

尘污染对植物的生理和生态特性影响

王宏伟¹, 曹琼辉¹, 黄峰¹, 袁琳²

(1. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070; 2. 武汉理工大学生物材料与工程研究中心, 武汉 430070)

摘要: 综述了尘污染对植物和植物群落的生理和生态作用和影响, 并初步探讨了其原因和机制。尘污染能影响植物的光合作用、呼吸作用和蒸腾作用, 并携带有毒性污染物穿透进入植物组织。尘污染会导致植物发生可见的伤害症状, 引起生产力的下降。大部分的植物群落也会受到尘的影响而改变群落结构。今后要加强对自然条件下尘对植物影响的深入研究和植物不同种类间对尘敏感性的差异的研究。

关键词: 沙尘; 气孔; 气体交换; 叶绿素; 植物群落

中图分类号: Q945 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2009)05-0621-06

Ecological and physiological effects of dusting pollution on vegetation

WANG Hong-Wei¹, CAO Qiong-Hui¹, HUANG Feng¹, YUAN Lin²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
2. Biomedical Materials and Engineering Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: This review describes the physiological and ecological effects of dusting pollution on plants and plant community, and discusses the reasons and mechanisms of those effects. Dusting pollution may affect photosynthesis, respiration, transpiration and allow the penetration of phototoxic pollutants. Visible injury symptoms may occur and generally there is decreased productivity. Most of the plant communities are affected by dust deposition so that community structure is altered. Future works should be focused on detailed studies in natural systems and the difference of sensitivity to dust among plant species.

Key words: dusting; stomata; gas exchange; chlorophyll; plant community

尘污染作为大气污染的重要部分, 给人们的日常生活和工作带来巨大的危害, 也严重影响植物的生理代谢和生长发育。常见的尘污染有沙尘和灰尘。沙尘常见于沙尘暴, 是指强风把地面大量沙与尘卷入空中, 使空气混浊能见度低于 1 km 的天气现象。灰尘多来源于城市施工灰尘和交通灰尘, 随着城市发展, 尘污染已成为不容忽视的城市环境问题。尘污染不仅破坏环境空气质量, 影响人体健康 (Wichmann 等, 2000; Schwartz 等, 2003; Anderson 等, 2004; 谢昱姝, 2006), 而且已对森林、植被和植物的新陈代谢和生长发育以及森林、农田、植被等植物群落造成了不可估量的破坏 (彭珂珊, 2004)。虽然

国内外对于尘污染研究的论文较多, 但缺少系统的总结。本文综述在相关研究论文的基础上, 对国内外尘污染对植物生理和生态方面的影响进行总结, 并初步探讨了伤害原因及机制。

1 尘污染对植物生理代谢和生长发育的影响

1.1 对植物气孔开放的影响

气孔对气体浓度的变化 (James & Roger, 1983), 光的强弱 (Miguel 等, 1996) 等外来刺激有很强的敏感性。首先, 细小的灰尘颗粒物会阻塞气孔。

收稿日期: 2007-09-24 修回日期: 2007-11-26

基金项目: 湖北省交通厅科研基金 (2005-361) [Supported by the Communications Department Research Fund of Hubei (2005-361)]

作者简介: 王宏伟 (1974-), 女, 河南郑州人, 博士后, 副教授, 主要从事污染植物生理生态研究, (E-mail) drwangongwei@sohu.com.

Naidoo & Chirkoot(2004)用电子显微镜观察覆盖灰尘(颗粒直径 5~12 μm)的叶片,发现大多数气孔阻塞和关闭。Hirano 等(1995)研究表明,即使清洗掉黄瓜叶片表面覆盖的灰尘后,光照下叶片的气孔开放还是受到抑制。我们的实验也发现,灰尘连续处理 40 d 后,大多数种类植物的气孔导度明显下降,抑制程度接近 50%(王宏伟等,2007)。其次,光能的性质和强弱能够直接或间接影响气孔的开闭(Sharkey & Raschke,1981)。红光是促进叶片气孔开放的主要因素,叶表灰尘的遮蔽作用导致叶片对红光吸收的减弱,抑制气孔的开放(Thompson 等,1984; Krishnamurthy & Rajachidambaram,1986)。一般情况下,光可促进气孔张开。光促进气孔开启的效应有两种:一种是通过光受体感受光信号发生的直接效应;另一种是通过光合作用发生的,由胞间 CO_2 浓度的变化介导的间接效应,这种效应被光合电子传递抑制剂 DCMU 所抑制。照光后,叶片光合作用增强,导致叶内部胞间 CO_2 浓度变低,低浓度 CO_2 促进气孔张开,这是由于低浓度 CO_2 有利于 K^+ 进入保卫细胞,使保卫细胞吸水膨胀,引起气孔开张(Roelfsema & Hedrich,2005)。另外,植物叶片如果含有水泥、石灰等的灰尘,表面会形成坚硬的外壳限制了边界层的气体交换(Singh & Rao,1981),也是影响气孔开放的直接或间接原因。

1.2 对植物气体交换的影响

1.2.1 对植物光合作用的影响 随着叶表蒙尘量的增加和蒙尘时间的延长,灰尘对植物叶片的光合作用影响程度也越显著。Cook(1987)观察到当苹果树叶上覆盖 1 mm 厚的灰尘并持续 1 星期后,叶片的光合速率降低约 90%。陈雄文(2000)研究北京地区 22 种常见绿化植物在短时间(2 h)的沙尘处理后叶片的生理生态指标的变化,结果表明植物叶片的光合作用普遍受到抑制,其中 5 种植物的净光合速率降低超过 35%。王宏伟等(2007)研究湖北省 20 种常见绿化植物在长期蒙尘处理后光合作用的变化,也观察到植物叶片的净光合速率普遍受到了抑制。蒙尘处理 20 d 后,除银杏、侧柏、海桐和金钟花外,其它研究物种的净光合速率(P_n)均有明显下降;随着蒙尘处理时间的加强,各植物的 P_n 又都出现不同程度地恢复;到 80 d 后,各植物的净光合速率趋于稳定,为对照的 50%~90%。研究还发现:常见滞尘树种中,如梧桐、法国梧桐、杜鹃、迎春等植物对蒙尘胁迫影响较小,而大叶女贞、侧柏、羽

叶栎树等植物对蒙尘胁迫影响较大。灰尘污染抑制植物光合作用可能是由蒙尘导致叶片对光能和底物 CO_2 的吸收减少而造成的(Nanos & Ilids,2007)。长期的蒙尘覆盖导致叶片叶绿素含量下降、PS II 受到抑制、叶片温度升高(Hirano 等,1994),抑制了植物的光合作用。

1.2.2 对植物呼吸作用的影响 灰尘影响植物呼吸作用方面的研究少有报道。陈雄文(2000)研究 22 种常见绿化植物在短时间的沙尘处理后叶片呼吸作用的变化,发现有 12 种植物的呼吸速率提高。灰尘提高促进植物呼吸作用的原因可能是叶表的温度升高(Hirano 等,1994)、叶表气体扩散阻力降低或是叶片受到机械伤害。

1.2.3 对植物蒸腾作用的影响 Hirano 等(1994)研究表明灰尘能促进植物叶片的蒸腾作用,并认为叶片温度升高会提高胞间的水汽分压,使细胞间隙和外界的水蒸气压力产生差异,进而促进植物叶片的蒸腾速率;王宏伟等(2007)研究观察到灰尘能降低植物叶片的蒸腾作用;Pajenkamp(1961)研究表明灰尘处理对燕麦,白车轴草,红叶甜菜和毒麦等植物叶片的蒸腾作用没有影响。灰尘如何影响植物的蒸腾作用取决于叶面空气流动状况与灰尘遮盖强度,如果叶面空气流动状况较好,灰尘积盖较薄,叶片温度升高提高胞间水汽分压,促进植物叶片的蒸腾作用;如果遮盖较厚,阻碍叶面气体交换,温度升高加重叶片受危害的程度,则降低植物叶片的蒸腾作用。

1.3 对植物色素含量和代谢的影响

植物新陈代谢和生长发育是环境中光照、气体、水和土壤等各种因素综合作用的结果,其中植物的色素含量(叶绿素和类胡萝卜素)对大气污染变化有很强的敏感性,常被用来作为指示大气污染物对植物生理状态影响的指标(Gowin & Goral,1977; Rabe & Kreeb,1980)。

灰尘污染能降低叶片的总叶绿素含量(Mandre & Tuulmets,1995,1997; Prusty 等,2005)。Prusty 等(2005)研究路边 6 种常见植物的叶片自然暴露于马路灰尘下 24 h 后色素含量的变化,发现几乎所有植物的叶绿素含量都有明显下降。通常,植物中叶绿素含量降低时,类胡萝卜素的含量升高。但 Prusty 等(2005)同时观察到植物的类胡萝卜素的含量显著降低,说明灰尘影响了叶片组织内所有色素的动力学变化。

Mandre & Tuulmets(1997)研究发现,水泥的

灰尘显著改变挪威云杉针叶色素的季节性变化规律。与未受污染的对照地区的相比,距离水泥场 0.5 km 处的一年齡的云杉的叶绿素 a(Chl a)含量显著下降,叶绿素 b(Chl b)的变化很小,Chl a/Chl b 比值下降约 25%。Gowin & Goral(1977)在 Douglas fir needles 上也发现了 Chl a/Chl b 比值对灰尘污染的敏感性。

灰尘处理降低色素含量的主要原因可能是由于灰尘颗粒上附着的碱性物质,遇水合成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$,导致细胞液形成碱性环境(Guderian, 1986)。在碱性条件下,镁铁锰等无机离子溶解度较小,不能很好地被吸收,造成叶片内部的 Mg^{2+} 、Fe 及 Mn^{2+} 含量下降(Baszynski 等, 1980; Mandre & Tuulmets, 1995, 1997),进而抑制叶绿素前期的生化合成;以及灰尘的直接遮蔽作用,导致光合作用等新陈代谢速率降低。

1.4 对植物叶片生长和形态的影响

空气污染物对植物最明显的伤害大都最先由植物叶片表现出来(Ulrich, 1984)。灰尘污染对植物叶片的主要伤害包括:(1)萎黄(chlorosis):灰尘覆盖会导致植物叶片正常的绿色消失,叶片发白绿色,黄色甚至是白色(Prasad 等, 1992),加速植物叶片的老化,引起早落叶等现象。(2)坏疽(necrosis):轻微的灰尘污染胁迫,首先导致黄化,进而引起叶片细胞、组织或整个植株的死亡(Prasad 等, 1992)。(3)偏上性(epinasty):偏上性是由于植株的上层部分生长过快而导致叶片的面积和质量增加,超出了叶柄的承重能力,导致叶片向下弯曲(Prasad 等, 1992)。一些阳生植物,长期灰尘的覆盖会导致光能吸收的减少,为了能获得更充足的光能,植物叶片的面积会增大;另一方面,由于营养的匮乏会导致植物长势变弱,使叶柄变细,产生偏上性。严重的还会发生叶片从叶柄处断开脱落。(4)使叶片变得柔软。长期的蒙尘覆盖会导致植物光合作用产物积累减少,植物营养不良,从而影响叶片的生长,导致叶片发育不良,叶片厚度变小,使得叶片整体变得柔弱。(5)导致叶片卷曲。叶片表面灰尘的积累,为一些生物或附生植物提供了生存条件,它们的生长会导致叶片向内卷曲。

1.5 对植物生长发育、开花结果的影响

很多植物对空气污染物都很敏感,污染物能破坏叶片,导致营养物质合成的减少,从而抑制植物的生长(Ulrich, 1984)。长期覆盖灰尘的植物,生长、

开花结果等普遍会受到抑制,尤其是对胁迫敏感的物种(Saunders & Godzik, 1986; Grantz 等, 2003)。灰尘抑制植物叶片的光合作用等代谢过程,导致植物叶片的营养积累减少,从而影响植物的正常生长。如美国南部 Mojave 沙漠生长在没有铺柏油或石砖的道路附近的典型的灌木丛,由于过量灰尘的积聚,会导致植物落叶,新芽死亡和降低初级经济产量(Sharifi 等, 1997)。有自然落叶和新叶生长速度快等特点的落叶植物能较好地缓解灰尘覆盖带来的不良影响;但对常绿植物来说,长期灰尘覆盖会导致叶片叶绿素含量减少,叶片光合速率下降,加速植物组织、器官的衰老,致使植物对营养的消耗大于合成,营养积累逐渐减少,导致植物长势弱,并影响和威胁植物叶芽的生长。

一年生植物对灰尘胁迫反应更加明显,灰尘的覆盖及其所含的可溶性有毒物质,使一年生植物的光合作用下降,导致营养积累不足,生长势弱。由于孕育种子所需的营养不足,导致一年生植物孕育出的种子数量和质量下降,这影响了来年植物的生长数量,使其逐年减少(Grantz 等, 2003)。植物授粉过程中对灰尘的胁迫也很敏感,灰尘能阻碍花粉传递到接受部位,导致结果率低,小果或变形果。在许多果实生长初期,果实表面对各种刺激和伤害异常敏感,此时灰尘覆盖会导致果实表面出现黄褐色的斑点,延迟果实的成熟,降低果实中糖份的含量并影响果实的成色,这些影响会导致易落果,使其产量下降,严重影响果实的质量和产量。

2 灰尘中特殊成分对植物的影响

灰尘不是一种单一的污染物,而是由不同粒径、大小、来源和化学组成的颗粒形成的混合物(Grantz 等, 2003),其中含有很多酸性、碱性和具有诱变活性的物质,它们能通过多种途径进入植物体(Van Houdt, 1990; Beckett 等, 1998),对植物的新陈代谢和生长发育产生影响和危害。

2.1 酸性成分

如硝酸盐和硫酸盐,以及它们的联合作用,这些酸性成分会侵蚀叶片的表面,影响气孔开度,进入叶片细胞后还会改变细胞环境的酸碱度,从而破坏细胞功能,影响反应酶的活性,使叶片的光合作用受到抑制(曹仁江, 2003)。

2.2 微量元素和重金属元素

主要包括铅、汞等(Grantz等,2003)。灰尘中,尤其是城市灰尘中含有大量的重金属元素,其中以铅(Pb)的含量最高。铅被植物吸收富集到体内达到一定程度时,会破坏叶片中的叶绿素,抑制叶绿素的合成。叶片被800 mg/L的 Pb^{2+} 溶液处理4 h后,叶绿素含量约减少50%,2 d后减少约70%,严重影响叶片的光合作用(Singh & Rao,1997)。

2.3 碱性成分

如水泥、石灰等。多来源于采石场、露天采矿作业场以及公路交通沿线(Farmer,1993)。这类碱性灰尘发生水合作用后能释放氢氧化钙,使叶片表面呈现碱性环境,在一些情况下pH高达12,导致叶片表面的脂质和蜡质等组分解,穿透叶表皮,使叶片内部的蛋白质发生变性,最终导致叶片的质壁分离(Guderian,1986)。此外,碱性灰尘中通常MgO的含量较高(Bermadinger等,1988),无论是在污染场地还是在实验室中,灰尘中的MgO都会破坏挪威云杉(*Picea abies*)针叶的外表皮蜡质层。

2.4 可溶性毒物和可溶性盐分

它们与水作用后,从气孔浸入叶组织,伤害细胞,影响细胞内正常的代谢过程,或发生类似“腐蚀”的情况,使植株和叶片表面形成坏死斑点,降低光合作用面积,直接或间接地抑制植物的气体交换(Chappelka等,1991;Cairney等,1999)。另外这些成分还会伤害植物的幼芽和嫩叶,导致其发芽率低,植物长势较弱,甚至引起死亡(van Houdt,1990;Beckett等,1998)。

3 灰尘对植物群落的影响和危害

3.1 对植物群落的直接影响

大多数有关灰尘对植被影响的研究多集中于分析植物个体的生理变化,而且大多在实验室或可控制的环境中开展研究(Saunders & Godzik,1986),因此有关灰尘对植物的种群、群落乃至生态系统影响的研究甚少。植物群落对灰尘胁迫的响应始于植物种群水平的改变;而种群水平的改变又始于敏感性个体的改变(Bazzaz,1996)。植物种群中个体间敏感性的差异直接与植物群落的结构和功能相关。植物种群中个体间的差异,包括基因型,生长阶段,营养水平和个体赖以存在的小环境(Levin,1998)都会决定个体的发展和命运。长期被大量的灰尘污染

会不可避免地迫使植物群落中个体生长和发育所需的大部分能量转移到抵抗污染和维持生存方面,一些植物种类因不能适应环境的改变而消失,致使植物的生产力削弱,群落内的生物多样性下降,进而导致系统不稳定和恢复重建能力的降低(Waring等,1985;Odum,1993;Rapport & Whitford,1999)。除此之外,由于群落内植物的物质循环和能量传递减弱、抗病性下降、外来种侵入等,造成植物群落中大量的低矮和存活期短的植物种类占据生长优势(Odum,1985;Rapport等,1999),最终导致群落的结构组成和特性发生改变。

生态系统对环境条件改变的响应最重要和易于观测的指标是植物群落结构组成的改变(Bowman,2000)。长期的灰尘污染会导致森林群落中一些对灰尘污染敏感种的丢失、致使树冠的改变以及群落中优势种和大量种种类的改变(Smith,1974;Miller & McBride,1999)。Brandt & Rhoades(1972,1973)的研究发现,位于石灰石场附近的植物群落的结构和组成在20~30年间发生了很大变化。对照地区的优势种和大量种是栗子橡木(*Quercus prinus*),红橡(*Q. rubra*)和红枫(*Acer rubrum*);而受石灰石影响地区的优势种是白橡(*Q. alba*),红橡(*Q. rubra*)和鹅掌楸(*Liriodendron tulipifera*),同时老树都呈现出叶片坏疽和树皮剥落现象。

3.2 对植物群落的间接影响

灰尘对植物群落产生的间接影响比直接影响更为显著,主要是由灰尘介导的光能的减少、光质的改变以及小气候的变化;另外灰尘改变土壤中N、S等营养成分的浓度和比例,以及土壤中微生物的组成(Guderian,1986;Allen,1991;Bobbink,1998;Wall & Moore,1999),这些均是造成间接影响的重要原因。植物的光合作用受到N水平的精细调控(Chapin等,1997)。富含N的灰尘沉降到土壤中会改变土壤的N元素水平,减轻自然条件下植物N缺乏的压力,促进多种植物的生长,进而改变植物的种类组成和生态系统的多样性(Ellenberg,1987)。同时,N供应的改变还会影响到生态系统中其他营养物质的平衡(Waring,1987),破坏植物间的平衡关系,从而改变植物群落的组成(Skeffington等,1988;Bobbink,1998;Edgerton等,2000)。

4 结论与展望

直径小于100 μm 的微细的尘颗粒是构成灰尘

的主要成分。本文在综述尘污染危害植物生理和群落的基础上,总结了尘污染对植物危害的原因以及生理机制。尘对植物的新陈代谢如光合作用、呼吸作用等气体交换过程和植物的生长发育以及森林、农田、植被等植物群落造成不可估量的破坏。尘污染对植物造成伤害的原因主要是对光能的遮蔽作用(Thompson 等,1984)、对气孔的阻塞作用(Ricks 等,1974)、提高叶表温度(Eller,1977;Borka,1980)、促进叶附生植物的生长等,另外,植物受胁迫后体内乙烯等激素水平的变化,也可能对植物的光合作用、呼吸作用等生理产生影响。有关这方面的问题尚待进一步研究和证明。

目前有关沙尘或灰尘对植物的伤害和影响的研究多集中在实验室或可控制的小环境中展开,还缺少大量的对自然条件下尘对植物的生理和生态特性的深入研究。加强这方面的研究,可以全面、正确、客观的认识和评价尘或沙尘暴对园林绿化和农业生产的影响。

今后的研究工作有必要加强探讨不同种类植物对尘胁迫的敏感性差异,如我们对湖北省 20 种常见绿化植物长期蒙尘处理后光合作用的变化的研究发现,对节白蜡、红榿木的光合速率并没有受到太大影响,表明蒙尘胁迫对对节白蜡、红榿木光合作用的影响较弱,通过比较植物对尘污染的敏感性的差异,为评价尘污染的植物生产影响及确定抗性植物提供理论支持。另外,确定评价尘污染影响植物的指标体系和方法是有待进一步解决的重要问题,这一问题的解决对于全面认识尘及沙尘暴的危害、采取积极措施控制与减轻尘对农业生产和园林绿化的消极影响具有重要意义。

参考文献:

- 王宏伟,黄峰,王慧觉,等. 2007. 蒙尘胁迫对植物叶片气体交换的影响[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),已接收
- 曹仁江. 2003. 酸雨的危害及防治措施[J]. 辽宁城乡环境科技,23(4):6-8
- 谢昱妹. 2006. 大气颗粒物对人体健康影响研究进展[J]. 铁道劳动安全卫生与环保,33(4):205-208
- 彭珂珊. 2004. 沙尘暴对西部发展的危害研究[J]. 地质技术经济管理,26(3):19-25
- Allen MF. 1991. The ecology of mycorrhizae. Cambridge(MA): Cambridge University Press
- Anderson H, Atkinson R, Peacock J, et al. 2004. Meta-analysis of time-series studies and panel studies of particulate matter(PM) and ozone(O₃)[M]. Geneva, Switzerland; World Health Organization
- Brandt CJ, Rhoades RW. 1972. Effects of limestone dust accumulation on lateral growth of forest trees[J]. *Environ Poll*, 3:213-217
- Brandt CJ, Rhoades RW. 1973. Effects of limestone dust accumulation on lateral growth of forest trees[J]. *Environ Poll*, 4:207-213
- Borka G. 1980. The effect of cement dust pollution on growth and metabolism of *Helianthus annuus*[J]. *Environ Pollut*, 22:75-79
- Baszynski T, Wajda L, Krol M, et al. 1980. Photosynthetic activities of cadmium-treated tomato plants[J]. *Physiol Plant*, 48:365-370
- Bermadinger E, Grill D, Golob P. 1988. Influence of different air pollutants on the structure of needle wax of spruce(*Picea abies* Karsten)[J]. *Geol J*, 17:289-293
- Bazzaz FA. 1996. Plants in changing environments[M]. Cambridge University Press.
- Beckett KP, Freer-Smith PH, Taylor G. 1998. Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution[J]. *Environ Pollut*, 99:347-360
- Bobbink R. 1998. Impacts of tropospheric ozone and airborne nitrogenous pollutants on natural and semi-natural ecosystems; a commentary[J]. *New Phytol*, 139:161-168
- Bobbink R, Hornung M, Roelofs JGM. 1998. The effects of airborne nitrogen pollutants on species diversity in natural and semi-natural European vegetation[J]. *J Ecol*, 86:717-738
- Bowman WD. 2000. Biotic controls over ecosystem response to environmental change in alpine tundra of the Rocky Mountains [J]. *Ambio*, 29:396-400
- Cook ER. 1987. The use of climatic response models of tree rings in the analysis and prediction of forest decline[M]//Kairiukstis L, Bednars Z, Feliksik E(eds). Methods of Dendrochronology-1. Proceedings of the Task Force Meeting on Methodology of Dendrochronology East/West Approaches, Warsaw, Poland, 269-276
- Chappelka AH, Kush JS, Runion Gb, et al. 1991. Effects of soil-applied lead on seedling growth and ecto-mycorrhizal colonization of loblolly pine[J]. *Environ Poll*, 72:307-316
- Chapin III FS, Walker BH, Hobbs RJ, et al. 1997. Biotic control over functioning ecosystems[J]. *Sci*, 277:500-504
- Cairney JWG, Meharg AA. 1999. Influences of anthropogenic pollution on mycorrhizal fungal communities[J]. *Environ Pollut*, 106:169-182
- Chen XW. 2000. Study of the short-time eco-physiological responses of plant leaves to dust[J]. *Acta Bot Sin*, 43:1058-1064
- Eller BM. 1977. Road dust induced increase of leaf temperature [J]. *Environ Pollut*, 13:99-107
- Ellenberg H. 1987. Floristic changes due to eutrophication[M]//Asman WAH, Diederik SMA(eds). Ammonia and acidification, Symp Proc European Association for the Science of Air Pollution (EURASAP), Bilthoven, The Netherlands, 301-308
- Edgerton-Warburton LM, Allen EB. 2000. Shifts in arbuscular mycorrhizal communities along an anthropogenic gradient, nitrogen deposition gradient[J]. *Ecol Appl*, 10:484-496
- Farmer AM. 1993. The effects of dust on vegetation-a review[J]. *Environ Poll*, 79:63-75
- Gowin T, Goral I. 1977. Chlorophyll and pheophytin content in needles of different age of trees growing under conditions of chronic industrial pollution[J]. *Acta Sci Bot Poloniae*, 46:151

- 159
- Guderian R. 1986. Terrestrial ecosystems: particulate deposition. In: Legge AH, Krupa SV (eds). Air pollutants and their effects on the terrestrial ecosystem[J]. *Adv Environ Sci Tech*, **18**: 339-363
- Grantz DA, Garner JHB, Johnson DW. 2003. Ecological effects of particulate matter[J]. *Int Environ*, **29**: 213-239
- Hirano T, Kiyota M, Aiga I. 1994. Physical effects of dust on leaf physiology of cucumber and kidney bean plants[J]. *Environ Pollut*, **89**: 255-261
- Hirano T, Kiyota M, Aiga I. 1995. Physical effects of dust on leaf physiology of cucumber and kidney bean plants[J]. *Environ Pollut*, **89**: 255-261
- James ILM, Roger M. 1983. Gifford. Stomatal Sensitivity to Carbon Dioxide and Humidity[J]. *Plant Phys*, **71**: 789-796
- Krishnamurthy KV, Rajachidambaram C. 1986. Factors associated with reduction in photosynthetic oxygen evolution in cement dust coated leaves[J]. *Photosynthetica*, **20**: 164-168
- Levin SA. 1998. Ecosystems and the biosphere as complex adaptive systems[J]. *Ecosystems*, **1**: 431-436
- Mandre M, Tuulmets L. 1995. Physiological and biochemical responses of coniferous trees to alkaline dust impact. Changes in the pigment system. In: Mandre M (ed.), Dust pollution and forest ecosystems. A study of conifers in an alkalized environment[M]. Tallinn; Institute of Ecology, Publication, **3**: 66-77
- Miguel AQ, Zhenmin L, Eduardo Z. 1996. Close correspondence between the action spectra for the blue light responses of the guard cell and coleoptile chloroplasts, and the spectra for blue light-dependent stomatal opening and coleoptile phototropism[J]. *Plant Biology*, **5**(93): 224-228
- Mandre M, Tuulmets L. 1997. Pigment changes in Norway Spruce induced by dust pollution[J]. *Water Air Soil Pollut*, **94**: 247-258
- Miller P, McBride JR. 1999. Oxidant air pollution impacts in the montane forests of southern California; a case study of the San Bernardino Mountains[J]. *Eco studies*, **134**: 424
- Naidoo G, Chirkoot D. 2004. The effects of coal dust on photosynthetic performance of the mangrove, *Avicennia marina* in Richards Bay, South Africa[J]. *Environ Poll*, **127**: 359-366
- Nanos GD, Ilias IF. 2007. Effects of inert dust on olive (*Olea europaea*) leaf physiological parameters[J]. *Environ Sci Poll Res Int*, **14**(3): 212-214
- Odum EP. 1985. Trends expected in stressed ecosystems[J]. *Bio Sci*, **35**: 419-422
- Odum EP. 1993. The Ecosystem, Ecology and our endangered life-support systems, 2nd ed. Sunderland[M]. Sinauer Associates, 38-67
- Pajenkamp H. 1961. Einwirkung des Zementofenstaubs auf Pflanzen und Tiere[J]. *Zement-Kalk-Gips*, **14**: 88-95
- Prasad D, Choudhury. 1992. Effects of air pollution[C]//Misra SG (ed). Environmental Pollution Air, Environmental Pollution and Hazards Series. Venus Publishing House, New Delhi, 58-60
- Prusty BAK, Mishra PC, Azeez PA. 2005. Dust accumulation and leaf pigment content in vegetation near the national highway at Sambalpur, Orissa, India[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, **60**: 228-235
- Ricks GR, Williams RJH. 1974. Effects of atmospheric pollution on deciduous woodland part 2; effects of particulate matter upon stomatal diffusion resistance in leaves of *Quercus petraea* (Matuschka) Leibl[J]. *Environ Pollut*, **6**: 87-109
- Rabe R, Kreeb KH. 1980. Bioindication of air pollution by chlorophyll destruction in plant leaves[J]. *Oikos*, **34**: 163-167
- Rapport DJ, Whitford WG. 1999. How ecosystems respond to stress: common properties of arid and aquatic systems[J]. *Bio Sci*, **49**: 193-203
- Roelfsema MR, Hedrich R. 2005. In the light of stomatal opening; new insights into "the Watergate"[J]. *New Phytol*, **167**(3): 665-691
- Smith WH. 1974. Air pollution-effects on the structure and function of the temperate forest ecosystem[J]. *Environ Pollut*, **6**: 111-129
- Singh SN, Rao DN. 1981. Certain responses of wheat plants to cement dust pollution[J]. *Environ Pollut*, **24**: 75-81
- Sharkey TD, Raschke K. 1981. Separation and measurement of direct and indirect effects of light on stomata[J]. *Plant Phys*, **68**: 33-40
- Saunders PJW, Godzik S. 1986. Terrestrial vegetation-air pollutant interactions: non-gaseous air pollutants[C]//Legge AH, Krupa SV, Editors. Air pollutants and their effects on the terrestrial ecosystem. Advances in environmental science and technology, **18**: 389-394
- Skeffington RA, Wilson EJ. 1988. Excess nitrogen deposition; issues for consideration[J]. *Environ Pollut*, **54**: 159-184
- Sharifi MR, Gibson AC, Rundel PW. 1997. Surface dust impacts on gas exchange in Mojave Desert shrubs[J]. *J Appl Ecol*, **34**: 837-846
- Singh RP, Tripathi RD, Sinha SK, et al. 1997. Response of higher plants to lead contaminated environment[J]. *Chemosphere*, **34**: 2467-2493
- Schwartz J, Zanobetti A, Bateson TF. 2003. Revised analyses of time-series studies of air pollution and health [C]. In: Revised Analyses of Time-Series Studies of Air Pollution and Health. Boston, Mass; Health Effects Institute, 25-58
- Thompson JR, Mueller PW, Fluckiger W, et al. 1984. The effect of dust on photosynthesis and its significance for roadside plants[J]. *Environ Pollut (Ser A)*, **34**: 171-190
- Ulrich B. 1984. Effects of air pollution on forest ecosystems and waters - the principles demonstrated at a case study in Central Europe[J]. *Atmos Environ*, **18**: 621-628
- Van Houdt JJ. 1990. Mutagenic activity of airborne particles in indoor and outdoor environments[J]. *Atmos Environ*, **24**: 207-220
- Waring RH, Schlesinger WH. 1985. The carbon balance of trees. Forest ecosystems: concepts and management[J]. *Orlando; Academic Press*, **7**: 37
- Waring RH. 1987. Nitrate pollution; a particular danger to boreal and subalpine coniferous forests[C]//Fujimori T, Kimura M (eds). Human impacts and management of mountain forests. Ibaraki, Japan; Forestry and Forest Products Research Institute, 93-105
- Wall DH, Moore JC. 1999. Interactions underground; soil biodiversity, mutualism, and ecosystem processes[J]. *Bio Sci*, **49**: 109-117
- Wichmann HE, Spix C, Tuch T, et al. 2000. Daily mortality and fine and ultrafine particles in Erfurt [M]. Part I; Role of Particle Number and Particle Mass. Germany; Health Effects Institute