

文章编号: 100025013(2008)0120001205

植物对 PAHs 胁迫响应及植物修复研究进展

刘 泓¹, 叶媛蓓¹, 唐 玲², 崔 波²

(1. 福建农林大学 资源与环境学院; 2. 福建农林大学 生命科学学院, 福建 福州 350002)

摘要: 探讨国内外关于植物吸收多环芳烃(PAHs)的途径、PAHs 胁迫对植物生长的影响、植物对 PAHs 胁迫的生理响应,以及 PAHs 污染的植物修复等方面的研究进展。分析认为,目前的研究缺乏植物对 PAHs 胁迫响应的生物化学、分子机制的新途径,且现有的植物修复方法存在生物量较低、针对性不强、效率不高等缺点。最后,进一步展望值得探究的相关技术和问题。

关键词: 多环芳烃; 胁迫响应; 植物; 修复

中图分类号: X 503.23; O 625

文献标识码: A

多环芳烃(PAHs)是由 2 个或 2 个以上的苯环,以直链状、角状或串状排列组成的持久性有机污染物,人为活动特别是化工燃料的燃烧是环境中 PAHs 的主要来源^[1]。PAHs 在环境中的量虽然不高,但分布广泛,普遍存在于土壤、水和大气中。由于具有难降解、半挥发和长距离迁移等特点,随着人类活动及能源的开发利用,PAHs 在环境中的积累将会越来越多,尤其是在城市和工业地区^[27]。PAHs 对动物健康有着严重的影响,其代谢后所产生的活性电子代谢物是危及 DNA 的致癌物质^[8],而且 PAHs 在动物细胞中会引起活性氧的增加和细胞的死亡^[9]。近年来,有采用遗传工程、转基因植物、表达细菌等方法降解三硝基甲苯^[10],或用超表达的植物酶去降解三氯酚和其他酚类物质的研究^[11]。与微生物和动物相比,关于植物如何吸收、转运和降解,以及如何响应 PAHs 的细胞和分子机制的研究很少^[12]。

1 植物吸收 PAHs 的途径和机制

有研究认为,由于 PAHs 的强不溶性,所以它们应该被紧紧地固定在土壤颗粒中,几乎不能被生物降解^[13]。但也有研究指出,植物确实能从土壤中吸收 PAHs^[14]。研究认为,白杨树、松树、黑麦、燕麦、小麦、玉米、太阳花、大豆、豌豆及胡萝卜等耐受土壤中 PAHs 污染的能力较强^[15,17],一些 PAHs 如苯并芘和荧蒽在不同植物种类的细胞培养液中会产生代谢变化^[18,19]。Mc Cutcheon 等^[20]研究认为,植物中的致癌物质可与葡萄糖或谷胱甘肽结合,而被隔离在液泡或细胞壁中。ColonCarmona 等^[21]研究表明,PAHs 胁迫 21 d 的拟南芥幼苗,其致病相关蛋白 PR1 在 RNA 水平上被诱导表达。

Simonich 等认为,PAHs 进入植物体的途径主要有土壤到植物和空气到植物两种途径。土壤到植物体的途径是 PAHs 通过受污染土壤与植物根系之间的接触进入植物体的方式。PAHs 能否通过受污染的土壤与植物根系之间的接触进入植物体,主要取决于 PAHs 的水溶解度、亨利定律常数和辛醇/水分分配系数,以及土壤有机质质量比和植物的种类等因素。空气到植物的途径是 PAHs 从空气通过气态和颗粒态沉降到叶片的蜡质表皮,通过气孔吸收进入植物体^[22]。据报道,空气到植物的途径是植物体富集 PAHs 的主要途径。PAHs 沉降到植物体的状态,很大程度决定了它们是被吸收进入叶片,还是滞留在植物体表面。PAHs 在空气中存在状态(如气态或颗粒),是由空气温度、PAHs 理化性质及吸附层表面特征所共同决定^[23,24]。植物体叶表面的形态学特征在决定植物与空气相互作用过程中起重要作用,不同种类植物叶表面的形态、表皮蜡质化学成分、气孔数量和分布,以及绒毛的生长情况等都有很大不

收稿日期: 20071214

作者简介: 刘 泓(1968),女,副教授,博士,主要从事环境生态的研究。E-mail: fjauliuhong@163.com.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(D0510020)

同^[25]。据报道,叶绒毛能增强对空气中颗粒物的截获与吸滞,与无绒毛的叶片相比,它们有更大的表面积,并且会在叶表面的边缘形成相对静态空气层^[26]。另一方面,叶片有排水的生理现象,这样会消除一部分叶片上滞留的颗粒物^[27]。虽然已知不同种类的 PAHs 危害植物的程度不同^[28],但是其毒害机制尚未明确,植物对 PAHs 胁迫响应的生化与分子机制缺乏研究。

2 PAHs 胁迫对植物生长的影响

Ren 等^[29,30]报道了茼蒿、菲、奈对水萍的光诱导性毒害,认为植物的生长、失绿现象可以作为最终评价其光诱导毒害的指标,随着苯环的增加其毒害症状趋于明显;通过对水培油菜种子的萘、苊和茼蒿暴污试验,发现油菜种子在萌发过程中,根的数量降低,长度变短。Henner 等^[31]以 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的萘、菲、茼蒿和苯并[a]苊等 PAHs 水培玉米、大麦和紫花苜蓿等 8 种作物的种子。结果表明,在培养初期,所有作物种子的萌发均受到萘和菲的抑制,并且抑制的程度萘大于菲;而苯并[a]苊对种子的萌发则有促进作用。Back 等^[32]也有相似的报道,认为萘、菲、苊对玉米及红豆的毒害作用随苯环的增加而增加,且质量分数为 $0.001\% \sim 0.1\%$ 的 PAHs 可观察到其毒害症状。Maliszewska 等^[33]用茼蒿、苊等分别土培小麦、燕麦和玉米等 6 种作物,其结果表明,在培养初期,土壤中 PAHs 质量浓度低于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时对作物生长有刺激作用,最低的植物性毒害阈值为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。Wan 等^[34]用水芹种子发芽的毒害状况,评价了 PAHs 污染的生物修复效果。ColonCarmona 等^[21]研究认为,拟南芥可以吸收 3 环的 PAHs 菲,经菲胁迫的拟南芥外形症状表现为根、苗生长受抑制、香毛蒺畸形、根毛减少、叶片发黄、迟开花,并出现白斑,且白斑不久会变成坏死的组织。

3 植物对 PAHs 胁迫的生理响应

有关植物对 PAHs 胁迫生理响应的研究,主要集中在对低环芳烃萘、菲的研究上。刘建武等^[35]通过盆栽试验研究了萘污染 5 种水生植物生理指标的影响,结果表明,萘对水生植物具有毒害作用,叶绿素浓度及过氧化物酶(POD)活性可以作为水生植物受萘污染的指标。陆志强^[36]分析了萘和苊对红树植物秋茄幼苗的生长、光合代谢、水分代谢,以及膜保护系统的影响,探讨 PAHs 对红树植物秋茄的生理生态效应及植物性毒害的机理。刘宛等^[37]研究了短期菲胁迫对大豆幼苗超氧歧化酶(SOD)活性和丙二醛(MDA)浓度的影响,指出 SOD 活性可以作为大豆幼苗遭受短期菲胁迫的生物标记物。尹大强等以沉水植物为试验材料,通过模拟实验研究了菲的长期暴露对沉水植物生长状况,以及对丙二醛和蛋白质等生理生化指标的影响。孙娟等^[38]通过砂培白骨壤幼苗萘暴污实验,探讨萘的污染物的环境胁迫,对红树植物白骨壤幼苗萌发初期的幼苗萌生及子叶抗氧化酶活力和膜脂质过氧化作用的影响。杨志峰等^[39]通过砂培试验,研究了有机污染物苊对辣椒生理指标的影响。结果表明,在苊胁迫条件下,随着处理浓度的升高,辣椒生长受到明显抑制,生物量、株高及叶绿素显著下降,丙二醛(MDA)显著增加,在一定浓度范围内根系活力受到显著促进。Paskova 等^[40]研究 PAHs 及其氮杂环衍生物对高等植物的毒性时认为,植物的氧化胁迫响应是植物响应 PAHs 胁迫的早期警报,在胁迫条件下植物保护酶活性显著提高,脂质过氧化作用增强。

4 PAHs 污染的植物修复

许多研究指出,PAHs 在环境中是一种极为稳定的难降解物质,但因其广布性,一些环境微生物经过适应和诱导,可以对 PAHs 进行代谢分解。生物修复技术(Bioremediation)具有二次污染少、安全、无毒、价廉等优点,因此,利用生物修复技术治理 PAHs 污染的研究非常活跃。植物修复是利用植物原位处理污染土壤、水、污泥的一种方法,植物可通过吸收、固定、挥发污染物,并能释放一些分泌物、酶以利于降解有机污染物,并可刺激根区微生物的活性来进行 PAHs 的污染修复^[41]。

骆永明等^[42]报道了利用土壤微生物、菌根、生物反应器、紫花苜蓿及黑麦草,对土壤 PAHs(苯并[a]苊、菲)污染进行修复的研究。徐建民等^[43]认为,土壤有机质及溶解性有机质(DOM)的变化,使重金属(Pb、Zn、Cu)污染的土壤能够吸附更多的 PAHs 菲。郑天凌等^[44]也报道了海洋 PAHs 的污染及微生物

物的修复. Simonichi 等^[45]研究表明, 从污染源排放到大气中的 PAHs, 一半左右被植物所吸收、净化. Ling 等^[46]用高富集铈的栽培植物三线苋进行了 PAHs 类污染物菲和芘的土壤污染修复试验, 发现与对照组相比, 三线苋可以显著地减少污染土壤中菲和芘的浓度, 富集效果明显. Qiu 等^[47]、Chekol 等^[48]、Vervaeke 等^[49]和 Ke 等^[50]分别用草本植物、饲料作物、柳树和红树林等不同植物进行了土壤或污泥的 PAHs 污染修复实验, 也证明了有一定效果. 可见, 利用高富集植物对 PAHs 污染进行生物修复的理论与技术已有一定基础. 然而, 栽培现有高富集植物虽然能一定程度地缓解 PAHs 污染的危害, 但缺点是其生物量较低、针对性不强、效率不高.

5 研究展望

借鉴现代分子生物学和基因工程理论和方法的研究成果, 探明植物对 PAHs 等持久性污染物的响应及其分子调控机制, 克隆关键基因, 并转化到高生物量的生物中, 为环境污染治理的生物修复技术开辟了一条有前景的途径. ColonCarmona 等认为, 拟南芥可以吸收 3 环的多环芳烃菲, 是利用基因工程进行 PAHs 修复的潜在材料¹. 明确指出, 拟南芥对多环芳烃污染响应的分子机制, 有望成为 PAHs 的生物修复提供可能的途径.

差异蛋白质组学(Differential Proteomics)是蛋白质组学一个重要研究方法, 着重于寻找和筛选任何有意义的因素引起的两个遗传背景相同的样本之间的差异蛋白谱¹. 它可以揭示某一生物对外界生物或非生物的胁迫的响应途径, 同时获得对某些关键蛋白的性质和功能的信息. 然而, 目前尚未有利用差异蛋白质组学方法研究植物对多环芳烃污染响应的差异蛋白质分析的研究报道. 同时, 利用 TCDNA 插入失活突变体库, 筛选抗 PAHs 胁迫的拟南芥突变体; 针对目的基因或目的基因家族的同源序列或是保守序列, 构建可转录生成与此序列反向互补的 RNAi 载体, 再通过 RNAi 技术研究相应的编码基因功能; 针对由于功能冗余或功能微效的基因所产生的失活突变体与野生型之间表型差异不显著的问题, 且 TCDNA 筛选无表型的情况下, 可同时构建这些基因的过量表达突变体; 在 PAHs 胁迫下, 分析其萌发率、根长、叶片形状及细胞学变化等表型变化情况, 来分析相关基因功能等¹. 这些技术都可以作为进一步研究 PAHs 胁迫相关基因功能的途径, 为 PAHs 污染的生物修复提供可利用的基因资源.

参考文献:

- [1] SOCLO H H, CARRIGUES P H, EWALD M. Origin of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coastal marine sediments: Case studies in Cotonou (Benin) and Aguitaine (France) areas [J]. Mar Pollut Bull, 2000, 40: 387-396.
- [2] 丁克强, 骆永明, 刘世亮, 等. 黑麦草对土壤中苯并[a]芘动态变化的影响[J]. 土壤学报, 2004, 41(3): 348-353.
- [3] ZHANG Z L, HONG H S, ZHOU J L. Phase association of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Minjiang River Estuary, China[J]. Sci Total Environ, 2004, 323(13): 71-86.
- [4] 张枝焕, 陶 澍, 沈伟然, 等. 天津地区主要河流沉积物中多环芳烃化合物的组成与分布特征[J]. 环境科学学报, 2005, 25(11): 1507-1516.
- [5] 郭志顺, 罗财红, 张卫东, 等. 三峡库区重庆段江水中持久性有机污染物污染状况分析[J]. 中国环境监测, 2006, 22(4): 45-48.
- [6] 陈畅曙, 刘 娜, 付云娜, 等. 我国水体沉积物中多环芳烃的污染现状与生态效应[J]. 辽宁城乡环境科技, 2006, 26(3): 57-59.
- [7] 林 刚, 孙贵范, 田村宪治, 等. 抚顺大气悬浮颗粒物、PAHs 和 NPAHs 污染调查[J]. 中国公共卫生, 2005, 21(5): 604-606.
- [8] WANG J Q, WEYAND E H, HARVEY R G. Synthesis of suspected carcinogenic metabolites of 7H-benzo[c]flu2orene, a coal tar component implicated in causation of lung tumors [J]. J Org Chem, 2002, 67, 6216-6219.
- [9] BURCZYNSKI M E, LIN H K, PENNING T M. Isoform-specific induction of a human aldo-keto reductase by polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), electrophiles, and oxidative stress: Implications for the alternative pathway of PAH activation catalyzed by human dihydrodiol dehydrogenase [J]. Cancer Res, 1999, 59, 6070-614.
- [10] HANNINK N, ROSSER S J, FRENCH C E, et al. Phytodetoxification of TNT by transgenic plants expressing a bacterial nitroreductase[J]. Nat Biotechnol, 2001, 19: 1168-1172.

- [11] WANG G D, LIQ J, LUO B, et al. Explanta phytoremediation of trichlorophenol and phenolic allelochemicals via an engineered secreted laccase[J]. *Nat Biotechnol*, 2004, 22: 893-897.
- [12] HARVEY P J, CAMPANELLA B F, CASTRO P M L, et al. Phytoremediation of polyaromatic hydrocarbons, anilines and phenols[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2002, 9: 29-47.
- [13] PILONOSMITS E. Phytoremediation [J]. *Annu Rev Plant Biol*, 2005, 56: 15-39.
- [14] KUHN A, BALLACH H J, WITTIG R. Studies in the biodegradation of 5 PAHs (phenanthrene, pyrene, fluoranthene, chrysene, and benzo(a)pyrene) in the presence of rooted poplar cuttings [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2004, 11: 23-32.
- [15] RENTZ J A, CHAPMAN B, ALVAREZ P J, et al. Stimulation of hybrid poplar growth in petroleum-contaminated soils through oxygen addition and soil nutrient amendments [J]. *Int J Phytorem*, 2003, (5): 57-72.
- [16] APRILL W, SIMS R. Evaluation of the use of prairie grasses for stimulating polycyclic aromatic hydrocarbon treatment in soil [J]. *Chemosphere*, 1990, (20): 253-265.
- [17] LIST E H H, ALEXANDER M. Plant-promoted pyrene degradation in soil [J]. *Chemosphere*, 2000, (40): 7-10.
- [18] SANDERMANN H, SCHEEL D, TRENCK T. Use of plant cell cultures to study the metabolism of environmental chemicals [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 1984, 8: 167-182.
- [19] KOLB M, HARMS H. Metabolism of fluoranthene in different plant cell cultures and intact plants [J]. *Environmental Science and Chemistry*, 2000, 19: 1304-1310.
- [20] MC CUTCHEON S C, SCHNOOR J L. Overview of phytotransformation and control of wastes [C]. MC CUTCHEON S C, et al. *Phytoremediation: Transformation and Control of Contaminants*. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2003: 305-8.
- [21] ALKIO M, TABICJOL T M, Wang X C, et al. Stress responses to polycyclic aromatic hydrocarbons in Arabidopsis include growth inhibition and hypersensitive response-like symptoms [J]. *J Exp Bot*, 2005, 56(421): 2983-2994.
- [22] 陆志强. 多环芳烃对秋茄幼苗的生理生态效应及其在九龙江口红树林湿地的含量与分布[D]. 厦门: 厦门大学, 2002.
- [23] PANKOW J F. Review and comparative analysis of the theories on partitioning between the gas and aerosol particulate phases in the atmosphere [J]. *Atmos Environ*, 1987, (1): 275-283.
- [24] BIDDLEMAN F. Atmospheric processes [J]. *Environ Sci Technol*, 1988, 21: 363-367.
- [25] TRAPP S, MCFARLANE J C. *Plant contamination modeling and simulation of organic chemical process* [M]. London: Lewis, 1995.
- [26] BAKKER M I, TOLL J, KOLL; FEL C. Atmospheric deposition of SOC to plants [J]. *American Chemical Symposium Series*, 2000, 16: 218-236.
- [27] NEOMJIOS C, BARTHLOTT W. Characterisation and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces [J]. *Ann Bot*, 1997, 79: 667-677.
- [28] BAEK K H, KIM H S, OH H M, et al. Effects of crude oil, oil components, and bioremediation on plant growth [J]. *J Environ Sci Health*, 2004, 39: 2473-2484.
- [29] REN L, HUANG X D, MCCONKEY B J, et al. Photoinduced toxicity of three polycyclic aromatic hydrocarbons (fluoranthene, pyrene, and naphthalene) to the duckweed *Lemna gibba* L. G3 [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 1994, 28(2): 160-171.
- [30] REN L, ZEILER L F, DIXON D G. Photoinduced effects of polycyclic aromatic hydrocarbons on *Brassica napus* (Canola) during germination and early seedling development [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 1996, 33: 73-80.
- [31] HENNER P, SCHIAVON M, DRUELLE V, et al. Phytotoxicity of ancient gaswork soils: Effect of polycyclic aromatic hydrocarbons PAHs on plant germination [J]. *Org Geochem*, 1999, 30: 275-284.
- [32] BAEK K H, KIM H S, OH H M, et al. Effects of crude oil, oil components, and bioremediation on plant growth [J]. *Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng*, 2004, 39(9): 2463-2472.
- [33] MALISZEWSKA K B, SMRECZAK B. Ecotoxicological activity of soils polluted with polycyclic aromatic hydrocarbons PAHs effect on plants [J]. *Environ Technol*, 2000, 21: 1099-1110.
- [34] WAN C K, WONG J W, FANG M. Effect of organic waste amendments on degradation of PAHs in soil using thermophilic composting [J]. *Environ Technol*, 2003, 24(1): 23-30.

- [35] 刘建武, 林逢凯, 王 郁, 等. 多环芳烃(萘)污染对水生植物生理指标的影响[J]. 华东理工大学学报: 自然科学版, 2002, 28(10): 5200524.
- [36] 陆志强. 不同浓度萘和芘处理对红树植物秋茄胚轴萌发和幼苗生长的影响[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2005, 44(4): 5800583.
- [37] 刘 宛, 李培军, 周启星, 等. 短期菲胁迫对大豆幼苗超氧化物歧化酶活性及丙二醛含量的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(4): 5810584.
- [38] 孙 娟, 郑文教, 赵 胡. 萘胁迫对白骨壤种苗萌生及抗氧化作用的影响[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2005, 44(3): 436.
- [39] 杨志峰, 史衍玺. 芘胁迫对辣椒生理指标的影响[J]. 山东农业科学, 2006, (4): 20022.
- [40] PASKOVA V, HILSCHEROVA K, FELDMANNOVA M, et al. Toxic effects and oxidative stress in higher plants exposed to polycyclic aromatic hydrocarbons and their NOheterocyclic derivatives [J]. Environ Toxicol Chem, 2006, 25(12): 323803245.
- [41] TANG C S, SUN W H H, TOMA M et al. Evaluation of agricultural based phytoremediation in pacific island ecosystems using trisector planters [J]. Int J Phytorem, 2004, 6 (1): 17033.
- [42] 丁克强, 骆永明, 刘世亮, 等. 利用改进的生物反应器研究不同通气条件下土壤中菲的降解[J]. 土壤学报, 2004, 41(2): 2450251.
- [43] GAO Y Z, XIONG W, LING W T, et al. Sorption of phenanthrene by soils contaminated with heavy metals[J]. Chemosphere, 2006, 65(8): 135301361.
- [44] 郑天凌, 骆苑蓉, 曹晓星, 等. 高分子量多环芳烃(苯并[a]芘)的生物降解研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2006, 12(6): 884089.
- [45] SIMONICH S L, HITES R A. Vegetation/atmosphere partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. Environ Sci Technol, 1994, 28(5): 9380942.
- [46] LING W T, GAO Y Z. Promoted dissipation of phenanthrene and pyrene in soils by amaranth (Amaranthus tricolor L.) [J]. Environ Geol, 2004, 46 (5): 5530560.
- [47] QIU X J, LELANDT W, SHAH S I, et al. Grass remediation for clay soil contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. Phytoremediation of Soil and Water Contaminants Acs Symposium Series, 1997, 664: 1860199.
- [48] CHEKOL T, VOUGH L R, CHANEY R L. Plant/soil/contaminant specificity affects phytoremediation of organic contaminants [J]. Int J Phytorem, 2002, 4 (1): 17026.
- [49] VERVAEKE P, LUYSSAERT S, MERTENS J, et al. Phytoremediation prospects of willow stands on contaminated sediment: a field trial [J]. Environ Pollut, 2003, 126 (2): 2750282.
- [50] KE L, WANG W Q, WONG T W, et al. Removal of pyrene from contaminated sediments by mangrove microcosms [J]. Chemosphere, 2003, 51 (1): 25034.

Advances in Research of Plant Response to PAHs Stress and Plant Based Bioremediation

LIU Hong¹, YEI Yuanbei¹, Tang Ling², CUI Bo²

(1. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University;

2. College of Life Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: This paper reviewed the absorption pathways of plant for PAHs, the effects of PAHs stress on plant growth, the physiological response of plant to PAHs stress and the plant based bioremediation for PAHs pollution. It concluded that information on biochemistry and molecular biology of PAH stress responses in plants was lacking, and the existing methods of plant based bioremediation lack of biomass, pertinency, and efficiency. In addition, further research of plant response to PAHs stress were discussed.

Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons; stress response; plant; remediation

(责任编辑: 黄仲一)