

大气污染的植物修复

骆永明 查宏光 宋 静 李 华

(中国科学院南京土壤研究所 南京 210008)

摘 要 本文综述了近年来国际上利用植物修复大气污染的研究现状与趋势。认为人类可以有意识地选择单一的或组合的野生植物和人工植物,利用植物对大气污染物的吸附、吸收、转化、同化、降解等功能,形成和发展经济、高效、持续、安全的大气污染绿色修复理论和技术,实现污染大气环境的生物修复

关键词 大气污染;植物修复

大气污染是大气中污染物含量达到一定程度,对环境、生态和人体健康产生影响或造成损害的现象。随着世界各地工业化、城市化和现代化的迅速发展,由人为因素造成的大气污染已成为人类无法回避的现实问题。大气中一次污染物与二次污染物的复合污染,有机污染物与无机污染物的混合污染和颗粒物、颗粒携带污染物与气态污染物的交织污染,已直接或间接地威胁到了陆地生态系统和人类自身的健康与生存。控制和治理大气污染是维持和提高区域性和全球性环境质量、保障生态环境卫生和人体健康的迫切需要,也是社会经济可持续发展的重大需求。

利用植物修复技术来治理大气污染尤其是近地表大气的混合污染是近年来国际上正在加强研究和迅速发展的前沿性新课题。大气污染的植物修复是一种以太阳能为动力,利用植物的同化或超同化功能净化污染大气的绿色植物技术。这种生物修复过程可以是直接的,也可以是间接的,或者两者同时存在。植物对大气污染的直接修复是植物通过其地上部分的叶片气孔及茎叶表面对大气污染物的吸收与同化的过程,而间接修复则是指通过植物根系或其与根际微生物的协同作用清除干湿沉降进入土壤或水体中大气污染物的过程。最近,Omasa 等^[1]提出了具有超吸收和代谢大气污染物能力的天然或转基因的超同化植物(hyperassimilator)的概念。超同化植物可将含有植物所需营养元素的大气污染物如氮氧化物、硫氧化物等,作为营养物质源高效吸收与同化,同时促进自身的生长。这种现象也可称为超同化作用(hyperassimilation)。近来,Morikawa 和 Takahashi^[2]提出了另一概念,即所谓的“气-气转化植物”。随着对大气污染的植物修复研究的不断深入,更多的新概念和新内容补充到现有的这种绿色生物修复理论与技术体系中是可以预料的。

应该指出的是实际上植物对大气污染的净化作用很早就被注意到并得到应用,例如,在公路边种植植物以减轻汽车造成的污染和在一些化工厂或类似的人为污染源附近种植大量植物来减轻污染并美化环境等。然而,明确地提出大气污染的植物修复却不仅仅是一个新的名词,而是环境污染植物修复这一技术的理论体系不断发展的结果,其中包括污染大气的植物修复分子机理的揭示、有关植物生理方面研究进展的取得,以及用来提高植物修复功能的手段尤其是基因工程技术的突破。

利用植物修复大气污染的技术及其原理的研究在国际上正在崛起,发展潜力很大,应用前景明显。这种新动向和新趋势已受到国内学者的注意,但是有关的专门研究在国内还非常有限。污染土壤和水体环境的植物修复^[3,4]已成为国内外环境污染修复前沿领域的热门研究课题。在本文,作者将对污染大气特别是化学性污染大气环境的植物修复作一综述性介绍,旨在推动国内有关大气污染的植物修复的理论创新和技术进步。

1 大气污染类型与植物修复

近地表大气中污染物一般可分成 3 大类:物理性污染物、生物性污染物和化学性污染物,因而,相应地有物理性大气污染、生物性大气污染和化学性大气污染。污染的大气环境中通常有多种污染物复合或混合,并且污染物具有长距离迁移和干湿沉降等特性。由于植物的种类、群落及其生态习性与功能的差异,不同的植物可以在不同的时空尺度上对近地表(包括室内)空气污染进行修复与净化。

粉尘是主要的物理性大气污染物。绿色植物都有滞尘的作用,但其滞尘量的大小与树种、林带宽度、种植状况和气象条件有关。总叶面积大、叶面粗糙多绒毛、能分泌粘性油脂或浆汁的物种,如核桃、板栗、臭椿、侧柏等可被选为滞尘树种,用于防尘林带的建立^[5]。

空气中一些原有的微生物(如芽孢杆菌属、无色杆菌属、八迭球菌属及一些放线菌、酵母菌和真菌等)和某些病原微生物都可能成为经空气传播的病原体,即生物性大气污染物。由于空气中的病原体一般都附着在尘埃或飞沫上随气流移动,绿色植物的滞尘作用可以减小病原体在空气中的传播范围,并且植物的分泌物具有杀菌作用,因此植物可以减轻生物性大气污染^[6]。

大气环境中的毒害化学物质是化学性大气污染物。植物除了可以监测大气的化学性污染外,更重要的是植物可以吸收大气中的化合物或毒害性化学物质。其中最为典型同时也最重要的是植物通过光合作用对大气中 CO₂ 的吸收和同化。植物可以通过多种途径修复化学性大气污染物,现就其修复过程与机理和影响因素作重点介绍如下。

2 化学性大气污染植物修复的过程与机理

植物修复化学性大气污染的主要过程是持留和去除。持留过程涉及植物截获、吸附、滞留等,去除过程包括植物吸收、降解、转化、同化等。有的植物有超同化的功能,有的植物具有多过程的作用机制。

2.1 植物吸附与吸收修复

植物对于污染物的吸附与吸收主要发生在地上部分的表面及叶片的气孔。在很大程度上,吸附是一种物理性过程,其与植物表面的结构如叶片形态、粗糙程度、叶片着生角度和表面的分泌物有关。植物可以有效地吸附空气中的如浮尘、雾滴等悬浮物及其吸附着的污染物。已有实验^[7,8]证明植物表面可以吸附亲脂性的有机污染物,其中包括多氯联苯(PCBs)和多环芳烃(PAHs),其吸附效率取决于污染物的辛醇-水分配系数。Simonich 和 Hites^[9]认为植被是从大气中清除亲脂性有机污染物最主要的途径,其吸附过程是清除的第一步。

植物可以吸收大气中的多种化学物质,包括 SO₂、Cl₂、HF、重金属(Pb)等^[10]。植物吸收大气中污染物主要是通过气孔,并经由植物维管系统进行运输和分布。对于可溶性

的污染物包括 SO_2 、 Cl_2 和 HF 等,随着污染物在水中溶解性增加,植物对其吸收的速率也会相应增加。湿润的植物表面可以显著增加对水溶性污染物的吸收。光照条件由于可以显著地影响植物生理活动,尤其是控制叶片气孔的开闭,因而对植物吸收污染物有较大的影响^[11]。对于挥发或半挥发性的有机污染物,污染物本身的物理化学性质包括分子量、溶解性、蒸气压和辛醇-水分配系数等都直接地影响到植物的吸收。气候条件也是影响植物吸收污染物的关键因素。有报道^[8]认为大气中约 44% 的 PAHs 被植物吸收,从大气中去除。该报道还认为,植物在春季和秋季吸收能力较强,主要吸收较高分子量的 PAHs,虽然植物不能完全降解被吸收的 PAHs,但植物的吸收有效地降低了空气中的 PAHs 浓度,加速了从环境中清除 PAHs 的过程。Corneji 等^[12]发现植物可以有效地吸收空气中的苯、三氯乙烯和甲苯,不同植物对不同污染物的吸收能力有较大的差异。这一结果也说明选择合适的植物种类是取得植物修复成功的一个关键环节。

对植物吸收重金属机理的了解多来自于植物从土壤或水中吸收重金属的研究结果。对于植物如何从空气中吸收重金属的机理性认识还很有限。但是,植物可以吸收重金属如 Pb 却是一个已知的事实,一旦重金属进入植物的组织或细胞,植物中的植物金属硫蛋白(MT)、植物螯合肽(PC)、游离的组氨酸、膜上特异性转运蛋白等物质将为重金属在植物体内的存在形态、运输和分布起重要的作用。

近年开展的植物吸收有机污染物的研究提出了多种平衡模型如一室质量平衡模型^[13]和三室质量平衡模型^[14]等,这些模型拟合了污染物在植物体内与体外的平衡状况,分析了影响平衡的诸多因素。有的研究确认了植物细胞膜上具有结合有 ATP 的盒式转运体(ABC),这种转运体可以识别共轭结合着有机污染物的氧化型谷胱甘肽或结合着金属的植物螯合肽,并将这些物质转运到细胞或液泡中^[15]。这些结果有助于进一步了解和提高植物吸收污染物的能力。

对于已进入植物体的污染物,有些可以通过植物的代谢途径被代谢或转化,有些可以被植物固定或隔离在液泡中^[16]。虽然会有一部分被植物吸收的污染物或被转化了的产物重新回到大气中,但这一过程是次要的,不致于构成新的大气污染源。但是,如何防止植物体内的重金属和其它有毒有害污染物进入食物链是一个需要关注的问题。

2.2 植物降解修复

植物降解是指植物通过代谢过程来降解污染物或通过植物自生的物质如酶类来分解植物体内外来污染物的过程。目前,对有机污染物在植物体内的降解机理的了解远远少于在动物或微生物中的了解。Sandermann^[17, 18]认为植物含有一系列代谢异生素的专性同功酶及相应的基因。其代谢的主要途径与在动物中的相似,但往往更复杂,还有一个显著的不同点是植物将代谢的产物以被束缚的状态保存。参与植物代谢异生素的酶主要包括:细胞色素 P450、过氧化物酶、加氧酶、谷胱甘肽 S-转移酶、羧酸酯酶、O-糖苷转移酶、N-糖苷转移酶、O-丙二酸单酰转移酶和 N-丙二酸单酰转移酶等。而能直接降解有机污染物的酶类主要为:脱卤酶、硝基还原酶、过氧化物酶、漆酶和胍水解酶等^[19]。Lee 和 Fletcher^[20]认为主要是细胞色素 P450 而不是过氧化物酶导致了植物体内 PCBs 的氧化降解。Kas 等^[21]观察到几种植物在无菌培养条件下能有效地降解多种 PCBs。Doty 等^[22]将人的细胞色素 P450 2E1 基因转入烟草后提高了转基因植株氧化代谢三氯乙烯(TCE)和二溴乙烯(EDB)的功能约 640 倍。Gordan 等^[23]通过同位素标记的实验表明,植物中的酶可以直

接降解 TCE, 先生成三氯乙醇, 再生成氯代乙酸, 最后生成 CO_2 和 Cl_2 。还有报道认为, 植物体内的脂肪族脱卤酶也可以直接降解 TCE^[24]。Langebartels 和 Harms^[25] 的研究表明大豆和小麦的细胞悬浮培养物可以代谢五氯苯酚。至于植物能否在地上部分茎叶的表面分泌酶类而直接降解吸附在其表面的大气污染物还未见报道, 有待探索。

对于一些在植物体内较难降解的污染物如 PCBs, 将动物或微生物体内能降解这些污染物的基因转入植物体内可能是一种好办法。这种基因工程的手段不仅能提高植物降解有机污染物的能力, 还可以使植物修复具有一定的选择性和专一性。这也是基因工程技术的一个重要应用领域^[26]。人们或许可以利用多年来对微生物降解污染物研究的成果和信息, 设计出自然界原先并不存在的污染物复合降解方案。植物相对于微生物在环境修复方面有一些优势, 例如植物修复不需要向环境中释放降解菌, 因而更易为公众所接受; 植物修复通常不需要无菌的生长条件和有机营养物; 植物修复可以在花费很低的情况下获得较大的生物量; 植物可以很容易地进行繁殖和收获^[27]。尽管在植物转基因工程方面还需要做很多基础性研究工作, 如选择合适的外源基因和宿主, 如何使转基因植物持续高效地表达外源基因以及生物安全问题等^[28], 但是通过转基因植物来高效降解大气环境中难降解污染物的前景是诱人的。

2.3 植物转化修复

植物转化是指利用植物的生理过程将污染物由一种形态转化为另一种形态的过程。植物转化过程与植物降解过程有一定的区别, 因为转化后的污染物分子结构不一定比转化前的更简单。转化后产物还有可能比转化前物质具更高或更低的生物毒性, 但一般对植物本身无毒或低毒。对于这两种不同的转化结果, 毒性提高的可称之为植物增毒作用, 毒性降低的称之为植物解毒作用。如何防止植物增毒和如何强化植物解毒是利用植物转化修复大气污染物的关键。使植物将有毒有害的污染物转化为低毒低害或完全无毒无害的物质应是主攻方向。例如, 利用基因工程技术使植物将空气中的 NO_x 大量地转化为 N_2 或生物体内的氮素。臭氧是近地表大气中主要的二次污染物, 可通过产生活性氧对动、植物造成伤害。可以利用专性植物有效地吸收空气中的臭氧 (包括其它的光氧化物), 并利用其体内一系列的酶如超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶、过氧化氢酶等和一些非酶抗氧化剂如维生素 C、维生素 E、谷胱甘肽等进行转化清除^[29]。

通常, 植物不能将有机污染物彻底降解为 CO_2 和 H_2O , 而是经过一定的转化后隔离在植物细胞的液泡中或与不溶性细胞结构如木质素相结合^[30], 也有人认为一旦有机污染物进入植物体首先进行的就是木质化的过程^[19]。因此, 植物转化是植物保护自身不受污染物影响的重要生理反应过程。植物转化需要有植物体内多种酶类的参与, 其中包括乙酰化酶、巯基转移酶、甲基化酶、葡糖醛酸转移酶和磷酸化酶等。具有极性的外来化合物可以与葡糖醛酸发生结合反应^[5]。

2.4 植物同化和超同化修复

植物同化是指植物对含有植物营养元素的污染物的吸收, 并同化到自身物质组成中, 促进植物体自身生长的现象。除了以上所提到的 CO_2 外, 含有植物营养元素的污染物主要指气态的含硫化合物和含氮化合物。植物可以有效地吸收空气中的 SO_2 , 并迅速将其转化为亚硫酸盐至硫酸盐, 再加以同化利用。对于大气中氮氧化合物的同化是目前一个研究热点^[1]。从天然植物中筛选或通过基因工程手段培育“超同化植物”及其理论与技术的发展

是今后一个重要而有应用前景的研究工作。Morikawa 等^[31, 32]研究了 217 种天然植物同化 NO_2 的情况, 结果发现不同植物同化能力的差异达 600 倍, 其中 Solanaceae 和 Salicaceae 两个科中的植物具有较高的同化 NO_2 能力, 可用来筛选“嗜 NO_2 植物”。

植物体内与 NO_2 代谢有关的酶和基因的研究已比较清楚。所涉及的酶类主要为硝酸盐还原酶 (NR)、亚硝酸盐还原酶 (NiR) 和谷氨酰胺合成酶 (GS)。这几种酶的蛋白质性质、酶的组成、酶促反应的机理、基因的表达调控在 Omasa 等的文章^[1]中已有比较详细的阐述。这几种酶的基因都已经被成功地转入了受体植株中, 并随着转入基因的表达和相应酶活性的提高, 转基因植株同化 NO_2 的能力都有了不同程度的提高^[33~35]。这些研究成果不仅为培育高效修复大气污染的植物提供了快捷的途径, 同时也为修复植物的生理基础研究提供了新的实验工具。

3 大气污染植物修复的限制因素与研究展望

大气污染是一个复杂的并涉及到多方面的环境问题。植物修复能否有效地修复大气污染物和净化大气环境, 受到诸多因素的影响和限制。这些因素除了来自植物本身外, 还来自气候的、土壤的、污染物的以及公众环境修复意识的等方面。

植物修复与植物生命活动密不可分, 因为植物只有在其具有旺盛的生命活力时才有可能对大气污染进行有效地修复。所以, 影响或抑制植物生命活动的因素都将影响或抑制植物的修复。对于植物修复最大的限制因素无疑是气候、土壤条件等与植物生长条件相关的因素。如何在极端的气候和环境条件下利用植物对大气污染进行修复是一个棘手的问题。植物在不同年龄、不同季节表现出的修复能力不同也是植物修复应用中的一个重要限制因素。针对不同气候环境和土壤条件, 构建不同生态型功能植物的组合以及优化农艺管理措施是一项能实现最佳植物修复效果的研究工作。高等植物对一些对人或动物危害较大的污染物如 CO 不仅不敏感, 也很少吸收^[36], 而且同时还会由于植物叶绿素的光解产生一定量的 CO^[37]。如何解决此类问题将是今后植物修复大气污染物基础研究工作中的一个重要内容。植物修复的本身除有耗时长的缺陷外, 同时还存在其它一些限制因素^[38], 如植物修复受到污染物浓度的限制, 有毒污染物有可能在植物体中转化为毒性更强的物质, 所吸收的污染物有可能又重新释放到环境中或通过食物链的生物放大而污染等。如何解决这些问题将是植物修复能否投入实际应用的关键。

虽然这些限制因素对大气污染的植物修复提出了挑战, 但是与此同时也给这种生物修复技术的研究与发展带来了机遇。应该看到的是, 无论是近地表大气污染植物修复的理论本身还是其应用性的研究都处于刚刚起步阶段, 并在迅速发展。国际上在这方面的研究进展为大气污染绿色生物修复技术走向应用提供了可能性。这种污染大气生物修复的思想及其技术对城市园林绿化、环境规划和生态环境建设具有直接的指导意义和应用价值。迫切需要的是运用生物学、化学、土壤科学、环境科学、农学等多学科的知识, 交叉、综合地开展研究。

人们利用自然植物资源不仅修复已受损的土、水栖身地^[3, 4], 而且同时可以修复栖身地的大气环境, 从而改善和提高整体环境质量, 造福于人类。这种利用自然生物资源来修复自然环境污染的思路与策略必将促进环境友好、经济高效、持续健康的生物修复的理论创新和技术发展。

参 考 文 献

- 1 Omasa K., Saji H., Youssefian S. and Kondo N., Air pollution and plant biotechnology— prospects for phytomonitoring and phytoremediation. Tokyo: Springer-Verlag 2002, 383 ~ 401
- 2 Morikawa H., and Takahashi M., Remediation of soil, water and air by naturally occurring and transgenic plants. In:Gamma Field Symposia No.39, Japan: NIAR, MAFF, 2000, 81 ~ 101
- 3 骆永明. 污染土-水环境的植物修复 — 一种绿色净化技术.《迈向 21 世纪的土壤科学》, 中国土壤学会第九次全国代表大会论文集综合卷. 南京: 中国土壤学会编, 1999,135 ~ 138
- 4 骆永明. 金属污染土壤的植物修复. 土壤, 1999,31 : 261 ~ 265
- 5 熊治廷. 环境生物学. 武汉: 武汉大学出版社 2000, 74 ~ 90, 519 ~ 520
- 6 Cunningham S.D. and Ow D.W.. Promises and prospects of phytoremediation. Plant Physiol., 1996, 110: 715 ~ 719
- 7 Meredith M.L. and Hites R.A. Polychlorinated biphenyl accumulation in tree bark and wood growth rings. Environ. Sci. Technol., 1987, 21:709 ~ 712
- 8 Trapp S., Miglioranza K.S.B. and Mosbek H., Sorption of lipophilic organic compounds to wood and implication for their environmental fate. Environ. Sci. Technol., 2001, 35:1561 ~ 1566
- 9 Simonich S.T. and Hites R.A.. Importance of vagatation in removing polycyclic aromatic hydrocarbons from the atmosphere. Nature, 1994, 370:49 ~ 51
- 10 李汉卿, 谢文焕, 傅纯彦, 李得知. 环境污染与植物. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1998, 210 ~ 229
- 11 Treshow M.. Air pollution and plant life. New York US : John Wiley & Sons 1984, 417 ~ 45
- 12 Comejo J.J., Munoz F.G., Ma C.Y. and Stewart A.J.. Studies on the decontamination of air by plant, Ecotoxicology, 1999, 8:311 ~ 320
- 13 Trapp S. and Matthies M. Geneic one-compartment model for uptake of organic chemicals by foliar vegetation. Environ. Sci. Technol., 1995, 29:2333 ~ 2338
- 14 Paterson S. and Mackay D.. A modal of organic chemical uptake by plant from soil and the atmosphere. Environ. Sci. Technol., 1994, 28:2259 ~ 2266
- 15 Tommasini R., Vogt E., Fromenteau M., Hortensteiner S., Matile P., Amrhein N. and Martinoia E.. An ABC-transporter of *Arabidopsis thaliana* has both glutathione-conjugate and chlorophyll catabolite transport acitivity. Plant J., 1998 13:773 ~ 780
- 16 Alkorta I. and Garbisu C.. Phytoremediation of organic contaminants in soils. Bioresour. Technol., 2001, 79:273 ~ 276
- 17 Sandermann H..High plant metabolism of xenobiotics: The green liver concept. Pharmacogenetics, 1994, 4:225 ~ 241
- 18 Sandermann H.. Plant metabolism of xenobiotics. Trends Biochem Sci, 1992, 17:82 ~ 84
- 19 Schoor J.L., Light L.A., McCutcheon S.C., Wolfe N.L. and Carreira L.H.. Phyremedaition of organic and nutrient contaminants. Environ. Sci. Technol., 1995, 29: 318A ~ 323A
- 20 Lee I. and Fletcher J.S.. Involvement of mixed function oxidase systems in PCB metabolism in plant cells. Plant Cell Reports, 1995, 11:250

- 21 Kas J., Burkard J., Demnerova K., Kosta J., Macek T., Mackova M. and Pazlarova J.. Perspectives in biodegradation of alkanes and PCBs. *Pure Appl. Chem.*, 1997, 69:2357 ~ 2369
- 22 Doty S.L., Shang T.Q., Wilson A.M., Tangen J., Westergreen A.D., Newman L.A., Strand S.E., and Gordon M.P.. Enhanced metabolism of halogenated hydrocarbons in transgenic plants containing mammalian cytochrome P450 2E1. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2000, 97:6287 ~ 6291
- 23 Gordon M., Choe N., Duffy J., Ekuan G., Heilman P., Muiznieks I., Ruszaj M., Shurtleff B.B., Strand S., Wilmoth J. and Newman L.A., Phytoremediation of trichloroethylene with hybrid poplars. *Environ. Health Perspect* 1998,106(suppl4):1001 ~ 1004
- 24 Anderson T.A. and Walton B.T.. Comparative fate of [^{14}C] trichloroethylene in the root zone of plants from a former solvent disposal site. *Environ Toxicol Chem.*, 1996, 12:2041 ~ 2047
- 25 Langebartels C. and Harms H.. Metabolism of pentachlorophenol in cell suspension cultures of soybean and wheat: Pentachlorophenol glucoside formation. *Z Pflanzenphysiol*, 1984, 113:201 ~ 211
- 26 Wolfenbarger L.L. and Phifer P.R.. The ecological risks and benefits of genetically engineered plants. *Science*, 2000, 290:2088 ~ 2093
- 27 Raskin I.. Plant genetic engineering may help with environmental cleanup. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1996, 93:3164 ~ 3166
- 28 Pena L. and Seguin A.. Recent advances in the genetic transformation of trees. *Trends Biotechnol.*, 2001, 19:500 ~ 506
- 29 Chaudiere J. and Ferrari-Iliou R.. Intracellular antioxidants: from chemical to biochemical mechanisms. *Food Chem. Toxicol.*, 1999, 37: 949 ~ 962
- 30 Salt D.E., Smith R.D. and Raskin I.. Phytoremediation. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 1998, 49:643 ~ 668
- 31 Morikawa H., Higaki A., Nohno M., Takahashi M., Kamada M., Nakata M., Toyohara G., Okamura Y., Matsui K., Kitani S., Fujita K., Irifune K., Goshima N.. More than a 600-fold variation in nitrogen dioxide assimilation among 217 plant taxa. *Plant Cell Environ.*, 1998a, 21: 180 ~ 190
- 32 Morikawa H., Takahashi M., Irifune K.. Molecular mechanism of the metabolism of nitrogen dioxide as an alternative fertilizer in plants. In: Satoh K, Murata N(eds) *Stress responses of photosynthetic organisms*. Amsterdam: Elsevier, 1998, 227 ~ 237
- 33 Dorlhac de Borne F., Vincentz M., Chupeau Y. and Vaucheret H.. Co-suppression of nitrate reductase host genes and transgenes in transgenic tobacco plants. *Mol. Gen. Geent.*, 1994, 243: 613 ~ 621
- 34 Hemon P., Robbins M.P. and Cullimore J.V.. Targeting of glutamine synthase to the mitochondria of transgenic tobacco. *Plant Mol. Biol.*, 1990, 15:895 ~ 904
- 35 Takahashi M., Sasaki Y., Ida S. and Morikawa H., 2001. Nitrite reductase gene enrichment improves assimilation of nitrogen dioxide in Arabidopsis. *Plant Physiol.*, 2001, 126:731 ~ 741
- 36 Mudd J.B. and Kozlowski T.T., 著, 刘富林译. 植物对空气污染的反应. 北京: 科学出版社, 1984. 250
- 37 刘培桐, 薛纪渝 王华东. 环境学概论. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 1995, 22 ~ 23
- 38 Macek T., Mackova M. and Kas J.. Exploitation of plant for the removal of organics in environmental remediation. *Biotechnology Advances*, 2000, 18: 23 ~ 34