

植物中多氯联苯的来源、分布及代谢研究进展

范国兰¹, 崔兆杰^{2*}

(1. 山东大学环境研究院, 济南 250100; 2. 山东大学环境科学与工程学院, 济南 250100)

摘要: 研究植物中多氯联苯(PCBs)的来源、分布和代谢特点,可以更好地发挥植物在 PCBs 环境监测中的被动采样平台作用,丰富植物修复 PCBs 污染的基础理论。对植物中 PCBs 的来源途径方面的已有研究进行了总结,阐述了植物吸收 PCBs 的机制及影响因素,论述了植物不同部位中 PCBs 的分配特点,概括了 PCBs 的代谢机理和应用的研究现状,最后指出了目前存在的问题和未来的研究方向。

关键词: 多氯联苯; 植物; 有机污染物; 吸收; 代谢

中图分类号: X171.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-470X(2009)04-0423-06

A Review on the Sources, Distribution and Metabolism of PCBs in Plants

FAN Guo-Lan¹, CUI Zhao-Jie^{2*}

(1. *Environment Research Institute, Shandong University, Jinan 250100, China*; 2. *School of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China*)

Abstract: To study the sources, distribution and metabolism of polychlorinated biphenyls (PCBs) in plants, can help to serve plants as passive samplers for PCBs monitoring, and enrich the theory of PCBs phytoremediation. Firstly, the sources of PCBs in plants were reviewed; secondly, the uptake mechanism of PCBs by plants and influence factors were summarized; thirdly, the distribution patterns of PCBs in different parts of plants were reviewed; fourthly, the metabolism of PCBs by plants were summarized. Finally, current problems and future studies on the sources, distribution and metabolism of PCBs in plants were discussed.

Key words: Polychlorinated biphenyls (PCBs); Plant; Organic pollutants; Uptake; Metabolism

多氯联苯(PCBs)是持久性有机污染物的一类,虽已停产和停用多年,但因具持久性、半挥发性、生物蓄积性、高毒性的特点,其对环境的影响至今仍然存在^[1]。另外,由于 PCBs 可以在环境中长距离迁移,即使是在未使用过此类污染物的地区,也能检出^[2]。因此,PCBs 对环境的影响,仍是目前环境危害研究的热点之一。

植物能够吸收和降解 PCBs,改变 PCBs 的迁移路径^[3-5]。植物吸收的 PCBs 可通过植食动物进入生态系统,进而影响到人体健康^[3,6,7],因此 PCBs 在植物中的累积特征是生态风险评价需要考虑的重要指标。研究植物积累 PCBs 的特点,有助于深入了解生态环境不同时空的污染状况,有利于准确识别环境中的潜在污染源^[8-10]。另一方面,通过研究不同种类植物对 PCBs 污染的积累和降解机制,能够为已有污染地区的植物修复提供科学详细的理论依

据^[11,12]。总之,研究植物中 PCBs 的来源、分布和代谢特点,可以为生态环境的风险评价和被 PCBs 污染的植物修复提供理论基础。

1 植物中多氯联苯的来源

1.1 空气

PCBs 在空气中以两种状态存在:即气态和与颗粒物结合态。气态 PCBs 通过植物的地上部分如叶片等被吸收^[13-15],颗粒物结合态的 PCBs 则以干相或湿相沉积的方式沉降在植物表面,一部分扩散入植物内部,而另一部分则只是附着在表面,在风或者雨水的作用下离开植物^[16]。PCBs 可通过叶子的角质层进入植物体^[14],也可以通过气孔进入到植物体内^[15]。植物的角质层由无生命的脂质细胞组成,它的作用是抵御病虫害和防止水分流失。PCBs 是脂溶性化合物,而角质层中的脂肪含量非常高,因此持

收稿日期:2008-09-01,修回日期:2008-11-03。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(20577030)。

作者简介:范国兰(1981-),女,山东蓬莱人,主要从事植物生态学和有机污染物监测分析研究。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: cuizj@sdu.edu.cn)。

久性有机物进入植物的主要通道是这些角质层^[14]。Riederer^[17]发现植物细胞透性降低时,气孔会发挥吸收污染物的作用。Riederer 建立的模型预测出:如果植物表皮细胞相对没有透性,那么辛醇-空气分配系数(K_{oa})低的 POPs 主要通过气孔来吸收,而 K_{oa} 高的 POPs 则主要通过其它途径进入植物。对 PCBs 而言,只有 K_{oa} 低的 PCBs 才能通过气孔进入植物;如果叶子细胞透性非常高,气孔吸收的作用则可以忽略。Barber 等^[15]对萱草(*Hemerocallis* × *hybrida*)在不同光照及脱落酸存在条件下吸收和释放 PCBs 的研究发现,植物的气孔与 PCBs 的吸收有密切关系。

1.2 土壤

土壤是 PCBs 的重要储存地,有研究表明土壤中的 PCBs 可以通过根系吸收进入植物体:Suzuki 等^[18]发现豌豆(*Glycine max*)可以从土壤中吸收 PCBs, Zeeb 等^[19]发现在 PCBs 含量为 10 ~ 1000 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 土壤上生长的大豆(*Glycine max*)、南瓜(*Cucurbita pepo* ssp. *pepo*)的 3 个亚种、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)等 9 种植物,都能通过根从土壤中吸收 PCBs。Wallnöfer 等^[20]认为土壤中 PCBs 的浓度达到一定的数值时,才能被植物吸收,他们的研究发现胡萝卜生长在含 PCB4, PCB52 和 PCB159 浓度为 0.05 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤中 120 d 仍未在植物体内检测出 PCBs。但更多的研究发现即使在污染严重的土壤中,PCBs 也很难被植物吸收:Pier 等发现随着土壤中 PCBs 浓度的增大,植物中 PCBs 浓度并未随之升高^[8];毕新慧等^[21]对浙江东南某水稻种植地区水稻和土壤中 PCBs 的研究表明,土壤中 PCBs 的迁移速度很慢,很难被水稻吸收。虽然有的研究发现土壤中 PCBs 浓度与植物中 PCBs 浓度相关,但这是因为土壤中的 PCBs 挥发进入空气中,进而从空气进入到植物体内^[14]。土壤中的 PCBs 之所以很难直接被植物吸收,原因可能是 PCBs 与土壤颗粒紧密结合,生物可利用性太低。PCBs 与土壤颗粒的结合程度受 PCBs 中氯原子数目的影响,在 PCBs 的同族体中,低氯代 PCBs 没有高氯代 PCBs 与土壤颗粒的结合紧密,迁移性较强,相对来说更易被植物吸收^[12]。

2 植物吸收 PCBs 的机制及影响因素

2.1 植物吸收 PCBs 的机制

由于多数研究结果认为植物中的 PCBs 主要从大气进入植物,因此植物吸收 PCBs 的机制研究主

要集中于叶片上。Toll 和 McLachlan^[22]通过对种植的多花黑麦草进行人工污染的实验得出,植物叶片从大气中吸收 PCBs 的过程可以分为两个阶段:PCBs 吸附到植物表面,PCBs 进入植物体内部。他们建立了“两段”模型:

$$V_S Z_S \frac{df_s}{dt} = -d_{SR}(f_s - f_R) + d_{AS}(f_A - f_s) \quad (1)$$

$$V_R Z_R \frac{df_R}{dt} = -d_{SR}(f_s - f_R) \quad (2)$$

(1)式描述的是阶段一,化合物从大气到植物叶片表面的过程,其中: V_S 为叶片表面的体积, Z_S 为叶片表面的逸度容量, d_{SR} 为化合物在叶片表面—叶片内部之间的体积传导, d_{AS} 为化合物在大气—叶片表层之间的体积传导, f_A 、 f_S 、 f_R 分别为大气、叶片表层、叶片内部的逸度;(2)式描述的是阶段二,化合物从植物叶片表面到叶片内部的过程,其中: V_R 为叶片内部的体积, Z_R 为叶片内部的逸度容量。该模型能很好地描述 PCBs 在大气—叶片表面—叶片内部间分配的短期动力学过程。

之后的很多研究发现^[3,23],PCBs 进入植物的第一阶段很快,仅需要几天到几个星期的时间,PCBs 扩散速度的主要取决于大气/植物层面的环境因素^[24],如风速等,而不是植物的气孔或者脂肪的影响;第二阶段所需时间较长,几个月甚至更久,此阶段内,决定 PCBs 扩散速度的主要是植物表层细胞的结构及 PCBs 的脂溶性大小^[14]。

植物叶片从大气环境中吸收 PCBs 是一个动态的过程,吸收和释放同时存在^[23]。最终的分配结果可以用植物/空气分配系数(K_{pa})表示,它与污染物的 K_{oa} 相关,并且随着植物种类的不同而不同^[25,26]。Kömp 和 McLachlan^[23]发现黑麦草(*Lolium multiflorum*)、白三叶草(*Trifolium repens*)、车前(*Plantago lanceolata*)等 5 种草本植物的 K_{pa} 的最小值和最大值差异达 20 倍以上,而且不同植物的 K_{pa} 与 K_{oa} 的线性关系也不同。

2.2 植物吸收 PCBs 的影响因素

2.2.1 PCBs 性质对吸收的影响

PCBs 的物理化学性质在 209 种同族体间差异很大,是研究植物吸收和积累 PCBs 模型的关键参数。目前 PCBs 的物化性质主要涉及饱和蒸汽压,辛醇-水分配系数等^[27-29]。其中, K_{oa} 作为衡量 PCBs 脂溶性大小的指标,可反应 PCBs 在不同介质中的迁移能力强弱,目前研究的最多。

K_{oa} 小的 PCBs 更倾向于以气态存在,在植物和

空气之间的分配平衡比较容易达到,而 K_{oa} 大的 PCBs,更易与颗粒物结合,其在植物和大气环境之间的分配平衡也比较难达到^[30]。McLachlan 等^[30]研究了 PCBs 在植物和空气之间的分配与 $\log K_{oa}$ 之间的关系,认为半挥发性有机物在植物和大气间的分配类型分为3种:在大气和植物间的平衡分配;气态沉降占主导地位的分配;干湿沉降占主导地位的分配。在实际吸收过程中,何种方式占主导,主要由污染物的物化性质决定。Böhme 等^[25]研究发现,植物中 $\log K_{oa} < 9$ 的 PCBs,主要来自在空气和植物间达到分配平衡的 PCBs; $\log K_{oa} > 11$ 的 PCBs 主要来自大气的颗粒物; $9 < \log K_{oa} < 11$ 的 PCBs 则来自气态的 PCBs。

2.2.2 植物特点对吸收的影响

植物的形态和生理生化特征是影响 PCBs 吸收的重要因素^[14,30],目前此方面的研究主要涉及到植物叶片的厚度、叶片表皮细胞透性、叶片的化学成分等。

植物叶片的形状、厚度和大小决定着叶面积的大小和叶片细胞透性,进而影响着 PCBs 进入植物体内的阻力大小。在植物叶片细胞透性大小相近的情况下,比叶面积 (specific leaf area, SLA) 越小,PCBs 在空气和植物间达到分配平衡所需的时间越长^[30]。而不同植物的 SLA 种间差别很大,从小于 $5 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 到大于 $72 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$,即使在相近的物种之间,差异也很大^[27]。

植物的表皮细胞的化学组成在物种间差异很大,以脂肪含量为例,在大多数的植物中,叶片表皮细胞脂肪的含量在 10% 左右,而在松树中,可以达到 50%^[27]。所以,松树往往比其他物种积累更多的 PCBs,在大气环境监测中,松树通常被用作被动采样平台监测环境空气质量^[31-33]。Moeckel 等^[14]在对叶蜡和植物表皮细胞其他组分的研究中发现,在表皮细胞的组分中,PCBs 与叶蜡的亲合力最强。另外,叶蜡的组成能够影响叶片的透性^[34],影响 PCBs 进入植物内的阻力大小,因此植物的表皮叶蜡成分被认为对 PCBs 进入植物有重要作用。

植物的形态和生理生化特点随种类的不同而不同,因此导致植物对 PCBs 的吸收存在种间差异。Buckley 等发现纽约市区 18 种植物叶片中的 PCBs 含量相差 10 倍多^[35];Böhme 等^[25]研究中欧地区植物的 PCBs 积累发现,10 种植物中 PCBs 的积累浓度最大差异达到 37 倍;Pier 等发现北极地区植物对 PCBs 的积累按照属的划分而呈现不同特点^[8];

Nizzetto 等^[36]对意大利 Lys 流域中三种类型的高山树林叶片中持久性有机污染物的含量进行了研究,发现树木种类的组成对所积累的多氯联苯的组成和浓度影响很大。因此,在利用植物进行不同地区空气中 PCBs 的浓度监测时,需考虑到植物种类对 PCBs 吸收的影响,应选择同一时段的同一物种进行分析比较。

2.2.3 影响吸收的其他因素

温度 温度的升高会造成有机物在植物和空气之间的分配系数降低^[23,37],温度的降低会使植物中的浓度增大而空气中的浓度降低。温度还影响 PCBs 的扩散速率,影响其在气态和颗粒结合态间的分配^[38],从而影响植物对 PCBs 的吸收。在实际的研究中,温度对 PCBs 的影响主要表现为季节变化和昼夜更替对植物中 PCBs 浓度的影响^[37]。

风速 风速决定着空气-植物层面的阻力大小,进而影响到 PCBs 的扩散速率和在植物和空气中达到平衡所需的时间^[24]。Barber 等^[24]的研究发现,空气流速的加快,可以加快植物吸收 PCBs 的速度。

生长基质 土壤中化学物质的生物有效性取决于很多因素,包括浓度、可溶性、土壤类型、有机质的含量、pH 值、温度和化学物质的性质等^[39]。生长在含 PCBs 的沙地和淤泥上的盐生植物互花米草 (*Spartina alterniflora*) 对 PCBs 处理反应不同^[40]:生长在 PCBs 污染的沙地 ($1.7 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 中表现出植株高度显著降低 ($\sim 30\%$),每个枝干上活叶子的累计数目 ($\sim 25\%$)、每个植株上枝的数目显著降低 ($\sim 300\%$);生长在 PCBs 污染的淤泥 ($2.2 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 中表现出每棵植株上枝的数目显著下降 ($\sim 75\%$),并且改变了生物量的分配。这种差异被认为与生长基质的不同有关。

环境因素除了影响 PCBs 的分子扩散速率等行为参数外,对植物的形态和生理生化特点也会产生一定的影响,如生物量、光合速率、气孔的密度和大小以及表皮细胞的结构等,所以环境因素通过调节植物自身的特点也会影响其对 PCBs 的吸收^[27]。

3 植物体内 PCBs 的分布特性

Pier 等^[8]在野外研究发现,PCBs 在植物的地下和地上部分一般是平均分布的,柳树的当年生组织和多年生组织中 PCBs 浓度无显著差异。Whitfield Åslund 等^[12]发现在土壤严重污染的情况下,南瓜 (*Cucurbita pepo* ssp. *pepo* cv. Howden) 的叶片、茎和叶柄中 PCBs 浓度无明显差异,但 PCBs 浓度与离根

的距离相关。但若土壤的 PCBs 浓度高于大气,那么植物地下部分的浓度会相对高些:在国产三氯联苯和五氯联苯污染的土壤上生长的青椒和西红柿,污染程度为根 > 叶 > 茎 > 果皮^[41]。毕新慧等^[21]发现水稻不同组织中 PCBs 浓度分布顺序为稻叶 > 稻壳 > 稻秆 > 糙米。另外,Buckley 等^[35]的研究发现,根中的 PCBs 向植物地上部分转移的很少,根的吸收几乎不会引起地上叶子的污染。

4 植物对 PCBs 的代谢研究

目前的研究发现很多种类的植物都可以代谢 PCBs。如大豆(*Glycine max*)、柳枝稷(*Panicum virgatum* L.)和鹿舌草(*Panicum clandestinum* L.)、紫花苜蓿(*Medicago saliva* L.)、胡枝子(*Lespedeza culneata*)等^[42,43]。

4.1 植物对 PCBs 的代谢机理

总体来讲,PCBs 在植物中的代谢分为三个阶段:第一阶段是被氧化或羟基化,第二阶段是葡萄糖等与 PCBs 母体分子结合形成亲水性更强的物质,第三阶段是溶于非结合水的外源物被运输到液泡中或分泌到非原质体中去^[44,45]。

目前植物对 PCBs 代谢机理的研究主要集中在三方面:①植物细胞对 PCBs 的代谢;②植物中的酶对 PCBs 的代谢;③植物的次生代谢物对 PCBs 代谢的影响。

4.1.1 植物细胞对 PCBs 的代谢

植物细胞可以代谢 PCBs^[46-49],Fletcher 等发现 Paul's Scarlet Rose 的细胞对 PCBs 有明显的代谢作用^[46];Rezek 等在 14 d 的实验周期内发现烟叶(*Nicotiana tabacum*)细胞对 6 种二氯联苯都能降解^[47]。不同种类的植物对 PCBs 的代谢效率不同,Mackova 等^[48]对澳洲茄(*Solanum aviculare*)、龙葵(*Solanum nigrum*)、颠茄(*Atropa bella-donna*)、辣根(*Armoracia rusticana*)4 种植物细胞组培对 PCBs (Delor 103) 的代谢实验发现,4 种植物均能代谢 PCBs,PCBs 代谢率最高的是龙葵 SNC-90(53%),最低的是澳洲茄(18%)。不同种类的 PCBs 在植物中的代谢速度也不同,Wilken 等^[49]研究了 12 种植物对 10 种 PCBs 的代谢情况,发现低氯代的 PCBs 的代谢速度要高于高氯代的 PCBs。

4.1.2 植物中的酶对 PCBs 的代谢

植物中的酶对有毒物质代谢起着重要作用,在植物代谢 PCBs 的过程中,研究较多的为细胞色素 P450 和过氧化物酶^[50-53]。细胞色素 P450 是广泛

引起关注的参与代谢 PCBs 的酶,它可对外源或内源物质起氧化代谢的解毒作用,并能催化防御性次生物质的合成,有研究发现此酶在代谢 PCBs 的第一阶段起作用^[50]。细胞色素 P450 酶系数量庞大,在不同种类的植物中,细胞色素 P450 同工酶的种类也不同,特定种类的细胞色素 P450 能够代谢特定种类的化合物^[51]。过氧化物酶对植物代谢 PCBs 也非常重要,Mackova 等发现过氧化物酶的活性与 PCBs 的代谢程度相关^[48],Chroma 等^[52]发现在添加 PCBs 的情况下,过氧化物酶活性升高。这些酶在植物细胞中并不单独起作用,Chu 等^[53]发现芦苇(*Phragmites australis*)和水稻(*Oryza sativa* L.)中细胞色素 P450 和过氧化物酶对 PCBs 的代谢都起作用。

4.1.3 植物的次生代谢物对 PCBs 代谢的影响

植物的次生代谢物主要通过两种方式影响 PCBs 的代谢^[48,54]:一种是通过给根际的微生物提供营养加快 PCBs 降解,另一种是根的分泌物可以与 PCBs 在微生物中共代谢。Donnelly 等^[54]在研究的 15 种植物次生代谢物中发现柚苷、香豆素和杨梅素 3 种物质对微生物降解 PCBs 有显著的促进作用。Donnelly 等的研究还发现,有些微生物在降解 PCBs 时,需要共代谢物^[54],例如苯可以作为共代谢物之一,但苯很难被微生物吸收到体内。而植物的分泌物作为共代谢物可被生存在植物根际的微生物吸收,参与 PCBs 的降解代谢过程,因此,植物和微生物的联合作用可以更好的降解 PCBs^[48]。Chekol 等^[42]发现植物的存在可以增加根际酶的数量和微生物的活性,与未种植植物的土壤相比,种植植物的土壤 PCBs 的代谢率提高了 46%。

4.2 植物代谢 PCBs 的影响因素

影响植物代谢 PCBs 的因素有很多,如植物种类、PCBs 的初始浓度、物理化学性质等。刘亚云等^[55]对此方面做了详细的论述,在此不再赘述。

4.3 植物代谢 PCBs 在污染地区修复中的应用

虽然植物能够降解代谢 PCBs,但 PCBs 在植物中的生物累积因子(bioaccumulation factors,简称 BAF,指植物中的污染物浓度与土壤中的污染物浓度的比值)很低,如对 PCBs 降解效果很好的大豆的 BAF 仅为 0.0015^[18],玉米的 BAF 为 0.001^[56],甜菜的 BAF 为 0.045^[56],灌木 *Carex normalis* 的 BAF 为 0.29^[12]。植物从土壤中吸收的 PCBs 很少,而能够降解的 PCBs 相对更少,所以导致植物对 PCBs 污染土壤的修复效率比较低。因此在实际工作中,需要在污染土壤上重复种植植物,Whitfield Åslund 等^[57]

发现第二年在 PCBs 污染土壤上种植南瓜时,南瓜中的 PCBs 浓度相比第一年要高很多,可见,重复种植会大大提高污染土壤的植物修复效率。所以,从长远角度考虑,植物修复 PCBs 污染土壤在多年的积累后会有比较明显的结果。

5 展望

植物中 PCBs 的来源、分布和代谢的研究,相对于其他有机氯污染物,起步较晚,研究的不够深入,大部分的研究还只局限于植物吸收 PCBs 的阶段,今后的研究还需要在以下几方面加强:

(1) PCBs 在植物中的运输和降解机制研究。由于植物结构特点的复杂性,PCBs 在其中的运输和降解机制现在了解的还不够透彻,对于 PCBs 的运输途径,储存位置,降解的中间产物都需要深入研究。

(2) 研究的植物种类需要增加。目前研究对象主要为牧草^[8,13,22]和常绿植物^[31-33],更多的研究需要在其他种类的植物如落叶植物中展开。另外,由于植物的种类分布有很大的地区局限性,更多的研究需要在不同地区的植物中展开。

(3) 实验手段需要改进。目前对于植物吸收积累 PCBs 的研究,主要以室内控制暴露实验为主,这样得出的模型很难在实际的室外工作中应用推广。而野外实验的环境影响因素太多,很难分辨具体某一因素的作用。因此,如何将二者的工作有机地结合起来得出科学的结论,是需要深入探讨的问题。

(4) PCBs 种类的研究。对 PCBs 的研究,仅仅停留在总和的水平已不能满足研究的需要,越来越多的研究需要深入到同族体的水平,甚至手性异构体的水平。

参考文献:

- [1] Jones K C, Voogt P D. Persistent organic pollutants (POPs): state of the science[J]. *Environ Pollut*, 1999, 100: 209 - 221.
- [2] Macdonald R W, Harner T, Fyfe J. Recent climate change in the Arctic and its impact on contaminant pathways and interpretation of temporal trend data[J]. *Sci Total Environ*, 2005, 342: 5 - 86.
- [3] Simonich S, Hites A. Organic pollutant accumulation in vegetation[J]. *Environ Sci Technol*, 1995, 29: 2905 - 2914.
- [4] Ockenden W A, Steinnes E, Parker C, Jones K C. Observations on persistent organic pollutants in plants: implications for their use as passive air samplers and for POP cycling[J]. *Environ Sci Technol*, 1998, 32: 2721 - 2726.
- [5] Su Y, Wania F. Does the forest filter effect prevent semivolatile organic compounds from reaching the Arctic?[J]. *Environ Sci Technol*, 2005, 39: 7185 - 7193.
- [6] Serrano R, Blanes M A, López F J. Biomagnification of organochlorine pollutants in farmed and wild gilthead sea bream (*Sparus aurata*) and stable isotope characterization of the trophic chains[J]. *Sci Total Environ*, 2008, 389: 340 - 349.
- [7] Turrio-Baldassarri L, Abate V, Alivernini S, et al. A study on PCB, PCDD/PCDF industrial contamination in a mixed urban-agricultural area significantly affecting the food chain and the human exposure. Part I: Soil and feed[J]. *Chemosphere*, 2007, 67: 1822 - 1830.
- [8] Pier M D, Zeeb B A, Reimer K J. Patterns of contamination among vascular plants exposed to local sources of polychlorinated biphenyls in the Canadian Arctic and Subarctic[J]. *Sci Total Environ*, 2002, 297: 215 - 227.
- [9] Dushenko W T, Grundy S L, Reimer K J. Vascular plants as sensitive indicators of lead and PCB transport from local sources in the Canadian Arctic[J]. *Sci Total Environ*, 1996, 188: 29 - 38.
- [10] Rappolder M, Schröter-Kermani C, Schädel S, Waller U, Körner W. Temporal trends and spatial distribution of PCDD, PCDF, and PCB in pine and spruce shoots[J]. *Chemosphere*, 2007, 67: 1887 - 1896.
- [11] Rezek J, Macek T, Mackova M, Triska J. Plant metabolites of polychlorinated biphenyls in hairy root of black nightshade *Solanum nigrum* SNC-90[J]. *Chemosphere*, 2007, 69: 1221 - 1227.
- [12] Whitfield Åslund M L, Zeeb B A, Rutter A, Reimer K J. *In situ* phytoextraction of polychlorinated biphenyl-(PCB) contaminated soil[J]. *Sci Total Environ*, 2007, 374: 1 - 12.
- [13] Hung H, Thomas G O, Jones K C, Mackay D. Grass-air exchange of polychlorinated biphenyls[J]. *Environ Sci Technol*, 2001, 35: 4066 - 4073.
- [14] Moeckel C, Thomas G, Barber J, Jones K C. Uptake and storage of PCBs by plant cuticles[J]. *Environ Sci Technol*, 2008, 42: 100 - 105.
- [15] Barber J L, Kurt P B, Thomas G O, Kerstiens G, Jones K C. Investigation into the importance of the stomatal pathway in the exchange of PCBs between air and plants[J]. *Environ Sci Technol*, 2002, 36: 4282 - 4287.
- [16] Smith K E C, Jones K C. Particles and vegetation: implications for the transfer of particle-bound organic contaminants to vegetation[J]. *Sci Total Environ*, 2000, 246: 207 - 236.
- [17] Riederer M. Partitioning and transport of organic chemicals between the atmospheric environment and leaves[M] // Trapp S, McFarlane J C. Plant Contamination: Modeling and Simulation of Organic Chemical Processes. London: Lewis Publishers, 1995: 153 - 190.
- [18] Suzuki M, Aizawa G, Okano G, Takahashi T. Translocation of polychlorobiphenyls in soil into plants: a study by a method of culture of soybean sprouts[J]. *Arch Environ Contam Toxicol*, 1977, 5: 343 - 352.
- [19] Zeeb B A, Amphlett J S. Potentiation for phytoremediation of polychlorinated biphenyl-(PCB-) contaminated soil[J]. *Int J Phytoremed*, 2006, 8: 199 - 221.
- [20] Wallnöfer P, Königer M, Engelhardt G. Fate of xenobiotic chlorinated hydrocarbons (HCB and PCBs) in plants and soils[J]. *Z Pflanzenk Pflanzen*, 1975, 82: 91 - 100.
- [21] 毕新慧, 储少岗, 徐晓白. 多氯联苯在水稻田中的迁移行为[J]. 环境科学学报, 2001, 21: 454 - 458.
- [22] Tolls J, McLachlan M S. Partitioning of semivolatile organic compounds between air and *Lolium multiflorum* (welsh ray grass)[J]. *Environ Sci Technol*, 1994, 28: 159 - 166.

- [23] Kömp P, McLachlan M. The kinetics and reversibility of the partitioning of polychlorinated biphenyls between air and ryegrass[J]. *Sci Total Environ*, 2000, 250:63 – 71.
- [24] Barber J L, Thomas G O, Kerstiens G, Jones K C. Air-Side and plant-side resistances influence the uptake of airborne PCBs by evergreen plants [J]. *Environ Sci Technol*, 2002, 36: 3224 – 3229.
- [25] Böhme F, Welsh-Pausch K, McLachlan M S. Uptake of airborne semivolatile organic compounds in agricultural plants: field measurements of interspecies variability [J]. *Environ Sci Technol*, 1999, 33:1805 – 1813.
- [26] Kömp P, McLachlan M. Interspecies variability of the plant/air partitioning of polychlorinated biphenyls [J]. *Environ Sci Technol*, 1997, 31:2944 – 2948.
- [27] Barber J L, Thomas G O, Kerstiens G, Jones K C. Current issues and uncertainties in the measurement and modeling of air-vegetation exchange and within-plant processing of POPs [J]. *Environ Pollut*, 2005, 128:99 – 138.
- [28] Paterson S, Mackay D. Correlation of the equilibrium and kinetics of leaf-air exchange of hydrophobic organic chemicals [J]. *Environ Sci Technol*, 1991, 25:866 – 871.
- [29] Helma P A, Bidleman T F. Gas-particle partitioning of polychlorinated naphthalenes and non-and mono-ortho-substituted polychlorinated biphenyls in arctic air [J]. *Sci Total Environ*, 2005, 342: 161 – 173.
- [30] McLachlan M S. Framework for the interpretation of measurements of SOCs in plants [J]. *Environ Sci Technol*, 1999, 33: 1799 – 1804.
- [31] Chen J, Zhao H, Gao L, *et al.* Atmospheric PCDD/F and PCB levels implicated by pine (*Cedrus deodara*) needles at Dalian, China [J]. *Environ Pollut*, 2006, 144:510 – 515.
- [32] Holoubek I, Kořánek P, Šeda Z, *et al.* The use of mosses and pine needles to detect persistent organic pollutants at local and regional scales [J]. *Environ Pollut*, 2000, 109:283 – 292.
- [33] Ockenden W A, Steinnes E, Parker C, Jones K C. Observations on persistent organic pollutants in plants: Implications for their use as passive air samplers and for POP cycling [J]. *Environ Sci Technol*, 1998, 32:2721 – 2726.
- [34] Kerler F, Schönherr J. Permeation of lipophilic chemicals across plant cuticles: prediction from partition coefficients and molar volumes [J]. *Arch Environ Con Tox*, 1988, 17:7 – 12.
- [35] Buckley E H. Accumulation of airborne polychlorinated biphenyls in foliage [J]. *Science*, 1982, 216:520 – 522.
- [36] Nizzetto L, Jones K C, Gramatica P, *et al.* Accumulation of persistent organic pollutants in canopies of different forest types: role of species composition and altitudinal-temperature gradient [J]. *Environ Sci Technol*, 2006, 40:6580 – 6586.
- [37] Thomas G O, Sweetman A J, Ockenden W A, Mackay D, Jones K C. Air-pasture transfer of PCBs [J]. *Environ Sci Technol*, 1998, 32:936 – 942.
- [38] Kaupp H, McLachlan M S. Gas/particle partitioning of PCDD/Fs, PCBs, PCNs and PAHs [J]. *Chemosphere*, 1999, 38:3411 – 3421.
- [39] Alexander M. Biodegradation and bioremediation [M]. 2nd ed. San Diego, CA: Academic Press, 1999.
- [40] Mrozek E, Queen W H, Hobbs L L. Effects of polychlorinated biphenyls on growth of *Spartina alterniflora* Loisel [J]. *Environ Exp Bot*, 1983, 23:285 – 292.
- [41] 孟亚黎, 赵明亮, 赵晓松, 等. 青椒、西红柿对多氯联苯的吸收及在各部位中的分布 [J]. 吉林农业大学学报, 1993, 15:38 – 41.
- [42] Chekol T, Vough L R, Chaney R L. Phytoremediation of polychlorinated biphenyl contaminated soils: the rhizosphere effect [J]. *Environ Int*, 2004, 30:799 – 804.
- [43] Dzanor E K, Chekol T, Vough L R. Feasibility of using forage grasses and legumes for phytoremediation of organic pollutants [J]. *J Environ Sci Heal*, 2000, 35:1645 – 1661.
- [44] Macek T, Mackova M, Kas J. Exploitation of plants for the removal of organics in environmental remediation [J]. *Biotechnol Adv*, 2000, 18:23 – 34.
- [45] Macková M, Vrchotová B, Francová K, *et al.* Biotransformation of PCBs by plants and bacteria-consequences of plant-microbe interactions [J]. *Eur J Soil Biol*, 2007, 43:233 – 241.
- [46] Fletcher J S, Groeger A W, McFarlane J C. Metabolism of 2-chlorobiphenyl by suspension-cultures of Paul's Scarlet Rose [J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 1987, 39:960 – 965.
- [47] Rezek J, Macek T, Mackova M, Triska J, Ruzickova K. Hydroxy-PCBs, methoxy-PCBs and hydroxy-methoxy-PCBs: metabolites of polychlorinated biphenyls formed *in vitro* by tobacco cells [J]. *Environ Sci Technol*, 2008, 42:5746 – 5751.
- [48] Mackova M, Macek T, Ocenaskova J. Biodegradation of polychlorinated biphenyls by plant cells [J]. *Int Biodeter Biodegr*, 1991, 39:311 – 325.
- [49] Wilken A, Bock C, Bokern M, *et al.* Metabolism of different PCBs congeners in plant cell cultures [J]. *Environ Toxicol Chem*, 1995, 14:2017 – 2022.
- [50] Lee I, Fletcher J S. Involvement of mixed function oxidase systems in polychlorinated biphenyl metabolism in plant cells [J]. *Plant Cell Rep*, 1992, 11:97 – 100.
- [51] Kahn R, Durst F. Function and evolution of plant cytochrome P450 [J]. *Recent Adv Phytochem*, 2000, 34:151 – 189.
- [52] Chroma L, Mackova M, Kucerova P, *et al.* Enzymes in plant metabolism of PCBs and PAHs [J]. *Acta Biotechnol*, 2002, 22:35 – 41.
- [53] Chu, W K, Wong M H, Zhang J. Accumulation, distribution and transformation of DDT and PCBs by *Phragmites australis* and *Oryza sativa* L. : II. Enzyme study [J]. *Environ Geochem Heal*, 2006, 28:169 – 181.
- [54] Donnelly P K, Hegde R S, Fletcher J S. Growth of PCB-degrading bacteria on compounds from photosynthetic plants [J]. *Chemosphere*, 1994, 28:981 – 988.
- [55] 刘亚云, 陈桂珠. 植物修复多氯联苯研究进展 [J]. 应用生态学报, 2006, 17:325 – 330.
- [56] Strek H J, Weber J B, Shea P J, Mrozek E, Overcash M R. Reduction of polychlorinated biphenyl toxicity and uptake of carbon-14 activity by plants through the use of activated carbon [J]. *J Agric Food Chem*, 1981, 29:288 – 293.
- [57] Whitfield Åslund M L, Rutter A, Reimer K J, Zeeb B A. The effects of repeated planting, planting density, and specific transfer pathways on PCB uptake by *Cucurbita pepo* grown in field conditions [J]. *Sci Total Environ*, 2008, 405:14 – 25.