

# 用稳态法确定中国土壤的硫沉降和氮沉降临界负荷

段雷<sup>1</sup>, 郝吉明<sup>1</sup>, 谢绍东<sup>2</sup>, 周中平<sup>1</sup> (1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084, E-mail: lduan@tsinghua.edu.cn; 2. 北京大学环境科学中心, 北京 100871)

**摘要:**在地理信息系统支持下,用稳态法确定了中国土壤的硫沉降临界负荷和氮沉降临界负荷.中国硫沉降临界负荷最小[ $< 0.3 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ]的地区主要分布在东北的大兴安岭、小兴安岭和长白山,青藏高原南部雅鲁藏布江河谷以及云南西南部怒江和澜沧江流域,而酸沉降污染较为严重的富铝土区域,总体上都能够承受  $0.8 \sim 3.2 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$  的酸沉降.根据硫沉降临界负荷可以将中国大致划分为东南和西北 2 部分,东南部大部分地区只能接受小于  $3.2 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$  的硫沉降,而西北部普遍可以接受大于  $3.2 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$  的硫沉降,其分界线基本上与 400 mm 等降水量线重合.与硫沉降临界负荷的分布不同,中国氮沉降临界负荷在总体上呈现自西向东逐渐增加的格局,中国氮沉降临界负荷最低[ $< 1.0 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ]的地区分布青藏高原西部和阿拉善高原,而氮沉降临界负荷最高[ $> 4.0 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ]的地区则包括东北平原、华北平原、长江中下游平原以及四川盆地等.

**关键词:**临界负荷;土壤;硫沉降;氮沉降;稳态法

中图分类号:X517 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2002)02-06-0007

## Estimating Critical Loads of Sulfur and Nitrogen for Chinese Soils by Steady State Method

Duan Lei<sup>1</sup>, Hao Jiming<sup>1</sup>, Xie Shaodong<sup>2</sup>, Zhou Zhongping<sup>1</sup> (1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, E-mail: lduan@tsinghua.edu.cn 2. Center of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871)

**Abstract:** Supported by the geographical information system (GIS), critical loads of sulfur and nitrogen of Chinese soils were estimated through the steady state method. Results showed that the lowest critical loads of sulfur [ $< 0.3 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ] occurred on the Daxingan Mountain, Xiaoxingan Mountain and Changbai Mountain in northeast China, the valley of the Yaluzangbu River on the south of the Tibetan Plateau, and the catchments of the Nu River and the Lancang River in the southwest of Yunan province. However, the critical loads of southeast China, where acid deposition was very high, were intermediate and in the range of  $0.8 \sim 3.2 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ . According to the critical loads of sulfur, China might be divide into two parts approximately by the 400 mm isohyet: the northwest part could generally tolerate more than  $3.2 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$  sulfur deposition, but the southeast one could not. Unlike the distribution of the critical loads of sulfur, the critical loads of nitrogen were low in the west China and high in the east. The lowest critical loads of nitrogen [ $< 1.0 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ] occurred on the west of the Tibetan Plateau and on the Alashan Plateau, and the highest [ $> 4.0 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ] on the Dongbei Plain, the Huabei Plain, the Changjiangzhongxiayou Plain, and the Sichuan Basin, etc.

**Key words:** critical loads; soil; sulfur deposition; nitrogen deposition; steady state method

临界负荷作为国际公认的进行有关酸沉降控制决策的科学手段<sup>[1]</sup>,近年来在中国也逐渐得到应用<sup>[2]</sup>.谢绍东等<sup>[3]</sup>利用改进的半定量方法确定了中国土壤的酸沉降临界负荷,成为中国划分酸雨控制区的最重要依据之一.由于半定量方法本身比较粗糙,因此该结果存在较大的不确定性,需要进一步用稳态法加以完善.尽管早在“八五”期间,谢绍东等<sup>[4]</sup>就利用稳态法对土壤的酸沉降临界负荷进行了研究,但由于

数据有限,该研究只局限于典型地区,而进行全国范围的研究尚属首次.

### 1 土壤临界负荷的计算公式

根据文献<sup>[1,5,6]</sup>以及其它相关资料<sup>1)</sup>,改进

1) Posch M, de Smet P A M, Hettelingh J P et al. (eds.). Calculation and Mapping of Critical Loads Thresholds in Europe. Coordination Center for Effects, Technical Report, 1995, 31 ~ 38. 基金项目:国家自然科学基金项目(50078027)

作者简介:段雷(1972~),男,博士,讲师,主要研究方向为大气污染控制.

收稿日期:2001-01-16;修订日期:2001-05-05

后的土壤硫沉降临界负荷、酸化氮临界负荷和营养氮临界负荷的计算公式分别为:

$$CL_{Max}(S) = BC_d + BC_w - BC_u - ALK_{le(crit)} \quad (1)$$

$$CL_{Max}(N) = N_i + N_u + CL_{Max}(S) / (1 - f_{de}) \quad (2)$$

$$CL_{nut}(N) = N_i + N_u + N_{le(crit)} / (1 - f_{de}) \quad (3)$$

其中,下标  $d, w, u$  和  $i$  分别表示大气沉降、土壤风化、植被吸收和土壤矿化,  $AC, S, N$  和  $BC$  分别表示酸度、硫、氮和盐基阳离子( $BC = Ca + Mg + K + Na$ ) 通量,  $f_{de}$  是反硝化率,  $N_{le, crit}$  是可以允许的最大氮淋溶速率(临界氮淋溶)。另外,  $ANC_{le(crit)}$  表示临界碱度淋溶, 由下式计算:

$$ANC_{le(crit)} = 1.5 \frac{BC_{dep} + BC_w - BC_u}{(BC/Al)_{crit}} + Q^{\frac{2}{3}} \left[ 1.5 \frac{BC_{dep} + BC_w - BC_u}{(BC/Al)_{crit} \cdot K_{gibb}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

其中,  $Q$  表示径流量,  $K_{gibb}$  是水铝矿平衡常数,  $BC = Ca + Mg + K, (BC/Al)_{crit}$  是临界化学值。氮沉降临界负荷是酸化氮临界负荷和营养氮临界负荷两者的较小值。

## 2 参数确定

利用稳态法确定中国土壤酸沉降临界负荷的关键是获取有关的输入参数。除了土壤的风化速率和植被对氮和盐基阳离子吸收速率之外, 所需参数还包括地表径流深度、盐基阳离子沉降、水铝矿平衡常数、氮的固定速率和反硝化率以及临界化学值等。

### 2.1 土壤参数

土壤的风化速率是确定土壤酸沉降临界负荷的最关键的参数。根据文献[7]有关结果可初步得到中国各种土壤类型的风化速率。由于数据缺乏, 上述结果都建立在典型研究的基础之上, 无法反映同种土壤风化速率的地理分布。事实上, 由于某些土壤类型分布范围较广, 自然条件的差异, 特别是温度的差异使得风化速率存在显著差异。在确定酸沉降临界负荷时, 这种差异是不能忽略的。因此, 本研究用温度对风化速率进行校正

$$BC_w(T) = BC_w(T_0) \cdot e^{(A/T_0 - A/T)} \quad (5)$$

其中  $BC_w(T)$  是实际温度  $T$  (热力学温度, K) 下的风化速率, 而  $BC_w(T_0)$  是参考温度  $T_0$  (K) 下

的风化速率,  $A$  是指前因子, 通常取  $3600 K^{[8]}$ 。

除了风化速率之外, 土壤参数还包括水铝矿平衡常数和反硝化率, 它们分别根据土壤的有机物含量和土壤质地加以估算。不同有机质含量下土壤的  $K_{gibb}$  值如表 1 所示, 而  $f_{DE}$  同土壤类型的关系如下: 对不含潜育特征的黄土和沙土,  $f_{DE} = 0.$ ; 对含潜育特征的沙土,  $f_{DE} = 0.5$ ; 对粘土,  $f_{DE} = 0.7$ ; 对泥炭土,  $f_{DE} = 0.8^{[2]}$ 。中国土壤的有机质含量和质地可以从全国第二次土壤普查资料或其它文献<sup>[9]</sup>中获得。

表 1 不同有机质含量下土壤的  $K_{gibb}$  值<sup>[2]</sup>

有机质 / %	土壤类型	- p $K_{gibb}$	$K_{gibb} / m^6 \cdot eq^{-2}$
70 ~ 100	泥炭土、泥炭状土、有机土壤、有机土层	6.5	9.6
10 ~ 30	含有机质的土壤、A/E 层	7.6	100
5 ~ 15	低有机质土壤、B/C 层	8 ~ 9	300 ~ 3000
0 ~ 5	矿物质土壤、C 层	8.5 ~ 9.5	950 ~ 9500

### 2.2 植被参数

植被对盐基阳离子和氮的吸收速率是确定酸沉降临界负荷的重要参数。另一个重要的植被参数是临界化学值, 它包括盐基阳离子与铝离子的临界浓度比  $(BC/Al)_{crit}$  和临界氮淋溶速率  $N_{L, crit}$ 。对于一个生态系统来说, 当考虑确定酸沉降临界负荷的需要而选择指示生物时, 必须意识到它包含了敏感性不同的多种生物, 选择具有代表性的指示生物并能满足数据的可获得性和计算的需要是十分关键的。在实际选择指示生物时, 不一定选择对酸沉降最敏感的物种, 因为最敏感的物种通常是一些次要的物种, 即使受到一定的损害也不会对生态系统的结构和功能产生显著的影响, 但是用它确定的临界负荷却往往很低, 在实际控制决策中很难达到, 所花费的代价也太大。因此, 在欧洲临界负荷区划时,  $(BC/Al)_{crit}$  被统一设定为  $1.0^{[10]}$ , 这相当于针叶树的临界化学值, 尽管有研究表明一些地衣或真菌对酸沉降的敏感性更高<sup>[12]</sup>。本研究也同样避免采用最敏感物种作为生态系统的指

2) Task force on mapping. Mapping Critical Levels/ Loads. UN/ECE Convention on Long range Transboundary Air Pollution, Federal Environmental Agency (Umweltbundesamt), Texte 71/96, Berlin, German, 1996, 83 ~ 99.

示生物,而是在优势植物中选取最敏感的物种.在现有资料<sup>3)</sup>的基础上,得到我国各种植被类型的临界化学值,如表 2 所示.

表 2 中国植被的临界化学值

Table 2 Chemical criteria for vegetation in China

植被类型	典型指示生物	(BC/Al) <sub>crit</sub>
寒温带 温带针叶林	落叶松 赤松 冷杉 云杉	1.0
温带针阔混交林	红松 椴 鹅耳枥	1.5
亚热带 热带针叶林	马尾松 华山松 杉木	2.0
温带落叶阔叶林	栎 槭	0.6
亚热带 热带常绿阔叶林	水青冈 木荷 栲	1.0
热带雨林	樟 茶 棕榈	0.6
温带灌丛 矮林	柳 香椿 国槐	2.0
亚热带 热带灌丛 矮林	桉 洋槐 酸橙	2.0
温带荒漠 草原 草甸	针茅 早熟禾	10.0
高寒荒漠 草原 草甸	剪股颖 越橘 毛茛	2.0
农田	稻 小麦 玉米 高粱	10.0

为了计算营养氮的临界负荷,还必须确定临界氮淋溶速率和土壤中氮的矿化速率.根据国外的研究结果<sup>2)</sup>,温带灌丛和沼泽的临界氮淋溶速率为  $\text{N}0 \sim 0.5 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ,针叶林为  $\text{N}0.5 \sim 1.0 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ,人工针叶林为  $\text{N}1 \sim 3 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ,温带阔叶林为  $\text{N}2 \sim 4 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ,温带草原为  $\text{N}1 \sim 3 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ .而氮的矿化速率是指氮在土壤中的矿化速率的长期平均值,它的数量级为  $\text{N}2 \sim 5 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ,即  $142 \sim 357 \text{ keq} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ .

### 2.3 沉降参数

盐基阳离子的总沉降是湿沉降与干沉降之和.其中盐基阳离子的湿沉降可根据年降水量与降水的平均离子浓度计算得到

$$\text{BC}_{\text{wd}} = P \cdot [\text{BC}] / 10^5 \quad (6)$$

式中,  $\text{BC}_{\text{wd}}$  是盐基阳离子的湿沉降量 [ $\text{keq} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ],  $P$  是年均降水量 ( $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ),  $[\text{BC}]$  是降水中盐基阳离子的平均浓度 ( $\text{meq} \cdot \text{m}^{-3}$ ), 即降水中  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  和  $\text{Mg}^{2+}$  的平均浓度之和.我国各地区的年降水量可以从中国年降水量图上查得,而各地降水的平均离子浓度则可以从有关资料<sup>4)</sup>中得到.

与湿沉降量不同,盐基阳离子的干沉降量目前较难测定,通常假设它随湿沉降量线性变

化,于是盐基阳离子的总沉降量为:

$$\text{BC}_{\text{d}} = (1 + f_{\text{dd}}) \cdot \text{BC}_{\text{wd}} \quad (7)$$

其中,  $f_{\text{dd}}$  是干沉降因子.由于植被类型对干沉降因子起决定作用,当考虑森林覆盖率对一个地区的总沉降量的影响时,实际的干沉降因子为:

$$f_{\text{dd}} = x_{\text{d}} \cdot f_{\text{d}} + x_{\text{c}} \cdot f_{\text{c}} + x_{\text{o}} \cdot f_{\text{o}} \quad (8)$$

其中  $x_{\text{d}}$ 、 $x_{\text{c}}$  和  $x_{\text{o}}$  分别是针叶林、阔叶林和开阔地(除森林外的其他植被类型)的覆盖率 ( $x_{\text{d}} + x_{\text{c}} + x_{\text{o}} = 1$ ),而  $f_{\text{d}}$ 、 $f_{\text{c}}$  和  $f_{\text{o}}$  分别为针叶林、阔叶林和开阔地的干沉降因子.国内的研究表明,针叶林、阔叶林和开阔地的干沉降因子分别为 1.55、0.75 和 1.87<sup>[4]</sup>.

### 2.4 其它参数

我国各地区的年径流深度可从中国年径流深度图上查得.

## 3 中国土壤硫沉降和氮沉降临界负荷确定

### 3.1 方法

用稳态法确定中国土壤的酸沉降临界负荷,其技术路线如图 1 所示.由于研究范围覆盖全国,并涉及多种土壤类型、植被类型和气候水文条件,因此计算量极大,于是利用地理信息系统(GIS)进行计算.

利用 ARC/INFO 的地图数字化软件,首先对中国土壤图(1:4000000)、中国植被图(1:4000000)、中国年平均气温图(1:14000000)、中国年降水量图(1:14000000)和中国年径流深度图(1:14000000)进行手工数字化.其中中国土壤图区分 46 种主要土壤类型,中国植被图区分 84 种主要植被类型(包括自然植被和栽培植被),中国年平均气温图以  $1^\circ\text{C}$  为间隔划分,而中国年降水量图和中国年径流深度图则以 100 mm (值较小时以 50 mm 或更小) 为间隔划分.如此得到的数字地图均为矢量格式.确定计算临界负荷所需的各种参数,并将所有参数作

3) Sverdrup H, Warfvinge P. Effect of Soil Acidification on Growth of Trees and Plants as Expression by the  $(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K}) / \text{Al}$  Ratio, Report 2:1993, Department of Chemistry Engineering II, Lund University, Lund, Sweden, 1993, 155-159.

4) 王文兴. 我国酸雨时空分布的研究, 国家“八五”科技攻关项目报告(85-912-01-04), 1995, 92-267.

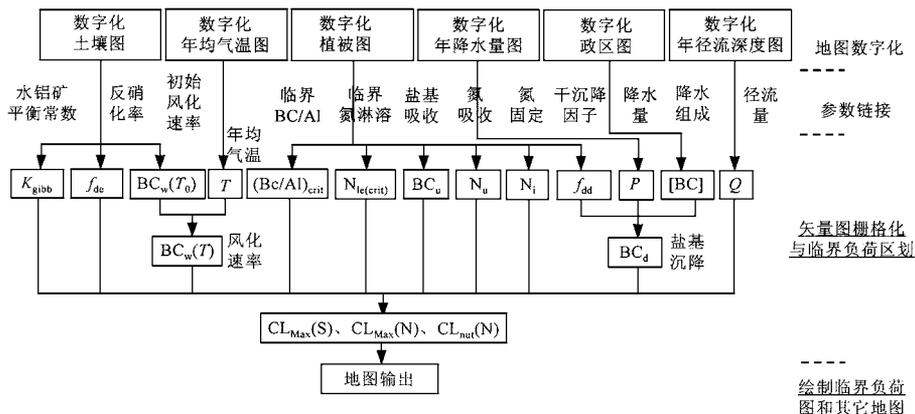


图 1 用稳态法确定中国土壤硫沉降和氮沉降临界负荷的技术路线

Fig. 1 Process of deriving critical loads of sulfur and nitrogen for Chinese soils through the steady state method

为属性数据链接到相应的矢量地图中。

为了完成中国酸沉降临界负荷图,必须对上述地图进行重叠和消除等空间运算,但是矢量数据格式不利于进行这种处理,因此需要将矢量数据格式转化成栅格数据格式。根据中国的版图,确定研究范围为东经 73°至 134°,北纬 18°至 53°;根据研究的精度要求,分辨率取 0.1°(经度) × 0.1°(纬度),该尺度基本满足我国酸沉降控制的需要。在 ARC/INFO 系统的支持下对各矢量图层进行转换,分别产生各参数的栅格图层。这些栅格图层都以 0.1° × 0.1° 的网格为基本单元,按照 ARC/INFO 系统的要求,它们只有唯一的属性数据(即相应的参数)。在数据格式的转换过程中,一个网格可能与多个多边形存在重叠面积,也就是可能对应着多个值,此时该网格通常优先取重叠面积最大的多边形的值(简称面积最大优先)或最小值(称最小值优先),有时也可以取它们的加权平均(以各多边形在网格中占有的面积为权重)。在本研究中,温度、径流量、反硝化率和水铝矿常数等参数采用面积最大优先,临界化学值采用最小值优先,而干沉降因子、风化速率、吸收速率和矿化速率等取面积加权平均。

在各参数土层的基础上,利用 ARC/INFO 系统 GRID 模块的数学计算功能,直接产生了中国土壤酸沉降临界负荷的栅格图层(有关 ARC/INFO 的使用请参照有关的用户手册)。从

该图层上可以直接读出各个地区的临界负荷。

### 3.2 硫沉降临界负荷图

利用稳态法得到中国硫沉降临界负荷,如图 2 所示。从图 2 可以看出,根据硫沉降临界负荷可以粗略地将我国划分为东南和西北 2 部分,其分界线大致与 400 mm 等降水量线重合。我国东南部季风区域以淮河为界又分为南北两部分:南部属高温多雨区,土壤多为不同程度的富铝化土壤,大都呈酸性反应,有明显的铁、铝积累,其天然植被为热带雨林、季雨林和亚热带常绿阔叶林;而北方大都属半湿润至半干旱区,植被主要是阔叶林和针叶-阔叶混交林,土壤多数属于硅铝性土。除了辽东半岛、华北平原和云贵高原西部之外,我国东南部大部分土壤只能接受小于 3.2 g·(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup> 的硫沉降,对硫沉降比较敏感。我国西北部属于干旱区域,在干旱内陆盆地土壤多为不同类型的漠土,逐渐向外伸展为半漠土和干旱草原土壤,如棕钙土、灰钙土和栗钙土等,植被以温带荒漠和温性草原为主,而青藏高原上则分布着特有的多种高山土壤类型,植被包括高寒草甸、高寒草原和高寒荒漠等。我国西北部普遍可以接受大于 3.2 g·(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup> 的硫沉降,对硫沉降很不敏感。

从图 2 还可看出,我国临界负荷最小[ < 0.3 g·(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup> ]的地区主要分布在东北的大兴安岭、小兴安岭和长白山,青藏高原南部雅鲁藏布江河谷,以及云南东南部怒江和澜沧江流

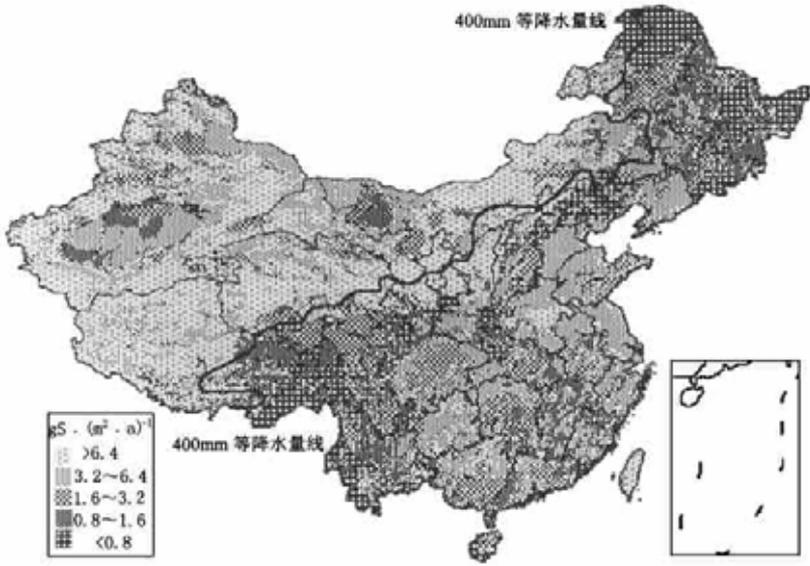


图 2 中国土壤的硫沉降临界负荷图

Fig.2 Critical loads of sulfur deposition for soils in China

域.这些地区共同的特点都是森林覆盖,而且土壤具有较强的酸性.较高的植被吸收速率和极低的土壤风化速率是造成这些地区对酸沉降敏感的主要原因.相对而言,我国酸雨污染较为严重的东南部地区,总的说来都属于对硫沉降中等敏感的土壤[硫沉降临界负荷  $0.8 \sim 3.2 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ].

### 3.3 氮沉降临界负荷图

中国氮沉降临界负荷分布如图 3 所示.与硫沉降临界负荷分布东低西高的总趋势正相反,氮沉降临界负荷在总体上呈现自西向东逐渐增加的格局.从图3可以看出,我国氮沉降临界负荷最低[ $<1.0 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$  ]的生态系统是温带、亚热带高寒草原、温带高寒矮半灌木荒漠

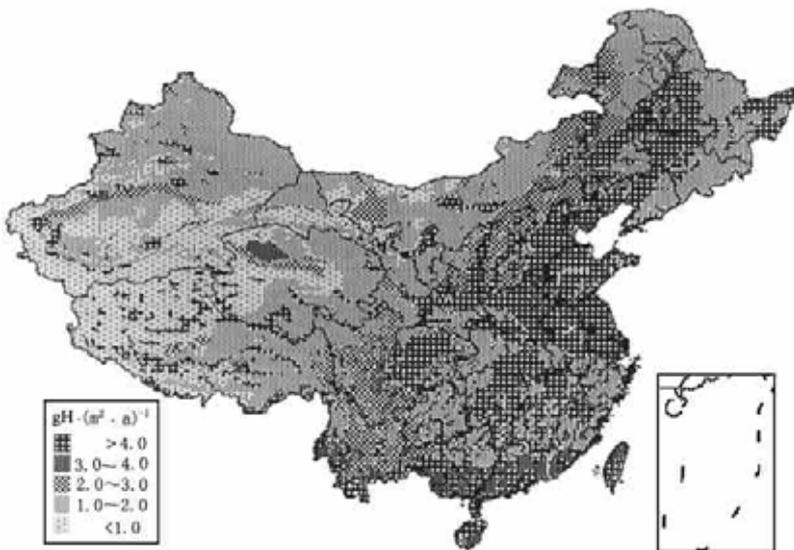


图 3 中国土壤的氮沉降临界负荷图

Fig.3 Critical loads of nitrogen deposition for soils in China

和温带矮半灌木荒漠,它们主要分布在青藏高原西部和阿拉善高原;而氮沉降临界负荷最高 [ $> 4.0 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ] 的生态系统则是各种栽培植被,它们主要分布在我国东部,包括东北平原、华北平原、长江中下游平原以及四川盆地等。此外,我国西部一些无植被地区,如沙漠、戈壁、盐壳、高山山顶碎石和冰川雪被等,由于不存在酸化和富营养化的问题,氮沉降临界负荷也很高(对硫沉降临界负荷来说也一样)。在其它各类生态系统中,针叶林、草原和荒漠的氮沉降临界负荷仅为  $1.0 \sim 2.0 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ,对氮沉降也比较敏感,而阔叶林、灌丛和草甸则对氮沉降较不敏感,其氮沉降临界负荷大体在  $2.0 \sim 4.0 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$  范围之内。

#### 4 讨论

本文利用稳态法确定了中国土壤的硫沉降临界负荷和氮沉降临界负荷,受客观条件限制,上述结果存在一定的不确定性:

(1) 从方法上考虑,稳态法建立在稳态假设的基础之上,无法模拟生态系统中复杂的动态过程。另外,稳态法假设土壤性质在整个土层中都是相同的,但事实上存在较大的空间差异,特别是在深度方向上。为了更精确地模拟酸沉降对土壤性质的影响,最好是应用动态模型或多层稳态模型,但这些方法所需参数太多,目前无法满足。

(2) 应用稳态法的关键是确定所需的各种参数。稳态法的许多重要参数,比如盐基阳离子的沉降速率、植被的生物吸收速率以及径流量,原则上都必须在临界状态下取值,但由于无法事先确定该状态,因此只能利用当前状态进行近似。另外,在各参数的确定中都产生一定的不确定性。比如,土壤的风化速率是确定生态系统临界负荷的最关键的参数,但目前的研究普遍存在很大的不确定性<sup>[7]</sup>。盐基阳离子的沉降速率同样存在很大的不确定性:在进行中国临界负荷区划时,不仅缺乏干沉降因子的数据,甚至连计算湿沉降所需的降水化学组成也极其缺乏。由于干沉降因子随气象、地形、植被、水文条

件的变化存在显著的空间差异,而且目前还很难测定或者估算一个特定区域的干沉降因子,因此一些研究<sup>[11]</sup>试图用长距离传输沉降模型来估算盐基阳离子的沉降速率。但是,模型计算也会产生了新的不确定性,除了模型自身的精度有限之外,排放源的确定是一个大问题。

(3) 对于每个地区来说,选择具有代表性的土壤和植被类型以及气候条件是确定临界负荷的前提。但是,一方面受到地图精度的限制,不可避免地会丧失一些局地特性,另一方面由于研究单元( $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  的网格)面积较大(大约 100 平方公里),可能存在多种自然条件,因此得到的临界负荷值可能并不能完全代表该区域。尽管如此,根据本研究所采用的参数取值方法,这个结果是偏于安全的。

#### 参考文献:

- Hettelingh J P, Posch M, De Smet P A M et al. The use of critical loads in emission control agreement in Europe. *Water, Air and Soil Pollution*, 1995, **85**: 2381 ~ 2388.
- 郝吉明, 段雷, 谢绍东. 临界负荷在中国酸沉降控制中的应用. *环境科技进展——中国环境科学学会成立 20 周年论文集*. 北京: 中国环境科学出版社, 1999, 225 ~ 229.
- 谢绍东, 郝吉明, 周中等. 中国酸沉降临界负荷区划. *环境科学*, 1998, **19**(1): 13 ~ 17.
- 谢绍东, 郝吉明, 周中平. 应用简单质量平衡法计算酸沉降临界负荷的研究. *环境科学*, 1997, **18**(6): 5 ~ 8.
- Sverdrup H, de Vries W. Calculating critical loads for acidity with the simple mass balance method. *Water, Air and Soil Pollution*, 1994, **72**: 143 ~ 162.
- 谢绍东, 郝吉明, 周中平. 稳态法确定酸沉降临界负荷的基本理论探讨. *环境科学*, 1997, **18**(4): 5 ~ 9.
- 段雷, 郝吉明, 叶雪梅等. 中国土壤风化速率的初步研究. *环境科学学报*, 2000, **20**(Sup): 1 ~ 7.
- Sverdrup H. *The Kinetics of Base Cation Release due to Chemical Weathering*. Lund University Press, Lund, Sweden, 1990. 246.
- 熊毅, 李庆远(主编). *中国土壤*. 北京: 科学出版社, 1987. 39 ~ 304.
- De Vries W, Reinds G J. Assessment of critical loads and their exceedance on European forest using a one-layer steady-state model. *Water, Air and Soil Pollution*, 1994, **72**: 357 ~ 394.
- Lee D S, Kingdon R D, Pacyna J M et al. Modelling base cations in Europe—Sources, transport and deposition of calcium. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**: 2241 ~ 2256.