

樟树林生态系统水文学过程中 多环芳烃的迁移与转化机理

闫文德, 田大伦*, 康文星, 项文化, 潘勇军

(中南林业科技大学生态研究室, 湖南长沙 410004)

摘要:依据 3a 定位研究数据, 采用气相色谱法对樟树林生态系统水文过程中 PAHs 的迁移转化机理进行了研究, 结果表明: 大气降水中携带的 PAHs 有 10 种, 总含量为 $288.662\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 林内穿透水中 PAHs 有 6 种, 总含量为 $101.901\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 树干茎流水中有 5 种, 总含量为 $82.069\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 灌木层和草本层穿透水中只有 4 种, 总含量分别为 $49.049\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $74.938\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。大气降水中的 PAHs 经过树冠、树干、灌木和草本层的吸收、淋溶和淋洗作用后, 有的种类表现为完全被吸收而消失, 有的种类浓度大幅度降低, 而有的种类则浓度增大。随地表径流迁移水中 PAHs 有 5 种, 总含量为 $36.866\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 与大气降水相比, PAHs 种类减少 50%, 浓度降低 87%。同时阐述了水文学过程中 PAHs 迁移转化机理和樟树林具有较高的净化效能。该项研究为城市森林的铲污机制提供了理论依据。

关键词: PAHs; 森林生态系统; 水文学过程; 迁移; 大气污染

文章编号: 1000-0933(2006)06-1882-07 **中图分类号:** Q948.1, S718.55 **文献标识码:** A

Transfer and transformation of PAHs in the hydrological process of camphor forest ecosystem

YAN Wen-De, TIAN Da-Lun*, KANG Wen-Xing, XIANG Wen-Hua, PAN Yong-Jun (Research Section of Ecology, Central-south Forestry University, Changsha 410004, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 1882 ~ 1888.

Abstract: The characterizations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) compositions in the hydrological processes were examined in Camphor forest ecosystems, Zhuzhou, China. The concentrations of PAHs in rainfall above forest canopy, throughfall, stemflow, and surface runoff components were measured by gas chromatography (GC-HP6890). A total of 10 PAHs were detected in rainfall above canopy, and the number of the detected PAHs was 6 and 5 in throughfall and stemflow, respectively. The concentrations of total PAHs in rainfall above canopy was $288.662\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, which was approximately 2.8 and 3.5 times as high as that in throughfall ($101.901\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) and stemflow ($82.069\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), respectively. The amount and concentration of total PAHs were further decreased in water samples taken beneath the shrub and herb stratum. Compared to the rainfall, PAHs in runoff were lost 87% in composition and 50% in concentration, respectively. Our results demonstrate that the Camphor forest ecosystems have a strong ability for purifying PAHs that are known to be hazardous substances in the environment.

Key words: PAHs; forest ecosystem; hydrological process; transportation; air pollution

PAHs 是一类广泛存在于环境中的有机污染物, 且被列为美国 EPA 黑名单上的优先有机污染物^[1]。它是

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30571487, 30271043); 国家科技部平台建设资助项目 (20021220); 国家林业局重点资助项目 (2001-07, 2004-163, 2005-203)

收稿日期: 2005-09-20; **修订日期:** 2006-04-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: csfuywd@hotmail.com

作者简介: 闫文德 (1969 ~), 男, 甘肃武威人, 博士, 副教授, 主要从事森林生态学研究. E-mail: csfuywd@hotmail.com

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30571487, 30271043); Platform construction project of the Ministry of Science and Technology of China (No. 20021220); Key task project of State Forestry Administration (No. 2001-07, 2004-163, 2005-203)

Received date: 2005-09-20; **Accepted date:** 2006-04-27

Biography: YAN Wen-De, Ph.D., mainly engaged in forest ecology. E-mail: csfuywd@hotmail.com

由石油、煤炭等化石燃料燃烧过程及能源转化过程的副产物。随着工业化、城市化的进程加快,经济的快速发展以及汽车拥有量的快速增加,由工业燃烧和汽车尾气排放产生的 PAHs,不仅污染了环境,而且对生物体,尤其是人类,带来了不安全的影响,引起世界各国环境科学工作者们及政府和有关部门的高度重视。

城市随着人口增多,规模不断扩大,产生了许多负效应。近年来,城市居民中兴起了一股渴望绿色,回归自然的浪潮,尤其是对森林产生了更全面的认识,将森林引入城市,把城市森林作为城市生态环境建设的重要组成部分,使城市森林不断向深度与广度发展,并成为现代城市的重要标志之一。这也是历史发展的必然趋势。因此,开展城市森林的自净功能研究,将具有十分重要的意义。

有关 PAHs 在大气、土壤和植物系统的分布和行为研究方面,在国内外已有许多报导^[2~13]。但 PAHs 在森林水文学过程中的行为研究尚属空白。从 2003 年开始,在中南林业科技大学株洲校区作为南方城市森林优选的樟树(*Cinnamomum camphor*)林内,采集和分析了大量的水样,对 PAHs 在樟树林生态系统水文学过程中的浓度变化进行了测定,并同时研究 PAHs 的迁移转化行为进行了为期 3a 的定位研究,可为城市森林具有减少或净化污染物质的功能提供科学依据。

1 试验区概况

试验区设在中南林业科技大学株洲校区的树木园樟树人工林内,地理位置为 112°54'E, 27°50'N, 海拔 50 ~ 200m, 相对高度 100m, 属湘中丘陵区。气候为典型亚热带湿润气候区, 年平均降水量 1430.8mm, 集中于 4 ~ 7 月份, 年平均相对湿度 80%, 年平均气温 17.4℃。母岩以变质板页岩为主, 风化程度较深, 土壤为森林红壤, 呈酸性。地带性植被为常绿阔叶林。试验林分为 1983 年营造的樟树纯林, 面积为 4hm², 现实林分郁闭度 0.7 ~ 0.8, 造林前进行了平梯整地, 造林后未经管理而处于半自然状态。林分平均胸径 14.5cm, 平均树高为 8.5m, 林下植被主要有女贞(*Ligustrum lucidum*)、小叶女贞(*Ligustrum quihoui*)、菝葜(*Smilax china*)、山胡椒(*Lindera glauca*)、木莓(*Rubus swinhoei*)、油茶(*Camellia oleifera*)、大叶黄杨(*Buxus megistophylla*)、满树星(*Ilex acueolata*)、南蛇藤(*Celastrus orbiculatus*)、铁芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)等。

2 研究方法

2.1 水样采集

分析所用水样均取自试验区内。其中大气降水水样, 采于距试验林分 200m 处空旷地的雨量筒内; 林内穿透水在承接器中采集; 灌木穿透水在灌木下的雨量筒内采集; 矮小灌木和草本植物地上部分穿透水在其下安放的铝盒(100 个)内采集; 树干茎流水在蛇形缠绕树干导管基部承接器中采集; 地表径流水在 5m × 20m 的地表径流出口测流堰中采集。各类水样采集量为 2L, 均盛于经过严格洗涤的洁净玻璃瓶内, 在最短时间内分析完毕。

2.2 分析方法

对水样采用 GDX-102(40 ~ 60 目)富集, 二氯甲烷洗脱, K-D 浓缩器浓缩^[14], 气相色谱仪 HP-6890、FID 氢火焰检测器分析, 在分析时, 以 EPA610 Polynuclear Aromatic Hydrocarbons Mix. supeleo, USA 生产的 16 种 PAHs 混合标准液为外标, 16 种 PAHs 为: 2 环的萘(Nap)、3 环的苊烯(Any)、苊(Ane)、芴(Fle)、菲(Phe)、蒽(Ant)、4 环的荧蒽(Fla)、芘(Pyr)、苯并(a)蒽(BaA)、屈(Chr)、5 环的苯并(b)荧蒽(BbF)、苯并(k)荧蒽(BkF)、苯并(a)芘(BaP)、二苯并(a,h)蒽(DaA)、6 环的茚并(1,2,3-cd)芘(IiP)、苯并(g,h,i)芘(BgP)。用保留时间直接对照法和标准物加入法定性分析。用外标法定量测定。

分析条件: 色谱柱为 HP-5 毛细管色谱柱(30m × 0.25mm)。不分流进样, 检测器温度 300℃, 载气为高纯 N₂, 分离多环芳烃温度梯度为:

$$60^{\circ}\text{C} \rightarrow 20^{\circ}\text{C}/\text{min} \rightarrow 100^{\circ}\text{C} (5\text{min}) \rightarrow 8^{\circ}\text{C}/\text{min} \rightarrow 250^{\circ}\text{C} (5\text{min}) \rightarrow 10^{\circ}\text{C}/\text{min} \rightarrow 290^{\circ}\text{C} (10\text{min})$$

进样量为 2μl^[15]。

2.3 分析数据准确性的控制

森林水文学过程是一种自然发生的现象, 它或多或少是随机的和不稳定的, 要获得水样中有机污染物的

准确含量,一定要根据天气状况、降水时间和性质以及自然条件等因素进行多次分类采样分别测定^[16,17]。本试验定位研究历时 3a,每年采集水样 10~12 次,而每次分析结果并不完全相同,因此,采用加权平均法计算每种水样中全年的 PAHs 量。

在分析测定时,对试验过程进行空白试验,如对二氯甲烷及溶剂经重蒸处理,对 GDX 进行回流处理,将处理后的 GDX-102 装柱后不富集任何水样,直接用 60ml 二氯甲烷分三次淋洗,收集洗脱液,经无水硫酸钠干燥,再用 K-D 浓缩器浓缩至 1ml,吸取 1 μ l 在气相色谱中进行分析,结果未检测出 PAHs 组分。

在每次测定水样时,为了减少偶然误差,则取同一水样的 3 个样品,同时进行测定,求其平均值作为测定结果。加标空白 16 种 PAHs 的回收率在 75.2%~105.3% 之间。

3 结果与分析

3.1 大气降水中多环芳烃的含量:

大气降水中多环芳烃的总含量为 288.662 μ g $\cdot$ L⁻¹,共检测出的多环芳烃 10 种组分,分别是萘、苊、芴、菲、蒽、荧蒽、苯并(a)蒽、苯并(a)芘、二苯并(a,h)蒽、茚并(1,2,3-cd)芘。其中含量较高的是蒽和苯并(a)蒽,为 210.05 μ g $\cdot$ L⁻¹、52.296 μ g $\cdot$ L⁻¹,苯并(a)芘含量最低为 0.336 μ g $\cdot$ L⁻¹(见表 1)。

表 1 大气降水中 PAHs 含量
Table 1 Content of PAHs in incident precipitation

项目 Items	多环芳烃组分 Concentration of individual PAHs (μ g $\cdot$ L ⁻¹)										Σ PAHs
	Any	Ane	Fle	Phe	Ant	Fla	BaA	BaP	IiP	DaA	
大气降水 Incident precipitation	5.495	6.930	1.663	1.339	210.05	3.223	52.296	0.336	2.319	4.951	288.662

从表 1 可以看出,大气环境中的多环芳烃主要集中在 3~4 环的高分子量的组分:蒽占 72.8%、苯并(a)蒽占 18.1%、茚并(1,2,3)芘占 1.7%。表明该地区的多环芳烃主要来源于矿物燃料的燃烧及工业活动的焦化过程。

3.2 穿透水和树干茎流水中多环芳烃的含量

由表 2 可以看出,林内穿透水中多环芳烃的含量为:101.901 μ g $\cdot$ L⁻¹,蒽的含量最高为 59.928 μ g $\cdot$ L⁻¹,菲含量最低为 0.541 μ g $\cdot$ L⁻¹,共检测出 6 种组分。多环芳烃总含量较大气降水有明显减少。但多环芳烃各组分的含量变化不一:菲、蒽和苯并(a)蒽含量减少,苯并(a)芘、二苯并(a,h)蒽、茚并(1,2,3)芘的含量增加,萘、苊、芴、荧蒽低于检测限。

树干茎流中多环芳烃检测出 5 种,总含量为 82.069 μ g $\cdot$ L⁻¹,苯并(a)蒽最高为 41.226 μ g $\cdot$ L⁻¹,苯并(a)芘含量为 5.127 μ g $\cdot$ L⁻¹,茚并(1,2,3)芘含量最低为 2.402 μ g $\cdot$ L⁻¹。相对于大气降水,蒽、二苯并(a,h)蒽的含量降低,苯并(a)蒽、苯并(a)芘的含量增加。

表 2 林内穿透水和树干茎流中的 PAHs 含量
Table 2 Content of PAHs in throughfall and stemflow

项目 Items	多环芳烃组分 Concentration of individual PAHs (μ g $\cdot$ L ⁻¹)										Σ PAHs
	Any	Ane	Fle	Phe	Ant	Fla	BaA	BaP	IiP	DaA	
林内穿透水 Throughfall	未检出*	未检出	未检出	0.541	59.928	未检出	6.722	4.591	9.829	20.29	101.901
树干茎流水 Stemflow	未检出	未检出	未检出	未检出	29.068	未检出	41.226	5.127	2.402	4.246	82.069

* No detected,下同 the same below

2.3 灌木和草本层穿透水中多环芳烃含量

灌木和草本层穿透水中多环芳烃的含量变化如表 3。灌木穿透水中多环芳烃的含量为 49.049 μ g $\cdot$ L⁻¹,草本穿透水中多环芳烃的含量为 74.938 μ g $\cdot$ L⁻¹,均检测出 4 种。草本穿透水中多环芳烃总含量及各组分的含量均高于灌木穿透水。

表 3 灌木穿透水和草本穿透水中的 PAHs 含量

Table 3 Content of PAHs in throughfall and stemflow

项目 Items	多环芳烃组分 Concentration of individual PAHs ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)										Σ PAHs
	Any	Ane	Fle	Phe	Ant	Fla	BaA	BaP	IiP	DaA	
灌木穿透水 Throughfall of shrubs	未检出	未检出	未检出	未检出	44.159	未检出	未检出	0.276	1.585	3.029	49.049
草本穿透水 Throughfall of herbs	未检出	未检出	未检出	未检出	42.836	未检出	未检出	7.283	8.307	16.512	74.938

3.4 多环芳烃在水文学过程中的迁移转化机理

3.4.1 林冠和树干的淋溶作用 降水通过林冠和树干后,将枝叶和树皮表面的有机物质进行淋洗,使水中多环芳烃含量发生变化,产生了林冠和树干的净淋溶。从表 4 就可以看出,林内穿透水中 3 环的萘、蒽、芘、4 环的荧蒽消失,表明完全被林冠吸收;菲、蒎和苯并(a)蒎为负淋溶,表明穿透水中含量低于大气降水,大部分被林冠吸收;苯并(a)芘、茚并(1,2,3)芘各组分、二苯并(a,h)蒎的含量有所增加,表明大气降水中除自己携带的以外,还从林冠内淋洗出来。依据淋溶系数大小排序为 $\text{BaP} > \text{IiP} > \text{DaA} > \text{Ant} > \text{Phe} > \text{BaA}$ 。

树干茎流水中的 PAHs 有 5 个组分消失,蒎、二苯并(a,h)蒎、茚并(1,2,3)芘的含量低,表明全部或大部分被树干吸收、吸附;苯并(a)蒎、苯并(a)芘的含量增加,表明这些组分又被树干淋洗出来。树干茎流中的蒎、茚并(1,2,3)芘、二苯并(a,h)蒎的吸附作用低于穿透水,而对苯并(a)蒎、苯并(a)芘的吸附作用又高于穿透水。各组分的淋溶序列为 $\text{BaP} > \text{IiP} > \text{DaA} > \text{BaA} > \text{Ant}$ 。

表 4 林内穿透水和树干径流净淋溶量和净淋溶系数

Table 4 Net leaching amount and coefficient of throughfall and stemflow

项目 Items	多环芳烃组分 Concentration of individual PAHs ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)									
	Any	Ane	Fle	Phe	Ant	Fla	BaA	BaP	IiP	DaA
穿透水净淋溶量 Net leach of throughfall	—	—	—	-0.858	-150.122	—	-45.574	4.255	7.510	15.339
树干茎流净淋溶量 Net leach of stemflow	—	—	—	—	-180.982	—	-11.07	4.791	0.083	-0.705
穿透水淋溶系数 Leach coefficient of throughfall	—	—	—	0.387	2.847	—	0.129	13.664	4.238	4.098
树干茎流淋溶系数 Leach coefficient of stemflow	—	—	—	—	0.138	—	0.788	15.259	1.036	0.857

* 净淋溶量 = 穿透水或树干茎流含量 - 大气降水含量,淋溶系数 = 穿透水或树干茎流含量/大气降水含量 Net leaching amount = amount of throughfall or stemflow-amount of incident precipitation; Leaching coefficient = amount of throughfall or stemflow/amount of incident precipitation

3.4.2 灌木和草本层的淋溶作用 由林内穿透水再向灌木层或草本层进行淋溶或淋洗,使得灌木层和草本层穿透水中多环芳烃组分种类就显得更少了,只剩下四种,比林内穿透水中种类减少 33%,比大气降水中种类减少 60%。且除苯并(a)芘被草本层淋洗略有增加外,其余组分显示出负淋溶,表明大部分被灌木层和草本层吸收(见表 5)。

从表 4 和表 5 还可以看出,淋溶系数在 1 以上的,穿透水中有蒎、苯并(a)芘、6 环的茚并(1,2,3-cd)芘、二苯并(a,h)蒎;树干茎流水中仍有苯并(a)芘和 6 环的茚并(1,2,3-cd)芘;草本层水中只有苯并(a)芘。表明樟树人工林水文学过程中的冠淋以苯并(a)芘-6 环的茚并(1,2,3-cd)芘型淋溶为主。值得注意的是,穿透水和树干茎流水中苯并(a)芘的淋溶系数在 10 以上,这可能与冠层枝叶及树干原有附集干沉降物质中的内含物或其本身有关^[18]。

3.4.3 地表径流水中多环芳烃的迁移 樟树林水文学过程中地表径流多环芳烃的含量为 $36.866\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,检测出 5 种,地表径流中蒎的含量最高为 $27.239\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,苯并(a)芘的含量最低为 $1.14\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。排列顺序为 $\text{Ant} > \text{BaA} > \text{DaA} > \text{IiP} > \text{BaP}$,相对于大气降水、林内穿透水,多环芳烃的含量已有明显的降低(见表 6)。

表 5 灌木和草本层的净淋溶量和淋溶系数

Table 5 Net leaching amount and coefficient of shrubs and herbs

项目 Items	多环芳烃组分 Concentration of individual PAHs ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)									
	Any	Ane	Fle	Phe	Ant	Fla	BaA	BaP	liP	DaA
灌木层净淋溶量 Net leach of shrubs	—	—	—	—	-15.769	—	—	-4.315	-8.244	-17.261
草本层净淋溶量 Net leach of herbs	—	—	—	—	-17.092	—	—	2.692	-1.522	-3.778
灌木层淋溶系数 Leach coefficient of shrubs	—	—	—	—	0.737	—	—	0.060	0.161	0.149
草本层淋溶系数 Leach coefficient of herbs	—	—	—	—	0.715	—	—	1.586	0.845	0.814

* 净淋溶量 = 灌木或草本层穿透水含量 - 穿透水含量, 淋溶系数 = 灌木或草本层穿透水含量/穿透水含量 Net leaching amount = amount of throughfall of shrubs or herbs-amount of throughfall; Leaching coefficient = amount of throughfall for shrubs or herbs /amount of incident precipitation

表 6 地表径流的迁移量和迁移系数

Table 6 Leach amount and coefficient of surface runoff

项目 Items	多环芳烃组分 Concentration of individual PAHs ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)									
	Any	Ane	Fle	Phe	Ant	Fla	BaA	BaP	liP	DaA
大气降水含量 Incident precipitation	5.495	6.930	1.663	1.399	210.05	3.223	52.296	0.336	2.319	4.951
地表径流含量 Surface runoff	未检出	未检出	未检出	未检出	27.239	未检出	3.337	1.141	2.480	2.669
地表径流迁移量 Leach of surface runoff	—	—	—	—	-182.811	—	-48.959	0.805	0.161	-2.282
地表径流迁移系数 Leaching coefficient of surface runoff	—	—	—	—	0.130	—	0.064	3.396	1.070	0.539

* 迁移量 = 地表径流含量 - 大气降水含量, 迁移系数 = 输出含量/输入含量 Leach amount = amount of surface runoff-amount of incident precipitation, leach coefficient = amount of output /amount of input

从表 6 还可以看出, 地表径流迁移量中苯并(a)芘、6 环的茚并(1,2,3-cd)芘为正值, 且迁移系数在 1 以上, 则为淋失迁移型; 而蒽、苯并(a)蒽和二苯并(a,h)蒽的迁移量为负值, 迁移系数在 1 以下, 则为输入含量尚有部分在樟树林生态系统内吸收贮存的内贮型^[18]。

3.4.4 多环芳烃随樟树林水文学过程的转化 降水通过林冠、树干流下, 然后由径流流出, 在此过程中由于降水对树叶、枝条表面尘埃等物质的淋洗; 降水对树叶中物质的淋溶; 树叶对降水中物质的吸收、吸附, 以及树干茎流的淋洗、淋溶等行为, 已使降水中所含物质发生了质和量的变化。当穿透水进入林地后, 又通过灌木层、草本层、凋落物层和表土层的截持、吸附, 经过层层化学调节作用, 径流水得到了净化, 改善了径流水质^[14,19,20]。

值得提出的是: 森林植被还可以作为气态污染物的蓄积库, 特别是树木具有作为气态污染物蓄积库的潜力。气态污染物通过扩散和气流运动两种力量的结合, 从大气转移到植物。一旦与植物接触后, 气体便被束缚或溶解于植物的外表面, 或通过气孔被植物吸收。如果植物表面是潮湿的, 并且气体是水溶性的话, 则前一种过程是主要的。当植物是干燥的, 或气体在水中的溶解度较低, 则后一种机理是最重要的^[21]。而森林水文学过程中水是载体, 又为森林净化大气作用提供了最为有利的条件。

从表 7 就可以看出, 从大气降水中带入樟树林生态系统水文过程中 PAHs 的浓度, 均按大气降水、穿透水、树干茎流水、灌木层穿透水及地表径流水的顺序递减, 从大气降水至地表径流水 PAHs 的浓度已经降低 87%, 多环芳烃种类亦由 10 种减少至 5 种, 减少 50%。仅有草本穿透水的含量例外, 虽然多环芳烃种类减少 6 种, 但其总含量却比灌木层多, 这主要是由于在系统内的活植物体, 草本层处于最低位置, 容易导致沉积和贮存所致, 但与大气降水中的含量比较, 则仍然降低 74%, 从地表径流迁出樟树林生态系统的水中 PAHs(种类为 5 种)总含量为 $36.866\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 不难看出, 樟树林生态系统具备较高的净化效能。

4 结论与讨论

(1) 大气降水是樟树林生态系统水文学过程中气象输入各种物质的主要途径之一。利用气相色谱法检测出大气降水中有 10 种 PAHs, 总含量为 $288.662\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中蒽的含量最高, 为 $210.05\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 其次为苯并(a)蒽

$52.29\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,而以苯并(a)芘最低,为 $0.336\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。究其原因,株洲市是重工业城市,加之距试验区 500m 处有一条省级公路和 4km 处有工厂,因此 PAHs 主要由汽车尾气排放和工业燃烧产生,在大气环流影响下,随大气降水参与水文学过程。

表 7 水文学过程中多环芳烃的转化

Table 7 Transformation of PAHs in hydrological process

项目 Items	多环芳烃组分 Concentration of individual PAHs ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)										Σ PAHs
	Any	Ane	Fle	Phe	Ant	Fla	BaA	BaP	IiP	DaA	
大气降水含量 Incident precipitation	5.495	6.930	1.663	1.399	210.05	3.223	52.296	0.336	2.319	4.951	288.662
林内穿透水含量 Throughfall	未检出	未检出	未检出	0.541	59.928	未检出	6.722	4.591	9.829	20.29	101.901
树干茎流水含量 Stemflow	未检出	未检出	未检出	未检出	29.068	未检出	41.226	5.127	2.402	4.246	82.069
灌木穿透水含量 Throughfall of shrubs	未检出	未检出	未检出	未检出	44.159	未检出	未检出	0.276	1.585	3.029	49.049
草本穿透水含量 Throughfall of herbs	未检出	未检出	未检出	未检出	42.836	未检出	未检出	7.283	8.307	16.512	74.938
地表径流水含量 Surface runoff	未检出	未检出	未检出	未检出	27.239	未检出	3.337	1.141	2.480	2.669	36.866

(2)大气降水中携带的 PAHs,经过林冠层和树干的截留和吸收、淋溶和淋洗,使林内穿透水中 PAHs 含量降低至 $101.901\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,而且种类由 10 种减少至 6 种;树干茎流水含量降低至 $82.069\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,种类减少至 5 种。

在穿透水中 PAHs 组分以蒽的含量最高,为 $59.928\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,占总量的 59%;菲含量最低,仅占 0.5%。树干茎流水中却是苯并(a)蒽最高,为 $41.226\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,占总量的 50%;茚并(1,2,3)芘含量最低为 $2.402\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,占 3%。

(3)穿透水是林内降雨,又经过灌木层和草本层的吸收、淋溶和淋洗,使灌木和草本层穿透水中 PAHs 种类减少至 4 种。灌木层穿透水 PAHs 含量为 $49.049\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。草本层穿透水 PAHs 含量虽比大气降水、穿透水和树干茎流水低,但却比灌木层穿透水要高出 $25.889\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,这主要是在樟树林生态系统的活植物体中,草本层处于最低位置,一方面林内穿透水和树干茎流水可以直接产生淋溶淋洗,另一方面大气降水还可以通过林间空隙,不经过林冠层等的层层截滞,而直接到达草本层的原故。

(4)樟树林生态系统水文学过程 PAHs 的迁移转化进程中,林冠、树干、灌木和草本层的淋溶和淋洗作用明显,它为 PAHs 的转化作出了重要贡献,经过淋溶淋洗作用后,PAHs 的种类有的表现为被完全吸收而消失,有的浓度大幅度降低,有的浓度反而增大。完全消失的种类有 3 环的萘烯、萘、芴、菲和 4 环的荧蒽;大部分被吸收的有蒽,增加的典型则有苯并(a)芘。其结果使大气降水产生了量和质的变化。

地表径流是水文学过程 PAHs 迁移的主体,由地表径流迁移的水中只有 5 种,总含量为 $36.866\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。与大气降水相比,PAHs 种类减少 50%,浓度降低 87%。表现出樟树林生态系统具有较高的净化效能。随地表径流水中迁移的苯并(a)芘和 6 环的茚并(1,2,3-cd)芘可划分为淋失迁移型;蒽、苯并(a)蒽和二苯并(a,h)蒽则为输入含量尚有部分在系统内吸收贮存的内贮型。

(5)森林水文学过程是自然发生的现象,在这个过程中即有物理现象和化学行为,还有生物参与,因此是一个非常复杂的过程,多少存在随机性和不稳定性,它受自然条件、天气现象、降水性质和时间、植物生长发育状态等的干扰,除了注意采集水样的代表性外,对于 PAHs 在樟树林水文学过程中迁移转化的环境行为和归宿,以及与植物本身有机体代谢的中间产物关系等,尚待进一步研究。

References:

- [1] Sun T H, Zhou Q X, Li P J. Pollution Ecology. Beijing: SciencePress, 2001. 129 ~ 136.
- [2] Huang S B, Wang Z J, Xu Y P. Distribution, sources and potential toxicological significance of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Guanting Reservoir Sediments, China. Journal of Environmental Sciences, 2005, 17(1): 48 ~ 53.

- [3] Howsam M, Jones K C, Ineson P. Dynamics of PAH deposition, cycling and storage in a mixed-deciduous (*Quercus-Fraxinus*) woodland ecosystem. *Environ. Pollut*, 2001, 113:163 ~ 176.
- [4] Bzdusek P A, Christensen E R, Li A. Source apportionment of sediment PAHs in Lake Calumet. Chicago: application of factor analysis with nonnegative constraints. *Environmental Sciences and Technology*, 2004, 38:97 ~ 103.
- [5] Guinan T M, Charlesworth M S, Oliver T. Sources and geochemical constraints of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments and mussels of two Northern Irish Sea Loughs. *Marine Pollution Bulletin*, 2001, 42:1073 ~ 1081.
- [6] Odabasi M, Sofuoglu A, Vardar N, *et al.* Measurement of dry deposition and air-water exchange of polycyclic aromatic hydrocarbons with the water surface sample. *Environ. Sci. Technol*, 1999, 33:426 ~ 434.
- [7] Zhu L Z, Hidetsur M. Progress in research on polycyclic aromatic hydrocarbons in air. *Advances in Environmental Science*, 1997, 5(5):18 ~ 29.
- [8] Liang T, Wang H, Ding S M. An evolution of water quality in Guanting Reservoir during the past three decades. *Progress in Geography*, 2003, 22: 38 ~ 44.
- [9] Wilcke W. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil — a review. *J. Plant Nutr. Soil Sci*, 2000, 163:229 ~ 248.
- [10] Song Y F, Sun T H, Zhang L S, *et al.* Behaviors of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and heavy metals in soil-plant system. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6(4):417 ~ 422.
- [11] Liu S L, Luo Y M, Chao Z H, *et al.* The progress of phytoremediation and microbial remediation on PAHs contaminated soil. *Soils*, 2002(5): 257 ~ 265.
- [12] Li Y, Ou Z Q, Sun T H, *et al.* Effects of surfactants on the uptake of PAHs by wheat. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(1):99 ~ 102.
- [13] Lin D H, Zhu L Z, Wang J. Assessment on the contamination and risk of PAHs in a metal smelting area. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(2):261 ~ 267.
- [14] Liu X Z, Tian D L, Zhou Z H. Studies on the function for purifying water of Chinese fir plantation ecosystem. *Scientia Silvae Sinicae*, 1995, 31(3):193 ~ 199.
- [15] Pan Y J, Tian D L, Tan D W, *et al.* Concentration and spatial distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a *Cinnamomum camphora* stand. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(6):2 ~ 7.
- [16] Tian D L. Analysis for purifying water in forest hydrological process. *Forest Science and Technology*, 1987, (6):13 ~ 15.
- [17] Pan W C, Tian D L, Shen X Y. Studies on biogeochemical cycling in forest ecosystem and experimental technology. *Journal of Central South Forestry University*, 1984, 4(1):18 ~ 28.
- [18] Tian D L, Zhu X L, Cai B Y, *et al.* A study on the dynamics of water chemistry in Chinese fir and broad-leaved plantation watershed in Huitong. *Scientia Silvae Sinicae*, 1997, 33 (Sp.2):12 ~ 18.
- [19] Tian D L, Zhou Z H. Studies on the dynamics of organic compounds in process of hydrology in Chinese fir plantation ecosystem. In: Liu X Z ed. Long-term located research on forest ecosystem. Beijing: China Forest Press, 1993. 195 ~ 202.
- [20] Tian D L, Xiang W H, Yang W H. Nutrient Characteristic of Hydrological Process in Young Second — rotation Chinese Fir Plantations. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(6):859 ~ 865.
- [21] William H S. Atmospheric pollution and forest. Beijing: China Meteorological Press, 1986. 101 ~ 117.

参考文献:

- [1] 孙铁珩, 周启星, 李培军. 污染生态学. 北京: 科学出版社, 2001. 129 ~ 136.
- [7] 朱利中, 松下秀鹤. 空气中多环芳烃的研究现状. *环境科学进展*, 1997, 5(5):18 ~ 29.
- [10] 宋玉芳, 孙铁珩, 张丽珊, 等. 土壤-植物系统中多环芳烃和重金属的行为研究. *应用生态学报*, 1995, 6(4):417 ~ 422.
- [11] 刘世亮, 骆永明, 曹志洪, 等. 多环芳烃污染土壤的微生物与植物联合修复研究进展. *土壤*, 2002, 5:257 ~ 263.
- [12] 李滢, 区自清, 孙铁珩, 等. 表面活性剂对小麦吸收多环芳烃 (PAHs) 的影响. *生态学报*, 2000, 20(1):99 ~ 102.
- [13] 林道辉, 朱利中, 王静. 小冶炼地区 PAHs 污染及其风险评价. *生态学报*, 2005, 25(2):261 ~ 267.
- [14] 刘焯章, 田大伦, 周志华. 杉木林生态系统净化水质功能的研究. *林业科学*, 1995, 31(3):193 ~ 199.
- [15] 潘勇军, 田大伦, 项文化, 等. 樟树林生态系统中多环芳烃含量和分布特征. *林业科学*, 2004, 40(6):2 ~ 7.
- [16] 田大伦. 森林水文学过程中的水质分析. *林业科技通讯*, 1987, (6):13 ~ 15.
- [17] 潘维涛, 田大伦, 谌小勇, 等. 森林生态系统物质循环研究中的生物地球化学方法和实验技术. *中南林学院学报*, 1984, 4(1):18 ~ 28.
- [18] 田大伦, 朱小年, 蔡宝玉, 等. 会同杉木林、阔叶林集水区水化学动态的研究. *林业科学*, 1997, 33(专刊 2):12 ~ 18.
- [19] 田大伦, 周志华. 杉木林生态系统水文学过程中有机化合物的动态研究. 见: 刘焯章主编. 森林生态系统定位研究. 北京: 中国林业出版社, 1993. 195 ~ 202.
- [20] 田大伦, 项文化, 杨晚华. 第二代杉木幼林生态系统水化学特征. *生态学报*, 2002, 22(6):859 ~ 865.
- [21] William H. Smith. 汪嘉熙译. 大气污染与森林. 北京: 气象出版社, 1986. 101 ~ 117.