

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.03.014

# 中国非点源污染负荷计算研究现状与存在问题

刘 庄, 晁建颖, 张 丽, 解宇锋, 庄 巍, 何 斐

(环境保护部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042)

**摘要:** 非点源污染负荷计算对水污染总量控制具有重要意义, 为分析中国非点源污染负荷计算研究的现状与问题, 在系统调研相关文献的基础上, 将中国常用的非点源污染负荷计算方法总结为三大类: 输出系数模型、实证模型和机理模型, 阐述了各种模型的特点及其在中国的研究和应用情况; 从非点源污染的界定、产污量和排污量的区别、国内和国外非点源污染产生环境的差异以及平原河网地区非点源污染负荷的计算 4 个方面分析了中国非点源污染负荷计算研究存在的主要问题; 认为模型和计算方法适应研究区的环境特征是研究工作取得成功的关键, 今后要加强实证研究、理论与模型开发的结合, 逐步建立适应中国环境特点的非点源污染负荷计算方法体系。

**关键词:** 非点源污染; 污染负荷计算; 输出系数模型; 实证模型; 机理模型

**中图分类号:** X52; G353.11      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2015)03-0432-11

非点源污染具有广泛性、随机性、不确定性和难监测等特点<sup>[1]</sup>, 其负荷计算远比点源困难, 但获得准确的水体污染负荷量又是对水环境实施污染总量控制管理的基础和关键<sup>[2]</sup>, 中国的环境管理部门正在探索将非点源污染纳入污染总量控制体系, 非点源污染负荷计算成为不可避免的重要研究内容。

非点源污染负荷计算方法研究始于美国 20 世纪六七十年代, 通过在北美地区开展的一系列深入研究, 研发了包括输出系数模型、机理模型等在内的一系列非点源污染负荷计算方法<sup>[3]</sup>。进入 21 世纪后, 该领域的研究在世界各国引起广泛关注, 除了欧美国家, 日本、韩国和中国等亚洲国家近年来尤其活跃。由于现有主流模型大多是根据北美地区环境特点研发的, 在其他地区应用时, 常常不能很好地适应研究区的特点, 因此, 除了一般性的模型应用、验证和对比研究以外<sup>[4-5]</sup>, 很多研究者还对模型进行改进<sup>[6-7]</sup>, 使之能更好地适应研究区的实际情况; 韩国的 Kang 等<sup>[8]</sup>针对水稻田的降雨径流特征, 对 SWAT 中池塘的水量平衡方程进行了改进; 日本的 Sakaguchi 等<sup>[9]</sup>则引入“潜在渗透率”的概念, 改进了 SWAT 模型中壶穴的降雨径流计算方法, 建立了新的水稻田降雨径流计算模式; 日本的 Boulange 等<sup>[10]</sup>将日本本土的农药污染计算模型 PCPF-1 与 SWAT 相结合, 建立了新的水稻田农药降解和迁移转化模式。

中国的非点源污染研究始于 20 世纪 80 年代<sup>[11]</sup>, 2000 年以前, 总体处于探索阶段, 和国外的交流相对偏少; 2000 年以后, 随着国外非点源污染模型尤其是机理模型的引进发展迅速, 大批研究者运用各种模型和计算方法(主要来自美国)在全国不同地区、不同尺度范围内开展了大量应用研究<sup>[12]</sup>, 近年来在国际上的影响力越来越大。同时, 随着研究工作的深入, 因国内外环境不同而导致的模型和计算方法对研究区特点不适应等方面的问题也日益暴露, 为进一步提高中国在该领域的研究水平, 有必要对这些问题进行系统总结和分析。

收稿日期: 2014-09-10; 网络出版时间: 2015-04-16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20150416.1707.002.html>

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK2011081); 国家自然科学基金资助项目(41301556)

作者简介: 刘庄(1969—), 男, 江苏姜堰人, 研究员, 博士, 主要从事水体污染负荷计算与水质变化预测等研究。

E-mail: liuzhuang@nies.org

## 1 中国非点源污染负荷常用计算方法及其应用情况

根据对近年来国内外非点源污染研究文献的检索和分析,中国目前常用的非点源污染负荷计算方法大体可以归纳为以下三大类:输出系数模型、实证模型和机理模型。各类方法的特点对比见表1。

表1 中国常用非点源污染负荷计算方法及其特点

Table1 Characteristics of commonly used NPS load calculation methods in China

模型	精度	尺度敏感性	对数据的要求	可移植性	国内使用情况
输出系数模型	低	不敏感	低	好	多
实证模型	高	敏感	高	差	少
机理模型	高	敏感	高	好	多

### 1.1 输出系数模型

输出系数模型(Export Coefficient Models)来自一种称为“单位负荷测算”(Unit Load approach)的研究思路,这种思路大约是20世纪70年代在美国发展起来的<sup>[13]</sup>,其核心是测算每个计算单元(人、畜禽或单位土地面积)的污染物产生量,将每个计算单元的平均污染物产生量与总量相乘,估算研究范围内非点源污染的潜在产生量。Johnes<sup>[14]</sup>在总结以往输出系数法研究成果的基础上发表了规范的输出系数模型方程,该模型已经成为输出系数法的经典模型,国内输出系数法方面的研究,大多基于该模型或稍作改进。

$$L = \sum_{i=1}^n E_i A_i I_i + p \quad (1)$$

式中  $L$  为研究区域的总污染负荷量;  $n$  为土地利用类型的种类或牲畜、人口等不同的污染来源,  $E_i$  为第  $i$  种土地利用类型、牲畜或人口的污染物输出系数;  $A_i$  为第  $i$  种土地利用类型的面积或牲畜、人口的数量;  $I_i$  为第  $i$  种污染物的输出量;  $p$  为来自降雨的污染物输出量。

输出系数模型因其结构简单和数据获取容易等特点在国内得到广泛应用<sup>[15]</sup>。该模型忽略了非点源污染复杂的迁移转化过程,可以使用统计数据开展污染负荷计算<sup>[16]</sup>,其计算区域,既可以是边界明确的流域,也可以是不同等级的行政单元,时间步长的设定比较灵活,可以是月、季节甚至年。虽然测算精度通常比机理模型低(如果不测算输移系数,其计算结果只是非点源污染的产生潜力,而不是真正进入水体的污染量),但对尺度不敏感,可移植性好,并可以在较大尺度和较长时间段对非点源污染负荷进行估算。国内输出系数模型的应用,既有将流域作为研究区域的案例<sup>[17]</sup>,也有将行政单元作为研究区域的案例<sup>[18-19]</sup>,研究的时空尺度从中小尺度<sup>[20]</sup>到大尺度<sup>[21]</sup>均有涉及,2007年开展的全国污染源调查,其非点源污染负荷的调查方法,也是基于输出系数模型建立的<sup>[22]</sup>。还有一些研究者对模型进行了改进,引入降雨和地形影响因子,考虑降雨时空分布差异和地形对计算结果的影响<sup>[23]</sup>。

### 1.2 实证模型

实证模型(Empirically Based Models)有时也称为统计模型(Statistic Models),它的研究基础是统计分析,根据长系列降雨、水文和水质监测数据,建立非点源污染负荷变化和降雨、径流变化之间的相关关系,通过回归分析构建经验公式计算非点源污染负荷,这种方法一般适用于内部结构比较单一的小流域,因为小流域内降雨、径流量和污染负荷之间的关系相对简单,大多是线性关系或者简单的非线性关系。实证模型同样不考虑污染的迁移转化,无法从机理上对计算公式进行解释,加之这些公式都是通过回归分析获得,因此,模型通常不可移植,在其他流域使用时,必须根据该流域的水文、水质监测数据重新进行分析,但如果研究的流域面积不大、结构简单且能够在流域出口处获得足够长系列的水文、水质监测数据,该方法也可以获得较高的计算精度。

实证模型的代表是水文分割法,水文分割法尚无规范的名称,也有研究者称之为平均浓度法或其他名称,但研究思路基本一致:将河川径流过程划分为汛期地表径流过程和基流过程,认为降雨径流的冲刷是产

生非点源污染的原动力,非点源污染主要由汛期地表径流携带,而枯水季节的水污染主要由点源污染引起。根据多年的水文和水质监测数据,分别测算枯水期和汛期流域出口处污染物的平均浓度,再根据流域出口处的径流量,就可以计算整个流域的污染负荷并将非点源污染负荷从总负荷中区分出来<sup>[24]</sup>,该方法的应用受研究区水文和其他条件的影响较大,应用的案例总体不多<sup>[25-26]</sup>。由水文分割法进一步发展而来的还有降雨量差值法,其基本思想是:认为只有发生较大降雨并产生地表径流时,非点源污染物才会流失并进入水体,降雨量跟非点源污染负荷之间存在相关关系,可以对任意两场洪水产生的污染负荷之差与降雨量之差进行回归分析,从而获得降雨量与非点源污染负荷之间的相关关系,根据相关关系,结合降雨和水文、水质统计数据,估算流域非点源污染负荷<sup>[27]</sup>。除水文分割法以外,神经网络和灰色关联分析法实质上属于实证模型,少数研究者应用这些方法也开展了一些探索性研究<sup>[28]</sup>。此外,还有一些研究者提出过用流域总负荷减去点源污染负荷的方法来计算非点源污染负荷的思路<sup>[29]</sup>,但由于中国目前污染管理水平不高,准确核算流域点源污染负荷本身就非常困难,因此,几乎没有见到过成功应用的案例。

### 1.3 机理模型

机理模型(physically based models)试图根据非点源污染形成的内在机理,通过数学模型,对降雨径流的形成以及污染物的迁移转化过程进行模拟,它通常包括子流域划分、产汇流计算、污染物流失转化和水质模拟等子模块,不仅考虑污染物的输入和输出情况,还考虑污染物的迁移转化过程;机理模型一般需要与GIS进行耦合,通过GIS进行地形分析和子流域划分。机理模型对数据量和数据精度要求较高,但如果经过规范的率定和验证,能够获得较高的计算精度,并且由于其机理和过程比较明晰,具有良好的可移植性,率定好的模型应用于其他条件类似的流域,也能获得理想的计算结果,机理模型对尺度较为敏感,更适合于中小流域。

目前,无论是国内还是国外,机理模型在非点源污染负荷计算方法中都占据了主导地位,国内广泛使用的机理模型绝大多数来自美国,SWAT(Soil and Water Assessment Tool)、AnnAGNPS(Annualized Agricultural Non-point Source Pollution)和HSPF(Hydrologic Simulation Program Fortran)是应用最为广泛的3种模型,除此以外,ANSWERS(Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation),SWMM(Storm Water Management Model)、WEPP(Water Erosion Prediction Project)等也有一定的应用,国内常用机理模型的特点见表2。

表2 中国常用的机理模型及其特点

Table 2 Characteristics of commonly used physically based models in China

模型名称	计算单元	水文计算方法	污染负荷计算方法	模拟的污染物类型
SWAT	水文响应单元	SCS 曲线法	负荷函数	氮、磷、杀虫剂等
AnnAGNPS	栅格	SCS 曲线法	潜在排放因子	氮、磷、细菌、杀虫剂等
HSPF	子流域	斯坦福模型	累积/冲刷函数	氮、磷、杀虫剂等
ANSWERS	栅格	连续方程	潜在排放因子	氮、磷等
SWMM	子流域	非线性储水	累积/冲刷系数	氮、磷、悬浮物等
WEPP	子流域	风蚀预测模型	负荷函数	泥沙等

SWAT是目前国内应用最多的机理模型,以水文响应单元(HRU, Hydrologic Response Unit)作为基本计算单元<sup>[30]</sup>,参数设置方面将土地利用、土壤、作物类型和农业管理方式等各方面的数据储存在查找表(look-up tables)中,在北美地区使用时,用户输入研究区域的空间、坡度、土壤性质以及土地管理方式等信息,模型可自动从查找表中提取所需要的参数<sup>[3]</sup>;AnnAGNPS与HSPF的基本原理和SWAT类似,在基本计算单元(AnnAGNPS为栅格,HSPF为子流域)等方面略有差异;此外,还有研究者将SWMM、WEPP等用于非点源污染负荷计算研究,与其他模型大多基于源-汇过程开展污染物模拟不同,SWMM的污染物模拟基于累积-冲刷原则,由于具有强大的管道水力计算功能,SWMM更多应用于城市非点源污染负荷的研究<sup>[31]</sup>,WEPP则更多应用于土壤侵蚀的研究<sup>[32]</sup>。

机理模型引入国内后,得到迅速推广,以SWAT应用最为广泛,应用范围已经覆盖北方<sup>[33-34]</sup>和南方<sup>[35]</sup>

的许多地区,研究区域多以中型和小型流域为主<sup>[36-37]</sup>,但也有应用于大流域的案例<sup>[38-39]</sup>,AnnAGNPS和HSPF也有一定的应用<sup>[40-42]</sup>。在应用过程中,国内一些研究者开始尝试对国外模型进行改进,Yang等<sup>[43]</sup>将SWAT与新安江模型进行耦合,运用新安江模型进行径流计算,对国产与国外模型的耦合进行了尝试性研究;Xie和Cui<sup>[44]</sup>对SWAT中壅穴降雨径流计算模式存在的问题进行了分析并针对水稻田的产汇流特征提出了改进方案;郑捷等<sup>[45-46]</sup>在沟渠河网的提取方法、子流域与水文响应单元的划分以及作物耗水量计算等方面对SWAT模型进行了改进;桑学锋等<sup>[47]</sup>针对中国流域水循环过程受人类活动影响较大的特点,基于“自然-人工”的二元水循环模式,对SWAT的水文模块进行了改进;赖正清等<sup>[48]</sup>针对中国西北干旱区河流的特点,通过减少土壤水的贮藏量并增加下渗量对SWAT模型进行改进;余文君等<sup>[49]</sup>将FASST模型与SWAT集成,以改善SWAT对融雪径流的计算;王慧亮等<sup>[50]</sup>提出了运用多模型方法降低模型不确定性的研究思路。

平原河网区产汇流计算结果不理想是目前机理模型存在的主要问题之一,国内一些研究者在平原河网区的产汇流方面开展了探索性研究,针对模型无法在平原河网区自动划分汇流区的问题,提出了多边形河网划分法<sup>[51-52]</sup>与河道嵌入法(Burn-in algorithm)<sup>[44-45,53]</sup>等解决方案,前者运用多边形河网来划分汇流区,将一些骨干河网构成的不规则多边形作为汇流区,多边形汇流区的产水量则根据一定的计算规则分别汇入四周的河道;河道嵌入法首先根据调查资料,概化并绘制研究区域的骨干河网,运用GIS软件的“Burn-in”功能,根据河网的空间分布格局,对DEM进行改造,使河道流经地区格点的高程低于周边地区,离河道越近,高程越低,通过这种方法,人为增加研究区的高程起伏,使子流域划分和汇流计算能够顺利完成。但国内在模型改进方面的研究目前主要局限于对水文模拟技术的改进,而水质模拟方面则较少涉及,总体上不够系统和深入。

## 2 中国非点源污染负荷计算研究存在的主要问题

### 2.1 对非点源污染缺乏清晰的界定

一些国外研究者认为中国很多非点源污染负荷计算研究的结果总体偏高<sup>[3]</sup>,根据第一次全国污染源普查公报,中国农业源COD、TN和TP占总排放量的比重分别为43.71%、57.19%和67.27%<sup>[54]</sup>;亚洲开发银行发布的一份报告指出,2001年中国农村非点源COD所占的比重是城镇和工业点源COD的1.42倍,农村TN和TP的负荷也占了大部分<sup>[55]</sup>;更有一些学者计算得到松花江流域在2000年左右来源于农田的TN、TP和NH<sub>3</sub>-N占流域总负荷的比重即达到70%以上<sup>[56]</sup>,而根据美国等发达国家的经验,只有在点源污染得到有效控制以后,非点源污染才会成为水污染的主体,国内一些研究结果显示中国非点源污染负荷所占的比重跟美国相当甚至超过美国,这与一些研究者对非点源污染缺乏清晰的界定有一定关系。

(1) 畜禽养殖污染的归属 中国的畜禽养殖业有集约和散养两种模式,集约化养殖场一般都有污染收集、排放甚至集中处理设施,其排污量是可以逐个统计和计算的,应当属于点源;而散养模式的畜禽一般散养于农户的房前屋后,很难逐户统计,只能纳入非点源范畴。一些研究者,在研究工作中忽视了两者的区别,尤其是那些采用输出系数模型的研究者,主要使用统计数据,而统计部门发布的畜禽养殖数量,又主要来自集约化养殖业,散养畜禽由于统计困难,数据精度很低,有的地区甚至未做统计,导致计算出现偏差,随着经济的发展,中国农户散养模式所占比重越来越小,将集约化畜禽养殖污染算作非点源污染,显然会夸大非点源污染的负荷量。

(2) 生活污染的归属 发达国家一般将生活污染归入点源,这些国家通常拥有完善的污水处理设施和管网,农村人口比重很小且很多农村也拥有污水处理设施,生活污染排放总体是集中、可控和可统计的。但中国情况相对复杂,很多地区农村人口占总人口的比重超过50%,且农村生活污水大多为分散式直接排放,因此,中国农村生活污染应当归入非点源污染范畴。城镇生活污染则更加复杂,目前,中国大中型城镇一般拥有污水处理厂,但由于管网滞后,相当一部分生活污水并不能真正实现集中处置和排放,数量众多的小城镇生活污水水平则更加落后,不同地区差别很大,需要根据研究区域的实际情况进行界定。由于生活污染的归属不明确,导致不同研究者各有不同的理解和界定标准,但在文献中又很少对非点源污染所涉及的范

围和界定理由给予详细说明,根据不同的界定标准测算非点源污染负荷,造成很多疑惑。亚洲开发银行的一份报告认为松花江流域非点源污染贡献率达到 45%<sup>[57]</sup>,受到不少学者的怀疑,其重要原因之一就是未对非点源污染的界定给予明确说明。

## 2.2 将产污量与排污量混淆

输出系数模型由于计算简单加之数据获取容易,在国内得到广泛应用,该模型应用中最需要关注的问题是产污量和排污量的区别。和点源污染不同,来自污染源的非点源污染物并不会直接进入水体,一般先滞留在土壤中,只有当有效的降雨径流产生时,才会随降雨径流进入邻近的水体,污染源产生的污染量是产污量,进入水体的污染量才是排污量,由于土壤的吸收和沿途的污染降解,来自污染源的非点源污染物只有一部分会进入水体,很多地区尤其是北方地区,由于有效降雨少,产污量和排污量会有很大差别。排污量与产污量的比值称为输移系数(也有研究者称为入河系数),输移系数的确定是输出系数模型研究的难点<sup>[58]</sup>,国内仅有少数研究者应用输出系数模型时考虑了污染物的输移系数<sup>[59]</sup>,且系数的测算方法缺乏详细说明,国内大部分研究工作计算的实际上都是产污量,且文献中一般都未给予明确说明,这样的计算会大大高估非点源污染的负荷量。

## 2.3 忽视中外非点源污染产生环境的差异

国内常用的非点源污染负荷计算方法主要源自美国,构建模型的技术和所依托的各种监测数据大部分是在北美地区的水文、气象和环境条件下获得,很多模型的构建思路、计算模式和参数都是针对北美的特点设定,未必能完全适应国内的环境特点,但很多研究者在应用过程中对此关注不够,具体表现在以下几个方面:

(1) 忽视中外流域水文特征的差异 流域水文特征,尤其是污染源与受纳水体间的水力联系,对污染负荷的计算有很大影响,国内很多研究者未注意到中国流域水文特征的独特性及其与国外的差异,突出体现在输出系数模型和实证模型的应用中。北美农业区一般水分条件充裕,农田水资源管理面临的主要问题是水分过多,大部分农田都设计有管道和沟渠用于排水<sup>[60]</sup>,农田产流以自然状况下的降雨产流为主<sup>[3]</sup>;而中国农田设计的关键是蓄水,农田普遍都有田埂,很多流域建有大量水库和闸坝且经常处于关闭状态,导致污染源与受纳水体之间的水力联系被人为阻隔,来自农田的污染物只有部分能够进入水体,如果不考虑输移系数,输出系数法计算的结果会比实际进入水体的负荷量偏大很多。此外,中国华北和西北地区的地下水位通常很低<sup>[61]</sup>,很多河流缺乏稳定的基流,除了大型暴雨事件以外,几乎很难形成连续的地表径流<sup>[62]</sup>,加之闸坝长期关闭,闸坝以上的河道和库区内积累了大量点源污染物,很多北方城市内河的河水在非汛期实际上主要是各种类型的城市尾水,因此,这些地区汛期的下泄径流中,实际上包含了闸坝以上区域一整年的点源和非点源污染物,如果使用水文分割法等实证模型,其测算出的非点源污染负荷量也会大大偏高。

(2) 忽视中外农田水资源管理方式的差异 农田水资源管理方式对机理模型的径流计算有很大影响,SWAT等模型发源于北美地区,未充分考虑中国农田的水资源管理特点,一般根据降雨量和土壤含水量计算降雨径流,在土壤含水量超过饱和含水量的情况下,如果有降雨,模型会认为有径流产生<sup>[30]</sup>,这种计算模式在北美地区可行,但在中国,尤其是南方的水稻种植区,如果直接套用,会产生很大偏差。水稻生长期很长一段时间处于淹水状态,水稻田土壤含水量长期处于过饱和状态,但由于田埂的存在,如果降雨较小,田间积水的深度不超过田埂高度,是不会大规模产生径流的,这和模型的计算模式相矛盾,如果强行套用模型,不仅计算精度无法保证,甚至可能导致模型运行出错。为避免这一情况,一些研究者在应用 SWAT 时,将水稻田所属的水文响应单元定义为壶穴,这种方法可以在一定程度上规避模型计算的错误,但依然存在很大问题,主要包括:① SWAT 将壶穴概化为一个圆锥形的水塘<sup>[30]</sup>,其水面面积随水面高度的降低而减小,但水稻田的水面面积不随水面高度而变化,而水面面积对蒸发量的计算会有影响;② SWAT 对壶穴这种类型的水文响应单元,只考虑下渗,如果壶穴底部的土壤含水量达到饱和,SWAT 关于渗漏的计算就会停止,但实际上,水稻田除下渗以外,还有通过田埂的侧渗,即便是土壤含水量达到饱和状态,水稻田依然会有渗漏;③ SWAT 的壶穴计算模块未考虑植物的蒸腾作用,但水稻田需要考虑植物蒸腾作用;④ 在灌溉过程中,灌溉水如果超出水稻田的蓄水能力,将会直接流入河道,这个水文过程,SWAT 没有考虑。中国是世界主要

水稻生产国,水稻田是非点源污染的重要来源也是研究重点之一,虽然国内一些学者已经意识到上述问题,开始对国外模型进行改进<sup>[44]</sup>,但相当一部分研究者依然在研究中直接套用国外模型的计算模式。

(3) 忽视中外农作物及其耕作管理方式的差异 农业是非点源污染的重要来源,农作物的类型、生长情况和耕作管理方式对非点源污染负荷的计算有很大影响,主要表现在:①不同作物和不同生长阶段,水分的吸收和叶面的蒸腾作用有很大差异,会对模型的产流计算产生影响;②不同作物和不同生长阶段,施肥管理以及作物对营养物质的吸收有很大差异,会对污染负荷的计算产生影响。SWAT等国外机理模型内均包含有模拟农作物生长的模块,该模块的计算结果是产流和污染负荷等其他模块计算的重要依据,但这些模型主要是根据北美地区的农作物特点和耕作管理方式研发的<sup>[7]</sup>,中国的农作物和耕作管理方式与北美有很大差异,尤其是中国东部地区普遍种植水稻,实行稻麦或水稻与其他经济作物的轮作,这些都是国外模型未充分考虑的情况,一些研究者未根据国内的情况对国外模型进行适当调试和改进,造成计算结果偏差。

#### 2.4 平原河网地区缺乏成熟的小流域划分方法和产汇流计算模式

产汇流计算是各种机理模型开展非点源污染负荷计算的基础,而子流域的划分又是产汇流计算的基础,SWAT和AnnAGNPS等非点源污染模型基本上都是运用D8法则,根据DEM确定径流流向并划分子流域,在地势起伏较大的丘陵山区,这种方法效率很高且计算结果也比较理想;而平原河网地区由于地势平坦,导致D8方法无法有效应用<sup>[52]</sup>,因此,如果不对降雨径流模块有针对性地进行改进,大部分机理模型只能在丘陵山区有理想的应用效果,但国内一些研究者将SWAT等模型未经改进地应用于平原河网地区,且对子流域的划分、河道流向的确定等都交代不清<sup>[63]</sup>,其污染负荷计算的精度可能难以保证;还有一些研究者,对研究范围内的平原河网区,采用更大比例尺的地形数据以期提高精度<sup>[64]</sup>,但这不是根本的办法,因为对于太湖平原、江苏的苏北平原等地势起伏非常平缓的地区,即便是高分辨率的DEM数据,也很难区分小流域边界,加之这些地区河道的水流经常受到排灌等人为因素的影响,模型无法自动确定水流流向。而平原河网地区农业和人口密集,是非点源污染问题严重的地区,其污染负荷的计算既是重点也是难点,国内一些研究者对这一问题虽然已经开展了一些探索性研究,但尚未建立被广泛认可的方法和计算模式。

### 3 对中国非点源污染负荷计算研究的建议

#### 3.1 根据中国的实际情况制定恰当的非点源污染界定准则

非点源污染的界定会直接影响到污染负荷的计算结果,但这个问题长期以来被国内研究者忽视。由于污染管理水平的差异,不同国家甚至国内不同地区,对非点源污染的界定也会有所差异,需要适当开展这一方面的研究并制定适合中国国情的非点源污染界定准则,在得到广泛认可的准则出现以前,相关研究者应当对本研究的非点源污染界定原则做出说明,尽量避免阅读者理解上的偏差。

#### 3.2 开展典型区域输移系数的测算研究

输出系数模型由于数据要求低且对尺度不敏感,在中国得到广泛应用,尤其是在那些数据缺乏的地区以及在开展大范围污染普查时,输出系数模型有很大优势,但输出系数模型要获得理想的计算结果,必须搞清楚研究区域的输移系数,应当有针对性地开展中国不同区域和不同类型流域输移系数的测算研究,提高输出系数模型的计算精度。

#### 3.3 加强国外模型的本地化改进并推动国产模型的研发

机理模型是非点源污染负荷计算研究的主流方向,但中国的机理模型研究与国外相比差距很大,大部分研究者都直接使用国外的模型,这些模型由于并非根据中国的环境特点开发,在国内应用时难免出现各种问题,近年来国内虽然有一些研究者尝试对国外模型进行改进,但研究工作缺乏系统性,应当全面分析国外主流机理模型在国内应用中存在的主要问题,针对这些问题开展系统性的研究和改进。除此以外,国产模型的研发也应当引起重视,国外模型尽管技术先进,功能也比较完善,但毕竟跟中国的应用条件有很大差异。实际上,非点源污染负荷计算模型大多是在降雨径流模型的基础上进一步增加污染负荷计算模块而得到,中国

也有一些比较成功的降雨径流模型,如新安江模型,该模型是针对中国的水文气象特点开发的,国内很多科研人员对该模型的应用积累了丰富的经验,如果在新安江模型的基础上进一步开发拥有自主知识产权的非点源污染负荷计算模型,不仅可以节省成本,而且更加符合国内科研人员使用习惯,有利于模型的推广应用。

### 3.4 加强平原河网地区非点源污染负荷测算技术的研发

平原河网地区的产汇流与污染负荷计算是非点源污染模型研究的难点,即便是国外一些著名的模型,也没有找到很好的解决方案。国内一些研究者已经提出了一些新颖的研究思路,但都是一些零星的研究且主要围绕产汇流计算开展,很少涉及污染负荷的计算。平原河网地区大多人口、经济密集,是非点源污染物的主要来源区,有必要投入更多的科研资源,在平原河网地区系统性地开展小流域划分、产汇流计算、污染物迁移转化规律以及污染负荷计算等多方面的研究,建立平原河网地区非点源污染负荷测算的技术方案和模型。

### 3.5 根据研究目标和研究区的实际情况选择合适的污染负荷计算方法

每种模型都有其优缺点和适用范围,不应当盲目求新或使用复杂的模型,非点源污染负荷计算方法选择的基本原则应当是根据研究目标和研究区的实际情况选择合适的方法。输出系数模型数据要求低且对尺度不敏感,但计算精度不高,更适用于大范围的污染普查;实证模型则适用于内部结构相对简单的小流域,如果研究区拥有长序列水文和水质监测数据,流域内又基本没有闸坝等水工建筑物,实证模型可以用较小的研究成本获得较高的计算精度;机理模型参数众多、操作复杂且对数据要求很高,而较大范围的流域降雨时空分布不均且难以监测,如果强行使用机理模型,应用效果反而不佳,因此机理模型更加适合中小流域的精细研究。机理模型一般都包括GIS分析和水文计算模块,除了非点源污染负荷计算以外,还可以开展产汇流计算、最佳污染控制措施评价、非点源污染时空分布规律等方面的研究,应用领域比其他方法更广。

## 4 结 语

和发达国家相比,中国非点源污染研究历史偏短,虽然近年来发展迅速,还是主要依赖国外模型开展研究,但非点源污染的产生、流失和迁移转化与研究区的气象、水文、农业生产方式、污染管理水平等因素密切相关,采用的非点源污染负荷计算方法必须适应研究区的实际情况,研究工作才能取得成功。虽然不少研究者近年来已经开始对国外模型进行改进,但研究工作相对分散且不连续,对研究成果的整合也不够重视,没有提出系统性的改进意见和方案。非点源污染负荷计算涉及水文模拟和水质模拟两个方面,技术成熟需要依赖长期理论研究和应用经验的积累,相比发达国家,中国在两方面都有差距。美国等发达国家,除了拥有扎实的理论研究基础以外,最关键的还在于通过数十年研究积累了大量实证数据并建立了各种类型的数据库供科研人员查用,这些数据一方面为模型的率定、验证和应用提供了坚实的数据基础,同时也推动了理论研究不断向前发展;相比之下,中国的数据积累和分析总结工作不够扎实,研究工作缺乏连续性且不同研究团队之间缺少实质性的技术交流和数据共享,虽然很多研究者和团队在国内外期刊发表了很多高水平的论文,但研究成果没有得到有效整合,模型开发、应用与理论研究存在脱节的问题,即便是在国外模型的应用方面,也没有能够形成诸如SWAT查找表一类的针对全国不同地区特点的参数数据库。今后,需要不断加强实证研究、理论与模型开发的结合,通过长期、大量的实证研究,积累不同地区、不同流域的基础数据并构建数据库,首先建立国外主流模型在国内应用时所需要的参数数据库,进而通过对国外模型的深入分析和改进,逐步积累经验,研发和构建能够适应中国环境特点的模型和污染负荷计算技术体系。

### 参考文献:

- [1] 孙金华,朱乾德,颜志俊,等. AGNPS系列模型研究与应用综述[J]. 水科学进展, 2009, 20(6): 876-884. (SUN Jinhua, ZHU Qiande, YAN Zhijun, et al. A review of research and application of AGNPS model[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(6): 876-884. (in Chinese))
- [2] 麻德明,石洪华,丰爱平. 基于流域单元的海湾农业非点源污染负荷估算:以莱州湾为例[J]. 生态学报, 2014, 34(1):

- 173-181. (MA Deming, SHI Honghua, FENG Aiping. Estimation of agricultural non-point source pollution based on watershed unit: A case study of Laizhou bay[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(1): 173-181. (in Chinese))
- [3] ONGLEY E D, ZHANG X L, YU T. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158: 1159-1168.
- [4] LAM Q D, SCHMALZ B, FOHRER N. Modelling point and diffuse source pollution of nitrate in a rural lowland catchment using the SWAT model[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97: 317-325.
- [5] NASRA A, BRUENA M, JORDAN P, et al. A comparison of SWAT, HSPF and HETTRAN/GOPC for modelling phosphorus export from three catchments in Ireland[J]. *Water Research*, 2007, 41: 1065-1073.
- [6] DECHMI F, BURGUETE J, SKHIRI A. SWAT application in intensive irrigation systems: Model modification, calibration and validation[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 470/471: 227-238.
- [7] STRAUCH M, VOLK M. SWAT plant growth modification for improved modeling of perennial vegetation in the tropics[J]. *Ecological Modelling*, 2013, 269: 98-112.
- [8] KANG M S, PARK S W, LEE J, et al. Applying SWAT for TMDL programs to a small watershed containing rice paddy fields[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 79: 72-92.
- [9] SAKAGUCHIA A, EGUCHIA S, KATOB T, et al. Development and evaluation of a paddy module for improving hydrological simulation in SWAT[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 137: 116-122.
- [10] BOULANGE J, WATANABE H, INAO K, et al. Development and validation of a basin scale model PCPF-1@ SWAT for simulating fate and transport of rice pesticides[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 517: 146-156.
- [11] 夏青. 城市径流污染系统分析[J]. *环境科学学报*, 1982, 2(4): 271-278. (XIA Qing. Study on pollution system of urban runoff [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1982, 2(4): 271-278. (in Chinese))
- [12] SHEN Z Y, LIAO Q, QIAN H, et al. An overview of research on agricultural non-point source pollution modelling in China[J]. *Separation and Purification Technology*, 2012, 84: 104-111.
- [13] UTTORMARK P D, CHAPIN J D, GREEN K M. Estimating nutrient loadings of lakes from non-point sources[R]. Washington D C: U S Government Printing Office, 1974.
- [14] JOHNS P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: The export coefficient modeling approach[J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 183: 323-349.
- [15] 薛利红, 杨林章. 面源污染物输出系数模型的研究进展[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(4): 755-761. (XUE Lihong, YANG Linzhang. Research advances of export coefficient model for non point source pollution[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(4): 755-761. (in Chinese))
- [16] SHRESTHA S, KAZAMA F, NEWHAM L T H. Catchment scale modelling of point source and non-point source pollution loads using pollutant export coefficients determined from long-term in-stream monitoring data[J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 2008, 2: 134-147.
- [17] DING X W. The simulation research on agricultural non-point source pollution in Yongding River in Hebei province[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 1770-1774.
- [18] 叶延琼, 章家恩, 李逸勉, 等. 基于 GIS 的广东省农业面源污染的时空分异研究[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(2): 369-377. (YE Yanqiong, ZHANG Jiaen, LI Yimian, et al. Spatial-temporal variation of agricultural non-point source pollution based on GIS technology in Guangdong province[J]. *China Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(2): 369-377. (in Chinese))
- [19] 邱斌, 李萍萍, 钟晨宇, 等. 海河流域农村非点源污染现状及空间特征分析[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(3): 564-570. (QIU Bin, LI Pingping, ZHONG Chenyu, et al. Characteristics and spatial distribution of the rural non-point source pollution in Haihe River basin[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(3): 564-570. (in Chinese))
- [20] 孙添伟, 陈家军, 王浩, 等. 白洋淀流域府河干流村落非点源负荷研究[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(5): 568-572. (SUN Tianwei, CHEN Jiajun, WANG Hao, et al. Study on non-point source pollution loads in villages along the Fuhe River, Baiyangdian watershed[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(5): 568-572. (in Chinese))
- [21] SHEN Z Y, CHEN L, DING X W, et al. Long-term variation (1960—2003) and causal factors of non-point source nitrogen and phosphorus in the upper reach of the Yangtze River[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 252/253: 45-56.



- [22] 第一次全国污染源普查领导小组. 第一次全国污染源普查农业污染流失系数手册[R]. 2009. (Steering Group of the First National Census of Pollution Sources. Agricultural pollution export coefficient handbooks of the first national census of pollution sources, China [R]. 2009. (in Chinese))
- [23] DING X W, SHEN Z Y, QIAN H, et al. Development and test of the export coefficient model in the upper reach of the Yangtze River[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 383: 233-244.
- [24] 李怀恩. 估算非点源污染负荷的平均浓度法及其应用[J]. *环境科学学报*, 2000, 20(4): 397-400. (LI Huaen. Mean concentration method for estimation of nonpoint source load and its application[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(4): 397-400. (in Chinese))
- [25] 李强坤, 李怀恩, 胡亚伟, 等. 黄河干流潼关断面非点源污染负荷估算[J]. *水科学进展*, 2008, 19(4): 460-466. (LI Qiangkun, LI Huaen, HU Yawei, et al. Estimation of non-point source pollution loading on Tongguan section of the Yellow River [J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(4): 460-466. (in Chinese))
- [26] 李家科, 李怀恩, 沈冰, 等. 渭河干流典型断面非点源污染监测与负荷估算[J]. *水科学进展*, 2011, 22(6): 818-828. (LI Jiako, LI Huaen, SHEN Bing, et al. Monitoring and estimating non-point source pollution on typical sections along the Weihe River[J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(6): 818-828. (in Chinese))
- [27] 蔡明, 李怀恩, 庄咏涛. 估算流域非点源污染负荷的降雨量差值法[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2005, 33(4): 102-106. (CAI Ming, LI Huaen, ZHUANG Yongtao. Rainfall deduction method for estimating non-point source pollution load for watershed[J]. *Journal of Northwest Sci-Tech Univ of Agri and For Nat Sci Ed*, 2005, 33(4): 102-106. (in Chinese))
- [28] 杨珏, 钱新, 张玉超, 等. 两种新型流域非点源污染负荷估算模型的比较[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(7): 762-766. (YANG Jue, QIAN Xin, ZHANG Yuchao, et al. Comparison of two machine learning models for non-point source pollution load of watershed[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(7): 762-766. (in Chinese))
- [29] 于涛, 孟伟, ONGLEY E D, 等. 我国非点源负荷研究中的问题探讨[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(3): 401-407. (YU Tao, MENG Wei, ONGLEY E D, et al. Problems and recommendations for non-point source pollution identification in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(3): 401-407. (in Chinese))
- [30] NEITSCH S L, AMOLD J G, KINIRY J R, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation, version 2009 [M]. Texas: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, 2009.
- [31] 马晓宇, 朱元励, 梅琨, 等. SWMM 模型应用于城市住宅区非点源污染负荷模拟计算[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(1): 95-102. (MA Xiaoyu, ZHU Yuanli, MEI Kun, et al. Application of SWMM in the simulation of non-point source pollution load in urban residential area[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(1): 95-102. (in Chinese))
- [32] 刘世梁, 董玉红, 王军. 基于 WEPP 模型的土地整理对长期土壤侵蚀的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(4): 18-22. (LIU Shiliang, DONG Yuhong, WANG Jun. Effects of Land consolidation on long-term soil erosion based on WEPP model[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(4): 18-22. (in Chinese))
- [33] 孙丽娜, 卢文喜, 杨青春, 等. 东辽河流域土地利用变化对非点源污染的影响研究[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(8): 1459-1467. (SUN Lina, LU Wenxi, YANG Qingchun, et al. Effect of future land use caused change on the non-point source pollution in Dongliao River weatershed[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(8): 1459-1467. (in Chinese))
- [34] 罗倩, 任理, 彭文启. 辽宁太子河流域非点源氮磷负荷模拟分析[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(1): 178-186. (LUO Qian, REN Li, PENG Wenqi. Simulation study and analysis of non-point source nitrogen and phosphorus load in the Taizihe watershed in Liaoning province[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(1): 178-186. (in Chinese))
- [35] SHANG X, WANG X Z, ZHANG D L, et al. An improved SWAT-based computational framework for identifying critical source areas for agricultural pollution at the lake basin scale[J]. *Ecological Modelling*, 2012, 226: 1-10.
- [36] HUANG Z H, XUE B, PANG Y. Simulation on stream flow and nutrient loadings in Gucheng Lake, Low Yangtze River basin, based on SWAT model[J]. *Quaternary International*, 2009, 208: 109-115.
- [37] 李瑞玲, 张永春, 刘庄, 等. 太湖缓坡丘陵地区雨强对农业非点源污染物随地表径流迁移的影响[J]. *环境科学*, 2010, 31(5): 101-107. (LI Ruiling, ZHANG Yongchun, LIU Zhuang, et al. Rainfall intensity effects on nutrients transport in surface runoff from farmlands in gentle slope hilly area of Taihu Lake basin[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(5): 101-107 (in Chinese))
- [38] SHEN Z Y, QIU J L, QIAN H, et al. Simulation of spatial and temporal distributions of non-point source pollution load in the Three Gorges Reservoir region[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 493: 138-146.

- [39] WEI O Y, SKIDMORE A K, TOXOPEUS A G, et al. Long-term vegetation landscape pattern with non-point source nutrient pollution in upper stream of Yellow River basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 389: 373-380.
- [40] 齐琳, 林剑, 马继力, 等. AnnAGNPS 模型应用于辽河源头小流域的主要参数确定方法[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(4): 865-870. (QI Lin, LIN Jian, MA Jili, et al. Methods for determining the main parameters of AnnAGNPS model applied to the watershed of the source areas of the Liaohe River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(4): 865-870. (in Chinese))
- [41] 李明涛, 王晓燕, 刘文竹. 潮河流域景观格局与非点源污染负荷关系研究[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(8): 2296-2306. (LI Mingtao, WANG Xiaoyan, LIU Wenzhu. Relationship between landscape pattern and non-point source pollution loads in the Chaohe River watershed[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(8): 2296-2306. (in Chinese))
- [42] 张恒, 曾凡棠, 房怀阳, 等. 基于 HSPF 及回归模型的淡水河流域非点源负荷计算[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(4): 856-864. (ZHANG Hen, ZENG Fantang, FANG Huaiyang, et al. Estimating nonpoint pollution loading from the Danshui catchment based on HSPF and regression model[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(4): 856-864. (in Chinese))
- [43] YANG S T, DONG G T, ZHENG D H, et al. Coupling Xinanjiang model and SWAT to simulate agricultural non-point source pollution in Songtao watershed of Hainan, China[J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222: 3701-3717.
- [44] XIE X H, CUI Y L. Development and test of SWAT for modeling hydrological processes in irrigation districts with paddy rice[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 396: 61-71.
- [45] ZHENG J, LI G Y, HAN Z Z. Hydrological cycle simulation of an irrigation district based on a SWAT model[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2010, 51: 1312-1318.
- [46] 郑捷, 李光永, 韩振中, 等. 改进的 SWAT 模型在平原灌区的应用[J]. *水利学报*, 2011, 42(1): 88-97. (ZHENG Jie, LI Guangyong, HAN Zhenzhong, et al. Application of modified SWAT model in plain irrigation district[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(1): 88-97. (in Chinese))
- [47] 桑学锋, 周祖昊, 秦大庸, 等. 改进的 SWAT 模型在强人类活动地区的应用[J]. *水利学报*, 2008, 39(12): 1377-1389. (SANG Xuefeng, ZHOU Zuhao, QIN Dayong, et al. Application of improved SWAT model to area with strong human activities[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(12): 1377-1389. (in Chinese))
- [48] 赖正清, 李硕, 李呈罡, 等. SWAT 模型在黑河中上游流域的改进与应用[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(8): 1404-1413. (LAI Zhengqing, LI Shuo, LI Chenggang, et al. Improvement and applications of SWAT model in the upper-middle Heihe River basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(8): 1404-1413. (in Chinese))
- [49] 余文君, 南卓铜, 赵彦博, 等. SWAT 模型融雪模块的改进[J]. *生态学报*, 2013, 33(21): 6992-7001. (YU Wenjun, NAN Zhuotong, ZHAO Yanbo, et al. Improvement of snowmelt implementation in the SWAT hydrologic model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(21): 6992-7001. (in Chinese))
- [50] 王慧亮, 李叙勇, 解莹. 多模型方法在非点源污染负荷中的应用展望[J]. *水科学进展*, 2011, 22(5): 727-732. (WANG Huiliang, LI Xuyong, XIE Ying. Application prospects of multi-model approach for modeling nonpoint source pollution[J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(5): 727-732. (in Chinese))
- [51] 王船海, 王娟, 程文辉. 平原区产汇流模拟[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(6): 627-632. (WANG Chuanhai, WANG Juan, CHENG Wenhui. Numerical simulation of runoff yield and confluence in plain area[J]. *Journal of Hohai University: Natural Science*, 2007, 35(6): 627-632. (in Chinese))
- [52] YIN H L, JIANG W Y, LI J H. Simulation of non-point pollutants evolution in coastal plain island: A case study of chongming island[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2008, 20(2): 246-253.
- [53] LUO Y X, SU B L, YUAN J Y. GIS techniques for watershed delineation of SWAT model in plain polders[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10: 2050-2057.
- [54] 环境保护部. 第一次全国污染源普查公报[N]. *人民日报*, 2010-02-10(16). (Ministry of Environmental Protection of China. Bulletin of the first national census of pollution sources[R]. *The People's Daily*, 2010-02-10(16). (in Chinese))
- [55] ADB. Study on control and management of rural non-point source pollution, final report of TA No. 3891-PRC [R]. Manila: Asian Development Bank, 2004.
- [56] 岳勇, 程红光, 杨胜天. 松花江流域非点源污染负荷估算与评价[J]. *地理科学*, 2007, 27(2): 231-236. (YUE Yong, CHENG Hongguang, YANG Shengtian. Integrated assessment of non-point source pollution in Songhuajiang River basin [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(2): 231-236. (in Chinese))

- [57] ADB. Songhua River basin water quality and pollution control management-summary report: Technical assistance consultant's report to ADB[R]. Manila: Asian Development Bank, 2005.
- [58] CAI M, LI H E, ZHUANG Y T. Application of modified export coefficient method in polluting load estimation of non-point source pollution[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004 (4): 40-45.
- [59] 烟贯发, 张思冲, 齐少群, 等. 基于 RS 和 GIS 技术的松花江哈尔滨段流域面源污染特征分析[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(3): 91-98. (YAN Guanfa, ZHANG Sichong, QI Shaoqun, et al. Characteristic analysis of surface source pollution in Harbin section of Songhua River based on RS and GIS technology [J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(3): 91-98. (in Chinese))
- [60] MORIASIA D N, GOWD P H, ARNOLD J G, et al. Modeling the impact of nitrogen fertilizer application and tile drain configuration on nitrate leaching using SWAT[J]. Agricultural Water Management, 2013, 130: 36-43.
- [61] 费宇红, 张兆吉, 张凤娥, 等. 华北平原地下水位动态变化影响因素分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(5): 538-541. (FEI Yuhong, ZHANG Zhaoji, ZHANG Feng'e, et al. Factors affecting dynamic variation of groundwater level in North China Plain[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2005, 33(5): 538-541. (in Chinese))
- [62] 陈利者, 李致家, 李巧玲, 等. 我国降雨径流关系的区域规律研究[J]. 水利发电, 2014, 40(3): 8-15. (CHEN Lizhe, LI Zhijia, LI Qiaoling, et al. Research on regional law of rainfall runoff relationship of China[J]. Waterpower, 2014, 40(3): 8-15. (in Chinese))
- [63] 李爽, 张祖陆, 孙媛媛. 基于 SWAT 模型的南四湖流域非点源氮磷污染模拟[J]. 湖泊科学, 2013, 25(2): 236-242. (LI Shuang, ZHANG Zulu, SUN Yuanyuan. Simulation of non-point source pollution of nitrogen and phosphorus in Lake Nansi watershed using SWAT model[J]. Journal of Lake Science, 2013, 25(2): 236-242. (in Chinese))
- [64] ZHANG Q L, CHEN Y X, GHULAM J, et al. Model AVSWAT apropos of simulating non-point source pollution in Taihu Lake basin[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 174: 824-830.

## Current status and problems of non-point source pollution load calculation in China \*

LIU Zhuang, CHAO Jianying, ZHANG Li, XIE Yufeng, ZHUANG Wei, HE Fei

(Nanjing Institute of Environmental Sciences, MEP, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** Calculation of the load of non-point source pollution (NPS) is of considerable significance in the control of total water pollution. In order to analyze the current status and problems of NPS load calculation in China, the authors provide an overview of previous relevant studies, and summarize the methods by which the NPS loads have been calculated that are commonly used in China. These include export coefficient models, empirically based models, and physically based models. The authors also discuss the problem of NPS load calculation in four respects: The definition of NPS, the difference between the amount of NPS generated and the amount discharged, NPS load calculation in plains regions, and the differences in NPS characteristics between North America and China, regard the key factors underlying NPS research is the load calculation models and methods adapted to the characteristic of study area. Finally, some recommendations for these problems are proposed, including strengthening the cooperation in the research fields of empirical studies, theory studies and model developments, and developing models and methods adapted to the environmental characteristics of China.

**Key words:** non-point source pollution; pollution load calculation; export coefficient models; empirically based models; physically based models

---

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK2011081) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41301556).