

非点源污染模型研究

胡雪涛,陈吉宁,张天柱(清华大学环境科学与工程系,北京 100084)

摘要:随着工业污染源的有效控制,非点源污染已经成为我国重要污染类型之一,如何科学地认识并有效控制非点源污染因而成为一个紧迫的研究课题.本文回顾了描述非点源的基础工具——非点源模型 30 多年来的发展历史,就非点源模型的主要类型、结构和特点进行了系统的总结,并对目前主要的非点源模型进行了比较分析,探讨了非点源模型发展的趋势,以期为我国非点源污染的控制提供可借鉴的经验.

关键词:非点源;模型

中图分类号:X11 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2002)03-06-01 24

A Study on Non Point Source Pollution Models

Hu Xuetao, Chen Jining, Zhang Tianzhu (Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: With the effective control of industrial waste water, pollution of non-point sources has become increasingly important in China. The understanding of non-point source pollution processes, mostly through mathematical models, is thus a prior knowledge to its effective control. A review is presented in this paper, regarding the development of non-point source pollution models. The conceptualization, structure and major processes of non-point source models are systematically summarized and several widely applied models are compared so as to assess its state of art. The future development trends of non-point source model are also discussed.

Keywords: nonpoint source; model

非点源污染(Nonpoint pollution),或称面源污染(Diffused pollution),是指溶解性或固体污染物在大面积降水和径流冲刷作用下汇入受纳水体而引起的水体污染(Novotny 和 Olem, 1993),其主要来源包括水土流失、农业化学品过量施用、城市径流、畜禽养殖和农业与农村废弃物等.在发达国家,随着工业和生活污染源等点污染源的有效控制,非点源污染已成为水体污染的主要因素,例如美国目前约有 60% 的河流和 50% 的湖泊污染与非点源污染有关,1995 年美国国家环保局用于控制非点源污染的财政拨款达 3.7 亿美元(USEPA, 1996).在我国,非点源污染问题也日益严重.在太湖和滇池等重要湖泊,非点源污染已经成为水质恶化的主要原因之一(金相灿, 1995; 昆明市环境科学研究所, 1992).

非点源污染在近 30 年间受到了广泛关注,非点源污染模型的研究是其中的主要领域之一.非点源污染模型通过对整个流域系统及其内部发生的复杂污染过程进行定量描述,帮助我们分析非点源污染产生的时间和空间特征,识别其主要来源和迁移路径,预报污染的产生负荷及其对水体的影响,并评估土地利用的变化以及不同的管理与技术措施对非点源污染负荷和水

质的影响,为流域规划和管理提供决策依据.

1 非点源模型的发展

早期的非点源研究始于土地利用对于河流水质产生影响的认识,其方法往往依据因果分析和统计分析的方法建立统计模型,并以此建立污染负荷与流域土地利用或径流量之间的统计关系(Haith, 1976; Rast 和 Lee, 1983; Whipple 和 Hunter, 1977; Wanielista 等, 1977).这类统计模型对数据的需求比较低,能够简便地计算出流域出口处的污染负荷,表现了较强的实用性和准确性,因而在早期得到了较为广泛的应用.但是由于它们难以描述污染物迁移的路径与机理,使得这类模型的进一步应用受到了较大的限制.

自 70 年代中后期以来,随着对非点源污染物理化学过程研究的深入和对非点源过程的广泛监测,机理模型逐渐成为非点源模型开发的主要方向,其中著名的有模拟城市暴雨径流污染的 SWMM、STORM,模拟农业污染的 ARM,以及流域模型 ANSWERS 和 HSP

基金项目:高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助.
作者简介:胡雪涛(1975~),男,硕士研究生,主要从事非点源污染模型与控制方面的研究.

收稿日期:2001-03-14;修订日期:2001-06-13

等.美国农业部农业研究所开发的 CREAMS(USDA, 1980)模型奠定了非点源模型发展的“里程碑”,它首次对非点源污染的水文、侵蚀和污染物迁移过程进行了系统的综合. CREAMS 推出后,立即引起了广泛的关注,并在其基础上发展出了一系列结构特征类似的模型,如农田小区模型 EPIC(Williams 等,1984),用于模拟农业活动对地下水影响的 GLEAMS(Leonard, R. A. 等,1987),用于模拟大型流域非点源污染负荷的 SWRRB(Williams 等,1985)和 SWAT(Arnold 等,1998)等.此外,Haith 等(1984)开发了农田小区模型 CNPS, Young 等(1989)开发了中小流域非点源模型 AGNPS, Wilson 等(1984)和 Ascough II 等(1997)分别开发了流域侵蚀和泥沙模型 SEDI MOT II 和 WEPP, Arnold 等(1995)开发了用于大型流域水文和泥沙演算的 ROTO, Abbott 等(1986)开发了欧洲水文系统模型 SHE. 这些尺度和功能各异的模型极大地丰富机理型非点源模型的内涵.

90 年代后期,随着计算机技术的飞速发展和 3S 技术在流域研究中的广泛应用,一些功能强大的超大型流域模型被开发出来. 这些模型已经不再是单纯的数学运算程序,而是集空间信息处理、数据库技术、数学计算、可视化表达等功能于一身的大型专业软件. 其中比较著名的有美国国家环保局开发的 BASINS(Whittemore, 1998) 和美国农业部农业研究所开发的 AGNPS 98(ANPGS98 网站)等.

2 非点源机理模型的结构特点

降雨径流过程(水文过程)、侵蚀过程和污染物的迁移转化过程是决定非点源污染特征的 3 个主要过程,因此通常非点源模型由水文子模型、土壤子侵蚀模型和污染物迁移转化子模型构成(如图 1 所示).

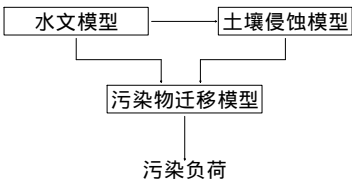


图 1 典型非点源模型的基本框架

Fig.1 Structure of typical NPS models

由于应用的目的不同,实际中非点源模型的结构往往更为复杂,可能涉及水质模拟、气候模拟、作物生长模拟和管理控制费用估算等方面的子模型.

(1) 水文子模型 水文过程是描述非点源污染的基础,水的运动为污染物提供了迁移的介质和能量,因此水文路径也是污染物迁移的路径,其描述的合理性和准确性直接影响到非点源污染模型的模拟结果.早

期的非点源水文模型主要多以模拟地表径流为主,对侧向壤中流则考虑的不多.典型的模型包括 CREAMS、CNPS、ANS WERS 和早期的 AGNPS 模型,它们都采用美国农业部水土保持局开发的 SCS 水文模型(McCuen, 1982; Chow 等, 1988)来计算暴雨径流.后来的 SWRRB 和 EPIC 模型增加了对侧向壤中流的模拟, SWAT 模型更增加了对浅层地下水的模拟.特别是美国 EPA 组织开发 HSPF 模型(Johanson 等, 1983; Bicknell 等, 1996),它采用的斯坦福流域水文模型(袁作新, 1988)涉及了十余个水文过程.但采用如此复杂的水文模型建立非点源模型并不多见.

(2) 土壤侵蚀子模型 非点源模型中土壤侵蚀的主要过程指是降雨侵蚀.研究表明,随暴雨侵蚀土壤流失进入水体的非溶解性磷占总流失磷量的绝大部分(Sharpley 等, 1994),因此侵蚀过程是非点源污染的重要过程.目前,很多非点源污染模型采用通用土壤流失方程(USLE)(Wischmeier 等, 1965; Singh, 1992; 王汉存, 1992)及其改进形式作为侵蚀子模型.该模型是一个考虑了降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、地形因子、作物管理因子及土壤侵蚀控制措施因子等 5 个因素的统计模型.相反, CREAMS、ANS WERS 和 HSPF 等模型则采用了更具机理性的侵蚀模型,侵蚀过程被分为雨滴溅蚀、径流冲蚀和径流运移等若干个子过程,并分别进行模拟.80 年代后期,美国 USDA 开发了新一代机理型的土壤侵蚀模型——WEPP(Ascough II, 1996).该模型对影响土壤侵蚀的气象、水文和水力学条件以及土壤侵蚀的机械过程等进行了全面模拟,使其各步演算都具有明确的物理意义,从而为提高模型精度创造了必要的条件.尽管对输入数据的大量需求影响了目前该模型的广泛应用,但是随着空间地理信息技术的飞速发展,数据将不再是模型应用的阻碍.

(3) 污染物迁移模型 污染物的迁移过程不仅与水文条件和侵蚀条件有关,还与污染物在土壤中的物理、化学形态以及分布等密切相关.而污染物各物理、化学形态之间的转化以及在土壤中的分布的变化过程是十分复杂的,这给非点源污染模型提出了十分棘手而又极富挑战性的课题.非点源模型对污染物迁移的模拟可分为 2 类,一类是不考虑污染物的平衡过程,认为污染物在土壤中的含量是恒定的,典型的有早期的 AGNPS 模型和 CNPS 模型等.这类模型往往只将污染物根据物理形态划分为溶解性和非溶解性 2 种,根据土壤侵蚀量和暴雨径流量来计算 2 种形态污染物的负荷.另一类是考虑污染物平衡过程,即土壤中污染物的状态和含量是受到各种过程影响的.如 CREAMS 模型在

对氮的模拟中,考虑了地表径流流失、入渗淋失、化肥输入等物理过程,有机氮矿化、反硝化等化学过程以及作物吸收等生物过程,氮除了具有溶解和非溶解 2 种物理状态外,还分为有机氮、作物氮和硝酸盐氮 3 种化学状态. EPIC 和 SWRRB 中则增加了氮的生物固定、无机氮向有机氮的转化以及溶解性氮随侧向壤中流的迁移等过程,有机氮又被划分为活泼(active) 有机氮和惰性(stable) 有机氮 2 种状态. SWAT 模型在 EPIC 基础上又

增加了对氨态氮挥发过程的模拟. 而 HSPF 对氮平衡的模拟更为复杂,有机氮也被划分为溶解性和非溶解性 2 类,并且通过吸附与解吸过程相互转化.

3 常见非点源污染模型的比较

目前非点源模型数量繁多,表 1 对目前影响较大、应用较广的 13 个机理模型进行了总结,并由此可以发现非点源模型发展的一些特点.

(1) 模型的空间和时间尺度逐步扩大. 随着人们对

表 1 常见非点源模型对比

Table 1 Compare of several non-point source pollution models								
模型名称	最早开发时间	最新版本发布时间	参数形式	空间尺度	时间尺度	时间步长	模型结构	参考文献
HSPF	1976	1996 (v.11)	集中参数	流域	长期连续	1 min 到 1 d	斯坦福水文模型,侵蚀模型考虑雨滴溅蚀、径流冲刷侵蚀和沉积作用;污染物包括氮、磷和农药等,考虑复杂的污染物平衡	Johanson 等, 1983; Bicknell 等, 1996
ANSWERS	1977	1996	分散参数	流域	开始为单次暴雨,后发展为长期连续	暴雨期为 60s,非暴雨期为 1 d	水文模型考虑降雨初损、入渗、坡面流和蒸发;侵蚀模型考虑溅蚀、冲蚀和沉积;早期并不考虑污染物迁移,后补充了氮、磷子模型,复杂污染平衡	Beasley, 1980; Bouraoui 等, 1996
CREAMS	1979		集中参数	农田小区	长期连续	1 d	SCS 水文模型,Green Ampt 入渗模型,蒸发;侵蚀模型考虑溅蚀、冲蚀、河道侵蚀和沉积;氮、磷负荷,简单污染物平衡	USDA, 1980; Knisel, 1981
GLEAMS	1986		集中参数	农田小区	长期连续	1 d	水文和侵蚀子模型与 CREAMS 相同;污染物更多考虑农药地下迁移过程	Leonard, R. A. 等, 1987
CNS	1981		集中参数	农田小区	长期连续	水文 1 d 污染物 1 mon	SCS 水文模型,入渗、蒸发,融雪;改进通用土壤流失方程;氮、磷负荷,简单污染物平衡	Haith 等, 1981, 1984
EPIC	1983		集中参数	农田小区	长期连续	1 d	SCS 水文模型,入渗、蒸发,融雪;改进通用土壤流失方程;氮、磷负荷,复杂污染物平衡	Williams 等, 1984
SEDMOT II	1984		集中参数	流域	单次暴雨	3 min	SCS 水文模型,坡面流,河道流;侵蚀部分有两个模型, MUSLE 和 SLOSS;无污染物迁移子模型	Wilson 等, 1984
SWRRB	1984	1993	集中参数	流域	长期连续	1 d	SCS 水文模型,入渗、蒸发,融雪;改进通用土壤流失方程;氮、磷负荷,复杂污染物平衡	Williams 等, 1985
AGNPS	1987	1998	分散参数	流域	开始为单次暴雨,后发展为长期连续	1 d	SCS 水文模型;通用土壤流失方程;氮、磷和 COD 负荷,不考虑污染物平衡	Young, 1989; AGNPS 网站
ROTO	1990		集中参数	大流域	长年连续	1 d	河流水文和泥沙演算,水库水文和泥沙演算	Arnold 等, 1995
CNPS	1996		分散参数	流域	长期连续	1 d	SCS 水文模型,入渗、蒸发;改进通用土壤流失方程;氮、磷负荷,简单污染物平衡	Dikshit 等, 1996
SWAT	1996	2000	集中参数	流域	长期连续	1 d	SCS 水文模型,入渗、蒸发,融雪;改进通用土壤流失方程;氮、磷负荷,复杂污染物平衡	Arnold 等, 1998
LOAD	1996		分散参数	流域	长期连续	1 d	产流系数法计算径流量;无侵蚀模型;统计模型计算 BOD、TN、TP 负荷	VKI, 1996

非点源管理与控制过程向长期化和流域化发展,非点源模型在空间和时间尺度上也不断扩展。ANSWERS 模型的发展最能够体现这一趋势。早期的 ANSWERS 模型用于模拟小区范围内单暴雨的非点源产生负荷,后来它发展为能够在流域范围内的长期连续模拟模型。90 年代后开发的模型在空间和时间尺度上与 80 年代开发的模型相比都有不同程度的扩展,ROTO 模型甚至可以模拟未来 50 至 100 年的状况。

(2) 统计模型在非点源模型中仍然具有不可替代的地位。由于非点源模型的机理十分复杂,使得对非点源污染过程精确的物理描述几乎不可能。同时人们发现对非点源发生机理无限精细的公式描述非但不能增加模型的精度,反而可能造成更大的误差,而且使模型的输入增加,操作更为复杂,运行成本上升。因此,象 SCS 水文模型和通用土壤流失方程这样的统计模型仍然被广泛地应用。CREAMS 的侵蚀子模型十分复杂,描述了侵蚀的多个过程,但是终因过于复杂而影响了它的应用性。因此在后来的 EPIC、SWRRB 和 SWAT 中,均采用了形式更为简单的改进通用土壤流失方程。

(3) 3S 技术在 90 年代以后被普遍采用,并成为非点源模型建立中不可或缺的重要工具。由于非点源污染过程与流域地形、土壤、植被、土地利用等下垫面情况密切相关,因此能否获得准确大量的地面信息是影响非点源模型应用效率和可靠性的至关重要的因素。90 年代以前,地面信息只能靠人工测量获得,成本高,周期长,精度差,因而成为制约非点源模型发展的主要因素。90 年代后,3S 技术是非点源模型研究中的应用使得地面信息数据的数量和质量都大为的提高,从而大大增强了非点源模型的应用性能,同时也推动了大流域非点源模型的快速发展。3S 技术与非点源模型的结合已成为非点源模型研究领域中的热门课题。SWAT、HSPF、LOAD 和 ANSWERS 等模型都是通过 GIS 系统进行数据的读取和表达,并具有图形输入/输出界面。

4 非点源污染模型发展趋势讨论

从目前的发展状况来看,机理型非点源模型将面临如下几个研究重点:

(1) 寻求对土壤侵蚀和污染物在土壤中迁移过程更为合理的表征水平。由于流域在地形和土壤特征上所具有空间复杂性,使得土壤学已有的一些在小区或更微观尺度内获得的关于侵蚀和污染物迁移的研究成果难以推广到流域尺度上。现有的非点源污染模型对污染物在迁移的模拟仍然比较粗略,如何解决微观尺度机理模型推广到宏观尺度上,是目前非点源模型需

要研究的首要课题。

(2) 不确定性分析将成为今后非点源模型研究的重点。任何数学模型的模拟结果都与真实系统之间存在着一定误差,而由于人对系统认知的有限性,使得误差的大小和分布无法确知,从而造成了模型的不确定性,对系统的认知越少,不确定性就越大。由于非点源污染过程十分复杂,人们对它的了解仍然十分有限,因此非点源模型具有很大的不确定性。不确定性分析是近年来在数学模型研究中十分活跃的一个领域,已经形成了较为完善的方法体系(Beck, M.B., 1987),它将成为非点源模型未来研究的主要课题之一。

(3) 非点源模型与大型流域管理模型的结合。近年来欧美国家出现的流域集成管理的思想导致了一种集合污染负荷、水质、工程治理以及费用效益分析等模型与一身大型流域管理模型。由于非点源污染是流域内影响水质的主要过程之一,因此流域非点源模型将成为这种大型模型的重要组成部分。美国国家环保局主持开发的 BASINS 模型(Whittlemore, 1998)标志着这类模型的出现,HSPF 模型就是它的重要组成部分之一。可以预见,随着流域集成管理概念的广泛接受和采用,包含了非点源模型的大型流域管理模型将成为未来数年中流域模型开发的重点。

5 结论

非点源模型是近年来环境模型研究中十分活跃的一个领域,经过 30 多年的发展历史,非点源模型逐步从统计模型过渡到机理模型,机理型非点源模型又形成了以水文子模型、侵蚀子模型和污染物迁移子模型为基本构成的框架模式,其应用尺度也从小区逐步扩大到了大流域,从单次暴雨扩大到了长期连续模拟。3S 技术的应用使得非点源模型的应用性能和精度都有大为提高。今后,非点源模型还将在侵蚀和污染物迁移过程的描述以及不确定性分析等领域不断发展。

我国对非点源的研究和控制仍处在刚刚起步的阶段,随着点源污染的有效控制,非点源污染问题将逐步受到重视,适合中国流域特点的非点源模型的研究也将逐渐繁荣起来。

参考文献:

- 1 Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A et al. Introduction to the European Hydrological System-Structure of a Physically-based, Distributed Modelling system. J. Hydrol., 1986, 87 (1, 2): 61 ~ 77.
- 2 Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A et al. Introduction to the European Hydrological System-Système Hydrologique Européen, 'SHE', 1: History and Philosophy of a Physically-based, Distributed Modelling System. J. Hydrol., 1986, 87 (1, 2): 45 ~ 59.

- 3 Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah T S et al. Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part II: Model Application. JAWRA, 1998, **43**(1): 91 ~ 101.
- 4 Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah T S et al. Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model development. JAWRA, 1998, **43**(1): 73 ~ 89.
- 5 Arnold J G, Williams J R, Maidment D R. Continuous-time water and sediment-routing model for large basins. J. Hydraul. Eng., 1995, **121**(2): 171 ~ 183.
- 6 Ascough II J C, Baffaut C, Nearing M A et al. The WEPP watershed model: I. Hydrology and erosion. Trans. ASAE., 1997, **40**(6): 921 ~ 933.
- 7 Beasley D B, Huggins L F, Monke E J. ANSWERS: A Model for Watershed Planning. Trans. ASAE., 1890, **23**(4): 938 ~ 944.
- 8 Beck M B. Water Quality Modeling: A Review of the Analysis of Uncertainty. Water. Resour. Res., 1987, **23**(8): 1393 ~ 1442.
- 9 Bicknell B R, Imhoff J C, Kittle J L et al. Hydrological Simulation Program FORTRAN, User's Manual for Release 11. Environmental Research Laboratory Office of Research and Development, USEPA, 1996. 755.
- 10 Bouraoui F, Dllaha T A. ANSWERS - 2000: Runoff and Sediment Transport Model. J. Environ. Eng., 1996, **122**(6): 493 ~ 502.
- 11 Chow V T, Maidment D R, Mays L W. Applied Hydrology. New York: McGraw-Hill, 1988. 572.
- 12 Dikshit A K, Loucks D P. Estimating Nonpoint Pollutant Loadings I: A Geographical-Information-Based Nonpoint Source Simulation Model. J. Environ. Sys., 1996, **24**(4): 395 ~ 408.
- 13 Dikshit A K, Loucks D P. Estimating Nonpoint Pollutant Loadings II: A Case Study in the Fall Creek Watershed, New York. J. Environ. Sys., 1996, **25**(1): 81 ~ 95.
- 14 Haith D A. Land Use and Water Quality in New York River. J. Environ. Eng. Div., ASCE., 1976, **102**(1): 1 ~ 15.
- 15 Haith D A, Tubbs L J. Watershed loading functions for nonpoint sources. J. Environ. Eng. Div. ASCE, 1981, **107**(EE1): 121 ~ 137.
- 16 Haith D A, Tubbs L J, Pickering N B. Simulation of pollution by soil erosion and soil nutrient loss. Wageningen, Netherlands: Pudoc, 1984. 77.
- 17 Johanson R C, Kittle J L. Design, programming and maintenance of HSPF. J. Technical Topics in Civil Eng., 1983, **109**(1): 41 ~ 57.
- 18 Knisel W G. Systems for evaluating nonpoint source pollution: an overview. Math. Comput. Simul., 1982, **24**: 173 ~ 184.
- 19 Leonard R A, Knisel W G, Still D A. GLEAMS: Ground-water Loading Effects of Agricultural Management Systems. Trans. ASAE, 1987, **30**(5): 1403 ~ 1418.
- 20 McCuen R H. A Guide to Hydrologic Analysis Using SCS Methods. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1982. 145.
- 21 Novontny V, Chesters G. Handbook of Nonpoint Pollution: Sources and Management. New York: Van Nostrand Reinhold, 1981. 555.
- 22 Pisano M A. Nonpoint sources of pollution: a federal perspective. J. Environ. Eng. Div., ASCE, 1976. **102**(3): 555 ~ 565.
- 23 Sharpley A N, Chapra S C, Wedepohl R. Managing Agricultural Phosphorus for Protection of Surface Waters: Issues and Options. J. Environ. Qual., 1994, **23**: 437 ~ 451.
- 24 Singh V P. Elementary Hydrology. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1992. 973.
- 25 Somlyody L, van Straten G (ed). Modeling and Managing Shallow Lake Eutrophication, with Application to Lake Balaton. Berlin: Springer Verlag, 1986. 386.
- 26 U. S. EPA. Nonpoint Pointers, EPA-841-F-96-004 A, USEPA, Office of Water(4503 F), U. S. Gov. Print. Office, Washington, DC. 1996.
- 27 USDA. CREAMS, A Field Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems. Conservation research report No.26. USDA, Washington, D.C.: 1980. 643.
- 28 VKI, Load: A GIS Based Pollution Load Model. User Guide. VKI main office, Hosholm, Denmark, 53.
- 29 Whipple W, Hunter J. V. Nonpoint sources and planning for water pollution control. J. Water Pollut. Control Fed., 1977, **49**: 15 ~ 23.
- 30 Whittemore R C. The BASINS model. Water Environ. Technol., 1998, **10**(12): 57 ~ 61.
- 31 Williams J R, Jones C A, Dyke P T. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. Trans. ASAE, 1984, **27**(1): 129 ~ 144.
- 32 Williams J R, Nicks A D, Arnold J G. Simulator for Water Resources in Rural Basins. J. Hydraul. Eng., 1985, **111**(6): 970 ~ 186.
- 33 Wilson B N, Barfield B J, Ward A D et al. A Hydrology and Sedimentology Watershed Model. Part I: Operational Format and Hydrologic Component. Trans. ASAE, 1984, **27**(5): 1370 ~ 1377.
- 34 Wilson B N, Barfield B J, Ward A D et al. A Hydrology and Sedimentology Watershed Model. Part II: Sedimentology Component. Trans. ASAE, 1984, **27**(5): 1378 ~ 1384.
- 35 Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall-Erosion of Losses from Cropland East of the Rocky Mountains. USDA Agr. Handbook, 1965. 282.
- 36 Young R A, Onstad C A, Bosch D D et al. AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. J. Soil Water. Conserv., 1989, **44**(2): 168 ~ 173.
- 37 金相灿等. 中国湖泊环境. 北京: 海洋出版社, 1995.
- 38 王汉存. 水土保持原理. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- 39 袁作新(主编). 流域水文模型. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- 40 云南省环境科学研究所. 滇池富营养化调查研究. 昆明: 云南科学技术出版社, 1992.