

# 酸沉降对土壤团聚体及土壤可蚀性的影响

刘广深, 许中坚, 徐冬梅

(浙江大学 环境科学研究所, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 从土壤团聚体的角度探讨了酸沉降对土壤可蚀性的影响。根据已有的资料分析表明, 酸沉降主要通过改变土壤的酸碱条件、土壤胶体的稳定性以及土壤胶结物质的数量和性质来影响土粒团聚和有机无机复合; 其结果是团聚作用降低而黏粒含量增加, 最终导致土壤的可蚀性加大。由此可见, 长期的酸沉降在土壤侵蚀退化中具有重要作用, 进行深入而广泛的有关酸沉降对土壤结构体的影响研究, 可为从土壤结构管理的角度防治土壤侵蚀退化提供理论依据。

**关键词:** 酸沉降; 土壤可蚀性; 团聚体

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2001)04-0070-05

中图分类号: S153, X16

## Effects of Acid Deposition on Soil Aggregate and Soil Erodibility

LIU Guang-shen, XU Zhong-jian, XU Dong-mei

(Institute of Environmental Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027, PRC)

**Abstract:** Acid deposition and soil erosion have deteriorated human living environment, which has aroused a general concern from people all over the world. The erodibility of acid deposition on soil from the angle of aggregate is studied. Analyzing of the effects of acid deposition on soil system showed that acid deposition affects soil aggregation and organo-mineral complex mainly by altering soil acid-based condition, soil colloidal stability and the amount and property of soil cements. The influences made soil aggregation decreased, clay content increased and finally soil erodibility enhanced. Obviously, long-time acid deposition plays an important role in soil erosion.

**Keywords:** acid deposition; soil erodibility; aggregate

由于土壤对酸沉降的缓冲作用, 酸沉降对土壤有机无机复合体及团聚体的影响是潜在的, 这种影响在其它因素的掩盖下, 短期内不易为人所察觉, 但长期性的、持续性的潜在影响会导致土壤结构退化, 加速土壤侵蚀, 因而其后果就更为严重。目前, 从全球范围来看, 酸沉降远未得到控制, 且有愈演愈热之势, 因酸沉降而导致的土壤酸化问题亦越来越严重。有研究表明, 土壤酸化严重的地区, 土壤侵蚀退化也很严重<sup>[1]</sup>。这意味着酸沉降可能破坏土壤结构, 降低土壤的抗侵蚀能力。而良好土壤结构的形成主要依赖于团聚体的数量和质量。因此, 本文主要从理论上分析酸沉降对土壤团聚体, 包括对有机无机复合体的影响, 为进一步研究酸沉降对土壤的可蚀性提供方法和思路。

### 1 酸沉降及其对土壤系统的影响

酸沉降是指  $\text{pH} < 5.6$  的酸性化学组分通过降水的气象过程进入陆地和水生生态系统的现象。严格地说, 它包括雨、霜、雾、雪、尘等形式的输入。因降雨

是降水的最主要形式, 且直观较易监测, 故文献上常狭义地称酸雨。20 世纪 70 年代末以来, 继北欧、西德之后, 美国、日本相继观测到严重的酸雨现象。近年来, 西北欧的大部分地区降水的年平均  $\text{pH}$  值已降低至 4.0~4.5, 美国东北部降水的年平均  $\text{pH}$  值为 4.3, 在加州观察到的  $\text{pH}$  值更低, 为 2.6~3.0<sup>[2]</sup>。我国酸雨的主要分布区在秦岭淮河以南, 川桂湘黔粤及皖赣局部和浙闽沿海, 降水  $\text{pH}$  值低于 5.0<sup>[3]</sup>。我国降水酸性污染物以城市周围最为严重, 其中重庆、贵阳、长沙等城市的降水平均  $\text{pH}$  值低于 4.5, 广州、贵阳、厦门及庐山等地检测到极端  $\text{pH}$  低于 3.0 的酸雨<sup>[4]</sup>。酸雨频率高, 西南、南昌、福厦等酸雨区的酸雨频率在 90% 以上。日益严重的酸雨对生态影响和造成的巨大经济损失, 已成为制约酸雨区农林业生产和社会经济发展的重要因素之一。

为了探讨酸沉降对土壤团聚体的影响, 有必要就酸沉降对土壤系统的影响作一论述。综述酸沉降国内外研究资料, 酸沉降对土壤系统的影响主要有以下几个方面。

## 1.1 盐基加速淋溶与土壤酸化

土壤系统与酸雨接触会发生一系列化学反应, 其中包括黏土矿物表面吸附的阳离子与酸沉降中的氢离子交换、元素淋溶、黏土矿物风化等, 这些反应可以导致土壤营养性盐基元素的损失和某些毒性元素的释放与活化。因此, 酸雨对土壤最基本的影响表现在盐基离子的组成及盐基饱和度的变化。国外有研究资料表明, 酸沉降诱发的土壤酸化过程中盐基淋失率是过去土壤形成过程的 2~10 倍<sup>[4]</sup>。Hanson 等为了找出酸性沉降物影响土壤淋溶液增强的证据, 从美国新英格兰地区和加拿大东部山地 14 个点采集了亚高山针叶林的有机层样品<sup>[5]</sup>。这 14 个采样点位于北美重要工业中心的下风向, 降水 pH 值介于 4.0~4.6 之间。从测定结果看, 土壤中 Ca, Mn 的浓度沿采样点断面从西南(距工业中心近)向东北(距工业中心远)方向递增, 其浓度梯度与降水的 pH 梯度相一致, 亦即愈靠近工业中心, 土壤淋溶强度愈大。廖柏寒等<sup>[6]</sup>通过淋溶研究表明, 随着淋洗液 pH 以 0.5 个单位降低, 阳离子释放量以算术级增加。汪雅各等通过模拟试验, 发现菜园土壤渗漏水离子含量随淋洗液 pH 值降低而呈幂函数升高<sup>[7]</sup>。模拟酸雨对盐基的长期淋溶将造成森林土壤的营养不平衡尤其是  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  的缺乏<sup>[8]</sup>。酸雨导致盐基离子  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^{+}$ ,  $\text{Na}^{+}$  及  $\text{NH}_4^{+}$  等的损失, 酸度越大, 尤其当 pH 低于 3.0 时, 各盐基离子的淋失量增大。

酸沉降通过土壤阳离子的释出会导致土壤酸中和量(ANC)的减小, 即引起土壤酸化。这种酸化作用也可以通过阴离子保持即碱中和容量(BNC)的增加来形成潜在的影响。很多研究表明, 酸雨使土壤系统发生明显酸化, 土壤盐基饱和度(BS)降低, 而交换性酸明显增加<sup>[2, 6-8]</sup>。

## 1.2 Al, Si 的淋溶释放

酸性沉降对生态系统的潜在威胁之一, 是提高了土壤中铝的活性。铝的活化和淋溶意味着风化速率、盐基饱和度、黏土矿物学和形态学发生了变化。研究表明<sup>[9]</sup>, 土壤中固定态铝的释放对 pH 值非常敏感, 当 pH 值在 5~7 之间时, 铝的释放受到明显抑制。当酸沉降影响到土壤 pH 降为 4.0~4.5 以下时, 第四纪红土发育的红壤 Al 淋失量剧增, 这是由于 Al-HA 络合物降低了稳定性之故。酸雨淋洗影响土壤铝形态的转化, 邵宗臣等<sup>[10]</sup>的研究表明, 酸雨使红壤中交换态铝上升, 而吸附态羟基铝下降。在风化过程中, Al 的释放有 2 个来源: 原始铝硅酸盐的水解和次生三水铝矿( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )的溶解反应。三水铝矿的反应式如下:

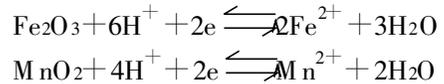


这一公式表明, 随着 pH 值的降低, 三水铝矿的溶解作用也加大。

土壤中的 Si 除石英外, 主要以硅酸盐矿物的形态存在, 硅酸盐矿物进行水解是土壤释放单硅酸的主要途径。

## 1.3 Fe, Mn 的氧化物

土壤中氧化铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )和氧化锰( $\text{MnO}_2$ )的溶解度极低, 但这种物质被还原后产生的亚铁和亚锰离子却可以在土壤中稳定地存在, 从而增加铁和锰的迁移性<sup>[11]</sup>。氧化铁和氧化锰的还原反应为:



在相同的氧化还原条件下, pH 愈低, 愈有利于铁和锰的还原。因此, 酸沉降导致铁、锰氧化物溶解而易被淋失。Rampazzo 和 Bium 的研究表明, 酸雨污染区土壤表面发生了铁氧化物的积累, 同时伴随锰氧化物的溶解。铁氧化物的大量形成可能主要是富铁硅酸盐矿物的强酸性风化所致<sup>[12]</sup>。

## 1.4 重金属的活化、移动

由于酸雨引起土壤酸化, 必然会对土壤中的重金属含量、形态、组成及生物有效性等产生影响。汪雅各等通过土柱模拟试验表明, 经 pH 值为 3.5 以下的酸液淋溶 70d, 土壤中 DTPA 提取态重金属浓度增加, 尤以表层最为显著<sup>[7]</sup>。类似地, 周修萍等<sup>[13]</sup>观测到, 对于红壤、黄壤等, 用 pH 值为 3 的淋液处理比用 pH 值为 4 的处理其  $\text{Mn}^{2+}$  淋出量提高 5~10 倍。模拟酸雨对土壤 Cu, Cd 的淋溶表明, 随着酸度的增加, Cu, Cd 淋溶程度增加, 交换态和水溶态比例明显增加, 同时对生物毒性影响也较大, 但这些影响又同时受到重金属种类尤其是土壤类型的影响<sup>[14]</sup>。Kau-penjohann 通过固定 pH 条件淋溶技术研究认为, 蛇纹岩土壤 Cr, Ni 含量较高, 酸化作用可使与硅酸盐结构相联的金属转变为生物可利用形态, 可交换性 Fe, Pb, Al 含量也明显增加<sup>[15]</sup>。

## 1.5 土壤有机质及微生物

刘洪杰的研究结果表明<sup>[9]</sup>, 酸性淋洗可导致土壤有机质含量的轻微下降, 下降幅度与淋入液的酸度成正比。这与酸化会抑制土壤微生物的生物活性, 使有机物的矿化速率变缓的实验结果相左。一种可能的解释是: 酸性环境促进了蛋白质、脂肪和碳水化合物等类有机物的溶解性, 而易随渗滤液淋失。因此, 酸性淋溶液下土壤有机质含量的变化, 在短期内或许主要是化学作用而不是生化作用的结果。

Gresta 系统地研究了模拟酸雨对土壤微生物过

程的影响,发现细菌,尤其是磷细菌和硫细菌活性降低,数量减少,而真菌数量增大,但种类变化较大<sup>[19]</sup>。硝化作用、纤维素分解及土壤呼吸均受到限制,但氨化作用增强。同时,酸雨引起土壤富里酸、胡敏酸减少,而吉马多美朗酸增加,因此导致土壤有机质组成和 E<sub>4</sub>/E<sub>6</sub> 比等发生变化,土壤动物也因酸雨影响而减少。Falppi 研究结果也表明酸雨使细菌,如氯化细菌、固氮细菌的数量减少,同时使真菌数量增加,酸雨抑制了放射菌中具拮抗作用菌群的发育,使纤维素分解作用增强;酸雨降低土壤中蛋白酶、转化酶和接触酶的活性,磷酸酶的活性则增强<sup>[17]</sup>。

### 1.6 土壤黏粒

根据 Rampazzo 和 Bium 的野外实地研究,酸雨区与非酸雨区相对比,酸雨区表现为黏粒和粉粒含量升高<sup>[12]</sup>。在深度 20~30 cm 处可见到强酸性风化和淋失作用,该层黏粒级含量由于分散与淀积作用而非酸雨区高约 20%。刘洪杰先生的酸性淋洗实验表明,排除实验过程本身的机械淋失后,在 pH> 3.0 时,酸性淋洗对土壤黏粒含量影响轻微;但当 pH< 3.0 后,开始出现黏粒含量的下降,这是在强酸性条件下,促进了一些黏土矿物(如三水铝矿)等不断溶蚀的结果<sup>[9]</sup>。

## 2 团聚体的形成及胶结物质

### 2.1 团聚体的形成

团聚体的形成是一个非常复杂的过程,包括一系列的物理、化学及生物的作用,其形成机制仍然不很清楚。影响团聚体的形成及其稳定性的因素很多,如成土母质、土地利用方式、耕作及管理制度、气候条件、植被覆盖情况、土壤本身的物理化学性状以及人为因素(如各种污染物的输入)等<sup>[18-21]</sup>。对团聚体形成过程的解释有多种模式,应用较多的主要有 Edwards 和 Bremner 提出的以有机无机复合体为基础的团聚体形成模式以及 Tisdall 和 Oades 提出的以团聚体中各种大小结构单元及各种胶结剂的组成为基础的团聚模式<sup>[22-23]</sup>。

Edwards 和 Bremner 提出,大团聚体(直径> 250 μm)由黏粒—多价金属—有机质(C—P—OM)复合体组成。其中,黏粒通过多价金属与腐殖化的有机质键合。C—P—OM 和(C—P—OM)<sub>x</sub> 的颗粒(直径都小于 2 μm)一起形成直径小于 250 μm 微团聚体[(C—P—OM)<sub>x</sub>]<sub>y</sub>。x, y 分别表示初生黏土颗粒大小的总数,其团聚作用以下式表示

$$[(C-P-OM)_x]_y \xrightarrow[A]{D} (C-P-OM)_x$$

$$\xrightarrow[A]{D} xy(C-P-OM)$$

式中: D——分解作用; A——团聚作用。

Tisdall 和 Oades 主要根据红棕壤的有关资料,提出了广泛适用于有机质为主要胶结剂的土壤团聚体形成模式。在该模式中,分 4 步团聚:

$$\begin{aligned} < 0.2 \mu\text{m} - 0.2 \sim 2 \mu\text{m} - 2 \sim 20 \mu\text{m} - \\ 20 \sim 250 \mu\text{m} - > 2000 \mu\text{m} \end{aligned}$$

可以按比例画出表示土壤团聚体由各种大小结构单元通过各种胶结剂构成的一个理想模型<sup>[23]</sup>。该模式阐述了各类胶结物质在土粒团聚中的重要作用。

### 2.2 团聚体形成的主要胶结物质

土壤团聚体的形成主要依赖于土壤中各种胶结物质的数量和性质。在土壤中起团聚作用的胶结物质一般可分为有机胶结物质和无机胶结物质<sup>[18, 24]</sup>。

团聚土壤的有机物质通常可分 3 种类型<sup>[24]</sup>: 非腐殖物质、土壤腐殖物质以及人工合成的结构改良剂。非腐殖物质包括动、植物体中可能含有的各类化合物和蛋白质、碳水化合物、脂肪、木质素、单宁等以及许多低分子化合物。而蛋白质和碳水化合物中的多糖类对矿质土粒的吸附和团聚起着重要作用。腐殖物质是类暗色的、含氮的、具芳香性结构的酸性高分子聚合物,是微生物活动的产物,但不易为微生物所分解,包括胡敏酸、富里酸以及胡敏素。土壤结构改良剂包括天然结构改良剂和人工结构改良剂。很多研究表明,微生物在土壤团聚体形成中具有重要作用。其作用主要有 2 个方面:(1) 微生物主要是真菌和放射菌借助它们的菌丝将土壤颗粒彼此机械地缠绕在一起而形成团聚体;(2) 作用是依靠微生物的代谢产物(多糖和其它有机多聚物)对土壤颗粒的胶结作用而形成稳定团聚体。

在土粒团聚过程中,不仅有机胶结物起作用,无机胶结物的黏结作用也很重要,这些物质包括铁、铝的氧化物和氢氧化物,以及二氧化硅和碳酸钙等<sup>[21]</sup>。

综上所述,酸沉降引起的土壤酸化,将最终导致土壤的一系列物理、化学和生物性质的改变,而有机无机复合和土粒团聚与土壤组分及性质密切相关,因而酸沉降对土壤性状包括对土壤有机无机复合体及团聚体产生重要影响。

## 3 酸沉降对土粒团聚体的影响分析

通过酸沉降对土壤系统的影响以及土壤团聚体形成的主要模式不难推断,持续性的酸沉降会对团聚体产生重要影响,包括对团聚体数量和质量的影響。

### 3.1 酸沉降对土壤胶体稳定性的影响

土壤胶体,包括有机胶体、无机胶体、有机无机复

合体,是有机无机复合及土粒团聚的物质基础。土壤胶体的稳定性决定着土壤的许多物理和化学性质,对有机无机复合及土粒团聚有重要影响。土壤胶体的稳定性决定于颗粒间吸力和斥力的平衡,它与土壤黏粒矿物组成、颗粒的大小和形状、吸附的阳离子种类、饱和程度及有机质的数量和性质等密切相关。如土壤黏粒表面主要基团为无机质或有机羟基的情况下,因与质子和氢氧离子形成内配位络合物,则 pH 成为影响土壤胶体稳定性的主要因素<sup>[25]</sup>。带有表面羟基的黏粒(水合氧化物或高岭石),在体系达到 ZPC(电荷零点)时(不考虑本底电解质)则趋向不稳定。如果体系的  $\text{pH} < \text{ZPC}$ ,氧化物表面带正电荷,且所带正电荷随 pH 降低而增加,导致黏粒间的电斥力增大,从而使土壤胶体的稳定性增强。对于黏粒(土)-水分散体系,在土壤学上要求其稳定性弱或不稳定,因为这有利于有机无机复和微团聚体的形成。而酸沉降导致土壤酸化,使土壤 pH 值降低。当  $\text{pH} < \text{ZPC}$  时,有利于土壤胶粒的分散稳定,不利于胶粒聚沉;pH 值越低,越不利于胶粒聚沉。

另一方面,酸沉降导致土壤中  $\text{Al}^{3+}$  的增加,而  $\text{Al}^{3+}$  是极强的絮凝剂,有利于土壤胶粒的聚沉;但亦有研究表明,酸沉降使土壤总铝含量降低。而且,酸沉降导致盐基的大量淋失,它们对土壤胶体的稳定性同样产生影响。因此,因酸沉降对土壤胶体稳定性的影响是客观存在的,至于影响的性质及程度如何,则有待于进一步的研究。

### 3.2 酸沉降对土壤胶结物质的影响

以上说明酸沉降影响土壤胶体的稳定性进而影响有机无机复合及土粒团聚的情况。另一方面酸沉降影响有机无机复合及土粒团聚还在于其影响土壤结构胶结物质,包括对胶结物质的组成、含量、性质等的影响。团聚体的形成与胶结剂有关,一般认为在土壤有机质含量较高、黏粒和氧化铁铝较低的土壤中,有机质的作用占主导地位;而在有机质含量不高、黏粒和氧化铁铝较高的土壤中,团聚体的形成主要靠黏粒的内聚力及铁铝氧化物的胶结作用。从酸沉降对土壤系统影响的分析中可以看出,酸沉降对这些胶结物质都产生不同程度的影响,主要表现在以下几个方面:酸沉降加速可溶性有机质胶结物质的淋失;酸沉降抑制某些微生物的活性进而影响多糖等重要有机胶结物质的含量;酸沉降对三氧化物、碳酸钙等无机胶结物的溶蚀、淋失,或使其在剖面下层淀积。这些影响无疑会对有机无机复合及土粒团聚产生重要影响。

### 3.3 酸沉降对土壤团聚体的影响

从酸沉降对土壤胶体稳定性的影响以及对土壤胶结物质影响的分析中不难推断:酸沉降会使土壤的团聚作用降低,新团聚体尤其是水稳性大团聚体难以形成;破坏大的老团聚体,降低水稳性大团聚体的含量。Rampazzo 和 Blum 的研究表明,酸雨导致森林土壤黏粒和粉粒含量升高,团聚作用下降及黏粒淀积;用扫描电子显微镜(SEM)观察土壤团聚体,发现对照区(非酸雨污染区)土壤团聚体的表面为腐殖质、氧化物和其它矿物均匀地复盖和胶结,而酸雨污染区由于酸性水流的长期强风化和淋洗作用的结果,已不存在这些结构了;而且土壤孔隙的连续性和形状及土壤结构的稳定性和结持性较对照区也显著下降<sup>[12]</sup>。

### 3.4 酸沉降对有机无质复合体的影响

有机无机复合和土壤团聚都是表征土壤中有机物质和矿物相互聚合效应,但两者的着眼点和研究问题的角度不同。有机无机复合是讨论土壤中有机物质的复合状况和复合程度,其出发点是有机物质;而土粒团聚实际上是矿物质颗粒的聚合状况和程度(即与机械分析结果相比较),出发点是矿物颗粒。有机无机复合体主要是黏粒矿物和有机质通过多价阳离子( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ )的键桥而形成的配位络合物<sup>[23]</sup>。土壤 pH 影响所形成络合物的稳定性。随 pH 的升高,络合剂上的质子的解离增加,有利于络合物的形成。所以,在一定的 pH 范围内,pH 升高能增加络合物的稳定性。酸沉降降低土壤 pH 值,从而影响有机无机的复合。另一方面,不同类型的复合体在不同环境条件下其稳定性不同,相互之间存在着转化现象。何云峰<sup>[26]</sup>的研究表明:钙键复合体上的  $\text{Ca}^{2+}$  较易为  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  置换而进入溶液;其中  $\text{Al}^{3+}$  的置换能力高于  $\text{Fe}^{3+}$ ,而且  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  置换复合体中  $\text{Ca}^{2+}$  的能力有随 pH 上升而下降的趋势。酸雨不仅降低土壤 pH 值,而且使  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  相对富集,从而使钙键复合体大大减少,铁、铝键复合体则相对增加。

## 4 酸沉降对土壤可蚀性的影响

土壤退化导致人类生存环境的恶化,已成为世界各国日益关注的重大全球环境问题。目前,全球约 35% 的土地有着不同程度的退化,已直接影响世界经济的发展和人类的生存<sup>[27]</sup>。研究表明土壤团聚体的稳定性是影响土壤侵蚀的最为重要的土壤性质<sup>[28]</sup>。酸沉降亦是重大的全球环境问题之一,它对土壤的影响广泛而且深刻。然而,对于酸沉降在土壤侵蚀退化中的作用并未得到人们的重视。酸沉降严重的地区,土壤侵蚀退化往往也很严重。这反映了酸沉降破坏

土壤结构,降低土壤的抗侵蚀能力。因此研究酸沉降对土壤团聚体的影响具有重要的理论和实际意义。通过酸沉降对土壤团聚组成、稳定性的研究,为明确土壤物理退化的机理,从土壤结构管理角度防治土壤侵蚀退化提供理论依据。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 南方红壤退化机制与防治措施研究专题组. 中国红壤退化机制与防治[ M ]. 北京: 中国农业出版社, 1999. 7—45.
- [ 2 ] 仇荣亮, 吴箐. 陆地生态环境酸沉降敏感性研究[ J ]. 环境科学进展, 1997, 5(4): 8—21.
- [ 3 ] 中国环境科学学会. 酸雨文集[ C ]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [ 4 ] 潘根兴, 冉炜. 中国大气酸沉降与土壤酸化问题[ J ]. 热带亚热带土壤科学, 1994, 3(4): 243—252.
- [ 5 ] Hanson D W, Norton S A, Williams J S, et al. Modern and paleolimnological evidence for accelerated leaching and metal accumulation in soils in New England caused by atmospheric deposition[ J ]. Water Air and Soil Pollution, 1982, 18: 227—239.
- [ 6 ] 廖柏寒, 戴昭华. 土壤对酸沉降的缓冲能力与土壤矿物的风化特征[ J ]. 环境科学学报, 1991, 11(4): 425—431.
- [ 7 ] 汪雅各, 盛沛麟, 袁大伟. 模拟酸雨对土壤金属离子的淋溶和植物有效性的研究[ J ]. 环境科学, 1989, 9(2): 22—26.
- [ 8 ] Van Oene H. Acid deposition and forest nutrient imbalance: a modelling approach[ J ]. Water Air and Soil Pollution, 1992, 63: 33—50.
- [ 9 ] 刘洪杰. 酸性淋洗对土壤有机质和黏粒含量的影响[ J ]. 环境科学, 1991, 12(2): 42—43.
- [ 10 ] 邵宗臣, 何群, 王维君. 模拟酸雨对红壤铝形态的影响[ J ]. 热带亚热带土壤科学, 1997, 6(3): 187—193.
- [ 11 ] 于天仁, 季国亮, 丁昌璞, 等. 可变电荷土壤的电化学[ M ]. 北京: 科学出版社, 1996. 294—295.
- [ 12 ] Rampazzo N, Bium W E H. Changes in chemistry and mineralogy of forest soils by acid rain[ J ]. Water Air and Soil Pollution, 1992, 61(3/4): 209—220.
- [ 13 ] 周修萍, 江静蓉, 梁伟, 等. 模拟酸雨对南方五种土壤理化性质的影响[ J ]. 环境科学, 1988, 9(3): 6—12.
- [ 14 ] 谢思琴, 周德智, 顾宗瀛, 等. 模拟酸雨下土壤中铜、镉行为及急性毒性效应[ J ]. 环境科学, 1991, 12(1): 24—28.
- [ 15 ] Kaupenjohann M, Wilcke W. Heavy metal release from a serpentine soil using a pH—seat technique[ J ]. Soil Sci Soc Am J, 1995, 59: 1027.
- [ 16 ] Gieszta J et al. Humus degradation under the influence of simulated acid rain[ J ]. Water Air and Soil Pollution, 1992, 63: 51—66.
- [ 17 ] Falappi D, Farini A, Ranalli G. Effects of simulated acid rain on some microbiological parameters of subacid soil[ J ]. Chemosphere, 1994, 28(6): 1087—1095.
- [ 18 ] 章明奎, 何振立. 成土母质对土壤团聚体形成的影响[ J ]. 热带亚热带土壤科学, 1997, 6(3): 198—202.
- [ 19 ] 姚贤良, 许绣云, 于德芬. 不同利用方式下红壤结构的形成[ J ]. 土壤学报, 1990, 27(1): 25—33.
- [ 20 ] Salako F K, Babalola O, Hauser S, et al. Soil macroaggregate stability under different fallow management systems and cropping intensities in southwestern Nigeria[ J ]. Geoderma, 1999, 91: 103—123.
- [ 21 ] Barral M T, Arias M, Gúerif J. Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates[ J ]. Soil & Tillage Research, 1998, 46: 261—272.
- [ 22 ] Edwards A P, Bremner J M. Microaggregates in soils[ J ]. J Soil Sci, 1967, 18: 64—73.
- [ 23 ] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[ J ]. J Soil Sci, 1982, 33: 141—163.
- [ 24 ] 李映铁. 有机物质与土壤结构[ J ]. 热带亚热带土壤科学, 1997, 6(1): 45—50.
- [ 25 ] 熊毅, 等. 土壤胶体——土壤胶体研究方法[ M ]. 北京: 科学出版社, 1985. 50—51, 140—141.
- [ 26 ] 何云峰. 土壤中钙键复合体和铁铝键复合体的形成和转换机制研究[ D ]. 浙江大学, 2000.
- [ 27 ] 史德明, 等. 关于侵蚀土壤退化及其机理[ J ]. 土壤, 1996(3): 140.
- [ 28 ] Brgan R B. The development, use and efficiency of indices of soil erodiability[ J ]. Geoderma, 1968, 5: 2—26.