

# 中国酸雨对陆地生态系统的影响和防治对策

冯宗炜

(中国科学院生态环境研究中心, 北京, 100080)

**[摘要]** 我国是继欧洲、北美之后, 在世界上出现的第三大酸雨区。长江以南各省是我国酸雨的主要分布区。酸雨对陆地生态系统的危害日益严重。文章阐述了酸雨对农作物、森林、土壤和水生生物的影响及其经济损失的估算。并根据可持续发展的战略思想, 提出防治对策。

**[关键词]** 酸雨; 陆地生态系统; 经济损失; 防治对策

## 1 引言

酸雨是世界十大环境问题之一。我国是继欧洲、北美之后, 在世界上出现的第三大酸雨区。随着我国经济建设、工业化和城市化的迅速发展, 能源的消耗量日益增加。我国能源结构以煤为主(约占75%), 据统计, 1990年全国煤炭消耗量为 $10.52 \times 10^8$  t, 1995年增至 $12.8 \times 10^8$  t, 燃煤排放的 $\text{SO}_2$  1995年达 $2.370 \times 10^4$  t, 超过欧洲和美国, 居世界首位<sup>[1]</sup>。大量排放的 $\text{SO}_2$ 和烟尘, 导致越来越严重的酸雨和大气污染。国家环保局对全国2177个环境监测站13年(1981~1993)的监测结果表明, 有62.3%的城市 $\text{SO}_2$ 年平均浓度超过国家二级标准( $0.06 \text{ mg/m}^3$ ), 日平均浓度超过国家三级标准( $0.25 \text{ mg/m}^3$ )<sup>[1]</sup>; 年平均降水pH值低于5.6的酸雨覆盖面积约占国土的30%<sup>[2]</sup>。我国酸雨主要分布在长江以南各省市, 其面积已由1985年的 $175 \times 10^4 \text{ km}^2$ 增至1993年的 $280 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

日益严重的酸雨对陆地生态系统的影响和造成的巨大经济损失, 已成为制约我国农林业生产和社会经济发展的重要因素之一。文章介绍笔者15年来对我国酸雨生态影响的研究, 阐述酸雨对农作

物、森林、土壤和水生生物的危害及其经济损失的定量估算, 并根据可持续发展的战略思想, 提出减免酸雨对陆地生态系统危害的防治对策, 以期改善我国酸雨区的生态环境质量, 促进社会经济建设的持续发展。

## 2 酸雨及其对陆地生态系统危害过程的概述

### 2.1 酸雨的概述<sup>[3]</sup>

酸雨(Acid Rain, Acid Precipitation)是指pH值小于5.6的雨水, 也包括雪、雾、雹等其它形式的大气降水。酸雨是通常的叫法, 科学上称作酸沉降(Acid Deposition), 包括湿沉降如酸雨、酸雪、酸雾、酸霰、酸雹和干沉降如二氧化硫( $\text{SO}_2$ )、氮氧化物( $\text{NO}_x$ )、氯化物(HCl)等气体酸性物质。形成酸雨的酸性物质有自然源和人为源。在自然界自然产生的酸性物质, 在正常的降雨过程中能稀释, 使它们不会产生什么危害。人为源如燃煤发电厂、工业燃煤的锅炉、家庭炊用和取暖用煤以及机动车等排放的大量含硫和含氮的废气。这些人类活动排放到大气中的含硫和含氮的氧化物在运行过程中, 经过复杂的大气化学和大气物理作用, 形成硫酸盐和硝酸盐, 与空气中水分反应形成酸, 随

雨、雪等降落到地面，就形成了酸雨，即硫酸和硝酸的水溶液。

2.2 酸雨对陆地生态系统影响过程概述

图1是以森林为例说明酸雨对陆地生态系统危害过程的框图。酸雨包括干、湿沉降物由空中降下，首先影响植被，然后经土壤和地下水影响湖泊水体生态系统<sup>[4]</sup>。酸雨对陆地生态系统中绿色植物生产者的影响大致可分为直接影响和间接影响<sup>[3]</sup>。直接影响一般是指酸雨降落在植物表面积最大的植冠或林冠部分的叶子部位而引起的形态结构，如褪绿、坏死斑、失水萎蔫和早落叶等以及生理生化过程的变化，如叶片细胞膜透性增加、膜脂过氧化作用加剧、气孔扩散传导率增高、酶活性的增高或降低、叶细胞pH值和原生质等电点的下降、叶绿素含量减少、光合作用速率下降和呼吸作用速率上升等导致植物生长量减少和生产率的下降。间接影响包括酸雨通过对土壤化学性质的改变如土壤pH值下降、土壤盐基淋失、盐基饱和度下降、铝的活性增加导致植物营养不良、生产率下降；通过对土壤微生物区系和活性的改变如抑制土壤微生物的硝化、氨化和固氮作用等，改变土壤氮素水平和土壤养分的循环，从而抑制植物的生长。

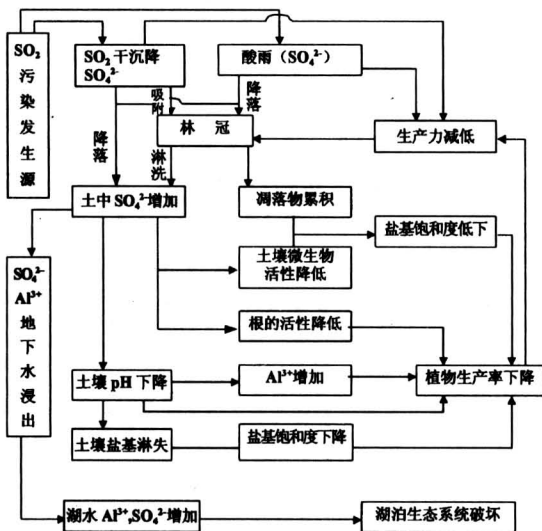


图1 酸雨对陆地生态系统影响过程的框图<sup>[4]</sup>

Fig.1 The process diagram of effects of acid rain on terrestrial ecosystems

3 酸雨对农作物的影响

3.1 酸雨对农作物产量的影响

酸雨对农作物产量的影响，不同作物反应不

一。8种主要农作物对模拟酸雨敏感性反应和产量影响的试验结果表明，在酸雨pH值3.0左右时，油菜最敏感，小麦、玉米、大麦等次之，水稻不敏感，烟草和黄麻最不敏感，其敏感性排列次序为：油菜>小麦>玉米>大麦>大豆>水稻>烟草>黄麻<sup>[5]</sup>。蔬菜比谷类作物易受酸雨危害，15种蔬菜试验结果表明，如以pH值3.5的模拟酸雨为准，则属于敏感性的有6种：番茄、芹菜、茄子、春瓢白、豇豆和黄瓜，其产量下降20%以上；属于中等敏感的有4种：生菜、冬瓢白、四季豆和辣椒，其产量下降10%~20%；属于抗性较强的有5种：青椒、甘蓝、菠菜、小白菜和胡萝卜，其产量影响在10%以下<sup>[3]</sup>。必须指出叶菜类的蔬菜由于叶片受酸雨危害出现斑斑或叶片褪绿，也会使其质量降低，直接影响市场价格。

模拟酸雨和SO<sub>2</sub>单一污染与复合污染对农作物减产影响的基准也有不同(表1、表2、表3)，三者比较表明，模拟酸雨和SO<sub>2</sub>复合污染具有明显的协同效益<sup>[6~7]</sup>。

表1 模拟酸雨对农作物产量影响的基准值<sup>[7]</sup>

Table 1 Criteria values of simulated acid rain affecting crops yield

作物类型	减产幅度/%	酸雨pH值
抗性作物 (水稻、大豆、花生等)	5.0	3.2~3.8
	10~15	2.8~3.0
	20~25	<2.6
中等敏感作物 (小麦、玉米、薯类等)	5.0	4.0~4.6
	10~15	3.6~4.0
	20~25	<2.8
敏感作物 (大部分蔬菜)	5.0	4.6~5.2
	10~15	3.8~4.4
	20~25	<3.0

表2 SO<sub>2</sub>对农作物产量影响的基准值<sup>[7]</sup>

Table 2 Criteria values of SO<sub>2</sub> affecting crops yield

作物类型	减产幅度/%	SO <sub>2</sub> 浓度/ /mg·m <sup>-3</sup>	SO <sub>2</sub> 剂量/ /mg·m <sup>-3</sup> ·h <sup>-1</sup>
抗性作物 (水稻、大豆、花生等)	5.0	0.09~0.16	35~38
	10~15	0.13~0.19	76~114
	20~25	0.20~0.32	120~190
中等敏感作物 (小麦、玉米、薯类等)	5.0	0.07~0.10	25~30
	10~15	0.09~0.17	50~100
	20~25	0.19~0.28	105~170
敏感作物 (大部分蔬菜)	5.0	0.03~0.05	14
	10~15	0.06~0.10	16~24
	20~25	0.12~0.14	30~61

表3 模拟酸雨和SO<sub>2</sub>复合污染对农作物产量影响的基准值<sup>[7]</sup>

Table 3 Criteria values of combined pollution of simulated acid rain and SO<sub>2</sub> affecting crops yield

作物类型	减产幅度 /%	酸雨 pH 值	SO <sub>2</sub> 浓度	SO <sub>2</sub> 剂量
			/mg·m <sup>-3</sup>	/mg·m <sup>-3</sup> ·h <sup>-1</sup>
抗性作物 (水稻、大豆、花生等)	5.0 10~15 20~25	4.6 4.0~3.6 <2.6	0.28~0.20 0.37~0.28 0.43~0.37	68~50 90~68 125~90
中等敏感作物 (小麦、玉米、薯类等)	5.0 10~15 20~25	4.6 4.0~3.6 <2.8	0.15~0.20 0.20~0.28 0.28~0.37	28~36 48~50 68~90
敏感作物 (大部分蔬菜)	5.0 10~15 20~25	5.2~4.8 4.6~4.0 ≤3.0	0.08~0.13 0.13~0.24 0.24~0.37	21~33 32~58 58~78

3.2 酸雨对农作物危害损失

根据“七五”、“八五”国家攻关酸雨课题组在

表4 中国南方11省(区)每年农作物受酸雨危害的播种面积和经济损失

Table 4 Annual economic losses of crops damaged by acid deposition in 11 provinces of South China

省(区) 名称	粮食作物		经济作物		蔬菜		合计		资料来源
	面积/10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup>	损失/10 <sup>8</sup> 元	面积/10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup>	损失/10 <sup>8</sup> 元	面积/10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup>	损失/10 <sup>8</sup> 元	面积/10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup>	损失/10 <sup>8</sup> 元	
江苏	178.83	2.218	81.82	1.753	39.99	2.800	300.65	677.0	文献[6]
浙江	21.38	0.257	16.97	0.283	24.95	2.310	63.29	2.850	同上
安徽	120.62	2.725	56.83	1.419	21.89	1.901	199.34	6.045	同上
福建	8.35	0.076	11.45	0.074	32.74	3.168	52.53	3.318	同上
江西	4.70	0.024	29.18	0.542	28.3	3.038	62.17	3.604	同上
湖南	15.25	0.10	37.22	0.963	42.3	4.970	94.76	5.938	同上
湖北	107.99	1.945	68.36	2.418	42.74	4.100	219.09	8.463	同上
四川	100.77	1.000	71.25	0.300	13.33	0.600	185.35	1.900	文献[5]
贵州	31.04	0.100	14.23	0.100	2.93	0.100	48.21	0.300	同上
广东	0.09*	0.006	—	—	31.17*	1.911	31.26*	1.917	文献[7]
广西	10.20*	0.196	—	—	21.91*	1.276	32.11	1.472	同上
合计	599.22	8.652	387.31	7.852	301.51	26.074	1288.74	42.578	

\* 为危害面积

不同树种对酸雨的敏感性和生态效应不同。亚热带东部地区108种种对酸雨和SO<sub>2</sub>复合污染危害的敏感性试验结果表明<sup>[6]</sup>，根据伤害阈值、叶伤斑比率、初次出现症状时的剂量和初次出现症状的时间等四项指标综合的比较，属于敏感的树种有27种，中等敏感的树种有55种，抗性的树种有26种，其中在敏感树种中有我国特有的珍贵树种水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)、银杏(*Ginkgo biloba*)和珙桐(*Davidia involucrata*)等。

4.2 酸雨对森林生长量的影响

四川(含重庆)、贵州、广东、广西、浙江、安徽、福建、江西、湖南、湖北等11省(区)的研究结果，农作物受酸雨危害的播种面积为1 288.74 × 10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>/a，经济损失达42.6 × 10<sup>8</sup> 元/a(表4)。

4 酸雨对森林的影响

4.1 酸雨对森林的危害

酸雨对森林危害造成森林衰亡的现象最早是在我国西南地区出现。据研究报导<sup>[8]</sup>，重庆南山1 500 hm<sup>2</sup>马尾松(*Pinus Massoniana*)林已死亡46%；四川峨眉山冷杉(*Abies Fabri*)林死亡率达40%；四川奉节县茅草坝林场6 000 hm<sup>2</sup>华山松(*Pinus Armandii*)林已经死亡达96%。此外，广西柳州市郊、广东广州市郊、浙江杭州市郊和天目山等地酸雨对林木的危害也比较严重。

据在贵州和四川对相近年龄阶段的马尾松林和杉木林的研究<sup>[5, 9]</sup>，降水pH值大于4.5地区的胸径年平均生长量比降水pH值小于4.5地区分别高出13.7%~33.3%和26.7%~44.3%，树高年平均生长量分别高出6.0%~37.9%和25.8%~50.6%，材积年平均生长量分别高出34.3%~77.6%和51.4%~88.9%(表5)。当然还不能就此认为这些生长差别完全是由降水pH值决定的。根据在贵州或四川调查地区样地所处的气候条件即温湿度和降雨量相近似，而立地条件如海拔高度、

坡向、坡位、坡度、土壤厚度、A层厚度和降雨酸度等有差异,将这些因子作为影响林分生长的自变量,选用胸径、树高、材积年均生长量作因变量,采用数量化理论 I 数学模型分析,结果表明,降水 pH 值对森林生长量影响相对得分都高于其它因子,而从降水 pH 值这一因子相对得分来看 pH 值 4.5 以上又大于降水 pH 值 4.5 以下的,这表明 pH 值 4.5 以下的降水即酸雨对森林生长有不利影响。数

量化相关分析得出贵州省酸雨对森林胸径、树高、材积生长影响的贡献率:马尾松为 48.97%、33.90% 和 48.32%,杉木为 31.86%、32.38% 和 25.17%;而在四川省相应的马尾松为 45.40%、46.40% 和 29.19%,杉木为 46.50%、33.90% 和 33.98%;其后按公式(1)计算酸雨对胸径、树高、材积的年平均生长量的损失率。

表 5 酸雨对马尾松、杉木林年平均生长量的影响

Table 5 Effects of acid deposition on annual mean increment of Masson Pine and Chinese Fir

降水 pH 值	省份	树种	样地数	平均林龄 / a	胸径/cm	树高/m	材积 /m <sup>3</sup> ·株 <sup>-1</sup>
4.5 以下	贵州	马尾松	272	22.7	0.63	0.63	0.004 4
		杉木	60	24.8	0.55	0.46	0.003 9
	四川	马尾松	20	22.0	0.44	0.41	0.001 1
		杉木	11	8.0	0.39	0.38	0.000 1
4.5 以上	贵州	马尾松	75	23.5	0.73	0.67	0.006 7
		杉木	66	23.6	0.75	0.62	0.007 0
	四川	马尾松	40	23.6	0.66	0.66	0.004 9
		杉木	32	8.0	0.70	0.77	0.000 9

$$P_n = \frac{(y_0 - y_1) \times C \times 100}{y_0} \quad (1)$$

式中  $P_n$ ——年平均生长量损失的百分率

$y_0$ ——未受酸雨危害的森林年平均生长量

$y_1$ ——降水 pH 值 4.5 以下受害的森林年平均生长量

$C$ ——相关分析得出的酸雨对森林生长影响的贡献率

由表 6 中得知, pH 值 4.5 以下的酸雨对贵州马尾松林的胸径、树高和材积年生长量分别下降 6.71%、2.02% 和 16.37%,杉木林的胸径、树高和材积年生长量分别下降 8.50%、8.36% 和 13.26%;而四川马尾松林的胸径、树高和材积年生长量分别下降 15.12%、17.59% 和 22.15%,杉木林的胸径、树高和材积年生长量分别下降 14.72%、14.85% 和 29.06%。

表 6 酸雨对森林年平均生长量的损失率/%

Table 6 Percentage of annual increment losses caused by acid deposition

省份	树种	胸径	树高	材积
贵州	马尾松	6.71	2.02	16.37
	杉木	8.50	8.36	13.26
四川	马尾松	15.12	17.59	22.15
	杉木	14.72	14.85	29.06

### 4.3 酸雨对森林危害损失

4.3.1 酸雨对森林危害经济损失的估算<sup>[5-6]</sup> 酸雨对森林的危害损失,分为直接损失和间接损失。直接损失通常以能用货币价值来度量的木材材积来计算。根据公式(2)先计算酸雨危害木材的年损失量,然后按公式(3)进行木材经济损失的估算。间接损失是指生态效益的损失。森林生态效益通常包括涵养水源如防止洪水减缓枯水,保护国土如防止水土流失,风沙危害,保健游憩,保护野生动物,净化大气和调节气候等方面。日本研究表明,森林生态效益的价值占森林总效益的 93%,木材效益仅占 7%;美国测算,森林生态效益与木材价值之比为 9:1;刘清泉对山西的研究得出,森林生态效益的价值占森林总价值的 91%。本文对森林生态效益危害的经济损失,按 90% 计算。

$$W_n = \sum_{n=1}^m G_n \cdot \theta_n \cdot P_n \quad (2)$$

式中  $W_n$  为酸雨危害木材的年损失量 ( $m^3$ )

$G_n$  为单位面积木材年生长量 ( $m^3/hm^2 \cdot a$ )

$\theta_n$  为酸雨危害森林的面积 ( $hm^2$ )

$$T_n = \sum_{n=1}^m K_n \cdot W_n \quad (3)$$

式中  $T_n$  为酸雨危害森林的木材年经济损失价值 ( $10^8$  元)

Kn 为单位  $m^3$  木材价格 (元/ $m^3$ )  
 4.3.2 中国酸雨对森林危害的经济损失 根据“七五”、“八五”国家攻关酸雨课题在 11 省 (区)

的研究结果表明, 木材经济损失为  $18.02 \cdot 10^8$  元/a; 森林生态效益经济损失为  $162.30 \cdot 10^8$  元/a (表 7)。

表 7 我国酸雨区 11 省 (区) 酸沉降对森林造成的年经济损失估算

Table 7 Annual economic losses of forests damaged by acid deposition in eleven provinces of China

省 (区) 名称	木材经济损失/ $10^8$ 元·a <sup>-1</sup>			生态效益经济损失/ $10^8$ 元·a <sup>-1</sup>			资料来源
	马尾松林	杉木林	合计	马尾松林	杉木林	合计	
江苏	0.17	0.12	0.29	1.50	1.10	2.60	文献 [6]
浙江	1.5	0.60	2.1	13.50	5.40	18.90	同上
安徽	0.07	0.02	0.09	0.60	0.20	0.80	同上
福建	0.15	0.56	0.71	1.40	5.00	6.40	同上
江西	0.41	0.93	1.34	3.70	8.40	12.10	同上
湖南	0.24	0.56	0.80	2.20	5.00	7.20	同上
湖北	0.30	0.37	0.67	2.70	3.30	6.00	同上
四川	1.36*	0.05	1.41	12.20*	0.50	12.70	文献 [5]
贵州	0.49	0.05	0.54	4.40	0.50	4.90	同上
广东			3.52**			31.70***	文献 [7]
广西			6.55**			59.00***	同上
合计			18.02			162.30	

注 \* 含华山松林在内; \*\* 指针叶林合计; \*\*\* 按文献 [5] 估算

## 5 酸雨对土壤的影响

### 5.1 酸雨对土壤化学性质的影响

土壤长时期的受酸雨影响后, 土壤化学性质发生变化, 造成土壤 pH 值下降, 土质恶化, 使正常的生态系统失去原有的平衡。

我国西南重庆市区内, 重酸雨区的黄壤和污染较轻的郊区黄壤的土壤 pH 值测定结果, 市区在 4.51~4.84 之间, 平均为 4.56; 而郊区在 4.55~5.63 之间, 平均为 5.04, 市内比郊区下降达半个 pH 单位<sup>[10]</sup>。不同植被覆盖的黄壤也有差异, 重庆南山马尾松林下土壤溶液的 pH 值为 4.3~4.6, 明显比樟树 (*Cinnamomum Camphora*) 林下土壤溶

液的 pH 值 (4.5~5.0) 低, 樟树林下的土壤溶液中的  $SO_4^{2-}$  浓度比马尾松林下的要高出 3 倍,  $NO_3^-$  浓度高出 10 倍。上述情况表明, 樟树常绿阔叶林对减缓土壤酸化起一定作用<sup>[11]</sup>。模拟酸雨对重庆黄壤化学性质影响的试验结果表明, 无论是表层土 (0~4 cm) 还是深层土 (15~20 cm) 活性铝含量随土壤 pH 值下降而增加, 而交换性钙、镁离子和盐基饱和度则相反, 呈下降的趋势 (表 8)<sup>[5]</sup>。

### 5.2 酸雨对土壤微生物的影响

土壤中繁衍着数量巨大、种类繁多、代谢类型各异的微生物种群, 它们对生态系统的能量循环和物质转化具有重要作用, 同时生态环境的变化又直接和间接地影响微生物种群的组成及其功能的发挥。

表 8 模拟酸雨对黄壤化学性质的影响

Table 8 Effects of simulated acid rain on chemical properties of yellow soil

采样部位	模拟酸雨 pH 值	土壤 pH 值		盐基饱和度/%	Al	Ca	Mg
		H <sub>2</sub> O	KCl		/mmol·100 g <sup>-1</sup> 干土		
表土 (0~4 cm)	2.0	3.26	2.96	17.24	0.91	0.22	0.05
	3.0	3.95	3.16	33.04	0.79	0.86	0.06
	4.5	4.77	3.98	51.93	0.26	1.77	0.32
	对照	6.12	5.05	82.94	0	2.51	0.84
深层土 (15~20 cm)	2.0	3.69	3.20	27.12	1.50	0.10	0.03
	3.0	3.81	3.33	29.88	1.00	0.59	0.04
	4.5	4.75	3.92	51.47	0.30	1.33	0.30
	对照	5.76	4.75	74.67	0	2.40	0.64

5.2.1 酸雨对土壤微生物种群数量的影响<sup>[12]</sup> 酸雨对土壤微生物种群数量有明显的影。重庆地区的重酸雨区、轻酸雨区和相对清洁区的马尾松林下土壤微生物分析结果表明(表9),受酸雨的影响土壤中微生物总数明显减少,其中细菌数量减少最显著,放线菌数量略有下降。而真菌数量有所增加。土壤细菌中芽胞杆菌具有较强的氨化能力,对土壤中蛋白质等含氮有机质的转化有重要作用,酸雨的影响使细菌中芽胞杆菌数量减少,在重酸雨区南山土壤中,蕈状芽胞杆菌(*Bacillus mycoides*)、巨大芽胞杆菌(*B. megatherium*)、蜡状芽胞杆菌(*B. cereus*)和枯草芽胞杆菌(*B. subtilis*)的数量与相对清洁区的江津四面山相比,数量明显减少。受酸雨的影响,土壤中真菌数量增加,但种类减少,数量增加主要是由于较喜酸性的青霉(*penicillium*)和木霉(*Trichoderma*)数量增加有关。

表9 酸雨对土壤微生物数量的影响/1000个·g<sup>-1</sup>干土

Table 9 Effects of acid deposition on soil microbes

地点	酸雨状况	微生物总数	细菌	放线菌	真菌
南山	重酸雨区	817	271	46	500
巴县	轻酸雨区	2 239	1 700	36	503
江津	相对清洁区	52 681	51 890	31	760

5.2.2 酸雨对土壤微生物生化活性影响<sup>[13]</sup> 酸雨明显减弱土壤微生物的氨化作用强度,在重酸雨区氨化作用强度较轻酸雨区下降27%,经折算每kg土减少约50mg氨态氮。较相对清洁区下降50%,约相当于每kg土减少约500mg氨态氮。酸雨的影响也使硝化作用有所下降,固氮作用变化不明显(表10)。

表10 酸雨对土壤微生物的生化活性的影响

Table 10 Effects of acid deposition on biochemical activity of soil microbes

地点	酸雨状况	氨化作用	硝化作用	固氮作用
		∕NH <sub>3</sub> mg ·g <sup>-1</sup> 干土	∕NO <sub>3</sub> mg ·g <sup>-1</sup> 干土	∕N mg ·g <sup>-1</sup> 干土
南山	重酸雨区	0.68	17.22	0.23
巴县	轻酸雨区	0.33	11.54	—
江津	相对清洁区	1.40	17.94	0.23

## 6 酸雨对水生生物的影响

### 6.1 水质酸化对鱼类的影响<sup>[14]</sup>

水质酸化对白鲢、鳙鱼和草鱼的早期生活阶段的发育、孵化、存活、畸形率等影响研究发现,这三种鱼对低pH值水体的敏感性没有显著差异,但不同生活阶段的敏感性不同,受精卵、仔鱼和幼鱼能存活的pH值水平分别为6.0、5.5和4.5;当pH≤6.0值时,仔鱼畸形率随pH值的降低而升高。

### 6.2 水质酸化对其它水生生物的影响<sup>[5]</sup>

低pH值对浮游生物大型溞(*Daphnia magna*)存活、生长和生殖影响的急性试验结果表明,24小时LL<sub>50</sub>(半致死水平)为pH值4.66±0.19,48小时LL<sub>50</sub>为pH值4.94±0.20。慢性试验中平均存活时间在0天(pH值4.00)至11天(pH值7.00和对照)之间。溞自出生到第11天试验结果,随pH值降低,溞的平均体长逐渐减少,生殖量逐渐下降。低pH值对底栖软体动物椭圆萝卜螺(*Radix swinhoei*)的耐受性研究发现pH值3.6、3.8、4.0时的96小时死亡率分别是100%、60%、20%和10%。

### 6.3 水体酸化现状及水生生物的影响

我国酸雨严重的四川、重庆、贵州地区的大江大河如长江、嘉陵江、涪江、岷江、沱江等水体,目前pH值在7.6~8.4之间,总碱度在1.52~2.3mol/L之间,电导率在170~440mS/m之间,都不是酸化水体。四川稻田养鱼近30×10<sup>4</sup>hm<sup>2</sup>,其中位于降雨年平均pH值5.0等值线之内的近27×10<sup>4</sup>hm<sup>2</sup>。据调查,泸州地区水田碱度平均1.92mol/L,pH值在7.0~7.6之间,加上施肥量大,近期也不可能酸化。紫色土区水库、池塘目前也未被酸化<sup>[5]</sup>。仅在重庆黄壤地区个别小池塘发现Al和SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的浓度稍高,浮游生物(藻类)的现存量 and 物种减少<sup>[11]</sup>。据统计,四川、重庆和贵州有可能酸化(pH值6.5)的养殖渔业水体近2.3×10<sup>4</sup>hm<sup>2</sup>,如不采取措施,估计10年后可能渔业损失每年将达6000~7500×10<sup>4</sup>元<sup>[5]</sup>。

## 7 防治对策

中国酸雨成因主要是燃煤排放的大量SO<sub>2</sub>,是典型的“硫酸型酸雨”<sup>[15]</sup>。中国煤含硫量低于1%的低硫煤只占20%,2/3分布在秦岭以北。在秦岭以南,含硫量大于4%的特高硫煤约占3/4。全国平均每吨原煤排放SO<sub>2</sub>30kg左右。中国是燃煤大国,防治酸雨的主要控制对象是SO<sub>2</sub>,根据可持续

发展的战略思想，提出下列对策：

1) 强化环境管理，确定酸雨控制区，严格实行 SO<sub>2</sub> 排放总量控制，削减 SO<sub>2</sub> 排放量。

2) 因地制宜选择适用清洁煤炭能源技术，如洗选煤、型煤固硫，循环流化床燃烧脱硫和烟气脱硫等技术。

3) 大力发展煤炭替代能源，包括加速开发水电，积极发展核能和开发利用新能源如太阳能、风能等。

4) 在煤炭能源尚不能完全解决脱硫的情况下和基于酸雨不分国界，有远距离输送问题的现实条件下，在我国酸雨分布区还应该尽量选用抗酸性强的农作物和树种，减少农、林业的损失；多种绿肥，施有机肥，在酸化土壤地区还可施石灰，提高土壤缓冲能力，缓解土壤酸化进程。

#### 参考文献

- [1] 国家环境保护总局. 酸雨控制区和二氧化硫污染控制区划方案 [J]. 环境保护, 1998, (3): 7~11
- [2] 国家环境保护总局. 跨世纪的中国环境保护 [J]. 环境保护, 1998, (8): 3~5
- [3] 冯宗炜. 酸雨的生态效应 [A], 丁一汇, 高素华主编. 痕量气体对我国农业和生态系统影响的研究 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995. 232~301
- [4] 户塚绩. 酸雨与森林衰亡 [J]. 燃料协会志 (日本), 1989, 6 (3): 200~209
- [5] 冯宗炜主编. 酸雨对生态系统的影响 [M]. 北京: 中国科学技术出版社. 1993. 21~56, 133~143, 108~177
- [6] 冯宗炜, 曹洪法, 周修萍, 等. 酸沉降对生态系统的影响及其生态恢复 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1999. 79~178
- [7] 曹洪法, 舒俭民, 刘燕平, 等. 酸沉降对两广地区农作物、森林影响的经济损失 [A]. 国家环境保护局. 大气污染防治技术研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1993. 844~851
- [8] 酸雨考察组. 酸雨对大农业的危害及其对策综合学术考察报告 [A]. 中国林学会主编. 酸雨与农业 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1989. 1~9
- [9] 张家武, 陈楚莹, 邓仕坚, 等. 酸雨对森林生长影响的研究 [A]. 国家环境保护局. 大气污染防治技术研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1993, 805~813
- [10] 程伯容, 许广山, 耿晓源. 酸雨对重庆黄壤土影响的初步研究 [A]. 中国林学会主编. 酸雨与农业 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1993, 170~173
- [11] 冯宗炜, 小仓纪雄. 重庆酸雨对陆地生态系统的影响和控制对策 [J]. 环境科学进展, 1998, 6 (5): 1~8
- [12] 周崇莲, 齐玉臣, 卢耀波, 等. 酸雨对土壤微生物种群分布的影响 [J]. 大气环境, 1987, 2 (6): 43~46
- [13] 周崇莲, 齐玉臣. 酸雨对土壤微生物活性的影响 [J]. 生态学杂志, 1988, 7 (2): 21~24
- [14] 王德铭, 李辛夫, 庄德辉. 酸雨对水体影响的生态学研究及一些建议 [A]. 中国林学会主编. 酸雨与农业 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1989, 74~78
- [15] Zhang, F Z, Zhang J Y, Zhang H R, et al. Chemical Composition of Precipitation in a Forest Area of Chongqing, Southwest China [J]. Water, Air and Soil Pollution, 1996, 90: 407~417

## Impacts and Control Strategies of Acid Deposition on Terrestrial Ecosystems in China

Feng Zongwei

(Research Center for Eco-environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

[Abstract] South China has become the third largest region with heavy acid deposition after Europe and North America. The land seriously impacted by acid deposition has extended from 1.75 million km<sup>2</sup> in 1985 to 2.8 million km<sup>2</sup> in 1993. Acid deposition has seriously damaged the terrestrial ecosystems. In this paper, the results of experimental and field studies on the impacts of acid deposition on agricultural crops, forests, soils and aquatic biota is reported. Annual economic losses in crops and forests due to acid deposition in 11 provinces of South China were estimated to be 4.26 billion Yuan (RMB) and 18.3 billion Yuan (RMB), (Cont. on p.28)

键技术问题。为了减小脉冲功率源的复杂程度、体积和成本,提高性能价格比,需要研究在单路模块中快放电储能技术和新的组合结构。直线型脉冲变压器是多年来发展起来的一种新的初级脉冲能源,与传统的 Marx 发生器相比,它不需要庞大的绝缘油系统,能量利用率高,工作可靠,关键是要解决它的低电感、低抖动的技术难题。电感储能方式具有结构紧凑、重量轻、成本低等突出优点,关键是它的断路开关技术能否取得突破。它们的组合可使装置结构大大简化。

在我们已有的低阻抗、短脉冲电容储能的高功率脉冲装置研制经验和等离子体断路开关研究的基础上,今后准备先从单路模块技术研究着手,选择低电感直线型脉冲变压器模块化结构和低抖动气体开关技术研究为突破口,重点研究上述关键技术,对大型 Z-pinch 脉冲功率源的几种储能技术进行研究和评估。

#### 参考文献

[1] Bloomquist D D, Stinnet R W, et al. Saturn, A large

area X-ray simulation accelerator [A]. 7th IEEE International Pulsed Power Conference [C]. 1989. 310~317

[2] Summa W J, et al. Advances in x-ray simulator technology [A]. 10th IEEE International Pulsed Power Conference [C]. 1995. 1~2

[3] Quintenz J. Pulsed power fusion program [A]. Task Force on Fusion Energy Third Meeting [C]. Lawrence Livermore National Laboratory. 1999. 26~27

[4] Cook D. New developments and applications of intense pulsed radiation sources at Sandia National Laboratories [A]. 11th IEEE International Pulsed Power Conference [C]. 1997. 23~36

[5] Covault Craig. Powerful X-ray facility readied for BMD tests [J]. Aviation Week & Space Technology. April, 2000: 65

[6] Hammer J H, Tabak M, Wilke S C, et al. Z-箍缩驱动腔的高产额惯性约束聚变靶设计 [J]. (译自 Phys. Plasmas. 1999.6 (5): 2129~2136). 强激光技术进展. 1999 (6): 1~9

## The Development of Technology for Pulsed X-ray Simulators

Qiu Aici

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

[Abstract] In this paper is given briefly a survey of situation of simulating pulsed x-ray with high current pulsed electron beam accelerator. It's indicated that technology of high pulsed power Z-pinch has vast application prospects in the realization of ultraintensive pulsed x-ray simulator and ICF driver as a chief technological way. Also are described the progress and the current status of simulators for pulsed x-ray in China, and proposals for the future development of Z-pinch technology.

[Key words] pulsed x-ray; high pulsed power technology; pulsed electron beam accelerator; Z-pinch; ICF

(Cont. from p.11) respectively. Acid deposition in south China is typical "sulfuric acid type". According to the view of sustainable development, some control strategies are brought forward: 1. Strengthening environmental management, specifying acid deposition control area, and controlling and abating the total emission amount of SO<sub>2</sub>. 2. Employing practical techniques of clean coal, such as techniques of washing pyrite off from raw coal, industrial sulfur-fixed briquette, and abating sulfur from waste gas, etc. 3. Developing alternative energy sources to replace coal, including hydroenergy, nuclear, solar and wind energy, etc. 4. In acid deposition region of South China, selecting acid-resistant crop and tree species to reduce agriculture and forestry losses, planting more green fertilizer crops, using organic fertilizers and liming to raise buffer capacities of soils.

[Key words] acid deposition; terrestrial ecosystems; economic loss; control strategy