

大气污染生物指示物研究进展

毛军需¹ 王发园¹ 王秀丽² 王连喜³

¹ 河南科技大学农学院, 洛阳 471003

² 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100010

³ 南京信息工程大学, 南京 210044

摘要 生物指示物 (Bioindicator) 是指能通过典型症状或可衡量的反应来揭示大气污染物存在与否的生物体或生物反应。许多对污染物敏感的植物和微生物都可以做为大气污染的生物指示物。对国内外相关研究进展做一综述, 并简单探讨了目前研究存在的问题和未来研究的方向。

关键词 大气污染 污染物 生物指示物 重金属 植物

文章编号 1006-9585 (2008) 05-0688-09 **中图分类号** X51 **文献标识码** A

Advances in Bioindicators of Air Pollution

MAO Jun-Xu¹, WANG Fa-Yuan¹, WANG Xiu-Li², and WANG Lian-Xi³

¹ Agricultural College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003

² Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100010

³ Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract A bioindicator is an organism or biological response that reveals the presence or absence of an air pollutant by the occurrence of typical symptoms or measurable responses. Many plants and microorganisms sensitive to air pollutants may be applied as indicators of air pollution. The relative researches on bioindicators are reviewed and the problems and prospects are discussed briefly.

Key words air pollution, pollutant, bioindicator, heavy metal, plant

1 引言

大气污染的监测是大气环境综合治理工程中的重要组成环节。一些生物对大气污染物反应比较敏感, 可以有效地监测大气质量的变化, 因此被视为大气污染的生物指示物。根据 Tingey^[1]的定义, 生物指示物 (Bioindicator) 是指能通过典型症状或可衡量的反应来揭示大气污染物存在与否的生物体或

生物反应。生物指示物可以概括为3类^[2]: 第1类是根据污染物对这个物种造成形态或生理伤害的程度判断污染状况; 第2类根据某个敏感物种出现或消失的概率判断污染状况; 第3类是动物或植物对污染物有生物累积作用, 可以通过分析其内污染物的含量判断污染状况。常用的生物指示物大多是植物, 微生物也较多应用于指示大气污染。本文将对近年来国内外关于大气污染植物指示物和微生物指示物的最新研究做一综述, 并简单探讨目前研究存

收稿日期 2007-02-01 收到, 2008-02-26 收到修定稿

资助项目 河南科技大学博士科研启动基金 05-008 和河南科技大学科学研究基金项目 2006ZY035

作者简介 毛军需, 男, 1949年出生, 副教授, 主要从事农业气象和气候资源利用领域的研究。E-mail: maojunxu01@163.com

在的问题和未来研究的方向。

2 植物指示物

2.1 敏感植物

植物尤其是敏感植物,一旦遇到污染,可依照污染程度在群落、个体上,在细胞、组织和器官上,在细胞内酶系和生理生化反应等不同水平层面上做出应激反应。不同植物在解剖结构和生物学特性等诸多方面对污染物的抵抗能力是不一样的,这决定了其对大气污染物的不同反应。一般可以把植物分成敏感、抗性中等、抗性强等几个层次^[3]。

敏感植物一般可以做为指示植物,常见的主要属于苔藓植物、裸子植物和被子植物等几个植物纲,涉及农作物、园艺作物、经济作物、药用植物、野生植物和林木等。虽然不同植物对污染物的抗性不一样,但有些植物对不同污染物的敏感度往往是一致的,所以这些植物可以同时用于几种污染物的指示。表 1 给出了常见大气污染物的指示植物(根据文献[4, 5]改编)。

2.2 植物指示物的作用

植物的叶片、树皮、污染物含量以及各种生理生化指标都可以因大气污染程度不同而表现出各种特征变化,从而起到指示作用。

2.2.1 植物生长状况

植物通过叶片同外界进行气体交换作用,容易受到各种大气污染物的侵害,根据受害程度的不同,叶片上会出现伤斑,绿色变浅、变黄,枯萎,甚至整株死去等症状,因而可以直观地反映出大气污染的程度。采用观察植物叶片伤害症状判断植物的受害程度来指示大气污染状况仍是目前最常用的方法。植物在不同的大气污染物作用下对植物叶片的可见伤害因伤斑的部位、形状、颜色和受害叶龄等特征的不同而互相区别。表 2 将常见大气污染物对指示植物毒害的症状、机理等做一简单总结。

植物叶片对污染物的反应除了与污染物的毒性密切相关以外,其自身形态解剖结构特征对抵抗污染物的毒害是相当重要的。一般情况下,抗性强的植物叶片较厚、革质,外表皮角质化或表面具有蜡质层,气孔较少,叶背面多毛等。有人认为栅栏组织与海绵组织厚度的比值越大,抗性

就越强^[6]。

植物生长指标主要包括树木的高度、胸径、枝下高和冠幅,新梢长度和直径、新叶数、叶长、叶宽等生长因子,也可以赋予各参数不同的权重,利用综合生长因子来指示大气污染的影响^[7]。孔国辉等^[8]利用盆栽试验植物生长参数(株高、基径、冠幅、叶面积、新叶增长率和叶片脱落率)、生理特性(净光合速率、叶绿素荧光特性,叶细胞膜渗漏率和叶绿素含量)、植物伤害状况以及长期生长在野外污染环境中的植物生长及受害状况,根据对空气污染敏感性反应的不同把 125 种木本植物分为 3 类。

2.2.2 植物体内有毒物含量

植物叶片是大气污染物的主要吸收器官,通过分析叶片中污染物含量,可以一定程度上反应污染状况。研究比较多的植物是林木或绿化植物,如松树(*Pinus sylvestris*)^[9~11]、圣栎(*Quercus ilex*)^[12,13]、云杉(*Picea abies*)^[14]、橡树(*Quercus robur*)^[15]等。

植物叶片中重金属含量与大气污染有一定的相关性,可以通过测定叶片中的重金属含量来监测大气污染状况。任乃林等^[16]研究表明,植物叶片中的重金属元素富积量和大气中污染指数正相关,植物叶片的重金属元素富积量可较好和客观地指示市区大气的重金属污染状况。通过测定植物叶片中 Zn、Pb、Cd 和 As 的含量,可以判定测定区的大气污染等级^[17]。污染区植物叶片中 Cu、Pb、Cd、Cr 元素含量比清洁区的高,可用于监测大气污染状况^[18]。

通过测定叶片中有机污染物的含量可指示大气中有机污染物的水平。有研究发现,松针中多氯代二苯并二恶英(PCDDs)、多氯代二苯并呋喃(PCDFs)等二恶英以及非邻位取代 PCB 的含量可以用于监测大气中这些污染物的水平^[19~21]。

利用树皮作为生物指示物有取样容易、不伤害树木等优点,因此被推荐为大气污染的指示物^[22],尤其是在其他生物指标难以发现的时候,例如在城市市区或工业区内,许多阔叶树木和针叶树木的树皮都被用于指示大气污染^[23,24]。Mandiwana 等^[25]通过测定合欢(*Acacia karroo* Hayne)树皮中 Cr 含量作为空气中 Cr(VI) 污染的生物指示物。Poikolainen^[22]测定苏格兰松树皮

表 1 常见大气污染物的指示植物
Table 1 Common indicator plants of air pollution

污染物	指示植物
SO ₂	地衣、苔藓、紫花苜蓿、荞麦、金荞麦、向日葵、燕麦、芝麻、芝麻、地瓜、棉花、大豆、落叶松、雪松、马尾松、悬铃木、油松、枫杨、加拿大杨、水杉、杜仲、合欢、土荆芥、藜、曼陀罗、胡萝卜、葱、菠菜、茼蒿、南瓜、辣椒、黄瓜、月季、梅花等
氟化物	唐菖蒲、郁金香、玉米、大蒜、杏、葡萄、芒果、烟草、小苍兰、玉簪、梅、紫荆、雪松、落叶松、欧洲赤松、苔藓等
O ₃	烟草、美洲五针松、光叶桦、女贞、银桦、桦树、皂荚、丁香、菠菜、番茄、萝卜、洋葱、马铃薯、甜瓜、燕麦、葡萄、牡丹、矮天牛、牵牛花、马唐等
PAN	早熟禾、矮牵牛、繁缕、菜豆、苜蓿、烟草、牵牛花、番茄、芥菜等
氯气和氯化物	芝麻、荞麦、玉米、大麦、向日葵、藜、翠菊、万寿菊、鸡冠花、大白菜、韭菜、葱、萝卜、洋葱、桃树、苹果、枫杨、雪松、复叶槭、落叶松、油松、木棉、假连翘、苜蓿等
二氧化氮 NO ₂	悬铃木、向日葵、秋海棠、烟草、小麦、玉米、燕麦、胡萝卜、番茄、马铃薯、洋葱、蚕豆、柑桔、瓜类等
乙烯 C ₂ H ₂	芝麻、番茄、香石竹、棉花等

注:根据文献[4,5]改编

表 2 常见大气污染物对指示植物叶片的毒害作用
Table 2 Toxicity of common air pollutants to leaves of indicator plants

污染物	危害机理	伤斑部位	伤斑形状	伤斑颜色	受害叶龄和程度	受害剂量
SO ₂	使海绵细胞和栅栏细胞产生质壁分离,然后收缩或崩溃,叶绿素分解	多脉间、少叶缘	无规律点、块状,界限分明	土黄、红棕色	展开的嫩叶>成熟叶>老叶和未展开的嫩叶	0.05~0.5 mL·L ⁻¹
氟化物	使叶肉与细胞产生质壁分离	多叶间、缘、少脉间	带状或环带状	棕黄色	幼叶>成熟叶>老叶	10 μL·L ⁻¹
O ₃	破坏栅栏组织细胞壁和表皮细胞	多叶面、少数脉间	散布细密点状	棕、黄褐色	成熟叶>幼叶>老叶	0.02~0.05 mL·L ⁻¹
PAN	使叶子收缩,失水,然后充入空气	多叶背、少叶尖端	玻璃状,坏死带	银白、棕、古铜色	幼叶尖部和老叶基部易受害	0.01~0.05 mL·L ⁻¹
NO _x	使细胞破裂	脉间	不规则伤斑或全叶点斑	白、黄褐、棕色	嫩叶易受害	2~3 mL·L ⁻¹
氯气和氯化物	破坏叶绿素	脉间	点块状界限模糊或过度	严重失绿、漂白	成熟叶易受害	0.46~4.67 mL·L ⁻¹

注:根据文献[4,5]改编

中 S 和重金属含量监测大气污染状况。El-Hasan 等^[26]利用柏树 (*Cupressus semervirens* L.) 树皮中 Pb、Zn、Mn、Cr、Ni、Cd、Cu 的含量监测大气中重金属的污染。Panichev 和 McCrindle^[27]利用树皮监测 Cu 矿对大气 Cu 污染的影响, 认为树皮是监测重金属沉降的重要指示物。

2.2.3 植物生理生化指标

大气污染侵害后, 植物的生长、代谢、繁殖等过程都会受到影响, 但实际上在植物伤害症状出现之前, 大气污染物对光合或呼吸作用及其他代谢过程早已产生影响。这类指标往往比症状指标更敏感和迅速。大气污染主要是影响代谢过程中酶的活性, 改变某些物质的通透性, 使质膜透性增加, 光合作用能力降低, 叶绿素含量下降; 同时, 也使植物体内水分的蒸腾作用减弱, 影响水分吸收并阻碍植物呼吸作用, 从而阻碍了植物的生理活动, 造成对植物的伤害。因此, 常用的指标有植物光合作用参数、呼吸强度、气孔开放度、细胞膜的透性以及酶学指标。

植物中叶绿素含量、叶绿素荧光参数 (F_v/F_m)、细胞膜渗透率以及叶片气体交换特征参数净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (E) 和气孔导度 (g_s) 等指标对于大气污染反应灵敏, 可用于监测大气污染状况^[28,29]。李海亮等^[30]发现兰州不同大气污染地区, 国槐叶片的叶绿素含量、可溶性糖的含量、叶提取液 pH 值随污染程度的加剧而减少, 而细胞膜渗漏率、脯氨酸含量 SOD 酶活性则上升。苏行等^[31]研究了广州两种绿化植物对大气污染的响应, 发现不同污染地点大叶紫薇和白兰叶片的叶绿素含量、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 Φ_{PSII} 和 qP 随污染程度的加剧而减少, 细胞膜渗漏率和 qP 则上升, 其中白兰比大叶紫薇更敏感。

植物体内各种保护性酶活性的改变往往可以反映大气污染物对植物的影响, 从而指示污染状况。许多研究发现在污染较重的情况下, 植物过氧化物酶活性会增加, 可以作为监测大气污染对植物造成危害的生理指标^[32]。Rubisco 活化酶对 O_3 污染也较敏感^[33], 硝酸盐还原酶对氮沉降较为敏感^[34]。

除了植物体内的酶, 土壤酶也可做为大气污染指示物。陈红跃等^[35]研究了不同大气污染区林木根区土壤酶活性, 认为脲酶、过氧化氢酶、酸

性磷酸酶和蛋白酶等土壤酶活性的高低可以反应大气污染状况。

某些次生代谢物可以作为监测大气污染的指标, 如叶片中的酚类物质。Pasqualini 等^[36]研究了大气污染物对阿勒颇松松针中总酚和单酚含量的影响, 发现总酚含量因 SO_2 而增加, 因 NO_2 而降低, p-香豆酸、丁香酸、对羟基苯甲酸浓度随 NO_2 污染而增加, 而没食子酸、香兰素分别因 SO_2 和 O_3 的出现而降低。

花粉一般对大气污染物比较敏感, 大气污染能够抑制花粉的萌发和活力, 花粉粒形态结构也发生变化, 因此花粉可以做为大气污染的生物指示物^[37,38]。在磷肥厂附近, 由于氟化物、 NO_x 和 S 的释放, 欧洲赤松花粉的萌发率降低了 50%^[39]。在城市市区内污染物浓度较高的地方, 意大利石松 (*Pinu pinea*) 的花粉活力和花粉管长度都比对照区的低^[40]。欧洲黑松 (*Pinus nigra*) 的花粉在交通污染较严重的地方其活力、萌发力和花粉管长度都比对照地区的高, 花粉活力与 O_3 的浓度和海拔高度成正相关, 与 SO_2 、 PM_{10} 、 NO_x 、 NO_2 浓度成负相关^[41]。但墙草属 (*Parietaria*) 植物的花粉粒在交通繁忙的地方仍然保持很强的活力, 因此不适合做生物指示物^[37]。

树木年轮能反映若干年的污染历史状况, 一般受污染的树木年轮变窄。墨西哥城郊高海拔森林公园圣杉 (*Abies religiosa*) 的年轮化学变化与环境污染有一定的相关性, 1960 年以来树木年轮中 Pb、Cd 的增加反映了墨西哥城城市化进程的加快以及交通污染的加重^[42]。

在实际应用过程中, 往往采用多种指标共同指示大气污染状况。Moraes 等^[43]利用热带果树 *Psidium cattleianum* 的叶片症状, 根茎比, 叶片 F、S、N 含量, 抗坏血酸盐含量和可溶性硫醇含量来评价工业大气污染状况。大气污染使得 *Tibouchina pulchra* 叶片中抗坏血酸降低, 而过氧化物酶和硫醇含量增加^[44]。

2.2.4 其他指标

可以通过植物群落的改变来检测大气污染, 如果抗性植物增加而敏感植物减少, 则可以指示大气污染加重^[45]。在 SO_2 污染较重的地方, *Polygonum cilinode* 和 *Sambucus pubens* 丰度增加, 而抗性差的种类则已经消失^[46]。后来研究发现,

这种改变只发生在空气污染严重的地方^[2]。

波动性不对称 (Fluctuating asymmetry, FA) 是反应环境胁迫对生物影响的重要指标, 在大气污染条件下, FA 常常增加, 所以可以用做指示物^[47~49]。Kozlov 等^[49]研究发现苏格兰松松针的波动性不对称可以作为大气污染的灵敏指标。

2.3 苔藓植物

苔藓植物是一类结构简单的绿色植物, 叶片一般只有单层细胞, 没有保护层, 吸附力强, 这种特殊的生理结构决定了其营养来源主要是大气, 所以以苔藓为指示植物, 分析苔藓植物组织的污染物浓度, 可以直接监测大气污染, 分析大气重金属沉降的时空分布、污染物的迁移及其来源。苔藓往往比地衣和高等植物更容易积累重金属, 而且利用苔藓植物监测大气污染具有取材容易, 调查方法简单等特点。因此, 苔藓已成为目前仅次于地衣的生物指示物。

利用苔藓指示大气污染状况主要有以下几种方法^[50]: 1) 分析测定苔藓体内的有害物, 如通过测定苔藓重金属含量可以了解大气重金属沉降的变化; 2) 移植比照, 把苔藓从洁净区移栽到待监测区, 观察苔藓受害状况来判断污染程度; 3) 调查苔藓植物的种数、覆盖度、出现频度及生长状况等, 以此计算大气净度指数, 估计污染程度, 绘制空气污染分布图。

国内外已有很多研究证实苔藓植物在指示大气的重金属污染等方面有很好的作用^[51~53], 这里不再赘述。

3 微生物指示物

3.1 细菌、真菌等微生物

许多微生物对大气污染很敏感, 因此可以用做指示生物来监测大气污染。植物表面附生的微生物群落具有固氮、分泌植物生长调节物、促进植物分泌抗毒素、抗真菌或细菌物质等许多重要功能, 对于植物的正常生长有重要作用^[54]。这些微生物容易受到大气污染物的影响^[55], 其群落结构和功能都可能发生变化, 并因此可能影响植物的生长, 因此微生物也可以做为大气污染指示物。Brighigna 等^[54]研究发现大气污染改变了两种铁兰属 (*Tillandsia*) 植物叶片表面的微生物群落结

构, 酵母菌和细菌数量显著减少。

许多研究证实, 植物叶片表面的酵母菌对于大气污染物十分敏感, 可以用做生物指示物^[56,57]。大气污染重的地方叶片表面酵母数量较少, 种类也往往发生改变^[56,57]。

3.2 地衣

地衣是一类由真菌与藻类或蓝细菌共生的复合体, 对外界环境的污染物极为敏感, 原因是地衣缺乏像高等植物那样的真皮层和蜡质层, 其通过表皮直接吸收大气中的物质, 污染物容易进入体内。所以地衣对大气污染极其敏感, 是一类很好的大气污染的生物指示物。利用地衣监测大气污染比较经济, 方法易掌握, 而且地衣是全球性分布的, 这样就便于形成统一的标准, 便于比较和交流。

地衣最早作为生物指示物可以追溯到 1866 年。1968 年, 在荷兰的瓦赫宁根举行的大气污染对动植物影响的讨论会上, 苔藓和地衣被推荐为大气污染指示物, 之后地衣成为研究最多的大气污染生物指示物^[58]。主要是通过以下几种方法指示大气污染: 1) 调查地衣群落或种群结构以及多样性的变化^[59,60]; 2) 分析地衣体内有害物 (如重金属等) 的含量^[61]; 3) 把地衣从洁净区移植到待监测污染区, 观察其死亡率、形态和生理指标的变化^[61], 如光合作用、叶绿素含量和降解、ATP 的含量、呼吸水平的变化、内源激素 (如乙烯) 的水平。已经证实, 地衣对于重金属、SO₂ 以及硫化物、NO_x、O₃、氟化物、氯化物和放射性污染物等皆有很好的指示作用^[61]。

英国地衣学家 Hawksworth 和 Rose^[62]根据研究选择了适合于英格兰和威尔士的附生地衣测定大气中 SO₂ 浓度, 根据不同种类的地衣对 SO₂ 的敏感性不同制定出一个检索表, 以此监测 SO₂ 的污染程度。Thrower^[63]制定了在香港评定污染区的地衣指标。近年来国内许多研究者也开展了利用地衣监测大气污染的研究, 但这些研究缺乏系统性和新颖性^[64,65], 还有待进一步加强。

4 问题与展望

随着环境化学和现代仪器分析技术的发展, 利用生物指示物监测大气污染状况也得到新的发

展,用于监测的指标和方法日臻成熟。但同时也存在许多问题:1)生物指示物的灵敏性不够,因为大气污染物的流动性强,具有时空变异性,当污染物发生变化时,生物指示物很难立即做出响应,而是需要一个过程,这样就不利于大气污染的动态监测。2)生物指示物的特异性不够,许多生物指示物往往同时对多种污染物敏感,不利于监测某特异污染物。3)生物指示物的广谱性不够,大气污染往往是复合污染,包括多种污染物,而目前尚缺乏针对复合污染的生物指示物。4)生物指示物的生态相关性研究不够深入,除了大气污染的因素,其他如土壤状况、生长季节、人为因素等都影响植物、动物、微生物的生长及生理生化状况,这些指标未必能真实反应大气污染状况。5)分子生物指示物尚待开发,目前的生物指示物限于器官、组织和细胞水平,缺乏分子水平的生物指示物。6)取样方法的研究还很不足,大气污染物的时空变异性使得取样时很难判断其代表性。

综上所述,未来要加强以下领域的研究:1)开发灵敏性和时效性更强的生物指示物,以实现 对污染物的动态监测,在这方面微生物比动植物更具优势,应该加强微生物指示物的研究。2)加强样品采集方法学研究,以保证样品更具有代表性,更能实时反映区域大气污染状况。3)加强大气有机污染物(如 POPs、VOCs 等)的生物指示研究。4)针对特异性大气污染和复合污染,开发特异性和广谱性的生物指示物。5)加强生物指示物生态相关性研究,分析环境因素对生物指示物的影响,降低环境因素的干扰。6)研究生物指示物对污染物在分子水平上的响应,开发分子生物指示物。7)建立标准的监测方法和模式生物指示物,使结果具有可比性和可重复性。8)发展更精确的化学分析技术和更先进的生物学技术,许多生物指示物对大气污染物反应敏感,但是目前的分析技术未必一定能检测出其体内的污染物。因此这一学科需要多学科、多实验室合作,分别从不同学科、不同角度进行深入的研究。我国在大气环境的保护、监测、治理等方面还相对落后,有必要加强相关领域的研究。

参考文献 (References)

- [1] Tingey D T. Bioindicators in air pollution research-applications and constraints. In: *Biologic Markers of Air Pollution Stress and Damage in Forests*, Committee on Biological Markers of Air Pollution Damage in Trees, National Research Council, Eds. Washington D. C.: National Academy Press, 1989. 73~80
- [2] Grodzinski W, Yorks T P. Species and ecosystem level bioindicators of air pollution: An analysis of two major studies. *Water Air Soil Pollut.*, 1981, **16**: 33~53
- [3] 李顺鹏. 环境生物学. 北京: 中国农业出版社, 2002
Li Shunpeng. *Environmental Biology* (in Chinese). Beijing: China Agricultural Press, 2002
- [4] 顾朝光, 宋爽, 何志桥. 大气污染物的植物监测方法研究. 浙江工业大学学报, 2005, **33** (5): 566~570
Gu Chaoguang, Song Shuang, He Zhiquiao. Research on the method of monitoring air pollutants by plants. *Journal of Zhejiang University of Technology* (in Chinese), 2005, **33** (5): 566~570
- [5] 李江平, 李雯. 指示生物及其在环境保护中的应用. 云南环境科学, 2001, **20** (1): 51~54
Li Jiangping, Li Wen. Biological indicator and environmental protection. *Yunnan Environmental Science* (in Chinese), 2001, **20** (1): 51~54
- [6] 刘艳菊, 丁辉. 植物对大气污染的反应与城市绿化. 植物学通报, 2001, **18** (5): 577~586
Liu Yanju, Ding Hui. Responses of plants to air pollution and their significance in urban greening. *Chinese Bulletin of Botany* (in Chinese), 2001, **18** (5): 577~586
- [7] 刘世忠, 薛克娜, 孔国辉, 等. 大气污染对 35 种园林植物生长的影响. 热带亚热带植物学报, 2003, **11** (4): 329~335
Liu Shizhong, Xue Kena, Kong Guohui, et al. Effects of air pollution on the growth of 35 garden plants. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* (in Chinese), 2003, **11** (4): 329~335
- [8] 孔国辉, 陈宏通, 刘世忠, 等. 广东园林绿化植物对大气污染的反应及污染物在叶片的积累. 热带亚热带植物学报, 2003, **11** (4): 297~315
Kong Guohui, Chen Hongtong, Liu Shizhong, et al. Responses of garden greening plants to air pollution in Guangdong province and the accumulation of pollutants in leaves. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* (in Chinese), 2003, **11** (4): 297~315
- [9] Giertych M J, De Temmerman L O, Rachwal L. Distribution of elements along the length of Scots pine needles in a heavily polluted and control environment. *Tree Physiol.*, 1997, **17**: 697~703

- [10] Rautio P, Huttunen S, Kukkola E, et al. Deposited particles, element concentrations and needle injuries on Scots pine along an industrial pollution transect in northern Europe. *Environ. Pollut.*, 1998, **103**: 81~89
- [11] Migaszewski Z M, Galuszka A, Paslawski P. Polynuclear aromatic hydrocarbons, phenols, and trace metals in selected soil profiles and plant bioindicators in the Holy Cross Mountains, South-Central Poland. *Environ. Int.*, 2002, **28**: 303~313
- [12] Monaci F, Bargagli R. Barium and other trace metals as indicators of vehicle emissions. *Water Air Soil Pollut.*, 1997, **100**: 89~98
- [13] Monaci F, Moni F, Lanciotti E, et al. Biomonitoring of airborne metals in urban environments: New tracers of vehicle emission, in place of lead. *Environ. Pollut.*, 2000, **107**: 321~327
- [14] Ceburnis D, Steinnes E. Conifer needles as biomonitors of atmospheric heavy metal deposition: Comparison with mosses and precipitation, role of the canopy. *Atmos. Environ.*, 2000, **34** (25): 4265~4271
- [15] Aboal J R, Fernández J A, Carballeira A. Oak leaves and pine needles as biomonitors of airborne trace elements pollution. *Environ. Exp. Bot.*, 2004, **51**: 215~225
- [16] 任乃林, 陈伟彬, 黄俊生, 等. 用植物叶片中重金属元素含量指示大气污染的研究. *广东微量元素科学*, 2004, **11** (10): 41~45
Ren Nailin, Chen Weibin, Huang Junsheng, et al. Study on air environment pollution by the content of heavy metals in leaves of plants. *Guangdong Trace Elements Science* (in Chinese), 2004, **11** (10): 41~45
- [17] 陈学泽, 谢耀坚, 彭重华. 城市植物叶片金属元素含量与大气污染的关系. *城市环境与城市生态*, 1997, **10** (1): 45~47
Chen Xueze, Xie Yaojian, Peng Chonghua. Relationship between air pollution and contents of metal elements in leaves of urban plants. *Urban Environment and Urban Ecology*, 1997, **10** (1): 45~47
- [18] 马跃良, 贾桂梅, 王云鹏, 等. 广州市区植物叶片重金属元素含量及其大气污染评价. *城市环境与城市生态*, 2001, **14** (6): 28~30
Ma Yueliang, Jia Guimei, Wang Yunpeng, et al. Contents of heavy metal in leaves of plants and air pollution evaluation in Guangzhou region. *Urban Environment and Urban Ecology* (in Chinese), 2001, **14** (6): 28~30
- [19] Aozasa O, Ikeda M, Nakao T, et al. Air pollution by PCDDs, PCDFs and non-ortho coplanar PCBs in Japan using pine needle as a biomonitoring indicator. *Organohalogen Comp.*, 1996, **28**: 181~186
- [20] Miyata H, Takamitsu S, Iwata N, et al. Investigation on assessment of air pollution by dioxin analogues using Japanese black pine needle as an indicator. *Organohalogen Comp.*, 2000, **46**: 373~376
- [21] Ok G, Ji S H, Kim S J, et al. Monitoring of air pollution by polychlorinated dibenzo-p-dioxins and polychlorinated dibenzofurans of pine needles in Korea. *Chemosphere*, 2002, **46**: 1351~1357
- [22] Poikolainen J. Sulphur and heavy metal concentrations in Scots pine bark in northern Finland and the Kola Peninsula. *Water Air Soil Pollut.*, 1997, **93**: 395~408
- [23] Lippo H, Poikolainen J, Kubin E. The use of moss, lichen and pine bark in the nationwide monitoring of atmospheric heavy metal deposition in Finland. *Water Air Soil Pollut.*, 1995, **85**: 2241~2246
- [24] Huhn G, Schulz H, Stark H J, et al. Evaluation of regional heavy metal deposition by multivariate analysis of element contents in pine tree barks. *Water Air Soil Pollut.*, 1995, **84**: 367~383
- [25] Mandiwana K L, Resane T, Panichev N, et al. The application of tree bark as bio-indicator for the assessment of Cr (VI) in air pollution. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, **B 137**: 1241~1245
- [26] El-Hasan T, Al-Omari H, Jiries A, et al. Cypress tree (*Cupressus Semervirens* L.) bark as an indicator for heavy metal pollution in the atmosphere of Amman city, Jordan. *Environ. Int.*, 2002, **28**: 513~519
- [27] Panichev N, McCrindle R I. The application of bio-indicators for the assessment of air pollution. *J. Environ. Monit.*, 2004, **6**: 121~123
- [28] 彭长连, 温达志, 孙梓健, 等. 城市绿化植物对大气污染的响应. *热带亚热带植物学报*, 2002, **10** (4): 321~327
Peng Changlian, Wen Zhida, Sun Zijian, et al. Response of some plants for municipal greening to air pollutants. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* (in Chinese), 2002, **10** (4): 321~327
- [29] 温达志, 孔国辉, 张德强, 等. 30 种园林植物对短期大气污染的生理生态反应. *植物生态学报*, 2003, **27** (3): 311~317
Wen Zhida, Kong Guohui, Zhang Deqiang, et al. Ecophysiological responses of 30 gardens plant species exposed to short-term air pollution. *Acta Phytocologica Sinica* (in Chinese), 2003, **27** (3): 311~317
- [30] 李海亮, 赵庆芳, 王秀春, 等. 兰州市大气污染对绿化植物生理特性的影响. *西北师范大学学报 (自然科学版)*, 2005, **41** (1): 55~58
Li Hailiang, Zhao Qingfang, Wang Xiuchun, et al. Effects of air pollution on plant physiology in Lanzhou City. *Journal of Northwest Normal University* (Natural Science Edition) (in Chinese), 2005, **41** (1): 55~58
- [31] 苏行, 胡迪琴, 林植芳, 等. 广州市大气污染对两种绿化植物叶绿素荧光特性的影响. *植物生态学报*, 2002, **26** (5): 599~604
Su Xing, Hu Diqin, Lin Zhifang, et al. Effect of air pollu-

- tion on the chlorophyll fluorescence characters of two afforestation plants in Guangzhou. *Journal of Plant Ecology* (in Chinese), 2002, **26** (5): 599~604
- [32] Puccinelli P, Anselmi N, Bragaloni M. Peroxidases: Usable markers of air pollution in trees from urban environments. *Chemosphere*, 1998, **36**: 889~894
- [33] Pelloux J, Jolivet Y, Fontaine V, et al. Changes in RuBisCo en rubisco activase gene expression and polypeptide content in *Pinus halepensis* Mill. subjected to ozone and drought. *Plant Cell Environ.*, 2001, **24** (1): 123~131
- [34] Krywult M, Karolak A, Bytnerowicz A. Nitrate reductase activity as an indicator of ponderosa pine response to atmospheric nitrogen deposition in the San Bernardino mountains. *Environ. Pollut.*, 1996, **93** (2): 141~146
- [35] 陈红跃, 闫雪燕, 陈明洁, 等. 不同大气污染区林木根区土壤重金属和酶活性研究. *生态环境*, 2006, **15** (3): 513~518
Chen Hongyue, Yan Xueyan, Chen Mingjie, et al. Heavy metal contents and enzymatic activities of soil in tree root zone at different air-polluted areas. *Ecology and Environment* (in Chinese), 2006, **15** (3): 513~518
- [36] Pasqualini V, Robles C, Garzino S, et al. Phenolic compounds content in *Pinus halepensis* Mill. needles: A bioindicator of air pollution. *Chemosphere*, 2003, **52**: 239~248
- [37] Iannotti O, Mincigrucci G, Bricchi E, et al. Pollen viability as a bio-indicator of air quality. *Aerobiologia*, 2000, **16**: 251~256
- [38] Cerceau-Larival M T, Bocquel C, Carbonnier-Jarreau M C, et al. Pollen: Bio-indicator of pollution. *J. Aerosol Sci.*, 1996, **27**: 227~228
- [39] Mejnartowitz L, Lewandowski A. Effects of fluorides and sulphur dioxide on pollen germination and growth of the pollen tube. *Acta Soc. Bot. Poloniae*, 1985, **2** (54): 125~129
- [40] Cela Renzoni G, Viegi L, Stefani A, et al. Different in vitro germination responses in *Pinus pinea* pollen from two localities with different levels of pollution. *Ann. Bot. Fenn.*, 1990, **27**: 85~90
- [41] Gottardini E, Cristofolini F, Paoletti E, et al. Pollen viability for air pollution bio-monitoring. *J. Atmos. Chem.*, 2004, **49**: 149~159
- [42] Watmough S A, Hutchinson T C. Change in the dendrochemistry of sacred fir close to Mexico City over the past 100 years. *Environ. Pollut.*, 1999, **104**: 79~88
- [43] Moraes R M, Klumpp A, Furlan C M, et al. Tropical fruit trees as bioindicators of industrial air pollution in southeast Brazil. *Environ. Int.*, 2002, **28**: 367~374
- [44] Klumpp G, Furlan C M, Domingos M, et al. Response of stress indicators and growth parameters of *ibouchina pulchra* Cogn. exposed to air and soil pollution near the industrial complex of Cubatao, Brazil. *Sci. Total Environ.*, 2000, **246**: 79~91
- [45] Cairns J, Patil P, Waters W E. *Environmental Bio-monitoring, Assessment, Prediction and Management. Statistical Ecology Series* 11. Fairland: International Cooperative Publishing House, 1979
- [46] Gordon A G, Gorham E. Ecological aspects of air pollution from an iron sintering plant at Wawa, Ontario. *Can. J. Bot.*, 1963, **41**: 1063~1078
- [47] Kozlov M V, Wilsey B J, Koricheva J, et al. Fluctuating asymmetry of birch leaves increases under pollution impact. *J. Appl. Ecol.*, 1996, **33**: 1489~1495
- [48] Allenbach D M, Sullivan K B, Lydy M J. Higher fluctuating asymmetry as a measure of susceptibility to pesticides in fishes. *Environ. Toxicol. Chem.*, 1999, **18**: 899~905
- [49] Kozlov M V, Niemelä P, Junttila J. Needle fluctuating asymmetry is a sensitive indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris*). *Ecol. Indicators*, 2002, **1**: 271~277
- [50] 孙守琴, 王定勇. 苔藓植物对大气污染指示作用的研究进展. *四川环境*, 2004, **23** (5): 31~35
Sun Shouqin, Wang Dingyong. Advance in indication function of bryophyte to air pollution. *Sichuan Environment* (in Chinese), 2004, **23** (5): 31~35
- [51] 安丽, 曹同, 俞鹰浩. 苔藓植物与环境重金属污染监测. *生态学杂志*, 2006, **25** (2): 201~206
An Li, Cao Tong, Yu Yinghao. Bryophytes and environmental heavy metal pollution monitoring. *Chinese Journal of Ecology* (in Chinese), 2006, **25** (2): 201~206
- [52] 刘家尧, 孙淑斌, 衣艳君. 苔藓植物对大气污染的指示监测作用. *曲阜师范大学学报*, 1997, **23** (1): 92~96
Liu Jiayao, Sun Shubin, Yi Yanjun. The indication of bryophytes to air pollution. *Journal of Qufu Normal University* (in Chinese), 1997, **23** (1): 92~96
- [53] Szczepaniak K, Biziuk M. Aspects of the biomonitoring studies using mosses and lichens as indicators of metal pollution. *Environ. Res.*, 2003, **93**: 221~230
- [54] Brighigna L, Gori A, Gonnelli S, et al. The influence of air pollution on the phyllosphere microflora composition of *Tillandsia* leaves (Bromeliaceae). *Rev. Biol. Trop.*, 2000, **48** (2-3): 511~517
- [55] Danti R, Sieber T N, Sanguineti G, et al. Decline in diversity and abundance of endophytic fungi in twigs of *Fagus sylvatica* L. after experimental long-term exposure to sodium dodecylbenzene sulphonate (SDBS) aerosol. *Environ. Microbiol.*, 2002, **4** (11): 696~702
- [56] Brighigna L, Ravanelli M, Minelli A, et al. The use of an epiphyte (*Tillandsia caput-medusae* morren) as bioindicator of air pollution in Costa Rica. *Sci. Total Environ.*, 1997, **198**: 175~180
- [57] Hagler A N. Yeasts as indicators of environmental quality.

- In: *Biodiversity and Ecophysiology of Yeasts*, Roas C A, Peter G, Eds. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2006. 515~532
- [58] Ferry B W, Baddeley M S, Hewskworth D L. *Air Pollution and Lichens*. London: The Athlone Press, 1973
- [59] Loppi S, Corsini A. Diversity of epiphytic lichens and metal contents of *Parmelia caperata* thalli as monitors of air pollution in town of Pistoia (C Italy). *Environ. Monit. Assess.*, 2003, **86**: 289~301
- [60] Giordani P. Is the diversity of epiphytic lichens a reliable indicator of air pollution? A case study from Italy. *Environ. Pollut.*, 2007, **146** (2): 317~323
- [61] Conti M E, Cecchetti G. Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment-a review. *Environ. Pollut.*, 2001, **114**: 471~492
- [62] Hawksworth D L, Rose F. Qualitative scale for estimating sulphur dioxide air pollution in England and Wales using epiphytic lichens. *Nature*, 1970, **227**: 145~148
- [63] Thrower S L. Air Pollution and lichens in Hong Kong. *Lichenologist*, 1980, **191**: 385~311
- [64] 项汀, 陈舒泛, 吴继农. 利用地衣和苔藓对南京黑墨营地区大气质量的初步评价和研究. 南京师范大学学报 (自然科学版), 1989, **12** (2): 69~77
- Xiang Ting, Chen Shufan, Wu Jinong. A preliminary study on the assessment of atmospheric quality in Heimoying area (Nanjing) by using lichens and bryophytes. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science)* (in Chinese), 1989, **12** (2): 69~77
- [65] 王玉良, 阿地里江·阿不都拉, 热依木, 等. 地衣对重金属的累积效应用于大气监测的初步研究. 菌物研究, 2005, **3** (2): 39~41
- Wang Yuliang, Adiljan Abdulla, Reyimu, et al. A preliminary study on the application of the accumulative effect of lichens to heavy metals in air monitoring. *Journal of Fungal Research* (in Chinese), 2005, **3** (2): 39~41