

珠江三角洲马尾松年轮中 S 的环境指示意义

旷远文 周国逸 温达志

(中国科学院华南植物园生态研究所)

摘要:为探讨珠江三角洲马尾松年轮 S 含量作为生物指标追踪区域大气污染历史变迁的意义,该文通过树木年轮化学分析方法,研究了肇庆鼎湖山和南海西樵山马尾松木质部 S 含量的时间变化规律。结果表明,两地马尾松木质部 S 平均含量随时间的增长呈明显上升趋势,在最晚形成的木质部中 S 含量最高;在 20 世纪 80 年代以前,两地相同时期的马尾松木质部 S 含量差异不显著,80 年代后,西樵山马尾松木质部 S 含量显著高于同期鼎湖山马尾松木质部 S 含量;从两地马尾松木质部 S 最终年表发现,木质部 S 含量存在着 1970 年前、1971—1985 年和 1986—2002 年 3 个明显区别的时段;基于两地马尾松木质部中 S 含量时间变化规律,结合珠江三角洲 20 世纪 80 年代以后的某些特定经济指标分析,恢复了研究地大气污染历史:1941—1970 年为大气相对清洁期;1971—1985 年为大气污染开始出现并持续增强期;1986—2002 年为大气污染最严重期。

关键词:珠江三角洲;马尾松;年轮化学;硫元素;环境指示

中图分类号:S718.53 文献标识码:A 文章编号:1000-1522(2008)02-0001-07

KUANG Yuan-wen; ZHOU Guo-yi; WEN Da-zhi. **Environmental bioindication of sulphur in tree rings of Masson pine (*Pinus massoniana*) in the Pearl River Delta of China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2008) **30**(2) 1-7 [Ch, 36 ref.] Institute of Ecology, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510650, P. R. China.

In order to identify the potential of sulphur (S) content in the rings of Masson pine (*Pinus massoniana*) in the Pearl River Delta as a bio-indicator to regional history of atmospheric pollution, dendrochemistry was used to determine the temporal distribution of S content in the xylem of Masson pine from Zhaoqing Dinghushan Mountain and Nanhai Xiqiaoshan Mountain, Guangdong Province, southern China. The results indicated that the content of xylem S increased temporally and peaked in the rings formed in the latest years at the both sites. In the rings formed at the same periods before the 1980s, S content was not significantly different between the two sites, while in the rings formed at the same periods after the 1980s, S content at Xiqiaoshan Mountain was significantly higher than that at Dinghushan Mountain. The chrono-sequences of S index at the both sites could be easily marked as three periods: before 1970, 1971-1985 and 1986-2002. Based on the temporal changes of the xylem S content and certain social-economic index after the 1980s in the delta, the history of atmospheric pollution at the studied sites could be reconstructed as the followings: 1) before 1970, a period in which the air was relatively clear; 2) 1971-1985, a period in which the air was gradually polluted; 3) 1986-2002, a period in which the air was most severely polluted in the delta.

Key words Pearl River Delta; *Pinus massoniana*; dendrochemistry; sulphur; environmental bioindication

工业化和城市化导致的环境污染已经成为全世界面临的重大问题之一。对环境污染尤其是大气污染历史的研究,已经在全球范围开展起来。树木年

轮化学(Dendrochemistry)是树木年轮年代学(Dendrochronology)的分支学科之一,自 Lepp^[1]首次将之用于监测环境中痕量金属的长期变化获得成功

收稿日期:2007-01-05

http://www.bjfujournal.cn, http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(30570349)、中国科学院研究生科学与社会实践资助专项、中国科学院华南植物园博士启动项目和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-SW-120)。

第一作者:旷远文,博士,副研究员。主要研究方向:森林生态学和环境生态学。电话:020-37252977 Email:kuangyw@scbg.ac.cn 地址:510650 广州市天河区兴科路 723 号中国科学院华南植物园生态研究所。

责任作者:温达志,博士,研究员。主要研究方向:森林生态学和环境生态学。电话:020-37252615 Email:dzwen@scbg.ac.cn 地址:同上。

后,经过 30 余年的完善和发展,在揭示区域性环境历史污染领域得到广泛应用^[2-9],其理论体系、技术手段、研究尺度等方面都取得了长足进展^[10],已成为重建环境历史变化的重要工具之一^[11]。

改革开放以来,我国珠江三角洲地区经济实现了迅速发展。但伴随而来的资源过度开发、环境污染加剧和生态系统服务功能受损,严重影响了当地社会经济的可持续发展,给人类健康及其生存环境带来了严重威胁。陶瓷工业的迅速崛起和生产规模的持续扩大,煤、石油等能源的大量消耗,使近地高空大气 SO_2 、 NO_x 和降尘中重金属浓度不断升高,大气污染已经成为该地区最突出的环境问题^[12-13]。该地区目前已经成为我国酸雨危害最严重的地区之一,由酸雨导致的森林冠层盐基离子淋溶、土壤盐基离子淋失和缓冲能力下降,严重破坏了自然森林群落和生态环境,局部地区的生物多样性锐减,森林出现健康衰退甚至死亡^[14],给该地区农作物产量、森林材积和自然生态系统造成了巨大损失。另外,土壤重金属污染^[15-16]、有机污染物污染^[17]和大气痕量重金属沉降增加^[18]也日趋严重。针对这些问题,我们在反思人类活动给自然环境带来巨大威胁的同时,迫切需要选择正确合理的手段和途径对环境进行评价。

近年来,以大气污染排放种类和大气污染物浓度的常规监测,无论在地方还是在国家层面,都在不断完善和发展,并积累了丰富的资料。然而,受历史条件的限制和科技手段的影响,区域性长期、连续的大气污染历史资料仍十分缺乏。在我国珠江三角洲,以马尾松(*Pinus massoniana*)为对象来研究其对大气污染,特别是酸沉降胁迫的响应已有报道,如马尾松木质部金属元素含量与酸雨关系^[19],受害针叶生长素^[20]和光合色素含量的变化^[21],树皮 pH 值和电导率变化^[22],针叶营养元素流失与重金属累积^[23],木质部重金属含量的年代变化^[24]等,但大气污染下马尾松木质部污染指示元素 S 含量年代变化趋势仍未见报道。本研究采用年轮化学分析手段,通过分析马尾松木质部中大气污染指示元素 S 含量年代变化规律,对珠江三角洲酸沉降地区(肇庆和南海)过去近 50 年大气质量的变化历史进行研究,以期获得该地区 50~60 年左右大气环境变化的信息,该时段正好经历了我国改革开放前后 30 年时间,研究结果具有很强的对比性,对追踪珠三角区域性大气环境污染变迁具有重要意义,并可为区域环境未来变化趋势的预测提供参考。

1 研究地概况与研究方法

肇庆市和佛山市是珠江三角洲酸沉降较为严重

的地区,供试马尾松分别采自肇庆鼎湖山自然保护区(112°34' E, 23°10' N)和佛山南海西樵山自然保护区(112°56' E, 23°55' N)海拔相近的针阔混交林。鼎湖山自然保护区位于珠江三角洲经济区西北边缘,在夏季东南风的推动下,大气污染物主要来自东南方向的珠江三角洲经济区。西樵山自然保护区位于佛山南海,其南侧分布了众多电镀、铝铜材、制革、瓷砖、印染、化工等重污染企业,大气污染严重,对当地植被已产生严重影响^[14]。

在普查基础上于 2002 年末分别从两样地随机选择 50 年左右树龄马尾松样木 10 株进行树木年轮年代学研究,样木为健康成熟、无明显伤害特征的优势木。为避免人为干扰,两地样木均在距林缘 1 000 m 以外的山脊迎风面采集,采集方位和海拔高度尽量一致,样木相互间隔至少 50 m。

样木选定后整株伐倒,截取树木基部圆盘,圆盘厚度约 30 cm,于圆盘非工作面标明采集地点、采集时间、树木生长状况、生长环境、圆盘号等,运回实验室,风干,打磨,抛光。用加拿大产 Windrendro 6.1 年轮扫描系统定年,并测定逐年年轮宽度,测量精度为 0.01 mm。

两地年轮宽度测量完成后,分别进行指数生长拟合,然后从中选取相关系数较高的 3 株样木基部圆盘用于化学分析。鼎湖山样木为 3 号($R^2 = 0.7207$)、7 号($R^2 = 0.7510$)和 11 号($R^2 = 0.7712$),西樵山样木为 2 号($R^2 = 0.7308$)、3 号($R^2 = 0.8758$)和 5 号($R^2 = 0.8701$)。在定年后的各基部圆盘面上用不锈钢电动微雕刀分别以 5 年为 1 个样本,小心将不同年份形成的木质部剔取下来。剔取时微雕刀用 10% HNO_3 洗涤后用双氧水清洗。木质部样品剔取后在 70 °C 烘干 48 h 到恒重。准确称取约 0.08 g 植物样品,包于剪折好的滤纸中,采用余叔文方法^[25]测定各样本木质部 S 含量。每个样本 3 个重复,取平均值为该时期木质部 S 含量。测定过程中用地矿部物化探研究所提供的国家一级标准物质杨树叶(CBV07604- GSV-3)进行实验质量控制。

2 结果与讨论

表 1 列出了两地马尾松不同时期木质部 S 平均浓度和标准差,比较发现两地马尾松木质部 S 平均浓度随时间推移均呈现明显上升趋势。西樵山 3 株样木质部中 S 含量的最低时段分别为:2 号树为 1966—1970 年,浓度为 268.81 mg/kg;3 号树为 1966—1970 年,浓度为 161.42 mg/kg;5 号树为 1955—1960 年,浓度为 190.61 mg/kg。S 浓度最高出现的时段分别为:2

号树 1991—1995 年,浓度达到 1 521.29 mg/kg,比 1966—1970 年期间木质部 S 浓度高出近 6 倍;3 号树 1991—1995 年,达到 824.35 mg/kg,超出其最低 S 浓度 5 倍;5 号树为 1996—2000 年,浓度为 954.45 mg/kg,高出最低期 4 倍多。比较不同时期马尾松木质部 S 含量随时间的变化规律,发现 1976—1980 年是木质部 S 含量出现显著升高的时段,该时段前形成的木质部 S 含量处于 200~600 mg/kg 之间,该时段后的木质部 S 含量上升到 600~1 500 mg/kg 范围。在 1975 年以后形成的木质部中,S 含量出现持续上升特征,呈现明显的跃迁态势(图 1)。

与西樵山相比,鼎湖山马尾松不同时期形成的

木质部 S 含量呈现出明显的累积波动性。3 号树木质部中 S 含量最低的时段是 1971—1975 年,浓度为 98.30 mg/kg,最高时段是 1996—2000 年,浓度 447.32 mg/kg,最高值是最低值的 5 倍;7 号树中木质部 S 含量最低的时段出现为 1956—1960 年,浓度为 121.74 mg/kg,最高含量同样出现在 1996—2000 年(688.30 mg/kg),是最低值的 5 倍多;11 号树 S 最低含量出现在 1951—1956 年时段,最高含量出现在最后的 5 个年轮中。3 株样树木质部 S 含量随时间变化的规律与西樵山马尾松类似,越晚形成的木质部 S 含量越高(图 1)。

表 1 鼎湖山和西樵山马尾松木质部 S 含量年代变化

mg kg⁻¹

TABLE 1 Content of S in the tree rings formed at different periods of *P. massoniana* from Dinghushan and Xiqiaoshan Mountains

年份	样树编号					
	D-3	D-7	D-11	X-2	X-3	X-5
1941—1945			294.87 (16.24)			
1946—1950			345.87 (88.28)			
1951—1955	256.17 (14.97)		244.78 (62.20)			
1956—1960	179.24 (16.06)	121.74 (20.54)	314.41 (23.31)	303.78 (74.91)	259.51 (42.87)	190.61 (28.18)
1961—1965	225.04 (75.73)	239.14 (39.77)	299.50 (68.55)	490.53 (60.44)	275.89 (45.83)	212.16 (37.30)
1966—1970	151.89 (5.31)	169.85 (36.45)	393.61 (14.50)	268.81 (18.24)	161.42 (43.18)	310.24 (17.57)
1971—1975	98.30 (3.13)	266.26 (106.23)	595.82 (69.57)	615.55 (95.41)	283.79 (106.98)	411.43 (43.21)
1976—1980	163.33 (15.71)	234.13 (12.96)	612.16 (42.96)	627.45 (28.54)	362.97 (47.06)	422.60 (64.09)
1981—1985	213.30 (22.38)	634.17 (46.52)	624.32 (51.66)	1 230.94 (379.79)	813.71 (23.25)	964.47 (8.19)
1986—1990	252.17 (40.66)	618.60 (52.19)	666.10 (9.30)	1 243.88 (274.30)	813.72 (78.41)	924.11 (19.34)
1991—1995	344.47 (37.14)	636.06 (217.93)	636.77 (94.50)	1 521.28 (82.37)	824.35 (36.75)	920.30 (47.62)
1996—2002	447.32 (24.93)	688.30 (216.64)	610.81 (39.91)	1 519.65 (273.79)	795.27 (53.79)	954.45 (27.74)

注:括号内数字为标准差。

尽管鼎湖山和西樵山马尾松木质部中 S 含量随时间推移呈现上升趋势,但两地木质部 S 含量上升的时段存在非同步性。西樵山马尾松木质部 S 含量出现较大幅度跃迁的时段是在 1980 年以后,达到 1 000 mg/kg 的水平后保持着较小的波动;鼎湖山马尾松木质部 S 含量在 1980 年以前一直处于平稳水平,虽然 1980 年以后的木质部中 S 含量也开始持续上升,但上升幅度小于西樵山同期木质部中 S 含量上升幅度,在之后 15 年的时期内基本保持在相近水平。两地 1980 年前相同时段形成的木质部中 S 平

均含量均处于 550~600 mg/kg 水平,二者差异不大;1980 年以后,两地马尾松在相同时期形成的木质部中 S 含量开始出现差异,在相差最大的时段,西樵山木质部 S 含量几乎是鼎湖山木质部 S 含量的 2 倍。

为更直观地表现 S 浓度在年轮中随时间推移的变化趋势,对各个时间序列木质部 S 浓度进行标准化。标准化方法可以为不同树龄的树木建立年轮元素含量年表,使不同来源的有序数据综合成均一的时间序列,避免幼树因元素含量平均值不同而被忽略,对每棵树的作用进行同等衡量,使不同年轮都能

反映相同的环境信息。标准化方法既保留了各时间序列元素实际的浓度变化,又剔除了因为生物生长过程中其他非环境因素引起的元素浓度变化趋势。因此,标准化后的年表既不会夸大测定结果中元素最高浓度对结果的影响,也不会减少元素最低浓度对研究结果的评判。元素浓度标准化的方法和年表的计算按照喻斌等^[26]提供的方法进行:

$$C_i = (C_i - C) / S_x \quad (1)$$

式中, C_i 为第 i 年年轮元素标准浓度, C_i 为第 i 年年轮元素浓度, C 为平均值, S_x 为标准差。元素浓度指数按 $I_i = (C_i - C_{\min}) / (C_{\max} - C_{\min})$ 计算, C_{\max} 、 C_{\min} 分别为年轮序列中元素浓度的最大值和最小值。基于两地所测到 S 含量在时间序列上的浓度值,按照上述方法标准化后得到了两地样树 S 浓度年表,如图 1。最后按照式 (2) 计算每个地方马尾松木质部 S 含量最终年表:

$$I = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n I_n + M \quad (2)$$

式中, I 为最终年表, I_n 为单株样树年表, n 为样本树, M 为各树生长轮元素浓度指数最小值的平均值。鼎湖山和西樵山马尾松木质部 S 含量的最终年表见图 2。

最终年表更直观地反映了两地木质部 S 含量随时间推移的变化规律(图 2)。比如鼎湖山马尾松木质部 S 含量出现根本变化的时段是 1966—1970 年,该时段以前的 S 指数序列仅有微小波动,上升趋势不明显,到 1976—1980 年时段, S 指数迅速上升,并持续到 1996—2002 年时段;西樵山马尾松 S 浓度指数序列从 1966—1970 年时段开始上升,之后上升速度剧增。比较两地 S 最终年表,1975 年以前 S 浓度指数是鼎湖山大于西樵山,表明该时期西樵山周围环境中可被植物利用的 S 要小于鼎湖山,间接反映了西樵山环境质量好于鼎湖山;经历 1976—1980 年时段后,西樵山马尾松 S 指数大于鼎湖山马尾松 S 浓度指数,中间没有过渡阶段,揭示西樵山周围环境质量出现了急剧变化,且这种变化态势一直持续上升。由于元素浓度指数剔除了树木生物学特性的影响,因此,推断造成马尾松木质部 S 浓度指数持续上升的原因是外在环境植物可利用 S 的增加引起的。年轮 S 浓度指数比单纯的浓度序列能更有效地反映树木对环境变化的响应。

S 主要是通过干湿沉降途径进入生态系统。 SO_2 被排放到大气环境后, S 通过水汽凝结体以气态 (SO_2)、固态 ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 或 CaSO_4) 返回到森林生态系统中^[27]。S 的干沉降(主要是 SO_2) 是酸沉降的主要组成部分^[28],也是大多数生态系统中 S 沉降的主

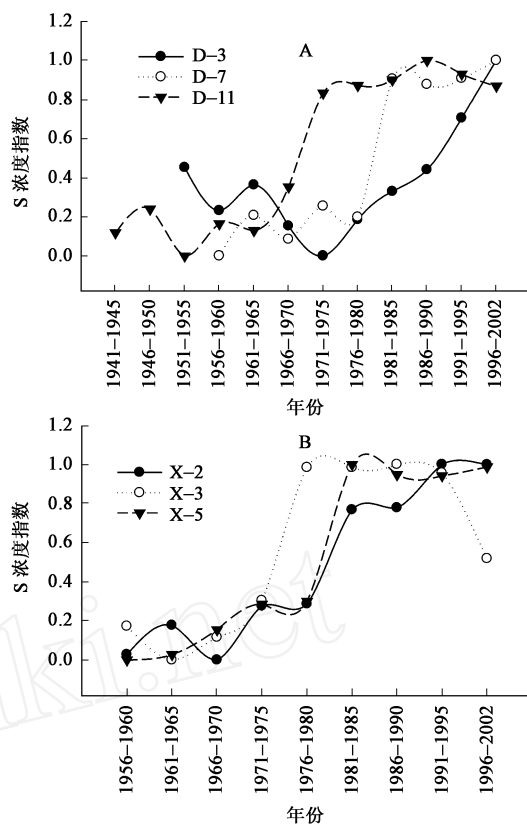


图1 鼎湖山马尾松 1941—2002 年(A)和西樵山 1956—2002 年(B)年轮 S 年表指数

FIGURE 1 Chrono-sequences index of S in the rings formed during 1941—2000 of *P. massoniana* from Dinghushan Mountain (A) and formed during 1956—2002 from Xiqiaoshan Mountain (B)

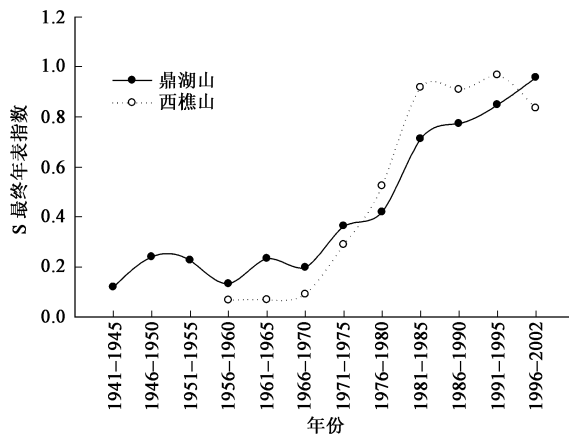


图2 鼎湖山和西樵山相同时期年轮中 S 年表指数比较

FIGURE 2 Comparisons of the chrono-sequences index of S in the same period from Dinghushan and Xiqiaoshan Mountains

要途径^[29]。S 虽然是植物生长的必需元素,但维持植物正常需要的 S 主要是以 SO_4^{2-} 的形式从土壤中吸收。植物体内 S 含量主要受大气 SO_2 浓度的影响,与大气中 SO_2 和 TSP 浓度有关^[30],受土壤 S 含量的影响较小^[31]。这种特点正是植物生物监测大气 S 污染的主要机理之一,植物 S 含量已被用于指示环境大气污染^[4,6,30]。

广东省是国家环保局 1998 年列出的全国首批酸雨控制区和 SO₂ 污染控制区范围之一。改革开放以后,广东经济持续高速发展,工业总产值不断攀升,经济总量一直处于全国前茅。从广东能耗来看,广东省的能源主要是燃煤。改革开放后工业耗煤增长较快,全省煤炭、燃料油消耗量年际情况见图 3^[32]。从 1980 年到 1997 年,广东省工业耗煤由 1 020.53 万 t 增加到 3 645.98 万 t,年增长率达 7.8%;燃料油(重油)消耗从 1980 年的 187.54 万 t 增加到 1997 年的 622.98 万 t,年增长率 7.3%。火力发电是广东 SO₂ 最大的排放源,占到总排放的 59.19%^[33]。另外,汽车尾气也是珠三角大气污染的重要污染源之一,无 Pb 汽油的使用在 20 世纪 80 年代初还不普遍,柴油含 S 量偏高,这也是造成广东省大气 SO₂ 逐年增高的原因之一^[34]。

佛山是广东省 17 个酸雨控制区之一,其大气污染属于煤烟-汽车尾气型,主要污染物为 SO₂ 和降尘,其次是 NO_x。调查表明,市区工业和商业用燃料主要是石油类燃料(包括重油和柴油)和燃煤,由于市区工业用燃煤锅炉只安装了消烟除尘装置而没有实施脱硫措施,燃料燃烧过程中产生大量 SO₂。据统计,仅佛山市区“八五”期间排入大气中的 SO₂ 总量达 5.97 万 t,南海“八五”期间 SO₂ 排放总量达 12.93 万 t^[35]。相对而言,鼎湖山所在的肇庆市无论是经济增长速度还是工业规模都不及佛山市(表 2),从 1998—2000 期间,西樵山所在的佛山 SO₂ 的排放量分别为 9.78、10.08 和 10.49 万 t,而鼎湖山所在的肇庆同期 SO₂ 排放量分别为 3.92、3.32 和 3.19 万 t^[34]。但由于鼎湖山处在佛山工业区东南风下风向,受其影响环境质量近年来有下降趋势,体现在年轮中 S 的上升,但上升幅度不及西樵山。

表 2 1995 年佛山和肇庆市工业燃料消耗、污染物排放对比
TABLE 2 Comparisons of the amount of industrial fuel consumption and of atmospheric emission between Foshan and Zhaoqing cities in 1995

	煤耗量/万 t	油耗量/万 t	主要污染物排放量/万 t		
			SO ₂	NO _x	烟尘
佛山市	316.40	232.84	10.28	5.04	3.77
肇庆市	97.37	7.77	1.31	0.97	2.12

分析珠三角改革开放以来煤炭消耗量变化曲线,对比年轮中 S 含量变化与燃煤历史增长趋势,可以推断煤消耗是造成马尾松木质部 S 元素浓度指数上升的重要原因。两地马尾松木质部 S 含量随着时间推移呈现的上升趋势与珠三角城市化进程是一致的^[32](图 3)。

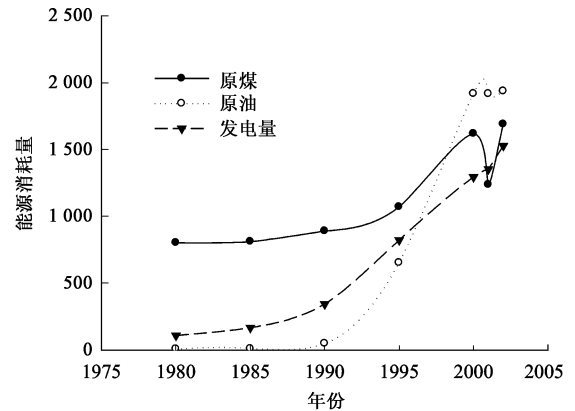


图 3 广东省 1980—2002 年能源消耗量
FIGURE 3 Amount of energy consumption in Guangdong Province during 1980—2002
注:煤油万 t,发电量亿 kWh。

将我们所获得的结果和其他地区的相似研究结果比较,发现两地马尾松木质部中 S 含量均远远高于国内承德避暑山庄油松 (*P. tabulaeformis*) 木质部中 S 含量 (44.4 ~ 420.7 mg/kg)^[41]、北京香山油松木质部中 S 含量 (24.53 ~ 1 685 mg/kg)^[61] 和安徽黄山松 (*P. taiwanensis*) 年轮中 S 含量 (0.43 ~ 13.5 mg/kg)^[36],也高于美国火炬松 (*P. taeda*) 木质部中 S 的含量 (92.5 ~ 270.0 mg/kg)^[27],显示了该地区大气污染程度要高于其他地区。

3 结 论

从两地马尾松木质部中 S 浓度指数序列曲线来推断,两地环境出现质量变化的“分水岭”时期是 1976—1980 年。排除特殊阶段及局地影响因素,根据马尾松木质部中 S 含量的变化规律,结合珠三角地区改革开放以来的社会经济分析,可以大致恢复研究地大气污染历史:1941—1970 年为污染程度较轻,大气相对清洁时期;1971—1985 年为大气污染开始出现并持续增强时期;1986—2002 年为大气污染不断恶化,达到最严重的时期。马尾松年轮中 S 浓度年表变化趋势与珠三角地区过去 20 余年原油和原煤年消耗量上升是相吻合的。研究结果证实,珠江三角洲马尾松树木年轮中 S 含量随时间推移的变化可以指示马尾松生长环境中 S 浓度的变化,马尾松年轮 S 化学分析是一条具适用前景、适合监测区域性环境 S 长期历史变化的有效生物途径。

参 考 文 献

- [1] LEPP N W. The potential of tree-ring analysis for monitoring heavy metal pollution patterns[J]. *Environmental Pollution*, 1975, 9: 49-61.
- [2] EKLUND M. Cadmium and lead deposition around a Swedish battery plant as recorded in oak tree rings[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24(1): 126-131.

- [3] WATMOUGH S A, HUTCHINSON T C, SAGER E P S. Changes in tree ring chemistry in sugar maple (*Acer saccharum*) along an urban-rural gradient in southern Ontario [J]. *Environmental Pollution*, 1998, 101: 381-390.
- [4] 蒋高明. 运用油松年轮揭示承德市硫及重金属污染的历史[J]. *植物生态学报*, 1994, 18(4): 314-321.
JIANG G M. The application of *Pinus tabulaeformis* tree rings in revealing the pollution history of Chengde City [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1994, 18(4): 314-321.
- [5] 钱君龙, 柯晓康, 王明珠, 等. 树木年轮元素含量与环境演变[J]. *南京林业大学学报*, 1998, 22(1): 22-26.
QIAN J L, KE X K, WANG M Z, et al. The chemical element contents in tree rings and the dynamic changes of the surroundings [J]. *Journal of Nanjing Forestry University*, 1998, 22(1): 22-26.
- [6] 聂丽瑞, 罗海江, 赵承义, 等. 北京市大气污染动态变化的树木年轮分析[J]. *中国环境监测*, 2001, 17(4): 20-24.
NIE R L, LUO H J, ZHAO C Y, et al. Tree ring analysis of the dynamic variation of air pollution in Beijing [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2001, 17(4): 20-24.
- [7] EDMANDS J D, DANIEL J, BRABANDER D, et al. Uptake and mobility of uranium in black oaks: Implications for biomonitoring depleted uranium-contaminated groundwater [J]. *Chemosphere*, 2001, 44: 789-795.
- [8] WATMOUGH S A, HUTCHINSON T C. Historical changes in lead concentrations in tree-rings of sycamore, oak and Scots pine in north-west England [J]. *The Science of the Total Environment*, 2002, 293: 85-96.
- [9] BINLDER R, RENBERG I, KLAMINDER J, et al. Tree rings as Pb pollution archives? A comparison of $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ isotope ratios in pine and other environmental media [J]. *The Science of the Total Environment*, 2003, 319: 173-183.
- [10] 温达志, 旷远文, 周国逸, 等. 树木年轮分析在环境监测中的应用进展[J]. *广西科学*, 2004, 11(2): 134-142.
WEN D Z, KUANG Y W, ZHOU G Y, et al. Progress on the applications of dendroanalysis in environmental monitoring [J]. *Guangxi Sciences*, 2004, 11(2): 134-142.
- [11] WATMOUGH S A. An evaluation of the use of dendrochemical analyses in environmental monitoring [J]. *Environmental Review*, 1997, 5: 181-201.
- [12] 张远东. 珠江三角洲地区酸雨污染简析[J]. *环境科学研究*, 1999, 12(3): 31-34.
ZHANG Y D. Simple analysis of acid rain pollution in the Pearl River Delta Region [J]. *Research of Environmental Sciences*, 1999, 12(3): 31-34.
- [13] 杨士弘. 珠江三角洲城市化对生态环境的影响及持续发展对策[J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 1999(3): 74-81.
YANG S H. Influence of urbanization on ecological environment of the Pearl River Delta and countermeasures for the sustainable development [J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science)*, 1999(3): 74-81.
- [14] WEN D Z, KUANG Y W, ZHANG D Q, et al. Evidences and implications of vegetation damage from ceramic industrial emission on a rural site in the Pearl River Delta of China [J]. *Journal of Forest Research*, 2006, 17(1): 7-12.
- [15] 颜文, 池继松, 古森昌, 等. 珠江三角洲工业区土壤(沉积物)重金属污染特征及防治对策——以石龙和荣桂工业区为例[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(3): 177-182.
YAN W, CHI J S, GU S C, et al. Characteristics and prevention countermeasures of heavy metal pollution of soils (sediments) in industrial areas of the Pearl River Delta—two case studies of Shilong and Ronggui industrial areas [J]. *Soils and Environments*, 2000, 9(3): 177-182.
- [16] WONG S C, LI X D, ZHANG G, et al. Heavy metals in agricultural soils of the Pearl River Delta, south China [J]. *Environmental Pollution*, 2002, 119: 33-34.
- [17] MAI B X, QI S H, ZENG E Y, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in the coastal region of Macao, China: Assessment of input sources and transport pathways using compositional analysis [J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, 37: 4 855-4 863.
- [18] ZHU B Q, CHEN Y W, PENG J H. Pb isotopic geochemistry of urban environment in Pearl River Delta [J]. *Applied Geochemistry*, 2001, 16(4): 409-417.
- [19] 侯爱敏, 彭少麟, 周国逸. 鼎湖山地区马尾松年轮元素含量与酸雨的关系[J]. *生态学报*, 2002, 22(9): 1 553-1 558.
HOU A M, PENG S L, ZHOU G Y. Tree-ring chemical changes and possible impacts of acid precipitation in Dinghushan, South China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9): 1 553-1 558.
- [20] 任琴, 杨莉, 胡永建, 等. 受害马尾松针叶内脱落酸含量的变化[J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(5): 99-101.
REN Q, YANG L, HU Y J, et al. Change of ABA content inside the damaged *Pinus massoniana* needles [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(5): 99-101.
- [21] 余春珠, 温达志, 彭长连. 三种木本植物对酸雨的敏感性和抗性[J]. *生态环境*, 2005, 14(1): 86-90.
YU C Z, WEN D Z, PENG C L. Sensitivity and resistance of three woody species to acid rain pollution [J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(1): 86-90.
- [22] KUANG Y W, ZHOU G Y, WEN D Z, et al. Acidity and conductivity of *Pinus massoniana* bark as indicators to atmospheric acid deposition in Guangdong, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(5): 916-920.
- [23] KUANG Y W, WEN D Z, ZHOU G Y, et al. Distribution of elements in needles of *Pinus massoniana* (Lamb.) was uneven and affected by needle age [J]. *Environmental Pollution*, 2007, 145: 146-153.
- [24] 旷远文, 周国逸, 温达志, 等. 珠江三角洲马尾松年轮重金属含量年代变化[J]. *热带亚热带植物学报*, 2007, 15(5): 383-389.
KUANG Y W, ZHOU G Y, WEN D Z, et al. Historical changes in heavy metals in tree-rings of Masson pine (*Pinus massoniana*) in the Pearl River Delta, south China [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2007, 15(5): 383-389.
- [25] 余叔文. 大气污染生物监测方法[M]. 广州: 中山大学出版社, 1993: 12-17.
YU S W. *The bio-monitoring methods of air pollution* [M]. Guangzhou: Sun Yat-SEN University Press, 1993: 12-17.
- [26] 喻斌, 黄会一. 城市环境中树木年轮的变异及其与工业发展的关系[J]. *生态学报*, 1994, 5(11): 72-77.

- YU B, HUANG H Y. Variation of tree-ring in urban environment and its relation to industrial development[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1994, 5(11): 72-77.
- [27] CAPPELLATO R, PETERS N E, MEYERS T P. Above-ground sulfur cycling in adjacent coniferous and deciduous forests and watershed sulfur retention in the Georgia Piedmont, USA[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1998, 103: 151-171.
- [28] FREEDMAN B. *Environmental ecology: The ecological effects of pollution, disturbance, and other stresses*[M]. New York: Academic Press, 1995.
- [29] JOHNSON D W, LINDBERG S E. *Atmospheric deposition and forest nutrient cycling*[M]. New York: Springer-Verlag, 1992.
- [30] 蒋高明. 承德市油松针叶硫及重金属含量动态及其与大气 SO₂ 之间的关系[J]. *生态学报*, 1995, 15(4): 407-412.
- JIANG GM. The dynamics of sulphur and heavy metal content in the needles of *Pinus tabulaeformis* Carr. and the relation between needles sulphur and air SO₂[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15(4): 407-412.
- [31] 陈春焕, 颜丽英. 运用植物含硫量预测广州市大气中的 SO₂ 浓度[J]. *环境污染与防治*, 1982, 9: 10-14.
- CHEN C H, YAN L Y. Monitoring of the SO₂ concentration in the Guangzhou atmosphere by the sulphur content of plants [J]. *Environmental Pollution and Control*, 1987, 9: 10-14.
- [32] 广东省统计局. 广东省统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1995-2001.
- Bureau of Statistics of Guangdong Province. *Guangdong statistical yearbook*[M]. Beijing: China Statistics Press, 1995-2001.
- [33] 谢文彰, 杜国瑶, 钟昌琴. 珠江三角洲火电群 SO₂ 污染及防治对策研究[J]. *上海环境科学*, 1998, 17(4): 25-29.
- XIE W Z, DU G Y, ZHONG C Q. Study on SO₂ pollution of group of power plants and treatment, countermeasures in the Pearl Delta [J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 1998, 17(4): 25-29.
- [34] 黄铭洪. 环境污染与生态恢复[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 25-43.
- HUANG M H. *Environmental pollution and ecological restoration* [M]. Beijing: Science Press, 2003: 25-43.
- [35] 关共凑. 佛山市区酸雨现状及防治对策[J]. 佛山科学技术学院院报(自然科学版), 2001, 19(1): 45-48.
- GUAN G C. The present situation of acid precipitation in Foshan City and its prevention[J]. *Journal of Foshan University (Natural Science)*, 2001, 19(1): 45-48.
- [36] 吴泽民, 高健, 黄成林, 等. 黄山松年轮硫及重金属元素含量动态特征[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(5): 820-824.
- WU Z M, GAO J, HUANG C L, et al. Dynamic characters of sulphur and heavy metals concentrations in *Pinus taiwanensis* growth rings [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(5): 820-824.

(责任编辑 赵 勃)

本刊 2008 年第 3 期要目预告

- 林勇明等: 泥石流频发区人工恢复新银合欢林种内竞争研究
- 郑永宏等: 不同生境祁连圆柏径向生长对气候变化的响应
- 阎雄飞等: 光肩星天牛成虫对原寄主枝条挥发物趋向的测定
- 张海涵等: 黄土高原 5 种造林树种菌根根际土壤微生物群落多样性研究
- 李效文等: 北京山区侧柏游憩林抚育技术模式研究
- 叶绍明等: 尾叶桉与马占相思人工复层林生物量及生产力研究
- 刘世海等: 密云水库流域油松水源保护林主要养分元素生物循环研究
- 张晓娟等: 晋西黄土区天然次生林营养元素分配与积累研究
- 周金星等: 青藏铁路唐古拉山南段沿线植被多样性及盖度特征分析
- 周宇飞等: 基于 Web Service 的 PDA 林火监测应用技术研究