cn)

统, 其生境与相同气候条件下常态地貌上常绿阔叶林的生境有明显不同, 主要表现为岩石裸露率高, 土壤与植被不连续, 土层浅薄及持水量低, 土壤富钙, 偏碱性等。由于喀斯特山区植被生长较为缓慢, 喀斯特森林生态系统抵抗外界干扰的阈值较低, 是一种脆弱的生态系统, 一旦破坏后很难恢复<sup>[5]</sup>。近年来, 国内学者就喀斯特森林生态系统开展了大量相关研究, 如, 从生态系统水平研究喀斯特森林生态系统生境特征<sup>[1]</sup>、喀斯特退化生态系统恢复重建<sup>[6]</sup>、森林生态系统对喀斯特环境的适应与调节<sup>[7]</sup>、森林生态系统水文功能<sup>[8]</sup>、喀斯特地区植被净生产力估算<sup>[9]</sup>、喀斯特森林土壤有机碳空间变异<sup>[10]</sup>等; 从群落水平上, 则涵盖了喀斯特森林自然恢复过程中群落动态<sup>[11]</sup>、森林物种多样性<sup>[12]</sup>、退化喀斯特森林群落数量特征<sup>[13]</sup>、物种多样性维持机制<sup>[14]</sup>、石漠化地段植被类型<sup>[15]</sup>、人工林天然更新效果<sup>[16]</sup>、土壤抗侵蚀性与喀斯特土壤环境变化<sup>[17]</sup>等方面; 从个体水平上, 包括喀斯特山区先锋树种叶解剖特征及生态适应性<sup>[18]</sup>、植物水分利用效率<sup>[19]</sup>、乔灌植物叶片C同位素组成对石漠化的响应<sup>[20]</sup>等。

因环境污染而引发的营养元素缺乏和有毒元素累积, 都会对植物正常生长和森林健康产生严重的影响。植物组织(尤其是叶片)化学分析结果, 作为生物监测指标已广泛应用于森林健康和森林衰退风险评价中。相对而言, 对喀斯特地区植物化学计量分析的研究仅有零星报道<sup>[21-22]</sup>, 喀斯特森林群落优势树种叶片化学分析的研究还不多见。本研究以贵州普定喀斯特山区森林群落中3个优势树种为对象, 测定了其叶片元素(N、P、K、Ca、Mg、Mn、Cu、Zn、Cr、Ni、Pb和Al)含量, 并分析了叶片一些元素含量的比值, 以期探讨喀斯特地区森林群落优势树种叶片的营养状况及环境变化可能带来的有害金属元素的胁迫, 为喀斯特地区森林生态系统的经营与管理、生物多样性保护和退化生态系统的恢复与重建提供依据。

## 1 研究区概况

普定县(105°41'27"~105°43'28"E, 26°13'3"~26°15'3"N)位于贵州省中部偏西, 地处安顺地区西北部, 东西长51.4 km, 南北宽40 km, 全县森林覆盖率23.2%。境内地势四周高、中部低而相对比较平坦, 海拔在1 100~1 600 m的面积占总面积的94.8%, 石灰岩山地面积占总面积的34.8%。普定县属北亚热带季风湿润气候, 季风交替明显, 气候温和, 年平均气温15.1℃, 极端最高温34.7℃, 极端最低温-11.1℃, 无霜期289 d; 雨量充沛, 多年平均降雨量为1 107.9 mm。土壤以石灰土和黄壤为主, 分别占土壤总面积的63.7%和20.1%, 土壤基本理化性质见表1。植被类型丰富多样, 有常绿阔叶林、常绿落叶阔

叶林、落叶阔叶林、针叶林、马尾松林、灌丛、灌草丛、草丛等。由于自然和人为双重因素的影响, 该县土壤侵蚀严重, 裸露和半裸露石山连片出现, 在多数地区植被退化严重。

## 2 材料与方法

本研究分别选择普定县坪上乡、城关镇辖区内石漠化地段的有代表性次生林进行采样。在林地设定样地后, 调查海拔、坡度、坡向、林分郁闭度、灌木总盖度、草本总盖度等, 对高度>1.3 m的乔木每木检尺, 记载树种、胸径并目测树高。选取在多样地中频繁出现的3个乔木树种大叶栎(*Quercus griffithii*)、猴樟(*Cinnamomum bodinieri*)和刺楸(*Kalopanax septemlobus*), 用高枝剪于树冠中上层4个方位采集成熟叶片, 混合成一个样装入干净信封, 每个树种5个重复。叶片采集后带回实验室, 先后用自来水和去离子水快速冲洗干净, 70℃下烘干, 用小型不锈钢粉碎机粉碎, 样品包装于密封袋内, 供化学分析测试用。

植物样品元素测定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》<sup>[23]</sup>进行。植物叶片N含量按照GB7886-87《森林植物与森林枯枝落叶层全N的测定》测定, 其余元素按照GB 7887-87《森林植物与森林枯枝落叶层全Si、全Fe、全Al、全Ca、全Mg、全K、全Na、全P、全S、全Mn、全Cu、全Zn的测定》测定。待测植物样品经酸消煮后, 用ICP-OES测定K、Ca、Mg、Mn、Cu、Zn、Cr、Ni、Pb、Al含量, 用钼锑抗分光光度法测P含量, 用凯氏定N法测定N含量。所有元素测定时用相应标准溶液(由日本KAWO化学工业有限公司提供)配置系列浓度, 绘制工作曲线。各工作曲线相关系数均要求大于0.999。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的要求, 以植物成分分析标准物质(国家一级标准物质杨树叶BGV07604-GSV-3)作质量控制, 标样元素含量测定结果均在标准值范围内。

## 3 结果与讨论

### 3.1 叶片营养元素含量水平

根据植物叶片元素浓度大小, 为便于比较, 本研究中人将N、P、K、Ca、Mg和Mn 6种元素归列为营养元素。图1列出了3个优势树种叶片N、P、K、Ca、Mg和Mn的平均含量。6种营养元素在3个树种叶片的含量, 其大小排序均表现为Ca > K > Mg > N > P > Mn特征, 与贵州喀斯特地区乔木树种叶片营养元素含量特征<sup>[21, 24]</sup>一致。周运超根据喀斯特地貌植物Ca生特性(Ca、Mg含量)曾将树种分成4大类: 嗜Ca型、喜Ca型、随遇型和厌Ca型<sup>[21]</sup>。本研究中3个树种叶片Ca+Mg含量处于其所划分的随遇型一类(Ca+Mg含量为1.4%~2.5%范围内)。但

表1 林区土壤基本理化特征(N=5,  $\bar{x} \pm s$ )

Table 1 Physicochemical properties of the soils in forest stands (N=5,  $\bar{x} \pm s$ )

采样深度 Soil depth (δ/cm)	有机质 Organic matter (w/g kg <sup>-1</sup> )	pH	N (w/g kg <sup>-1</sup> )	P (w/g kg <sup>-1</sup> )	K (w/g kg <sup>-1</sup> )	速效K Available K (w/mg kg <sup>-1</sup> )	交换性Ca Exchangeable Ca (w/mg kg <sup>-1</sup> )	交换性Mg Exchangeable Mg (w/mg kg <sup>-1</sup> )	阳离子交换量 Cation exchange capacity (b/cmole kg <sup>-1</sup> )
0~10	81.79±17.01	6.53±0.49	3.11±0.57	0.54±0.08	27.71±1.20	323.70±9.13	3769.09±74.10	947.26±47.75	30.48±5.20
10~20	52.67±22.94	6.90±0.02	2.10±0.78	0.41±0.01	27.78±1.47	244.82±24.38	3707.69±1060.24	1152.57±211.77	28.57±3.79
20~40	29.70±12.70	7.03±0.07	1.20±0.50	0.28±0.02	24.88±1.31	214.58±19.69	3356.08±565.02	1171.11±22.58	27.51±2.53

\*数据来源于贵州科学院, 测定单位为贵州省农科院土壤肥料研究所

\*Data were obtained from Guizhou Academy of Sciences and analyzed by Soil and Fertilizer Institute, Guizhou Academy of Agricultural Sciences

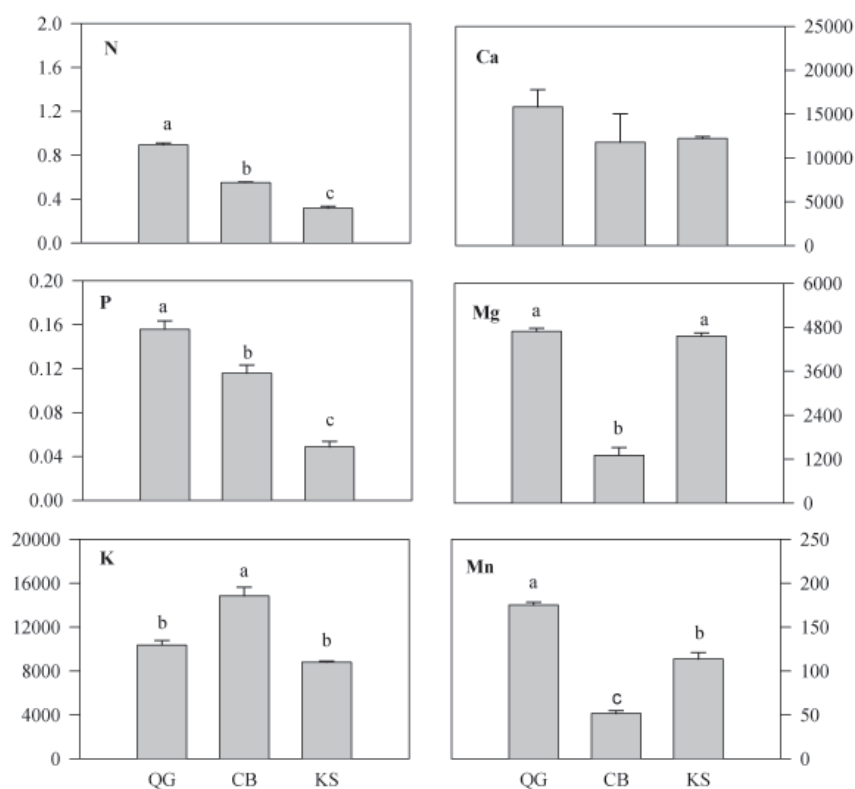


图1 3个树种叶片营养元素平均含量

Table 1 Mean±SE values of element contents in the leaves of *Q. griffithii* (QG), *C. bodinieri* (CB) and *K. septemlobus* (KS)

N、P含量单位为%，其余元素含量单位为mg kg<sup>-1</sup>。不同树种元素含量差异显著 ( $P < 0.05$ ) 时以不同字母表示

The units of elements are presented as by mg kg<sup>-1</sup>, except those of N and P, which are presented by percentage of dry mass. Different letters indicate the significant differences among the species at level of  $P < 0.05$

在本研究中,常绿树种猴樟叶片Ca+Mg含量却要低于落叶树种大叶栎和刺楸叶片Ca+Mg含量,这种现象与喀斯特地区植被落叶树种占多数的现象是一致的,因为从常绿到落叶的演替是物种的进化,也体现了3种乔木树种在喀斯特环境中生长的适应性,这种适应性对喀斯特退化地区在植被人工恢复实践选择什么树种提供了营养依据。

Ca、Mg和Mn是植物必需元素,只能从土壤中吸收<sup>[25]</sup>。3个树种叶片Ca含量均超过了10 000 mg kg<sup>-1</sup>,远远高于陆地植物叶片Ca含量2 300~5 000 mg kg<sup>-1</sup>的正常范围<sup>[26]</sup>,表明喀斯特地区植物叶片主要营养元素中Ca居于首位。3个树种叶片K和Mg的平均含量则与所报道的树种叶K和Mg含量<sup>[21]</sup>相近,但叶片Mg含量则高于Smid界定的陆地植物叶片Mg含量的正常范围(500~1 300 mg kg<sup>-1</sup>)<sup>[26]</sup>,体现了喀斯特地区植物对土壤Mg吸收的特异性。与广西喀斯特木论林区12种稀有濒危植物叶片Mn的背景值(29.2~123.9 mg kg<sup>-1</sup>,平均值73.89 mg kg<sup>-1</sup>)相比,本研究3个树种叶片Mn含量处于正常范围,也与广西鹅耳栎、青冈栎等6种非濒危植物叶片Mn含量<sup>[27]</sup>相近。

就营养元素在树种之间的差异而言,Ca在3个树种叶片含量无显著差别,N和P在3个树种叶片含量出现显著差异,这种特征与前期所报道的贵州喀斯特地区植物叶N、P含量差异性相符<sup>[22]</sup>。K、Mg和Mn在3个树种叶片的含量则因树种生物特性而不同:叶片K在常绿树种(猴樟)中最高,落叶树种(大叶栎和刺楸)叶片K含量无显著性差异;叶片Mg和Mn

则刚好相反,常绿的猴樟叶片Mg和Mn含量显著低于落叶的大叶栎和刺楸叶片Mg和Mn含量(图2)。

### 3.2 重金属含量水平

由于Al是一种植物毒性元素,我们将其和5种重金属列入一并分析讨论。图2列出了大叶栎、猴樟和刺楸叶片5种重金属和Al的平均含量。分析结果表明,尽管叶片重金属元素含量在不同树种间差异显著,但这些元素在3个树种叶片的含量表现出完全相同的模式:大叶栎含量最高,猴樟次之,刺楸含量最低。相同气候环境下植物叶片重金属含量的分布模式表明,植物叶片重金属含量不但受土壤环境的影响,也受树种本身生物学特性的影响,即使生长在相同的土壤环境下,不同树种对重金属元素的吸收仍存在着差别。6种元素在3个树种叶片含量大小顺序均表现出Al > Zn > Cu > Ni > Pb > Cr模式,反映了植物所处环境中该元素的地球化学分布特征。在本研究中,叶片重金属元素的分布模式与广西喀斯特林区植物叶片的含量模式<sup>[27]</sup>相似;3个树种叶片Al含量远低于广西亚热带土山16个树种叶片Al平均含量(976 mg kg<sup>-1</sup>),而与广西木论林区12种稀有濒危植物叶片Al背景值(20~187 mg kg<sup>-1</sup>,均值68 mg kg<sup>-1</sup>)<sup>[27]</sup>非常相近。

植物一方面直接从土壤主动吸收营养元素和一些必需的重金属元素,如Cu和Zn,另一方面又被动吸收土壤中某些非必需元素,如Pb等。在全球性大气污染蔓延和局部森林健康衰退的背景下,利用植物组织化学分析的结果来诊断环境

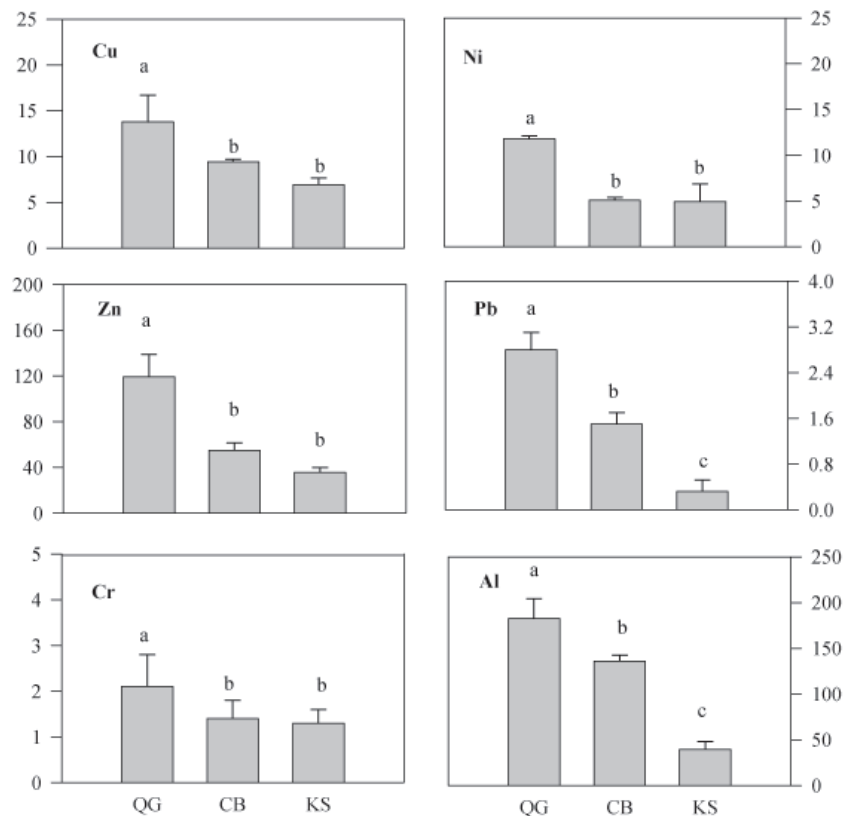


图2 3个树种叶片重金属和Al平均含量 (w/mg kg<sup>-1</sup>)  
Fig. 2 Mean±SE values of heavy metals and Al in the leaves of *Quercus griffithii* (QG), *Cinnamomum bodinieri* (CB) and *Kalopanax septemlobus* (KS) (w/mg kg<sup>-1</sup>)

污染对森林健康的影响已成为生态学家广泛采用的方法之一<sup>[28]</sup>, 如通过分析森林植物叶片重金属元素含量来评价森林遭受大气污染的胁迫程度<sup>[29]</sup>, 或者用来指示城市环境污染水平<sup>[30]</sup>. 本研究所测定的这几种重金属元素, 均为常见的酸污染或工业污染指示元素, 城市化和工业排放都可能导致这些元素在植物叶片中异常积累<sup>[31]</sup>.

重金属Cu和Zn是植物光合作用的酶底物, 高浓度的Cu和Zn会对植物产生毒害. 本研究3个树种叶片Cu和Zn含量与广西木论喀斯特林区植物叶片这两种元素的环境背景值范围 (Cu 2.81~10.08 mg kg<sup>-1</sup>, Zn 18.1~96.5 mg kg<sup>-1</sup>)<sup>[27]</sup>相近, 也处于植物叶片Cu和Zn含量的正常范围 (Cu为5~10 mg kg<sup>-1</sup>, Zn为25~100 mg kg<sup>-1</sup>)<sup>[23]</sup>; 重金属Pb属于植物非必需元素, 植物叶片高浓度Pb会抑制光合酶活性<sup>[32]</sup>, 降低叶片光合速率<sup>[33]</sup>, 干扰植物水分平衡<sup>[34]</sup>. 本研究3个树种叶片Pb含量均低于3 mg/kg, 处于植物体内Pb的正常浓度范围<sup>[35]</sup>; Ni和Cr也是植物的非必需元素, 植物体内Ni正常水平在0.1~10 mg kg<sup>-1</sup>, Cr为0.05~5 mg kg<sup>-1</sup><sup>[23]</sup>, 3个树种叶片中Ni和Cr含量均没有超出正常含量范围. 由于元素背景值在不同区域存在差异, 尽管本研究的土壤、气候、树种等条件与广西热带喀斯特林区相似, 参照已有的研究结果和文献, 推断大叶栎叶片中的Cu、Zn、Ni和Pb含量已经接近它们在植物体正常浓度范围的下限, 表明该地区喀斯特森林也存在着受重金属毒害的潜在风险. 尽管有人认为, 由于影响土壤重金属移动的最重要的因子是土壤pH值<sup>[36]</sup>, 在喀斯特地区由于土壤碳酸盐含量比较高, Al含量

相对较低, 土壤pH值较高, 因此, 在短期内喀斯特土壤中重金属移动性不大, 植物受重金属威胁的可能性较小. 但是, 已有研究证实喀斯特地区植物Cu含量显著升高<sup>[37]</sup>. 近年来, 受工业排放增加的影响, 许多重金属已经通过多种途径进入到陆地生态系统中, 对植物叶片重金属含量进行长期监测和定期分析, 能够为喀斯特山区森林的健康评价提供更为精确的信息.

### 3.3 叶片元素含量比值

图3列出了3个树种叶片5种营养元素的质量分数比值和Ca、Al物质的量浓度比值. N/P在树种间差异不显著; 不同生活特性树种Ca/K、K/Mg和Ca/Mg浓度比值体现了差异性: 落叶树种 (大叶栎和刺楸) 叶片Ca/K显著大于常绿树种猴樟, 而K/Mg和Ca/Mg刚好相反, 显著低于猴樟, 2个落叶树种间Ca/K、K/Mg和Ca/Mg浓度比值没有显著差异; 3个树种叶片Ca/Al物质的量浓度比值都很高, 远远大于欧洲植物遭受Al毒害的阈值12.5.

元素在植物的生长过程中可以表现为拮抗作用和协同作用两个方面. 与单一的元素浓度相比, 植物组织元素浓度比值更能真实指示环境的变化<sup>[38]</sup>, 因为元素在被根系吸收时会受到其它元素的影响, 比如随着酸沉降的增加, Al抑制根系对Ca的吸收<sup>[39]</sup>. 植物体内N/P值能用来衡量植物生长过程中受哪个元素的限制, 当N/P >16时, 暗示植物生长受P限制, 当N/P <14时, 表明植物生长受N限制, 当N/P比值介于14~16时, 表明N与P单独或者共同影响植物的生长<sup>[40]</sup>. 以此推

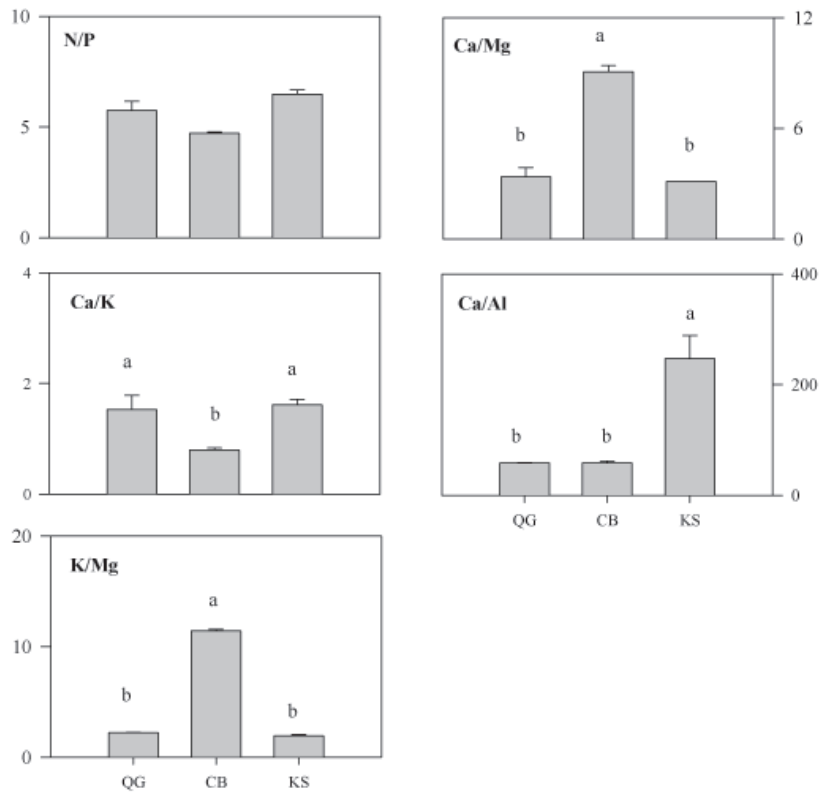


Fig. 3 3个树种叶片元素含量比值 (Ca/Al 为物质的量浓度比, 其余为质量分数比)

Fig. 3 Ratios of element concentrations in the leaves (Molar concentration ratio is used for Ca/Al and mass fraction ratio for the others)

断, 本研究的3个树种都属于N制约型植物, 与杨成等对贵州喀斯特山区乔木叶片的研究结果<sup>[41]</sup>一致。尽管3个树种间Ca/K、K/Mg和Ca/Mg比值存在显著差异, 但相同生活类型树种(2个落叶树种)叶片的元素比值非常接近 (Ca/K为1.6左右, K/Mg为2.0左右, Ca/Mg为3.2左右), 与杨成等所报道的喀斯特山区12种植物的比值<sup>[41]</sup>相近, 说明这些元素对相同生活类型树种的生长基本上起着协同作用。在欧洲, 植物叶片的Ca/Al物质的量浓度比值经常用于诊断酸沉降下植物是否受到Al毒害, 植物叶片Ca/Al物质的量浓度比值等于12.5是植物Al毒害的一个阈值, 当Ca/Al小于12.5时, 表明植物受到潜在Al毒伤害<sup>[42]</sup>。尽管贵州是我国一个酸沉降比较严重的地区, 本研究发现, 喀斯特地区森林3个优势树种叶片Ca/Al物质的量浓度比值远远高于12.5, 揭示树木还没有受到Al毒危害。其原因可能在于, 一方面, 土壤Al的可利用性与土壤pH的降低有关<sup>[43]</sup>, 而喀斯特地区由碳酸盐风化形成的土壤, 一般Ca的背景值都比较高<sup>[27]</sup>, 土壤pH值远远高于南方酸沉降地区红壤。

#### 4 结论

普定喀斯特山区森林3个种优势乔木叶片营养元素含量特征均表现为Ca > K > Mg > N > P > Mn型, 重金属元素含量特征均为Al > Zn > Cu > Ni > Pb > Cr型, Ca和K是叶片最主要的营养元素, 3个优势树种叶片Ca+Mg含量属于随遇型。3个树种叶片重金属含量均处于正常范围, 但大叶栎叶片中的Cu、Zn、Ni和Pb含量接近其在植物体正常浓度范围的下限。叶片元素含量比值表明, 普定喀斯特山区森林优势树种都属于N制约性植物, 相同生活类型植物Ca、K和Mg元素间比较

协调, 叶片还未受到Al毒潜在危害。喀斯特地区植被恢复和森林营造实践中应以Ca+Mg含量高的树种为优选。对植物叶片重金属含量进行长期监测和定期分析能为喀斯特山区森林健康评价提供更为精确的信息。

#### References

- Zhu SQ (朱守谦). Study on the Karst Forest Ecosystem. Guiyang, China: Guizhou Science and Technology Press (贵阳: 贵州科学技术出版社), 1993. 1~164
- Wang SJ (王世杰). The most serious eco-geologically environmental problem in southwestern China-karst rocky desertification. *Bull Mineral Petrol & Geochem* (矿物岩石地球化学通报), 2003, **22** (2): 120~126
- Chen QW (陈起伟), Xiong KN (熊康宁), Lan AJ (蓝安军). Analysis on karst rocky desertification in Guizhou based on "3S". *Carsol Sin* (中国岩溶), 2007, **26** (1): 37~42
- Xiao HL, Wen QH. The impact of land use and land cover changes on the land surface temperature in a karst area of China. *J Environ Manage*, 2007, **85**: 245~257
- Wan FX (万福绪), Zhang JC (张金池). Ecological characteristics and vegetation rehabilitation techniques in the karst mountain areas of Guizhou Province. *J Nanjing For Univ* (南京林业大学学报), 2003, **27** (1): 45~49
- Wu KH (吴克华), Xiong KN (熊康宁), Rong L (容丽), Long MZ (龙明忠). Characteristics of the process of vegetation restoration under different rocky desertification degrees by comprehensive treatment—A case study of the Huajiang Gorge area, Guizhou province. *Earth & Environ* (地球与环境), 2007, **35**: 327~335
- Zhou YC (周运超), Pan GX (潘根兴). Adaptation and adjustment of Maolan forest ecosystem to karst environment. *Carsol Sin* (中国岩溶),

- 2001, **20** (1): 47-52
- 8 Yang AX (杨安学), Peng Y (彭云). Summary of study on the Ecohydrological functions of karst forest ecosystems in Guizhou. *J Anhui Agric Sci* (安徽农业科学), 2007, **35** (36): 11995-11997
- 9 Wang B (王冰), Yang ST (杨胜天), Wang YJ (王玉娟). Estimation on net primary productivity of vegetation in karst area of Guizhou province. *Carsol Sin* (中国岩溶), 2007, **26** (2): 98-104
- 10 Wang SJ (王世杰), Lu HM (卢红梅), Zhou YC (周运超), Xie LP (谢丽萍), Xiao DA (肖德安). Spatial variability of soil organic carbon and representative soil sampling method in Maolan karst virgin forest. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), 2007, **44** (3): 475-483
- 11 Yu LF (喻理飞), Zhu SQ (朱守谦), Ye JZ (叶镜中), Wei LM (魏鲁明), Chen ZR (陈正仁). Dynamics of a degraded karst forest in the process of natural restoration. *Sci Silv Sin* (林业科学), 2002, **38** (1): 1-7
- 12 Long CL (龙翠玲). Comparison of species diversity in karst forest among different topography sites - A case study in Maolan natural reserve, Guizhou Province. *Carsol Sin* (中国岩溶), 2007, **26** (1): 55-60
- 13 Liu YL (刘映良), Xue JH (薛建辉). Quantitative properties of degraded karst forest communities in Maolan Mountain area of Guizhou. *J Nanjing For Univ* (南京林业大学学报), 2005, **29** (3): 23-27
- 14 Chen KH (陈坤浩), Luo Q (骆强), Xie YG (谢永贵), Zhou YS (周应书), Wu C (吴诚). *Euptelea pleiospermum* community characteristics of Dafang karst area in Guizhou, southwest China. *J Wuhan Bot Res* (武汉植物研究), 2007, **25** (5): 515-520
- 15 Yang CH (杨成华), Wang J (王进), Dai XY (戴晓勇), Ding FJ (丁访军), Yao XH (姚小华). Study on the vegetation types in the rocky desertification areas in Guizhou. *Guizhou For Sci & Technol* (贵州林业科技), 2007, **35** (4): 7-12
- 16 Lu XQ (卢晓强), Yang DC (杨德超), Zhang XS (张显松). Factor analysis in natural regeneration of *Patyclus orientalis* artificial forest in karst area of Guizhou province. *J West China For Sci* (西南林业科学), 2006, **35** (2): 78-81
- 17 Zhao YY (赵洋毅), Zhou YC (周运超), Duan X (端旭), Zhou W (周玮). Soil anti-erodibility of different vegetation in karst area in central part of Guizhou. *Res Agric Modernization* (农业现代化研究), 2007, **28** (5): 633-635
- 18 Rong L (荣丽), Wang SJ (王世杰), Liu N (刘宁). Leaf anatomical characters and its ecological adaptation of the pioneer species in the karst mountain area with a special reference to the Huajiang canyon of Guizhou. *J Mount Sci* (山地学报), 2005, **23** (1): 35-42
- 19 Yang C (杨成), Liu CQ (刘丛强), Song ZL (宋照亮), Liu ZM (刘占民), Zheng HY (郑厚义). Characteristics of carbon isotopic compositions in karst mountain plants and their indication to water use efficiency - A case study on Yangzhong catchment in Huaxi, Guizhou. *Carsol Sin* (中国岩溶), 2007, **26** (2): 105-110
- 20 Rong L (荣丽), Wang SJ (王世杰), Du XL (杜雪莲). Responses of foliar  $\delta^{13}\text{C}$  values of woody plants to different karst rocky desertification degrees in Huajiang Gorge, Guizhou. *Sci Silv Sin* (林业科学), 2007, **43**: 38-44
- 21 Zhou YC (周运超). Study on the part plants/ main nutrient elements content of Guizhou karst region. *J Guizhou Agric Coll* (贵州农学院学报), 1997, **16** (1): 11-16
- 22 Yang C (杨成), Liu CQ (刘丛强), Song ZL (宋照亮), Liu ZM (刘占民), Zheng HY (郑厚义). Distribution characteristics of carbon, nitrogen and sulphur of plants and soils in Guizhou karst mountain area. *J Beijing For Univ* (北京林业大学学报), 2008, **3** (1): 45-51
- 23 Dong M (董鸣). Survey, Observation and Analysis of Terrestrial Biocommunities. Beijing, China: Standards Press of China (北京: 中国标准出版社), 1996. 154-159
- 24 He JS (贺金生), Chen WL (陈伟烈), Wang QB (王其兵). Studies on the characteristics of element contents in the dominant plant species of the Three-Gorges Region in China. *Acta Bot Sin* (植物学报), 1998, **40** (5): 453-460
- 25 Lawrence GB, Huntington TG. Soil-calcium depletion linked to acid rain and forest growth in the eastern United States. Report WRIR 98-4267. Denver, CO: United States Geological Survey, 1999. 12
- 26 Smidt S. Schadstoffe und Nährstoffe in Blatterbanen, Natürliche Gehalte und Grenzwerte. Institut für Immissionsforschung und Forstchemie. *Interner Bericht*, 1988, **3**: 1-18
- 27 Liang QB (梁其彪), Li RT (李瑞棠), Tang RQ (唐润琴), Ning SJ (宁世江), Zhao TL (赵天林), Mo QH (莫权辉). Preliminary analysis on the element background values of rare and endangered plants in Mulun forest area. *Guihaia* (广西植物), 1998, **18** (3): 229-236
- 28 Percy KE, Ferretti M. Air pollution and forest health: Toward new monitoring concepts. *Environ Poll*, 2004, **130**: 113-126
- 29 Yilmaz S, Zengin M. Monitoring environmental pollution in Erzurum by chemical analysis of Scots pine (*Pinus sylvestris* L) needles. *Environ Poll*, 2004, **29**: 1041-1047
- 30 Alfani A, Baldantoni D, Maisto G, Bartoli G, Virzo De Santo A. Temporal and spatial variation in C, N, S and trace element concentrations in the leaves of *Quercus ilex* within the urban area of Naples. *Environ Poll*, 2000, **109**: 119-129
- 31 Guan DS, Pear MR. Heavy metal concentrations in plants and soils at roadside locations and parks of urban Guangzhou. *J Environ Sci*, 2006, **18**: 495-502
- 32 Singh S, Eapen S, D'ouza SF. Cadmium accumulation and its influence on lipid peroxidation and antioxidative system in an aquatic plant, *Bacopa monnieri* L. *Chemosphere*, 2006, **62**: 233-246
- 33 Sharma P, Dubey RS. Lead toxicity in plants. *Brazilian J Plant Physiol*, 2005, **17**: 35-52
- 34 Zhou W, Qiu B. Effects of cadmium hyperaccumulation on physiological characteristics of *Sedum alfredii* Hance (Crassulaceae). *J. Plant Sci*, 2005, **169**: 737-745
- 35 Allen SE, Grimshaw HM, Parkinson JA, Quarmby C. Chemical analysis of ecological materials. UK: Blackwell Scientific Publications, Osney Mead, Oxford, 1974
- 36 Brümmer GW, Gerth J, Herms U. Heavy metal species, mobility, and availability in soils. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkd*, 1986, **149**, 382-398
- 37 Li T, Yu L J, Li M T, Li W. Comparative studies on the qualities of green tea in Karst and non-Karst areas of Yichang, Hubei province, PR China. *Food Chem*, 2007, **103**: 71-74
- 38 Berger TW, Kollensperger G, Wimmer R. Plant-soil feedback in spruce (*Picea abies*) and mixed spruce-beech (*Fagus sylvatica*) stands as indicated by dendrochemistry. *Plant & Soil*, 2004, **264**: 69-83
- 39 Cronan CS. Differential adsorption of Al, Ca and Mg by roots of red spruce (*Picea rubens* Sarg.). *Tree Physiol*, 1991, **8**: 227-237
- 40 Koerselman W, Meuleman AFM. The vegetation N:P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation. *J Appl Ecol*, 1996, **33**: 1441-1450
- 41 Yang C (杨成), Liu CQ (刘丛强), Song ZL (宋照亮), Liu ZM (刘占民). Characteristics of the nutrient element contents in plants from Guizhou karst mountainous areas of China. *Ecol & Environ* (生态环境), 2007, **16** (2): 503-508
- 42 Rengel Z. Role of calcium in aluminium toxicity. *New Phytol*, 1992, **121**: 499-513
- 43 Tomlinson GH. Air pollution and forest decline. *Environ Sci & Technol*, 1983, **17** (6): 246A-256A