

植物对空 气污染的 反应

[美] J. B. 马 德 编
T. T. 科兹洛夫斯基

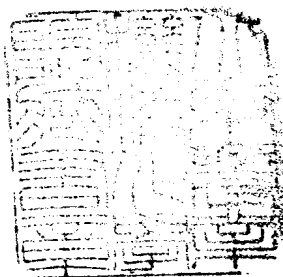


科学出版社

植物对空气污染的反应

〔美〕 J. B. 马德 T. T. 科兹洛夫斯基 编

刘富林 译



科学出版社

1984

内 容 简 介

本书叙述了大气污染与植被和农业的相互关系,并以高等植物为主,较详细地叙述了从亚细胞水平到整个生态系统的反应。本书还分章论述了污染物对森林、苔藓和地衣的影响以及六种污染物(二氧化硫、臭氧、氟化物、硝酸过氧化酰、氧化氮和颗粒物)、混合污染对植物的影响。

本书的特点是以植物生理、生化机制来阐明植物对空气污染的反应。本书可供植物、农林及环境保护等专业工作者和大专院校师生参考。

J. B. Mudd T. T. Kozłowski
RESPONSES OF PLANTS TO AIR POLLUTION
Academic Press, 1975

2030/01

植物对空气污染的反应

[美] J. B. 马德 T. T. 科兹洛夫斯基 编

刘富林 译

责任编辑 梁淑文

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1984年9月第一版 开本: 850×1168 1/32

1984年9月第一次印刷 印张: 10 3/4

印数: 0001—7,300 字数: 281,000

统一书号: 13031·2650

本社书号: 3650·13—10

定价: 2.00 元

序

由于人口的迅速增长和工业的发展所造成的地球的严重污染，是人类面临的最重要的问题之一。目前我们必须处理许多分布很广的有毒物质，包括气体、颗粒物和放射性物质，这些都影响我们的食品供应、健康和经济。特别是，实际上所有作物的产量和天然的生态系统的结构，都不幸地受到大气污染物的影响。问题在于，污染竟成为悲剧，这是人们自己造成的，这是由于多年来大家都对此漠不关心，终于使之根深蒂固。本书就是针对这样的背景，论述空气污染物单独地和相互促进地对高等和低等植物的影响。

本书取材广泛、可信，而且都有文献根据。第一章综合叙述了空气污染的来源、空气污染的损失和植物受污染危害的机制。后面分章论述了二氧化硫、臭氧、氟化物、硝酸过氧化酰、氧化氮和颗粒物。以后各章讨论植物对混合污染物的反应；污染物对植物超微构造、对森林、对地衣和苔藓植物的影响；论述了污染物与农业实践的相互作用。

我们希望本书对许多学科的科学家和分担我们忧虑的人都感兴趣和有用，这种忧虑就是认为我们不能再希望有清洁的空气成为动植物的正常环境。本书特别适于供高水平的大学肄业生、大学毕业生、研究人员和植物栽培工作者作参考书和教本。本书题材广泛，包括各门学科：农学、植物解剖学、生物化学、孢子植物学、生态学、昆虫学、森林学、园艺学、园林建筑学、气象学、镜检术、植物病理学、植物生理学和土壤科学。

让我们对我们的卓越合作者致以深切谢意，感谢他们热心答应作出共同努力，担任审定工作和在著作期间付出的辛勤劳动。P. E. 马歇尔先生和 T. C. 诺兰德先生协助制订内容索引。

J. Brian Mudd

T. T. Kozlowski

目 录

序.....	v
1. 绪论	1
I. 污染的来源	2
II. 空气污染的损失	3
III. 污染危害植物的机制	4
2. 二氧化硫	7
I. 引言	7
II. 化学上的探讨	7
III. 敏感性	9
IV. 生理效应	10
V. 生物化学效应	15
VI. 结论	18
3. 臭氧	19
I. 引言	19
II. 臭氧进入危害部分	22
III. 初始危害的部位	29
IV. 危害的蔓延或第二步反应	42
V. 结论	47
4. 氟化物	48
I. 引言	48
II. 氟化物的吸收、积累、转移和危害效应	48
III. 氟化物对各种代谢物的影响、危害(亚细胞的)和复原	53
IV. 氟化物对呼吸和有关生化反应的影响	56
V. 氟化物对外表光合作用、希尔(Hill)反应和色素的影响	62
VI. 氟化物对生长、老化和有关生化代谢物的影响	66
VII. 氟化物和含氟有机化合物	73
VIII. 氟化物对体外酶的影响	77

5. 硝酸过氧化乙酰	80
I. 引言	80
II. 化学性质	81
III. 症状	84
IV. 生理观察	86
V. 生物化学效应	89
VI. 毒性的化学基础	97
6. 氮的氧化物	100
I. 氮氧化物的形成	100
II. 影响危害的因素	103
III. 造成植物危害的机制	103
IV. 对高等植物的影响	104
V. NO_2 和 SO_2 的混合影响	115
VI. 影响植被的空气质量标准的评定	116
7. 颗粒物	118
I. 引言	118
II. 特殊颗粒物对植被的影响	118
III. 结论	132
8. 植物对混合污染物的反应	134
I. 引言	134
II. 植物对混合污染物的反应	136
III. 混合污染物的含义	149
9. 空气污染对植物超微结构的影响	152
I. 引言	152
II. 臭氧和硝酸过氧化乙酰	152
III. 二氧化氮	158
IV. 氟化物	159
V. 二氧化硫	162
VI. 乙烯	163
VII. 结论	164
10. 空气污染物对森林的影响	165
I. 引言	165

II. 美国的森林生态系统和林型	166
III. 二氧化硫危害事件	171
IV. 氟化物危害事件	181
V. 臭氧和氧化物危害事件	184
VI. 空气污染物影响森林生态系统的分析技术	192
VII. 预料美国新的空气污染物对森林生态系统的危害	196
VIII. 森林是空气污染物的来源	199
11. 空气污染物对地衣和苔藓的影响	202
I. 引言	202
II. 研究的方法和一些结果	204
III. 结论	234
12. 空气污染物与植被覆盖的相互作用	236
I. 引言	236
II. 物质通过地球-大气系统进行循环	237
III. 植物的生物系统: 复杂性和普遍的相互作用	241
IV. 空气污染物与植物覆盖的交换	246
13. 空气污染物与植物病害的相互作用	267
I. 引言	267
II. 污染物对病原的冲击	268
III. 对病害的影响	274
IV. 作用方式	286
V. 结论	288
14. 空气污染物与农业实践的相互作用	292
I. 引言	292
II. 栽培实践	293
III. 农药	297
IV. 烧荒	307
V. 肥料和围栏肥育	309
VI. 森林挥发物中的光化学氧化物	310
VII. 农业的其他空气污染物	311
译后记	312
内容索引	313
植物拉丁名索引	327

1. 绪 论

T. T. Kozlowski 和 J. B. Mudd

在未来的岁月里，处理环境污染将成为人类最迫切的问题之一。我们不能再寄望有清洁的空气作为动植物生长的正常环境，而我们所面临的却是这样的事实：相对来说，在近代环境中毒性污染物的总量和复杂性在惊人地增加。反之，在 1940 年以前，多数人所识别的污染物只是烟雾中的颗粒物和二氧化硫，而现在我们体会到，我们必须对付很多种环境污染物，包括气体、颗粒物、农药、大气中的放射性物质、阴沟污物和水中的化学药品，以及地上的固体废物。这些有毒物质对人类的食品供应、健康及幸福单独地和相互促进地带来不利的影响。污染物质毒化我们的空气和水，它们进入了高等动物的食物链，改变了动物的生殖能力，造成或加重眼病和呼吸疾病，腐蚀金属和建筑材料，以及有害地影响工业设施。

正在生长的植物特别容易感受污染，往往在可以看得出受危害的症状之前，就发生降低光合和减慢生长的情况。实际上，所有的重要农作物都会由于空气污染而大大减产。因为大城市周围存在高浓度污染物，所以使很多地块上生长蔬菜作物，特别象莴苣 (*Lactuca Sativa*) 之类的多叶蔬菜就增加了困难。在一些污染重的地区，比如在洛杉矶盆地，不得不放弃许多柑桔林和商品蔬菜农场。

生物圈内有毒物质的积累，造成了天然生态系统的结构与功能的严重变化。在森林地带，树木首先被低剂量污染物毁灭。随着污染时间的增加，高灌木被毁灭了，接着死亡的就是矮灌木、草本植物、苔藓和地衣 (Woodwell, 1970)。除了直接影响生态系统外，

无疑大气污染物还将由于影响 CO_2 含量、光强度、温度和降水而长期影响植物。从目前我们的知识状况来看，很难明确预料将发生什么变化 (Wenger 等, 1971)。

I. 污染的来源

极大部分环境污染是人类自己造成的难题。如表 1 所列的数据便可看出,机动车辆是大气污染的重要来源(1970 年约放出 1 亿吨)。工业上的来源占第二位(1970 年为 2600 万吨),约为交通运输来源的四分之一。蒸汽发生和电力厂造成的污染比工业略少一些(1970 年为 2200 万吨)。空间放热造成的污染略少于交通运输的 10%(1970 年为 900 万吨)。各种来源的污染物组成差别很大,而工业放出的污染物的组成变化很大。一氧化碳却成为机动车辆污染的主要成分,而硫的氧化物是工业、发电厂和空间热的初级污染物。

表 1.1 Weight⁽¹⁾ 估计的 1968 年空气污染来源

来 源	硫氧化物 (%)	氮氧化物 (%)	一氧化碳 (%)	碳氢化物 (%)	颗粒物 (%)	总 计
交通运输	0.7	4.2	46.5	8.5	0.7	60.6
工业	6.3	1.4	1.4	2.8	4.2	16.1
电力厂	8.5	2.2	0.7	0.7	2.1	14.2
空间热	2.1	0.7	1.4	0.7	0.7	5.6
烧废物	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	3.5
	18.3	9.2	50.7	13.4	8.4	100.0

1) 从 Hesketh (1973)

有许多农药和杀生物剂对植物的生长和发育产生有害的影响。除了来自肥料的剩余营养流失到湖泊和河流中,并造成水生环境不必要的改变外,还包括下列物质:一些杀虫剂、杀菌剂、除莠剂和抗蒸腾剂(antitranspirant)。一般说来,其中有些化学药剂通过堵塞气孔或改变叶片的光学性质、叶片的热平衡、叶片代谢、叶片

解剖结构或所有这些因素的组合作，来抑制光合作用。这些化学药剂还由于造成叶片上的侵蚀斑、缺绿病或叶片脱落来减低光合作用(Kozlowski 和 Keller, 1966)。农药对植物的影响因下列情况而变化很大：应用特效药、药效速度、应用方法、时间、次数、种类、土壤类型、气候等等(Kozlowski, 1971)。

现已认为植物本身也会造成污染：泌出一些化学物质去抑制别的植物的生长(Rice, 1974)。这种异株克生化合物由植物释放到土壤中去是借助于浸沥、挥发、排泄、溢泌和直接腐烂或通过微生物活动而腐烂。在天然产生的化合物中，对邻近的植物生长有抑制效应的包括有机酸、内酯、脂肪酸、苯醌、类萜、类固醇、酚类、苯甲酸、肉桂酸、香豆素、类黄酮、鞣酸类物质、氨基酸、多肽、生物碱、氰醇、硫化物、芥子油、配糖物、嘌呤和核苷。异株克生化合物在生态学上很重要，因为它们影响演替、优势、生长动态、物种多样性、植物群落的结构和生产率(Whittaker, 1970)。

一些研究人员已报道特殊的几种植物对种子发芽和邻近植物的生长有抑制效应。在这里可举少数例子。最著名的异株克生化合物就是胡桃中的胡桃酮。这种物质从叶片和果实淋洗到土壤中就会抑邻近植物的生长(Brooks, 1951)。洋艾(*Artemisia absinthium*) (Funke, 1943)、*Encelia farinosa* (Gray 和 Bonner, 1948) 和臭椿属(*Ailanthus*) (Mergen, 1959) 叶片的有毒浸沥物也已有报道。在加州，长在赤桉树(*Eucalyptus camaldulensis*) 归化林邻近的一年生植物受到极大的抑制。凡是桉树枯枝落叶层积累的地方，一年生草很少能生存到成熟(del Moral 和 Muller, 1970)，这说明受到异株克生影响。

II. 空气污染的损失

按照卫生保健外加的损失、产值的减少、物质品质的降级和植被的毁灭(包括农业生产率)作一些估计，在 1968 年，国家在空气污染上损失的大小可参看表 1.2。年度总损失超过 160 亿美元，其

表 1.2 1968 年因污染物造成的污染损失(单位为 10 亿美元)¹⁾

损失项目	硫的氧化物	颗粒物	氧化剂	氮的氧化物	总 数
住宅的财产	2.808	2.992	—	—	5.200
物 质	2.202	0.691	1.127	0.732	4.752
保 健	3.272	2.788	—	—	6.060
植 被	0.013	0.007	0.060	0.040	0.120
总 计	8.295	5.878	1.187	0.772	16.132

1) 从 Barrett 和 Waddell (1973)

顺序如下：保健>住宅的财产>物质>植被。根据 Barrett 和 Waddell (1933) 的资料，颗粒物和硫的氧化物(包括单独的和两者互促的作用)造成空气污染对健康的损失。有些空气污染造成物质损失。钢铁的腐蚀完全由硫的氧化物造成，而染料的褪色则由于氧化剂和氮的氧化物造成。经查明，作物的直接损失约 90% 是受氧化剂影响(在 21000 万美元的总损失中，有 1 亿美元由于这种影响造成的。Waddell (1970)指出，由硫的氧化物造成的直接损失为 1300 万美元，其他对作物危害的损失则由颗粒物造成，比如氟化物、铅和其他污染物的尘埃。

III. 污染危害植物的机制

除了能杀死植物外，大气污染物对植物还有各方面的有害影响。污染危害一般可分为急性的危害、慢性的危害(即缺绿的)或隐蔽的危害。急性危害的症状是叶面边缘或叶脉间绉缩，而在最初，叶面呈水渍状。稍后，这些叶片就变干，在多数植物则褪成象牙色，但是有些植物的受害叶片则变成褐色或褐红色。造成这些侵蚀斑的原因是所吸收的气体量足以杀死组织。慢性危害使叶片发黄，通过变白阶段逐步发展，一直到多数叶绿素和类胡萝卜素全破坏了，并在叶片的叶脉间变为近乎白色。造成慢性危害所吸收的气体量还不足以造成急性危害，或长期来所吸收的气体是在致

死量以下 (Thomas, 1951, 1961)。有时不同污染物的效应可以区别出来, 在另一些时候又无法区别。Solberg 和 Adams (1956) 发现, 双子叶植物对氟化氢和二氧化硫在组织上的反应不能区别。Costonis (1970) 发现 SO_2 和臭氧对美国五叶松 (*Pinus strobus*) 的危害在诊断意义上并无任何组织上的差异。

在污染危害的叶片中, 最常见的组织上的变化包括细胞质壁分离、细胞内含物的成粒作用或瓦解、细胞收缩或解体 and 受害组织的色素沉积 (Darley 和 Middleton, 1966)。有时候, 在任何可见的外部症状出现前, 受害植物的生理活动功能已被破坏了。由于这个理由, 许多研究人员把污染物危害称为“隐蔽的”、“不可见的”, 或叫“生理的危害”。早期判断这种不可见危害的标准如下: (1) 它包括植物生活的失调, 最后表现出对生长的影响, (2) 失调尚未达到肉眼可见, 和 (3) 下述情况是存在的: 虽然植物长期遭受到浓集的污染物危害, 但并不产生可见症状。然而, Haselhoff 和 Lindou (1903) 早已认为“可见危害”这个术语不适用, 因为对污染反应的解剖变化在显微镜下是能见到的。他们深信, 污染影响的确很容易说成急性的或慢性的。他们认为, 缺绿的或坏死的侵蚀斑便是减少了光合组织的证据, 同时无论可见症状和减慢生长都是由于细胞结构和活动崩溃的缘故。另外有许多研究工作人员在紧接熏气实验和田间观察之后, 并未发现隐蔽危害的证据, 从而就坚持说没有可见损害 (Hill 和 Thomas, 1933; Johnson, 1932; Katz, 1949; Thomas, 1951, 1956; Thomas 等, 1943)。另一方面, 有些研究人员发现污染造成综合的生理效应, 例如, 减少吸水、阻碍生长和气孔关闭 (Hull 和 Went, 1952; Koritz 和 Went, 1953)。由此可见, 这些效应并非一下子就有明显表现, 也不是马上伴生叶片的侵蚀斑, 于是就称它为“隐蔽损害”。Thomas (1956, 1961) 和 Thomas、Hendricks (1956) 在用氟化氢进行研究 (1956) 后重新给可见危害“下定义”如下: 光合作用减少到低于大量叶片被破坏所达到的水平。据认为隐蔽危害有两个主要特征: (1) 除非超过氟化氢的极限浓度, 否则就不会产生隐蔽危害和 (2) 隐蔽危害的大小

是有一定的，而一旦污染物侵害停止，其危害持续期也是有限的。这些特征决定于植物的种和品种。Brewer 等(1960)、Reckendorfer (1952)和 Applegate、Adams(1960)也认为存在有好几种形式的隐蔽危害。在污染研究中存在的问题之一就是没有一个标准的“隐蔽危害”定义为大家所接受。

在评价污染危害的生理机制时所存在的复杂性在于：象光、水、温度和矿质营养之类的因素都影响植物对污染物的反应(Rich, 1964; Darley 和 Middleton, 1966)。还有另一种困难就是：在田间不止一种污染物造成危害。例如，无论臭氧还是 SO_2 都会造成美国五叶松 (*Pinus strobus*) 的针叶在机能发育上的不规则生长，即大家所知道的“缺绿矮生”(Dochinger 和 Heck, 1969)。即使只达到耐量水平 (Tolerable level) 的单一污染物，也会由于存在另一种同样是低水平的污染物而危害植物。

相对来说，空气污染物看来不像是专一性的药物，它具有多方面的作用。污染物会抑制许多酶系统和代谢过程，其效应决定于它在细胞中的浓度和细胞内的代谢类型。许多空气污染物之所以减少光合作用是直接或间接地由于光合组织减少了（例如叶片脱落、缺绿病、坏死）以及影响气孔口所造成的。

后面各章将很详细地探讨大气污染物(气体和颗粒物)单独地和彼此互促地对低等和高等植物的“冲击”。注意点将放在污染物的吸入、植物的敏感性和症状，特别是植物对空气污染物的生化反应。

2. 二 氧 化 硫

J. B. Mudd

I. 引 言

作为一种空气污染物来说，二氧化硫比任何其他化合物历史更悠久。大气中二氧化硫的最普通来源便是矿物燃料、煤、油的燃烧。应用低硫燃料就能使 SO_2 来源达到最少程度。如果燃烧含硫燃料，就可采用各种控制技术(国家空气污染控制管理处，1969)。在全世界的空气中，造成二氧化硫污染的数量如下：由于燃烧煤，每年产生51公吨硫，提炼石油每年产生3公吨硫，石油燃烧每年产生11公吨硫，熔炼每年产生8万吨硫(1965年资料)。

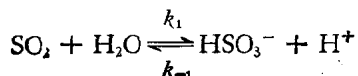
本书将在好几章内，从各个方面讨论二氧化硫对植物的毒性。本章将讨论二氧化硫的一些生理、生化效应。

II. 化学上的探讨

A. 实 验 室 研 究

二氧化硫的一些化学性质已在 Schroter (1966) 所著书中讨论。在 0°C 时， SO_2 在水中的溶解度为 228 克/升。这相当于一容积水中溶解 80 容积的 SO_2 。 SO_2 也能完全溶于一些有机溶剂中，例如 H_2O /氯仿中的分配系数为 0.72，而 H_2O /苯则为 0.44。

SO_2 的水合作用很迅速：

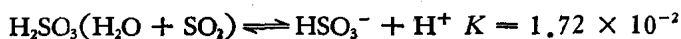


$$k_1 = 3.4 \times 10^6 \text{ 秒}^{-1}$$

$$k_{-1} = 2 \times 10^8 \text{ M}^{-1} \text{ 秒}^{-1}$$

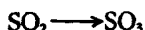
这是在 20℃ 和 0.1M 的离子强度条件下。值得注意的是：当存在表面活性剂(surfactant)时，水中吸收 SO₂ 的速度降低了，这是因为 SO₂ 被吸入表面活性剂层。

很值得怀疑的是溶液中存在着 H₂SO₃，可见溶于水中的非电离形式的硫即是 SO₂。但还是测出了电离常数：



B. 大气研究

SO₂ 是被放到大气中去的主要硫化物。它被氧化成 SO₃，当加水时，便形成 H₂SO₄：



根据美国收集的监测数据(Altshuller, 1973 年)，已证明 SO₂ 与硫酸的关系。SO₂ 与硫酸的关系是非线性的：SO₂ 在低浓度时，硫酸与 SO₂ 成比例增加，但是当 SO₂ 在高浓度时，硫酸就不再进一步增加。在费城的特殊情况中，费城市中心的 SO₂ 与硫酸之比例要比郊区高一倍。因此，有些硫酸是从 SO₂ 经过氧化作用衍生的。

Cox 和 Penkett (1971)曾报道，NO 和 α-戊烯(α-penten)存在时和不存在时，SO₂ 的光氧化作用。当 NO 和 α-戊烯存在时，由 SO₂ 氧化成 H₂SO₄ 烟雾剂的作用便大为增加。这种促进作用无疑是产生“光化学烟雾”机制的支路，但是其所包含的实际氧化剂究竟是什么尚不清楚。看来又不象是臭氧，因为它不容易与低浓度的 SO₂ 起反应。Cox 和 Penkett (1971) 推测，这种氧化剂可能是过氧化根或硝酸过氧化物。

SO₂ 或硫酸与植物反应决定于在溶液中的活性。Thomas 等(1943 年)估计亚硫酸的毒性比硫酸大 30 倍，因此大气中 SO₂ 氧

化成硫酸的程度对植物来说是有重大影响的。

III. 敏 感 性

A. 症 状

从 Jacobson 和 Hill (1970) 所著书中可找到 SO_2 伤害植物的精采照片。急性危害最普通的形式就是叶脉间的缺绿病(图 2.1)。在多数情况下,脉间叶面积变白色,但是有时被破坏的组织呈褐色。敏感的植物种包括菠菜(*Spinacea oleracea*)、黄瓜(*Cucumis sativas*)和燕麦(*Avena sativa*),而玉米(*Zea mays*)、芹菜(*Apium graveolens*)、柑桔(*Citrus sp.*)则对 SO_2 有抵抗力。

SO_2 危害决定于是否能通过气孔进入,这一意见是普遍为大家所接受的,因此,在暴露于 SO_2 中时,凡有利于气孔开放的条件

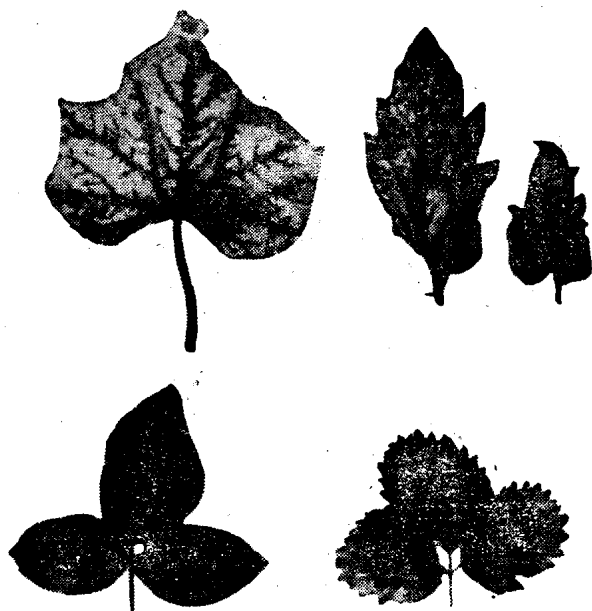


图 2.1 二氧化硫所造成的叶脉间缺绿病
上(自左到右): 黄瓜、番茄。
下(自左到右): 蔷薇、草莓。

都容易使植物受害。例如,供水紧张使气孔关闭,从而使植物免受危害。幼嫩而完全展开的叶片首先受危害,而对刚刚在展开的叶片则影响就少。

B. 剂 量

敏感的植物“种”在 0.05—0.5ppm SO_2 经 8 小时处理就受危害。短时处理 (30 分钟), 浓度可提高到 1—4ppm。有抵抗力的“种”浓度需达 2ppm 经 8 小时, 或 10ppm 经 30 分钟才受害。这些数据来自单一污染物 SO_2 , 如果存在另一种污染物, 那末用 SO_2 处理时的毒效要大得多。

文献中有关 SO_2 危害的“极限”有很多报道。这个“极限”概念的意义在于, 低于某种浓度的 SO_2 就不会有危害, 据设想, 这是因为植物通过代谢能使溶解的 SO_2 变为无毒的产物。一旦超过这种代谢能力, 有毒物质就积累, 从而超过了极限。“极限概念可以具体化为 O'Gara 方程(1922 年), 以说明 SO_2 危害的发展状况。

$$(C - C_R)t = K$$

$C = \text{SO}_2$ 浓度

$C_R =$ 极限浓度(在 O'Gara 的情况为 0.33ppm)

$t =$ 开始危害所需时间(小时)

$K =$ 常数; 极限剂量。

这一方程已经加以修改, 而且也提出了代替它的方程, 但是能影响症状发展的变量数很大, 以至由于进一步失真而不再适用了。O'Gara 方程的主要点是 (1) 当低于某种浓度时, 熏气的时间不管怎样长久也不会产生危害, (2) 高于某一浓度时, 通过浓度与暴露时间相结合就能诱发危害。

IV. 生 理 效 应

A. 气 孔 开 放

Unsworth 等 (1972) 报道 SO_2 的浓度在 0.1—0.5ppm 范围内