

HELIU SHUIHUANJING WURANWU TONGLIANG CESUAN
LILUN YU SHIJIAN

河流水环境污染物通量测算 理论与实践

珠江水利委员会珠江水利科学研究院
水利部珠江河口动力学及伴生过程调控重点实验室

徐礼强◎著



中山大學出版社
SUN YAT-SEN UNIVERSITY PRESS

HELIU SHUIHUANJING WURANWU TONGLIANG CESUAN
LILUN YU SHIJIAN

河流水环境污染物通量测算 理论与实践

珠江水利委员会珠江水利科学研究院
水利部珠江河口动力学及伴生过程调控重点实验室

徐礼强◎著



中山大學出版社
SUN YAT-SEN UNIVERSITY PRESS

· 广州 ·

版权所有 翻印必究

图书在版编目 (CIP) 数据

河流水环境污染物通量测算理论与实践/徐礼强著. —广州: 中山大学出版社, 2018. 8

ISBN 978 - 7 - 306 - 06076 - 1

I. ①河… II. ①徐… III. ①河流—水环境—水污染物—通量—测算
IV. ①X143

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 143024 号

出 版 人: 王天琪

策划编辑: 金继伟

责任编辑: 曹丽云

封面设计: 曾 斌

责任校对: 梁嘉璐

责任技编: 何雅涛

出版发行: 中山大学出版社

电 话: 编辑部 020 - 84110771, 84113349, 84111997, 84110779

发行部 020 - 84111998, 84111981, 84111160

地 址: 广州市新港西路 135 号

邮 编: 510275 传 真: 020 - 84036565

网 址: <http://www.zsup.com.cn> E-mail: zdcbs@mail.sysu.edu.cn

印 刷 者: 虎彩印艺股份有限公司

规 格: 787mm × 1092mm 1/16 12 印张 240 千字

版次印次: 2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 68.00 元

如发现本书因印装质量影响阅读, 请与出版社发行部联系调换

内 容 提 要

本书以河流水环境污染物通量为研究对象,从基本概念到测算理论,再到模型方法、模拟技术与决策支持系统开发,全面系统地阐述了河流水环境污染物通量测算的技术方法,并结合案例进行了实践分析。

全书共分7章,第1章绪论,第2章河流污染物通量及水环境测量的技术与方法,第3章河流水环境模拟数学模型,第4章河流不同工况下流场工况测量与模拟,第5章钱塘江主要污染物时空变化规律与通量模拟,第6章基于GIS的水质预报与污染物通量决策支持系统,第7章结论与建议。本书的出版为区域水环境管理、水环境容量的合理利用及经济可持续发展提供理论保障和技术支持。

本书系统性强,理论与实践相结合,方法与应用相结合,既适用于从事环境科学、水利科学教学、研究、监测工作的各级各类专业技术人员,又适用于水利、生态、水环境专业的本科生、研究生等。

前 言

水是世界上一切生命活动的基础。水资源是人类赖以生存和发展的基本条件之一，它对人类文明的延续和社会经济的发展具有决定性作用。高新技术在水科学研究中的应用，有力地推动了水科学的研究进程。

国家原环境保护总局《主要水污染物总量分配指导意见》第二条“区域（流域）总量指标分配”第（五）款指出，各级环境保护部门在分配区域（流域）化学需氧量总量指标时，应综合考虑不同地区的环境质量状况、环境容量、排放基数、经济发展水平和削减能力以及有关污染防治专项规划的要求，对重点保护水系、污染严重水体、一般水域等实行区别对待，确保流域水环境质量的总体改善。第三条“排污单位总量指标分配”第（十七）款指出，在国家确定的水污染防治重点流域等专项规划中，还要控制氨氮（总氮）、总磷等污染物的排污总量，控制指标由国务院批复的各专项规划下达；各地也可根据各自的水环境状况，增加本地区必须严格控制的特征水污染物，纳入本地区污染物排放总量控制计划，氨氮（总氮）、总磷等污染物以及特征水污染物的总量分配可参照本指导意见执行。从上述要求可以看出，对河流进行氨氮和总磷的污染物排放总量的研究迫在眉睫，而总量控制的方案基于一定水环境功能达标要求的通量研究，鉴于水环境容量具有动态变化的特点，开展不同水文情景/情势下的污染物通量研究尤为必要。

本书在国内外有关研究的基础上，采用理论研究和实践相结合的方法，综合运用环境评价技术、系统动力学原理、水环境空间建模技术、可视化空间数据挖掘技术、基于 MapX 和 C#.net 平台的系统开发技术、情景分析方法等对水环境进行规律解析，为区域水环境管理、水环境容量的合理利用及经济可持续发展提供理论保障和技术支持。通过基础调查和水环境空间资料的获取，获得对研究区域水环境的基本认识，对流域进行水质评价，分析近年来的水质演变趋势；通过对研究区域的野外水文测量和水质监测分析，获取和推算水文情景，运用水环境空间数据挖掘的原理和方法，对不同水文情景/情势的水环境

模拟结果进行分析,解析水环境流场的时空演变规律及其过程的动力学原理,探索人类活动依存的河流水环境主要污染物通量的时空演化规律与趋势;建立基于GIS的流域水环境水质污染预报和污染物通量决策支持系统,实现研究成果的可视化,为环境监测和管理部门提供科学便捷的决策依据。

本书主要内容包括:绪论、河流污染物通量及水环境测量的技术与方法、河流水环境模拟数学模型、河流不同工况下流场工况测量与模拟、钱塘江主要污染物时空变化规律与通量模拟、基于GIS的水质预报与污染物通量决策支持系统、结论与建议等。本书由珠江水利委员会珠江水利科学研究院、水利部珠江河口动力学及伴生过程调控重点实验室徐礼强博士编写,全书由罗欢高级工程师统稿,中山大学于海霞副教授定稿。本书在完成过程中,浙江大学楼章华教授、珠江水利委员会珠江水利科学研究院教授级高工邓家泉给予了大量的指导,并提出了宝贵意见,在此表示衷心感谢!

本书的研究工作得到如下科研项目的资助和经费支持:国家自然科学基金项目(51009156)、(41301627),广东省自然科学基金项目(2015A030313866),广东省水利科技创新项目(2014-12),水利部水科学与水工程重点实验室开放基金(Yk914005),在此表示感谢!

河流污染物迁移转化规律的研究是一项涉及多个学科和多个专业的工作,是一项较为复杂的系统工程,作者在河流污染物通量领域做了一些探索,限于学识水平和工作经验,书中难免有疏漏和不当之处,真诚希望各位专家和读者给予批评指正。

作 者

2016年12月于广州

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景与选题意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 选题意义	4
1.2 国内外研究进展	5
1.2.1 水环境、水资源承载力与水环境容量研究	5
1.2.2 物质通量与污染物通量研究	7
1.2.3 水环境数学模型	8
1.2.4 水信息与水环境空间数据挖掘	11
1.3 研究目的、方法与内容	14
1.3.1 研究目的与方法	14
1.3.2 技术路线与研究内容	14
第2章 河流污染物通量及水环境测量的技术与方法	18
2.1 水环境容量与污染物通量的关系及河流水环境容量	18
2.1.1 水环境容量的内涵	18
2.1.2 水环境污染物通量的内涵及其与水环境容量的关系	19
2.1.3 钱塘江流域水环境容量研究的方法	20
2.2 河流污染物通量计算方法	26
2.2.1 常用的河流污染物通量估算方法	26
2.2.2 本研究的河流污染物通量测算原理与方法	28
2.3 河流水环境测量的技术与方法	29
2.3.1 材料与方法	29
2.3.2 基于 ADCP 的流量/流速测量与数据处理	30
2.3.3 氨氮的水质测定方法	34

2.3.4	总磷的水质测定方法	36
第3章	河流水环境模拟数学模型	39
3.1	河流流场模型	39
3.1.1	模型的控制方程	39
3.1.2	模型的定解条件	41
3.1.3	模型的计算方法	42
3.1.4	模型的稳定性条件	43
3.2	河流污染物通量模型	44
3.2.1	通量模型基础	44
3.2.2	通量模型的控制方程及解法	48
3.2.3	关键参数的处理	49
3.2.4	模型的参数取值和定解条件	51
3.3	河流污染物预报模型	51
3.3.1	预报模型的选择及原因	51
3.3.2	模型的基本方程	51
3.3.3	模型的定解条件及解法	52
第4章	河流不同工况下流场工况测量与模拟	54
4.1	钱塘江流域概况	54
4.1.1	自然环境概况	54
4.1.2	社会环境概况	56
4.1.3	水文概况	57
4.2	流场测量与监测数据获取	62
4.2.1	测量断面布设	62
4.2.2	测量断面情况与测量数据	64
4.3	不同工况流场的模拟	67
4.3.1	计算区域及其网格划分	67
4.3.2	初始条件与参数设置	67
4.3.3	流场的验证	69
4.4	流场模拟结果及其对污染物扩散的影响分析	73
4.4.1	上游段流场模拟结果与分析	73
4.4.2	兰江口汇流区模拟结果与分析	76
4.4.3	下游段流场模拟结果与分析	79

4.4.4	浦阳江口汇流区模拟结果与分析	82
4.4.5	汇流区流场变化对污染的重要作用	85
第5章	钱塘江主要污染物时空变化规律与通量模拟	87
5.1	钱塘江流域水质概况	87
5.1.1	研究区域水环境污染调查	87
5.1.2	水环境监测的指标与标准	88
5.1.3	流域水质评价结果	90
5.2	氨氮、总磷浓度时空变化规律解析	91
5.2.1	项目监测年不同时期水质监测数据	91
5.2.2	上游段时空变化规律解析	93
5.2.3	下游段时空变化规律解析	96
5.2.4	氨氮、总磷浓度的时空变化特征	98
5.3	通量模拟的水环境与水文概况分析	98
5.3.1	研究区域水环境功能区概况	98
5.3.2	通量模拟的水文情景概况	103
5.4	不同水文情景氨氮、总磷通量模拟与分析	108
5.4.1	氨氮通量达标预测与分析	108
5.4.2	总磷通量达标预测与分析	114
※第5章	部分表格	121
第6章	基于GIS的水质预报与污染物通量决策支持系统	146
6.1	系统基本情况	146
6.1.1	系统河流分段情况	146
6.1.2	基于MapX和C#.net的系统开发	146
6.1.3	系统数据库的结构与特点	147
6.1.4	系统的功能与技术特点	149
6.2	水环境模拟数学模型及通量决策的GIS集成	149
6.2.1	水质预报模型与GIS集成	149
6.2.2	污染物通量决策与GIS集成	151
6.3	系统功能操作与案例应用	151
6.3.1	系统主界面与功能模块	151
6.3.2	环境水质污染预报应用	154
6.3.3	污染物通量决策支持应用	158

第7章 结论与建议	164
7.1 主要结论	164
7.2 特色与创新之处	167
结语	169
参考文献	171

第1章 绪 论

1.1 研究背景与选题意义

水环境是构成环境的基本要素之一，是人类赖以生存和发展的最重要场所，也是受人类影响和破坏最严重的领域。水环境的污染和破坏已成为当今的主要环境问题之一。水环境问题是由于自然因素和人为因素影响，水体的水文、资源与环境特征向不利于人类利用方向演变而产生的。

一条河流往往会流经多个行政区域（县、市、省甚至不同国家），上游地区工业或生活污水排放，会使下游区域工农业生产遭受损失，造成上下游区域社会经济发展的矛盾。目前，随着区域社会经济的快速发展，特别是工业化和城市化进程的加快，河流跨区域污染问题日益凸显，上游对下游区域污染事故日益增多，如豫鄂交界地区白河污染、江浙边界水污染、苏北鲁南龙王河污染等。因此，重视跨界水污染问题，加强流域水环境管理，对减少跨界水环境纠纷，实现流域内各行政区域的共赢和共享，构建和谐社会具有重要的现实意义。

1.1.1 研究背景

（1）水环境与水资源的重要性

水环境广义上是指水圈，通常指江、河、湖、海、地下水等自然环境，以及水库、运河、渠系等人工环境；而在《环境科学大辞典》^[1]中包含的则更广泛，指地球上分布的各种水体以及与其密切相连的诸环境要素，如河床、海岸、植被、土壤等。水环境主要由地表水环境和地下水环境两部分组成。地表水环境包括河流、湖泊、水库、池塘、沼泽、冰川等，地下水环境包括浅层地下水、深层地下水等。水环境不是一个单一的只与水有关的水体，从环境水利学科看，从现在的要求看，它是一个与水、水生生物和污染等有关的综合体，是一个生态系统。水环境是传输、储存和提供水资源的水体，是水生生物生

存、繁衍的栖息地,是由纳入的水、陆、大气污染物组成的系统,具有易破坏、易污染的特点。

水资源是人类赖以生存和发展的基本条件之一,它对人类文明的延续和社会经济的发展具有决定性作用。水是世界上一切生命活动的基础,水资源是人类生存和社会存在及发展的基础和生命线。近些年来,水资源的合理利用问题受到全球的极大关注^[2,3]。

水资源承载能力^[4-6]是一个国家或地区持续发展过程中各种自然资源承载力的重要组成部分,往往是水资源短缺和贫水地区人口与发展的“瓶颈”资源。因此,水资源承载能力对一个国家或地区综合发展及发展规模至关重要。

由于水资源供给的稳定性和需求的不断增长,水具有了越来越重要的战略地位。如果水资源消耗殆尽,人类的健康、经济的发展以及生态系统将受到威胁。如何解决水资源供应问题,保持水资源供给和需求之间的相对平衡,世界各缺水国家和地区长期以来做了大量探索,一些发达国家或者比较发达的国家已取得了很多成功的经验。概括起来,主要有三个方面:一是采取积极措施,通过区域调水解决地区之间水资源分布不均问题;二是通过科学管理维护水资源的供需平衡;三是开发和采用各种节水技术。

水科学的研究是20世纪末以来人类极为关注的课题之一。由于自然界中水演化规律的复杂性以及人类活动对天然水影响的日益加剧,致使水问题愈加突出,从而极大地影响和制约了人类社会的生存和发展。高新技术在水科学研究中的应用,有力地推动了水科学的研究进程^[7-12]。

(2) 研究区域在经济发展中的重要地位及水环境污染物研究的重要意义

本研究的研究区域浙江省是一个经济发达的大省。随着工农业的发展,人们对水环境的质量要求越来越高,保护水环境、防治水污染已经成为全省工作的重心之一^[13,14]。浙江省河流众多,水网密布,陆地水环境主要由“八大水系”、运河、湖泊与水库、河网等水体组成。陆地水环境和地下水环境构成浙江省生活饮用水和工农业用水的水源地,承载着全省的社会经济发展。钱塘江流域地理位置优越,资源条件得天独厚,其所在区域是浙江省工农业生产、经济建设、政治文化发展最快、最重要的地区,其面积、人口和经济总量都占到浙江全省的1/3。钱塘江作为浙江的“母亲河”,滋养着两岸生生不息的黎民百姓,在浙江省经济格局中占据重要的地位^[15,16]。

据统计,1991年,钱塘江全流域15.5%断面的水质不能满足水域功能要求,到1995年,这一比例上升到26.1%,2003年上升至44.4%。2004年的监测结果表明,流域内除千岛湖和分水江外,主干流水质均达不到地表水Ⅲ类水质标准,中下游富春江和钱塘江段甚至为劣Ⅴ类水质,其主要超标因子为

COD (即化学需氧量)、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ (即氨氮)、TP (即总磷) 及石油类。另据《杭州市水资源质量通报》报道, 2004 年 7 月下旬至 8 月中旬, 钱塘江梅城一闸口河段出现了较为严重的蓝藻暴发, 蓝藻种类主要有蓝藻、绿藻、硅藻、隐藻、甲藻等, 蓝藻密度在 $(402 \sim 1973) \times 10^5$ 个/升, 一度影响沿江各取水口正常取水。这些复杂的水环境问题与水文气象条件、工业及生活污水排放、农业面源污染、水资源配置结构、人口的流动、区域产业布局等都有关系, 需要从根本上分析其产生的原因。

(3) 区域水环境中氨氮和总磷的来源及其通量研究的重要性

氨氮是指以氨或铵离子形式存在的化合氮, 主要来源于人和动物的排泄物, 生活污水中平均含氮总量每人每年可达 $2.5 \sim 4.5 \text{ kg}$; 雨水径流以及农用化肥的流失也是氮的重要来源。另外, 氨氮还来自于冶金、石油、油漆颜料、煤气、炼焦、鞣革、化肥等生产的工业废水中。总磷则是指废水完全氧化消解后测得的正磷酸盐, 即溶解的无机磷 (主要以 H_2PO_4^- 和 HPO_4^{2-} 的形式存在)、有机磷与不溶解的颗粒磷之和。钱塘江流域水体中氮、磷污染物的主要来源有: ①工业废水。工业门类繁多, 生产过程复杂, 污染物种类多、数量大、毒性各异。工业废水污染物不易净化, 对水环境危害最大, 是造成水污染的最主要因素。②农田废水。施用的化肥、农药和除草剂等随农田排水、地表径流注入水体。农业废水产生面广, 不易控制和治理。③生活污水。生活污水成分复杂, 以氮、磷和耗氧有机物最多。④城市垃圾和工业废渣渗滤液。垃圾和废渣倾入水中或堆积在水域附近, 经水的溶解或浸渍作用, 其中有毒有害成分进入水中。⑤大气污染物。大气中污染物种类很多, 可以直接降落或溶于雨雪后降落至水体中。

氨氮和磷属于无机无毒的植物营养物。植物营养物污染的主要特点表现为水体富营养化。水体营养化程度与磷、氮含量有关, 磷的作用大于氮。一般认为, 总磷和无机氮分别超过 20 mg/m^3 、 300 mg/m^3 , 就可以判定水体处于富营养化状态。

国家原环境保护总局《主要水污染物总量分配指导意见》^[17] 要求: ①第二条“区域 (流域) 总量指标分配”第 (五) 款: 各级环境保护部门在分配区域 (流域) 化学需氧量总量指标时, 应综合考虑不同地区的环境质量状况、环境容量、排放基数、经济发展水平和削减能力以及有关污染防治专项规划的要求, 对重点保护水系、污染严重水体、一般水域等实行区别对待, 确保流域水环境质量的总体改善。②第三条“排污单位总量指标分配”第 (十七) 款: 在国家确定的水污染防治重点流域等专项规划中, 还要控制氨氮 (总氮)、总磷等污染物的排污总量, 控制指标由国务院批复的各专项规划下达; 各地也可

根据各自的水环境状况,增加本地区必须严格控制的特征水污染物,纳入本地区污染物排放总量控制计划。氨氮(总氮)、总磷等污染物以及特征水污染物的总量分配可参照本指导意见执行。

从上述要求可以看出,对重点河流进行氨氮和总磷的污染物排放总量的研究迫在眉睫,而总量控制的方案基于对一定水环境功能达标要求的通量研究,鉴于水环境容量具有动态变化的特点,开展不同水文情景/情势下的污染物通量研究尤为必要。

1.1.2 选题意义

钱塘江流域水环境管理中尚存的难点、问题表现在如下两个方面:

1) 长期以行政区域为单元控制流域水污染。虽然《中华人民共和国水法》《中华人民共和国水污染防治法》确定了我国水污染控制以流域管理与行政区管理相结合,但目前实行的流域管理是以部门管理与行政区管理相结合的管理体制。这种人为地将一个整体的流域按行政区划实行地方和部门的分割管理的做法,必定助长地方保护与部门保护,阻碍流域自然环境与自然资源的高效综合利用,导致流域上下游间的污染转嫁,引起地区之间的污染纠纷,加剧流域各地方利益相关者的矛盾冲突,阻碍流域可持续发展战略的实施。

2) 流域水污染治理责任主体缺位。治污责任主体缺位是我国跨界水污染治理和管理的难点。虽然我国环境法规定各级政府对本地的环境质量负责,但对流域沿岸的各地方政府来说,由于缺乏必要的制度保障和监督,在现有考核体系中,地方政府缺乏全局意识,只顾及自己的行政区域社会经济发展,忽视对流域下游的环境影响,对下游造成的污染问题通常就被“高高挂起”。同时,作为流域内的任何一个地方城市,都无法超越其他城市成为流域污染的责任主体,导致跨界水污染纠纷长期存在。

钱塘江流域水环境质量事关区域社会经济的可持续发展,水环境的保护和改善任重而道远,需要从全局、长远、战略的高度,探讨和制订水环境保护战略的措施与对策,达到水环境容量的科学、可持续利用,支持浙江省社会经济的可持续发展的目的。通过对钱塘江流域水环境和社会经济发展特征的研究,对钱塘江干流主要断面进行监测分析,建立流域水环境的流场模型、污染物通量控制模型和水质预报模型,解析流域水环境时空演变规律及其不同水文情景/情势下主要污染物的通量特征,计算满足水环境功能区水质达标要求的河流水环境允许污染物通量,可为流域水环境容量的科学利用、污染物的总量控制,以及河流水环境的水质管理提供切实有效的科学依据。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 水环境、水资源承载力与水环境容量研究

(1) 水环境与水资源承载力内涵

承载力概念的演化与发展是人类对自然界改造和发展的必然结果。“承载力”一词源于力学中的一个概念,指物体在不产生任何破坏时的最大负载。在全球人口不断增加,耕地面积日趋减少,人类面临粮食危机的背景下,生物学家和生态学家首先将承载力概念发展并应用到人类生态学中。随着社会的发展,资源短缺和环境污染问题日益突出,在充分认识环境系统与人类社会经济活动关系的基础上,人们普遍采用承载力来描述区域系统对外部环境变化的最大承受能力,承载力概念由此延伸并广泛用来说明环境或生态系统承受发展和特定活动能力的限度,许联芳等^[18]、毛汉英等^[19]、王俭等^[20]提出了资源承载力和环境承载力等相关概念。

环境承载力概念自20世纪70年代起就广泛应用于环境管理与环境规划中。1974年,Bishop等^[21]在《环境管理中的承载力》一书中指出,环境承载力是在维持一个可以接受的生活水准下,区域所能永久承载的人类活动的强烈程度。值得注意的是,Schneider^[22]强调,环境承载力是自然或人造环境系统在不会遭到严重退化的前提下,对人口增长的容纳能力。世界自然保护联盟、联合国环境规划署、世界野生生物基金会等组织1991年在《保护地球——可持续生存战略》一书中指出:“地球或任何一个生态系统所能承受的最大限度的影响就是其承载力。人类对这种承载力可以借助于技术进步而增大,但往往是以减少生物多样性或生态功能作为代价的,然而在任何情况下,也不可能将其无限增大。这一极限取决于系统自身的更新或对废弃物的安全吸收。”^[23]

水环境承载力的基本概念在我国水利建设与环境保护工作中得以不断完善。20世纪90年代中期,郭怀诚等^[24]、崔凤军^[25]和王淑华^[26]等学者将水环境承载力定义为:在某一时期某种状态或条件下,某地区的水环境所能承受的人类活动作用的阈值能力。21世纪初,水利部前部长汪恕诚^[27]在2001年水环境论坛上明确提出,水环境承载力是指在一定的水域,其水体能够被继续使用并保持良好生态系统时,所能够容纳污水及污染物的最大能力。

关于水资源承载能力方面研究的文献较多,但目前对于其定义、评价指标以及计算方法还没有统一的认识。关于水资源承载力的理论,国际上单项研究成果较少,大多研究将其纳入可持续发展理论中。国内水资源承载力研究始于

20 世纪 80 年代,其中以新疆水资源承载力的研究为代表。施雅风等(1992)采用常规趋势法对新疆乌鲁木齐河流域的水资源承载力进行了研究;许有鹏等(1993)采用模糊分析法对新疆和田河流域水资源承载力做了深入研究;1995—2000 年期间,多个“九五”攻关项目和自然科学基金课题都涉及这一领域^[28-42]。

(2) 水环境、水资源承载力评价与水环境容量研究

水环境与水资源承载力评价方法包括水文学法、数理统计法、水质模型法、向量模法、模糊综合评价法、多目标优化法、系统动力学法等。其中,水文学法和数理统计法主要用于生态需水量计算,水质模型法主要用于水体纳污量计算,向量模法、模糊综合评价法、多目标优化法、系统动力学法等则常用作水环境与水资源承载力的综合评价。

为实现水环境可持续发展,我国自 20 世纪 90 年代起开展了水环境承载力指标体系建立及承载能力评价工作。1995 年,北京大学郭怀成等^[43]针对辽宁省本溪市水环境可持续发展目标,建立了包括单位投资可治理废水量、单位工业废水排放量、单位 BOD(即生化需氧量)排放量的国民总收入、水体 COD 控制目标与水体预测浓度之比、水体 BOD 控制目标与水体预测浓度之比、水体环境容量与预测浓度之比、单位污水处理投资等 7 项水环境承载力指标体系,评价本溪市不断提高的水环境承载力。赵然杭等^[44]根据水环境系统本身的结构组成与人类社会经济活动之间相互作用的表现,提出了城市水环境承载力指标体系,并利用模糊优选理论模型进行重要程度排序。李如忠^[45]从经济、社会、资源、环境、技术和管理等领域选择了 15 个评价指标,构造了一个具有 3 层递阶层次结构的指标体系,建立了城市水环境承载力综合评价的 AHP-Statistics 模型。赵青松等^[46]根据水环境承载力自然属性,提出了涵盖生态环境需水量^[47-53]、供水水平、用水水平、水环境容量^[54-60]的生态需水量、环境需水量、可供水水资源量、污水处理率、工业万元耗水量、农灌水量、人均耗水量、COD 环境容量、挥发酚环境容量、氨氮环境容量等指标,并采用美国运筹学家 T. L. Saaty 的层次分析法进行重要程度权重分析及可承载隶属度分析,结果将可承载力分为:1 为完全可承载,0.8~1 为可承载,0.6~0.8 为弱可承载,0~0.6 为不可承载。2006 年,湖南省洞庭湖水利工程管理局采用社会经济指标与水环境指标评价西洞庭湖水环境承载力,结果表明,由于人口、工业的快速增长,大量农药和化肥的使用,该区域社会经济和水环境指标都超标,环境承载力过载。

1.2.2 物质通量与污染物通量研究

通量是一个物理名词,是指单位时间内流过某一给定面积(通常指与流动方向垂直的单位面积)的某种物理量的量值。国内外对物质通量的研究,常见的有生态系统通量研究、地表水热通量研究、河口悬沙通量研究、河口区污染物通量研究,而对河流水环境中主要污染物通量的研究较少。

(1) 物质通量的研究

入海河流物质通量研究是陆海相互作用和全球海洋通量联合研究计划的重要命题。我国是最早开展物质通量研究的国家之一。自20世纪90年代以来,国家自然科学基金项目和国家重大基础研究计划项目都开展了有关河流和边缘海物质通量的研究,即将开始的全国海岸带环境调查专项也把主要河流物质入海通量及其海洋环境效应研究作为主要内容之一^[61]。开展生态系统通量的长期定位观测研究具有重要的意义。张旭东等^[62]在总结生态系统通量概念与内涵的基础上,概要介绍了全球通量网、区域通量网(美洲网、欧洲网、亚洲网)和中国陆地生态系统通量观测研究网络的建设与发展历程,以及生态系统通量的主要研究方法,包括微气象学方法(涡度相关法、质量平衡法、能量平衡法和空气动力学法)和箱式法(静态箱法和动态箱法)及其基本工作原理;系统地对不同生态系统类型,包括森林生态系统、农田生态系统、草原生态系统和水体生态系统的 CO_2 通量、 N_2O 通量、 CH_4 通量、热通量等的研究成果、方法及进展进行了评述;最后,结合我国不同生态系统类型通量研究的现实与需要,从生态系统通量研究的策略、水平、方法以及资金的投入、数据的管理与使用等方面提出了一些合理化建议与展望。孙睿等^[63]介绍了当前国内外地表水热通量观测研究的进展及3种不同类型的土壤—植被—大气传输模型(SWAT):单层模型、双层模型和多层模型。遥感手段常用于监测大面积地表水热通量。基于地表能量平衡方程,现已建立了许多遥感模型以估算水热通量,如简化模型、单层模型、附加阻抗模型、作物缺水指数模型和二源阻抗模型等,并对这些模型的复杂程度及应用范围进行了分析。万新宁等^[64]系统地介绍了国内外河口悬沙通量研究的进展,目前对于河口悬沙通量主要采用模型研究以及水文学、机制分解、仪器直接测量等方法,从理论和实际相结合的角度进行研究。物理模型的研究成果比较直观,但受到模型尺度和精度等的限制;数学模型研究具有快、准的优点,可以给出令人满意的定性结果,但未能达到定量预报的程度;传统的水文学方法可以用来研究河口地区悬移质泥沙在不同动力因子作用下的输移情况;机制分解法是比较成熟和可靠的方法,但该方法与河口动力机制和泥沙输移过程结合不够;使用先进仪器进行直接测量则