

应用动态模型确定酸沉降临界负荷的探讨

叶雪梅, 郝吉明, 段雷, 周中平 (清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 任何一个天然生态系统都是一个稳定系统. 在一定酸沉降量的作用下, 生态系统最终会平衡在一个新的稳定状态. 动态模型可以模拟不同酸沉降量下生态系统化学状态的变化趋势. 根据信号与系统理论, 这种趋势可以用一阶指数衰减函数进行模拟, 以得到系统达到稳定状态时的化学指标值. 根据不同酸沉降量和所对应的稳态化学指标值之间的剂量-响应曲线, 可以求出当系统稳态化学指标值达到临界化学值时的酸沉降量, 即为系统的酸沉降临界负荷. 应用这种方法, 以 MAGIC 模型为例, 计算了四川峨眉山顶水和重庆南山湖泊的硫沉降临界负荷, 分别为 1.54 和 $6.51 \text{ keq} \cdot (\text{h m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. 通过和 MAGIC 计算的目标负荷及 SS WC 方法计算的临界负荷相比较, 认为用本文介绍的方法所计算的临界负荷值是合理可信的.

关键词: 临界负荷; 动态模型; 稳定状态; 剂量-响应曲线

中图分类号: X157 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2002)04-06-0018

Calculating Critical Load of Acid Deposition with Dynamic Model

Ye Xue mei, Hao Jiming, Duan Lei, Zhou Zhongping (Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Any natural ecosystem is a steady system which will ultimately approach a new steady state when it receives a fixed quantity of acid deposition. Dynamic models can be used to predict the changing potential of the chemical state of an ecosystem under different acid depositions. According to the theory of signal and system, this potential can be modeled by the first-order exponential attenuation function to get the value of chemical index when the ecosystem achieves steady state. A dose-response curve can be obtained according to the different quantity of acid deposition and the corresponding steady-state values of chemical index. Consequently, the critical load for an ecosystem can be evaluated from the dose-response curve, i.e., the quantity of acid deposition under which the steady-state value of the chemical index will achieve the critical chemical value. Taking MAGIC as an example, this method was applied to estimate critical loads of S deposition for a water body on Emei Mountain in Sichuan province and a lake on Nanshan Mountain in Chongqing city, the values being 1.54 and $6.51 \text{ keq} \cdot (\text{h m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, respectively. Through comparing the critical loads calculated using the method proposed in this paper with the target loads calculated with MAGIC and the critical loads estimated using SS WC method, it can be concluded that the method proposed in this paper are reasonable in estimating critical loads of acid deposition.

Key words: critical load; dynamic model; steady state; dose-response curve

酸沉降临界负荷是制定酸沉降控制策略以保护生态系统免受酸化危害的重要科学依据, 其概念在欧洲和北美得到了广泛的应用. 我国在 90 年代初期把酸沉降临界负荷的概念引入到我国的 SO_2 排放控制方案决策中^[1-3]. 估算酸沉降临界负荷的方法主要依赖基于土壤风化速率的半定量方法和基于质量平衡的稳态法. 动态法也可用于酸沉降临界负荷的计算, 而且由于它考虑了生态系统中和时间有关的过程, 因此更能反映系统酸化和恢复的实际情况. 虽然国内外都有人应用动态模型计算过生态系统

的酸沉降临界负荷^[1-2,4], 但是用这些方法估算的酸沉降临界负荷和临界负荷的定义及实质有着较大的出入, 值得进一步探讨. 本文探讨了一种基于信号系统理论和剂量-响应关系的估算酸沉降临界负荷的方法, 并以 MAGIC 模型为例, 应用此方法计算了四川峨眉山顶水和重庆南山湖泊的硫沉降临界负荷.

基金项目: 国家自然科学基金项目(59678016)

作者简介: 叶雪梅(1974~), 女, 浙江人, 博士研究生, 从事酸沉降污染与控制方面的研究.

收稿日期: 2001-07-20; 修订日期: 2001-10-27

1 临界负荷和临界化学值

1.1 临界负荷的概念

酸沉降临界负荷是指不致使生态系统发生长期有害影响的最高酸沉降负荷,其概念是基于酸沉降量与生态系统受到影响的关系,即剂量-响应关系,如图 1 所示.当理论上的剂量-响应曲线可观察到对生态系统不利的影响时,便显示出一个域值,这个域值就是酸沉降临界负荷.

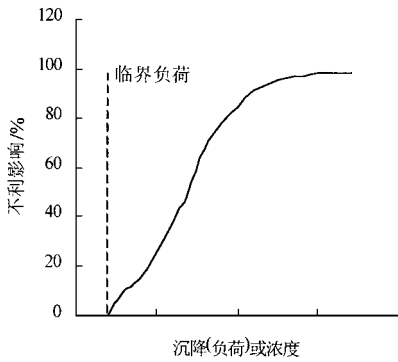


图 1 酸沉降量与生态系统受到影响的关系

Fig.1 The relationship between acid deposition and the response of ecosystem

从定义上来看,临界负荷是一个给定生态系统的内在属性,和时间无关.因此,临界负荷的计算总是隐含着稳定状态,即临界负荷是以系统达到稳定状态时的响应为基础进行计算的.

1.2 临界化学值

临界负荷根据生态系统对酸化最敏感的生物对酸沉降的响应而定,而这种响应通常用含有保护目标生物的一个或一组化学指标来表示.对这些化学指标确定一个界限,这是一个由于酸沉降到生态系统中产生的影响所不能超过的界限,称为临界化学值.使生态系统的影响达到该界限时的酸沉降量即为临界负荷.因此,临界化学值是计算临界负荷时所必须确定的参数.任一个临界负荷都是对应于一定临界化学值的酸沉降量.

在地表水酸沉降临界负荷研究中通常选择鱼类作为指示生物,并应用酸中和容量(ANC)

来衡量水体酸化对鱼类生存状态的影响.不同国家对临界 ANC 的取值并不相同,取决于不同国家的水生生物对酸化的敏感性,如英国、挪威和芬兰曾分别采用 $ANC_{limit} = 0, 20 \mu eq \cdot L^{-1}$ 和 $50 \mu eq \cdot L^{-1}$ 作为各自计算地表水酸沉降临界负荷的临界化学值^[5].

我国到目前为止还未见有关地表水 ANC 值和鱼类存活状态关系的报道.但有研究表明,我国鱼类对酸化的敏感性高于欧洲的鲑鳟鱼类^[6],而且国外研究也指出,当水体临界 ANC 上升到 $50 \mu eq \cdot L^{-1}$ 时就可以保护水生生物免受酸化的危害^[5].基于上述分析,本文选取 $ANC_{limit} = 50 \mu eq \cdot L^{-1}$ 作为计算水体酸沉降临界负荷的临界化学值.

2 动态模型计算临界负荷的方法

2.1 已有方法评价

到目前为止,应用动态模型计算临界负荷的方法有 2 种.第一种方法较普遍,它计算在一定时间范围内,系统化学状态达到临界化学值时的最高酸沉降量,认为该酸沉降量等于酸沉降临界负荷.但严格地说,用这种方法计算出来的并不是生态系统的酸沉降临界负荷,因为它和时间有关,它是在一定时间内为了达到一定的环境目标而必须达到的酸沉降量,因此应该为系统的酸沉降“目标负荷”.临界负荷是生态系统的内在属性,和时间无关.

第二种方法计算不同酸沉降方案下生态系统化学状态的变化趋势,以系统化学状态停止衰退,开始恢复时的酸沉降量作为系统的酸沉降临界负荷.这种方法存在很大的问题.首先,系统状态不再继续恶化并且开始恢复并不代表系统已经达到稳定状态;再者,该方法没有定义一个临界化学值,它所确定的临界负荷并不是对应于一个临界化学值的酸沉降量,因此并不能代表生态系统真正的酸沉降临界负荷.

2.2 基于信号系统与剂量-响应关系的方法

如前所述,临界负荷的概念是基于剂量-响应关系的,也就是说,根据生态系统对不同量的酸沉降的响应情况可以求出临界负荷.但是,响应必须是稳态响应,才能排除时间因素.因此,

求出系统在酸沉降作用下的稳态化学指标值是方法的关键.可以应用多种方法获得稳态指标值,下面介绍应用信号系统理论估算稳态指标值的方法.

任何一个天然生态系统都是一个稳定的系统,当该系统受到一个外部恒定剂量的信号作用时,在系统内部会相应地发生许多生物地球化学反应以抵消这个外部作用对系统状态的影响,直至系统达到一个新的稳定状态.也就是说,如果把系统中某状态的变化作为对外部剂量的响应,那么这种响应是收敛的,并逐渐趋于一个稳定值.从信号与系统的角度来看,恒定外部剂量(这里指一定的酸沉降量)可以看作对系统的一个阶跃信号激励 $x(t)$,而系统的状态(这里指水体 ANC)变化可以看作该系统在 $x(t)$ 作用下的响应 $y(t)$.根据信号与系统理论,在阶跃信号 $x(t)$ 作用下,对一阶稳定系统(这里,把自然生态系统看成一阶稳定系统是合理的),其响应 $y(t)$ 可以表示成一个一阶指数衰减函数:

$$y(t) = y_0 + A_1 e^{-(t-t_0)/a} \tag{1}$$

其中, y_0 、 A_1 、 t_0 和 a 均是常数.这意味着系统最终将达到一个稳定平衡状态,并能通过求解方程(1)的极限值得到稳定状态值.

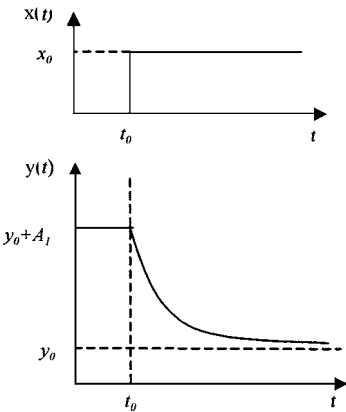


图 2 阶跃信号下的系统响应

Fig. 2 The ecosystem response to the step jump signal

因此,应用动态模型计算临界负荷的步骤是:假设若干种酸沉降方案,在每一种沉降方案下运行模型,计算出系统状态随时间的变化,用

一阶指数衰减函数模拟它们的变化趋势,得到化学指标稳态值.作不同酸沉降量和系统化学指标稳态值的相关曲线,即剂量-响应曲线,从图中求出化学指标值达到临界化学值时的酸沉降量,即为酸沉降临界负荷.

3 计算举例

3.1 模型参数及校验

以在国内外地表水酸化研究中得到广泛应用的 MAGIC 模型^[7]为例,选取四川峨眉山顶水和重庆南山湖泊 2 个水体,应用上述方法计算它们的硫沉降临界负荷.峨眉山顶水的酸中和容量为 $201 \mu\text{eq} \cdot \text{L}^{-1}$,为对酸化比较敏感的高山水体,而重庆南山湖泊的酸中和容量为 $856 \mu\text{eq} \cdot \text{L}^{-1}$,对酸化不敏感^[8].

MAGIC 模型的运行需要降水、土壤和地表水物理化学参数.计算中各土壤的物理化学性质参数来源于调研和实测 2 种途径.对难以直接获得的参数,如土壤矿物风化速率和盐基阳离子交换选择性系数等,通过模型校验过程得到.地表水化学和降水化学数据来源于公开发表的文献资料,其中降水背景数据采用云南丽江内陆点(该测点是全球唯一的内陆降水背景点)的实测数据的平均值,见表 1.

模型校验以还未出现工业的 1920 年为起点,假设那时地表水化学处于稳定状态.参照年取为 1988 年,以和地表水参数的年份相一致.硫沉降的历史变化情况假设和我国能源增长及消费的趋势相同.用 Monte-Carlo 法对以上参数进行校验,得到具有区域代表性的土壤参数.表 2 为模型校验过程得到的参照年地表水化学和实测值的比较.由表中可以看出,用以上参数模拟出来的地表水化学值和实测值符合得很好,这说明可以用这些参数进行地表水化学的预测计算.

3.2 硫沉降临界负荷的计算

为计算上述 2 个地表水体的硫沉降临界负荷,必须假设若干种硫沉降方案.本文共设计了 7 种方案,分别假设硫沉降在 1988 年的基础上阶跃增加 80%、50%、35%、20%、5%及削减 40%和 85%,然后一直保持不变.在计算过程

表 1 2 个集水区的 MAGIC 模型输入参数^[6,8,9] / meq·m⁻³

Table 1 Parameters of precipitation chemical and surface water chemical for the two catchments				
参数	峨眉山顶水	南山湖泊	背景值	
降水化学参数	降雨量/ m m	1800	1200	
	Ca ²⁺	30	125	4.4
	Mg ²⁺	4	18	0.8
	Na ⁺	14	13	1.0
	K ⁺	12	15	1.3
	NH ₄ ⁺	33	136	5.7
	SO ₄ ²⁻	36	228	8.0
	Cl ⁻	17	19	3.7
	NO ₃ ⁻	5	26	1.9
地表水参数	径流量/ m m	1000	600	
	pH	6.53	6.79	
	Ca ²⁺	281	1450	
	Mg ²⁺	76	364	
	Na ⁺	33	205	
	K ⁺	36	118	
	SO ₄ ²⁻	150	979	
	Cl ⁻	63	216	
	NO ₃ ⁻	12	86	
土壤参数	深度/ m	1.00	1.00	
	容重/ kg• m ⁻³	1200	1300	
	CEC/ meq• kg ⁻¹	130	120	
	ECa/ %	10	15	
	EMg/ %	8	10	
	ENa/ %	2	8	
	EK/ %	2	4	

中,假设其它离子沉降保持在 1988 年水平.预测年限为 140 年.

图 3 和图 4 分别为在上述 7 种硫沉降方案下,四川峨眉山顶水和重庆南山湖泊的 ANC 随时间变化的情况.从图中可以看出,随着硫沉降量的增大,水体 ANC 值呈逐年下降的趋势,而且硫沉降量越大,ANC 降低的速度也越快.对上述 2 个水体,在硫沉降量相对于 1988 年削减 85 %左右时,地表水 ANC 开始呈逐渐上升的趋势,表明系统开始恢复,但并不能认为此时的硫

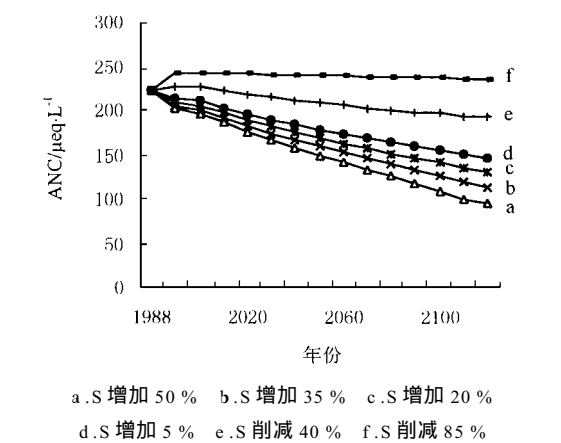


图 3 峨眉山顶水 ANC 在不同 S 沉降方案下的变化趋势
Fig.3 The changing trend of ANC for the water on Emei Mountain under different S deposition scenarios

表 2 峨眉山顶水体化学参照年模型模拟值和实测值的比较 / μeq·L⁻¹

Table 2 Comparison of water chemistry modeled by MAGIC with those measured for water body on Emei mountain								
项目	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	ANC
模拟值	277.92	75.07	31.98	35.04	140	63.24	0.00	216.76
实测值	281	76	33	36	150	63	12	201
差值	- 3.08	- 0.93	- 1.02	- 0.96	- 10	0.24	- 12	15.76

沉降量就是系统的硫沉降临界负荷,因为此时地表水 ANC 值分别达到约 250 和 1000μeq·L⁻¹,已远远超过了临界化学值(50μeq·L⁻¹).地表水硫沉降临界负荷通过在上述硫沉降方案下,比较地表水达到稳定状态时的 ANC 值和临界化学值来确定.由于模型的预测年限仅为 140 年,此时系统还未达到最终稳定,因此根据系统状态对阶跃酸沉降输入的负指数响应关系,用一阶指数衰减函数对酸化趋势曲线进行

长期拟合,以得到最终稳态 ANC 值.图 5 为用一阶指数衰减函数对上述 2 个水体的 ANC 模型预测值进行长期拟合的结果.可以看出,函数拟合值和模型计算值符合得非常好,这说明用该函数对 ANC 长期变化趋势进行预测以获得长期稳态值无论在理论上还是实际上都是可行的.依照此方法,图 6 作出了不同硫沉降削减率和水体稳态 ANC 值之间的剂量-响应关系.由图可见,水体稳态 ANC 随着硫沉降削减率的增

大而增大,而且其趋势线是连续光滑的曲线,这符合稳定系统在受到阶跃信号影响时所表现出来的特性.因此,根据图 6 的剂量-响应关系图就可以求出当水体稳态 ANC 值达到临界化学值时所对应的硫沉降削减率,结合参照年的总硫沉降量,就可以估算出硫沉降临界负荷值.

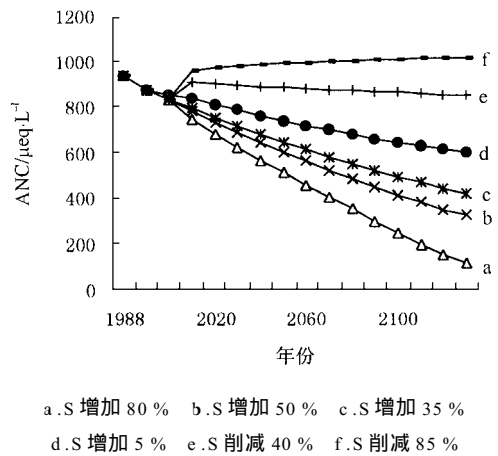


图 4 南山湖泊 ANC 在不同 S 沉降方案下的变化趋势
Fig.4 The changing trend of ANC for Nanshan lake under different S deposition scenarios

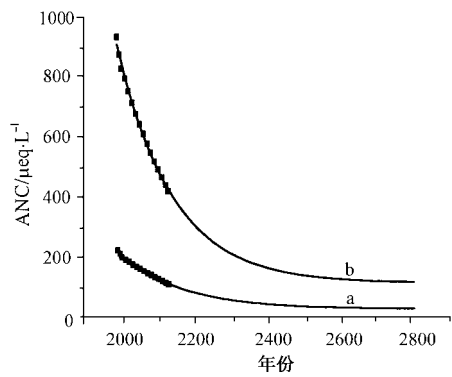


图 5 用一阶指数衰减函数模拟的地表水酸化趋势和模型预测值的比较 (黑点表示计算值, 曲线表示函数模拟值)
Fig.5 Comparison of the acidification trend modeled by the first-order exponential attenuation function with the trend predicted by MAGIC (black dots and the curve denote MAGIC calculated values and FEAF modeled values, respectively)

从图 6 可以清楚地看出,对峨眉山顶水和重庆南山湖泊,当硫沉降量分别在 1988 年基础上增加 26 %和 40 %时,地表水稳态 ANC 达到

$50\mu\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$ 的水平.这表明只要硫沉降量的增长幅度保持在上述范围内就可以使水体稳态 ANC 值高于 $50\mu\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$,能保证水生生物不受酸化的影响.但是如果硫沉降量在此基础上进一步增加的话,那么 ANC 就要降到 $50\mu\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,就会对水生生物的生存造成有害影响.峨眉山顶和重庆南山 1988 年的总硫沉降量分别为 1.22 和 $4.65\text{ keq}(\text{h m}^2\cdot\text{a})^{-1}$,由此可以计算出这 2 个水体的硫沉降临界负荷分别为 1.54 和 $6.51\text{ keq}(\text{h m}^2\cdot\text{a})^{-1}$,按 S 计即 2.46 和 $10.42\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$.

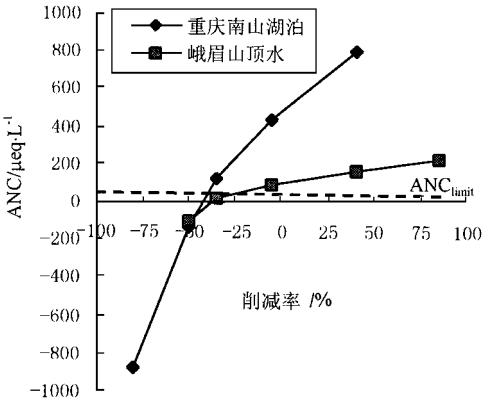


图 6 硫沉降量削减率和地表水稳态 ANC 值之间的剂量-响应关系

Fig.6 The dose-response relationship between the abatement ratio of S deposition and steady state ANC of the surface waters

应用 MAGIC 模型也可以计算酸沉降目标负荷.表 3 比较了应用 MAGIC 模型计算的上述 2 个地表水体的硫沉降临界负荷和目标负荷.可以看出,模型计算的硫沉降目标负荷大于临界负荷,这是因为只有在较高的硫沉降量作用下,地表水 ANC 才能在一定时间内达到所规

表 3 3 种方法计算的临界负荷的比较/ $\text{keq}\cdot(\text{h m}^2\cdot\text{a})^{-1}$
Table 3 Comparisons between critical loads, target loads calculated by MAGIC and critical loads calculated by SS WC

水体名称	MAGIC 临界负荷	MAGIC 目标负荷	SS WC 临界负荷
峨眉山顶水	1.54	2.28	3.09
南山湖泊	6.51	8.76	8.66

定的临界化学值,而在此硫沉降量下,水体稳态 ANC 值要低于临界化学值.如果认为这样计算出来的硫沉降量即为临界负荷的话,那它就越比系统真正的临界负荷要大,从控制的角度来说,是较为不利的.表 3 还比较了用 MAGIC 计算的临界负荷和用稳态水化学方法(SSWC)^[10]计算的临界负荷,发现后者也高于前者,这是因为:①SSWC 方法假设系统目前处于稳定状态,而系统实际上并不一定是稳态的;②用该方法计算的临界负荷与水体中盐基阳离子的浓度呈正相关,而我国地表水中盐基阳离子的浓度通常很高;③该方法认为临界负荷正比于径流量,而这一点是有所争议的.上述原因导致 SSWC 方法计算的硫沉降临界负荷大于 MAGIC 计算的临界负荷,尤其对于径流量较大的峨眉山顶集水区来说,这种差异更加明显.

由以上分析可知,用本文所介绍的在动态模拟的基础上,基于信号系统理论和剂量-响应关系来估算生态系统的酸沉降临界负荷是可行的.但同其它任何方法一样,用该方法计算的临界负荷的准确性强烈地依赖于输入参数的准确性,而对动态模型来说,输入参数的需求量较大且不易获得是限制它们广泛应用的因素,因此为了能在较大范围内推广应用本文介绍的方法,必须通过多种途径拓宽数据的来源,并进一步提高数据的准确性.

4 结 论

(1) 酸沉降临界负荷是系统内在的属性,它的计算总是隐含着稳定状态.任一个临界负荷都是对应于一定临界化学值的酸沉降量.

(2) 任何一个天然生态系统都是一个稳定的系统.在一个固定的酸沉降量的作用下,系统最终会平衡在一个新的稳定状态.只要获得不同酸沉降量对系统稳定化学状态的剂量-响应曲线,就能估算出当系统稳态化学指标值达到临界化学值时所对应的酸沉降量,即为系统的

酸沉降临界负荷.

(3) 动态模型可以模拟在一定酸沉降量下,生态系统化学状态随时间的变化趋势.由于生态系统是稳定系统,基于信号系统理论,酸化发展趋势可以用一阶指数衰减函数来模拟,从而求得稳定状态时的化学指标值.

(4) 应用 MAGIC 模型和本文介绍的方法,计算出了四川峨眉山顶水和重庆南山湖泊的硫沉降临界负荷分别为 1.54 和 6.51 $\text{keq}(\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$.通过和 MAGIC 计算的硫沉降目标负荷和 SSWC 方法计算的临界负荷的比较,认为用本文介绍的方法计算的临界负荷是合理可信的.因此这是一种值得推广的方法.

参考文献:

- 1 谢绍东,郝吉明,周中平.柳州地区酸沉降临界负荷的确定.环境科学,1996,17(5):1~4.
- 2 赵殿五,张晓山,熊际翎.应用 MAGIC 模式确定酸沉降临界负荷.中国环境科学,1992,12(2):93~97.
- 3 刘炳江,郝吉明,贺克斌等.中国酸雨和二氧化硫污染控制区划及实施政策研究.中国环境科学,1998,18(1):1~7.
- 4 Jenkins A, Renshaw M, Helliwell R et al. Modeling surface water acidification in the UK — application of the MAGIC model to the acid waters monitoring network report No. 131. the Institute of Hydrology, UK, 1997.
- 5 Jenkins A, Posch M, Hultberg H et al. Critical loads of acidity for surface waters — Can the $\text{ANC}_{\text{limit}}$ be considered variable? Water, Air and Soil Pollution, 1995, 85:2419~2424.
- 6 冯宗炜主编.酸雨对生态系统的影响——西南地区酸雨研究.北京:中国科学技术出版社,1993.142~177.
- 7 Cosby B J, Wright R F, Hornberger G M et al. Modeling the effects of acid deposition: estimation of long-term water quality responses in a small forested catchment. Water Resources Research, 1985, 21(11):1591~1601.
- 8 Xue H B, Schnoor J L. Acid Deposition and Lake Chemistry in Southwest China. Water, Air and Soil Pollution, 1994, 75:61~78.
- 9 四川省农牧厅,四川省土壤普查办公室.四川土壤.成都:四川省科学技术出版社,1995.
- 10 谢绍东,郝吉明,周中平,尹寒卉.酸化模型及其在确定酸沉降临界负荷中的应用.环境科学,1996,17(1):80~84.