

广州城郊环境梯度下马尾松针叶元素质量分数变化特征

李祥光^{1,2}, 孙芳芳^{1,2}, 吴敏³, 温达志^{1*}, 旷远文¹

1. 中国科学院华南植物园生态研究所, 广东 广州 510650; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3. 广州地区绿化委员会, 广东 广州 510030

摘要: 城市化、工业化迅速发展及人类活动的加剧给城市及其周边地区森林生态系统带来前所未有的干扰和压力。植物冠层是植物与大气直接进行气体交换的界面, 冠层叶组织化学分析已成为评价环境污染对森林树木健康的影响, 指示环境污染的有效手段。文章以广州黄埔工业区(丹水坑风景区)、城郊接壤区(华南植物园)和近郊(帽峰山森林公园)这一环境梯度为对象, 在各研究点上选定自然生长的、成熟健康的马尾松(*Pinus massoniana* L.) 5株, 分别采集树冠中部向阳枝条上的当年生(Current, C)和一年生(Current+1, C+1)针叶, 然后将每组针叶区分为带叶鞘针叶、去叶鞘针叶和叶鞘3个组分进行样本制备, 测定N、Al、Cu、Cd、Pb、Zn、Cr、Ni元素质量分数, 旨在探讨利用马尾松针叶不同组分的元素质量分数用于指示城郊梯度环境质量变化的适宜性和可靠性。研究结果表明: ①当年生带叶鞘针叶中Al质量分数显著高于当年生去叶鞘针叶($p < 0.05$), 其余元素在当年生和一年生的去叶鞘针叶与带叶鞘的完整针叶间均无显著差异; ②Ni在当年生针叶及其叶鞘间没有显著差异($p < 0.05$), 其它被测定的金属元素无论在当年生还是一年生针叶中, 均表现为叶鞘中的元素质量分数均显著高于去叶鞘针叶($p < 0.05$), 体现了针叶与叶鞘在形态结构上的差异引起重金属积累的差异; 而非金属元素N质量分数则针叶显著高于叶鞘; ③一年生针叶中Ni质量分数显著低于当年生针叶, 但Al、Pb、Zn质量分数显著高于当年生针叶, 一年生叶鞘中所有金属元素的质量分数都显著高于当年生叶鞘, 表现出随暴露时间和针叶寿命的延长而持续累积的特征; 而营养元素N质量分数在当年生针叶和一年生针叶以及当年生叶鞘和一年生叶鞘间无显著差异; ④城乡环境梯度下生长的马尾松为研究环境质量演变提供了一个天然的实验室, 受人类活动干扰大的城区马尾松一年生针叶的Cd和N质量分数及其叶鞘中的Cu、Cr、Ni质量分数显著高于受人为干扰较少的郊区, 表明植物组织中元素化学特征反映了城市发展过程中人类活动的足迹。在城市环境尤其是重金属污染的监测中, 成熟的一年生叶鞘更具指示意义, 效果更显著。

关键词: 马尾松(*Pinus massoniana* (L.)); 针叶; 叶鞘; 元素质量分数; 城乡环境梯度; 大气污染

中图分类号: X173

文献标识码: A

文章编号: 1672-2175 (2007) 06-1602-06

21世纪是世界城市化高度发展的世纪。城市人口的膨胀引起对能源需求的增加。据罗乐勤^[1]报道, 城市人口和能源消费量的相关系数达到0.89, 以目前我国的人口规模计算, 城市化水平每提高1%, 城市居民的能源消费需求将增加 3800×10^4 t 标煤。能源消耗的不断增长导致近地空各类环境污染浓度的不断增加, 引起全球气候变化和生态破坏。此外, 持续排放的污染物还可以通过改变土壤环境、中断营养循环导致自然群落和生态系统稳定性的下降及生态退化^[2-4], 某些长期遭受重污染排放的地区已经出现大片森林树木死亡现象^[5]。最近, 《生态与环境科学前沿》杂志的“生态可持续发展未来之展望”专辑也提出了未来许多关于以人类活动为主导影响的关键生态问题^[6]。可见, 经济发展活跃、受人类活动影响大的城市及其周边地区的环境质量变化将日益受到关注。

植物不断地与外界环境发生物质交换, 在受污染的环境中容易富集污染物, 通过测定植物体内污

染成分的含量便可估测环境的污染物成分和相对污染程度^[7]。冠层是植物与大气直接进行气体交换的界面, 对各种扰动比森林其他结构组分更敏感, 反应更加迅速。目前已有不少学者认为冠层叶组织化学分析是诊断树木营养水平和受胁迫情况的可靠手段^[8-10], 也有不少研究利用植物叶片化学元素含量来指示城市环境污染程度^[11-13]。马尾松(*Pinus massoniana* L.) 是研究者常选的实验材料, 广泛分布于我国热带、亚热带地区, 然而多数研究都是将整条针叶元素的单位含量作为环境污染指示的指标, 而事实上, 针叶不同部位的元素含量差异很大, 我们对相对清洁区^[14]和污染区^[15]的研究结果都表明, 针叶叶尖、叶中和叶基部之间重金属元素质量分数差异相对小, 但叶鞘中的含量显著高于针叶其他部位, 有些元素如Pb差异可达10倍以上。据此, 本研究选择高度城市化的广州市及其近郊自然生长的马尾松针叶, 主要将其区分为去叶鞘针叶和叶鞘两部分进行元素质量分数分析, 旨在探讨利用马

基金项目: 国家自然科学基金项目(30570349); 中国科学院华南植物园“城市森林与生态环境研究平台建设”项目; 广州地区绿化委员会项目

作者简介: 李祥光(1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事环境生态学研究。E-mail:lixg@scib.ac.cn

*通讯作者: 温达志, E-mail:dzw@scib.ac.cn

收稿日期: 2007-02-29

马尾松针叶不同部位的元素质量分数指示城市环境质量变化的可靠性和有效性。

1 材料和方法

1.1 研究地概况

研究区广州属亚热带典型季风海洋气候, 夏季盛行东南风或东风, 冬季以偏北风为主, 从而形成大气的南北输送和扩散通道^[16]。考虑到广州市及周边的经济发展情况, 选择近似位于东南——西北方向上的3个采样地: 黄埔区作为城市重污染区的代表, 该区是广州最重要的工业生产基地, 拥有发电厂、石油化工厂等多家工业企业^[17]; 华南植物园作为市一般情况的代表, 外有公路交通, 内有旅游活动; 帽峰山森林公园作为近郊区的代表, 该区相对清洁。三地约位于23°11'N, 113°21'E, 自然气候条件相近, 年平均气温21.5℃, 年均降水量约为1700 mm^[18]。

1.2 样品采集与处理

2006年8月底于上述三地分别选择5株健康、约40 a的马尾松样树, 样树间距至少100 m且远离道路。采集树冠中部向阳枝条上的当年生和一年生针叶, 然后装入塑料袋密封并立即运回实验室。用去离子水清洗干净, 从完整的针叶上剥离出异龄针叶叶鞘, 和去除叶鞘的针叶部分分别保存好。另保留少量异龄完整针叶以便比较。洗净的样品均在65℃下烘干48 h, 经微型植物粉碎机分别磨碎后装瓶以备化学分析。

1.3 化学分析

选择测定N、Al、Cu、Cd、Pb、Zn、Cr、Ni这些工业生产和城市交通废气中常见元素, N质量分数采用流动注射法分析, 其它金属元素化学分析过程参照中国生态系统研究网络观测分析标准^[19]进行。测定时用元素标准溶液(日本KAWO化学工业有限公司)配置系列浓度, 绘制工作曲线。各工作曲线相关系数(*R*)均大于0.999。以试剂空白作植物空白对照, 并按照CERN野外观测数据的要求, 以植物成分分析标准物质国家一级杨树叶作质量控

制, 标样分析结果均在标准值范围内。

1.4 数据分析

实验数据用SPSS 13.0软件进行统计分析, 运用t检验进行均数的比较, 方差分析进行多重比较, 显著性水平为0.05。

2 实验结果

2.1 马尾松去叶鞘针叶和含叶鞘的完整针叶元素质量分数比较

异龄马尾松去叶鞘针叶和含叶鞘的完整针叶中各元素质量分数见表1。配对t检验结果表明, 仅当年生完整针叶中Al质量分数显著高于去叶鞘的当年生叶, 其余元素在当年生和一年生的去叶鞘针叶与不去叶鞘的完整针叶间均无显著差异, 认为主要原因是叶鞘在整条针叶中所占的比例太小。据此, 下文仅对去叶鞘针叶、叶鞘进行分析, 除特别说明外, 当年生叶和一年生叶均指去叶鞘的针叶。

2.2 马尾松针叶不同元素质量分数的差异

由图1可以看出, 当年生叶、一年生叶以及当年生叶鞘、一年生叶鞘中, 均以非金属元素N质量分数最高, 当二年生叶中高达12 087.30 mg·kg⁻¹; 金属元素中, Al质量分数最高, 一年生叶叶鞘中可达3 367.26 mg·kg⁻¹; Cd质量分数最低, 一年生叶中仅为0.22 mg·kg⁻¹, 表明植物对不同元素的吸收能力存在很大差异。

异龄马尾松针叶不同组分间的金属元素质量分数也存在很大差异, 除Ni表现为一年生叶显著低于当年生叶外, 其他金属元素基本都呈现出当年生叶 < 一年生叶 < 当年生叶鞘 < 一年生叶鞘的规律。经统计分析, 一年生叶的Al、Pb、Zn质量分数显著高于当年生叶; 一年生叶鞘中所有金属元素都显著高于当年生叶鞘; 当年生叶鞘中的金属元素除Ni外均显著高于当年生叶; 一年生叶鞘的各金属元素均显著高于一年生叶, 前者的Al、Cu、Cd、Pb、Zn、Cr、Ni质量分数分别是后者的4.9、12.9、2.6、23.3、1.6、7.5和3.0倍。可见, 不论是针叶还是叶鞘, 一年生叶中金属元素质量分数都普遍高于当年生叶,

表1 马尾松当年生、一年生完整针叶和去叶鞘针叶中元素质量分数¹⁾

Table 1 Concentrations of elements in the whole needle and the needle without sheath of the current year(C) and previous year(C+1) in Masson pine

类别	w(元素)/(mg·kg ⁻¹)							
	Al	Cu	Cd	Pb	Zn	Cr	Ni	N
当年生叶(去叶鞘)	614.10 ^b (128.54)	5.44 (2.43)	0.12 (0.01)	4.19 (1.00)	37.20 (3.18)	1.08 (2.36)	5.28 (0.23)	15080.22 (376.62)
当年生完整针叶	742.55 ^a (141.43)	4.97 (1.48)	0.21 (0.08)	5.32 (2.16)	40.72 (4.62)	0.23 (0.19)	5.07 (0.60)	14300.83 (1310.58)
一年生叶(去叶鞘)	891.70 (335.22)	4.97 (0.94)	0.17 (0.06)	12.70 (5.24)	52.55 (11.12)	0.40 (0.30)	2.45 (0.43)	12648.18 (960.39)
一年生完整针叶	1028.96 (426.34)	8.02 (2.06)	0.15 (0.06)	18.09 (4.48)	56.07 (9.98)	0.87 (0.52)	2.77 (0.51)	12737.68 (1055.82)

1) 数值为4个样本的平均值, 括号内的数值为标准差; 同龄针叶去叶鞘和不去叶鞘间元素质量分数差异显著时以不同字母表示

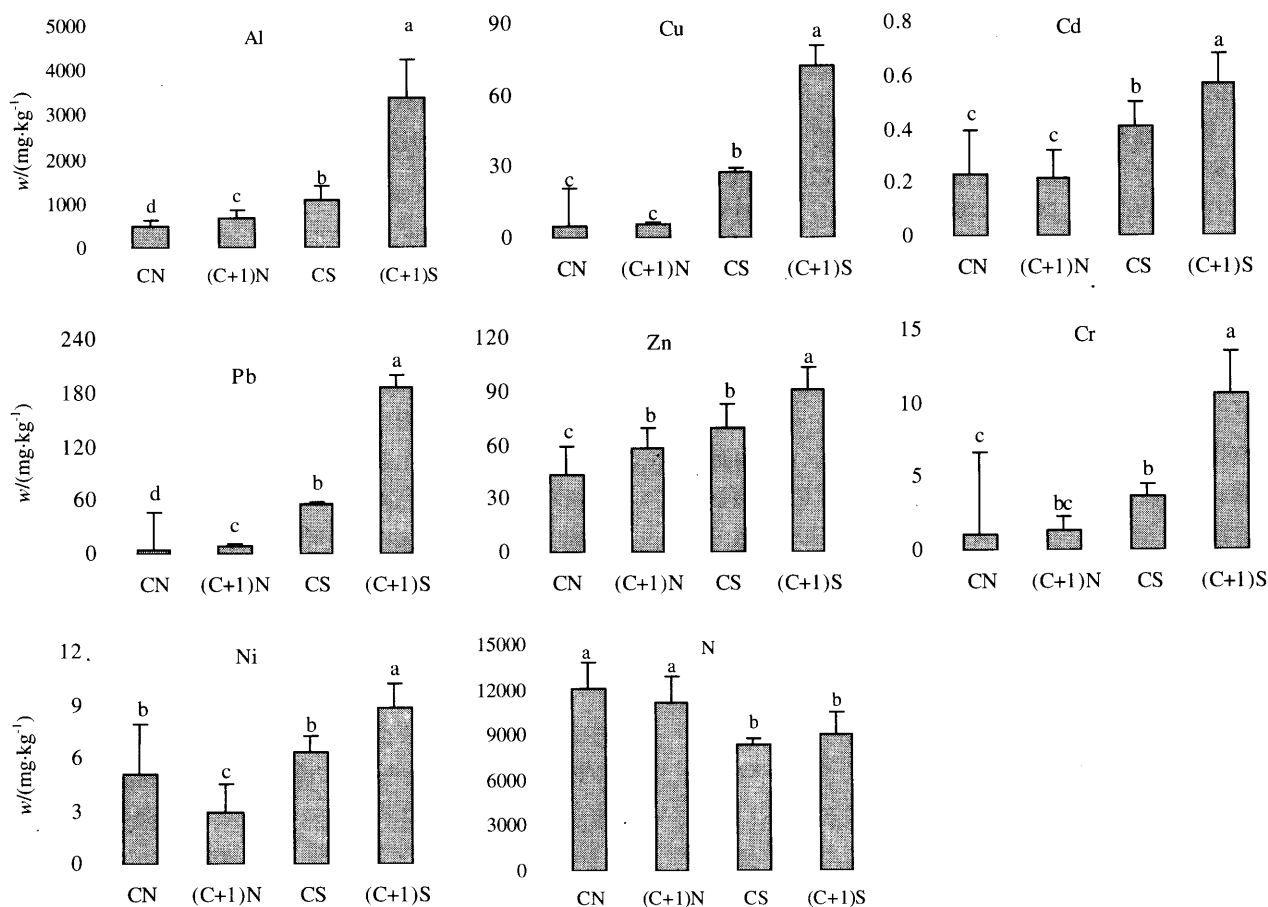


图1 马尾松当年生针叶和一年生针叶不同部位的元素质量分数

Fig. 1 The distribution pattern of elements in the current year(C) and previous year needles of *Pinus massoniana*

注: 针叶不同组间元素质量分数差异显著时以不同字母表示 ($P < 0.05$). CN: 当年生叶, (C+1)N: 一年生叶, CS: 当年生叶鞘, (C+1)S: 一年生叶鞘.

体现出这些元素随叶龄和暴露时间的延长而持续累积的特征; 不论是当年生叶还是一年生叶, 叶鞘的金属元素质量分数都显著高于针叶, 表明叶鞘比针叶更容易累积这些金属元素。非金属元素N在同龄针叶中均以针叶中的质量分数显著高于其叶鞘, 而当年生叶和一年生叶之间, 以及当年生叶鞘和一年生叶鞘之间的差异不显著, 表明针叶以及叶鞘的N质量分数与叶龄无关。

2.3 城乡梯度下马尾松针叶元素质量分数变化

上述被测定元素的含量普遍随叶龄增加而累

积, 在不同研究点上当年生针叶中的某些元素没有表现出显著差异, 故分别选用一年生叶和一年生叶鞘来进行城乡梯度下各采样地间的比较。

2.3.1 城乡梯度下马尾松一年生叶中各元素质量分数的差异

如表2所示, 工业污染区黄埔的马尾松一年生叶中Cd质量分数显著高于郊区的帽峰山, 且两地马尾松一年生叶中Cr质量分数均显著高于植物园, 但营养元素N质量分数则以植物园最高, 其余元素在城区至近郊梯度下差异不显著。

表2 城区至近郊梯度下马尾松一年生叶中各元素质量分数¹⁾

Table 2 Concentrations of elements in the previous year(C+1) needles of Masson pine along the urban-suburban gradient

采样地	w(元素)/(mg·kg ⁻¹)							
	Al	Cu	Cd	Pb	Zn	Cr	Ni	N
黄埔区	596.87 (180.91)	5.50 (1.13)	0.30 ^a (0.08)	7.74 (2.78)	64.41 (15.38)	1.95 ^a (0.40)	3.39 (1.33)	10892.36 ^b (766.44)
植物园	749.63 (142.53)	6.62 (2.78)	0.23 ^{ab} (0.06)	10.78 (2.03)	59.11 (15.74)	0.58 ^b (0.35)	2.71 (0.61)	12593.14 ^a (1354.16)
帽峰山	705.19 (185.31)	4.87 (1.57)	0.15 ^b (0.03)	6.31 (3.48)	53.27 (13.82)	1.97 ^a (0.27)	2.69 (0.22)	9481.75 ^b (1001.48)

1) 结果为5个样本的平均值, 括号内的数值为标准差; 不同采样地元素质量分数差异显著时以不同字母表示

2.3.2 城乡梯度下马尾松一年生叶叶鞘中各元素质量分数的差异

由表3可见,市区的两个采样点黄埔和植物园的马尾松一年生叶鞘中各金属元素质量分数都高于近郊帽峰山,其中,Cu、Cr、Ni都达到显著水平。而三地马尾松一年生叶鞘中非金属元素N质量分数无显著差异。

表3 城区至近郊梯度下马尾松一年生叶鞘中各元素质量分数¹⁾

Table 3 Concentrations of elements in the previous year(C+1) needle sheath of Masson pine along the urban-suburban gradient

采样地	w(元素)/(mg·kg ⁻¹)							
	Al	Cu	Cd	Pb	Zn	Cr	Ni	N
黄埔区	2728.28 ^b	80.67 ^a	0.64	179.97	92.93	10.28 ^b	12.09 ^a	9739.04
	(124.23)	(10.98)	(0.07)	(5.23)	(7.63)	(1.18)	(2.36)	(974.66)
植物园	5066.50 ^a	83.88 ^a	0.60	216.75	98.98	16.86 ^a	7.64 ^b	8660.32
	(2067.94)	(13.00)	(0.30)	(67.75)	(26.66)	(2.18)	(2.47)	(287.16)
帽峰山	2094.01 ^b	53.03 ^b	0.49	158.76	81.88	4.90 ^c	6.93 ^b	8862.97
	(705.49)	(3.92)	(0.01)	(19.96)	(6.84)	(1.81)	(1.06)	(2414.17)

1) 结果为5个样本的平均值,括号内的数值为标准差;不同采样地元素质量分数差异显著($p < 0.05$)时以不同字母表示

1.03、1.42 mg·kg⁻¹, 和马跃良等^[12]的结果(Cu: 6.0 ~ 6.4 mg·kg⁻¹, Cd: 0.10 ~ 0.47 mg·kg⁻¹, Pb: 11.03 ~ 0.9 mg·kg⁻¹, Cr: 0.9 ~ 2.1 mg·kg⁻¹)相近。其中,Cu质量分数都低于广州市马尾松针叶Cu质量分数的背景值11.0 mg·kg⁻¹,暗示广州城区研究点上土壤中可被植物利用的Cu并没有因工业污染排放得到增加,甚至可能存在不足;而黄埔、植物园和帽峰山的马尾松针叶Zn质量分数都高于其背景值40.0 mg·kg⁻¹,表明城市化和工业化等人类活动已经导致城区及其周边环境Zn的质量分数的明显增加^[20]。

金属元素尤其是Pb在针叶和叶鞘中质量分数差异很大,一年生叶鞘中Pb质量分数比其在针叶中的质量分数高23.3倍,和旷远文等人^[15]报道的元素在马尾松针叶长度序列上的不均匀分布的结果一致。针叶与叶鞘中金属元素质量分数如此大的差异可能与叶鞘的形态和解剖结构有关。和针叶比较,叶鞘相对比较粗糙,更易截留和吸附金属元素;且其束状结构能减少雨水对污染物的淋洗。营养元素N则不管是当年生还是一年生针叶,都表现为去叶鞘针叶高于叶鞘,可能由于元素的生理功能不同所致。N作为植物必需的大量元素,是组成氨基酸、蛋白质、核酸、叶绿素、辅酶等的基本元素^[21],针叶中这些结构物质和生命物质较叶鞘更多,因而其中N质量分数比叶鞘高。此外,一年生叶与当年生中的N质量分数没有显著差异,表明贮存在植物体内的或植物从土壤中吸收的有效N能够均衡地分配到异龄针叶,以维持同等重要的生命活动,因为假如叶片出现明显衰老,其生理活动出现下降,其中的有效营养将迁移到幼龄或新生组织中,导致衰老

3 讨论

由于之前的同类研究(包括背景值的研究)多以完整叶进行,并未分出叶鞘,所以在此仅选择针叶中的元素质量分数与过去类似的研究报道进行比较。本研究中马尾松当年生和一年生针叶中Cu、Cd、Pb、Cr元素质量分数均值分别为4.71、5.61 mg·kg⁻¹, 0.23、0.22 mg·kg⁻¹, 4.28、7.96 mg·kg⁻¹和

叶片中营养元素明显下降^[22]。

一年生叶中Al、Pb、Zn质量分数高于当年生叶,而Ni质量分数低于当年生叶。可能由于Al和Pb是植物有毒元素,过量存在时对植物产生毒害,如Al质量分数多时可抑制Fe和Ca的吸收、干扰磷代谢等^[23],而Ni是脲酶和氢化酶的金属成分,与氮代谢密切相关,是植物参与氧化还原反应的必需营养元素^[21]。植物对营养元素和有毒金属元素的吸收积累方式不同,对营养元素是主动吸收并积累在生长最旺盛的器官,对有毒元素是被动吸收并随时间或叶片寿命的延长积累在对其生长影响最小的部位^[24],所以较老龄的一年生叶中Ni质量分数低于生长旺盛的当年生叶,而Al和Pb质量分数比幼龄当年生叶高。尽管Zn也是植物必需的微量元素,但它在植物中不易迁移,从老叶向新叶的转移非常缓慢^[25],因而也表现出随叶龄和暴露时间的增加而积累。

除Cr质量分数以植物园最低外,马尾松一年生叶及其叶鞘中其它金属元素质量分数自城区至近郊总体上表现为下降趋势,反映出人类活动影响的强度依次减小,而导致Cr质量分数在该梯度上异常变化的原因尚不清楚。本文所测的元素,均为常见的酸污染或工业污染指示元素,在城市化进程中人口增加、工业生产、交通发展都可能对环境带来负面影响,引起环境质量的下降。有研究人员也曾报道工业污染和城市交通导致植物叶片中这些元素的异常积累^[13, 26, 27],并阐明了利用植物叶片内的元素质量分数变化监测大气污染、评价环境质量^[28]。

4 结论

综合分析表明,马尾松针叶元素化学分析反映

了自城市工业区,至城郊接壤区和近郊环境质量的 变化,在城市工业污染和人类活动的影响下,已经 形成了明显的Cu、Cr、Ni的复合污染梯度,受人类 活动干扰大的城区微量金属质量分数显著高于受 人类干扰少的郊区。通过对当年生和一年生针叶中 元素质量分数的比较分析,揭示了微量金属元素随 针叶暴露时间及其寿命的延长而持续积累的特征, 阐明了在重金属污染的生物监测中,一年生针叶比 当年生针叶更有效。此外,过去多数研究将完整针 叶用作环境污染指示,忽略了元素质量分数在针叶 不同部位及叶鞘间的差异,本研究结果表明,无论 一年生还是当年生,叶鞘比针叶能更好地指示城市 人类活动影响下金属污染的地区差异,但对于非金 属元素,至少营养元素N而言,则针叶比叶鞘更为 有效。

参考文献:

- [1] 罗乐勤. 我国城市能源安全分析[J]. 城市问题, 2003, 114: 77-79.
LUO Leqin. The analyses of urban safe energy in China[J]. Urban Problems, 2003, 114: 77-79.
- [2] WATMOUGH S A, HUTCHINSON T C, SAGER E P S. Changes in tree ring chemistry in sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) along an urban-rural gradient in southern Ontario[J]. Environmental Pollution, 1998, 101: 1-11.
- [3] GÖRANSSON A, ELDHUSE T D. Is the (Ca+K+Mg)/Al ratio in the soil solution a predictive tool for estimating forests damage?[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2001, 1: 57-74.
- [4] HOULE D, DUCHESNE L, MOORE J D, et al. Soil and tree-ring chemistry response to liming in a sugar maple stand[J]. Journal of Environmental Quality, 2002, 31:1993-2000.
- [5] 温达志, 旷远文, 刘世忠, 等. 大气污染对珠江三角洲村边林植被的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2003, 11(4): 386-392.
WEN Dazhi, KUANG Yuanwen, LIU Shizhong, et al. Vegetation damage by long-term air pollution at a rural site in the Pearl River Delta in South China[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2003, 11(4): 386-392.
- [6] MELILLO J M, GRIMM N B, SCHLESINGER W H. Ecology and the transition to sustainability[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2005, 3: 3-3.
- [7] 蒋高明. 植物生理生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 232-239.
JIANG Gaoming. Plant Ecophysiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 232-239.
- [8] NELLEMAN C, THOMSEN M G. Long-term changes in forest growth: potential effects of nitrogen deposition and acidification[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2001, 128: 197-205.
- [9] BORER C H, SCHBERG P G, DEHAYES D H, et al. Accretion, partitioning and sequestration of calcium and aluminium in red spruce foliage[J]. Tree Physiology, 2004, 24: 929-939.
- [10] BUSSOTTI F, PANCRAZI M, MATTEUCC G, et al. Leaf morphology and chemistry in *Fagus sylvatica* (beech) trees as affected by site factors and ozone: results from CONECOFOR permanent monitoring plots in Italy[J]. Tree Physiology, 2005, 25: 211-219.
- [11] ALFANI A, BALDANTONI D, MAISTO G, et al. Temporal and spatial variation in C, N, S and trace element concentrations in the leaves of *Quercus ilex* within the urban area of Naples[J]. Environmental Pollution, 2000, 109: 119-129.
- [12] 马跃良, 贾桂梅, 王云鹏, 等. 广州市区植物叶片重金属元素含量及其大气污染评价[J]. 城市环境与城市生态, 2001, 14(6): 28-30.
MA Yueliang, JIA Guimei, WANG Yunpeng, et al. Concentrations of heavy metal in leaves of plants and air pollution evaluation in Guangzhou region[J]. Urban Environment and Urban Ecology, 2001, 14(6): 28-30.
- [13] GUAN D S, PEAR M R. Heavy metal concentrations in plants and soils at roadside locations and parks of urban Guangzhou[J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, 18: 495-502.
- [14] 旷远文, 温达志, 周国逸, 等. 鼎湖山异龄马尾松针叶长度序列元素分布[J]. 植物生态学报, 2006, 30(1): 33-39.
KUANG Yuanwen, WEN Dazhi, ZHOU Guoyi, et al. Distribution of elements along the length of different-aged needles of *Pinus massoniana* at Dinghushan[J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(1): 33-39.
- [15] KUANG Y W, WEN D Z, ZHOU G Y, et al. Distribution of elements in needles of *Pinus massoniana* (L.) was uneven and affected by needle age[J]. Environmental Pollution, 2007, 145: 146-153.
- [16] 金腊华. 广州地区酸雨特征及其对植物的影响研究[J]. 城市环境与城市生态, 2002, 15(6): 11-13.
JIN Lahua. Research on characteristics of acid rain and its effects on plants in Guangzhou area[J]. Urban Environment and Urban Ecology, 2002, 15(6): 11-13.
- [17] 刘海燕. 黄埔区环境空气质量变化与对策[J]. 广州环境科学, 2000, 9: 45-47.
LIU Haiyan. The change and countermeasure of environmental atmosphere quality of Huangpu district in Guangzhou[J]. Guangzhou Environmental Sciences, 2000, 9: 45-47.
- [18] 郭少聪, 任海, 季申芒, 等. 污染对华南植物园水生生态系统的影响[J]. 生态科学, 2000, 19(3): 37-40.
GUO Shaocong, REN Hai, JI Shenmang, et al. Effects of Pollution on the Aquatic Ecosystem in South China Botanical Garden[J]. Ecological Science, 2000, 19(3): 37-40.
- [19] 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.
DONG Ming. Survey, Observation and Analysis of Terrestrial Bio-communities[M]. Beijing: Standards Press of China, 1996: 154-159.
- [20] 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: 200-216.
LI Jian, ZHENG Chunjiang. Handbook of Data for Environmental Background Values[M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1989: 200-216.
- [21] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 第5版. 北京: 高等教育出版社, 2004: 29-32.
PAN Ruichi. Plant Physiology[M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2004: 29-32.
- [22] ESCUDERO A, MEDIIVILLA S. Decline in photosynthetic nitrogen use efficiency with leaf age and nitrogen resorption as determinants of leaf life span[J]. Journal of Ecology, 2003, 91: 880-889.
- [23] 王忠. 植物生理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 90-91.
WANG Zhong. Plant Physiology[M]. Beijing: Chinese Agriculture

- Press, 2000: 90-91.
- [24] 孔牧, 任天祥, 孔令韶, 等. 植物体内元素吸收积累初步分析[J]. 物探与化探, 1999, 23(1): 33-37.
- KONG Mu, REN Tianxiang, KONG Lingshao, *et al.* A study of transporting and accumulative mechanism of elements in plants[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1999, 23(1): 33-37.
- [25] 曹恭, 梁鸣早. 锌: 平衡栽培体系中植物必需的元素[J]. 土壤肥料, 2003, 6(增刊): 2-3.
- CAO Gong, LIANG Mingzao. Zinc: necessary microelement for plants in balanced culture system[J]. *Soil Fertilizer*, 2003, 6(supplement): 2-3.
- [26] 康玲芬, 李锋瑞, 张爱胜, 等. 交通污染对城市土壤和植物的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(3): 556-560.
- KANG Lingfen, LI Fengrui, ZHANG Aisheng, *et al.* Effects of traffic pollution on urban soils and plants[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(3): 556-560.
- [27] 于一苏, 吴中能. 合肥市大气污染物中重金属对绿化植物影响的研究[J]. 安徽林业科技, 2005, 3: 2-6.
- YU Yisu, WU Zhongneng. A study on the effect of heavy metals in air pollution on greening plants in Hefei municipality[J]. *Anhui Forestry Technology*, 2005, 3: 2-6.
- [28] 任乃林, 陈炜彬, 黄俊生, 等. 用植物叶片中重金属元素含量指示大气污染的研究[J]. 广东微量元素科学, 2004, 11(10): 41-45.
- REN Nailin, CHEN Weibin, HUANG Junsheng, *et al.* Study on air environment pollution by the concentration of heavy metals in leaves of plants[J]. *Guangdong Microelement Science*, 2004, 11(10): 41-45.

Variations of concentrations of elements in needles of *Pinus massoniana* (L.) along an urban-suburban gradient in Guangzhou

LI Xiangguang^{1,2}, SUN Fangfang^{1,2}, WU Min³, WEN Dazhi¹, KUANG Yuanwen

1. Institute of Ecology, South China Botanical Garden, the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Guangzhou Greening Committee, Guangzhou 510030, China

Abstract: Increasing urbanization, industrialization along with human activities have imposed unprecedented disturbance and suppression on urban forest ecosystems and their surrounding areas. Canopy serves as the active interface for gas exchange of trees with the environment, and chemical assay of foliage has been frequently and extensively employed as the useful tool for forest health risk assessment and environmental monitoring and bioindication. In the present study, we selected Huangpu, Botanical Garden, and Maofengshan as the representative site of the industrial center of Guangzhou, urban-suburban transition, and suburban area, respectively. Five mature, health-looking pines (*Pinus massoniana* (L.)) grown in field at each site were sampled. The current (C) and previous year(C+1) needles were collected from branches of each tree at the mid crown, and pooled by needle age. The needles with the same age were separated into three parts including needles attached with sheath, needles without sheath and needle sheath. Concentrations of total N, Al, Cu, Cd, Pb, Zn, Cr and Ni for all components of needles were determined to elucidate the suitability and reliability of pine needles in monitoring urban-suburban environmental change.

The results were as follows, 1) The C needles with sheaths had significantly higher concentration of Al than those without sheaths, but this difference was not observed for other elements either in the C needles or the C+1 needles. 2) The sheaths for both needle ages had significantly higher concentrations of all metal elements than needles without sheaths, with the exception for Ni, suggesting the extant difference in metal accumulation rate caused by the dissimilarity in morphological and anatomical aspects between the bared needles and the sheaths; however, needles of both ages had significantly higher concentrations of nitrogen than those of needle sheaths. 3) Nickel concentration in the C+1 needles was lower, while Al, Pb and Zn concentrations were higher than those in the C needles. Concentrations of all the metal elements in the C+1 needle sheaths were significantly higher than the C needle sheaths, demonstrating that accumulation of metal elements increased with prolonged exposure time and needle longevity; however, the nutritional nitrogen concentration did not show significant relations with needle age. 4) Masson pine growing along the urban-suburban gradient provided a natural laboratory for environmental quality study, Cd and N concentrations in C+1 needles as well as Cu, Cr, Ni concentrations in their sheaths collected from highly human-impacted Guangzhou were significantly higher than its suburban Maofeng mountain, reflecting the ecological footprints of the anthropogenic activities along the urbanization course. 5) Among all the needle components divided and tested, the C+1 needle sheath is the best bioindicator for environmental monitoring, particularly efficient for heavy metal pollution assessment.

Key words: *Pinus massoniana* (L.); needles; needle sheaths; element concentration; urban-suburban gradient; air pollution