

社会—经济—自然复合生态系统
可持续发展研究丛书之二

酸沉降对生态环境的影响 及其生态恢复

冯宗炜 曹洪法 周修萍 等著



中国环境科学出版社

酸沉降对生态环境的 影响及其生态恢复

冯宗炜 曹洪法 ~~周修萍~~ 等著

中国环境科学出版社
·北京·

461375



图书在版编目(CIP)数据

酸沉降对生态环境的影响及其生态恢复/冯宗炜等著.
北京:中国环境科学出版社, 1999.3

ISBN 7-80135-774-4

I. 酸… II. 冯… III. ①酸雨-污染防治-研究-中国
②酸雨-环境影响-研究-中国 IV. X517

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 06019 号

中国环境科学出版社出版发行

(100036 北京海淀区普惠南里 14 号)

北京地大彩印厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经售

*

1999 年 3 月第 一 版 开本 850×1168 1/32

1999 年 3 月第一次印刷 印张 11.50 插页 0

印数 1~1 000 字数 300 千字

定价: 26.00 元

社会-经济-自然复合生态系统 可持续发展研究丛书 编辑委员会

主任:李文华

委员(以姓氏笔划为序):

马 中	牛文元	王如松	叶文虎	冯宗炜
刘燕华	陈昌笃	陈吉元	吴 刚	郝吉明
赵景柱	胡鞍钢	傅伯杰	潘家华	欧阳志云

主办单位:中国科学院生态环境研究中心系统生态开放研究室

前 言

酸沉降是当前世界上重大的环境问题之一。我国是继欧洲、北美之后在世界上出现的第三大片酸雨区。“七五”期间在西南和两广地区的研究结果表明,酸沉降对农作物、森林、土壤和水体的影响已造成很大的经济损失和生态危害。长江以南各省是我国酸雨的主要分布区,其东部地区特别是长江三角洲是我国人口密度大,经济发展快,工农业较发达地区,近年来乡镇企业发展迅猛,酸性气体的排放量随燃煤消耗量的增加而逐年升高,雨水酸度逐年递增。因此,查明该地区酸沉降对生态环境的影响和农、林业的危害损失,提出有效的防治技术和措施,对改善我国酸雨区的生态环境质量,促进经济建设的持续发展具有十分重要的意义。

《酸沉降对生态环境的影响及其经济损失》(85-912-01-02),是国家“八五”环保科技攻关课题《我国酸沉降及其生态环境影响的研究》(85-912-01)的一个专题,其任务是在国家“七五”环保科技攻关课题于川、黔、粤、桂四省(区)典型地区的《酸雨对生态环境的影响及其经济损失》的研究基础上,对我国南方苏、浙、闽、皖、赣、湘、鄂七省广大地区,酸沉降对生态环境的影响及其经济损失,做出定量的估算,并对重庆酸沉降严重地区退化生态系统的恢复技术和措施进行研究。专题组由冯宗炜、

曹洪法和周修萍主持,参加研究的各单位科技人员近 60 人(详细名单附后)。该专题是一项多学科的综合性的研究,包括有四个子专题:酸沉降对农作物影响及其经济损失(85-912-01-02-01);酸沉降对森林影响及其经济损失(85-912-01-02-02);生态系统对酸沉降敏感性区划和临界负荷的研究(95-912-01-02-03);以及酸沉降严重危害地区生态系统恢复技术和措施的研究(85-912-01-02-04)。应当指出,“七五”期间的研究主要是针对酸雨的影响,“八五”期间则较全面的考虑了酸雨和二氧化硫复合污染的影响,并利用 GIS(地理信息系统)技术按 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 经纬度的网格分别提出了酸沉降对农田、森林危害图、生态系统对酸沉降敏感性图和临界负荷图,因此野外和实验室内的研究工作量 and 难度更大。该专题由中国科学院生态环境研究中心、中国环境科学研究院生态研究所、国家环境保护局南京环境科学研究所承担,中国科学院南京土壤研究所、中国科学院沈阳应用生态研究所、中国科学院武汉水生生物研究所等单位参加。几年来,科研人员不畏酷暑严寒,奋力拼搏,共同努力,按国家科技攻关合同规定的内容,胜利完成任务,取得了预期的成果。

本专著是在上述研究成果的基础上,经专题技术组成员共同讨论后,分章执笔。各章的执笔人:第一章 酸沉降对农作物影响及其经济损失为曹洪法、沈英娃;第二章 酸沉降对森林影响及其经济损失为冯宗炜、陈楚莹;第三章 生态系统对酸沉降的敏感性和临界负荷为周修

萍、季国亮;第四章 酸沉降严重危害地区生态系统恢复技术和措施为张福珠、冯宗炜;第五章 结论与建议为冯宗炜,初稿撰写完成后,由冯宗炜统一修改后定稿。本研究成果已于 1995 年通过专家鉴定,该成果是《我国酸沉降及其生态环境影响的研究》课题中的重要组成部分,课题研究成果已于 1997 年获国家环保局科技进步一等奖,并于 1998 年获国家科技进步一等奖。本研究成果已为国务院批准的我国大气污染防治法所规定的:“酸雨控制区和二氧化硫污染控制区的区划”及制定“国家区域酸雨控制规划”参考应用。本专著的出版得到我国环保、农业、林业、高教和科研各部门的重视和鼓励,并得到中国科学院生态环境研究中心系统生态开放研究室的资助。在此一并表示衷心的感谢。

最后,应该指出的是,由于时间紧,任务重,本专著中不足和错误之处在所难免,敬希领导、专家和同志们批评指正。

冯宗炜

1999 年 2 月 20 日



重庆南山金属栏杆受酸雨危害腐蚀状



豆类蔬菜受酸雨和 SO_2 复合污染危害症状



重庆南山马尾松受酸雨危害状
(自右至左：严重、中等、较轻)



峨眉山冷杉(*Abies fabri*)受酸沉降和冰雹等影响危害状

目 录

第一章 酸沉降对农作物影响及其经济损失	(1)
1 酸沉降对农作物的急性伤害	(1)
1.1 酸雨的可见伤害	(1)
1.2 二氧化硫的急性伤害	(3)
1.3 模拟酸雨和二氧化硫复合污染的可见伤害	(8)
2 酸沉降对农作物生理代谢的影响	(9)
2.1 模拟酸雨的影响	(9)
2.2 二氧化硫对农作物生理代谢的影响	(14)
2.3 模拟酸雨和二氧化硫对农作物生理代谢的复合影响	(19)
3 酸沉降对农作物生长的影响	(25)
3.1 模拟酸雨对农作物生长的影响	(25)
3.2 二氧化硫对农作物生长的影响	(35)
3.3 模拟酸雨和二氧化硫复合污染对农作物生长发育的影响	(43)
4 酸沉降对农作物产量和品质的影响	(52)
4.1 模拟酸雨对农作物产量和品质的影响	(52)
4.2 二氧化硫对农作物产量和品质的影响	(61)
4.3 模拟酸雨和二氧化硫复合污染对农作物产量的影响	(69)
5 酸沉降对南方七省(苏、浙、皖、闽、赣、湘、鄂)农业影响的经济损失分析	(75)
5.1 南方七省农业概况	(75)
5.2 酸沉降污染现状	(76)
5.3 农作物减产基准值	(79)

5.4	农业经济损失估算	(83)
5.5	酸沉降对农田生态的危害	(90)
6	小 结	(100)

第二章 酸沉降对森林影响及其经济损失..... (105)

1	南方七省(苏、浙、皖、闽、赣、湘、鄂)主要树种对酸沉降的敏感性	(105)
1.1	树木对模拟酸雨的敏感性	(106)
1.2	树木对二氧化硫的敏感性	(106)
1.3	树木对模拟酸雨和二氧化硫复合污染的敏感性	(106)
1.4	树木对模拟酸雨和二氧化硫单一和复合污染的敏感性比较	(107)
1.5	小 结	(107)
2	酸沉降对不同树种生长影响的生理生化反应	(124)
2.1	对超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响	(126)
2.2	对过氧化物酶(POD)活性的影响	(127)
2.3	对叶汁酸度(pH)的影响	(128)
2.4	对细胞膜透性的影响	(128)
2.5	不同树种过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)活性本底值的比较	(129)
2.6	小 结	(130)
3	酸沉降对南方七省主要森林类型生产力的影响和经济损失	(130)
3.1	酸沉降对森林生产力影响和经济损失的研究方法	(131)
3.2	酸沉降对江苏省森林生产力影响和经济损失估算	(133)
3.3	酸沉降对浙江省森林生产力影响和经济损失估算	(140)
3.4	酸沉降对安徽省森林生产力影响和经济损失估算	(146)
3.5	酸沉降对福建省森林生产力影响和经济损失估算	(151)
3.6	酸沉降对江西省森林生产力影响和经济损失估算	(156)

3.7	酸沉降对湖南省森林生产力影响和经济损失估算	(161)
3.8	酸沉降对湖北省森林生产力影响和经济损失估算	(166)
4	酸沉降对南方七省森林危害损失图的计算和绘图	(170)
4.1	1°×1°经纬度网格森林危害损失计算	(170)
4.2	编图方法和绘制	(170)
5	酸沉降对南方七省森林的危害和经济损失的比较	(174)
5.1	酸沉降对森林危害的面积	(174)
5.2	酸沉降危害的木材产量	(175)
5.3	酸沉降危害森林造成的经济损失	(176)
5.4	酸沉降对森林危害的综合评估	(176)
5.5	小 结	(177)

第三章 生态系统对酸沉降的敏感性区划和临界负荷 (179)

1	生态系统对酸沉降的敏感性	(179)
1.1	酸沉降的影响和生态系统的敏感性	(179)
1.2	影响亚热带生态系统敏感性的因素	(184)
1.3	相对敏感性分级方法与指标体系	(193)
1.4	敏感性分区图的编制	(210)
2	亚热带地区土壤酸化趋势预测	(222)
2.1	土壤元素淋溶状况	(222)
2.2	土壤 ANC 预测模型	(228)
2.3	土壤酸化趋势估测	(235)
3	生态系统对酸沉降的临界负荷	(237)
3.1	酸沉降临界负荷	(237)
3.2	临界负荷计算模型	(238)
3.3	工作方法及模型参数	(242)
3.4	临界负荷的计算	(256)
3.5	南方七省生态系统对酸沉降的临界负荷和临界负荷图	(261)
4	典型地区土壤的酸缓冲能力	(271)

4.1	土壤酸缓冲能力的指标和测定方法	(273)
4.2	影响土壤酸缓冲能力的因素	(274)
4.3	酸缓冲能力的指标和分级	(283)
4.4	典型地区土壤的酸缓冲能力	(285)
5	小 结	(290)

第四章 酸沉降严重危害地区生态系统恢复技术和措施 (300)

1	实验地区的基本概况	(302)
1.1	自然概况	(302)
1.2	退化森林生态系统群落的特点	(302)
1.3	林地土壤特点	(303)
2	实验区的设计和处理	(304)
2.1	实验区的位置	(304)
2.2	抗酸树种的选择和引种	(304)
2.3	实验小区的设计和处理	(305)
3	不同措施对马尾松林地酸化土壤改良的效应	(307)
3.1	抗酸树种栽植对马尾松林地土壤的改良作用	(307)
3.2	不同树种叶片中元素含量和年枯落物量的估算	(307)
3.3	不同处理对马尾松林地土壤改良的效应	(310)
3.4	不同处理对林木生长的影响	(310)
4	抗酸耐污优化人工生态系统营养物质循环的特点和效应的估算	(312)
4.1	樟树林和马尾松林群落结构	(313)
4.2	群落中 N、P、S 元素的分布	(314)
4.3	群落中 N、P、S 元素的存留	(318)
4.4	群落中 N、P、S 元素的归还	(320)
4.5	群落中 N、P、S 元素林冠层的淋洗	(325)
4.6	群落中 N、P、S 元素的年总归还量、总吸收量和总需求量	(330)

4.7	群落中 N、P、S 元素的流动特性	(332)
4.8	群落中 N、P、S 元素的迁移	(333)
5	小 结	(333)
第五章 结论和建议		(336)
1	结 论	(336)
1.1	酸沉降对农作物的影响及其经济损失	(336)
1.2	酸沉降对森林的影响及其经济损失	(338)
1.3	生态系统对酸沉降的敏感性和临界负荷	(340)
1.4	酸沉降严重危害地区生态系统恢复技术和措施	(341)
2	建 议	(342)
参 考 文 献		(344)
附录 1 植物名录(拉丁名 - 中文名对照)		(351)
附录 2 承担国家攻关专题的单位和研究人员名单		(356)

第一章 酸沉降对农作物影响及其经济损失

1 酸沉降对农作物的急性伤害

植物受酸雨和二氧化硫等大气污染物的伤害,一般分为急性伤害和慢性伤害两类。急性伤害,通常指植物与酸雨、二氧化硫等污染物接触,植物叶片在短时间(24~72h)内出现可见的伤害症状。这种症状是高浓度的污染物引起叶片细胞死亡造成的,严重的甚至全叶细胞死亡,枯枝枯梢,整株衰亡。叶片急性伤害的可见症状与污染物种类密切相关。慢性伤害,一般指植物长期与低酸度的降水或低浓度的大气污染物接触,出现叶色失绿或色素变化,破坏细胞的正常活动,导致细胞死亡,以可见伤害症状或叶片过早脱落等形式显示。慢性伤害症状通常不反映污染物的特征。

1.1 酸雨的可见伤害

采用土培盆栽法,以小麦(*Trificum aestivum*)、玉米(*Zea mays*)、大麦(*Hordeum vulgare*)、水稻(*Oryza sativa*)、大豆(*Glycine max*)、棉花(*Gossypium hirsutum*)、菜豆(*Phaseolus vulgaris*)、油菜(*Brassica pekinensis* var. *oleifera*)、黄瓜(*Cucumis sativus*)、西红柿(*Lycopersion esculentum*)、白菜(*Brassica pekinensis*)、菠菜(*Spinacia oleracea*)等12种农作物的苗期为材料,模拟酸雨按我国南方天然酸雨中的 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的比例(8.32:1)及 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 Mn^{2+} 、 Cl^- 等主要离子成分的平均浓度来配制。试验处理为pH 4.0、3.5、3.0、2.5、2.0和1.5等6个不同

酸度。每处理重复 10 次。用人工降雨器降水,雨量 15mm,其持续时间为 10min。以简易塑料棚遮盖,避免自然降雨的干扰。

1.1.1 模拟酸雨的可见伤害症状

叶片接触模拟酸雨后,当时一般不表现症状,随着时间的延续,症状开始显露,并逐渐加重。敏感的农作物接触高酸度的模拟酸雨几小时后,就可出现受害斑,但多数农作物在 24h 左右才表现受害,通常接触模拟酸雨 48~72h 左右可见伤害症状稳定下来。模拟酸雨造成农作物急性伤害,症状表现为微小点状的白色枯死斑点,主要分布在叶脉附近,这与 SO_2 急性危害引起叶片的成片伤斑有些不同,也与 HF 造成叶片边缘或尖端受害有区别。若模拟酸雨的 pH 值很低,伤害症状呈黄白色的条状,或使叶片大部分以至全部的叶肉组织坏死。大豆和白菜叶片出现可见伤害症状的同时,伴随着出现叶尖部位卷曲,叶边缘枯竭等现象。

1.1.2 酸雨的可见伤害阈值

叶片可见伤害阈值通常以受害叶面积的 5% 来确定。不同农作物或同一种作物不同品种因生物学特性的差异、地域、实验条件与方法、生育期和实验的环境条件等不同都会影响叶片的伤害。因此,不同的研究者所得出的阈值常常有差别。根据我们实验结果,供试作物苗期叶片伤害阈值见表 1.1。

表 1.1 模拟酸雨对几种农作物的急性伤害阈值

农作物	小 麦	玉 米	白 菜	大 豆	水 稻	菜 豆
伤害阈值(pH)	3.0	3.0	2.5	2.5	2.0	2.5
农作物	油 菜	黄 瓜	番 茄	大 麦	棉 花	菠 菜
伤害阈值(pH)	2.5	2.5	2.5	3.0	2.5	3.0

由表 1.1 可以看出,模拟酸雨的伤害阈值因农作物的种类不

同而异。在受试的农作物中,大麦、菠菜、小麦、玉米的阈值为 pH3.0;大豆、菜豆、油菜、黄瓜、棉花、白菜的阈值居中,在 pH2.5 模拟酸雨的作用下表现出可见伤害;而水稻表现出较强的抗性,可见伤害阈值 pH2.0。

农作物不同龄期的叶片对模拟酸雨的反应呈现出不同的敏感性。就小麦、大麦和水稻叶片而言,展开和正在展开的叶片对模拟酸雨的反应比成熟叶或老叶敏感,易受害。幼小的新生叶片对模拟酸雨的抗性最强,不易受害。农作物对模拟酸雨的敏感性或抗性在叶片形态上具有下列特点:叶片光滑、腊质层厚,叶革质、坚韧,不易受害,对模拟酸雨相对抗性大;反之,叶面粗糙、凹陷、叶薄质,易受害,对模拟酸雨敏感。

农作物对酸雨的敏感性随生育期不同而异。苗期对酸雨最为敏感,抗酸能力最差。随着农作物生长,抗酸能力也随之增加,表现出抗性增大,对酸雨的敏感性减弱。

1.2 二氧化硫的急性伤害

选用小麦、水稻、玉米、大麦、大豆、棉花、油菜、黄瓜、菜豆、番茄等农作物的苗期为材料,应用 CSTR 熏气系统进行高浓度 SO_2 处理,以及不同暴露时间(1、2、4、6 和 8h),进行不同 SO_2 剂量与农作物急性伤害关系的研究。

1.2.1 二氧化硫的急性伤害症状

在 SO_2 作用下,农作物的急性伤害症状最常见的是叶脉间的不规则的坏死,有的农作物坏死斑较小,呈点状,有的较大,呈块状;有些窄叶的农作物的坏死区集中在叶顶部和边缘。叶组织破坏部分呈灰绿的水渍状,然后渐渐失水干枯,出现坏斑,其颜色有红棕色、灰白色、象牙色。伤害严重时,点状发展成条状,块状连成片状。由于二氧化硫伤害通常是局部性的,坏死区周围的组织仍