
* 酸 性 沉 降 物 *
* 对陆地生态和水生生态的影响 *

建设部南京环境科学研究所四室

一九八三年九月

新 華 書 局

中國現代文學名著叢書

中國現代文學名著叢書

新 華 書 局

酸性沉降物对陆地生态和水生生态的影响

目 录

一、酸性沉降物向地面的输入	2
二、模拟酸雨对作物的影响	4
(一) 对作物发芽、生长和产量的影响	5
(二) 作物受害的机理	12
三、酸性沉降物对森林生态的影响	13
(一) 直接影响和间接影响	13
(二) 对林木生长的影响	15
(三) 对森林生态系内元素通量和元素平衡的影响	18
(四) 用反馈回路阐明酸性沉降物对森林生态系内元素循 环和森林生长量的影响	25
四、酸性沉降物对土壤的影响	27
(一) 土壤中硫的形态和反应	28
(二) 酸性沉降物进入土壤后的迁移转化	29
(三) 酸性沉降物对盐基离子和其他金属离子淋溶的影响	35
(四) 酸性沉降物对土壤酸化的影响	39
(五) 酸性沉降物对土壤微生物过程的影响	44
(六) 土壤敏感性的分级与分区图的编制	47
五、酸性沉降物对湖泊的影响	53
(一) 对湖泊化学性质的影响	53
(二) 对湖泊酸化的影响	56
(三) 湖泊敏感性的划分与敏感区的划定	59
六、酸性沉降物对鱼类的影响	60

酸性沉降物对陆地生态和水生生态的影响

杨 景 辉

(建设部南京环境科学研究所)

酸性沉降物包括干、湿两种沉降物。酸性湿沉降物一般系指 $\text{PH} < 5.6$ 的降雨。通常称为酸雨。酸雨中不仅含有大量 H^+ ，而且还含有高浓度的具有酸化作用的 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 等阴离子。这些阴离子主要来自人为排放源。酸雨中通常还含有多种金属阳离子、重金属、微量元素和各种有机污染物。

酸性沉降物对陆地生态和水生生态的影响，已成为全球范围的重大环境问题。在一些工业发达的国家，特别是西北欧各国和北美东部，酸性沉降物已对生态环境，特别是水生生态环境构成了严重的威胁。

评价酸雨对陆地生态系统的影响，常常是极其困难的。迄今为止，我们还没有发现陆地生态系统的何种组成成分对酸雨的影响是敏感的。事实上，我们还没有观察到或测出直接归因于酸雨的自然陆地生态系统的任何显著变化。评价酸雨对水生生态系统的影响则较易，因为某些水生生物特别是鱼类对酸雨的影响极为敏感。我们可以在水生生态系统内测出水体 PH 的变化，并把水体 PH 的这种变化与所观察到的酸雨对水生生物的影响联系起来。

我国有关酸雨的研究工作，还处在刚刚起步的阶段。而有关酸雨的生态影响方面的研究工作，大多还处在准备阶段。为了在我国正确地开展有关酸雨的生态影响方面的研究工作。搞好这一课题的科研规划，我们认为很有必要较全面地介绍一下国外有关这方面研究的动向和发展趋势。下面我们分六个部分加以综述。

一、大气中酸性沉降物向地面的输入

大气中酸性沉降物向植物、土壤和水体的输入过程有两种，即干沉降和湿沉降。气体污染物以干沉降的方式向地面输入，颗粒状硫酸盐也可以干沉降的方式向地面输入，后者仅占干沉降总量的1.5—2.0%左右。颗粒状污染物主要是以湿沉降的方式向地面输入。

干沉降与湿沉降之比随距排放源的距离增大而明显变小。据瑞典测定，从排放源至24公里处，干湿沉降比由7:1减小为2:1；而据英国测定，在市区为6:1，在边远的农村则为1:1⁽³¹⁾。英国高地上硫的沉降量平均为50公斤/公顷/年，湿沉降量为8—20公斤/公顷/年，由此估算，总沉降量近70公斤/公顷/年⁽¹⁴⁾。根据A. Martin应用数学模型进行估算的结果，英格兰、苏格兰和威尔士大城市附近，硫的总沉降量（干湿沉降）一般在40公斤/公顷/年以上，而在工业欠发达的英格兰西南部和苏格兰东北部硫的总沉降量平均低于15公斤/公顷/年。大城市附近和边远地区平均湿沉降量分别为15和8—12公斤/公顷/年⁽³⁵⁾。由此可见，湿沉降的相对贡献在边远地区（15公斤总沉降中的8—12公斤）较在大城市附近（40公斤以上的总沉降中的15公斤）大。虽然英国高地上硫的总沉降量与瑞典南部部分地区相差不大，但在后一地区只有硫总沉降量的 $\frac{1}{4}$ （约5.3公斤/公顷/年）归因于干沉降。总之，干湿沉降比因地而异，在排放源附近，气态 SO_2 是沉降的硫污染物的主要形态，但在很远的距离，颗粒状硫酸和酸雨占有重要地位⁽³¹⁾。

大多数研究证明，降雨的酸度主要是由硫酸和硝酸两种强酸

所引起。但是也有少数研究者认为。在影响降雨酸度方面弱酸也具有重要作用。根据近年来大多数观测数据。在美国东北部降雨的酸度有60—70%要归因于硫酸根。30—40%要归因于硝酸根。其余部分则要归因于氯根以及少量其他多种有贡献的酸。近年来硝酸根所占的比例有增大的趋向。下面是该区酸雨中阴离子比例在1955(56)—1973年期间的变化:

	硫 酸 根	硝 酸 根	氯 根
1955(56)	78%	22%	0
1973	65%	30%	5%

从佛罗里达州的测定结果来看。硫酸根与硝酸根之比介于2.0:1—2.5:1之间。在密西西比州西部。这一比例约为1:1—1:1.4⁽⁴⁶⁾。但是在我国降水的阴离子组成中。硫酸根所占的比例在90%以上。而硝酸根所占的比例则很小⁽⁴⁾。

酸雨中 NO_3^- 一般对陆地生态不但不会产生危害。而且常常显示出肥料效益。酸雨中的 SO_4^{2-} 在缺硫的土壤上也会显示出肥料效益。但因常常引起多种土壤和水体的酸化。加速土壤淋洗。而对生态环境构成很大的潜在威胁。

全世界每年人为排放的硫量为8300万吨⁽⁵⁷⁾。据赵殿五报道。1980年我国人为排放的硫量为1500万吨。其中大部分作为污染物沉降在土壤上。很难确定在一定区域内输入土壤的精确数量和形态。人为排放的 SO_2 回归地面的方式有四种:由 SO_2 形成的 H_2SO_4 和中性盐随降水沉降; SO_2 为植物冠层滤留。降雨时形成 H_2SO_4 后再输入土壤;含有 H_2SO_4 和中性盐的颗粒直接沉降; SO_2 被土壤吸收。前两种方式属湿沉降。后两种方式属

干沉降。后三种方式对土壤硫的贡献，在很多情况下可能远远大于第一种方式(42)。

人为排放的 SO_2 似乎大部分通过土壤对 SO_2 直接吸收的方式沉降。有人在不到一天的时间里用总剂量 3618PPm SO_2 处理 10 克干土，结果，土壤吸收了 1134PPm SO_2 。M. Nyborg 等把盆栽土壤安放在 SO_2 排放源下风向 30 公里以内，发现土壤直接从空气中吸收的 S 比降雨携入的 S 多 8—6 倍，暴露 3 个月 后两种供试土壤的 PH 下降了 0.2 个单位(41)。

虽然在田间条件下还不能确切地了解土壤吸收 SO_2 的速率和数量，但是这种吸收作用看来是 SO_2 沉降的一种重要的机理，也许是最重要的机理。这种机理是使土壤酸化的最主要作用，因为以这种方式沉降的 SO_2 能迅速地转化为 H_2SO_4 (41)。

土壤吸收的 SO_2 最初大部分以亚硫酸根态存在，然后迅速转化为硫酸根。在用 SO_2 处理的土壤中，硫酸根的形成过程几乎都是在 10 小时内完成；如果土壤预先灭菌，则约需 48 小时完成(16)。

据西北欧 1965 年统计，降雨中的硫约 15—40% 以 H_2SO_4 的形态存在(6)。美国东北部降雨中的硫也有相当大的比例以 H_2SO_4 的形态存在(42)。但在我国的降雨中，硫常常是少部分以至很少一部分以 H_2SO_4 的形态存在，这是由于我国以燃煤为主，而且大多数企业尚未采取消烟除尘措施，大气含尘量较高所致。因此，尽管降雨中硫酸根含量较高，但降雨的酸度却不大。这也是我国酸雨与美国、西欧酸雨不同的一个方面。

二、模拟酸雨对作物的影响

酸雨中的硫酸根和硝酸根等植物营养元素虽然可为植物叶所

同化。但是一般认为酸雨中的 H^+ 很可能对作物产生直接的有害影响。

这个设想已为实验研究所证实。然而迄今为止文献上尚未报导上述自然状态下田间作物叶部的受害症状可以归因于酸雨影响的。因此，目前关于酸雨对作物影响的研究，仍局限于室内试验或田间模拟试验。

(一) 模拟酸雨对作物发芽、生长和产量的影响

近年来，美国环保局组织有关单位，对代表美国500亿美元年产值的32种作物，进行了大规模的模拟酸雨影响试验，并由美国环保局提出了初步报告(43)。供试作物是在受控环境条件下生长的，模拟酸雨的PH为3.0、3.5和4.0，对照雨的PH为5.7。在试验中测定了叶片受害程度和酸雨对作物可食部分产量的影响。试验结果表明，各种作物对酸雨的反应是不同的，一些作物明显受害，其他一些则受害不显著。与对照相比较，酸雨的PH为3.0时，芥菜叶部分以及茎、椰菜食用部分，分别减产30%和25%，萝卜食用部分减产一半多，菠菜减产仅15%，但是叶子长相太差，商品价值大大降低。PH3.5—4.0时，芥菜、萝卜和早熟禾的产量降低14—28%；花椰菜、甘蓝和嫩豌豆则在任何试验条件下都没有受到明显危害。

在美国环保局主持下由J. J. Lee等所进行的研究中，将盆栽植物放在田间小室内生长，喷洒模拟酸雨(PH3.0、3.5、4.0)或正常雨(PH5.6)。当28种作物收获时，测定其商品部分、地上部和根部的重量。在这些作物中有萝卜、甜菜、胡萝卜、花椰菜和芥菜五种作物的商品部分生产受到抑制；番茄、辣椒、草莓、紫花苜蓿、鸭茅和梯牧草六种作物受到促进，对马铃薯的影响还不能肯定。甜玉米的茎叶生长受到促进。酸雨对其余

15种作物产量的影响在数理统计上是不显著的。

28种作物中有10种根生长受抑制，受到促进的却只有2种。除块根作物外，根重的减少一般与商品部分产量的减少无关。例如，番茄根在 $\text{PH}3.0$ 时的重量比对照少15%，但其果实产量却比对照多31%。小麦根在 $\text{PH}3.0$ ， 3.5 和 4.0 的各处理中都比对照轻，燕麦根在 $\text{PH}3.5$ 的处理中比对照重，但其籽实产量均未受酸雨影响。

作物地上部分重量与商品部分产量的关系较为密切，地上部受影响的方向（影响的正负）与商品部分产量受影响方向没有什么区别。在 $\text{PH}3.5$ 的处理中马铃薯、紫苜蓿和青椒三种作物的商品部分生产受到明显促进，马铃薯、紫苜蓿、番茄和青椒四种作物的地上部分以及紫苜蓿和燕麦两种作物的根呈现峰值反应。这一反应方式使我们认识到，酸雨的净效应是其刺激作用和抑制作用相抗争的结果。因此，对于在该项试验中总是受到抑制的作物种类，其最适 PH 似应大于 4.0 ，而对于那些总是受到刺激的作物种类，其最适 PH 似应小于 3.0 ，而且其所受影响可能来自硫酸根，而不是 PH 。

35种供试作物（包括大豆四个品种）中有31种作物的叶片于 $\text{PH}3.0$ 时受害，28种于 $\text{PH}3.5$ 时受害，5种于 $\text{PH}4.0$ 时受害。根据酸雨对叶片的危害和产量的影响，将84个处理（28种作物 $\times$ 3个酸度处理）进行分类，其结果见表1。

· 见下页

表 11979 年作物叶片受害和产量结果的混合分类
(栏内数字为混合分类的处理数)

产 量	叶 片 受 害			
	++	+	0	总 计
大于对照的处理	1	6	4	11
与对照无显著差异	4	26	32	62
小于对照的处理	2	7	2	11
总 计	7	39	38	84

在 84 个处理中, 有 32 个对产量和叶片均无影响。叶片受害而产量未受影响的有 30 个, 产量受影响(包括正、负影响)而叶片未受害的有 6 个, 产量和叶片都受影响的有 16 个。

在 84 个处理中叶片受害的有 46 个, 除 5 种作物外, 其他都在 PH3.0 或 3.5 的处理中受害。在这 46 个处理中产量比对照高的有 7 个, 比对照低的有 9 个。因此, 叶片的明显受害不一定表明产量下降。

在 84 个处理中, 产量比对照低的有 11 个(PH3.0 时 6 个, 3.5 时 3 个, 4.0 时 2 个), 比对照高的也有 11 个(PH3.0 时有 5 个, 3.5 时 3 个, 4.0 时 3 个)。产量大于对照的一行内叶片受害的处理数和产量小于对照的一行内叶片受害的处理数比较接近。因此, 作物产量可能不受叶片受害的影响。

从试验结果来看, 双子叶植物的商品产量似较单子叶植物易受酸雨的不利影响。双子叶植物中最易受酸雨不利影响的是块根类作物, 其次是叶菜类, 再次为甘蓝类和块茎类。豆类和果类都有可能受到促进。禾谷类一般不受影响, 单子叶饲料作物还有可

能受到促进。

在李正芳等所进行的模拟酸雨试验中，酸雨对辣椒地上部分干物质的积累似有促进作用，对黄瓜有抑制或危害作用，对番茄的影响不明显。从试验结果可以看出，模拟酸雨对作物叶片的危害有两种类型：急性危害和慢性危害。在强酸水（ $\text{PH}1.5$ ）暴露下产生的是急性危害，向作物喷洒几次模拟酸雨，1—2天的短时间内便会出现受害症状；在中酸雨暴露下产生的是慢性危害。在自然条件下一般均为慢性危害。这种危害随着酸雨量的增加而变得明显起来。如辣椒和黄瓜经6次 $\text{PH}2.5$ 的酸水喷洒后叶片未呈现受害症状，但经20次喷洒后这两种作物均开始呈现明显的受害症状（2）。

在 J. S. Evans 等所进行的模拟酸雨试验中，植物叶面出现可见伤害的最高 PH 为 3.4。最先受影响的部位是叶面和叶表皮细胞。随着暴露时间的延长和暴露次数的增多，较为内部的细胞层也有可能受害，不同植物种的叶部对酸雨的不同反应，看来是由于叶部被淋湿的程度和叶细胞对低 PH 的反应不同所致（11）。

在高绪评就模拟酸雨对农作物种子发芽的影响所进行的试验中，酸雨的 PH 为 4.0 时，12 种供试作物中大多数种子发芽和幼苗生长未受影响，但苋菜、小麦、芝麻和油菜种子的发芽或幼苗的生长在一定程度上受到抑制，萝卜幼苗的生长则受到促进。 $\text{PH}3.0$ 时，虽然种子仍能发芽，但多数发芽幼苗长势差，苗小、纤弱，容易死亡。 PH 低至 2.0 时，绝大多数作物种子几乎不能萌发生长。模拟酸雨对农作物种子发芽的影响，主要表现在发芽幼苗的成活率下降以及根系和茎叶生长受抑制。不同作物幼苗对酸雨的敏感性存在差异， $\text{PH}4.0$ 时作物类中小麦、油菜和芝麻

较敏感，而水稻抗性较强。蔬菜类中苋菜和辣椒较敏感，萝卜抗性较强 (3)。

在用大豆幼苗所作的室内生长试验中，在不到 1 小时的时间内至少喷洒 1.9 厘米 PH3.0 的酸雨。大豆幼苗叶子 3 天后出现坏死症状。在连续 3 天的时间内喷洒 7.0 厘米酸雨后，所有大豆幼苗叶子都呈现出坏死症状。最后一次暴露后的第七天，在有坏死斑叶片以下的叶片产生了失绿现象。承受酸雨量较高的三个处理。出现失绿症的幼苗占 40% (见表 2) (25)。

表 2 模拟酸雨暴露后呈现可见症状的大豆幼苗%

组别	暴露日期 (1978年)	酸雨累计暴露量 (厘米)	累计暴露时间 (分钟)	坏死斑幼苗 (%)	失绿症幼苗 (%)
1	12/21	0.65	15	0	0
2	21	1.91	44	20	0
3	21-22	3.46	80	70	0
4	21-22	4.59	106	100	0
5	21-23	5.67	124	80	0
6	21-23	6.97	154	100	40
7	21-24	8.23	179	100	40
8	21-24	9.35	205	100	40

在自然条件下酸雨常常伴随其他污染物同时出现。因此，近年来开始重视酸雨和其他污染物对作物的复合影响。

在酸雨与 SO₂ 复合污染试验中，对试验结果进行方差分析后发现，酸雨对大豆产量没有显著影响，SO₂ 处理则显示出极为显著的差异 (P<0.0001)。89.6PPm·小时 SO₂ 处理 (0.79PPm

×113.6 小时)使大豆产量下降35%以上。13.5PPm·小时 SO₂ 处理(0.19PPm × 70.4 小时)使大豆产量下降12%以上。酸雨处理与 SO₂ 暴露没有明显的相互作用(25)。

在酸雨与亚硫酸的复合污染试验中,研究了0.1毫克分子 SO₃²⁻/升和不同 PH 的硫酸雨(PH5.5—2.5)复合污染对作物的影响。当酸雨 PH 由 3.5 降低至 2.5 时,萝卜地上部和地下部的生长量一致减少,而且在亚硫酸的共同作用下地下部受抑制的程度加重。当酸雨 PH 为 5.5—3.5 时,大麦早期生长由于亚硫酸的影响而受到某种程度抑制,但与模拟酸雨的酸度没有明显的关系(20)。

C. O. Tamm 等指出,酸雨或大气中的酸性物质也可通过与 O₃ 或氟化物等其他空气污染物的协同作用影响植物。附着于植物表面的烟尘可从空气中吸附气体污染物,从而使这些酸性物质浓缩(55)。

为了在田间条件下识别酸雨对作物的危害,开展酸雨危害的症状学研究看来是很有必要的。现将这方面已有的研究成果汇集于表3供参考。

表3 作物暴露于模拟酸雨后的受害症状(46)

受 害 症 状	受 害 作 物	酸 雨 PH
叶面侵蚀斑, 细胞质壁分离, 干重减少	蚕豆	2.5
叶片枯死, 失绿	大豆	3.0
叶面侵蚀斑	蚕豆, 向日葵	3.1
干重减少	蚕豆	4.0

表3 接下页

		表3接上页
干重减少	芥菜	3.0
干重减少	茎椰菜	3.0
干重减少	萝卜	3.0
叶面侵蚀斑	菠菜	3.0
生长量减低	芥菜、萝卜	3.5—4.0

作物叶对酸雨的反应决定于多种因素：酸雨暴露的持续时间和次数，酸的含量，雨滴大小和降雨强度等，所有这些因素都会影响受害症状的发展和严重程度。环境条件的变化会改变植物的生理过程、叶面上残留雨水的数量、雨停后的蒸发速率(46)。认识和了解这些参数，会使我们更加深刻地认识到，要把室内模拟研究结果外推到多变的自然条件是存在很多困难的。

因此，有些研究者试图在田间条件下研究酸雨对作物生长和产量的影响。为了在田间条件下确定酸雨对作物生长和产量的影响，试验必须有大样本，处理小区要有足够的随机分布，以避免土壤局部差异所带来的误差，还要对试验结果进行适当的统计分析。

在L. S. Events等所进行的酸雨影响田间试验中，试验小区采取拉丁方排列，五个处理（自然降雨，自然降雨加 $\text{PH}4.0$ 、 3.1 、 2.7 和 2.3 的模拟酸雨），重复五次，共组成六个拉丁方。试验结果表明，每株大豆籽粒量随加入的 H^+ 量增加而减少。试验期间自然降雨 PH 为 4.0 ，除自然降雨中的 H^+ 外，每株大豆另加 $\text{H}^+50(\text{PH}4.0)$ ， $397(\text{PH}3.1)$ ， $998(\text{PH}2.7)$ 和 $2506(\text{PH}2.3)$ 微克当量。结果是大豆籽实产量分别降低 2.6 、 6.5 、

11.4和9.5%。大豆籽实产量降低是由于每株大豆荚数减少所致(11)。

(二) 作物受害的机理

关于酸雨对植物产生危害的机理的报导还不多。C. O. Tamm等根据现有文献作出了如下推断(54)。

酸雨可使植物的保护性表面组织角质层等受损或受侵蚀。气态 SO_2 在现有的环境浓度水平上还不足以损坏角质层。但是气溶胶中 H_2SO_4 雾滴则肯定会产生这种效应。

坏死斑一般出现在酸浓度高的部位，尤其是当植物叶暴露于干湿交替的环境下时更为显著。在这种情况下酸雨滴蒸发，使酸浓度提高，从而产生局部的坏死斑。在粘附于植物表面的烟尘颗粒的下面，也会出现高浓度的酸液。

当角质层和其他保护性结构受损时，植物就有可能受不利的环境因素和生物因素的危害。例如，保卫细胞功能失去控制可使气体交换反应失去控制。植物一旦对气孔失去控制，也就失去对蒸发的控制，从而遭受干旱的危害，并对空气中气态污染物更加敏感(11、15)。

空气中的酸性物质很可能产生的一个直接影响，就是对活细胞内的代谢过程产生毒害效应。为此，这些酸性物质就要被输送到细胞表面，一般是透过细胞膜。对维管植物来说，这些酸性物质还要通过气孔或角质层扩散。因此，气孔出现率和影响气孔开闭的各种因素，都对决定植物对代谢中毒的敏感性具有重要意义。

细胞代谢也可能受 S、N 氧化物的影响，但尚未获得中毒的直接证据。针叶树的针叶和落叶树的叶子，在污染区其功能寿命常常缩短。在某些情况下这种早衰现象伴随着细胞内硫酸盐的大

量累积。事实上，硫酸盐的毒害作用要比亚硫酸盐小得多，在植物细胞内硫酸盐的形成是亚硫酸盐的一种解毒过程。

有人在燕麦发芽试验中发现，生长在PH为3左右的土壤上的植株，其受害原因在于Al、Fe、Mn在土壤溶液中浓度增高。在这些元素的高浓度下磷酸盐从种子向茎的输送受阻。这个过程可用来正确解释近年来德国白桦在自然繁殖当中遇到的困难(36)。

三、酸性沉降物对森林生态系的影响

很多植物能象从土壤溶液吸取养分那样，从大气吸取养分。这种能力对森林生态系显得特别重要。在这里来自外来给源的养分是极少的。一般是不采取施肥措施的。林木发育有庞大的冠层，为分散在大气中的物质的沉降和可能的同化提供了巨大的表面。有些陆地生态系在植物养分方面主要依赖于大气给源。在纽约州火岛上，林木生长在高度风化的砂丘上，它们对Ca、K、Mg的需要，几乎全部依赖于大气给源，而这些营养元素通常认为主要是土壤矿物风化产生的。这些砂土极端缺乏植物养分，以含盐水和降水的形态输入的植物养分已足以补偿这种土壤的贫瘠。这显然是一种极端情况，但是其他森林生态系对Ca、K、Mg的需求，也会在一定程度上依赖于大气的输入(13)。

降水的化学成分除了这种有利的施肥效应外，也产生某些有害的影响。下面我们就介绍一下酸雨对森林生态系可能产生的直接影响和间接影响。

(一) 对森林生态系的直接影响和间接影响

酸雨对森林生态系的净效应决定于降水的化学组成、接受降雨的植物的种类、植物的生理状况及其成熟度。

在降水过程内和过程之间，降水的化学组成常有变化，因此，

对于一种给定植物来说,在一段时间内可能接受有益影响。在另一段时间则可能接受有害影响。降水的酸度不仅应该理解为产生 H^+ 的物质(H_2SO_4 、 HNO_3 、 HCl 、有机酸等)的一个数量反映,也应理解为溶于降水中的其他各种阳离子和阴离子之间总离子平衡的一个反映,因此它是降水化学性质的一个极其重要的指标。

现将酸雨对林木可能产生的直接影响和间接影响列于表4。其中许多直接影响也可能产生多种间接影响,通过土壤产生的一些间接影响未包括在本表内。

表4 酸雨对林木可能产生的影响(13, 55)

直接影响

- (1) 保护性表面结构(如角质层)受损
- (2) 保卫细胞正常功能受到干扰
- (3) 对附生的植物病原菌的敏感性增大
- (4) 酸性物质通过气孔或角质层扩散后使植物中毒,叶、花、枝出现深部坏死或衰老斑
- (5) 正常代谢或生长过程受到干扰,表现为光合效率降低,中间代谢过程改变,发育不正常,叶及其他器官早衰。
- (6) 繁殖过程受到干扰,花粉活力降低,受精过程受到干扰,果实或种子产量降低,种子发芽率降低。
- (7) 叶及根的溢泌过程发生变化,从而使叶际和根际微生物种群(包括固氮种群)产生变化
- (8) 酸雨与不利环境因素产生协同作用,可能产生协同作用的因素有 O_3 、氟化物、烟尘以及旱涝等。