

生态系统对酸沉降敏感性评价方法与进展

陈定茂

谢绍东 胡泳涛

(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085) (北京大学环境科学中心, 北京 100871)

摘要 评述水体、土壤和整个生态系统对酸沉降敏感性评价的各种方法, 这些方法用系统的不同物理化学性质表征它们缓冲酸输入的能力。通过分析比较指出, 基于表征水体、土壤缓冲酸输入能力的某些化学指标建立的方法, 实质是对生态系统中某一部分的绝对敏感性评价; 基于潜在指示生态系统响应酸沉降的诸多生态环境因子开发的相对敏感性评价方法, 企图表征整个生态系统缓冲酸输入的能力, 其敏感性区划结果可用于酸沉降控制决策。

关键词 酸沉降, 生态系统, 敏感性评价, 水体, 土壤。

Methodology for Assessing the Sensitivity of Ecosystems to Acidic Deposition and Its Progress

Chen Dingmao

(Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085)

Xie Shaodong Hu Yongtao

(Center for Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871)

Abstract Different methods for assessing the sensitivity of water, soil and whole ecosystem to acidic depositions are summarized. These methods indicate the acidic input buffering ability of these systems with different physico-chemical characteristics. By comparing and analyzing, it is pointed out that the methods which are developed with some chemical indicators expressing the acidic input, buffering ability of water and soil are essentially the kinds of absolute assessment to some parts of ecosystem. The relative sensitivity assessing method attempts to indicate the buffering ability of whole ecosystem to acidic depositions, which is developed based on those environmental site factors that indicate potential ecosystem response to those depositions, and the derived sensitivity maps can be used to make a decision on acidic deposition control.

Keywords acidic deposition, ecosystem, sensitivity assessment, water, soil.

生态系统对酸沉降的敏感性是表征生态系统是否易受酸沉降危害的特征量, 可理解为生态系统对酸沉降的响应程度, 在酸沉降影响研究领域, 当生态系统响应酸沉降的定量关系尚未确定之前, 它可为决策者提供哪些区域应重点保护、哪些区域可暂停控制提供科学依据。因此受到国内外科学家的广泛关注, 就此开展了大量研究。本文对这些研究成果进行综述, 着重于总结敏感性评价方法与进展, 旨在为进一步开展类似研究提供参考。

1 水体对酸沉降敏感性的评价方法

北美国较早地开展了一些有关水体酸化过程和 水体对酸沉降敏感性及区划的研究工作。早在 70 年代末, Nriagu^[1] 等人探讨了加拿大 120 个湖泊对酸沉降的缓冲容量及敏感性; Hendry^[2] 等学者研究了美国东部地区对酸沉降敏感性的地理分布, 提出了该地区淡水湖泊的敏感度^[3]; Logan 和 Nelson 等分别考察了华盛顿、俄勒冈地区水体的敏感性^[4,5]。北欧在敏感性区划方面也作了大量研究^[6,7]。我国对西南地区天然水体的酸化敏感性和酸化趋势也进行了初步区划^[8], 江静蓉等^[9]根据 Galloway 提出的以 HCO_3^- 为指标和 Kramer 提出的以钙饱和度指数为指标的 二种分类标准, 探讨

了我国地表水对酸沉降的敏感性。

迄今人们对水体酸化及酸化敏感性的研究, 主要是从水体本身性质如水体 pH、酸中和容量 ANC、离子组成等着手, 再结合水体环境条件如酸沉降、水文、地质及土壤等来进行的。但目前还没有评价水体酸化敏感性及其区划的统一方法和标准, 主要有 4 种评价水体酸化敏感性的方法。

(1) 酸中和容量 ANC 法 目前普遍认为 ANC 可以作为评价水体对酸沉降敏感性的指标, 将 ANC 值的大小分成不同等级来对水体的酸化敏感性进行评价, 但划分标准却不大相同, 主要体现在划分敏感、中等敏感和不敏感的分界点上还不一致。有人认为^[10], $\text{ANC} \leq 0 \mu\text{eq} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 水体已经酸化; $\text{ANC} = 0-40 \mu\text{eq} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 水体极为敏感; $\text{ANC} = 40-200 \mu\text{eq} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 水体中度敏感; $\text{ANC} = 200-500 \mu\text{eq} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 水体低度敏感; $\text{ANC} \geq 500 \mu\text{eq} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 水体不敏感。在此基础上, 美国把地表水总碱度 ($\mu\text{eq} \cdot \text{L}^{-1}$) 划分成 6 个等级 (见表 1)。Zimmermen 和 Harvery 提出用 3 个指标综合考虑地表水对酸沉降的敏感性, 即 $\text{pH} < 6.3-6.7$ 、电

陈定茂: 男, 58 岁, 副研究员

收稿日期: 1998-05-30

导率 $< 30\text{--}40\mu\text{S}/\text{cm}$ 、 $\text{ANC}< 300\text{ }\mu\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$ 为敏感水体.

表 1 以总碱度(CaCO_3)划分水域对酸雨敏感性指标

研究者	敏感性等级		
	高度敏感	中度敏感	不敏感
Hendry(1980)	< 200	≥ 200	≥ 500
Haines(1981)	< 200	$200\text{--}400$	> 400
加拿大安大略省环境部(1981)	$0\text{--}40$	$40\text{--}200$	> 200

(2) 钙饱和指数 CSI 法^[11] 当 $\text{CSI}< 1$ 时, 水体碳酸钙接近饱和, 即水体对酸化不敏感, $\text{CSI}> 4$ 时, 水体对酸化敏感. Glass 等进一步细分了 CSI 指标后提出, $\text{CSI}< 1$ 为不敏感、CSI 在 $1\text{--}2$ 间为可能敏感、CSI 在 $2\text{--}3$ 间为微敏感、CSI 在 $3\text{--}4$ 间为敏感、 $\text{CSI}> 4$ 为高度敏感.

(3) 抗酸化容量 ΔA 法^[12] 我国一些学者提出用抗酸化容量来评价天然水体的酸化敏感性. 他们认为,

表 2 以 SI 划分水体酸化敏感性标准

酸化敏感性区划等级	酸化水体	极敏感	敏感	中度敏感	不敏感	极不敏感
SI 范围	≤ 0.011	$0.011\text{--}0.018$	$0.018\text{--}0.030$	$0.030\text{--}0.051$	$0.051\text{--}0.085$	≥ 0.085

2 土壤对酸沉降敏感性评价方法

一般认为, 土壤对酸沉降响应的敏感性主要表现在: 盐基阳离子的淋失量、土壤 pH 值下降的程度、酸中和容量的减小、土壤中铝的活化. Kaplan 等^[13]收集了世界上许多国家的土壤数据, 将土壤分为 4 类, 分析比较了其对酸沉降的敏感性; Raynal 等^[14]集中研究了美国 Adirondack 山脉内森林对酸沉降的缓冲能力. 但所有这些研究工作中最有影响的还是 McFee^[15]提出的土壤对酸沉降的敏感性分区. 刘怀全等^[16]根据土壤的盐基阳离子交换容量(BEC), 并参考土壤缓冲极限 pH 和风化壳类型, 将敏感性分为 4 级, 概略地绘制出我国土壤对酸雨敏感性区域分布图; 周修萍等^[17, 18]和程伯容^[19]应用 McFee 的方法, 分别评价了我国南方 4 省和西南地区土壤对酸雨的敏感性; 王敬华等^[20]基于酸缓冲曲线提出土壤酸害容量和酸敏感值 2 个指标, 对广东、广西、海南 3 省的土壤进行了敏感性分区.

总之, 土壤对酸沉降的敏感性实际反映了土壤酸化的难易. 土壤酸化是指土壤总酸度的含量相对于盐基阳离子的含量升高了, 普遍解释为盐基饱和度降低^[21]. 因此, 北欧、北美常用盐基饱和度降低这个指标评价土壤对酸沉降的敏感性^[22, 23]. 但也有人将水化学中的酸中和容量(ANC)的概念应用于土壤酸化的预测研究^[24], 不过所得结果只能代表理论上的最终结果, 实

然水体 pH 值一般在 $6.5\text{--}8.5$ 之间, 这时水体中 HCO_3^- 占总碳酸溶解量的 $60\%\text{--}95\%$, 成为水体中主要的缓冲因素. 根据水体碳酸平衡公式, 定量求算水体可承受的总酸量 ΔA . 如果 $\Delta A< 0.5\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$, 水体是敏感的; $\Delta A= 0.5\text{--}1.0\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$, 水体中等敏感; $\Delta A> 1.0\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$, 水体是不敏感的.

3 种方法都有一定的实用性, 但也有一些缺陷. 钙饱和指数主要考虑水体中碳酸盐的含量, 而忽略了其它无机或有机弱酸根的缓冲, 特别是当水体本身 pH 值较低时. 酸中和容量法是应用较广的一种, 但当水体 pH 值低于临界值 6.5 时, 其水体 ANC 并不一定是小于或等于 0, 而这种水体常被认为是已经酸化的水体.

(4) 水体酸化敏感指数法^[8] 水体酸化敏感指数(SI)定义为水体在酸沉降作用下, 由目前 pH 值下降相同单位所需加入的强酸总量.

将 SI 值的大小分成不同等级来评价水体酸化敏感性(见表 2).

际意义不大. 迄今尚未找到一个评价土壤对酸沉降敏感性的较为统一的意见和标准, 这里就其有代表性的评价方法作简单介绍.

(1) McFee 土壤敏感性判据、分类基准及分级标准 McFee^[15]提出了 4 个参数作为评定土壤对酸沉降敏感性的判据: ①土壤总缓冲容量(CEC); ②盐基饱和度; ③土壤的管理制度; ④土壤剖面上碳酸盐存在与否. 首先将剖面中含有游离碳酸盐的土壤、因耕作施用石灰改良剂和因淹灌而更新的土壤列为非敏感土壤, 然后根据 CEC 的大小进行分类. CEC 低者为敏感性土壤, CEC 高者为非敏感性土壤. McFee 的分级方法未考虑土壤吸附硫酸盐的特性. 但这些判据基本能反映土壤对酸沉降的缓冲能力, 因此北美和北欧^[31, 32]常常应用该方法评价土壤对酸沉降的敏感性. McFee 主要根据“标准酸负荷”($25\text{年}\times 100\text{cm}^2\text{pH}3.7$ 酸雨/年) 的质子当量数与“标准土层”(表层 25cm 厚度的土层) CEC 的总当量数的相对比值来确定分类基准, 当该比值 $> 25\%$ 时为敏感性土壤、比值 $< 10\%$ 时为非敏感性土壤、比值介于二者之间为微敏感性土壤. 对于地形复杂的地区, 考虑到土壤 CEC 分布的非均一性, McFee 根据各行政区内敏感、微敏感和非敏感土壤所占的比例确定了区域土壤的敏感性分级.

(2) 酸缓冲曲线法^[20] 指不同酸量与对应酸量土

壤溶液 pH 值间的关系曲线, 基于此曲线提出土壤的酸害容量和酸敏感值 2 个指标, 用以评价土壤对酸沉降的敏感性. 为了表示土壤对酸沉降的承受能力, 定义土壤的酸害容量为土壤达到对植物致害的某参考 pH 值所需的硫酸量, 以针叶林下土壤最低 pH3.5 作为致害参考 pH 值. 为了表示土壤对酸的敏感程度, 定义土壤的酸敏感值为加入规定量的硫酸后土壤 pH 值的降低值, 用 $\Delta\text{pH}_{\text{敏感值}}$ 表示.

上述 2 个指标反映了土壤敏感性的 2 种不同效应, 可以认为酸害容量是个容量因子, 酸敏感值是强度因子, 它们可以直观地反映土壤缓冲酸的能力. 但土壤缓冲酸的反应往往有一定的滞后性, 且依赖于土壤质地、矿物组成、有机质含量和土壤原 pH 等诸多因素, 因此时间应是该考虑的因素, 同时 pH 值往往并不与植物致害机理有直接联系, 因而该方法在应用时有较大局限性^[25].

3 生态系统对酸沉降的相对敏感性评价方法

水体、土壤对酸沉降的敏感性评价, 只反映了地表水或土壤的现在化学状态与植物对酸沉降的忍耐极限, 但这并不能代表整个生态系统对酸沉降的敏感性, 不能作为酸沉降控制决策的依据. 于是, 研究整个生态系统对酸沉降敏感性的评价方法就显得十分重要和有意义. Chadwick 和 Kaylenstierna^[26, 27] 提出了一套较为系统的生态系统对酸沉降的相对敏感性评价方法(见图 1).

由图 1 可见, 该方法用基岩岩石类型表示母岩矿物的风化速率、土壤类型表示土壤长期提供碱度的速率、土地利用表示植被吸收盐基阳离子的速率、降雨量表示盐基阳离子的淋溶速率, 这些因子影响生态系统缓冲酸能力的相对大小用权重表示, 并给出土地利用的权重为 3、基岩岩石类型为 2、土壤类型和降雨量为 1, 然后对这些因子再分类并给出相应权重. 生态系统对酸沉降的敏感性是这些因子综合作用的结果, 故用简单加和的方法将这些因子的权重相加, 可得 8 个对酸沉降的相对敏感性分级(0—7), 合并较高的敏感性范围(2+ 3; 4+ 5; 6+ 7) 与分级 0 和 1 一起可给出从极不敏感到极敏感共 5 个相对敏感性分级.

基岩岩石类型是基于矿物的风化速率再划分为 2 类: 以花岗岩、正长石、片麻花岗岩、石英砂岩、硅酸盐、粗砂岩、脱钙砂岩为母岩的基岩类型划分为含硅的、风化速率低的岩石类型, 其它为风化速率高的岩石类型. 对大多数岩石类型, 其风化速率难以直接测定, 只能根据岩石的化学成分和矿物种类作出定性判别, 以及由流域研究和实验室试验确定相对风化速率. 风化速率低的岩石, 酸中和能力亦低, 这些岩石的地区敏感性高.

土壤类型是基于土壤的物理和化学性质再划分为 2 类. 影响土壤对酸沉降缓冲能力的因数很多, 如盐饱和度、阳离子交换容量、质地、有机物质含量、粘土矿物、钙含量和硫酸盐吸附容量、土壤 pH 等, 可根据这些参数对土壤学科已经分类的土壤进一步分类. 低缓冲能力的土壤有, 灰壤类、灰化淋溶土类、强淋溶土类和铁铝土类; 高缓冲能力的土壤有, 黑钙土类、黑色石灰土类、干旱土类、漠境土类和盐土类.

土地利用类型是基于植物对土壤的影响、树冠和沉降之间的相互作用和植物对当地水文的影响而再划分 4 类: 针叶林、天然牧场、落叶林和耕地. 荒漠、半荒漠区域和干旱地区是高度不敏感; 玉米、稻等生长的农业区域为不敏感种类; 热带雨林、针叶林类型等对酸沉降相当敏感.

降雨量是基于降雨量决定的当地水文条件和从土壤中淋溶的离子数量再划分为 2 类. 降雨量增加, 致使盐基阳离子、铝和其它酸性离子淋溶速率也增加.

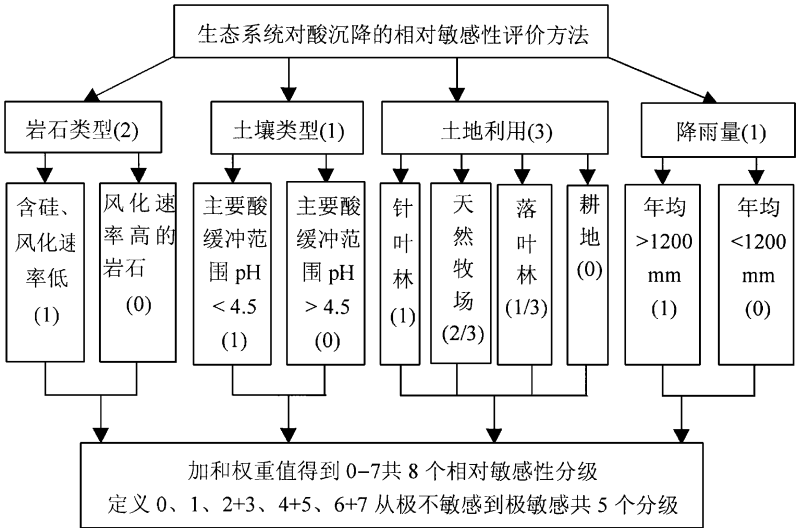


图 1 生态系统对酸沉降相对敏感性评价方法示意图

(括号里的数值为权重值)

Chadwick 等^[26,27]用此方法区划了欧洲生态系统对酸沉降的相对敏感性,并应用于欧洲酸沉降控制决策中。在区划非洲、南美洲和美洲中部、亚洲等发展中国家时,考虑到数据的可获性将前述 4 个因子降低到土壤类型、土地利用和降雨量对潜在土壤水分蒸发蒸腾损失总量的比率(P/PE)进行评价^[28]。

必须指出的是,由于不同气候带的生态系统对酸沉降的影响不同,因此 Chadwick 和 Kuylenstierha 建立的评价指标只适用于一定的气候带。周修萍^[29]在研究我国东部 7 省生态系统对酸沉降的敏感性时,考虑到该地区绝大部分属于亚热带湿润气候带的特点,认为不能用欧洲^[26]那样的温带指标,也不能用类似亚洲^[28]那样的热带指标。

4 结语

生态系统的不同部分将以不同方式响应酸沉降,水体、土壤对酸沉降敏感性评价只是生态系统中某一部分的“绝对”敏感性,但目前还没有统一的评价方法和标准。绝对敏感性仅仅反映了生态系统中水体或土壤的现有化学状态,未体现出整个生态系统对酸沉降的承受能力。由于受相同的强制变量控制,因此在一定区域中生态系统很可能不具有对酸沉降相同的绝对敏感性,但却可能具有相同的相对敏感性,故绝对敏感性不能作为酸沉降控制决策的依据。生态系统对酸沉降的相对敏感性评价,企图反映生态系统缓冲酸的能力,并考虑生态系统中生物学特性对酸沉降的响应,但评价指标和影响因子权重的选择与水体、土壤敏感性评价方法的等级分类一样,带有一定的主观任意性。可见,目前所开发的评价方法具有一定经验性,缺乏完整系统的理论依据,有待于进一步发展和完善。另外,该领域的研究趋势是,人们越来越关注生态系统的生物学特性对酸输入负荷的响应,试图将生态系统的敏感性与生态系统响应酸沉降的生物学特性相联系。对陆生生态系统首先考虑酸输入对土壤化学组成的改变,对水生生态系统考虑对水质的影响,然后研究生态系统中生物对这些变化的响应。

参 考 文 献

1 Nriagu J O. Isotopic Variation as an index of sulphur pollution in Lakes around Sudburo, Ontario. *Nature*, 1978, **273**(5659): 5

2 Hendry G R et al. . Geological and Hydrochemical Sensitivity of the Eastern U. S. to Acid Precipitation. EPA-600/3-80-024, 1980-01

3 Hendry G R et al. .Identification of Freshwater Susceptible to acidification. BNL-31000 (Brook haven National Lab. Upton. New York), 1982

4 Logan R M et al. . Acid Precipitation and Lake Susceptivity in the Central Washington Cascade. *Environmental Science and Technology*, 1982, **16**(11): 11

5 Nelson P U et al. . Sensitivity of Oregon's Cascade Lakes to acid precipitation. Water Resource Research Institute, Oregon state University, 1983: 85

6 Kamari J et al. . Regional Acidification Models. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 1989

7 Adriano D C et al. . Acidic Precipitation Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 1990: 1—4

8 冯宗炜主编. 酸雨对生态系统的影响. 北京: 中国科学技术出版社, 1993

9 江静蓉, 周修萍, 向锋等. 我国地表水对酸雨的敏感性. *大气环境*, 1987, (2): 43—47

10 Ministry of the Environment, Ontario, Canada. Acid Sensitivity Survey of Lakes in Ontario. APIOS 003/82, 1982

11 Canfield D E et al. . Acid Deposition Causes and Effects. Maryland: Government Institute, 1983: 283—306

12 刘怀全, 赵殿五. 酸雨的形成和影响. 北京: 中国科学院环境科学情报网, 1987: 201—206

13 Kaptan E et al. . Rocks, Soils and Water Quality. *Environmental Science and Technology*, 1981, **15**(5): 5

14 Raynal D J et al. . Actual and Potential Effects of Acid Precipitation on A Forest Ecosystem. NYSEKDA-80-28, 1980: 12

15 McFee W W. Sensitivity of Soil Regions to Acid Precipitation. EPA-600/3-80-031, 1980

16 刘怀全, 赵殿五. 我国环境对酸沉降敏感性初探. *酸雨*, 1984, (2): 13—17

17 周修萍, 江静蓉, 秦文娟. 我国南方四省土壤对酸雨的敏感性探讨. *大气环境*, 1987, (3): 42—48

18 周修萍, 秦文娟. 华南三省(区) 土壤对酸雨的敏感性及其分区图. *环境科学学报*, 1992, **12**(1): 78—83

19 程伯容等. 我国西南土壤区域对酸沉降的敏感性. 国家“七五”科技攻关环境保护项目论文集. 北京: 科学出版社, 1993: 790—798

20 王敬华, 张效年, 于天红. 华南红壤对酸雨敏感性的研究. *土壤学报*, 1994, **31**(4): 348—355

21 Sverdrup H and Warfvinge P. The Role of Weathering and Forestry in Determining the Acidity of Lakes in Sweden. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1990, (52): 71—78

22 Reuss. J O and Johnson D W. Acid Deposition and the Acidification of Soils and Water. New York: Springer-Verlag, 1986

23 Rechcigl J E and Sparks D L. Effect of Acid Rain on the Soil Environment. *Soil Science Plant Anal.*, 1985, **16**(7): 653—680

- 24 Van Breemen N, Mulder J and Driscall C T. Acidification and Alkalinization of Soils. *Plant and Soil*, 1983, **75**: 283—308
- 25 仇荣亮, 吴箐. 陆地生态环境酸沉降敏感性研究. *环境科学进展*, 1997, **5**(4): 8—22
- 26 Chadwick M J, Kuylenstierna J C I. Critical Loads and Critical Levels for the Effects of Sulphur and Nitrogen Compounds in Acid Deposition: Origins, Impacts and Abatement Strategies. New York: Springer-Verlag, 1991: 279—315
- 27 Chadwick, M J Johan C I Kuylenstierna. The Relative Sensitivity of Ecosystems in Europe to Acidic Depositions. A Preliminary assessment of the sensitivity of aquatic and terrestrial ecosystem. *Perspectives in Energy*, 1991, **1**: 71—93
- 28 Kuylenstierna J C I, Cinderby S and Chadwick M J. A Preliminary Mapping of Relative Sensitivity of Terrestrial Ecosystems to Acidic Depositions in Asia. Stockholm Environment Institute at York, York UK
- 29 周修萍. 我国东部七省生态系统对酸沉降的相对敏感性. *农村生态环境*, 1996, **12**(1): 1—5

(上接第 91 页)

- 12 Young R A, Onstad C A, Bosch D D and Anderson W P. AGNPS: Agricultural non-point source pollution model: a water analysis tool. Conservation Research Report 35, Washington DC: USDA, ARS, 1987: 77
- 13 Hubber W C, Heaney J P and Nix S J. Storm water management model: user's manual version 1.0, Department of Environmental Engineering and Science, University of Florida, FL., 1981: 569
- 14 US Army Corps of Engineers. Storage, treatment, overflow, runoff model. STORM User's Manual. Hydraulic Engineering Center, David CA: 1997: 170
- 15 Knisel W G (Editor). CREAMS: a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management system, Report No. 26, ARS, U S D A 1980
- 16 Leonard RA, Knisel W G and Sull D A. Gleams: ground-water loading effects of agricultural management systems. *Trans. ASAE*, 1987, **30**(5): 1401—1418
- 17 Cooper A B and Bottcher A B. Basin-scale modeling as tool for water-resource planning. *J. Water Resource Planning Management*, 1993, **119**: 306
- 18 Williams R D and Nicks A D. A modeling approach to evaluate best management practices. *Water Sci. Technol.*, 1993, **28**: 675
- 19 Canale R P et al. Modelling fecal coliform bacteria: model development and application. *Water Research*, 1993, **27**: 703
- 20 Nikolasids N P et al. Movement of nitrogen through an agricultural riparian zone: 2. Distributed modeling. *Water Sci. Technol.*, 1993, **28**: 613
- 21 He C, Riggs J F and Kang Y T. Integration of geographic information systems and a computer model to evaluate impacts of agricultural runoff on water quality. *Water Resource Bulletin*, 1993, **29**(6): 891—900
- 22 Engel B A et al. Non-point source pollution modeling using models integrated with geographic information systems. *Water Sci. Technol.*, 1993, **28**: 685
- 23 Drury C F et al. Influence of tillage on nitrate loss in surface runoff and tile drainage. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, **57**: 797
- 24 Comis D and Hardin B. Midwest water quality project matures. *Agricultural Research*, 1993, **41**: 4
- 25 Brown T C, Brown D and Binkley D. Law and programs for controlling non-point source pollution in forest areas. *Water Resource Bulletin*, 1993, **29**(1): 1—3
- 26 Pignatello J J et al. Elution of aged and freshly added herbicides from a soil. *Environ. Sci. Technol.*, 1993, **27**: 1563
- 27 Isensee A R and Sadeghi A M. Impact of tillage practice on runoff and pesticide, Transport. *J. Soil and Water Conserv.*, 1993, **48**: 523
- 28 Hipp B et al. Use of resource-efficient plants to reduce nitrogen, phosphorus, and pesticide runoff in residential and commercial landscapes. *Water Sci. Technol.*, 1993, **28**: 295
- 29 Haycock N E and Pinay G. Nitrate retention in grass and poplar vegetated riparian buffer strips during the winter. *J. Environ. Quality*, 1993, **22**: 273—278
- 30 Horner R R, Skupien J J et al. Fundamentals of urban runoff management: technical and institutional issues, Washington, DC: Terrene Institute. 1994: 302