

TIANJINSHI LUYUAN

DANLIN RUHAI WURAN FUHE ZONGLIANG PINGGU

天津市陆源

氮磷入海污染负荷 总量评估

许自舟 张志锋 梁 斌 马明辉 韩庚辰 © 主编

TIANJIN



海洋出版社

天津市陆源氮磷入海污染负荷 总量评估

许自舟 张志锋 梁 斌 马明辉 韩庚辰 主编

海洋出版社

2016年·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

天津市陆源氮磷入海污染负荷总量评估/许自舟等主编. —北京: 海洋出版社, 2016. 12

ISBN 978-7-5027-9653-2

I. ①天… II. ①许… III. ①近海-海洋污染-化学污染物-污染负荷-评估-天津
IV. ①X55

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 303465 号

责任编辑: 张荣 安森

责任印制: 赵麟苏

海洋出版社 出版发行

[http: //www. oceanpress. com. cn](http://www.oceanpress.com.cn)

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编: 100081

北京朝阳印刷厂有限责任公司印刷 新华书店发行所经销

2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 8.25

字数: 200 千字 定价: 48.00 元

发行部: 62132549 邮购部: 68038093 总编室: 62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

《天津市陆源氮磷入海污染负荷总量评估》

编 委 会

主 编：许自舟 张志锋 梁 斌 马明辉 韩庚辰

编写成员：王晓芳 许 妍 林忠胜 王立军 孙淑艳

梁雅惠 朱容娟 洛 昊 鲍晨光 李 冕

于春艳 余 东 穆景利 于丽敏 马新东

张 哲 杨 帆

前 言

随着沿海社会经济的快速发展，陆源污染物排海总量在不断增加，导致天津市海洋环境质量持续恶化，优良水域面积比例仅为 5.9%，海洋环境污染已成为天津市经济社会发展的主要制约因素和短板。天津市政府高度重视海洋环境污染问题，2012 年出台的《天津市海洋环境保护条例》规定执行重点海域排污总量控制制度，加强对入海排污口和陆源污染物排海的监督，改善海洋环境质量。《国家海洋局海洋生态文明建设实施方案》（2015—2020 年）将天津市列为海洋污染总量控制试点单位。

陆源入海负荷调查评估是实施排污总量控制的基础环节，是确定污染负荷削减方案的重要依据。本研究采用输出系数法评估天津陆源入海污染负荷，对河流跨界输入的总氮、总磷入海量，以及天津市陆源工业、城镇居民生活、农业化肥、畜禽养殖、农村居民生活和淡水养殖 6 类污染源的总氮、总磷的产生、排放和入海量开展了评估，分析出天津市不同来源总氮、总磷产生量、排放量及入海量的空间格局。通过两年的研究，初步确定了天津市入海污染源清单，为天津市建立污染总量控制制度和制定污染物总量控制方案提供了依据。

本书共分为 9 章，第一章对国内外陆源入海污染负荷研究的主要方法进行了归纳总结；第二章介绍天津市自然及社会经济概况；第三章详细分析了天津陆源污染负荷评估方法；第四章至第七章分别介绍了天津市氮磷入境量、产生量、排放量、入海量的评估结果；第八章对天津市陆源入海污染负荷评估结果进行了验证；第九章概括出天津市氮磷污染物的产生量、排放量及入海量清单。

本书的出版得到天津市海洋局科技兴海项目——“天津市陆源入海污染物总量控制示范与管理机制研究”的资助，在此深表谢意。

由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，望广大读者给予批评指正。

作 者

2016 年 4 月于大连

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 陆源入海污染负荷研究方法	(1)
一、断面实测法	(1)
二、输出系数法	(2)
三、模型估算法	(4)
第二节 研究的技术路线	(7)
第二章 天津市自然概况及社会经济现状	(10)
第一节 自然概况	(10)
一、地形地貌	(10)
二、气候	(10)
三、地表水系	(13)
第二节 社会经济概况	(15)
一、行政区划	(15)
二、人口	(17)
三、土地利用	(18)
四、生产总值	(20)
五、工业	(20)
六、种植业	(22)
七、畜牧业	(25)
八、淡水养殖	(26)
第三章 调查评估方法	(29)
第一节 陆源氮磷产生量评估	(29)
一、工业	(29)
二、城镇居民生活	(29)
三、农业化肥	(30)

四、畜禽养殖	(30)
五、农村居民生活	(31)
六、淡水养殖	(31)
第二节 陆源氮磷排放量评估	(32)
一、工业	(32)
二、城镇居民生活	(33)
三、农业化肥	(33)
四、畜禽养殖	(34)
五、农村居民生活	(35)
六、淡水养殖	(36)
第三节 入境河流调查评估	(37)
一、入境河流调查	(37)
二、入境量评估	(39)
第四节 入海河流调查及入海量评估	(39)
一、入海河流调查	(39)
二、流域划分	(41)
三、入海径流量估算	(43)
四、入海径流量验证	(46)
五、滞留系数估算	(47)
六、氮磷入海量估算	(47)
第五节 入海排污口调查与评估	(47)
一、入海直排口调查	(47)
二、入海直排口评估	(50)
第六节 评价结果的空间化	(50)
第四章 氮磷入境量评估结果	(52)
第一节 氮	(52)
第二节 磷	(53)
第五章 氮磷产生量评估结果	(54)
第一节 氮	(54)
第二节 磷	(57)
第六章 氮磷排放量评估结果	(60)
第一节 氮	(60)

第二节 磷	(63)
第七章 氮磷入海量评估结果	(66)
第一节 氮	(66)
第二节 磷	(70)
第八章 氮磷入海负荷验证	(74)
第一节 实测入海河流氮磷污染负荷	(74)
第二节 实测入海直排口氮磷污染负荷	(75)
第三节 估算负荷与实测负荷的比较及分析	(75)
第九章 氮磷产、排及入海量清单	(77)
第一节 氮	(77)
第二节 磷	(77)
附件一 天津市入境河流基础信息	(80)
附件二 天津市入海河流基础信息	(87)
附件三 天津市部分入海直排口基础信息	(91)
附件四 氮磷产生量估算结果表	(97)
附件五 氮磷排放量估算结果表	(101)
附件六 氮磷入海量估算结果表	(105)
参考文献	(109)

第一章 绪 论

第一节 陆源入海污染负荷研究方法

一、断面实测法

断面实测法通过对河流或入海直排口实测的水文水质数据进行分析，估算出污染物的入海负荷^[1-4]。理论上讲，通过断面实测法估算出入海污染负荷可以最真实地反映陆源污染物的排海情况，但由于我国目前水质监测频率普遍不高，水文水质监测数据不同步，监测的河流及排污口覆盖范围有限等问题，很难精确估算出陆源污染物的入海负荷。

虽然提高监测频率能够有效降低估算误差，但却需要耗费大量的人力、物力和财力。为了最大限度地降低因水质监测数据代表性不强、水文水质数据不同步引起的估算误差，国内外一些学者研究应用分时段通量和、时段平均浓度与时段水量之积等方法对河流污染负荷进行优化和改进^[5-9]。表 1.1 为河流和排污口污染负荷估算方法。

表 1.1 河流和排污口污染负荷估算方法

方法	估算公式	估算方法说明
A	$Load = K \left(\sum_{i=1}^n \frac{c_i}{n} \right) \left(\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{n} \right) = K \cdot \bar{c} \cdot \bar{Q}$	瞬时浓度 c_i 平均与瞬时流量 Q_i 平均之积
B	$Load = K \left(\sum_{i=1}^n \frac{c_i}{n} \right) \bar{Q}_r = K \cdot \bar{c} \cdot \bar{Q}_r$	瞬时浓度 c_i 平均与时段平均流量 $\bar{Q}_r$ 之积
C	$Load = K \sum_{i=1}^n \left(\frac{c_i Q_i}{n} \right) = K \cdot \overline{c \cdot Q}$	瞬时通量 $c_i Q_i$ 之平均
D	$Load = K \sum_{i=1}^n (c_i \bar{Q}_p)$	瞬时浓度 c_i 平均与代表时段平均流量 $\bar{Q}_p$ 之积
E	$Load = K \frac{\sum_{i=1}^n c_i Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \bar{Q}_r = K \cdot \overline{c \cdot Q} \cdot \frac{\bar{Q}_r}{\bar{Q}}$	时段通量平均浓度与时段平均流量 $\bar{Q}_r$ 之积

注：n 代表估算时间段内的样品数量；K 为估算时间段转换系数。

时段通量估算问题的关键在于如何选择正确的处理方式对非点源进行合理估算,由于目前我国大多数河流的水质指标年内数据有限且短期内较难改变,选择合适的时段通量估算方法以保证结果的准确显得十分重要。方法 A、B 只包含对流通量,不含离散通量,与方法 A 相比,方法 B 利用了所有的流量数据,而不只是采样时刻的流量,也就是说方法 B 强化了径流的作用。方法 C、D、E 均包含了对流通量和离散通量,方法 C 较适合点源占优的情况、方法 D 较适合非点源占优的情况,方法 E 则是在方法 C 的基础上进行流量加权,以采样间隔内的时段平均流量与采样时刻的瞬时平均流量之比作为加权系数。

由断面实测法估算得到的污染负荷不仅包括点源,还包括非点源,很难从中分辨出不同源强对污染物输出贡献量的大小,但可通过径流分割法分离出点源、非点源的量^[10-11]。降雨径流是非点源污染产生的自然动力,也是非点源污染物的载体,如果没有地表径流,非点源污染物就无法进入受纳水体。因此,可以认为,没有地表径流时陆源的水污染物全部是由点源污染引起的,只有发生降雨并产生地表径流时,点源和非点源污染才有可能同时发生。也就是说,非点源污染是由丰水期地表径流引起的,枯水期的水污染主要是点源污染。点源污染负荷一年之内相对稳定,可通过实测枯水期流量和污染物浓度求得,丰水期的污染负荷可通过实测丰水期流量求得,两者之差就是非点源污染负荷。

一般而言,河流实测断面都在河口上边界及以上区域,严格来说,由此估算出的污染负荷是河流污染物进入河口的量,而不能代表污染物真正的入海量。河口区在很大程度上表现为一个反应器,在河口中低盐度区域形成典型的颗粒物沉积环境,可能会释放一些营养盐到水体中;而在营养盐丰富、光限制消除的中高盐度区域,通常会发生显著的初级生产过程,进而从水体中去除一部分营养盐。河口区的这些生物地球化学过程显著地影响着江河入海物质的形态及其通量。因此,清晰地区分污染物入河口通量和入海通量,对于正确评估江河营养盐输运通量及其对河口、近海生态系统的影响有重要意义,国外学者在利用通量分解机制研究河口区物质输运方面做了大量研究^[12-19]。

二、输出系数法

输出系数法利用土地利用、施肥量、牲畜、人口等数据估算陆源污染物的输出量,再通过建立污染源和受纳水体(海洋)之间的联系,估算出陆源污染物的入海量。由于输出系数法所需的数据相对容易获取,在很大程度上降低了对试验和资料的依赖性,为估算大尺度、缺乏监测数据的陆源入海污染负荷提供了一种切实可行的方法。

目前,常用的输出系数法主要有 Jones 输出系数法、改进的输出系数法、单元调查法等^[20-22]。应用输出系数法的关键是如何确定输出系数以及在各种情况下的修正系数,可以基于典型样区的监测数据、调查资料或查阅文献等方式获取研究区域不同污染源的输出

系数。

应用输出系数法的另一关键问题是如何建立陆上污染源和受纳水体之间的联系,用输出系数法估算出的污染负荷是陆源污染物的流失量,污染物在伴随着降雨径流的产生与汇集过程向入海河流断面迁移的过程中,会发生土壤和植被的截留、向地下水的渗透、泥沙吸附、河流降解等物理、生化过程,使得污染物不可能全部进入海洋,即污染物在流域中存在滞留损失。特别是大流域,由于其产汇流时间长,流域地形、地貌、植被等情况复杂,土地利用类型多样等原因,其流域损失更为显著。一些研究中由于对污染物的迁移转化过程分析不充分,“产污系数”“排污系数”“输出系数”等概念区分不清,系数测算方法缺乏详细说明等问题,导致估算的结果大相径庭。国内对输出系数法的应用非常多,但应用输出系数法研究陆源入海污染负荷相对较少,对污染物在汇流过程中滞留损失的研究更是不多^[23-53]。

1. Johnes 输出系数法

20 世纪 70 年代初,美国、加拿大在研究土地利用、营养盐负荷、湖泊富营养化关系过程中,提出并应用了输出系数法^[54],这种方法为人们研究非点源提供了一种新的途径。早期的输出系数模型对所有的土地利用类型使用同一输出系数,针对初期输出系数模型的不足,Johnes 等对其进行了改进与发展,建立了更为完备的输出系模型,极大地促进了输出系数法的研究与应用。在该模型中,他们加入了人口、牲畜等因素,对种植不同作物类型的耕地采用了不同的输出系数;对不同种类牲畜使用了不同的输出系数;对人口的输出系数则主要根据生活污水的排放和处理率来选定;在总氮输入方面还考虑了植物固氮、氮的大气沉降等因素;很大程度上丰富了输出系数法模型的内容,提高了模型对土地利用状况发生改变的灵敏性。模型方程见式 (1.1)。

$$L = \sum_{i=1}^n E_i [A_i(I_i)] + P \quad (1.1)$$

式中, L 为营养物流失量; E_i 为第 i 种营养源输出系数; A_i 为第 i 类土地利用类型面积或第 i 种牲畜数量、人口数量; I_i 为第 i 种营养源营养物输入量; P 为大气污染物的湿沉降量。

2. 改进的输出系数法

Johnes 输出系数模型虽然区分了不同土地利用类型和营养物来源,但未考虑降雨径流对输出系数的影响,未考虑污染物在迁移过程中的损失,因此模型缺乏必要的物理基础。国内学者在 Johnes 输出系数模型的基础上进行了一定的改进和完善,如蔡明等建立了考虑降雨径流和污染物迁移损失的输出系数模型 [式 (1.2)]^[23-25]。

$$L = \lambda \left\{ \alpha \sum_{i=1}^n E_i [A_i(I_i)] + P \right\} \quad (1.2)$$

式中, L 为营养物流失量; E_i 为第 i 种营养源输出系数; A_i 为第 i 类土地利用类型面积或第 i 种牲畜数量、人口数量; I_i 为第 i 种营养源营养物输入量; P 为大气污染物的湿沉降量; α 为降雨影响系数; λ 为流域损失系数。

3. 单元调查法

单元调查法是针对不同单元分别进行调查、评估的方法, 在分析陆地污染物主要来源的基础上进行产污单元识别, 确定各单元产污强度的影响参数和参数取值, 从而计算陆源污染物的输出量^[26-29]。

该方法的核心是识别调查单元, 并确定各单元的评估系数。调查单元是指产生污染且可统计计量的最小独立单元。产污单元识别是建立在对污染物主要来源、迁移和转化途径进行充分分析的基础上, 如地表水中氮、磷污染物的来源可以分为点源和非点源; 而非点源来源又可分为城市非点源和农村非点源; 农村非点源中有一部分来自于农田化肥的施用, 化肥中的氮可以通过农田径流、淋洗和侧渗进入到地表水体, 除此之外, 农田中氮肥经氨挥发进入大气后, 其中一部分又可通过干湿沉降回到地表水体。农田径流中的氮包括溶解态和吸附态, 如果再单独估算土壤侵蚀, 就会产生重复计算的问题。

因此, 应尽可能正确地划分产污单元, 使得陆源污染负荷估算结果既不低估、也不高估。首先, 产污单元的划分要尽可能全面涵盖陆源污染的典型来源, 即产污单元具有全面性、典型性和代表性; 其次, 产污单元的划分尽可能避免交叉和重复性计算; 第三, 产污来源的划分要满足单元调查统计数据的可获得性、可比性和显著性。

三、模型估算法

模型估算法通过应用基于机理的、流域尺度的污染负荷模型, 综合利用地形地貌、气候、水文、土地利用、土壤、植被等数据资料, 模拟污染物在流域中的迁移转化过程来估算陆源污染物的入海负荷。这类模型一般都考虑了污染物的迁移转化机理, 结构相对复杂, 通常包括水文过程子模型、土壤侵蚀子模型和污染负荷子模型, 要求有详尽的数据资料支撑, 适用于非点源污染过程的精细模拟。

常用的模型主要有 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型、AnnAGNPS (Annualized Agricultural Non-point Source Pollution) 模型、HSPF (Hydrological Simulation Program-FORTRAN) 模型、MONRIS (Modeling of Nutrient Emission in River Systems) 模型、SPARROW (SPATIally Referenced Regressions On Watershed attributes) 模型等^[55-57]。这类模型的另一特点是将 3S 技术与模型相结合, 借助 GIS 空间信息管理、处理及分析功能, 开发出可视化、流程化的模拟系统, 如 Arnold 开发的 ArcSWAT 可以作为一个组件将 SWAT 模型

集成到 ArcMap 中。美国环保局开发的 BASINS 系统中内嵌有 HSPF 模型, AnnAGNPS、MONRIS、SPARROW 模型也都提供可视化操作的应用程序。

国内学者在应用国外这些机理性模型方面做了大量研究,但由于这些模型涉及的参数较多、对数据资料的条件要求过高、建模费用昂贵,在我国的推广应用很难取得满意的效果。

1. SWAT 模型

SWAT 是美国农业部 (USDA) 在 GLEAMS、CREAMS、EPIC、SWRRB、ROTO 模型的基础上开发的流域尺度模型。模型的整个模拟过程包括陆面水文过程 (产流和坡面汇流) 和水面过程 (河道汇流) 两部分。陆面水文过程控制着每个子流域内主河道的径流、泥沙、污染物质的输入量,包括气候、水文、泥沙、土壤温度、农作物生长、营养物、杀虫剂和农业管理 8 个模块;水面过程决定径流、泥沙、污染物质从河网向流域出口的输移及汇总演算过程,包括主河道径流演算、水库水量平衡演算两个模块^[58-62]。

该模型有较强的物理基础,并集成到 ArcGIS 环境中,具有良好的用户应用界面与较强的空间数据管理、分析和表达的能力,在众多的污染负荷模型中具有较强的应用优势。首先利用流域内的 DEM 数据提取水文特征参数,按一定的阈值将流域分成若干个子流域 (sub-basins),在此基础上进一步按土地利用和土壤面积阈值划分水文响应单元 (Hydrologic Response Unit, HRU);输入气象、水文、土地利用、土壤类型、农业管理措施、点源负荷等数据;采用概念性模型来估算 HRU 上的净雨、计算产流量和泥沙、污染物质的产生量;然后进行河道汇流演算,求得流域出口断面的流量、泥沙量和污染负荷。

SWAT 模型已通过美国环保署组织的关于模型性能、模拟精度等方面的全方位评价,可以模拟流域的径流、泥沙、污染物质的输移。模型在美国得到广泛应用,其他国家应用 SWAT 模型都是基于美国的经验而推广,在欧盟、澳大利亚、加拿大、印度有较多应用^[63-79];SWAT 模型自引入中国至今,国内学者开展了大量模拟应用和验证工作^[80-90]。

2. AnnAGNPS 模型

AnnAGNPS 是美国农业部 (USDA) 在 AGNPS 模型基础上改进的一个连续分布式模型。该模型主要由水文子模型、土壤侵蚀子模型和化学物质输移子模型构成,水文子模型采用 SCS (Soil Conservation Service Curve Number) 曲线法 (CN) 估算日地表径流量;土壤侵蚀子模型使用修正的通用土壤流失方程 (RUSLE) 计算流域各分单元的片蚀和沟蚀量、使用水文几何通用土壤流失方程 (HUSLE) 模拟沉积物和养分在沟道中的迁移量;污染物输移子模型可以模拟氮、磷和有机碳 3 种养分的产生、运移过程和负荷。

该模型按照流域的地形、土壤类型和土地利用等特征将研究区划分为任意形状均质分

室单元 (cell), 并认为各单元对流域出口污染负荷的贡献是独立的, 在每个单元分别计算其径流量、土壤侵蚀量和污染物流失量, 由河网将这些分室单元连接起来, 并根据单元的平均坡度和坡向等对径流和泥沙进行迁移演算, 累计得到流域出口处水土流失总量和非点源污染物输出量。

AnnAGNPS 模型可用于模拟评估流域地表径流、泥沙侵蚀和氮磷营养盐流失等, 其应用主要集中在美国^[91-95], 模型在我国的辽河流域、大沽河流域、太湖流域、千岛湖流域、九龙江流域、珠江流域等区域都有应用^[96-103]。

3. HSPF 模型

HSPF 模型是美国环保局 (USEPA) 1980 年在借鉴集成 SWM (stanford watershed model)、HSP (hydrologic simulation program)、ARM (agricultural runoff management)、NPS (non-point source runoff) 基础上研制的农业土地及城市区域污染负荷模型^[104, 105]。HSPF 模型主要包括透水地段水文水质模块、不透水地段水文水质模块、地表水体水文水质模块 3 部分。3 个大模块下面按照功能分为若干子模块, 实现对径流、泥沙、氮、磷等污染物质的迁移转化和负荷的连续模拟。水文模块采用斯坦福 IV 模型计算径流量; 侵蚀模块采用具有机理性的土壤侵蚀模型, 将土壤侵蚀分为雨滴溅蚀、径流冲蚀和径流运移等若干子过程; 而污染物的迁移转化模块则考虑了氮、磷、农药等污染物的复杂平衡过程。

美国国家环境保护局 1998 年开发了 BASINS 系统, HSPF 模型内嵌于 BASINS 系统中, 系统由 GIS 集成分析工具 (BASINS GIS)、工具分析软件 (WDMUtl)、流域水文模型 (WinHSPF 等) 和决策支持分析工具 (GenScn) 4 个重要部分组成, 可以自动提取模拟区域所需要的地形、地貌、土地利用、土壤、植被、河流等数据, 进行非点源污染负荷的长时间连续模拟。与 SWAT 模型相比, HSPF 模型能模拟时间尺度为小时的产汇流分析, 而 SWAT 模拟的最小时间尺度为天。

HSPF 模型在美国、澳大利亚、德国、韩国等许多国家的水文水质问题研究中都得到了应用, 在我国应用相对较少, 在潮河流域、滇池流域、流溪河流域等区域开展了应用研究^[106-120]。

4. MONRIS 模型

MONERIS 是德国淡水生态与内陆渔业研究所 (IGB) 于 1999 年研发的一个半经验的概念模型, 由农业土地的营养盐平衡模型、流域营养盐排放模型、营养盐的滞留与损失模型 3 个子模型构成。原模型主要考虑了点源、大气沉降、土壤侵蚀、地面径流、农业排水瓦管、地下径流及城市系统 7 种排放途径, 由于中国目前不存在农业排水瓦管排放方式, 因此只考虑其他 6 种排放途径^[121]。流域营养盐排放是一种分散排放 (diffuse emissions)

过程,每一种分散途径形成一种排放量,将各种途径的排放量相加,得到流域总的排放量。河流系统中营养盐负荷可以用流域营养盐的排放量及营养盐的滞留与损失量来表示,如式(1.3)所示。

$$L_{river} = D_{point} + D_{ero} + D_{rof} + D_{gw} + D_{urb} + D_{dep} - R \quad (1.3)$$

式中, L_{river} 为河流营养盐负荷; D_{point} 为点源排放的营养盐量; D_{ero} 为土壤侵蚀排放的营养盐量; D_{rof} 为地表径流排放的营养盐量; D_{gw} 为地下水中营养盐的排放量; D_{urb} 为城市系统排放的营养盐量; D_{dep} 大气沉降排放的营养盐量; R 为河流系统中营养盐的滞留与损失量。

MONERIS 模型机理过程全面、概念清晰、结构合理、对资料的要求适中,可用于流域尺度上的点源、面源营养盐排放量的计算、河流系统中营养盐的滞留与损失的估算以及营养盐排放削减方案的情景模拟,已成功应用于欧洲的多瑙河、莱茵河、易北河、威悉河、波河、维斯瓦河、阿克西奥斯河、威尼斯湖等流域以及中国的太湖流域^[122-139]。

5. SPARROW 模型

SPARROW 是由美国地质调查局 (USGS) 开发的一个基于空间的计算流域营养物质污染负荷的非线性回归模型。它以河段污染负荷作为因变量,污染源和流域空间属性作为自变量建立的非线性方程,充分考虑了河流上下游关系,以及污染物在陆地和河道中的传输行为,能较为准确地反映出污染物从产生到目标出口的全过程。利用河段出口处的监测数据对模拟方程进行校准,并基于统计分析系统平台 (Statistical Analysis System, SAS) 应用非线性最小二乘法拟合方程参数^[140,141]。

SPARROW 模型以污染物在陆域即河道水体中的迁移衰减过程机理为架构,通过非线性回归技术在空间上将河流水质监测数据与陆源污染数据及影响迁移的土壤和地表水体特性关联起来。SPARROW 模型最大的特点是将机理模型与统计模型结合起来用以估算陆源污染负荷。与 SWAT 等机理模型相比,需要的观测数据较少,对监测频率要求较低,更适用于大中型流域的计算;与完全统计模型相比,将陆源污染物的产生和迁移与河道衰减过程联系起来,对污染物迁移衰减细节有更多的考虑。

SPARROW 模型自开发以来,得到快速发展和广泛应用,已成功应用于美国多个流域营养盐的来源和迁移过程的空间描述,在新西兰、欧洲等地也有应用,近年来,中国学者也开始该模型的应用研究,模型显示出了较好的适用性^[142-152]。

第二节 研究的技术路线

在借鉴国外常用流域污染负荷机理模型思想、理论、框架的基础上,结合天津市自然

环境、社会经济、陆源污染的实际情况，基于输出系数模型建立了天津市陆源氮磷入海污染负荷的计算方法。对天津市 2013 年陆源氮磷产、排污量的空间格局及其与入海口污染负荷的响应关系进行了系统的评估，为弄清天津市氮、磷污染物的来源及入海污染负荷、实施总量控制制度提供数据源。研究技术路线如图 1.1 所示。

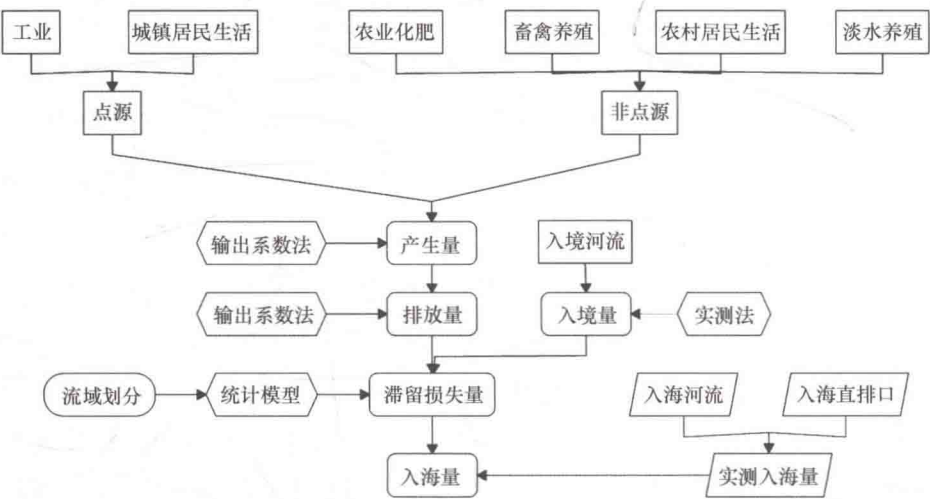


图 1.1 天津市陆源氮磷入海负荷研究技术路线图

将天津市陆源污染物按来源分为工业、城镇居民生活、农业化肥、畜禽养殖、农村居民生活和淡水养殖 6 类，其中工业、城镇居民生活为点源，农业化肥、畜禽养殖、农村居民生活、淡水养殖为非点源。

依据陆上污染物从源头到入海的过程，分为污染物的产生、排放和入海三个阶段，分别对应污染物的产生量、排放量和入海量。产生量是指在正常的生产和管理条件下，一定时间内，所产生原始污染物的量；排放量是指原始污染物经过处理设施消减或利用（或未经过消减、利用）后，直接排放到地表水环境或随着降水进入到地表径流中的量；污染物从陆地地表径流向海洋输移过程中，在物理、化学、生物的作用下，会存在一定的滞留或损失，污染物的排放量扣除滞留损失量即为入海量。

本研究中，评估的污染物为总氮、总磷，入海污染负荷评估的基准年为 2013 年。采用的数据资料主要包括：土地利用数据、人口密度数据、日降水量、蒸发量、化肥氮磷施用量、DEM、天津水系数据、天津行政区划数据、全国第一次污染普查天津市普查数据、《天津统计年鉴》《天津水资源公报》《中国渔业统计年鉴》《第一次全国污染源普查城镇生活污染源排污系数手册》《农业污染源肥料流失系数手册》《畜禽养殖业源产排污系数手册》《水产养殖业污染源产排污系数手册》等。

利用收集的数据资料,采用输出系数法估算 2013 年天津市陆源氮磷污染物的产生量、排放量。根据物质守恒定律,在计算流域水文的基础上,采用经验模型估算各子流域氮、磷的滞留系数,进而估算出天津市陆源氮、磷污染物的滞留损失量和入海量。在 ArcGIS 技术的支持下,分别按照污染物的来源、行政区、流域统计了天津市氮磷的产生量(附件四)、排放量(附件五)、入海量(附件六)。

在开展天津市入境、入海河流及入海直排口调查(附件一、附件二、附件三)的基础上,利用实测的水质数据、收集的河流断面逐日流量数据、入海工业和生活污水废水排放量的统计数据,估算出天津市入境河流、入海河流及入海直排口的污染负荷。利用实测法估算的天津市氮磷入海负荷对模型估算结果进行了验证,模型估算结果与实测结果之间的误差为:氮 6.9%、磷 9.3%。