

非点源污染的管理及控制^{*}

贺缠生

傅伯杰 陈利顶

(美国西密歇根大学地理系, 卡拉马祖, 密歇根 49008) (中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要 非点源污染是指溶解的或固体污染物从非特定的地域, 在降水和径流冲刷作用下, 通过径流过程而汇入受纳水体(如河流、湖泊、水库、海湾等)引起的水体污染。主要起源于土壤侵蚀、农药与化肥的施用、农村家畜粪便与垃圾、农田污水灌溉、城镇地表径流、林区地表径流和大气干湿沉降等污染源。由于其形成过程受区域地理条件、气候条件、土壤结构、土地利用方式、植被覆盖和降水过程等多种因素影响, 具有随机性大、分布范围广、形成机理模糊、潜伏性强、滞后发生和管理控制难度大的特点。非点源污染的发生, 对区域生态环境和人类健康形成了严重的危害, 不仅污染饮用水源, 而且造成地表水的富营养化和地下水污染, 破坏水生生物的生存环境, 引起生物量的减少或死亡。本文在分析了非点源污染的形成、特征和危害之后, 详细介绍了美国在非点源污染管理与控制方面的经验, 对于我国在这方面的研究和管理具有重要的指导意义。

关键词 非点源污染, 危害, 管理与控制, 区域生态环境。

Non-point Source Pollution Control and Management

Chansheng He

(Department of Geography, Western Michigan University, Kalamazoo, MI 49008, USA)

Bojie Fu Liding Chen

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

Abstract Compared to point source pollution, non-point source pollution is more common and severe and its management is also more challenging. Non-point source pollution originates from diffuse areas where some solvable or solid pollutants are produced. When these pollutants enter the waterbodies, such as lakes, river, reservoir and gulf with runoff during rainy season, water pollution or eutrophication could be induced. Normally, the soil erosion, application of chemical fertilizer and pesticide in farmland, piling of domestic animal's excrement or garbage in rural areas, surface-runoff from urban areas and forest areas, irrigation with waste water in farmland and air dry-wet deposit are considered as the principal sources of non-point source pollution. Due to the influence of various factors, non-point source pollution is characterized by random process, complex mechanism, widespread distribution, latent occurrence. Thus a practical difficulty is remained to study and control non-point source pollution. Apart from sources, adverse effects and characteristics of non-point source pollution were analyzed in this paper, the experiences and methods on managing and controlling non-point source pollution in USA were also introduced. It will be helpful for Chinese government to make a feasible decision on this issue.

Keywords non-point source pollution, adverse effect, management and control, regional eco-environment.

非点源污染(Non-point Source Pollution)与点源污染相对应, 是指溶解的或固体污染物从非特定的地点, 在降水和径流冲刷作用下, 通过径流过程而汇入受纳水体(如河流、湖泊、水库、海湾等), 引起的水体污染^[1]。其污染物类型主要有盐分、重金属和有机物。由于非点源污染起源于分散、多样的土地地区, 其地理边界和位置难以识别和确定。和点源污染相比, 非点源污染危害规模大, 防治困难。在美国, 非点源污染已经成为环境污染的第一因素, 60%的水资源污染起源于非点源污染^[2]。在北美和西欧, 非点源污染的研究和防治受到高度重视, 为此已进行了多年的研究工作。而在中国, 对非点源污染的研究起步于80年代中期, 在水资源和生态环境质量方面的研究和管理相对比较落后。本文旨在研究非点源污染的特点和介绍美国在非点源

污染控制与管理方面的经验, 以期对中国这方面的研究管理工作有所借鉴。

1 非点源污染的起源、类型和特点

1.1 非点源污染的类型

(1) 土壤侵蚀 土壤侵蚀是规模最大、危害程度最严重的一种非点源污染, 从表面上看, 土壤侵蚀损失了土壤表层的有机质层, 但同时随着土壤侵蚀, 有许多污染物进入水体, 形成非点源污染。据估计, 自人类开展

^{*} 国家自然科学基金资助项目(Project Supported by National Natural Science Foundation of China): 49571003; 49725101, 中国科学院水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金资助项目
贺缠生: 男, 39岁, 博士
收稿日期: 1997-12-01

农业生产活动以来,全球有 4.3 亿 hm^2 土地因遭受严重的土壤侵蚀而遗弃.现在全世界每年遭受土壤侵蚀而弃耕的土地仍达 500 万 hm^2 . 美国大陆每年因土壤侵蚀进入河流的泥沙量达 10 亿 t,造成的直接经济损失达 60 亿美元^[3].

(2) 农田化肥、农药施用、农村家畜粪便与垃圾 农药、化肥、家畜粪便和垃圾堆放是另外一个重要的污染源.许多研究表明,农药和化肥的使用是造成水体污染和富营养化的最主要来源.美国每年生产约 5 亿 t 的农药,其中 70% 用于农田,由此引起的地下水和地表水污染的事例不胜枚举. USEPA 把农业列为全美河流和湖泊污染的第一污染源^[2].此外,农村家畜粪便和垃圾的随意堆放,在降雨季节,随着地表径流也会进入水体形成大面积的污染.

(3) 农田污水灌溉 污水灌溉是利用土壤对污染物的自然净化作用和农作物对营养元素的吸收作用,净化污水,虽然污水中的营养元素可以为农作物吸收,但如果施用量过大或时间不恰当,许多污水未经过农作物和土壤的自然净化而直接进入水体,同样会导致土壤和地表水及地下水污染.目前美国有 1%—5% 的地表水污染起源于农田污水灌溉^[4].

(4) 城镇地表径流污染 主要指在降雨过程中,雨水及所形成的径流,流经城镇地面,如商业区、街道、停车场等,聚集一系列污染物,如原油、盐分、氮、磷、有毒物质及杂物,随之进入河流或湖泊,污染地表水或地下水. US EPA 把城市地表径流列为导致全美河流和湖泊污染的第三大污染源^[2].

(5) 矿区、建筑工地地表径流污染 主要是由于人类活动引起的,一方面由于不合理的人为活动,破坏了原来的土壤结构和植被面貌,使得土壤表层裸露,导致水土流失增加;另一方面,在降雨条件下,散落在矿区地表的泥沙、盐类、酸类物质和残留矿渣等污染物,会随着地表径流进入水体,形成非点源污染.美国有 5% 的地表水污染是由建筑工地的地表径流引起的^[4].

(5) 林区地表径流污染 主要指在降雨过程中所发生的地表侵蚀,使地表的植物残枝、落叶以及形成的腐殖物随地表径流进入水体,在一定程度上也可以形成非点源污染.由于林区人为活动强度相对较低,地表植被覆盖率较高,与其它非点源污染相比,林区地表径流形成的非点源污染负荷一般较低.但在森林采伐区,由于对地表植被的破坏,可以增加地表径流和土壤侵蚀,因而增加区域的非点源污染.

(7) 大气干沉降与湿沉降 大气中的有毒物质直接降落在土壤或水面,或随同降雨或降雪降落在土壤

或水体表面.酸雨形成的污染已经成为世界上公认的环境灾害之一,不仅对建筑物和植被造成直接的破坏,还会对土壤和水体形成污染.美国著名的五大湖第一大污染源就是大气污染^[2].

1.2 非点源污染的特征

(1) 随机性 从非点源污染的起源和形成过程分析,非点源污染与区域的降水过程密切相关.无论是城市地表径流、矿区地表径流,还是土壤侵蚀,其规模和强度均与降水过程密切相关.此外,非点源污染的形成与其他许多因素,如土壤结构、农作物类型、气候、地质地貌等密切相关^[5].由于降水的随机性和其他影响因子的不确定性,决定了非点源污染的形成具有较大的随机性.

(2) 广泛性 随着世界经济的发展,人工生产的许多为自然环境无法接受的化学物质逐年增多,在地球表层分布广泛,随着径流进入水体的污染物遍地可见,其所产生的生态环境影响更是深远而广泛.

(3) 滞后性 农田中农药和化肥施用造成的污染,在很大程度上与降雨和径流立即发生密切相关,同时也与农药和化肥的施用量有关.研究显示,当施用化肥后,若遇到降雨,造成的非点源污染将会十分严重^[5].研究还显示,农药和化肥在农田存在的时间长短也将决定非点源污染形成的滞后性的长短^[6].通常,一次农药或化肥的使用所造成的非点源污染将是长期的.

(4) 模糊性 影响非点源污染的因子复杂多样.由于缺乏明确固定的污染源,在判断污染物的来源时存在一定的难度.以农业非点源污染为例,农药和化肥的施用是非点源污染的主要来源,但不同的农药施用量、在生长季节、农作物类型、使用方式、土壤性质和降水条件不同时,所导致的农药和养分的流失将会有巨大的差异,而不同因子之间又相互影响,因而使得非点源污染的形成机理具有较大的模糊性.

(5) 潜伏性 以农药、化肥施用为例,使用之后,在无降水或灌溉时,形成的非点源污染十分微弱.在更多的情况下,非点源污染直接起因于降水和灌溉的时间.城市地表径流污染也有同样的特点.在无降水条件下,散落在城市空间的许多固体污染物、垃圾对水体的危害十分有限,但在降水时,随着径流进入水体将会形成严重的非点源污染.城市中的垃圾或其它附着于建筑物表面的污染物均是潜在的非点源污染源.

(6) 研究和控制难度大 由于非点源污染来源的复杂性,机理的模糊性和形成的潜伏性,在研究和控制非点源污染方面具有较大的难度.

2 非点源污染的危害

非点源污染对农业生产、水资源、水生生物栖息地和流域水文特征均有着严重影响。

2.1 淤积水体,降低水体的生态功能

由于水土流失,大量泥沙进入水体,一方面河床、湖泊水面升高,降低了水体的容纳水量。同时由于径流携带的大量泥沙及其有害物质,将会对水体的水质产生严重的影响,破坏水生生物的生存环境。在我国,由于水土流失导致湖泊面积缩小的例子不胜枚举,如洞庭湖、太湖、白洋淀和青海湖等,由于水体面积和体积的减小,大大降低了水体防洪、抗旱的能力,改变了水生生物的生存环境。

2.2 引起水体的富营养化,破坏水生生物生存环境

由于过量施用化肥和农药,大量的氮磷元素进入地下和地表水体,将导致水体的污染,甚至会形成水体的富营养化,破坏了水生生物的生存环境。由此,将会阻碍水生生物的呼吸和觅食,甚或引起水生生物的猝死,从而导致局域水生生态系统的失调。

2.3 污染饮用水源,影响人体健康

US EPA 1990年调查显示,全美农村1%公用供水井显示 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的存在,53%的家庭用水井显示 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的存在,2%饮用水井的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量超过安全用水标准规定的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量。氮、磷等营养元素是污染河流和湖泊的3大污染物之一。由于家畜粪便中常常包含大量细菌,尤其含有大量的大肠杆菌;随着径流进入水体后会形成大面积的非点源污染,并会造成疾病的广泛传播。1994年全美有2000多个海滩因水体细菌含量过高而关闭^[7]。

2.4 造成建筑物和财产的直接损失

随着近代工业的高速发展,大气中的 CO_2 和 SO_2 的含量迅速增加,由此导致的酸雨在全球范围内愈演愈烈。酸雨的形成,不仅对地表植被会形成直接的影响,破坏生态环境,而且降落在建筑物和衣物表面,还会对建筑物和衣物造成腐蚀,形成直接的经济损失。

3 非点源污染的控制与管理

对非点源污染的控制与管理包括两个方面,其一是对污染源的控制,将非点源污染物的排放控制在最低限度;其二是对污染物扩散途径的控制,通过研究非点源污染的扩散机理,采取适当的措施,减少污染物排入地下或地表水体的数量。

3.1 非点源污染的起源和机理研究

通常是通过研究、分析水体水质的变化,来确定非

点源污染的类型和来源。利用数学模型模拟非点源污染的形成成为研究非点源污染来源和扩散的有效手段。在土壤侵蚀模拟实验方面,通用土壤侵蚀方程式(Universal Soil Loss Equation,简称USLE)^[8],修改后的通用土壤侵蚀方程式(Revised USLE)^[9]是研究土壤侵蚀最为广泛的一种模型,此外,还有土壤侵蚀产沙模拟模型(Erosion Productivity Impact Calculator)^[10],非点源污染环境影响评价模型(The Areal, Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation)^[11],农业非点源污染模拟模型(Agricultural Nonpoint Source Pollution Model)^[12]等用来模拟地表径流产沙过程和非点源污染的形成过程。城市地表径流数学模型包括SWMM模型(Storm Water Management Model)^[13]和STORM模型(Storage Treatment, Overflow Runoff Model)^[14]。

在模拟化肥和农药在土壤中的迁移方面,现有的数学模型包括农业管理系统中化学污染物径流负荷与流失模型(Chemical Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems, CREAMS)^[15],农田系统地下水污染负荷效应模拟模型(Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems)^[16]。

在实际应用方面,Cooper and Bottcher (1993)应用CREAMS模型模拟了营养元素在土壤中的迁移规律和变化范围^[17]。Williams and Nicks (1993)应用CREAMS和水蚀预测模型(WEPP)评价植被过滤带对土壤侵蚀和营养元素迁移和截留的作用^[18]。

Canale (1993)建立了大肠杆菌数学模型用来预测城市地表径流中大肠杆菌的变化和管理^[19]。Nikolaids (1993)利用营养元素传输模型(Nutrient Transport and Transformation)模拟玉米田块中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 在地下水中的含量变化特征和迁移过程^[20]。

利用GIS较强的数据处理功能,提取模型所需参数,大大促进了对非点源污染的研究,He (1993)发展了一个软件系统,将GRASS(GIS软件)和AGNPS相结合^[21],从土地利用图、数字地面高程图、土壤图等GIS文件中自动加工提取ASNPS所需的22个参数,研究了密歇根州一个农业流域土壤侵蚀及营养元素(氮和磷)流失情况,并在模拟预测的结果基础上,提出了农业最佳管理措施,如少耕法、免耕法及作物残茬覆盖对控制土壤侵蚀和养分流失的作用。Engel (1993)发展了GRASS和AGNPS及AWSWERS的界面,模拟土壤侵蚀及营养元素在农业流域中的损失^[22]。

3.2 非点源污染的控制与管理

(1) 源的控制与管理 对于不同非点源污染类型,

应采取不同的控制措施. 对于农田非点源污染, 应减少或控制农药、化肥的施用量. 城市非点源污染, 保持城市地面的清洁, 减少污染物的存在, 将会大大地降低降水径流对地表或地下水体的污染. 对此需制定合理的政策法规和实行科学的管理.

政策法规: 农田非点源污染是所有非点源污染中最为严重的类型之一, 但农药和化肥的使用也是促进农作物增产的最有效的手段之一. 虽然许多研究表明, 改变农田的耕作方式和管理措施^[23], 会在一定程度上减少农药或养分的流失, 降低非点源污染负荷, 但与直接控制农药和化肥的施用相比, 微乎其微. 对此, 制定合理的政策法规, 鼓励农场主采用先进的科学的农田管理方式, 发展生态农业具有重要意义. 在美国, 已经实行的政策法规包括: 降低农产品税收, 增加对化肥和农药的税收, 设立专项基金鼓励农民采用最佳管理措施等, 并已取得明显的效果^[24].

科学管理与监测: 在不同性质和不同层次部门, 建立相应的非点源污染监测与管理机构, 随时监测研究非点源污染的起源、特点和变化, 在其形成之前消除污染物的存在, 成为非点源污染管理的基础. 监测非点源污染的源和汇, 研究非点源污染的形成特征和机制尤为重要.

(2) 汇的控制与管理 在诸多因素中, 最佳管理措施(Best Management Practices, BMP) 在控制非点源污染中占有极为重要的地位. US EPA 把 BMP 定义为: “任何能够减少或预防水资源污染的方法、措施或操作程序, 包括工程、非工程措施的操作和维护程序”^[25]. 现已提出的最佳管理措施有: 少耕法、免耕法、综合病虫害防治、防护林、草地过滤带、家畜粪肥大田合理施用等方法. 研究显示, 农药在地表径流中的含量与农药施用后的降雨时间和强度有关^[5], 土壤中未被吸附的农药成为地下水污染的潜在因素^[26]. 马里兰州的研究表明, 玉米田块施用农药 Atrazine 和 Cyanazine, 免耕田块地表径流中农药含量是传统耕作法玉米田块的 2—10 倍^[27]. 加拿大的研究表明, 采用传统耕作法的田块 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的渗漏量要比采用少耕法或免耕法的田块大, 但地表径流中的含氮量却是少耕法或免耕法的田块高于传统耕作法田块^[23]. 植被覆盖和合理分布暴雨蓄水池会降低城市地表径流及肥料、农药流失^[28]. 采用天然渠道、人工湿地、沙层过滤及缓冲带等, 都可减少城市地表径流.

利用生态工程措施控制非点源污染是目前采取的另一个有效手段. 许多研究表明, 在农田与水体之间建立合理的草地或林地过滤带, 将会大大减少水体中的

氮磷含量^[29]. 同时采取不同的农作物对营养元素吸收的互补性, 采取合理的间作套种, 同样可以大大减少养分元素的流失和对水体的污染.

4 美国在非点源污染控制与管理方面的经验

4.1 非点源污染控制的有关联邦法律

(1) 清洁水法规(The Clean Water Act) 清洁水法规中有 13 项条文涉及到非点源污染的研究、管理和控制. 其中尤以第 319 号条文更为直接明确, 条文规定对未达到水质要求的水体, 必须详尽描述非点源污染的种类及污染物, 并提出对此准备采用的最佳管理措施. 这个计划如得到 US EPA 的批准, 州政府即可得到财政支持. 用于流域范围内非点源污染管理与控制项目的资金来源主要是联邦政府的专项拨款^[26, 31].

(2) 联邦政府安全饮用水标准(Federal Safe Drinking Water Act) 这项法规设专款支持州和其它地方政府提出饮用水源(Well head) 保护项目. 通过识别、调查区域非点源污染及点源污染的类型和特点, 建立地方性水体保护条例.

(3) 联邦机构与非点源污染有关的项目 除(1) 和(2) 的法律外, 联邦政府有关机构还设立一些针对性比较强的项目, 涉及到非点源污染的具体管理.

美国农业部设立的农业保护项目, 用专款支持农场主采用水土保持措施减少非点源污染; 农田保护休闲项目, 把不适于耕作的农田退出用于种草植树, 条例规定联邦政府将在 12 年合同期内, 每年给农场主拨款补偿由此造成的经济损失; 湿地保护项目, 拨专款鼓励把已用作农田的湿地还原; 资源保护利用, 用于支持地方政府实施农村规划, 发展与环境保护有关的项目.

在水土保持方面, 美国水土保持局(现自然资源保护局) 提供技术指导, 帮助地方政府控制土壤侵蚀, 改善水质, 减少污染, 保护自然资源; 流域保护和防洪专款支持小流域防洪和控制水资源污染.

此外, 美国内政部也有一系列项目涉及到非点源污染的管理, 如全国水质评价, 水资源数据库建立, 海岸湿地规划、保护和恢复项目, 土地和水资源保护等, 通过非点源污染的监测、评价及通过购买某些具有保护价值的土地来控制非点源污染.

联邦高速公路管理局设有专款支持高速公路两旁的水土保持、绿化、湿地保护等环境项目.

美国大气海洋管理局(NOAA) 设有海滩管理条例, 要求邻近海岸的州必须制订非点源污染管理计划, 保护海滩资源和水质, 且管理计划必须上报 US EPA 和大气海洋管理局批准. 这些项目一般由联邦政府机

构提供主要财政资助,州和地方政府分摊部分经费开支,以鼓励地方政府参与项目的规划、制订和实施^[30]。

4.2 非点源污染的组织管理

(1) 组织机构 美国的非点源污染控制项目一般由州政府的环境保护厅、水资源厅或自然资源厅的水资源处全权负责,协同农业厅、卫生厅、交通厅等部门制订 10 到 20 年的综合法规方案,确定具体目标和所需经费,报全美环境保护总署批准^[30]。

(2) 项目管理 美国州政府一般只负责审批非点源污染的规划和实施方案,具体的工程设计和实施则由私立咨询公司完成,这将减轻政府部门的负担,避免机构臃肿和庞大。

(3) 项目操作和维护 美国的非点源污染控制项目一般由联邦政府和州政府提供前 3—5 年的工程费用,后期绿化、操作和维护费用则由地方政府承担。

(4) 监测和评价 非点源污染项目的监测包括水化学、生物、沉积物等分析指标。州政府和地方政府管理部门定期检查项目进展,评价项目质量和效益,以确保项目按计划实施。如项目实施不能达到计划要求,州政府和地方政府将协同分析存在的问题,提出解决方案。如属渎职者,州政府可取消对地方政府的财政拨款,勒令项目停工。严重情况下,失职者甚至需要承担法律责任^[30]。

(5) 教育 为了项目的正常管理,州政府和地方政府的项目管理人员需要接受系统培训,以正确理解联邦政府和州政府的新法规和政策。公众也需要接受教育,以改变日常不合理的行为,减少污染,保护环境。

(6) 技术指导 州和地方政府需要联邦政府提供法律和技术指导,以确保非点源污染控制项目的成功。美国联邦政府有关机构除定期举办培训班和讲座,介绍非点源污染控制的新政策、新要求 and 新技术外,还经常访问各州有关机构,回答解决有关疑难问题。

(7) 科学研究 非点源污染控制既包括非工程措施,如土地利用规划、区划、城市管理、化肥农药施用、废物再利用等,也包括工程措施如暴雨蓄积池、草地过滤带、防风林等,牵涉范围广,法律、工程、生物、经济和社会因素等相互交叉。这些因素都需要以科学研究为依托,以保证非点源污染控制项目的正确实施。美国联邦政府和州政府每年都拨出大量资金用于支持非点源污染研究,包括规划、设计、实施、最佳管理措施的效益评价等。

(8) 财政经费 非点源污染控制涉及面广、难度大、时间尺度长、所需经费多。为解决经费短缺问题,美国各级政府一般通过专项税收和收费,设立了各种专

项基金,如材料基金、环境基金、汽油基金等,用于环境保护。此外,通过向社会,特别是大公司、大财团募捐,来解决环境项目资金的短缺问题。如在 1993 年美国的公司和基金会用于社会和环境的基金达 150 亿美元,大大缓解了联邦政府和地方政府项目资金短缺问题。

5 小结

非点源污染是危害全球生态环境的一个最重要因素。非点源污染主要起源于区域的水土流失、农田中农药和化肥的使用、农村家畜粪便和垃圾的堆放、城镇地表径流、矿区地表径流、林区地表径流和大气干湿沉降。在形成上,具有随机性大,模糊性强,分布广泛,一定的滞后性和潜在性强的特点。由于非点源污染涉及因素多、时间尺度长、投资要求大,在管理和控制上比点源污染更为困难。中国具有广博的土地面积,自然生态条件复杂,非点源污染类型多样而又复杂,加上我国对非点源污染的研究起步较晚,在非点源污染的管理和控制上尚有较多的工作要做,借鉴其他发达国家在这方面的经验和教训,对于制定合适非点源污染管理与控制法规及条例具有重要的意义。

参 考 文 献

- 1 Novotny V and Olem H. Water quality: prevention, identification and management of diffuse pollution. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1993: 2
 - 2 US EPA. National water quality inventory. Report to Congress Executive Summary. Washington DC: USEPA 1995: 497
 - 3 Lai R Editor 2nd edition. Soil erosion research methods, Soil and Water Conservation Society. Iowa: Ankeny, 1994: 344
 - 4 Griffin Jr R. Introducing NPS water pollution. EPA Journal Nov./Dec., 1991: 6—9
 - 5 Southwick L M et al. . Runoff losses of norflurazon: effect of runoff timing. J. Agric. Food Chem., 1993, **41**: 1503—1511
 - 6 Line D F, Osmand D L et al. . Non-point sources. Water Environment Research, 1994, **66**(4): 585—601
 - 7 US EPA. Liquid assets: a summertime perspective on the importance of clean water to the Nation's Economy, Office of Water. Washington DC: USEPA 1996: 23
 - 8 Wischmeier W H. Use and Misuse of the universal soil loss equation. Journal of Soil and Water Conservation, 1976, **31**(1): 5—9
 - 9 Renard K G, Foster G R et al. . Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation(RUSLE). ARS, USDA, 1994
 - 10 Sharpley A N and Williams J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator, USDA ARS Technical Bulletin, No-1768, 1990: 235
 - 11 Beasley D B, Huggins L F and Monke E J. ANSWERS: A model for watershed planning, Trans. ASAE, 1980, **23**: 938—944
- (下转第 96 页)

- 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