

专论与综述

我国酸雨现状特点及对策刍议

徐康富 郝吉明

(清华大学环境工程研究所)

摘要 本文简要介绍目前国外酸沉降控制对策和我国酸雨现状基本特点, 针对大气颗粒物对降水组分和酸度的不同影响, 提出致酸物来源、主控制因子确定和酸沉降控制环境目标选择等研究中应注意的问题。依据目前这类问题的研究水平, 提出我国现阶段酸沉降控制的研究方法和原则性对策。

一、概 述

近十余年来, 人们对酸雨的危害和人为排放 SO_2 、 NO_x 对降水酸度的宏观影响已有许多认识, 对环境酸化问题的严重性有所觉察, 因而要求采取有效措施, 包括削减污染物排放量以控制酸雨的发展。

一般而言, 酸沉降控制研究需要两方面的基础。其一, 作为大气污染防治研究的一种发展, 不可没有污染气象资料、大气扩散模型和污染物排放的数据等; 其二, 要有相关基础研究的成果, 如致酸物来源, 源与受体的相关性, 以及酸雨对材料、生态和土壤危害的估价等。目前这类基础还相当薄弱。

从国外酸雨对策来看, 由于环境受害机理尚未弄清, 有些工作还刚起步, 因而显得措施不力。如在生态保护方面, 美国和瑞典对开始酸化的湖泊和河流定期投放石灰^[1]。显然这不过是一种应急手段, 而非根本的治理良策。削减污染物排放量, 包括燃料低硫化, 工业布局和工艺的改进, 才是防治酸雨危害的基本对策。一些欧美国家正在这方面采取措施, 它们的削减对策有下述共同点:

1. 削减量是在不完善的数据基础上确定的

由于酸雨成因的复杂性, 影响的广泛性

和潜在性以及定量评价的困难, 在近期内将不能科学地作出某一区域的许可排放量。目前所规划的削减有待于实践检验和修正, 只有通过理论和实践的交叉研究, 使之逐步臻于完善。

2. 以火电站为重点, 优先削减 SO_2 排放量

两种主要的致酸物 SO_2 和 NO_x , 从降水组分、生态影响、排放量及控制的技术经济可行性等方面说, 重点削减 SO_2 都是合适的^[1]。统计资料表明: SO_2 和 NO_x 的人为排放量, 较之各自的天然源排放量, 前者约大百分之五十, 后者则低约一个数量级^[2], 显然前者对自然循环干扰的程度更严重。有的研究还表明, 对 NO_x 排放量占优势和降水属硝酸型酸雨的美国华盛顿州, 通过削减 NO_x 排放量来减轻酸雨危害, 也不如削减 SO_2 排放量那样有效*。火电站则因集中排硫量大, 列为削减的重点实属当然。

3. 受社会经济承受能力的制约

实施削减需要巨额费用, 据一般统计, 脱硫设备投资占电站总投资的 25% 以上, 过大规模的削减会给经济发展带来严重影响。因

* 参见 M. G. Ruby, Evaluation of Acid Deposition Control Policies for Washington, p. 153, (1986)。

此,应根据国民经济发展水平确定各阶段可能的削减量。

上述共同点也是酸沉降控制对策研究的基本点,应结合各地区 SO_2 排放和酸雨的现状及趋势,土壤和生态的抗酸能力,以及技术经济水平等实际情况提出阶段性的控制对策。

二、我国酸雨现状特点与对策研究方法

我国工业起步较晚,目前 SO_2 排放虽有

一定数量,但由于环境的缓冲作用,表现在湖泊酸化和森林大面积衰亡等严重受害方面尚不明显。而长江以南地区已普遍发现酸雨,其中贵阳、柳州、韶关、萍乡、长沙、重庆和峨嵋山等城市和地区,降水中氢离子浓度雨量加权年均 pH 值(以下简称 pH)低于 4.5,与美国、加拿大和挪威等欧美国国家重酸雨区的降水酸度水平不相上下(见表 1)。

国外酸雨研究,由于环境酸化已有显现,加上大点源的高烟囱排放,主要关心湖泊酸化和森林衰亡等环境生态问题,重点放在污

表 1 国内外部分城市和地区降雨的平均数据

地 区	贵阳	柳州	韶关	长沙	重庆	峨嵋	美国纽约	日本神户	挪威南部
pH	4.20	4.45	4.11	4.30	4.44	4.28	3.92	4.40	4.57
SO_4^{2-} ($\mu\text{eq/L}$)	405.2		93.7		326.6	95.8	125.2	38.5	35.0
NO_3^- ($\mu\text{eq/L}$)	27.9		5.8		27.9	14.5	39.1	24.2	11.0

染物中远程输送和环境影响方面,进而探讨适当的控制对策。

我国所面临的情况正相反,由燃煤和低空排放所引起的大气污染对降水组分和酸度有重要影响,从而形成我国酸雨的基本特点,如呈多中心型分布,降水组分的离子浓度高, $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 的浓度比值大,地面层大气颗粒物具有显著的中和作用等^[3]。从对策研究角度看,应重视以下几个问题:

1. 致酸物来源的研究宜按污染气象的类同性分类作比较,而不按年(季)度作降雨量的加权统计处理。

后一种方法是酸雨现状普查所用的数据处理方法。沿用此法来研究致酸物来源、往往导致局地源为主的结论。实际上影响降水酸度的因素很多。由于受颗粒物中和作用的影响,一般地说,采样点位置高,采样及时(即开始下雨才打开采样器,雨停即收样),降雨时间长和降雨量大,所得雨样就较酸。加上大气污染的城市效应(如多雨、雾)和城区的建筑及管理条件,会使统计得出较多城市的

城区降水比郊区降水酸的结果。若以此推断本市污染源为当地降雨致酸物的主要来源,可能与事实相距甚远。

此外,由于局地源对每场雨都有影响,外地源则只有借助某类气象条件才起作用,这后一种降雨虽有迭加效果而酸度较强,也容易为统计结果所掩盖。如在 1986 年 2 月份对两广地区春季锋面雨的联合观察表明,广州市的每场雨都是地处上风向的白云山顶对照点最酸,在近地面层雨水对局地源排放物的洗脱只起减轻酸度的作用(见表 2)。这与以往的统计结果大相径庭。考虑到酸雨对土壤和环境生态的影响只有当酸度低于某一 pH 值时才能发生,在对策研究上则应关注具有一定发生频率的强酸雨而不是总酸量。因而统计方法所存在的问题很可能导致对策研究的失误。

如何评价广域大气污染对云水酸度的影响也是酸雨来源和成因研究的一个重要问题。正如地表水对酸沉降的缓冲模拟试验所表明的,开始滴定加入的酸未能引起水样 pH

表 2 联合观察期间广州市降水的 pH 值

观察点	清远	白云山	市中心站	番禺*
$\overline{\text{pH}}$	4.12	3.85	4.79	3.97—4.70

* 各场雨的 pH 值范围

值的多少变化,至一定量后再加入少许酸就能使 pH 值急剧下降。云水酸度的变化也会有类似的过程,即首先表现为本身缓冲能力的被削弱,单凭酸度的高低来衡量输送的影响是远远不够的。云水的缓冲能力当然与其汽源和相关气团所经途径有关,如海洋性气团和大陆性气团,南支西风和北支西风,气旋和反气旋等。因来源不同,所经距离的远近不同,所经地带的土壤背景和海拔高度不同,所携带的气溶胶数量和化学性质就会有差异,如由西北高原南侵的下沉气流会含有较多的碱性物质。从我国的具体情况看,这类差异有助于说明中南地区及其邻近地区(包括川东南)易降强酸雨的现象,值得进一步研究。

前几年酸雨现状普查数据抽样统计表明,对年均 $\overline{\text{pH}}$ 值低于 5.0 的城市,降水酸度城区高于郊区的只占三分之一*。要探明污染物来源,更应从污染气象的类同性上作不同类别和不同观察点的比较研究。

2. 降水组分的相关研究要注意排除大气颗粒物的中和作用影响,酸沉降控制目标应通过土壤酸化机理的研究来确定。

从国外情况来看,酸沉降控制目标已从单一的降水酸度转向同时考虑干、湿沉降的致酸物沉降量,如目前普遍认可的以硫计的 SO_4^{2-} 和 SO_2 沉降量。我国降水中 SO_4^{2-} 含量和 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 浓度比值一般为美国和日本等国降水之对应值的 3—5 倍*。这种情况似乎表明我国的酸沉降控制对策更应着重于削减 SO_2 排放量。

然而,一些城市的降水组分相关研究表明: SO_4^{2-} 与 H^+ 不甚相关,而与 Ca^{2+} 、尤其与 NH_4^+ 相关性很好*。这与硫酸铵的可溶性和

化学稳定性是相一致的。尽管农业生产上有施用铵肥后要施石灰的经验, SO_2 作为主控因子是相对明确的,但若没有 SO_4^{2-} 和 H^+ 的相关性,控制目标的选择就会有很大的盲目性。是控制酸沉降还是控制硫沉降,两者在污染物来源问题上是有重大区别的。后者基本上可以肯定主要来自局地源;前者的来源不易确定,现在还不能从数量上作出基本估计。不问来源如何,盲目削减局地源的 SO_2 排放量,控制降水酸度的有效性自然会受到怀疑,因此要加强有关研究。除了在搞清来源的基础上寻找源与受体和降水组分间的相关性之外,要通过土壤酸化机理的研究,以探明 SO_4^{2-} 和 H^+ 对土壤酸化的影响。在降水组分相关研究中必须注意的是大气颗粒物的中和作用可能会掩盖最初的致酸物,应在分时段和酸雨垂直分布监测的基础上尽量排除这种影响。鉴于湖泊酸化和森林衰亡都与土壤酸化或其组分化学形态变化有关,而土壤的变化又具有不易逆转的性质,故应及早开展土壤酸化机理的研究以防患于未然。

3. 在酸沉降控制中不宜以污染物地面浓度作削减的环境目标,而代之以区域许可的总排放量。

在酸雨来源和成因研究中,由于受现有数据限制,一般选用 SO_2 地面浓度来建立云下洗脱酸雨模型,有的还用于表示 SO_2 浓度和降水酸度相关性的统计模型。这类做法对探讨大气化学反应可能的途径会有一定帮助,但若用于对策研究则不妥,其理由有三:

(1) SO_2 平均地面浓度和降水 $\overline{\text{pH}}$ 值没有时段的对应性。

地面浓度常规监测的统计值只反映非降雨日的情况。在降水过程中,由于树冠、植被和建筑物表面等地表湿润化,显著地提高了对大气污染物的吸收和附着能力。加上污染物在扩散过程中沿程受雨水洗脱,酸雨监测

* 中国环境科学院等编《我国酸雨来源和影响及其控制对策》总报告(1987)。

表 3 降雨期与非雨期的 SO_2 平均地面浓度
(mg/m^3)

测点	韶关	白云山	广州市站	番禺
降雨期	0.026	0.003	0.004	0.013
非雨期	0.157(雨前) 0.117(雨后第二天)	0.010*	0.038* 0.064**	0.065**

* 同月份自动监测数据。 ** 同季度常规监测数据。

点附近的 SO_2 浓度,除个别情况外一般下降很快(见表 3),而降水酸度正是在地面浓度显著下降、大气颗粒物被大量去除的情况下才显著化。

(2) 酸雨是在城市上空形成的,地面层大气污染物对酸性降水有一定的中和作用。

在酸雨常规监测中,采样点高度和采样起止时间对雨样酸度的影响已预示地面层大气污染物对酸性降水具有中和作用的可能。一些地区所作的酸雨垂直分布监测,因其排除了气流随地形起伏的影响,降水酸度随高度上升而增加的现象十分明显,从而证实了发生在地面层内的中和作用。如表 4 所示,上海地区百米楼顶的雨样,除个别点外,一般都比楼底地面雨样酸;广州市电视塔百米高度处的雨样酸度也明显高于塔下雨样。对连续性降雨,中后期的雨样酸度随高度的变化显著变小,有的还因降落中的蒸发浓缩而使地面雨样水量较少而酸度略高。总的来说,酸雨是在城市上空形成的。在那里 SO_2 、 NO_x 及转化生成的酸性气溶胶与较粗大的碱性颗粒物有了初步的分离,致酸作用明显。而在地面层,大气颗粒物则因排放、扬尘和沉降汇集而骤增,酸性气态污染物浓度虽高,为雨

水洗脱的总效应仍表现出不同程度的中和作用。酸、碱性污染物的形态和垂直分布显然限制了降水在地面层内继续酸化,国外酸雨情况也是如此。用非致酸区的地面浓度作代表,对控制降水酸度是没有意义的。

(3) 削减地面浓度和削减高空污染物数量在控制重点和措施上大不相同。

事实上,一些重酸雨城市受 SO_2 污染严重,不少南方城市在 SO_2 污染较重的季节,酸雨强度和频率均有所上升。从目前各城市污染源排放高度大体类似和大气扩散的情况看,出现这种相关现象并无反常之处。因为地面浓度的差异和变化反映着空间浓度类似的差异和变化。忽视这种表征作用而只顾控制地面浓度,将削减目标转向低矮面源而置高架点源于不顾,高空浓度就得不到相应的削减,降水酸度的控制也就不能获得预期的效果。

显然,酸沉降控制有着不同于大气污染控制的侧重点。后者主要关心污染物地面浓度;前者则要综合考虑酸、碱性污染物沿高度分布积分的总效应。从简化问题考虑,需通过对所在区域环境和生态影响的研究,对总排放量作出限制。在城市和污染源周围地区当然还要顾及污染物地面浓度。因此,采用总量控制方法,以许可的地面浓度和总排放量作环境目标,探讨兼顾降水酸度和大气质量的区域大气环境容量,寻找最优控制和具体的防治措施,也许是一条适合国情的研究路线。因为地面层对酸性降水的中和作用反映了城市地区颗粒物和气态污染物的干沉降

表 4 百米低空内降水酸度的垂直分布

监 测 点		上 海 市				广州电视塔
		上海大厦	上海宾馆	佘山天文台	联宜大厦	
$\overline{\text{pH}}$	顶部	5.03	4.79	4.91	4.33	3.84
	地面	5.40	5.13	9.32	4.21	4.09
时 段		85—86年	85—86 年	85—86 年	86 年	88年 3 月

会有同样的总效应,撇开降水酸度只控制硫沉降量已背离酸沉降控制的含义。除非土壤酸化研究能够表明 SO_4^{2-} 的影响的确是重要的,届时就应参照许可的硫沉降量所对应的地面浓度或参照大气质量标准来控制。

三、我国现阶段酸沉降控制的原则性对策

综上所述,归纳和引出如下酸沉降控制对策:

1. 立足于防止土壤酸化,以总量控制作原则性对策,先从酸沉降控制和大气污染控制的一致性上研究近期的控制措施。

土壤酸化将带来的后果是不宜用目前的经济价值观来衡量的。从土壤、环境生态和气象的相互作用方面看,应高度重视酸雨对土壤潜在的破坏性影响。不能单凭眼前直接危害的大小来研究控制对策,也不能因城市所受的直接危害大于农村和偏远地区而任 SO_2 等到处扩散。

总量控制是近年来我国城市大气污染控制研究的一个重要课题,在用于酸沉降控制研究时必须增加一个总排放量的约束,其大小应根据污染物排放对研究区域降水酸度和环境生态的影响来确定。目前这一影响尚不能量化,近期的控制措施可参照地面浓度和不同削减率方案的横向比较来选择。

2. 开发西南地区水电资源以控制本地区及邻近地区成片的重酸雨区。

我国的大气污染和酸雨主要是由燃煤造成的。现正在努力施行通过局部改善能源结构以削减污染物排放量的措施,如城市煤气化,脱硫型煤技术的开发,热电联产和集中供热等,对削减地面浓度和硫沉降量较有成效,但因不能控制总排放量随经济发展而增长的趋势,难以使降水酸度得到相应的控制。若调用外省低硫煤以替代硫分在 4% 以上的本地高硫劣质煤,虽然在理论上不失为控制西南地区酸雨的一种有效措施,但由于会关联

到多方面的社会和经济问题,在近期内只限于用以解决个别严重的局地性污染。

控制西南地区重酸雨的主要出路在于限制火电和开发水电。这里水电资源丰富,可开发量占全国总量的 70%。据电力部门前几年的统计,开发利用率不到百分之五,一个基本原因据说是西电不易东送。若只满足本地区 and 邻区的需求,问题应较容易解决。虽然火电投资较省但若要采取 SO_2 排放控制措施,具有的经济优势就将大大削弱。开发水电则能利用可再生的水力资源,避免有限能源的巨大消耗,运行费用低廉,得失关系十分明显。看来,对重酸雨区新上火电站应制定并严格执行 SO_2 排放标准,以便推动水电开发工作。

3. 适度地推行高烟囱排放。

单纯的高烟囱排放不利于对酸雨的控制,辅助以烟气脱硫才是一种有效措施。实际情况往往只允许分步进行,如削减地面浓度已成为一些城市的当务之急,作为技术经济上可行的一种应急措施,高烟囱排放确能行之有效。从风速垂直分布和酸碱性污染物各自的运动趋向看,高烟囱排放也会有助于减轻邻近地区的降水酸度。当然,相应地要在常规监测的基础上加强环境影响的研究,通过实践验证下一步脱硫工作的必要性。为避免不必要的重复投资,应慎重和适度地推行高烟囱排放。

4. 在重酸雨区率先开展火电站烟气脱硫的工程示范性工作。

在重酸雨区率先进行火电站烟气脱硫,不单为今后面上的排烟脱硫积累工程经验,也不仅仅在于重酸雨区燃煤硫份高,回收硫资源可取得较好的经济效益,还可为酸雨问题研究提供良好的现场实验条件。火电站排硫量一般在当地排放量中占很大部分,排放量突然大幅度的削减,有利于查明多中心型分布的酸雨来源和探明排放量与降水酸度的相关性。这对研究的深化十分重要。

另外,要注意酸雨作为区域污染问题与局地污染的联系和区别。如工业布局问题,应参照当地易降酸雨的气象条件,在相关天气系统的范围内作高层次的规划。在排放控制方面,可先从局地污染角度采取削减措施。在产、烧高硫劣质煤的重酸雨地区,可考虑推广沸腾炉燃烧和炉内脱硫技术。

面对持续发展中的酸雨现象,对策研究要及早提出问题和解决问题的方法,在实践

和认识的多次反复中完善。

参 考 文 献

- [1] U. S. Congress: Office of Technology Assessment, *Acid Rain and Transported Air Pollutants: Implications for Public Policy*, OTA-0-204, 123 (1984).
- [2] 马倩如等,环境质量评价,第102页,中国文化书院,北京,1988年。
- [3] 王德春等,世界环境,45(2),8(1988).

(收稿日期:1989年7月3日)

沈阳市工业用水的优化分配及环境经济效益

边茂新 刘春英 张文清 徐鸿涛

(辽宁省环境保护科学研究所) (国家环境保护局)

摘要 本文应用线性规划原理,对沈阳市工业部门用水进行优化分配,从水资源观点出发,提出该市工业结构调整方向。对工业用水优化分配的环境经济效益的计算方法进行了探讨,计算结果表明,工业用水优化分配的环境经济效益是显著的。

水是人类赖以生存的基本物质条件,不仅是国民经济和社会发展不可缺少而又不能替代的物质,而且是构成环境的基本要素。

我国淡水资源缺乏,北方地区已经出现了不同程度的水资源危机。城市水资源的严重短缺和水质的严重污染,已成为制约这些地区国民经济发展的重要因素之一,为此,合理使用现有水资源成为一个重要问题。本文应用线性规划原理,建立了沈阳市工业用水的优化分配模型,并对其环境经济效益作一些分析。

一、沈阳市工业用水优化分配模型

1. 目标函数 工业用水的优化分配把取得最大的水的环境效益视为目标函数,即工业用水的优化分配在满足社会总需求的前提下,使工业产值之和尽可能地大,或在工业产值一定的条件下,工业用水量尽可能地少,当然,这种尽可能大或尽可能少是相对的,是受

一定的生产能力和市场需求约束的。

2. 变量的确定 优化模型变量 x 是一组表示各工业部门分配水量的向量。工业部门的划分是依据现行市属工业部门的隶属关系,较大工业局的划分是根据产品性能、工艺过程、耗水量大小及企业行业归属相近的原则,优化分配水量的依据是工业部门(工业局或工业公司)的部门产值,优化模型变量见表1。

3. 工业用水经济指标的确定 工业用水经济指标是万元国民收入耗水量。国民收入在工业企业就是工业净产值,用万元国民收入耗水量作为工业用水经济评价指标,有以下优点:一是有利于提高企业管理水平,工业企业新创造的价值,既受产品产量的影响,又受企业管理水平的影响,在总产值一定的条件下,企业管理水平好的,净产值就大。相反,企业管理水平差的,净产值就小,甚至企业亏损。因此,万元国民收入耗水量的大小,反映

(continued from page 96)

the lowest value in Lanzhou was high twice as much, but its highest value was similar to that in Beijing.

Application of Chemiluminescence Analysis to Environmental Detection.

Li Xiaohu, Lu Minggang (Department of Applied Chemistry, University of Science and Technology of China, Hefei): *Chin. J. Environ. Sci.*, 11(1), 1990, pp.

The application of chemiluminescence analysis to environmental detection has been reviewed in this paper, in which the chemiluminescence detection of metal ions, inorganic compounds, organic compounds and biomass, and the chemiluminescence detection of air pollution are explained.

Characteristics of Acid Rain in China and Primary considerations of the Strategies.

Xu Kangfu, Hao Jiming (Research Institute of Environmental Engineering, Tsinghua University, Beijing): *Chin. J. Environ. Sci.*, 11(1), 1990, pp.

This article introduces briefly the control strategies for acid precipitation abroad and the main features of acid rain in China. Based on variant effects of the components of airborne particulates and acidity of precipitation, the attention should be paid to sources of SO₂ emission, ascertainment of the main controlling factors and selection of environmental goal. According to the present situation of investigation, the authors have offered a suggestion on methodology and principles of the strategies for controlling acid deposition in China.

Optimum Distribution of Industrial Water in Shenyang City and Analysis of Its Economic Benefit.

Bian Maoxin et al. (Liaoning Provincial Institute of Environmental Protection Sciences, Shenyang); Xu Hongtao (National Environmental Protection Agency, Beijing): *Chin. J. Environ. Sci.*, 11(1), 1990, pp.

This paper describes the principles of linear programming applied in Shenyang City for optimum distribution of industrial water. From the viewpoint of water resources, the direction for adjusting industrial structure of the city is proposed. The authors have studied the calculating method of economic benefit for optimizing industrial water distribution. The results show environmental economic benefit is obvious according to calculation.

System Design of A Regional Environmental Management Information System—Software and Hardware Environment and Main Menu.

Situ Wei, Chen Shentong et al., (Department of Environmental Engineering, Tsinghua University, Beijing): *Chin. J. Environ. Sci.*, 11(1), 1990, pp.

This article outlines the principles and procedures of the system design of a Regional Environmental Management Information System (REMIS), in which modular design method has been used. The REMIS hardwares selection, software environment hierarchical relations of the functional modules and main menu of the REMIS have been discussed in detail. Hardware selection should reach identity of system functions, cost/benefit analysis and expansibility.

Current Environmental Situation of the Liaodong Peninsula (Dalian Area) and Its Integrated Renovation.

Chen Tao et al. (Institute of Applied Ecology, Academia Sinica, Shenyang): *Chin. J. Environ. Sci.*, 11(1), 1990, pp.

The ecological environment of Dalian area in the Liaodong Peninsula, as a whole, is getting deteriorated. Three main countermeasures should be taken to harness these environmental problems: (1) rational utilization of natural resources for controlling water pollution and soil erosion; (2) readjustment of distribution of industrial trades and removal of major industrial construction northward; (3) Development of agricultural economy, speeding up agro-ecological construction so as to avoid soil erosion.

Research on Natural Radionuclide Levels in Soil in Fujian Province, Southeast China.

Gao Weiwei et al. (Provincial Institute of Environmental Protection Science, Fuzhou): *Chin. J. Environ. Sci.*, 11(1), 1990, pp.

This paper reports the natural radionuclide levels in soil in Fujian Province. 248 soil samples were collected and tested by using spectrometric and radiochemical analysis method. The results showed that average concentration for U-238 was 55.5 Bq/kg (13.9—136 Bq/kg), Th-232 97.1 Bq/kg (19.5—260 Bq/kg), Ra-226 62 Bq/kg (18—201 Bq/kg) and K-40 627 Bq/kg 24—1627 Bq/kg), and that natural radionuclide contents were different with topographical features, land forms and soil types, which were higher than those in the normal areas home and abroad.

(continued on page 92)