

# 汞的树木年轮化学研究进展

张 鹏<sup>1,2</sup> 张 华<sup>2</sup> 冯新斌<sup>2,\*</sup> 闫海鱼<sup>2</sup>

(1. 贵州师范大学化学与材料科学学院, 贵阳 550002;

2. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081)

**摘要:** 由于可以有效揭示重金属污染的时间变化序列, 近年来, 树木年轮被广泛应用于环境重金属污染的历史追溯。年轮化学技术也被应用于示踪某地区的汞污染历史, 本文系统介绍了利用树木年轮化学对汞污染积累历史进行追溯研究的相关研究成果, 包括样品采集与处理、含量测定及数据分析, 并对木质汞来源进行了讨论, 最后对汞年轮化学研究的未来发展进行了展望。

**关键词:** 汞; 年轮化学; 历史演变; 木质汞来源

**中图分类号:** P595; X142 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9250(2016)01-0124-06 **doi:** 10.14050/j.cnki.1672-9250.2016.01.017

树木年轮化学是利用树轮中的化学元素含量重建环境污染历史以及元素在环境中转移特征的一门新兴学科<sup>[1]</sup>。Lepp<sup>[2]</sup>于40 a前首次将树木年轮成功应用于环境中痕量金属元素浓度的长期变化检测。年轮化学就是以树木生理学为基础, 以年轮生长特性为依据, 从历年年轮木质化学组成变化特征获取环境历史变迁的资料, 最终重现环境变迁历史。到目前为止, 年轮化学研究已涉及到非常多的重金属污染物(Pb、As、Mn、Cd等)和树木生长所需的矿质元素(K、Ca、Mg、S、P等)。汞是一种全球性污染物, 大气中的汞95%以上以气态单质汞(Hg<sup>0</sup>)的形态存在, 可以随大气环流进行长距离迁移, 传输到世界各地, 并在适宜的天气条件下沉降陆地生态系统中, 且被植被所吸收和储存。因此, 植物的生长记录了大气汞污染的历史变迁。生长于汞污染地区的树木, 可以通过树叶表面吸收大气干沉降时的水溶性/颗粒态汞, 通过树木气孔直接吸收Hg<sup>0</sup>, 以及通过根部吸收土壤中的可溶态汞<sup>[3]</sup>, 并最终有少部分汞积累在年轮木质部, 为汞的年轮化学研究提供了必要条件。将年轮化学应用到汞污染研究, 对于重建当地的汞污染历史以及完善汞的全生态系统研究有着重要的意义。本文

将对汞年轮化学研究领域的研究进展进行系统综述, 并提出研究展望。

## 1 汞的年轮化学研究方法

### 1.1 树木种类的选择

树木被应用于年轮化学研究主要基于其对环境变化的长期记录这一前提。因此, 用于树木年轮化学分析的理想树木应该具有寿命长、地理学分布广泛、对环境变化较为敏感、年轮生长稳定等特点<sup>[4]</sup>。

首先, 排除自然灾害及人为因素影响, 很多树木(包括一些矮小灌木)能够生长上百年甚至上千年之久<sup>[5]</sup>, 从而满足了年轮化学研究对环境变化长期记录的要求。如美国西南部的狐尾松(4 000 a)<sup>[6-7]</sup>、东部红杉(500 a)<sup>[8]</sup>以及北部的白衫木(1 000 a)<sup>[9]</sup>。此外, 生长于我国西南地区(四川、贵州、广西)的马尾松和南方地区的香樟树, 树龄也可达数百上千年<sup>[10]</sup>。其次, 地理学分布广泛的树种(如美国的星毛衫和中国的马尾松等), 由于具有较理想的生长环境差异性(如气候梯度及地球化学特点等), 从而提供了一个很有价值的、非常有利于科学研究的对比参照数据库。此外, 对环境变化

收稿日期: 2015-03-31; 改回日期: 2015-07-06

基金项目: 中国科学院青年创新促进会基金; 环境地球化学国家重点实验室开放课题(SKLEG2015903)。

第一作者简介: 张鹏(1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事汞的年轮化学方面的研究。E-mail: pengzhang1988@yeah.net。

\* 通讯作者: 冯新斌(1968-), 研究员, 从事环境地球化学研究。E-mail: fengxinbin@vip.skleg.cn。

敏感的树种,可以较为清晰的反映其生长环境的变化,有利于树木年轮化学研究;而树木具有清晰可辨的年轮,则有助于定年过程,提高年代分辨率。就树木本身生理特点而言,常青针叶类树木会比落叶类树木在指示大气化学变化中更加敏感,这得益于它们具有更大的表体积比,且叶子与大气的接触时间更长<sup>[4]</sup>。

当然,每种特定环境的树木都具有其独特的生理特点和研究价值。以上提到的几点参考标准都只是一种建议和讨论,而不应该是树种选择的约束。在进行具体科学研究的时候,研究者应该参照各自的实验目的和实验条件综合考虑。在过去的研究实践中,有不少的树种曾被选用于年轮化学实验,如油松<sup>[11]</sup>、马尾松<sup>[12]</sup>、雪松<sup>[13]</sup>、落叶松<sup>[14]</sup>、云杉<sup>[15]</sup>、法国梧桐<sup>[16]</sup>、黑松<sup>[17]</sup>、柏木<sup>[18]</sup>、黄松<sup>[19]</sup>、鹅掌楸<sup>[20]</sup>、白榆树<sup>[21]</sup>、栎树<sup>[22]</sup>、白桦<sup>[23]</sup>等。表 1 列举了汞的年轮化学研究中所涉及到的树木种类。

表 1 汞的年轮化学研究内容举例及其所研究树种

Table 1 Specials selected in mercury dendrochemistry studies

研究内容	采样区域	研究树种	文献
阔叶树木年轮汞分布及趋势	美国安大略湖金士顿区附近	槭类树木、法国栎树、杨树、高山柳	[24]
火山附近树木年轮汞踪迹	The Hoyo Negro Volcano 火山口附近	加纳利松	[25]
水生环境树木年轮汞记录	一家氯碱厂附近毗邻海岸的河口湾岛湖	黑杨	[26]
树木摄取的汞	美国某种植园	赤松	[27]
树木年轮汞浓度历史演变	加拿大东北部森林	黑云杉	[28]
树木年轮汞沉降变化记录	捷克某冶金采矿区	云杉、山毛榉	[29]
树木年轮与地衣汞浓度相关性	美国路易斯安那州	火炬松、赤松	[30]
红树林汞分布及树叶生长过程汞含量变化	中国南部海南岛沿岸	红树	[31]

## 1.2 样品的采集

截取树盘和钻取样芯是国内外对树木年轮化学研究进行样本采集的两种方法。截取树盘是指在条件允许情况下将整株树木伐倒,截取适当宽度的树干横剖圆柱体(即树盘),该方法的特点是样品量足,年轮图案完整,易于掌握年轮生长的总体状况,因此在条件允许的情况下,该采集方法应为首推方法。钻取样芯是指用树木生长锥从垂直树干

(距地面约 1.5 m) 方向钻入,获取一个直径约 5 mm 的样芯<sup>[24]</sup>,有的样芯采集直径可以达到 8 ~ 12 mm<sup>[1]</sup>,其特点是包含每一年年轮的部分木质,是在保全树木健康生长条件下最合适的样品采集方法,是目前国际通用的取样手段。

## 1.3 树木年轮的定年

在对年代分辨率要求不高的情况下,最简单的定年方法是在双目镜下按从表皮到内部(或反之)依次计数定年<sup>[26]</sup>。此外,也有部分研究根据年轮深度粗略判断年代远近。这些方法的主要缺陷是树木在生长过程中由于环境变化可能会出现伪轮以及年轮丢失现象<sup>[32]</sup>从而影响到定年精度。

因此,当对年代分辨率要求较高时,需要借助交叉定年技术。该技术已经应用到多个研究领域并发展为一门独立学科。其原理是对比一定区域内不同树木在相近生长时段内年轮宽度序列的变化特征,再根据取样时间,对已形成的每一个年轮进行精确断代。具体步骤包括砂纸打磨处理样芯、画骨架图(测定轮宽)、汇总及确定年代<sup>[33]</sup>。刘禹等于 2009 年在对西安东郊某废弃炼油厂的油松样品定年时,分别应用了 COFECHA 软件和 ARSTAN 软件进行了定年和年表制作,并通过数理计算、统计计算完成相关系数和自相关系数分析,最终完成定年<sup>[34]</sup>。

## 1.4 样品中汞的测定方法

对样品的前处理,一般是用不锈钢雕刀对其进行逐年剥取,获得包括每一个单位年限的木质。雕刀每次取完样用 10% HNO<sub>3</sub> 以及 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 逐一冲洗<sup>[35]</sup>。树盘取样要求雕刻深度一致<sup>[34]</sup>。对剥取的样品进行干燥可以通过 70 °C 下恒温干燥箱中烘干 72 h<sup>[34-35]</sup>,也可以自然风干数周<sup>[24]</sup>。

然后根据实验室所具备的测汞仪类型决定如何进一步处理样品。如该仪器允许固体进样,则需要将样品干燥,磨匀待测。如要求液体进样,则需要进一步对样品进行消解。常用的木质消解方法有微波消解<sup>[35]</sup>(准确称量约 0.5 g 样品,放入聚四氟乙烯离心管中,加入 10 mL HNO<sub>3</sub>,放入微波消解仪中消解,冷却,定容至 50 mL)、闷罐消解<sup>[36]</sup>(将 0.05 ~ 0.1 g 木质放入 10 mL 聚四氟乙烯坩埚中,加入 2 mL HNO<sub>3</sub>,静置过夜。加入 0.5 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,150 °C 密封溶样 8 h。冷却,打开坩埚盖,在电热板上加热至体积约 0.5 mL,冷却,定容至 10 mL。)和

强酸消解<sup>[24]</sup>(取一定量木质放入聚四氟乙烯瓶中,加入工超 HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 为 1:4 的溶液,在 250 °C 下加热 6 h,冷却定容),用到的标准物质有 NBS-1575 Pine Standard<sup>[24]</sup>、NIST-4515 Apple Standard<sup>[24]</sup>、BCR-062 Olive Leaves<sup>[25]</sup>、NIST-SRM1575a<sup>[26]</sup>(表 2)。

表 2 测汞仪类型及年轮木质的消解方法

Table 2 Types of mercury measurement instruments and digestion methods for wood

仪器名称	产地	检出限	进样要求
DMA80 测汞仪	意大利	0.000 5 ng	固气液
Lumex RA-915M	俄罗斯	0.5 ng	固气液
TK2500	美国	0.000 1 ng	液体
TK2600	美国	0.000 1 ng	液体
Brooks Modle3	美国	0.03 ng/L	液体

## 2 汞的树轮化学应用进展

目前国内学者对汞的年轮化学研究几乎还是空白,只是零散的提及或者附带研究。相比之下,国外学者开展了部分研究但为数不多。Siwik<sup>[24]</sup>曾对北美中东部地区的安大略湖周围的槭类、法国栎树、杨树、高山柳等树木的年轮汞含量进行测定后发现,已定年的年轮中总汞含量与其它已知的环境系统所监测的总汞含量未发现时间上的相关关系。众所周知,火山活动是一个很重要的汞排放自然源。Rodriguez Martin<sup>[25]</sup>等截取了一个在 Hoyo Negro 火山口附近经历过火山喷发(距今约 60 年)而存活的加纳利松的树盘,其目的在于确定火山喷发释放的汞是否可以在树木的树干中积累以及树木年轮是否可以示踪汞的历史积累。他们的研究结果显示,在受到火山岩浆灼伤的那部分年轮中的汞含量比火山喷发前后的年轮中汞含量超出 1 个数量级,因此他们认为,火山喷发的汞释放只是被保留在其喷发当时的年轮中,并不会在喷发完成后转移到树木随后生长的历年木质中,因此树木年轮化学无法应用于监测大气汞浓度。Zhang<sup>[28]</sup>等调查了加拿大北部森林中黑云杉年轮里汞浓度的历史演变后并未发现木质年生长量与相应汞浓度变化的之间的相关关系。他们指出,阳光和温度一样会影响树木对汞的摄取,并且树木年轮中的汞积累来自依附于树木表面的大气。Abreu<sup>[26]</sup>等研究了 Ria-deAveiro 湖沿岸的 3 棵黑杨。该湖长期承受附近一

家氯碱厂污水排入,而氯碱厂是已知的具有极大汞排放强度的人为源之一。他们的研究结果表明,年轮汞含量与工厂产量之间存在很强的相关性( $p < 0.001$ ),并且在新的防治技术应用之后,年轮汞浓度与产品、水体及大气中汞增减量一致。总体而言,年轮汞含量趋势不仅与该工厂历史记录的汞排放趋势相一致,而且与当地采集的河底沉积物柱中汞含量趋势相一致,由此证明黑杨树中的汞主要来源于根部水体和土壤而非大气。但 Hojdová<sup>[29]</sup>在研究了采矿冶金地区的树木年轮中汞沉降后指出,树木年轮可以很好地记录该地区的历史汞沉降。

从以上的研究内容来看,年轮化学能否反映汞的历史变化趋势是一个焦点,也是一个争论点。一些研究中树木年轮很好的记录了该地区汞污染的历史变化趋势,而另外一些则没有。从绝大多数的相关实验内容分析得出,造成该分歧的原因可能有如下三点:

首先,早期某些研究者对树木年轮木质中汞来源的认识不明确,造成汞的年轮化学所要反映其历史浓度的对象不确定,使其对“年轮化学重建汞地区污染历史是否具有可行性”的结论存有质疑。最近的研究表明,木质中的绝大多数汞很可能来自大气。如 Becnel<sup>[30]</sup>在 2004 年的研究发现,地衣中的汞与树木年轮中的汞之间存在非常好的相关性(相关系数达到了 0.882),这在很大程度上说明了地衣和树木二者在摄取汞方面可能存在较为相似的过程。由于特殊的生理结构,地衣中的汞被认为主要来源于大气,从而在很大程度上间接验证了树木年轮木质中汞的来源很可能来自大气。Siwik 等<sup>[24]</sup>在安大略湖污染点附近的研究结果表明,槭类和法国栎树等树木中的汞含量与当地土壤中的汞含量并不存在相关性,因此推断“落叶会不断将大气汞输送到土壤,但同时土壤中积累的汞并不会被树木所吸收”,即土壤不是木质汞的主要来源。Patra 等<sup>[37]</sup>在其研究中指出,由于植物根部会设立一个屏障来阻止对汞的摄取,因此土壤汞倾向于积累在植物根部,而通过土壤进入根部以上组织的量很少。Rea<sup>[3]</sup>等在研究两个混合硬木树林生态系统中叶子的全年汞积累情形时,也提到树根虽然可以积累大量的汞,但是只有极少部分能够传输到地上组织,其中大部分是土壤水分中的可溶态汞。Rodriguez Martin<sup>[25]</sup>指出,他未能发现加纳利松年轮中汞积累

量与火山活动的时间对应关系,然而他判断的前提却是汞可以通过土壤进入树木组织。可能他没有找到年轮汞与土壤的相关关系,便仓促下结论称年轮化学不能应用于重建汞的历史污染。此外,他还混淆了树木对汞的摄取方式。由于火山熔岩对部分木质的灼伤是树木本身的被动承受,是与汞源(岩浆中含有较大的汞)的直接强制的接触,在被损伤的同时,留有较多的汞残留,况且灼伤的组织其生理作用可能已经被破坏;而在火山之前和之后的年轮中汞积累是树木的生理摄取过程,并未与汞源直接接触,其量是来自大气的非常小的一部分。所以该研究者的研究结论注定是不严谨的。

其次,年轮汞反映污染源的汞年代变化趋势的效果优劣与二者之间存在的干扰因素有关。比如污染源是否单一、污染源的汞排放活动是否存在时间变化趋势、距离是否过远等从而导致干扰因素增多。Siwik<sup>[24]</sup>在研究落叶类树木年轮对安大略湖周围污染点的汞变化趋势监测时,所选污染点的第一个采样点存在两个污染源,一个是燃煤站,另一个是石油天然气发电厂,在污染源非单一的情况下,如何去判定年轮化学对于重建污染区汞的历史趋势的适用性?所以在通过年轮重建某个汞污染点的汞历史变化趋势的时候,一定要保证该污染源对该年轮木质的汞积累有决定性影响,最好是作为单一污染源存在;其次,采样点要尽可能的接近污染区,这样就减弱了一些干扰因素的作用,比如主导风和其它污染点的影响等。Hojdová<sup>[29]</sup>等在距离一个采矿区最远为2.5 km的地方采集的3棵云杉的年轮都能很好的反映19世纪末该地区的HgS开采活动趋势,虽然木质中的汞浓度最高时仅为15 ng/g。而在距离另一个铅矿冶炼区最远为0.5 km采集的云杉年轮也能很好的反映该地区自1950 s到1970 s中期的汞变化趋势,同样该木质中的汞浓度最多也只有8.4 ng/g。最后,当所要反映污染源的汞浓度非常高时,就会大大减弱其它因素对木质汞积累用于反映该污染源汞历史踪迹效果的影响,则木质汞反映该地区汞污染的历史趋势的效果就会较理想。Abreu<sup>[26]</sup>等研究了一家氯碱厂附

近的黑杨年轮中的汞浓度特点。值得一提的是该氯碱厂每年向环境中排放的汞质量最多时有20 t,木质中的汞含量较高(20~300 ng/g),结果这些黑杨年轮的汞浓度变化趋势很好地反映了该工厂的汞排放历史。总体而言,应该尽量避开干扰因素,确定汞污染源对树木年轮污染的直接作用关系,这样才能提高年轮汞化学研究对于重建当地污染历史的可行性。

最后,树木种类、年轮特点、生长习性、环境特点等都可能会影响到汞的年轮化学研究结果。很多松柏类树木会出现年轮丢失的现象<sup>[4]</sup>,并且有些柏树中会出现较多的伪轮,非常不容易分辨;一些阔叶类树木的年轮界限不是很清晰,仅能凭借一层浅色的细胞略微界定,有的甚至其细胞变化趋势都混乱难辨,这可能会对定年过程造成一定困难。其次,树木的“幼龄效应”<sup>[38]</sup>以及特别的生长习性都会或多或少的影响年轮对环境中汞积累的过程。再次,树木的生长环境也会影响到其年轮木质的生长活动,比如气温、光照、降水等<sup>[39]</sup>,而光照和降水同时也会影响到该环境中汞的迁移转化<sup>[40]</sup>。此外,值得一提的是,年轮中的很多元素都存在径向迁移现象,刘禹等人在西安郊区的油松年轮中也发现汞存在这一现象<sup>[34]</sup>。

### 3 展望

目前汞的年轮化学研究案例在国际上还为数不多,国内更是寥寥无几,但是该领域具有很好的研究前景。这首先得益于年轮作为时间标度的优越性,比如年代分辨率高、活动稳定、分布广泛及时间跨度大等<sup>[1,33,41]</sup>。其次,汞的年轮化学研究很好的填补了汞的全生态系统研究空白,加强了汞的研究数据的完整性和联系性。作为较新的领域,汞的树木年轮化学尚有大量的内容需要进一步研究,比如木质中汞的来源、迁移转化特点、树木年轮所响应的气候变化特点与其所重建的汞污染变化趋势的相关性、以及木质中的汞同位素在时间序列上的变化特点等等。

## 参 考 文 献

- [1] 袁晴雪,叶芝祥,尚华明,等. 树木年轮化学研究概况与进展[J]. 沙漠与绿洲气象,2009,3(5):1-6.
- [2] Lepp N W. The potential of tree-ring analysis for monitoring heavy metal pollution patterns [J]. Environmental Pollution,1974,9: 49-61.
- [3] Rea A W, Lindberg S E, Scherbatskoy T, et al. Mercury accumulation in foliage over time in two northern mixed-hardwood forests [J]. Water Air Soil Pollution,2002,133: 49-67.
- [4] Cutter B E, Guyette R P. Anatomical, chemical, and ecological factor affecting tree ring species choice in dendrochemistry studies [J]. Journal of Environmental Quality,1993,22: 611-619.
- [5] 伍学忠. 树木千年不死之谜[J]. 环境,2012,9: 70-71.
- [6] 李华文. 不老狐尾松[J]. 探索大自然,2006,6: 73-77.
- [7] Schulman E. Bristlecone pine, oldest living known thing [J]. National Geographic Magazine,1954,113: 354-372.
- [8] Guyette R, McGinnes E A Jr, Probasco G E, et al. A climate history of Boone County, Missouri, from tree-ring analysis of eastern redcedar [J]. Wood Fiber,1980,12: 17-28.
- [9] Kelley P E, Cook E R, Larson D W. Constrained growth, cambial mortality, and dendrochronology of ancient Thuja occidentalis on cliffs of the Niagara Escarpment: An eastern version of bristlecone pine [J]. International Journal Plant Sciences,1992,153: 117-127.
- [10] 杨应龙. 香樟树的特征特性及栽培技术[J]. 现代农业科技,2011,12: 213-214.
- [11] 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.
- [12] 董雅文,钱君龙,黄景苏,等. 南京栖霞山地区树木年轮元素的相关性及其组合类型[J]. 应用生态学报,1995,6(2): 133-137.
- [13] 钱君龙,柯晓康,尹卓思,等. 南京太平门地段雪松年轮及其根土在化学元素含量的相关性研究[J]. 地理科学,1998,18(4): 374-378.
- [14] 胡岫,王晓春,杨金艳. 伊春西林铅锌矿区兴安落叶松年轮中重金属元素含量的年变化[J]. 应用生态学报,2013,24(6): 1536-1544.
- [15] 杨银科,王文科,邓红章,等. 树木年轮中硫、铅元素含量与环境变化[J]. 科学技术与工程,2012,12(28): 7309-7313.
- [16] 栾以玲,阮宏华,姜志林. 南京市不同环境树木年轮重金属元素含量对比分析[J]. 安徽农业科学,2009,37(35): 17725-17729.
- [17] 董雅文,潘良宝,钱君龙,等. 南京栖霞山地区黑松、马尾松年轮 Pb、Zn 含量与降水量的谱分析[J]. 生态学杂志,1995,14(2): 13-17.
- [18] Marcantonio F, Flowers G, Thien L, et al. Lead isotope in tree rings: Chronology of pollution in Bayou Trepagnier, Louisiana [J]. Environmental Science and Technology,1998,32: 2371-2376.
- [19] Rolfe G L. Lead distribution in tree rings [J]. Forest Science,1974,20: 283-286.
- [20] McClenahan J R, Vimmerstedt J P, Scherzer A J. Elemental concentrations in trees rings by PIXE: Statistical variability, mobility, and effects of altered soil chemistry [J]. Canadian Journal of Forest Research,1989,19: 880-888.
- [21] 黄会一,蒋德明,林治庆. 树木年轮元素含量与环境污染关系的研究[J]. 中国环境科学,1993,13: 11-16.
- [22] Hupp C R, Woodside M D, Yanosky T M. Sediment and trace element trapping in a forested wetland [J]. Chickahominy River Virginia Wetlands,1993,13: 95-104.
- [23] 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.
- [24] Siwik E I H, Campbell L M, Mierle G. Distribution and trends of mercury in deciduous tree cores [J]. Environment Pollution,2010,158: 2067-2073.
- [25] Rodriguez Martin J A, Nanos N, Miranda J C, et al. Volcanic mercury in pinus canariensis [J]. Naturwissenschaften,2013,100: 739-747.
- [26] Abreu S N, Soares A M V M, Nogueira A J A, et al. Tree ring, populunigra, as mercury data logger in aquatic environments case study of an historically contaminated environment [J]. Bulletin Environmental Contamination Toxicology,2008,80: 294-299.
- [27] Fleck J A, Grigal D F, Nater E A. Mercury uptake by trees: An observational experiment [J]. Water, Air, and Soil Pollution,1999,115: 513-523.
- [28] Zhang L, Qian J L, Planas D. Mercury concentration in tree rings of black spruce ( piceamariana mill b. s. p. ) in boreal Quebec, Canada [J]. Water, Air and Soil Pollution,1995,81: 163-173.
- [29] Hojdová M, Navrátil T, Rohovec J, et al. Change in mercury deposition in a mining and smelting region as recorded in tree rings [J]. Water, Air, and Soil Pollution,2011,216: 73-82.
- [30] Becnel J, Falgeust C, Cavalier T, et al. Correlation of mercury concentrations in tree core and lichen samples in southeastern Louisiana [J]. Microchemical Journal,2004,78: 205-210.
- [31] Ding Z H, Wu H, Feng X B, et al. Distribution of Hg in mangrove trees and its implication for Hg enrichment in the mangrove ecosystem [J].

- Applied Geochemistry, 2011, 26: 205–212.
- [32] 方克艳, 陈秋艳, 刘昶智, 等. 树木年代学的研究进展[J]. 应用生态学报, 2014, 25(7): 1879–1888.
- [33] 马利民, 刘禹, 赵建夫. 交叉定年技术及其在高分辨率年代学中的应用[J]. 地学前缘, 2003, 10(2): 351–355.
- [34] 刘禹, 王伟平, 保庭毅, 等. 西安东郊某废弃钢铁厂油松年轮记录的重金属含量变化过程[J]. 生态毒理学报, 2009, 4(3): 382–391.
- [35] 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.
- [36] 许春雪. 树木年轮学在重建土壤重金属污染历史中的应用研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2005.
- [37] Patra M, Sharma A. Mercury toxicity in plants[J]. The Botanical Review, 2000, 66(3): 379–422.
- [38] 袁海龙. 园林树木幼龄效应实验研究[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(11): 2391–2393.
- [39] 姜倩倩, 田娜娜, 夏泰英, 等. 温度、降水与树木径向生长关系研究进展[J]. 山东农业大学学报, 2012, 43(3): 480–482.
- [40] 冯新斌, 仇广乐, 付学吾, 等. 环境汞污染[J]. 化学进展, 2009, 21(2/3): 436–457.
- [41] 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.

## Research Progress on Mercury Dendrochemistry

ZHANG Peng<sup>1,2</sup>, ZHANG Hua<sup>2</sup>, FENG Xinbin<sup>2</sup>, YAN Haiyu<sup>2</sup>

(1. School of Chemistry and Materials Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550002, China;

2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

**Abstract:** Recently, dendrochronology has been widely applied to historical retrospection of the time sequence of environmental heavy metal pollution. Dendrochemistry is also used for reflecting the history of mercury polluted area. In this paper, from the beginning of expounding the way mercury accumulation in trees, we systematically and comprehensively review related reports on the applications of tree rings in tracing accumulative history of environmental mercury pollution, including sample collection and processing, concentration determination and data analysis. We discussed the mercury sources of wood, and provided perspectives on the future's development directions of mercury dendrochemistry research.

**Key words:** Mercury; dendrochemistry; historical change; wood