

区域水污染控制系统

规划支持模型研究

Planning Support Model in Regional Water Pollution Control System

(申请清华大学工学硕士学位论文)

院 (系、所) : 环境科学与工程系

专 业 : 环境科学与工程

研 究 生 : 龙 瀛

指导教师 : 贾海峰 副教授

二零零四年六月

区域水污染控制系统规划支持模型研究

龙
瀛

关于论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文的复印件，允许该论文被查阅和借阅；学校可以公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存该论文。

(涉密的学位论文在解密后应遵守此规定)

签 名：_____ 导师签名：_____ 日 期：_____

摘 要

区域水污染控制系统规划涉及众多数据的管理、查询、分析、计算以及决策等工作,计算机技术在环境规划中已经有了一定的应用,出现了计算机辅助规划(Computer Aided Planning, CAP)系统的概念,主要用于实现辅助规划的功能。笔者通过对国内外 CAP 系统的深入调研,发现现有的 CAP 系统一般都具有较强的规划项目针对性,一个规划项目的 CAP 系统一般很难移植到另一个甚至类似的规划项目。究其原因是现有 CAP 系统的开发模式不利于代码复制,不具有较好的平台移植性。

针对这个问题,笔者提出规划支持模型(Planning Support Model, PSM 模型)的概念,可以作为区域水污染控制系统规划 CAP 系统的开发基础,提高其开发效率,具有较强的普适性。

文中笔者在对区域水污染控制系统规划进行深入剖析的基础上,对 PSM 模型进行结构需求分析和功能需求分析,确定了 PSM 模型的总体结构,并采用软件工程通用建模语言 UML 进行 PSM 模型的总体设计和详细设计,其中详细设计主要包括 PSM 模型中要素模型、域模型、关系模型、方法模型和模拟模型的设计。在模型开发部分,有针对性地给出 COM 和 Geodatabase 两种开发模式。对于 COM 开发模式,在采用 COM 技术对 PSM 模型开发的基础上,结合 COMGIS 进行 PSM-CAP 系统(基于 PSM 模型开发的 CAP 系统)的开发;而对于基于 Geodatabase 的开发模式,分别对基于 Geodatabase 的要素模型、域模型和关系模型的开发和基于 Microsoft Access 的方法模型的开发进行详细介绍,并在此基础上介绍了 PSM-CAP 系统的实现方法。

在佛山市水资源保护与水污染控制规划项目中,基于 Geodatabase 模式开发的佛山市水污染控制系统规划支持模型(FSH-PSM)得以成功应用,文中具体针对规划的各个过程中 FSH-PSM 模型的应用方法和实现的功能

进行介绍，最后对 FSH-PSM 模型在该项目中的应用进行评价。

通过研究，笔者认为 PSM 模型可以在保证提高规划效率和精确度的前提下改善 CAP 系统的开发效率，是区域水污染控制系统规划的有力工具，必将成为下一代区域水污染控制系统规划 CAP 系统的发展方向。

关键词：区域水污染控制系统，计算机辅助规划，规划支持模型，UML，Geodatabase，组件技术，COMGIS，污水处理厂，佛山市

ABSTRACT

Regional water pollution control (RWPC) system planning involves data managing, querying, analyzing, calculating and decision making. With the development of computer technology, computer has been widely applied to environmental planning, and the concept of computer aided planning (CAP) system has emerged. CAP system serves with the function of assisting planning. Basing on surveys and researches of CAP systems home and abroad, the author finds that most existing CAP systems are exclusively designed for a particular program respectively and could not be adapted to other similar programs. The reason is that the developing mode of existing CAP systems blocks the reusing of core programing codes.

To deal with such a problem, the author brings forward the concept of Planning Support Model (PSM). As the developing base of RWPC system planning, PSM model could raise the planning efficiency with better adaptability.

In this dissertation, analysis of the structural and functional requirement of PSM model is conducted, based on the profound study of RWPC system planning. General and detailed design of PSM model is developed by UML, the general software engineering modeling language. Element models, domain models, relationship models, method models and simulating models are contained in the detailed design of PSM model. In the part of PSM model development, COM and Geodatabase developing modes are selected. As for COM mode, based on PSM model in which COM is employed, PSM-CAP system is developed in combination with COMGIS. As for Geodatabase mode, PSM-CAP system developing method is introduced, after a detailed introduction to element models, domain models and relationship models

development in Geodatabase and method models development in Microsoft Access.

In the project of Foshan Water Resources Protection and Water Pollution Control Planning, PSM model for Foshan city RWPC system planning (FSH-PSM), based on Geodatabase, was developed and applied successfully. Detailed applying method and function of FSH-PSM model is elaborated in the dissertation. Application of FSH-PSM model in the project is also assessed.

By the study of PSM model, the author holds that PSM model has better adaptability, and can raise CAP system's developing efficiency with high planning efficiency and precision. PSM model is an excellent tool for RWPC system planning, and will lead the trend of RWPC system planning CAP system in the future.

Key words: Regional Water Pollution Control System, CAP, Planning Support Model, UML, Geodatabase, COM, COMGIS, GIS, WWTP, Foshan city

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	III
目 录	V
第 1 章 引 言	1
1.1 研究目的和意义	1
1.2 相关概念辨析	2
1.2.1 计算机辅助规划	2
1.2.2 CAP 系统与 PSM 模型	3
1.2.3 PSS、GIS 与 SDSS	3
1.3 国际国内研究状况和进展	4
1.3.1 国际研究进展	5
1.3.2 国内研究进展	10
1.3.3 问题分析	12
1.4 技术路线及各章主要内容	13
第 2 章 区域水污染控制系统规划基础	15
2.1 规划内容	15
2.2 规划方法	16
2.2.1 反向算法	16
2.2.2 正向算法	16
2.3 规划实质	17
2.4 本章小结	18
第 3 章 模型设计	19
3.1 需求分析	19
3.1.1 结构需求	19
3.1.2 功能需求	20
3.2 总体设计	22

3.2.1 UML 简介.....	22
3.2.2 模型定位.....	22
3.2.3 模型结构.....	22
3.3 详细设计	24
3.3.1 要素模型设计.....	24
3.3.2 域模型设计.....	24
3.3.3 关系模型设计.....	26
3.3.4 方法模型设计.....	27
3.3.5 模拟模型设计.....	30
3.4 本章小结	31
第 4 章 开发模式.....	32
4.1 引言	32
4.2 COM 开发模式	33
4.2.1 COM 和 COMGIS.....	33
4.2.2 PSM 模型的开发	34
4.2.3 PSM-CAP 系统的开发	38
4.2.4 系统特点及适用条件.....	42
4.3 GEODATABASE 开发模式	42
4.3.1 Geodatabase	43
4.3.2 PSM 模型的开发	44
4.3.3 PSM-CAP 系统的开发	48
4.3.4 特点及适用条件.....	49
4.4 本章小结	49
第 5 章 模型应用	51
5.1 项目背景	51
5.2 模型设计与开发	52
5.3 模型应用	53
5.3.1 数据标准化.....	53
5.3.2 水环境解析.....	54

5.3.3 污染源解析.....	55
5.3.4 基本服务区解析.....	60
5.3.5 方案生成.....	61
5.3.6 辅助水质模拟.....	63
5.3.7 方案评价及优选.....	64
5.3.8 阶段实施方案的制定.....	67
5.4 模型应用评价	68
5.5 本章小结	69
第 6 章 结论与建议.....	70
6.1 结论	70
6.2 建议	71
6.2.1 基于 COM 开发的 PSM	71
6.2.2 智能 PSM	71
6.2.3 协同式 PSM	72
6.2.4 网络 PSM	72
参考文献	73
致谢、声明.....	78
个人简历、在学期间的研究成果及发表的学术论文.....	79

第1章 引言

1.1 研究目的和意义

区域水污染控制系统是改善区域水环境质量的重要保障，与人居环境质量息息相关。目前国内很多地区的水污染控制系统的建设仍处于较为初级的阶段。对于这一涉及多方面因素的复杂系统的建设，需要在建设之前有完善的规划——区域水污染控制系统规划，以优化并合理安排系统的建设，降低系统的建设、运营费用，并科学地利用河流的水环境容量，有效促进水污染控制工作的进行。

区域水污染控制系统规划是在系统优化的基础上给出具体实施方案的过程，涉及到贯穿规划始终的大量空间和属性数据的管理、查询、分析以及计算等工作^[1]，仅凭手工完成这些工作逐渐显示出其局限性。随着计算机技术的发展，计算机辅助规划（Computer Aided Planning，CAP）在国外、国内的环境规划领域已经有了一定的应用，它是规划理论与计算机软硬件技术相结合的产物，可以提高规划效率、精确度和科学性。

随着我国经济的发展，区域水污染控制系统规划的研究方法和研究对象都发生了一定的变化，同时以面向对象技术、GIS（地理信息系统，Geographic Information System）技术、网络技术、组件技术和数据库技术等为代表的计算机技术也有了较大的发展。而且经过笔者的深入调研，目前国内外的 CAP 系统一般具有较强的项目针对性，不具有较好的平台移植性。

针对以上原因，本研究主要针对区域水污染控制系统规划的 CAP 系统进行研究，提出了规划支持模型（Planning Support Model，PSM 模型）的概念，该模型可以直接用于不同规划项目 CAP 系统的开发，提高代码的复制性，具有较好的普适性。笔者采用 UML 设计了区域水污染控制系统规划的 PSM 模型，给出 PSM 模型的两种开发模式，并在佛山市水资源保护与水污染控制规划项目中得以应用，取得了预期的效果。

为了便于对计算机辅助规划等相关概念有更为明确的认识，首先针对相关概念进行辨析。

1.2 相关概念辨析

1.2.1 计算机辅助规划

“计算机辅助规划（Computer Aided Planning, CAP）”的具体技术内涵是结合相关的规划理论，引入各种计算机软硬件技术，来推进规划工作的完成，在整个规划过程中，CAP 系统一直担任着规划数据的存储、管理、计算、查询和表达等功能。目前的计算机辅助规划技术，已经广泛应用于城市规划、城市工程规划和环境规划等领域。随着计算机技术的发展，计算机辅助规划的内涵和外延都发生了较大的变化，可以说 CAP 是一含义广泛且不断演变的概念。

“计算机辅助设计（Computer Aided Design, CAD）”的概念早于 CAP，发展也较 CAP 成熟。CAD 与 CAP 的不同之处主要体现在以下几方面：

- （1）系统的侧重点不同：CAD 系统侧重于设计，而 CAP 系统则更侧重于数据管理、查询、分析、计算、表达等。在 CAD 与 CAP 共同涉足的领域，如城市规划、城市工程规划，由于 CAD 的出现较 CAP 早，所以这一领域曾一度为 CAD 系统所占领，随着 CAP 系统的出现和完善，鉴于 CAD 系统和 CAP 系统的侧重点不同，操作平台正由 CAD 系统向 CAP 系统过渡；
- （2）应用领域不同：CAD 的应用领域较为广泛，如建筑、机械、服装设计等，在城市规划领域也有所应用，而 CAP 的应用主要是城市规划、城市专项规划、环境规划等领域，不及 CAD 应用广泛；
- （3）软件成熟度不同：目前很多行业的 CAD 软件已较为成熟，具有较强的通用性，而 CAP 软件的发展较为缓慢，且一般是针对某一规划项目而设计开发，通用性较差。

1.2.2 CAP 系统与 PSM 模型

计算机辅助规划系统（CAP 系统），是指在规划过程中实现辅助规划功能的计算机系统，它可以是一个集成的计算机规划平台，也可以是一套分散的软件包。计算机技术的变革也引起 CAP 系统的形式发生了很大的变化，MIS（信息管理系统，Management Information System）的出现带动了 MIS 形式的 CAP 系统（MIS-CAP）的发展，GIS 的出现带动了 GIS 形式的 GIS-CAP 系统，以及基于 DSS（决策支持系统，Decision Support System）的 CAP 系统（DSS-CAP）。

而本文的研究对象——PSM 模型，封装了规划对象的各个要素，可以在 PSM 模型的基础上开发 CAP 系统。PSM 模型较好的可移植性使得它可以提高 CAP 系统的开发效率，同时同一套 PSM 模型可以适用于不同 CAP 系统的开发。

1.2.3 PSS、GIS 与 SDSS

PSS（规划支持系统，Planning Support System），是 CAP 系统的一种形式，一般是以 GIS 和规划专业模型为核心的集成系统，用于实现特定的规划辅助功能。

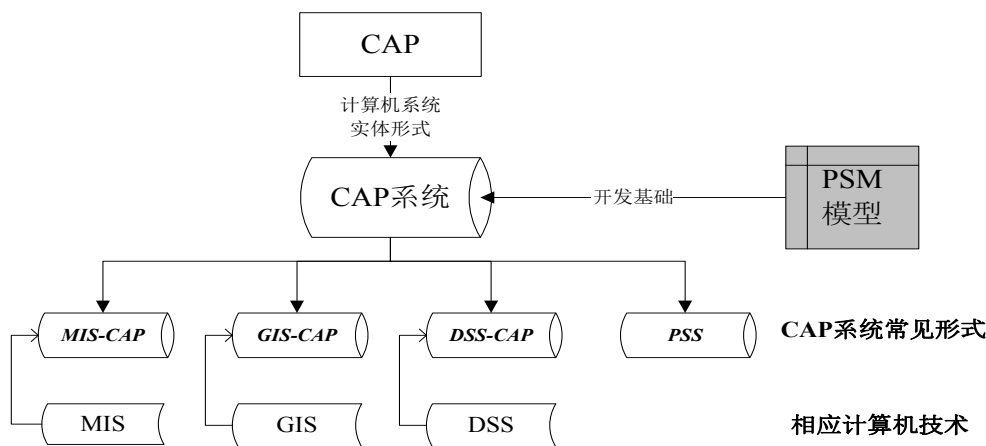
而 GIS 是通用的空间数据生成、处理、编辑和表达的平台，包括众多的空间分析模型，兼具空间表达功能。它具有较为广泛的应用，目前较多的商业 GIS 软件如 ESRI ArcGIS、MapInfo Professional 和 IDRISI 等。大多数情况下，实现特定功能的 GIS 是 PSS 的重要组成部分。

而 SDSS（空间决策支持系统，Spatial Decision Support System），即有空间数据支持的 DSS。PSS 的使用者一般是具有规划技术背景的规划师，而 SDSS 的使用者一般是决策者或决策分析者；PSS 侧重于计算、表达等功能，而 SDSS 则侧重于决策的制定。

PSS、GIS 和 SDSS 有较多的共同点，都可以在规划过程中起到规划辅助的功能，都是 CAP 系统的一种形式。但它们各自用于处理不同特征的具体任务。PSS 主要用于辅助规划过程涉及的任务，它通常通过一个由共用的界面和一套工具集的集成环境为规划者提供相关支持。总体上 PSS

与 GIS、SDSS 的主要区别在于：PSS 是“量体裁衣”专门用于支持规划相关任务的计算机系统。

总体上，CAP 系统是一较为广泛的概念，PSS、GIS 以及 SDSS 等计算机技术的出现都引起 CAP 系统形式上的重要变革。而 PSM 模型，主要起到作为 CAP 系统开发基础的功能。CAP 相关概念之间的具体关系如图 1-1 所示：



1.3.1 国际研究进展

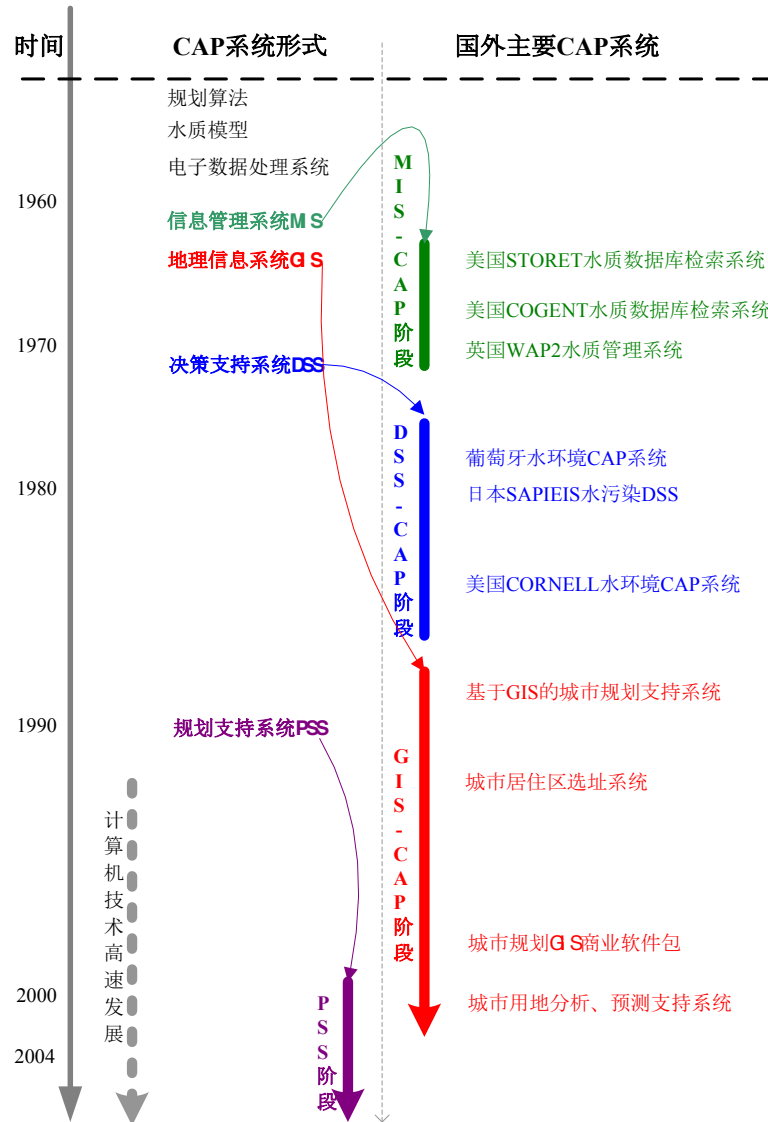


图 1-2 CAP 系统形式及其相关应用时间序列

1) 发展历程

计算机最初应用于规划是在 20 世纪 50 年代末，从 20 世纪 80 年代前期开始，随着硬件水平的提高、成本革命性的降低、大众软件的发展以及地理信息系统的兴起，CAP 系统发生了显著的变化，规划界使用计算机已

日趋广泛。在城市规划领域，国外 CAP 相关技术如图 1-2 所示，其中 MIS-CAP、DSS-CAP 和 GIS-CAP 的开发时间序列如图 1-2 所示，国外 PSS 系统开发的时间序列如图 1-3 所示。

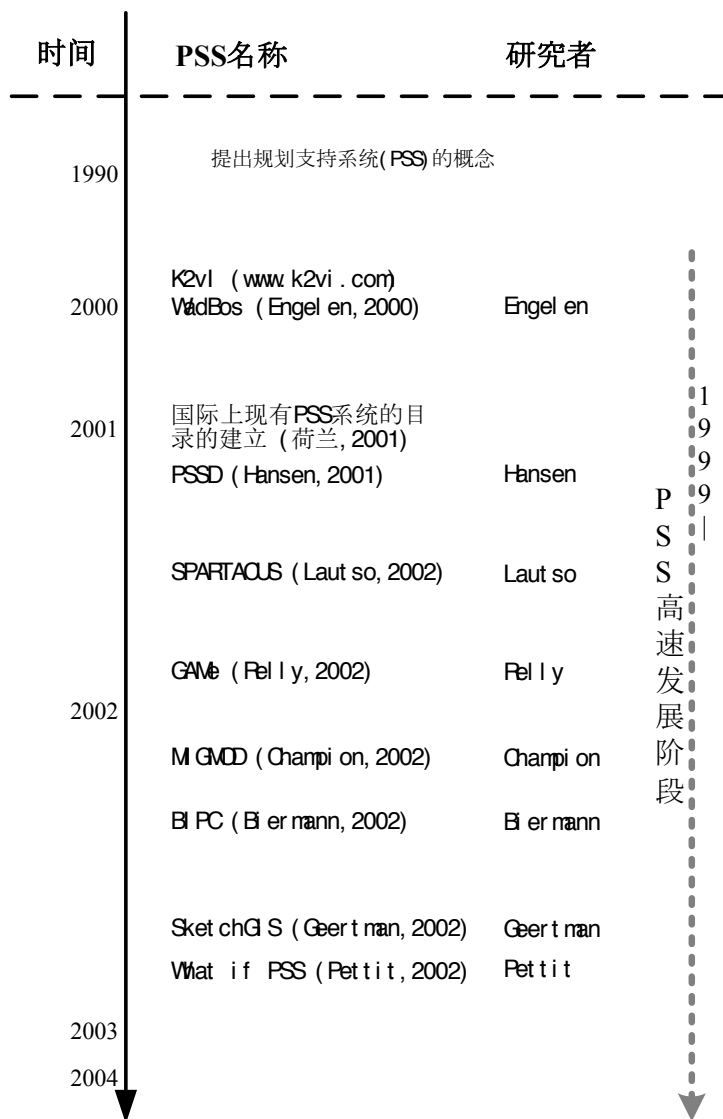


图 1-3 PSS 主要应用时间序列

在区域水污染控制系统规划领域，考虑到规划具有信息密集、人机交互频繁、整体性强、措施丰富多样等特点，研究者较早地采用 CAP 系统实现辅助规划的功能。从广义的角度讲，国际上使用 CAP 系统辅助规划

大致经历了以下几个阶段：

✓ 算法阶段

这一阶段的 CAP 系统仅仅是较为简单的规划算法，这些算法大多由 Fortran 语言编写、在 DOS 下执行，可以说这些简单的规划算法是 CAP 系统的雏形，实现了 CAP 系统最为核心的功能。

这种形式的 CAP 系统的局限性在于用户在利用这些软件包求解实际的规划问题时，必须严格符合系统界定的有关条件，同时这种形式的 CAP 系统输入输出一般都是文本文件，具有较大的局限性。

✓ MIS-CAP 阶段

20 世纪 60 年代初，Gallagher 提出了 MIS 的构想，随后 MIS 得以广泛的应用，在这样的背景下，一些研究者开发了水质管理信息系统（Water Quality MIS），即 MIS-CAP，为水质管理和规划的制定提供信息服务。这一阶段 CAP 系统的典型代表是美国的 STORET-COGEN 水质检索与评估系统、英国的 WAP2 水质档案系统和西德的 UMPLIS 环境信息系统等。这些系统的主要功能是模拟规划方案的水质，分配点源的排放负荷，以及为水质管理提供较为初步的决策支持。

这一阶段的 CAP 系统主要功能基本上是规划相关数据的储存、管理和一般业务性数据的处理，具有一定的模拟预测功能，但其空间数据处理和决策分析的功能相当薄弱。

✓ GIS-CAP 及 DSS-CAP 阶段

20 世纪 90 年代以来，是计算机软硬件技术发展的黄金时期，相关计算机技术的出现促进了 CAP 系统的快速发展，出现了以 GIS 为核心的 GIS-CAP 系统、以 DSS 为核心的 DSS-CAP 系统以及二者的集成 SDSS-CAP 系统^[2]。这类系统在处理水污染控制系统规划的空间数据和解决半结构化决策问题方面，取得了较大的进步，这方面的研究，曾一度是国外一些国家的研究重点。这一阶段典型的 CAP 系统有日本的 SAPIENS 系统和美国 CORNELL 大学的相关系统。

✓ PSS 阶段

这一阶段 CAP 系统的主要形式是 PSS。PSS 是 GIS、DSS、规划模型

以及相关工具集的集成系统，在出现的早期，其形式主要是一套松散的工具集和一个统一的用户接口界面，随着 PSS 的不断成熟，紧密集成 GIS、DSS 与规划模型的 PSS 自 1999 年以来取得了较大的进步。这一阶段的主要代表系统如图 1-3 所示。

在国外，GIS-CAP 与 PSS 方面的相关研究较多，下面对此具体进行介绍。

2) GIS-CAP

自 20 世纪 60 年代初加拿大的 Roger F.Tomlinson 和美国的 Duane F.Marble 在不同领域、从不同角度提出 GIS 的概念以来，随着空间分析理论和计算机技术的飞速发展，GIS 已广泛应用于城市规划领域，同时也逐渐渗透到城市工程规划和环境规划领域，并取得了比较成功的应用^[3]，如：

- (1) Batty (1992) 在澳大利亚墨尔本试验了传统的城市居住区选址模型与 GIS 的结合，辅助城市规划中居住区的选择；
- (2) Jankowski 和 Richard (1994) 集成 GIS 于多范畴分析模型中，提高了规划选址的系统性；
- (3) 加利福尼亚大学的 Robert A. Johnston 和 Tomas de la Barra 将城市模型 TRANUS 和 GIS 系统整合，利用 TRANUS 分析和预测城市的用地情况，然后将结果在 GIS 系统中表达，并利用 GIS 的查询分析功能进一步辅助城市规划和决策^[4]；
- (4) 澳大利亚的 C. Pettit 和 D. Pullar 提出了一种基于 GIS 的污水处理厂规划的多目标决策方法；
- (5) Klosterman (1997) 推出一种基于 GIS 的商业软件包，是确立和评估详细的城市发展前景的很有前途的工具。

纵观 GIS 在国外城市规划等领域的应用，可以发现其最主要的弱势在于它和规划模型的集成不够紧密。目前，在规划模型和 GIS 集成这一方面有几种解决方案，例如从松散的集成到紧密集成和完全一体化的集成结构^[5-8]。

3) PSS

PSS 的概念是在 1989 年由 Btitton Harris 提出的^[9], 10 年后被广泛接受。PSS 是基于计算机的方法和模型的综合, 能够实现辅助规划的功能。PSS 对决策者来说不仅是一个决策支持系统, 它同时还提供工具、模型和规划所需的信息。PSS 有一整套相关信息技术的集成(如 GIS、电子表格、模型和数据库), 它们在规划的不同阶段有着不同的应用。GIS 的地理信息处理、图形显示和建模能力, 以及 DSS 的决策分析能力, 使得 GIS、DSS 成为 PSS 的重要组成部分。一般的 PSS 系统结构框图如图 1-4 所示, 在基本要素——GIS、DSS、规划模型和相关工具集的支持下, 实现了相应的辅助规划功能模块, 由统一的用户界面提供用户访问 PSS 的接口。

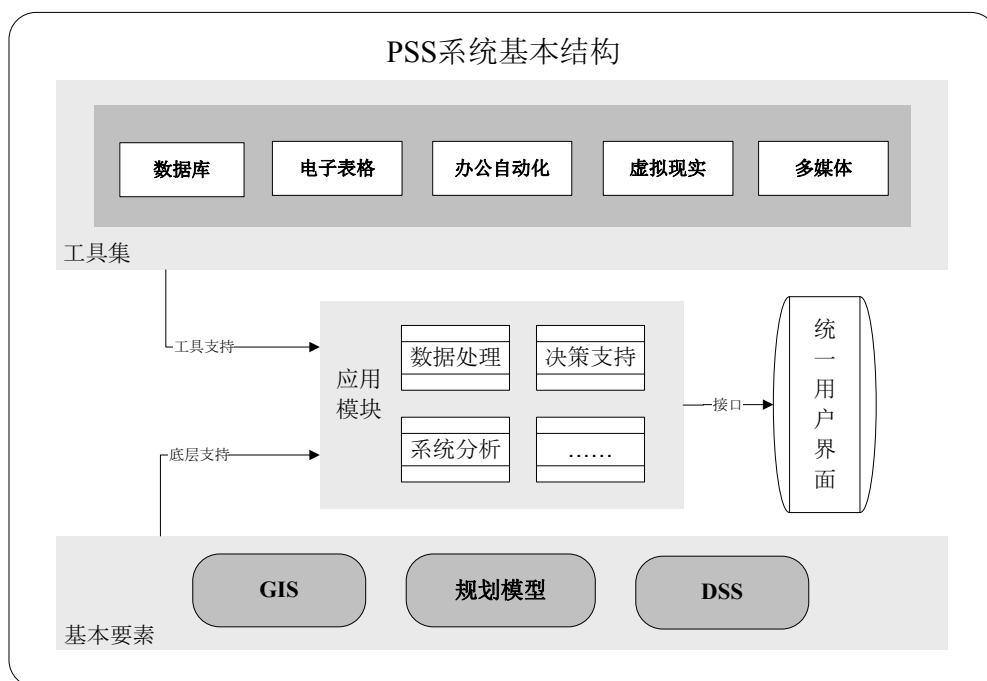


图 1-4 一般的 PSS 系统结构框图

早期 PSS 的开发一般都是松散结合的工具集, 后来软件工程师也开始集成众多工具来开发 PSS。1998 年 Bishop 建议采用统一的界面, 实现工具集的集合, 以此模式开发 PSS 系统^[10]。目前开发的并投入应用的 PSS 系统较多, 在 2000 年至 2001 年, 基于 Internet 建立了全世界范围 PSS 系统的名录, 2004 年 Stan Geertman 等人对名录进行详细分析并识别各类具

有代表性的 PSS 系统的主要特征，并给出了 PSS 的未来发展趋势。^[11]

随着城市规划领域 PSS 研究的增多，以及计算机技术的不断进步，计算机技术在城市规划和环境规划领域应用方面，已有每年一度的“计算机在城市规划管理中应用（Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management, CUPUM）”^[12]会议，就这一方面的研究问题进行交流和讨论。

从以上关于国外 CAP 的研究状况和进展可以看出，国外城市规划、环境规划乃至区域水污染控制系统规划的 CAP 系统，一般都能保持与计算机技术的同步发展，近年来 PSS 已经成为城市规划领域 CAP 系统的主流发展方向，但在环境规划领域乃至区域水污染控制系统规划领域的应用仍然较少，在这一领域 PSS 的应用还具有较大的发展潜力，可以将城市规划领域 PSS 成功案例的研究方法引入区域水污染控制系统规划领域。

1.3.2 国内研究进展

在国内，CAP 系统也经历了基本规划算法、水质模型、MIS、DSS 等几个阶段。国内部分博士论文也就这一方面进行了研究^[13, 14, 15]。20 世纪 80 年代末期，国内引入了 GIS 技术，随之 GIS-CAP 系统在城市规划、环境规划等方面都有了一定的发展，这类系统主要实现了数据管理、资料查询、统计分析等功能。目前 GIS-CAP 系统尚处于发展阶段，尚未完全发挥 GIS 在空间分析上的强大功能，同时 GIS 与规划模型的集成还不够深入^[16-19]。

在水污染控制系统规划中，GIS 技术可以发挥强大的空间数据处理功能，该领域的学者逐渐意识到开发 GIS-CAP 系统可以较大地提高规划效率，并随之取得了一定的应用^[20, 21, 22]，但这些 GIS-CAP 系统都不具有较好的可移植性，一般只能满足一个规划项目的辅助功能。同时，这些系统主要基于国内外的 GIS 商业软件采用松散方法进行 GIS 与规划模型的集成，实现的主要功能是空间数据的管理、查询、分析等，在决策方面有所欠缺。

20 世纪 90 年代初，随着决策支持系统的引入，部分学者对环境规划的决策支持系统的系统结构、功能等方面进行了探讨^[23, 24, 25]，同时给出环境规划决策支持系统的发展方向，是国内环境规划 DSS-CAP 系统的最初研究，对后来的系统开发具有一定的指导意义。随之有了相应的 DSS-CAP 系统的开发成果^[26-29]，也有很多学者纷纷把目光投到水资源规划与管理这个领域^[30-37]。但这些 DSS-CAP 系统，一般其数据库功能较为完善，而模型库方面还不够深入。一定意义上，还停留在 MIS 层次。

国内在环境规划乃至水污染控制系统规划 CAP 方面的研究较多，具体研究的时间序列如图 1-5 所示。

时间	系统名称	研究者
1990	流域规划模拟系统	陈循
1993	区域水污染控制系统规划CAP技术初步探讨	蒋勇
1996	基于GIS的规划支持系统	曾思育
	城市水环境总量控制CAP系统	李炜
	智能CAP原型系统	曾思育
	流域计算机集成模型系统	贾海峰
1999		
	基于Geonedia的水污染控制规划数据管理	何强
	基于GIS的水污染控制规划数据库	何强
2002	基于Geodatabase的城市污水处理系统规划辅助系统	龙瀛
	基于COMGIS的城市排水管网规划辅助系统	赵冬泉
	非点源污染控制信息系统	宋科
2004	基于组件的区域生态环境管理DSS研究	龙瀛

图 1-5 国内主要水环境规划 CAP 系统时间序列

在水污染控制系统规划、水污染物总量控制规划等方面，陈循（1989）

开发的流域规划模拟系统，可以说是国内最早的流域水污染控制规划的 CAP 系统，该系统采用 AutoCAD 作为规划平台，同时采用 AutoLISP 语言实现部分规划相关的计算工作，在浑太流域得以成功应用^[38]；蒋勇（1993）在规划方法学研究和国内外 CAP 相关研究的基础上，对区域水污染控制系统规划 CAP 技术进行了初步的研究和探讨^[39]；曾思育（1996）提出了以 GIS 技术为基础的 PSS，在国内尚属首次，并在此基础上提出引入人工智能技术到 CAP 系统中^[40, 41, 42]；李炜（1997）对城市水污染物总量控制计算机辅助规划系统进行了初步的分析和研究，提出了水环境规划 GIS-CAP 系统的原型^[43]；贾海峰（1998）提出了流域规划计算机集成模型系统，用于水库流域的水质规划，可以说是初级阶段的 PSS^[44]；何强（2001）开发了基于 GIS 的风嘴江水污染控制规划数据库^[45, 46]。

在污水处理厂布局、城市排水管网规划方面，龙瀛（2002）提出了基于 Geodatabase 的城市污水处理系统规划辅助系统，在提高规划效率方面该系统具有较大的优势^[47]；赵冬泉（2003）对此研究进行深入，开发了基于 COMGIS 的城市排水管网规划 GIS 辅助系统，功能上实现了管网绘制、计算和调整，设计上引入了面向对象的思想，将管道计算中涉及的管道、管网节点、排水区域抽象为“对象”并封装为相应的“类”，然后利用 COM 技术对“管网类”进行扩充和复用。^[48]

纵观国内多年来在环境规划领域 CAP 系统的研究，从最初的 CAP 系统框架设计，到详细设计、智能化策略，再至后来 GIS-CAP 系统、DSS-CAP 系统，以及面向对象技术、组件技术的引入，从独立系统的角度，CAP 系统的研究基本上把握了计算机软件技术的发展，而整体上这些 CAP 系统一般不具备较强的可移植性，一般都是针对不同的规划项目重新开发。

1.3.3 问题分析

在国外的城市规划领域，CAP 技术已经有了较为成熟的应用，PSS 作为目前 CAP 系统的研究热点，其在国外、国内的区域水污染控制系统规划领域的研究都较少，应推动 PSS 在这一领域的应用。同时鉴于国内外

CAP 系统的脆弱移植性，笔者本文提出的 PSM 模型可以较好解决这一问题，保证 CAP 系统间的代码可复制性。

1.4 技术路线及各章主要内容

本论文研究的技术路线如图 1-6 所示：在对区域水污染控制系统规划内容界定、规划方法探讨和实质分析的基础上，对 PSM 模型进行需求分析和总体设计，之后分别针对 PSM 模型中的要素模型、域模型、关系模型、方法模型和模拟模型进行详细设计。在此基础上提出 PSM 模型的两种主要开发模式，最后给出 PSM 模型在佛山市水资源保护与水污染控制规划项目中的应用。

第一章、引言：主要就本论文的课题目的和意义、国内外研究进展以及研究内容进行介绍，并给出论文研究的技术路线和各章节的主要研究内容。

第二章、区域水污染控制系统规划基础：主要对区域水污染控制系统的规划内容、规划方法和规划实质等进行分析和介绍。

第三章、模型设计：在对 PSM 模型进行需求分析的基础上，给出 PSM 模型的总体设计方案，并采用 UML 具体设计 PSM 模型中的要素模型、域模型、关系模型、方法模型和模拟模型。

第四章、开发模式：首先探讨 PSM 模型的开发模式并对其进行比较研究，在此基础上给出基于 Geodatabase 和 COM 的 PSM 模型及相应的 CAP 系统开发模式。

第五章、模型应用：作为本论文的应用案例章节，主要介绍模型应用的项目背景、模型的设计和开发模式、模型的应用步骤以及对模型应用的评价。

第六章、结论与建议：对整个论文的研究进行总结，给出主要研究结论并提出论文后续研究的相关建议。

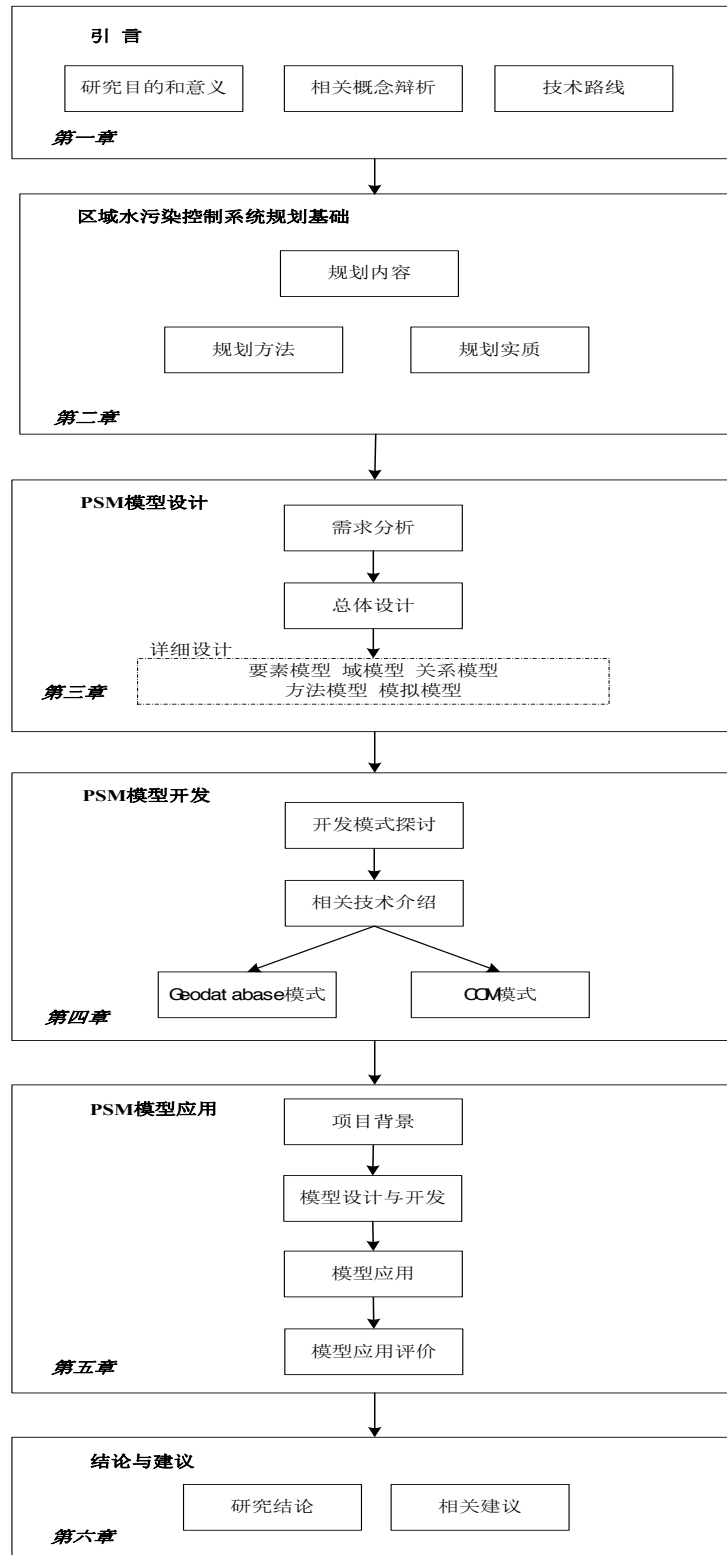


图 1-6 论文研究的技术路线

第2章 区域水污染控制系统规划基础

20 世纪 60 年代以后，随着人口的增长和工业的发展，水环境污染的问题在各国不断加剧，由此提出了水污染控制系统规划这一课题。本论文的研究对象——PSM 模型，主要是为区域水污染控制系统规划提供辅助规划的服务。对规划有一个较为全面和深入的认识，有助于 PSM 模型的设计和开发。本章具体针对区域水污染控制系统规划的相关内容进行介绍。

2.1 规划内容

区域水污染控制系统规划，主要研究对象是区域内的水污染控制系统，主要目的在于通过水污染控制系统的建设，削减入河污染负荷，改善水环境质量。

区域水污染控制系统规划的研究内容主要包括以下几方面：

- (1) 水环境解析：对水环境现状水质进行评价，识别主要纳污河流和主要污染物，以及对河流的水环境容量（水环境承载力）进行计算；
- (2) 现状污染源评价：根据目前的污水排放情况，识别主要污染源、排污行业、纳污水体和排污城镇等，作为水污染控制系统规划的工作基础；
- (3) 污染源预测，通过对各规划水平年各工业、生活污染源的预测，确定各规划水平年各污染源的污水排放量和污染物排放负荷；
- (4) 水污染控制基本单元解析：在污染源预测的基础上，按地形、行政区及河流等因素合理划分水污染控制基本单元，分析各水污染控制基本单元的情况，并计算其污染负荷；
- (5) 系统布局确定：在基本单元解析和水质模拟的基础上，确定合理的区域水污染控制系统的规划方案，制定其实施计划，以保障水环境污染控制工作的进行。

2.2 规划方法

区域水污染控制系统规划的研究方法主要分为反向算法和正向算法。无论是反向算法还是正向算法，其实质都是通过水质模型建立污染源与水环境质量之间的响应关系，为实现环境目标寻求水环境质量与技术经济等条件之间的最佳结合点。

2.2.1 反向算法

在目标水体水质功能区划的基础上，计算水体的环境容量和允许排放量，然后根据一定的策略对允许排放量进行分配，计算每个污染源的允许排放量。反向算法是从水环境质量目标出发，落实到污染源治理的一种规划方法。

目前反向算法的主要方法一般都是运筹学的基本规划方法，比较常见的有线性规划法、动态规划法、非线性规划法和混合整数规划法等，最近又出现了退火模拟法^[49]、遗传算法^[50, 51, 52]等新方法。这些方法根据污染源、水体等提供的信息，一次求出水污染控制系统规划的最佳方案。

反向算法思路清晰，目标明确。但是每一个具体步骤都存在很大的不确定性，结果的实用性也受到限制。^[5]

2.2.2 正向算法

正向算法是在污染源预测的基础上，根据实际条件制订污染源的污染控制规划可行方案，然后对每个可行方案进行经济、环境和社会影响分析，根据分析结果筛选满意的方案。规划时可暂时不考虑水污染控制系统与水环境之间的关系。规划方案确定后，通过不同规划方案污染物排放与水体水质之间关系的模拟，检验方案的环境影响，如果水质目标不能达到要求，则方案不可取。最后从可取的方案中，经过多方案的比选，给出优选方案作为实施方案。

采用正向算法优选的方案不一定是所谓的“最优方案”，方案的合理与否很大程度上取决于规划人员的经验与水平。因此在应用正向算法时，要尽可能多地提出一些“非劣”的规划方案，以供筛选。正向算法得出的

实施方案往往可操作性较强。因此在很多情况特别在较高层次的战略规划研究中，正向算法更有独特的优越性。

基于对这两种主要规划技术路线的分析和比较，以及相关国内外的研究进展，本研究选用正向算法作为本论文中所提及的区域水污染控制系统规划的技术路线。

2.3 规划实质

无论是正向算法还是反向算法，其实质都是通过一定的技术方法确定并优化污染物的重新分配方案，其中重新分配包括污染物的空间转移和介质转移，空间转移是指通过水污染控制系统的建设，污染物由分散转向集中，由多变少；介质转移是指污染物由水中部分转移至污水处理厂的污泥。

区域内在无规模水污染控制系统时，污染物一般是无序排放，生活污水沿河呈线状的点源排放，工业污水就近通过排放口排放。这种状态下的污染物主要依靠水体的自净能力降解。当污染物的排放超过水环境容量后，就形成了水环境的污染。通过区域水污染控制系统的建设，可以改变污染物的无序排放状态为有序排放，变直接排放为间接通过水污染控制系统排放，进而降低污染物的排放负荷，从浓度和总量上削减污染负荷。水污染控制系统规划前后的污水排放口布局如图 2-1 所示。

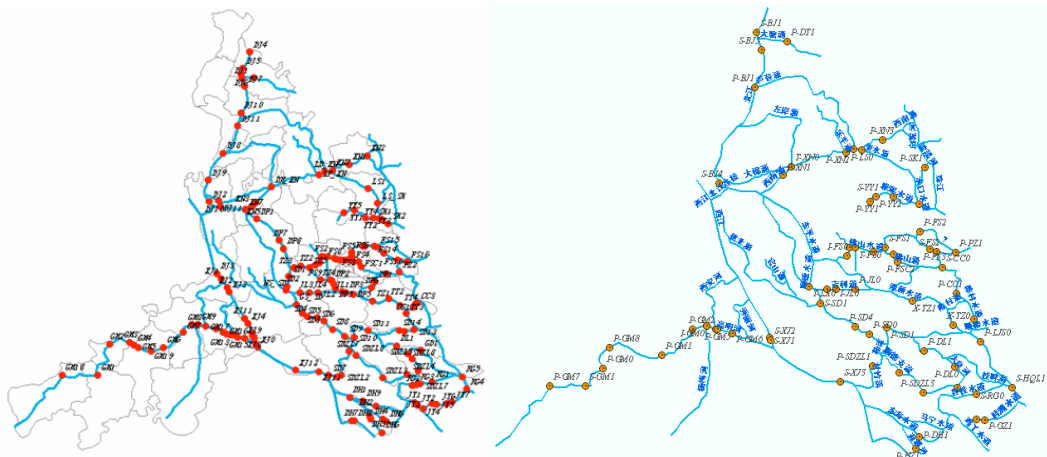


图 2-1 区域水污染控制系统规划前（左图）后（右图）污水排放口分布图（佛山为例）

污染负荷的重新分配对水体环境的影响，还需要考虑河流的基本情况，这就需要利用河流水质模型来建立污染负荷空间分配与河流水环境质量的关系。

通过对区域水污染控制系统规划实质的分析，可以看出规划的过程就是污染负荷的重新分配方案的优化过程，每一种污染负荷分配方案，都对应着相应的技术、经济以及水体环境影响情况，无论是正向算法还是反向算法，都是致力于通过多目标分析来获得较优的污染负荷分配方案。

2.4 本章小结

本章在对区域水污染控制系统规划的主要内容（水环境解析、污染源现状评价、污染源预测、水污染控制系统基本单元解析和系统布局确定）与规划方法（正向算法和反向算法）进行介绍的基础上，对区域水污染控制系统规划的实质进行分析，提出所谓的“规划即为污染负荷的空间重新分配的优化”。

在对区域水污染控制系统规划有较为全面而深入认识的基础上，第三章主要就 PSM 模型的总体设计和详细设计进行介绍。

第3章 模型设计

模型设计是模型开发的基础，选择合适的工具和方法进行模型的设计，是模型开发和应用的有力保障，下面具体针对 PSM 模型的需求分析、总体设计和详细设计进行讨论。

3.1 需求分析

3.1.1 结构需求

PSM 模型主要通过对区域水污染控制系统的各要素以面向对象的方法进行模拟来实现辅助规划的功能，要对 PSM 模型进行结构设计，首先应明确 PSM 要模拟的具体实体系统的要素构成。

对于区域水污染控制系统这一复杂的系统，从结构上可以分为子系统、模块和单元三个层次，其中子系统层次主要包括污染物发生子系统、污水收集/输送子系统、污水处理子系统和受纳子系统。每个子系统又包括相应的模块，具体每个子系统的模块构成如下（其中受纳子系统主要指污水的受纳对象，这里以河流为例，具体包括概化后的河段以及河段两端的取水口、水文监测断面、水质监测断面和排污口等人工要素）：

- （1） 污染物发生子系统：独立工业污染源、生活污染源、工业园区、农业面源，城市面源；
- （2） 污水收集/输送子系统：污水泵站、污水管道；
- （3） 污水处理子系统：污水处理厂（或土地处理系统、氧化塘等）；
- （4） 受纳子系统：取水口、水文监测断面、水质监测断面、排污口和河段（或其他受纳水体如湖泊、海洋、土地、回用等）；

其中各模块之间的具体关系如图 3-1 所示，其中独立工业污染源和生活污染源的污水通过污水管道和污水泵站可以直接排入河流，也可以经过污水处理厂处理，经污水管道排入河流；而对于城市面源和农业面源，一般直接排入河流；工业园区的污水，通过其内部的污水处理系统一般可以

直接排入河流。

对于基本元素相对较为复杂的模块，一般还可以分解为第三层次——单元，如污水处理厂模块还可以分解为格栅、曝气池和沉淀池等单元。本研究讨论的 PSM 模型，考虑到规划的层次和需求，仅就第一层次和第二层次进行研究，不涉及第三层次——单元。

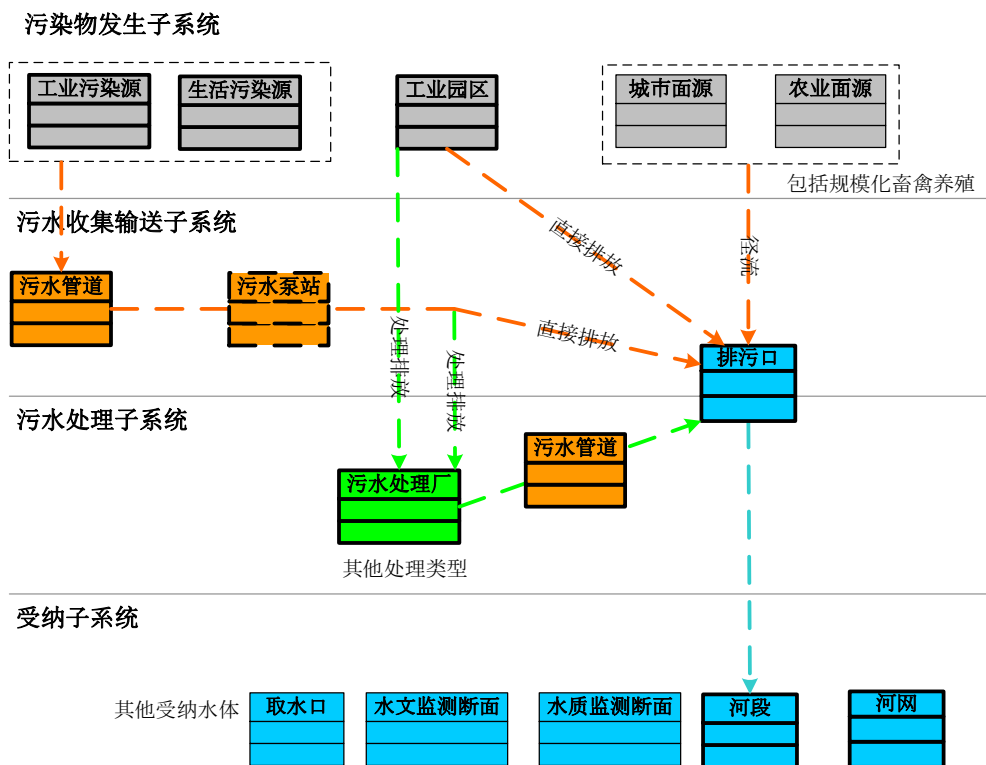


图 3-1 区域水污染控制系统要素构成示意图

3.1.2 功能需求

区域水污染控制系统规划，主要包括资料调查与处理、水环境解析、污染源解析、基本服务区（即汇水单元，是污水收集、处理的基本地理单元，若干个这样的基本服务区的组合构成污水处理厂的服务区）解析、方案生成、方案评价与优选和方案实施等几部分的工作，各步工作一般都涉及到空间、属性数据的管理和分析工作。规划各阶段 PSM 模型要实现的功能具体如图 3-2 所示。总体上 PSM 模型主要从数据标准化、数据处理、空间查询、数据分析和成果表达等几个方面起到辅助规划的作用。

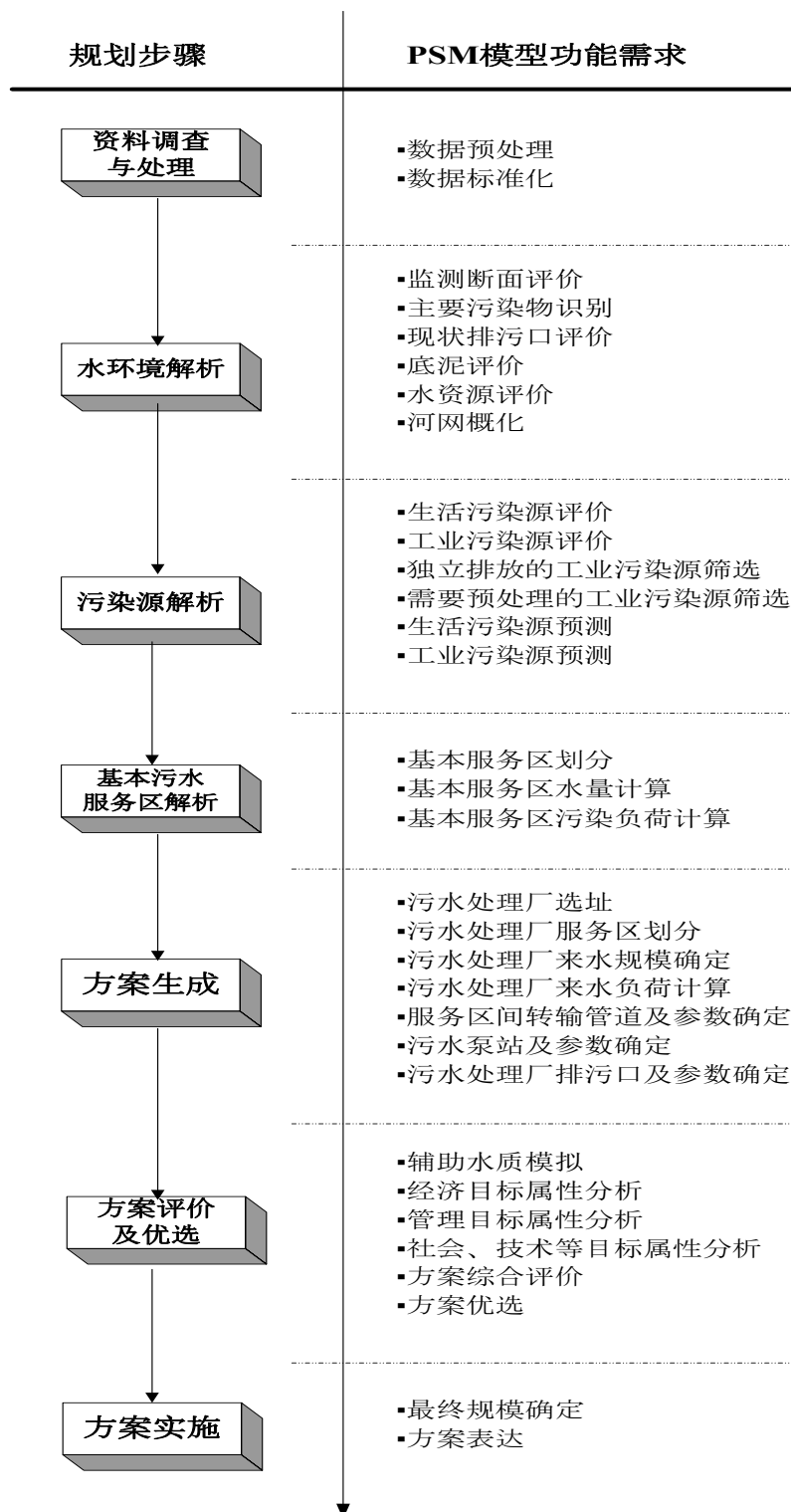


图 3-2 PSM 模型功能需求

3.2 总体设计

3.2.1 UML 简介

鉴于 UML 是软件工程上的通用建模语言，笔者采用 UML 对 PSM 模型的总体结构和具体模型进行设计，以便于 PSM 模型的开发。

UML（Unified Modeling Language，统一建模语言）是一种软件工程建模语言，是第三代用来为面向对象开发系统的产品进行说明、可视化和编制文档的方法。它是由信息系统和面向对象领域的三位著名的方法学专家——Grady Booch、James Rumbaugh 和 Ivar Jacobson 提出的。这种建模语言得到了随之建立的“UML 伙伴联盟”的应用，并得到工业界的广泛支持，OMG 组织（Object Management Group）将其纳为业界标准。UML 目前已取代软件工程的众多分析和设计方法成为一种标准。

UML 是一种标准的图形化建模语言，它是面向对象分析与设计的一种标准。UML 的目标是用面向对象的方法描述任何类型的系统。最直接的是用 UML 为软件系统创建模型。UML 的应用贯穿在系统开发的五个阶段——需求分析、分析、设计、构造和测试。

3.2.2 模型定位

- （1）服务于区域水污染控制系统规划，实现辅助规划的功能；
- （2）作为 CAP 系统的开发基础，可以用来开发不同需求的 CAP 系统；
- （3）模型应为其向智能化方向发展提供相应的接口和解决方案；
- （4）模型应具有一定的通用性，便于向流域水污染控制系统规划和城市水污染控制系统规划过渡。

3.2.3 模型结构

区域水污染控制系统 PSM 模型的总体结构如图 3-3 所示，主要包括要素模型、规则模型、方法模型和模拟模型：

- （1）要素模型用于定义区域水污染控制系统各模块层次的要素，是 PSM 模型的基础；
- （2）规则模型主要任务是用于驱动要素模型对象的建立和维护，可

以最大程度地减少要素模型应用于规划时的数据维护的工作量，提高数据的管理效率和完整性。其中域模型用于维护要素模型属性字段的取值范围，关系模型用于维护要素模型之间的拓扑关系；

- (3) 方法模型用于要素模型数据集的操作，辅助规划数据（包括要素模型对象的属性数据）的计算、查询、更新等功能主要是通过方法模型来实现的；
- (4) 模拟模型主要用于河流的水质模拟，模拟模型可以是新开发的水质模型，也可以是现有的水质模型。在设计阶段，只对模拟模型的选择和基本属性进行介绍。

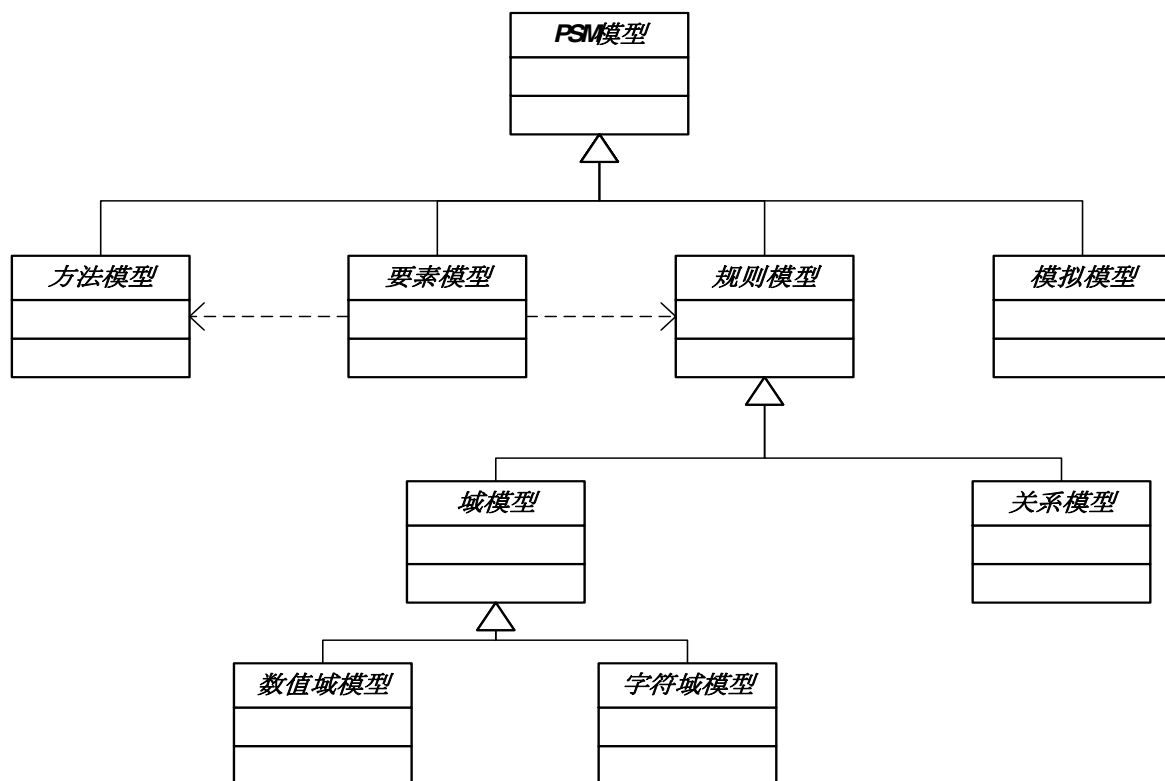


图 3-3 PSM 模型总体结构

下面具体就要素模型、域模型、关系模型、方法模型和模拟模型的设计进行介绍。

3.3 详细设计

3.3.1 要素模型设计

要素模型的类图如图 3-5 所示，主要考虑了区域水污染控制系统中模块层次的基本要素，主要包括独立工业污染源、生活污染源、农业面源、城市面源、工业园区、取水口、水文监测断面、水质监测断面、河段、河网、污水管道、排污口、污水泵站、基本服务区、污水处理厂、水质功能区和规划方案等。其中的规划方案要素模型用于组织区域水污染控制系统的各个要素，以便于进行规划方案的生成、评价和优选等工作。

3.3.2 域模型设计

域模型定义了各要素模型属性字段的取值范围，分为数值域模型和字符域模型两种。可以定义每个要素模型的属性字段对应某一个域模型的对象，以限制该成员变量的取值范围。采用 UML 进行域模型设计的类形式如图 3-4 所示。

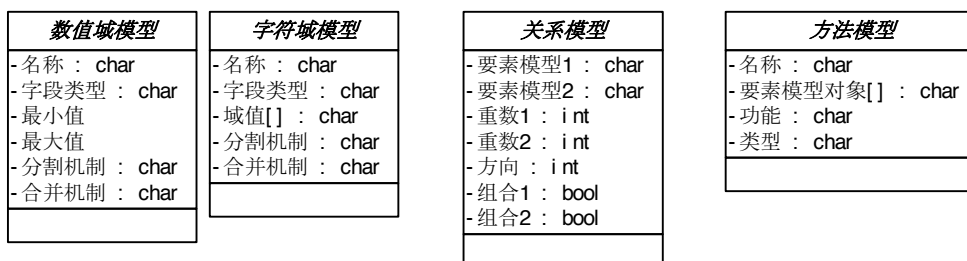


图 3-4 域模型（左一、左二）、关系模型（左三）及方法模型（右一）的类结构

表 3-1 和表 3-2 分别为 PSM 模型中所设计的部分数值域模型对象和字符域模型对象，以及采用这些域模型对象的要素模型相应字段名称。

第三章 模型设计

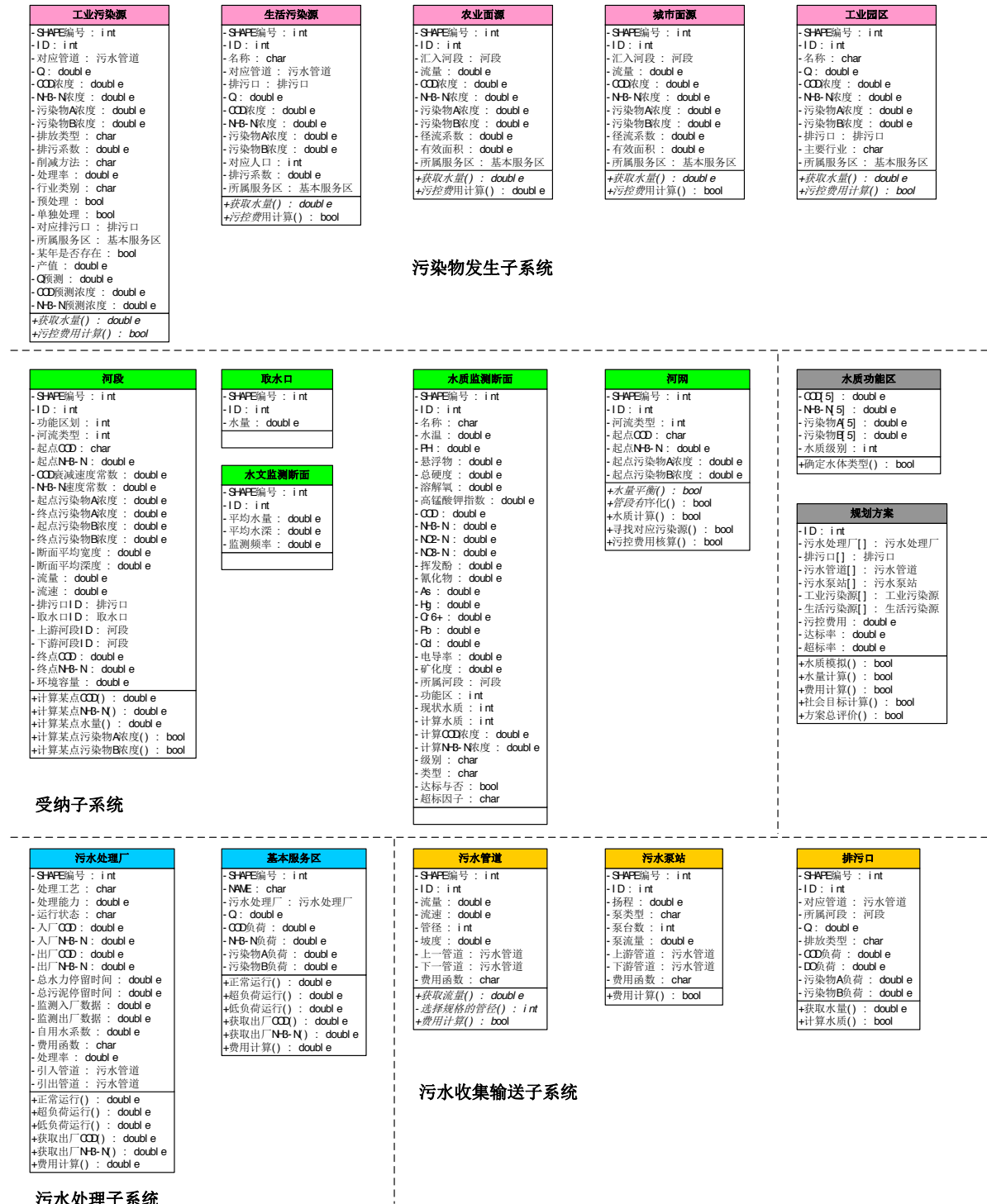


图 3-5 要素模型设计

表 3-1 数值域模型设计

名称	字段类型	最小值	最大值	分割机制	合并机制	应用字段
Level	短整形	1	6	复制	复制	水体功能区划/现状水体级别字段(6代表劣V类水体)
PH	短整形	1	13	复制	复制	水体 PH 值
Industry	长整形	1000	9999	复制	复制	工业污染源的行业代码

表 3-2 字符域模型设计

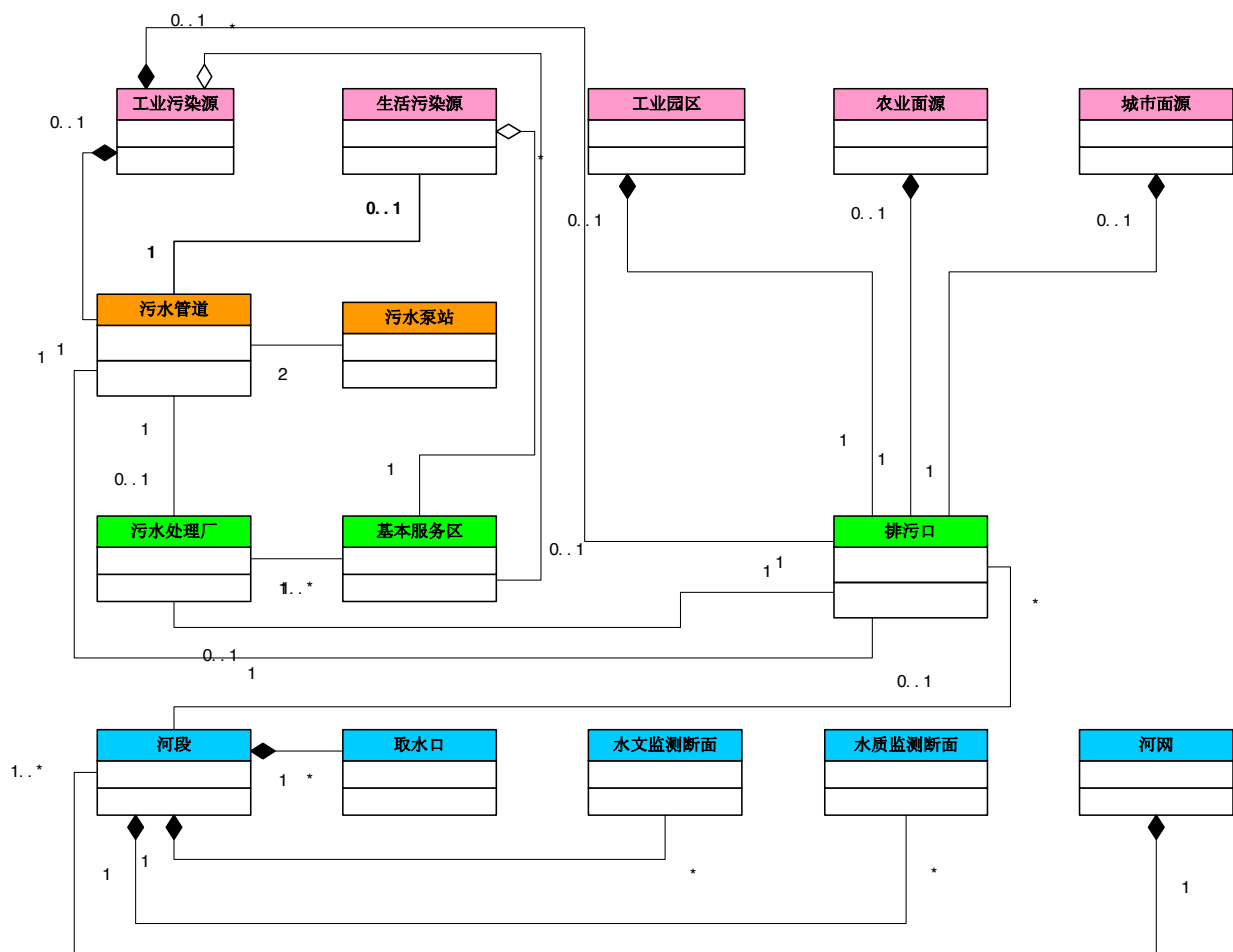
名称	字段类型	域值	分割机制	合并机制	应用字段
District	文字	研究区域内各行政区的名称	复制	复制	区名称
Town	长整形	研究区域内各镇的名称	复制	复制	镇名称
DN	长整形	100, 200, 300, 500, 800, 1000	默认值	复制	管径

3.3.3 关系模型设计

关系模型分为简单关系和复合关系：如果要素模型对象 A 和要素模型对象 B 之间是简单关系，对象 A 从系统中被删除后，对象 B 依然存在；而如果是复合关系，一个对象被删除，消息传送给相关联的对象，则其也将被删除。

图 3-6 中要素模型对象与要素模型对象之间的连线表示要素模型对象之间的关联，如污水处理厂要素模型和基本服务区要素模型的关联，表示一个污水处理厂至少对应一个基本服务区，它们之间是一种简单关系。而河段要素模型和监测断面要素模型的关联，表示一个河段可以有 $0 \sim \infty$ 个监测断面，一个监测断面在一个河段上，如果删除河段要素模型对象，则它所对应的监测断面要素模型对象也自动删除。

关系模型也以类的形式存在，其形式如图 3-4 所示。



注意：图中二元关系如果不带方向，默认为双向关系。

图 3-6 关系模型结构框图

3.3.4 方法模型设计

方法模型主要用于存储对要素模型的相关操作，PSM 模型主要是依靠方法模型对要素模型进行数据处理，实现辅助规划的功能，方法模型的设计是 PSM 模型的设计重点。可以采用 UML 对方法模型进行设计，方法模型的类结构如图 3-4 所示，每一个方法模型对应于该类的一个对象。表 3-3 给出 PSM 模型中方法模型的具体设计。

表 3-3 方法模型设计

序号	名称	要素模型 对象数组	类别	功能
1	PRE 数据标准化 (1-10)	各要素图层	更新	根据预处理数据完善要素图层相关数据
11	ASS 主要污染河流	河流	生成	识别主要污染河流
12	ASS 河流现状水质	河流	更新	对河流进行水质评价, 识别主要污染因子
13	ASS 等标污染负荷	工业污染源, 生活污染源	更新	计算各污染源的等标污染负荷
14	ASS 主要排放行业	工业污染源	生成	根据等标污染负荷, 统计主要工业污染行业
15	ASS 主要污染物	工业污染源, 生活污染源	生成	根据等标污染负荷, 统计主要污染因子
16	ASS 受纳河流	工业污染源, 生活污染源	生成	根据等标污染负荷, 统计主要受纳河流
17	ASS 主要污染源	工业污染源	生成	根据等标污染负荷, 统计主要污染源
18	ASS 主要贡献镇	工业污染源, 生活污染源	生成	根据等标污染负荷, 统计主要污染贡献镇
19	SEL 独立排放的工业污染源	工业污染源	更新	筛选独立排放污染源
20	SEL 预处理的工业污染源	工业污染源	更新	筛选预处理的污染源图层
21	SEL 预处理的工业污染源分类	工业污染源	更新	对预处理的工业污染源进行分类
22	FORE 污染源水量	工业污染源, 生活污染源	更新	更新污染源预测水量
23	FORE 污染源负荷	工业污染源, 生活污染源	更新	根据水量和浓度, 更新污染源预测负荷

第三章 模型设计

序号	名称	要素模型 对象数组	类别	功能
24	SEN 基本服务区	工业污染源、生活污染源, 污水处理厂	更新	更新基本服务区的水量和负荷属性
25	SEN 污水处理厂图层	基本服务区, 污水处理厂	新建	生成污水处理厂图层
26	SEN 污水处理厂进水浓度	污水处理厂	更新	计算各污水处理厂的进水浓度
27	SEN 排放口图层	污水处理厂, 排放口	新建	完善排放口图层
28	SEN 干流排放口图层	排放口	新建	生成干流排放口图层
29	SEN 支流排放口图层	排放口	新建	计算支流排放口图存
30	SEN 河段纳污情况	河流、排放口	更新	统计河段各方案下的纳污情况
31	CAL 基建费用	污水处理厂、污水管道、污水泵站	更新	计算各方案的基建费用
32	CAL 运行费用	污水处理厂、污水管道、污水泵站	更新	计算各方案的运行费用
33	CAL 方案年总费用	污水处理厂、污水管道、污水泵站	更新	计算各方案的年总费用
34	CAL 方案水质模拟输入	排放口	生成	根据排放口图层数据, 为模拟模型提供输入数据
35	CAL 方案水质模拟输出	监测断面	更新	获得方案水质模拟结果, 更新监测断面图层
36	CAL 规划方案	规划方案、污水处理厂、污水管道、污水泵站、排放口	生成	生成各方案的详细属性表

序号	名称	要素模型	类别	功能
		对象数组		
37	CAL 方案综合评价	规划方案	更新	生成各方案的最终评价结果，以用于方案优选

注：方法模型“PRE 数据标准化（1-10）”表示在本研究的 PSM 模型中，预留 10 个方法模型用于数据标准化。具体用于数据标准化的方法模型的预留数量取决于规划基础资料的数量、质量和深度等因素。

3.3.5 模拟模型设计

模拟模型主要用于水质模拟，建立污染源与受纳水体之间的响应关系。可以采用 UML 对模拟模型进行设计，其类的形式如图 3-7 所示，每一个模拟模型对应于该类的一个对象。在 PSM 模型中，一般提供几个模拟模型用于选择。表 3-3 给出部分模拟模型的具体设计。

<i>模拟模型</i>
-名称：char -维数：int -功能：char -类型：char -输入参数[]：char -输出参数[]：char

图 3-7 模拟模型的类结构

表 3-4 给出了 PSM 模型中模拟模型结构的具体设计。

表 3-4 模拟模型结构设计

序号	名称	维数	输入参数	输出参数
1	宏观水质模型	0	节点负荷信息及河流流量	节点基本水质
2	Streeter-Phelps(S-P)	1	排放口数据及河流参数	节点基本水质
3	CSTR	0维串联的1维	水文参数及排放口参数	各段综合水质
4	QUAL-II	1	水文参数、排放口参数等	各断面综合水质

注：现有的水质模型较多，本文只列出几个典型的模型，具体的模型选取可在规划工作中，根据实际需求确定。宏观水质模型的具体设计将在下一章水质模拟模块开发中进行介绍。如无特殊说明，本论文中所提及的 COD 均指 COD_{Cr} 。

3.4 本章小结

本章主要就 PSM 模型的设计进行介绍。作为 PSM 模型设计的基础，首先根据区域水污染控制系统的要素结构，进行了 PSM 模型的结构需求分析，根据区域水污染控制系统规划的具体内容进行 PSM 模型的功能需求分析。UML 作为软件工程的通用建模语言，采用 UML 作为 PSM 模型总体设计和详细设计的建模语言。根据模型的总体设计，本章具体针对 PSM 模型中的要素模型、域模型、关系模型、方法模型和模拟模型的设计方法进行介绍。

采用 UML 设计的 PSM 模型，便于采用面向对象的方法进行开发，第四章主要就 PSM 模型的开发进行详细介绍。

第4章 开发模式

4.1 引言

在利用 UML 进行 PSM 模型总体设计和详细设计的基础上,需要采用计算机软件工程的相关技术对 PSM 模型进行开发,以用于 PSM-CAP 系统(基于 PSM 模型的 CAP 系统,下同)的开发。近年来计算机技术有了较为快速的发展,数据库技术、地理信息系统技术、面向对象技术都有了较大的进步,传统的面向过程的开发模式已显得不适应 PSM 模型 CAP 系统开发的需要。

对于可应用于不同区域的水污染控制系统规划的 CAP 系统,鉴于规划的详细程度、复杂度、规划人员的计算机掌握能力、CAP 系统开发投入、现有计算机软硬件条件等多方面的差异,需要不同的 PSM 模型及 PSM-CAP 系统的开发模式,以适应不同规划的需要。

本章主要提出基于 COM 和 Geodatabase 的两种 PSM 模型及 PSM-CAP 系统的开发模式,其中前者具有开发工作量大、系统相对灵活、规划效率高等特点,而后者具有开发工作量小、规划效率相比前者低和手动干预多等特点。具体对比如表 4-1 所示。

表 4-1 PSM 模型开发模式对比表

开发模式	COM 模式	Geodatabase 模式
功能	一般	较多
ArcGIS 支持	不需要	需要
辅助规划效率	较高	一般
系统成本	较低	较高
COMGIS 组件支持	需要	不需要
PSM 模型开发的工作量	较大	较小
PSM-CAP 系统开发的工作量	较大	较小

开发模式	COM 模式	Geodatabase 模式
PSM 模型实体形式	DLL、OCX、EXE 等	Geodatabase
PSM-CAP 系统实体形式	应用软件	ArcGIS 扩展

4.2 COM 开发模式

4.2.1 COM 和 COMGIS

COM (Component Object Model, 组件对象模型), 是关于如何建立组件以及如何通过组件构建应用程序的一个规范, 是微软 (Microsoft) 公司用于构建可重用对象的标准。为了使各种软件产品更加灵活、更具有动态性并且更易于定制, 微软公司几年前就已经开始开发 COM。目前微软公司的几乎所有应用程序都使用了 COM。这些对象是独立于任何一种编程语言的二进制对象模块, 具有明确定义的、面向对象的各种接口。^[53]

COM 组件采用面向对象的方法设计程序, 提供了软件服务的一致性, 组件内部的类型库能够精确描述它提供的接口的调用规范, 自身能够提供一个详尽的调用文档, 来说明各个参数及其返回值的个数、类型及意义, 而且 COM 组件对多接口的支持使得组件的更新不会影响现有的客户程序。组件的应用不再局限于组件开发使用的语言环境, 它可以支持所有支持组件的语言, 包括最新的基于 “.NET” 框架的托管应用程序。组件编程是实现代码复用技术的首选, 使用组件来封装现有的源程序代码, 是一条实现代码复用的捷径。^[54]

随着 COM 技术和 GIS 技术的发展, 出现了组件式 GIS (COMGIS) 的概念。原来的巨型 GIS 系统正迅速分解为基本的 GIS 组件^[55, 56]。用户可以在可视化开发环境中将 GIS 组件嵌入到应用程序中, 方便地实现 GIS 的相关功能。

组件式 GIS 的基本思想是把 GIS 的各大功能模块划分为几个控件, 每个控件完成不同的功能。各个 GIS 控件之间, 以及 GIS 控件与其它非 GIS

控件之间，可以通过可视化的软件开发工具集成，形成最终的 GIS 应用。通过组件化，把 GIS 的功能适当抽象，以组件形式供开发者使用，将会带来许多传统 GIS 工具无法比拟的优点。

目前，COMGIS 的代表作应首推 MapObjects 以及 MapX 等。其中 MapObjects 由全球最大的 GIS 厂商 ESRI（Environmental System Research Institute）推出^[57]；MapX 由著名的桌面 GIS 厂商 MapInfo 公司推出^[58]。国内的有北京超图地理信息技术有限公司的 SuperMap^[59]、武汉中地信息工程有限公司的 MAPGIS 组件^[60]和武汉吉奥信息工程技术有限公司的 GeoMap 等。

下面就基于 COM 进行 PSM 模型和相应 PSM-CAP 系统开发的具体过程进行介绍。

4.2.2 PSM 模型的开发

要素模型、域模型、关系模型和方法模型主要以 COM 方式进行开发。具体的开发流程如下（以 Visual C++ 为例）：

- （1）框架生成：将 UML 设计的类图采用 CASE 方法导出为 Visual C++ 的工程文件，生成要素模型的结构代码；^[61]
- （2）要素模型开发：应用 COM 技术对要素模型进行开发，设计并建立 COM 对象和相应的接口，采用 ATL 方法，C++ 语言和 Visual C++ 编译环境；^[62]
- （3）域模型开发：根据域模型的设计，修正要素模型的代码，实现各个域模型类的结构代码；
- （4）关系模型开发：根据关系模型的设计，编写关系模型的代码，并将关系模型嵌入要素模型的生成、编辑等函数中；
- （5）方法模型的开发：根据方法模型的设计，编写具体的实现代码，其中方法模型涉及到的要素模型类，以参数的形式出现在方法模型的对应函数中；
- （6）模型打包：将 COM 对象打包成一个 DLL（Dynamic Link Library，动态链接库）文件，作为 PSM 模型的一部分，为 PSM-CAP 系统的开发提供底层支持。

模拟模型的开发是 PSM 模型开发的重点之一。作为建立污染源与河流水环境质量之间输入—响应关系的水质模拟模型，在一般的规划项目应用中，为了保证多个模拟模型能够紧密集成于 PSM 中，需要保证所有备选的模拟模型具有同样的封装形式和引用接口，基于组件的模拟模型是一种较好的解决方法。

一般的模拟模型都是采用面向过程方式进行开发，复杂的面向过程的模拟模型重新沿用面向对象的模式进行开发显然是不可行，下面具体针对传统模拟模型的组件化封装以及基于组件的新模拟模型的开发进行探讨。

1) 基于 COM 的模拟模型结构

在设计模拟模型组件时，必须先了解它需要提供的功能，分析组件应该提供几个接口，把实现的函数作为方法提供给用户，而对于一些中间调用的私有函数，则应该声明为实现类的私有成员函数，不应作为接口的方法函数公开。图 4-1 为 COM 组件的概念框图，COM 组件是以 DLL 或 EXE 文件形式存在的，其中 DLL 为进程内调用模式，而 EXE 为进程间（外）调用模式，图 4-1 展示的是以 DLL 形式存储的组件。一个 DLL 文件一般可以存储多个组件，每个组件可以有多个接口，每个接口包含若干函数。

每个 DLL 均有 DEF 文件用于描述 DLL 文件的入口，以便于其内部组件的调用。同时每个组件都有一个类厂，以便于访问该组件的接口。客户端可通过 CoCreateInstance 函数调用 DLL 文件中的组件。

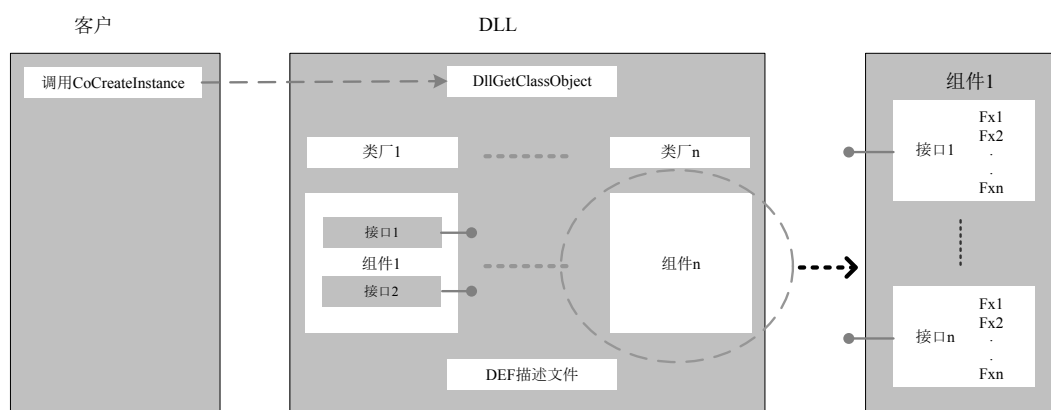


图 4-1 COM 组件的概念框图

图 4-2 为基于 COM 的模拟模型库框图，其中模拟模型库以 DLL 形式存在，模拟模型库索引文件用于描述 DLL 中存储的若干模拟模型的信息。这里每一个模拟模型对应图 4-1 中的一个组件，每一个模型描述对应图 4-1 中的类厂，用于标识每个模拟模型所包含的子模型的信息。

每个模拟模型可以包括若干个子模型（对应于图 4-1 的接口），而每个子模型又由若干个函数来实现模拟模型的基本功能。通过建立子模型库索引即模型字典，可以实现所有模拟模型的索引，便于模拟模型的选择与应用。

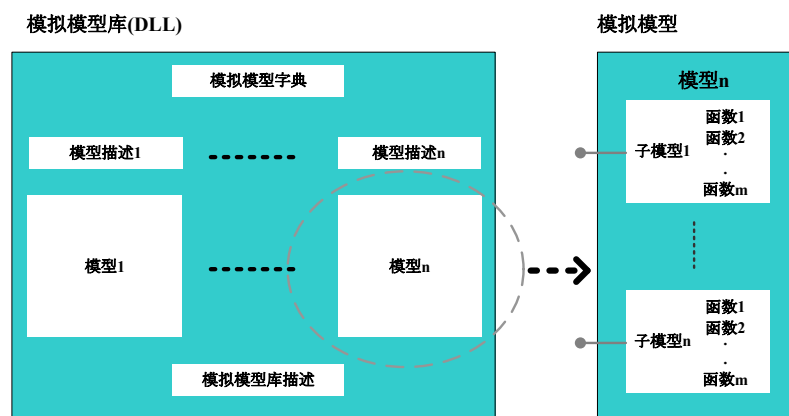


图 4-2 基于 COM 的模拟模型库框图

2) 基于 COM 的模拟模型的开发

采用 COM 技术开发模拟模型库的主要思路：对于新开发的模拟模型，可以采用 COM 技术直接进行模拟模型的开发；对于已有的模拟模型，采用 COM 技术对已有的模拟模型进行封装，将模拟模型的输入输出模块按标准的格式集成到组件中。

一、基于 COM 的模拟模型的开发

模拟模型主要一般由三个方面构成，输入模块、处理模块、输出模块。采用 COM 技术开发模拟模型，需要利用 COM 标准来包装模型的算法，把运行结果作为接口返回给用户。

在采用 COM 技术进行模拟模型开发的过程中，应尽量把中间过程的

接口留给用户，实现 COM 的层次功能，扩大其应用范围。开发过程中为了便于实现模型的参数率定、模型检验和灵敏度分析（状态与目标对参数，目标对约束）等功能，可以考虑把这些功能作为模拟模型组件所封装的函数，引出相应的接口给客户调用，以提高模拟模型的应用效率。

二、基于 COM 的已有模拟模型的封装

对于已有模拟模型的基于 COM 技术封装，国内外这方面的研究几乎没有，相对比较具有挑战性。基于 COM 技术的模型封装，主要思路是以待封装的模型集体打包至一个 DLL 文件中，利用 COM 标准来封装已，把模型的输入、输出作为组件接口供用户调用。对于不同类型的已开发的模拟模型，可以采用不同的封装方法，具体方法如下：

- （1）对于复杂的含有多模块的模拟模型，应将其分解为多个接口，每个接口有相应的方法与属性，然后再将各接口实现的功能进行聚合或包容，实现整体的功能；
- （2）基于 DOS 开发的模拟模型，一般以命令行和数据文件作为模拟模型的输入，通过键盘宏可以控制命令行的输入，同时数据文件也可以采用 COM 的库函数来读入，总体上的思路就是通过键盘宏来控制模拟模型的使用；
- （3）对于基于 Windows 开发的模拟模型：如果它本来就是基于组件开发的，则可以利用 COM 的包容或聚合手段直接利用该模拟模型；如果不是，则也可以通过键盘宏来控制窗口的输入。

三、宏观水质模型的开发要点

下面具体给出一种基于 COM 的用于区域（流域）级别水质模拟的“宏观水质模型（Macro-water quality model, MWQM）”，该模型本质上为零维串联的一维模型，不考虑水体的自净能力，参数主要包括排放口的位置、水量、污染物负荷，以及概化后的河网空间分布、水量和长度等。

该模型基于组件进行开发，在将河流概化为单线河的基础上，通过建立包括河流起始点、污水排放口、干支流交点的点集，生成基本的河段空间数据集，完善其上下游、分支等拓扑关系，以及河段的相关属性数据：

河段流量、长度、起点的污染物排放量、排放负荷等。

对于上下游河段之间的污染物响应关系，主要做了以下考虑：对于起点是排放口的河段，认为排放口的排放负荷瞬间在该河段内达到平衡，而对于起点是其他河段终点的河段，也认为在瞬间污染物达到混和，该河段的流量和总污染负荷是其各支流的总和。

对于概化后的河流，均为单线河，空间结构主要分为树状和环状两种，其中树状河流的污染物浓度求解，可以参考排水管网的水力、水量计算方法，而环状河流的求解，可以参考给水管网的压力平差方法。对于感潮河流，因为流量一直在变化，这类河流的模拟，需要获取同一个潮周期内不同时段流量资料，进行多次平行的水质模拟，以完成感潮河流整个潮过程的水质模拟。

这种模型具有需要基础数据少、算法执行效率高、易于与 PSM 模型集成和输入输出方便等特点，一定条件下可以用于水质的预模拟，对于自净能力较弱的河流，本模型更为适用。

四、基于 COM 的模拟模型的特点

总体上，采用上述方法开发的基于 COM 的模拟模型具有如下特点：

- (1) 符合模拟模型面向对象的开发趋势，便于应用于越来越多的面向对象开发的专业软件中；
- (2) 统一的接口标准便于模拟模型的调用，也便于模拟模型的层次架构的建立；
- (3) 基于 COM 的模拟模型是模型封装的一种新思路。这种方法可以避免各种模拟模型开发语言之间转换的复杂性，最大可能地实现代码的复用；
- (4) 为模拟模型与 GIS 的整合提供了便利条件，统一 GIS 应用与模型的开发模式。

4.2.3 PSM-CAP 系统的开发

PSM 模型的开发结果是两个 DLL 文件，其中一个用于存储要素模型、域模型、关系模型和方法模型，一个用于存储模拟模型。在 PSM 模型开

发的基础上，可以进行 CAP 系统的开发。根据需求分析，PSM-CAP 系统的基本结构如图 4-3 所示。主要分为四个系统层次，依次是系统底层、系统应用基础层、系统应用层和统一用户界面（接口）。每一层次分别基于下一层次开发，为上一层次提供服务。

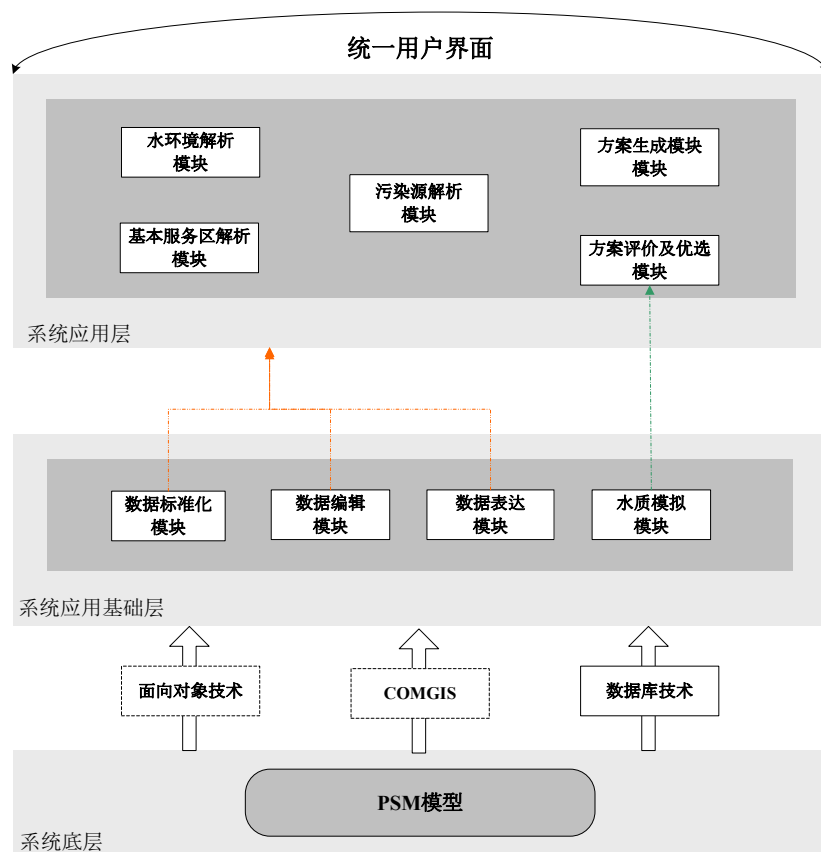


图 4-3 PSM-CAP 系统结构框图

整体上，PSM-CAP 系统的技术实现方法如下：

- (1) 开发语言及开发环境：C++ / Visual C++
- (2) 数据库平台：Microsoft Access
- (3) 基本组件：ESRI MapObjects、PSM 模型、ADO
- (4) 组件开发方法：ATL (Active Template Library)

PSM-CAP 系统的开发流程如下：

- (1) 准备阶段：在 PSM 模型开发的基础上，准备用于 PSM-CAP 系统应用基础层设计的两个 DLL 文件；

- (2) 系统应用基础层开发：本层次的开发方法和流程将在下文作具体介绍；
- (3) 系统应用层开发：在应用基础层开发的基础上，结合具体的系统需求和 PSM 模型的设计进行开发；
- (4) 统一用户接口开发：主要用于集成 PSM-CAP 系统各模块的主要功能，为用户提供访问系统应用层的接口；
- (5) 载入数据，进行系统测试，最终完成 PSM-CAP 系统的开发。

下面具体针对应用基础层各模块的开发进行介绍：

1) 数据标准化模块

数据标准化模块主要用于对预处理后的电子数据（包括空间数据、属性数据）进行标准化，以用于要素模型对象的生成。其中空间数据的标准化部分，可以基于 COMGIS 组件，结合 PSM 模型的要素模型结构和方法模型进行开发，同时需要融入域模型和关系模型，以保证标准化后数据的完整性和有效性。

2) 数据编辑模块

数据编辑模块主要实现对标准化后的空间数据（主要是指要素模型）进行编辑的功能，包括空间信息编辑和属性信息编辑。通过数据编辑，实现规划方案生成的功能。数据编辑模块可以基于 COMGIS 组件进行开发，同时该模块的开发应引入 PSM 模型的域模型和关系模型，以保证规划数据的完整性，实现系统的自动维护功能。

3) 数据表达模块

数据表达包括空间数据表达和属性数据表达，其中空间数据表达是指空间要素的显示，主要用于根据相关数据文件显示区域水污染控制系统的基本要素，可以基于 COMGIS 进行开发：通过对 COMGIS 的函数接口进行有效封装实现数据表达的功能；而属性数据表达，主要用于显示水环境

质量评价结果、污染源解析结果和规划方案的相关属性等，可以通过对数据库组件 ADO 进行封装实现。

4) 水质模拟模块

水质模拟模块的开发是在模拟模型开发的基础上，实现模型的管理功能，该模块的结构框图如图 4-4 所示，主要实现如下几方面的功能：

- (1) 模型表示：用知识、数据、子程序、对象等方法表示基本模型；
- (2) 模型存储：提供模型在计算机中的存储方法，便于进行模型管理；
- (3) 模型维护：提供模型的增加、删除、修改、查询、浏览等功能；
- (4) 模型运行：为模型的运行提供输入、输出的数据接口。

由于模拟模型基于 COM 进行开发，其开发成果为一个包括多个模拟模型的 DLL 文件，由于 DLL 中保存有该 DLL 文件的入口信息以及内部组件的信息，同时每个组件的类厂也具有该组件的接口信息，提取这些信息可以作为模型字典的索引，实现模型的查询功能。

同时，利用 COM 的注册表注册与卸载功能，可以实现模型的添加、删除功能；COM 的聚合与包容特性，使得模型的组合、生成等功能可以更方便地实现。对于模型输入输出的数据接口，可以针对 DLL 内不同模拟模型的输入输出特点编写文件接口，保证本模块与其他模块的数据交换。

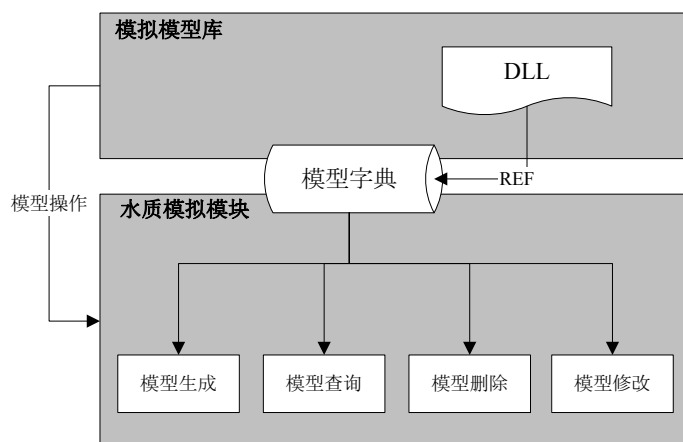


图 4-4 水质模拟模块结构框图

4.2.4 系统特点及适用条件

基于这种模式开发的 PSM-CAP 系统具有如下特点：

- (1) 规划模型与 GIS 紧密集成，可以降低 CAP 系统的应用门槛，不需用户有较为深入的 GIS 理论基础；
- (2) 基于关系和域驱动的 PSM 模型，可以简化系统维护，提高规划效率，维护规划数据的完整性；
- (3) PSM 模型基于 COM 开发，可方便地为 CAP 系统所调用，最大程度降低系统开发的工作量，便于系统的更新；
- (4) PSM 模型适用于不同区域水污染控制系统规划的 CAP 系统的开发，具有较好的代码复制性，适应不同的业务需求。

PSM-CAP 系统具有较强的应用优势，具体的适用条件如下：

- (1) 相比其他模式需要更多的代码开发工作量；
- (2) 系统对数据源的要求相对严格，需要按照系统要求进行规划相关数据的预处理和标准化工作；
- (3) 需要开发者具有更为深入的计算机专业知识和 COMGIS 开发经验；
- (4) 系统的开发需要 COMGIS 组件的支持；
- (5) 适用于不具备深入掌握 GIS 专业知识和数据库专业知识的系统使用者；
- (6) 这种模式开发的 CAP 系统在实际应用过程中不需过多的人机交互工作。

4.3 Geodatabase 开发模式

基于 Geodatabase 开发的 PSM-CAP 系统，可以实现更为强大的功能，但是要依赖于 ESRI 的 ArcGIS 平台和微软的 Access 数据库或 SQL Server 数据库（本文选用 Microsoft Access 数据库）^[63]。这种开发方式主要包括

三大模块的开发工作，其一为包括要素模型、域模型和关系模型的要素模块的开发，其二为基于 Microsoft Access 的方法模型的开发，其三为基于模拟模型的模拟模块的开发。

4.3.1 Geodatabase

Geodatabase（地理数据库）是美国 ESRI 公司在 ArcGIS 8 中推出的一种新型的面向对象的空间数据库，是继 CAD 数据模型和 Coverage 数据模型之后的第三代地理数据模型。它采用面向对象技术将现实世界抽象为若干对象类组成的数据模型，每个对象类有各自的属性、行为、规则，对象类之间又有一定的联系。用户可以在已有的空间数据模型之上，建立符合自己需求的扩展模型，具有可扩展能力。

Geodatabase 相对于 Coverage 数据模型在支持复杂网络（Complex Network）、支持要素类之间的关系（Relationship）、支持面向对象（Object Oriented）的要素等方面进行了扩展。Geodatabase 可以对地理要素类和地理要素类之间的关系、地理要素类集合网络、要素属性表对象、注释类（Annotation Class）、标注类（Dimension Class）等进行有效的管理，并支持对地理数据库要素类、关系以及几何网络进行建立、删除、修改等操作。同时，Geodatabase 数据模型提供了大量的实体对象模型（如小溪、公路、建筑物、道路），让用户摆脱经过抽象的点、线、面模型，更接近于人类对地理空间世界的认识。

Geodatabase 有两种模式，即个人与多用户 Geodatabase，个人 Geodatabase 支持内置于 ArcGIS 系统并提供对本地数据的访问，适用于面向项目的 GIS，在 Microsoft Access 数据库平台上实现，提供生成和更新 Access 数据库的服务，可处理小型或适中的 Access 数据库。多用户的 Geodatabase 是通过 ArcSDE（空间数据库引擎）实现的。ArcSDE 可以生成和访问从小型到大型的 Geodatabase 并提供关系型数据的开放界面。ArcSDE 支持版本管理，可以远程访问地理数据，允许多用户查看和编辑相同的地理数据。本研究中采用个人 Geodatabase 模式，基于 Microsoft Access 实现。

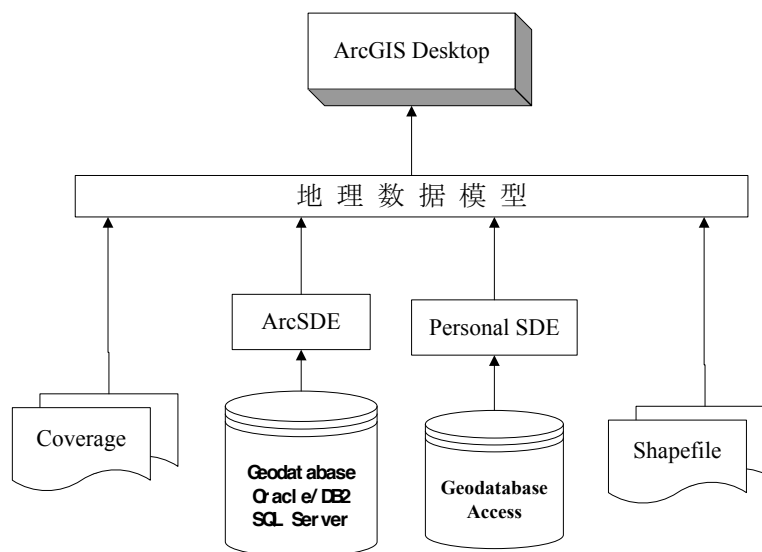


图 4-5 ArcGIS 接入 Geodatabase 的方式

Geodatabase 数据模型的优点在于要素能够完全存储在一个数据库中，大型的地理要素类型可以进行无缝存储。Geodatabase 使用地理数据库数据模型，要素在数据库中被存储为相应的记录，使物理数据模型和逻辑数据模型更加接近。Geodatabase 中的数据对象与逻辑数据模型中定义的对象大体一致，同时 Geodatabase 可以不需编写任何代码实现大多数的定制。Geodatabase 数据模型的最主要优势在于，它包含的构架使得用户可以容易地创建智能化的要素，使这些要素更加真实地模拟现实世界里的对象的行为和相互作用。

4.3.2 PSM 模型的开发

1) 要素模型、域模型和关系模型的开发

在采用 UML 进行 PSM 模型设计的基础上，经过一定结构调整，可以应用 ArcGIS 的 CASE (Computer Aided Software Engineering, 计算机辅助软件工程) 工具的 CGW (Code Generation Wizard, 代码产生向导) 建立相应的 Geodatabase 数据模型，完成要素模型、域模型和关系模型的开发。在 Geodatabase 数据结构中的部分概念与 PSM 模型设计中涉及到的概念是一一对应的，具体如表 4-2 所示：

表 4-2 Geodatabase 与 PSM 模型的概念对应关系^[64]

序号	PSM 模型	Geodatabase
1	要素模型	要素类 (Feature Classes)
2	域模型	属性域 (Domain)
3	关系模型	关系类 (Relationship)

用 CASE 工具建立定制对象的步骤如下：^[65]

- (1) 把设计的 UML 模型输出到 Microsoft Repository 中；
- (2) 产生存根代码 (Stub-code) 和实施行为；
- (3) 产生定制对象的一个地理数据库模式，即要素模型的框架。

经过上述流程，要素模型、域模型和关系模型都已导入到 Geodatabase 数据模型中。如果要素模型、域模型和关系模型在成功导入 Geodatabase 之后还需要修改，可以通过 ESRI ArcGIS 的 ArcCatalog 软件进行修改，ArcCatalog 可以方便地进行要素类、属性域和关系类的修改，对 PSM 模型的设计进行补充。

2) 方法模型的开发

方法模型是由多个 SQL (Structured Query Language, 结构化查询语言) 构成的，笔者开发的方法模型如图 4-6 所示，主要实现水环境解析、污染源解析、基本服务区解析和方案评价等几个方面的数据更新、数据计算和数据筛选等功能，具体对应于表 3-3 中方法模型的设计。

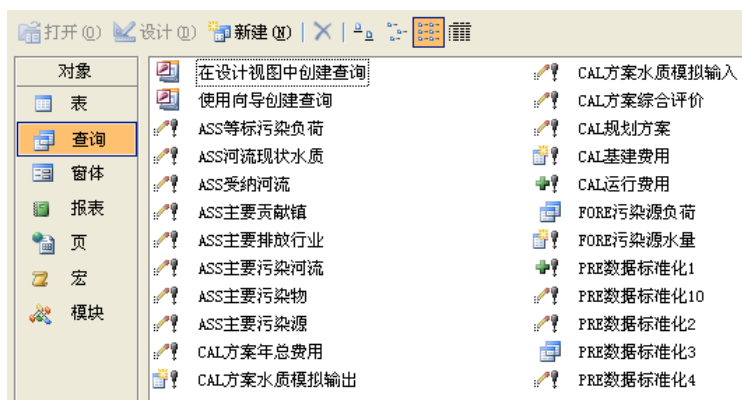


图 4-6 方法模型界面

方法模型可以通过三种方式进行开发，其一为应用 Microsoft Access 的查询构件进行可视化设计，“FORE 污染源水量”方法的可视化设计如图 4-7 所示，主要实现了污染源污水量预测的功能。

同时，方法模型的开发还可以通过 Microsoft Access 的查询构件直接输入 SQL 实现，如下所示：

```
UPDATE Source INNER JOIN Industry ON Source.IndustryID = Industry.LEVEL SET
Source.Q2006 = [Source].Q2002*Industry.[r02-06]^4*(1+Industry.[b02-06])^4,
Source.Q2010 = [Source].Q2006*Industry.[r07-10]^4*(1+Industry.[b07-10])^4,
Source.Q2020 = [Source].Q2010*Industry.[r11-20]^10*(1+Industry.[b11-20])^10
WHERE (((Source.Type)=1));
```

上面的 SQL 代码实现了和图 4-7 同样的功能，这种开发方式需要用户有 SQL 的语言基础。笔者推荐采用可视化方法进行方法模型的开发。

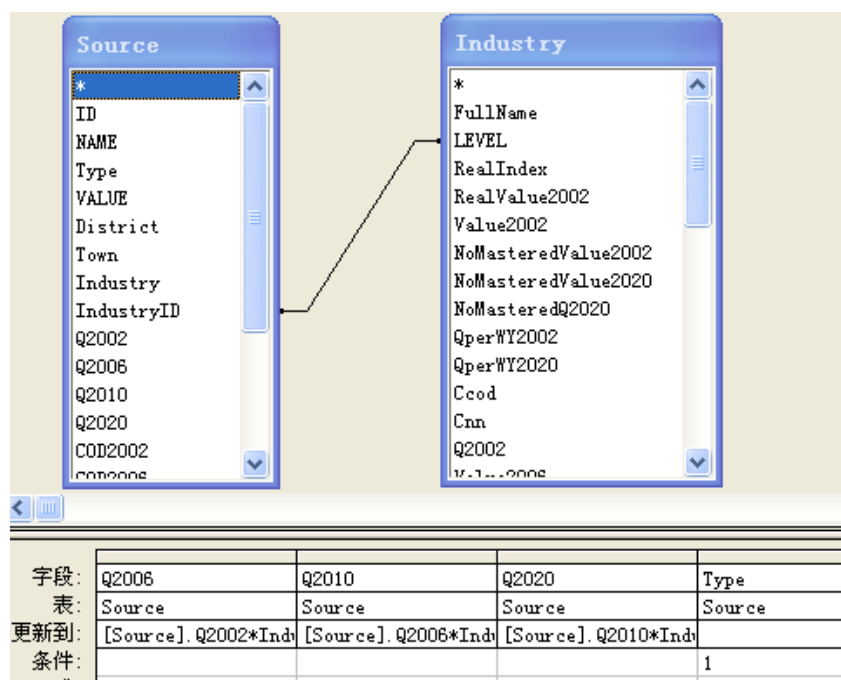


图 4-7 “FORE 污染源水量”方法的可视化设计

除了上述两种方法模型的开发方法，还可以脱离 Microsoft Access 的查询构件，通过采用 VBA 开发 ESRI ArcGIS 的 Macro（宏）方式实现。如图 4-8 所示。采用这种开发模式，要求开发者对 ESRI ArcGIS 的 VBA

开发方法有一定的掌握。这种紧密结合的方法具有较强的集成性，一般可以把多个方法模型集中到一个 Macro 中，实现最终的功能，减少人机交互的次数。如可以把表 3-3 中的方法模型“FORE 污染源水量”和“FORE 污染源负荷”集成到同一个 Macro 中，实现污染源的预测功能。具体的 Macro 运行界面如图 4-9 所示。

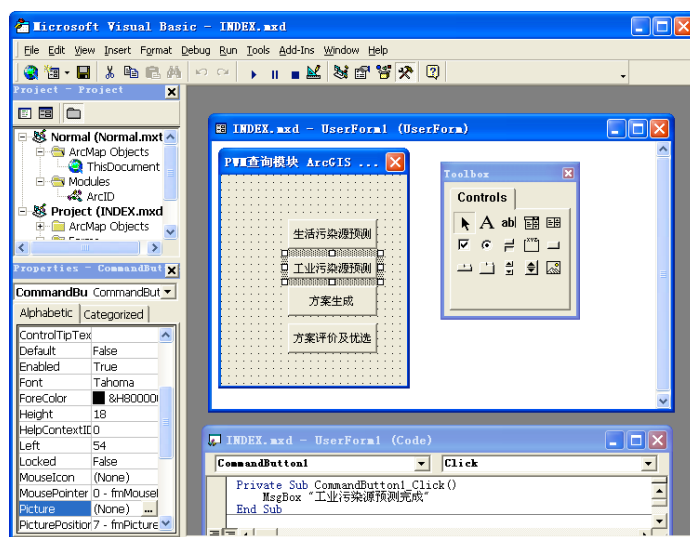


图 4-8 ArcGIS 平台中 Macro 的设计界面

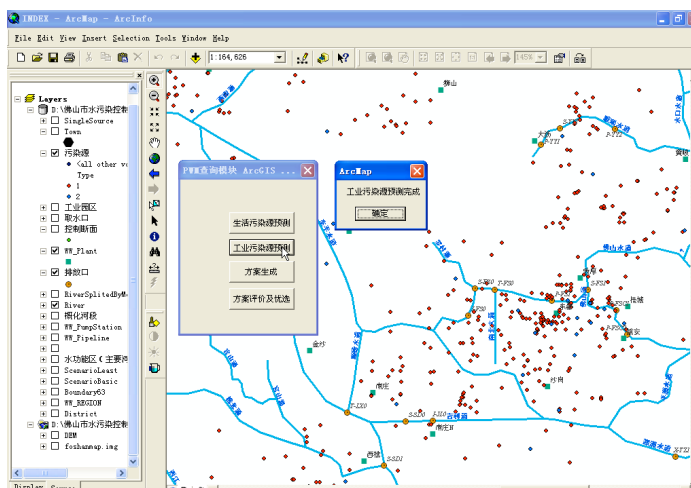


图 4-9 ArcGIS 平台中 Macro 的运行界面

3) 模拟模型的开发

PSM 模型的模拟模型开发方法与 ArcGIS 和 Microsoft Access 平台相互独立，模拟模型的开发方法与上文提到的基于 COM 进行模拟模型开发的方法基本一致，开发结果为一个包括多个模拟模型实体的 DLL 文件，即为基于 COM 的模拟模型库。

基于 Geodatabase 开发的 PSM 模型，如果其方法模型基于 Microsoft Access 开发，则 PSM 模型的开发成果为一个 mdb 格式的数据库文件和模拟模块的一个 DLL 文件；如果方法模型基于 Macro 进行设计，则 PSM 模型的形式为一个 mdb 格式的数据库文件、ESRI ArcGIS 的一个 Macro 文件以及模拟模块的一个 DLL 文件。

4.3.3 PSM-CAP 系统的开发

在 PSM 模型开发的基础上，需要少量开发就可以实现 PSM-CAP 系统的开发。PSM 模型在相应的 PSM-CAP 系统的对应关系如表 4-3 所示。其中要素模型、域模型和关系模型以 Geodatabase 的形式存储于 Microsoft Access 中，可以直接为 ESRI ArcGIS 用于建立空间数据模型。

而 PSM 模型中基于查询构件设计的方法模型，可以直接用于 Microsoft Access 中，用于对 Geodatabase 相关数据进行操作；基于 Macro 开发的方法模型，可以直接应用于 ESRI ArcGIS 中。

对于以 DLL 形式存在的模拟模型，需要开发第三方的工具软件，应用该 DLL，建立工具软件与 Geodatabase 数据模型的接口，以实现 Geodatabase 向 DLL 提供模型输入（水文条件、排污情况等），同时模拟模型的模拟结果可以输出至 Geodatabase 中，完善要素模型——监测断面的各方案水质属性。

表 4-3 PSM 模型与 PSM-CAP 系统对应关系

序号	PSM 模型	PSM-CAP 系统
1	要素模型	ESRI ArcGIS
2	域模型	ESRI ArcGIS
3	关系模型	ESRI ArcGIS
4	方法模型（查询构件）	Microsoft Access
5	方法模型（Macro）	ESRI ArcGIS
6	模拟模型	工具软件

4.3.4 特点及适用条件

采用 Geodatabase 数据模型开发的 PSM 模型具有较强的适用性、功能强大、便于规划数据管理、易于操作、便于与其他平台进行数据交换和提高数据完整性等特点。基于这种开发模式的 PSM 模型具有较强的应用优势，同时具有如下的适用条件：

- （1）需要 ESRI ArcGIS 和 Microsoft Access 的软件支持，要求操作者熟悉这两个平台；
- （2）要求操作者有较为全面的 GIS 专业知识和数据库专业知识；
- （3）要求操作者对 Geodatabase 地理数据模型有较为深入的认识；
- （4）因为辅助规划过程中涉及到很多人机交互工作，所以同时也要要求操作者对规划的内容和步骤有较为深入的掌握；
- （5）适用于要把重点放在规划本身、不需过多的计算机开发工作的规划项目。

4.4 本章小结

本章主要就 PSM 模型的开发进行介绍。不同层次的规划、不同的规划者，往往对 CAP 系统的要求不同，本章在对 PSM 模型开发模式进行探讨的基础上，有针对性地给出基于 COM 和 Geodatabase 的两种开发模式。

对于基于 COM 的开发模式，在对 COM 和 COMGIS 技术进行介绍的基础上，采用 COM 技术进行要素模型、域模型、关系模型和模拟模型的开发，完成 PSM 模型的开发，并采用 COMGIS 技术在 PSM 模型的基础上进行 PSM-CAP 系统的开发；对于基于 Geodatabase 的开发模式，在对 Geodatabase 进行介绍的基础上，分别对基于 Geodatabase 的要素模型、域模型和关系模型的开发和基于 Microsoft Access 的方法模型的开发进行详细介绍。在 PSM 模型开发的基础上，可以方便地实现 PSM-CAP 系统的开发。

在对 PSM 模型的开发模式进行探讨和两种开发模式介绍的基础上，下一章主要就模型的应用进行详细介绍。

第5章 模型应用

5.1 项目背景

佛山市是珠江三角洲经济发展的热点地区之一，该地区的水环境污染问题较为显著，同时 2002 年 12 月经国务院批准，佛山市在行政辖区上重新合并组合，市域面积从原 78km^2 扩展为 3848.49km^2 。重新组合后的佛山市，其水污染控制系统的建设必然与整合前有所不同，区域水污染控制系统规划也就提到日程上来。清华大学环境科学与工程系受佛山市环境保护局委托，开展了《佛山市水资源保护与水污染控制规划》课题的研究，用于指导各区、镇水污染控制基础设施的建设，尽量减少重复建设及不必要的浪费。

规划范围：空间范围为佛山市域（面积 3848.49km^2 ），时间范围为三个阶段：近期 2004 年～2006 年，中期 2007 年～2010 年和远期 2011 年～2020 年，规划基准年为 2002 年。

规划目标：为贯彻执行《广东省珠江三角洲水质保护条例》、《佛山市珠江水环境综合整治实施方案》和《广东省碧水工程计划》，以及佛山市政府提出的至 2005 年全市省控、市控水质监测断面以及跨市河流交界水质监测断面水质达标率达 75%、至 2008 达 80%、至 2020 年全部达标的目标。

规划目的：指导佛山市水资源保护工作的开展；指导佛山市水污染控制工作的开展；指导佛山市各城镇污水处理系统的建设。

本次规划的技术路线如图 5-1 所示，在水环境现状评价、河流概化和河网水质模型建立的基础上，进行污染源的解析的工作，在此基础上提出多个远景规划方案并对之进行环境、经济等目标的评价，获得满意的远景规划方案，据此提出各规划水平年的实施计划，再辅以其他工程措施及管理措施，实现佛山市的水污染控制系统规划方案。

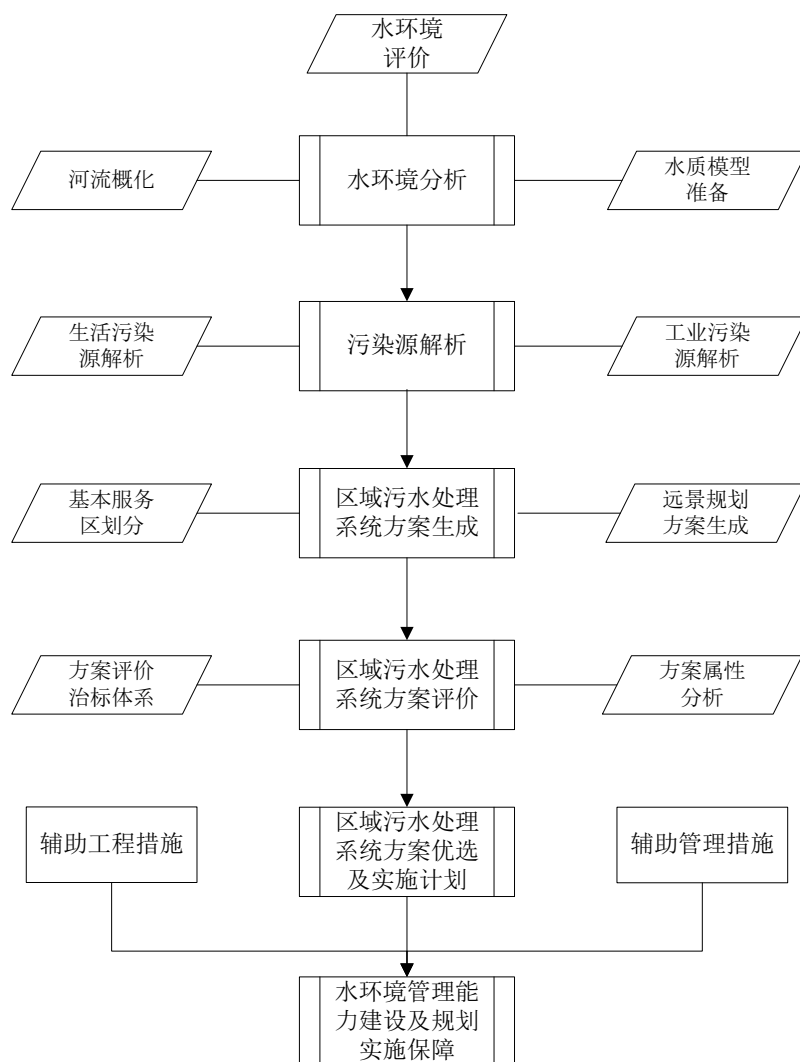


图 5-1 佛山市水资源保护与水污染控制规划技术路线

5.2 模型设计与开发

为了配合本次规划工作的开展，笔者在以上 PSM 模型研究的基础上，采用 UML 设计了佛山市水污染控制系统规划支持模型（FSH-PSM）。鉴于本次规划时间比较短，课题组具备 ESRI ArcGIS、Microsoft Access 等软件条件，所以采用 Geodatabase 这种模型开发模式，其中方法模型基于 Microsoft Access 的查询构件进行开发。

本次规划中，由于水质模拟部分由兄弟单位完成，所以本研究仅在方法模型中开发了模型的输入输出接口，没有就模拟模型进行具体开发；同时，本次研究的设计水文条件为 90%最枯月保证率，所以没有考虑面源污染问题。

5.3 模型应用

在本规划中所开发的 FSH-PSM 模型，其实体是空间图层的框架和配套的查询系统。FSH-PSM 模型与 ESRI ArcGIS 和 Microsoft Access 共同构成了 PSM-CAP 系统，用于该规划项目的各个阶段。

在应用过程中，主要是根据规划内容，利用方法模型和 ArcGIS 的编辑、空间分析功能，完善 FSH-PSM 的要素模型的数据，并利用域模型和关系模型对数据有效性进行验证，以保证数据质量。本次规划项目的步骤及 PSM 模型在相应环节的应用如下所示：

5.3.1 数据标准化

由于与规划相关的原始数据资料介质、形式种类较多，按照原始资料的不同格式，主要分为 GIS 图层、JPG 图片、CAD 文件、Excel 文件、Access 数据库文件、纸质地图、纸质文字和书籍等。大部分资料不能直接应用于 FSH-PSM 模型，需要利用 FSH-PSM 模型的相应方法模型对原始资料进行标准化，以完善部分要素模块的数据。

数据标准化首先要将各类原始资料电子化，转换为 Geodatabase 中的基本空间图层和属性表，之后利用 FSH-PSM 模型的方法模型“PRE 数据标准化（1-10）”系列，对生成的中间数据进行处理，包括表格生成、表格更新、数据综合等操作，最终得到 FSH-PSM 模型的要素模型的基础数据。图 5-2 是不同原始资料的处理方法。

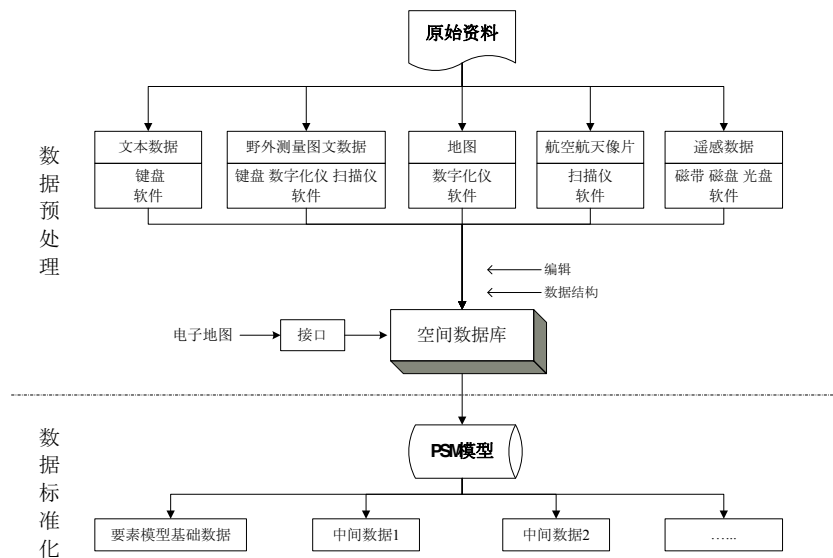


图 5-2 数据预处理和标准化流程

5.3.2 水环境解析

水环境解析主要包括水环境现状调查与评价和水系概化两方面的工作。利用 FSH-PSM 模型的方法模型“ASS 河流现状水质”和“ASS 主要污染河流”，根据各监测断面的水质监测数据，进行河流现状水环境质量评价，据此给出主要超标河流和相应的水质超标因子。图 5-3 为佛山市水环境功能区划图和利用 FSH-PSM 模型得到的 2002 年水质评价图。

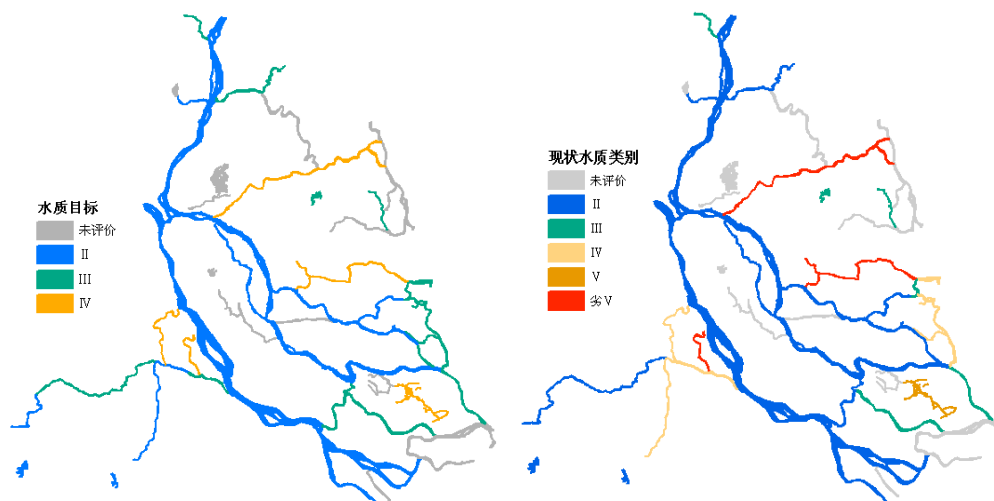


图 5-3 佛山市水环境功能区划图（左）和 2002 年水质评价图（右）

利用 ESRI ArcGIS 平台的数据编辑功能实现河网的概化工作，将河网概化为单线河段，生成要素模型中的河段要素，以在后续工作中建立取水口、排放口与河流的对应关系，作为水质模拟的工作基础。河流概化的部分结果如图 5-4 所示。



图 5-4 河流概化效果图（部分）

5.3.3 污染源解析

污染源解析主要包括污染源现状评价、独立排放的工业污染源筛选、需要预处理的工业污染源筛选和污染源预测等四部分的工作。

1) 污染源现状评价

污染源现状评价分为生活污染源现状评价和工业污染源现状评价。工业污染源现状评价是本次规划的重点（佛山市工业污染源分布如图 5-5 所示）：以佛山市 2002 年环境统计数据库作为数据源，评价方法采用“等标污染负荷法”。根据计算所得的每个工业污染源的等标污染负荷指标，评价出主要污染因子、主要工业污染源、主要受纳水体、主要污染行业和主要污染镇等。

污染源现状评价工作中，各工业污染源的等标污染负荷计算主要利用 FSH-PSM 模型的方法模型“ASS 等标污染负荷计算”实现，在此基础上利用其他方法模型如“ASS 主要污染物”、“ASS 主要污染源”、“ASS 受纳河流”等进行污染源评价。

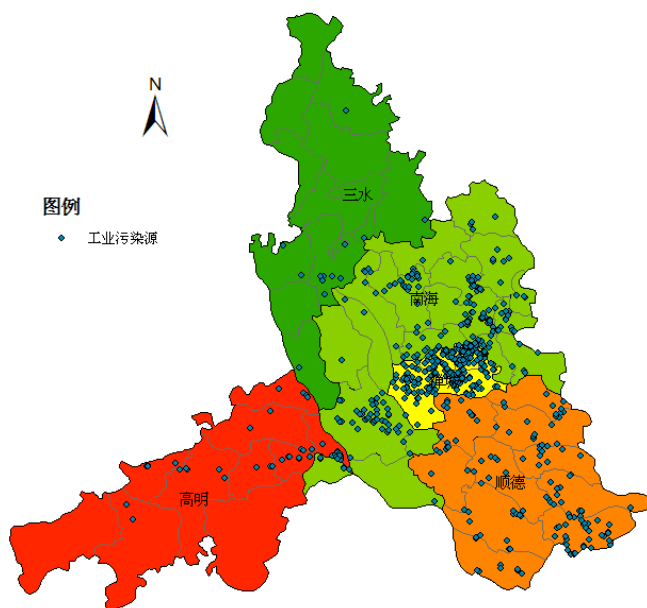


图 5-5 佛山市工业污染源分布图

工业污染源现状评价结果显示，佛山市的主要工业污染行业为纺织业、饮料制造业和有色金属冶炼及压延加工业，前三位的工业污染源分别是广东溢达纺织有限公司、青岛啤酒（三水）有限公司和南海市华涌小学广华漂染厂，主要纳污河流为佛山水道、西江干流、大棉涌、解放涌和顺德水道，主要的工业污水排放源集中于西樵、大良、禅城等地区。佛山市生活和工业污染源的污水排放量各镇（街道办事处）分布如图 5-6 所示。

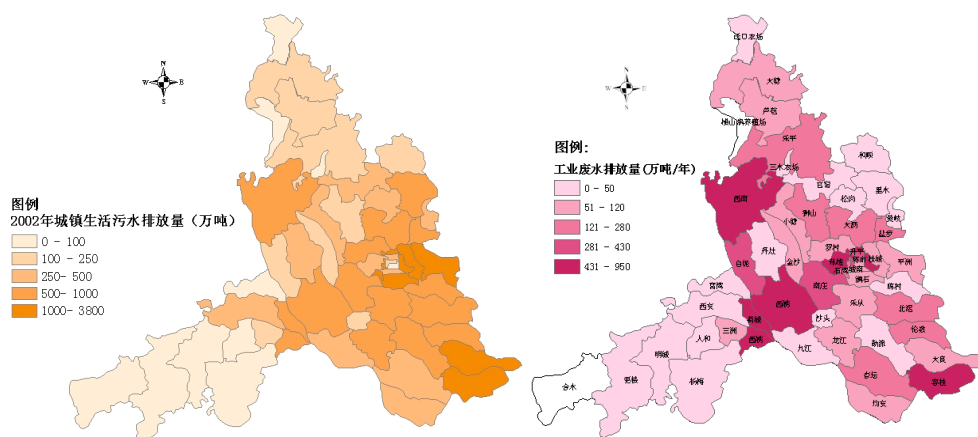


图 5-6 佛山市生活和工业污水排放量各镇（街道办事处）统计图

2) 独立排放的工业污染源筛选

凡符合下述条件之一者，即按独立排放的工业污染源对待，独立排放的工业污染源的工业污水一般可以通过本地的工业污水处理厂处理后排放或直接排放：

- (1) 污水排放量较大，会对污水处理厂产生冲击负荷的工业污染源；
- (2) 有一定的污水排放量，但位置较为偏僻，离城市污水处理厂较远的工业污染源；
- (3) COD 和氨氮浓度低于受纳水体的地表水环境功能区划标准、可直接排放的工业污染源；
- (4) COD 和氨氮浓度略高于受纳水体的地表水环境功能区划标准、经过混合区后可达标排放的工业污染源；
- (5) 污水的水质不宜与生活污水合并处理的工业污染源。

利用 FSH-PSM 模型的方法模型“SEL 独立排放的工业污染源”，可以筛选出符合上述条件 1、3、4 和 5 的独立排放的工业污染源，利用 ArcGIS 的空间查询功能，可以筛选出符合条件 2 的独立排放的工业污染源。利用如上原则筛选出的独立排放的工业污染源的空间分布如图 5-7 所示。

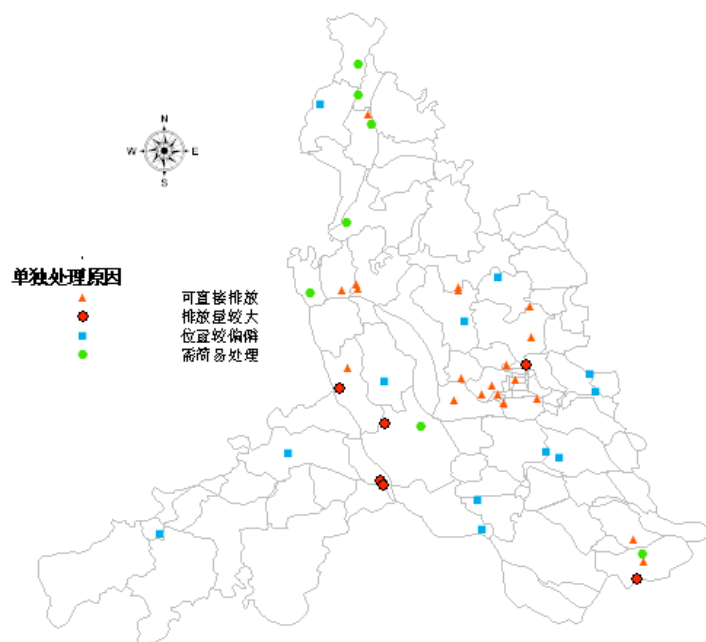


图 5-7 独立排放工业污染源空间分布图

3) 需要预处理的工业污染源筛选

在污染源现状评价的基础上，筛选出进入市政污水处理厂前需要预处理的工业污染源。需要预处理的工业污染源筛选范围为与生活污水合并处理的企业。对于这类企业，如果其水质指标超过城市污水处理厂的来水浓度标准，则需要进行处理，筛选标准采用广东省地方标准水污染物排放限值（DB44/26-2001）。

利用 FSH-PSM 模型的方法模型“SEL 预处理的工业污染源”，可以筛选出水质超标的工业污染源清单，同时由于目前佛山市大部分工业污染源都已配套了污水处理设施，筛选出来的需要预处理的工业污染源，结合方法模型“SEL 预处理的工业污染源分类”，可以分为两类（计 55 家，规模为 678.9 万吨/年），一类是现有污水处理设施可以满足排入城市污水处理厂标准的，计 42 家（规模为 497.4 万吨/年），另一类为该企业的污水处理设施不满足排入城市污水处理厂标准的，计 13 家（规模为 181.5 万吨/年）。筛选出的需要预处理的工业污染源空间分布如图 5-8 所示。

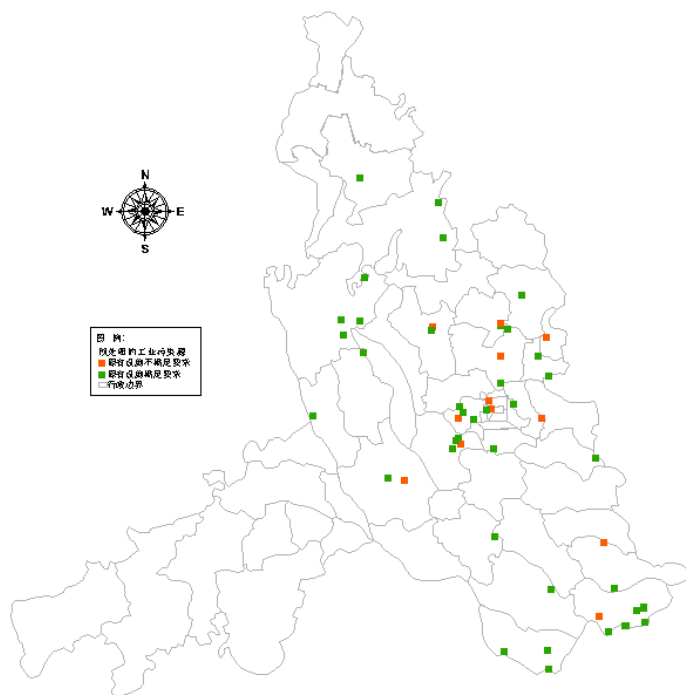


图 5-8 需要预处理的工业污染源空间分布

4) 污染源预测

污染源预测主要包括生活污染源和工业污染源的预测，预测主要包括污水量预测和污染负荷预测，分三个阶段——近期、中期和远期，其中工业污水量用万元产值法预测，而生活污水量用人口指数法预测。污染源解析的目的是为基本服务区水量、负荷的计算提供数据支持。

对于污染源预测的工作，可以利用 FSH-PSM 模型的方法模型“FORE 污染源水量”和“FORE 污染源负荷”实现。其中水量预测结果如表 5-1 所示，污染负荷预测结果如表 5-2 所示。

表 5-1 预测污水量汇总表

单位：万吨/日

类型	污染源 数目	2006 年 污水量	2010 年 污水量	2020 年 污水量
独立排放工业污染源	45	7.1	8.9	15.0
集中城市污水处理厂	614	132.3	165.4	294.2
其中合并处理的工业污染源	551	37.7	52.5	124.9
其中生活污染源	63	94.5	112.9	169.3
工业园区	10	40.0	59.5	109.0
总计	669	179.4	233.9	418.2

表 5-2 预测污染负荷汇总表

单位：kg/d

类型	2006 年 COD	2010 年 COD	2020 年 COD	2006 年 氨氮	2010 年 氨氮	2020 年 氨氮
独立排放工业污染源	1389	1729	2731	68	84	131

类型	2006 年 COD	2010 年 COD	2020 年 COD	2006 年 氨氮	2010 年 氨氮	2020 年 氨氮
集中城市污水处理厂	390782	498572	921680	22885	28836	51762
其中合并处理工业污染源	154459	216234	498486	5870	8508	21292
其中生活污染源	236323	282339	423194	17015	20328	30470
工业园区	21600	32100	60000	2880	4280	8000
总计	413771	532401	984411	25833	33200	59893

5.3.4 基本服务区解析

要生成区域水污染控制系统的规划方案，首先应确定污水处理厂的基本服务区。利用 ArcGIS 的空间分析功能，根据佛山市的地形地貌、行政区划以及河网分布，经过空间划分得到 100 个基本服务区，作为构成污水处理厂服务区的基本要素。利用污染源与基本服务区空间从属关系，并结合 FSH-PSM 模型的方法模型“SEN 基本服务区”，计算基本服务区各阶段的污水量及污染物负荷，分别如图 5-9 和图 5-10 所示。

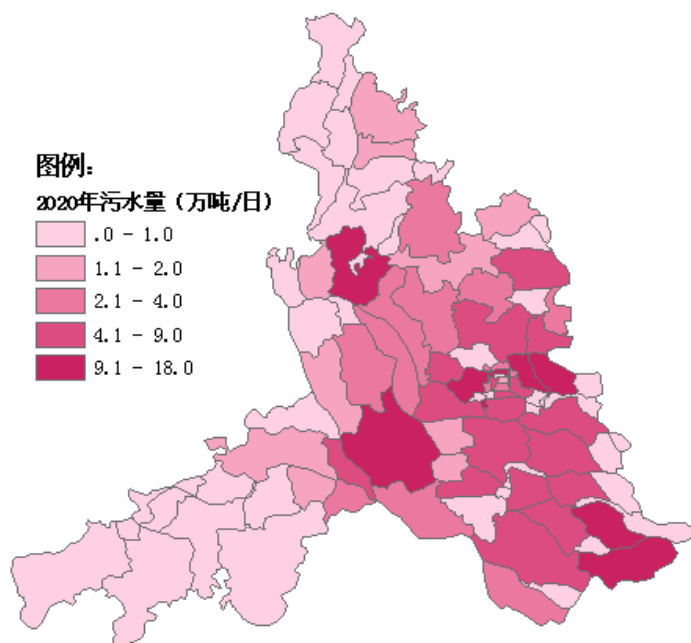


图 5-9 基本服务区及其污水量分布图

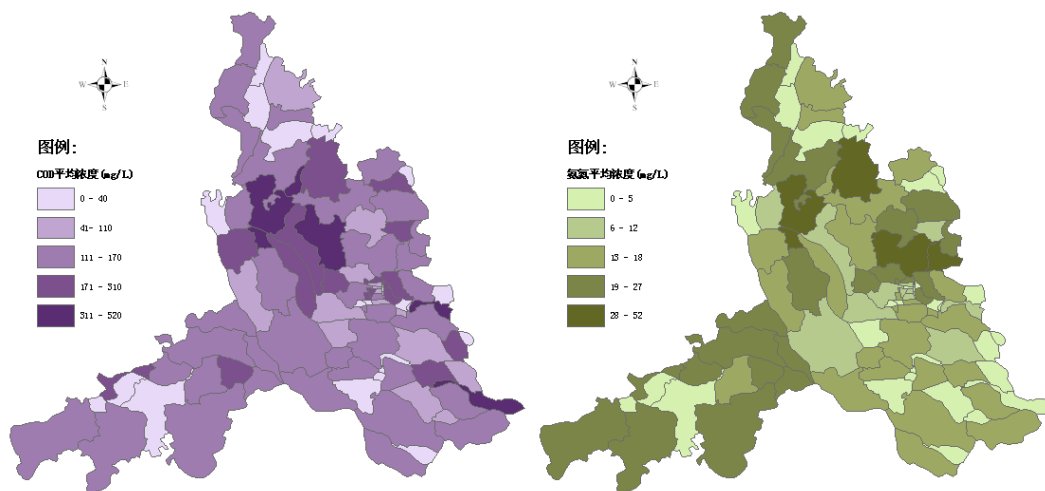


图 5-10 基本服务区 COD 及氨氮污水浓度分布图

5.3.5 方案生成

根据 2020 年的各基本服务区的污水量和负荷的预测数据，在划分污水处理厂服务区的基础上，确定水污染控制系统的 2020 年规划方案。方案生成的具体步骤如下（流程如图 5-11 所示）：

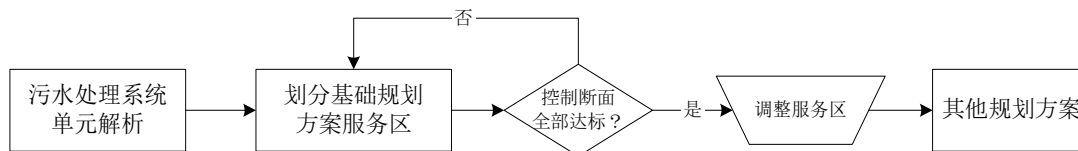


图 5-11 水污染控制系统规划方案生成流程

（1）划分基础规划方案的服务区：在水污染控制系统基本服务区解析的基础上，根据佛山市水环境功能区划要求和水环境污染控制的要求，采用最为可能分散处理的方式划分污水处理厂的服务区，并确定污水处理厂的选址、排放口布局出水浓度等，如图 5-12 所示；

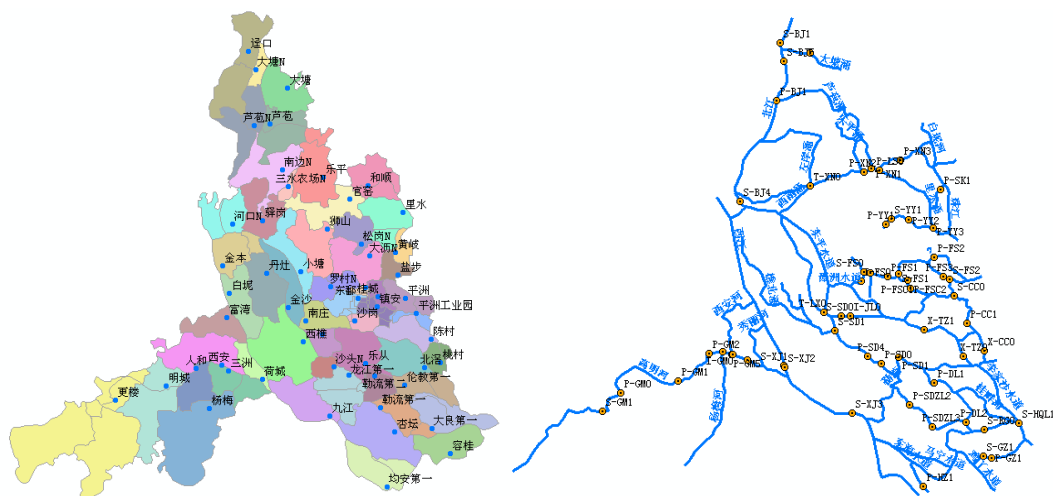


图 5-12 基础规划方案污水处理厂服务区分布图（左）及排放口分布（右）图

（2）基础规划方案水质模拟：根据基础规划方案的排放口分布，利用感潮水质模型对整个河网进行水质模拟，如果全部监测断面水质达标，此即为确定的基础规划方案的服务区，如果监测断面水质不能够全部达标，则重新划分基础规划方案的服务区并确定处理程度，直至监测断面全部达标为止；

（3）调整污水处理厂服务区：通过合并必要的污水处理厂服务区的方式调整基础规划方案，分别从原有规划、集中处理、行政区划和集中分散处理相结合等角度调整基础规划方案的服务区；

（4）生成其他规划方案：在调整规划方案污水处理厂服务区划分的基础上，确定污水处理厂的选址、排放口分布和处理程度。如果有必要，还需确定污水处理厂服务区间的污水转输管道和污水提升泵站。

对于上述方案生成的四个步骤，主要是利用 ESRI ArcGIS 的编辑和空间分析功能，划分各污水处理厂的服务区，并确定污水处理厂的地址、排放口位置、处理程度，以及服务区间必要的污水转输管道和污水提升泵站；同时在规划的过程中，还结合了 FSH-PSM 模型的部分方法模型，如“SEN 污水处理厂图层”、“SEN 污水处理厂进水浓度”、“SEN 排放口图层”、“SEN 干流排放口图层”和“SEN 支流排放口图层”等，用于方案生成和数据处理。

本次规划最终确定了 1 个基础规划方案和 4 个调整规划方案，具体的方案描述如表 5-3 所示。其中部分调整规划方案的系统示意图如图 5-13 所示。

表 5-3 规划方案列表

序号	名称	集中污水处理 厂数目	排放口 数目	服务区间调 水管道数目	污水泵 站数目	方案特点
1	方案 0	56	74	0	0	基础规划方案
2	方案 1	53	73	8	3	参考原有规划
3	方案 2	43	70	13	4	最为集中处理
4	方案 3	48	69	9	1	参考行政区划
5	方案 4	52	71	4	0	集中、分散相结合

注：排放口的数据主要包括集中污水处理厂排放口、工业园区污水处理厂排放口以及工业污水处理厂这三类污水处理厂的排放口，所以排放口数目大于集中污水处理厂数目。

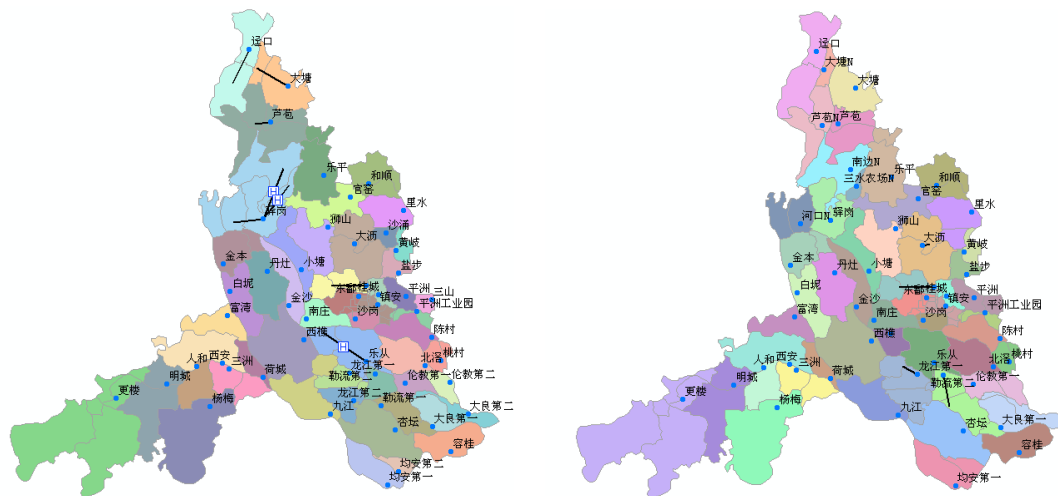


图 5-13 水污染控制系统调整规划方案（左：方案 1 右：方案 4）

5.3.6 辅助水质模拟

根据河流现状评价和污染源现状评价的结果，确定要模拟的河流水质因子，本规划最终选取的水质指标为 COD 和氨氮。利用 FSH-PSM 模型的方法模型“CAL 方案水质模拟输入”，为兄弟单位开发的感潮河流水质模型提供输入数据，以对各规划方案进行水质模拟。在水质模型的输出结果

基础上，利用方法模型“CAL 方案水质模拟输出”完善监测断面要素，统计监测断面的达标率。

水质模拟的结果如表 5-4 所示。其中指标负荷是污染物指标达标指数（即模拟值与标准值的比值）在 50 个断面上的加和值；平均负荷是指总负荷在 50 个断面上的平均分布值。

表 5-4 各规划方案水质影响指标评价结果

方案 编号	污水处理厂 数量	超标断面数量 COD	氨氮	指标负荷 COD	氨氮	总 负荷	平均 负荷	方案 评价	方案 排序
0	56	2	9	16.03	27.52	43.56	0.871	一般	3
1	53	1	9	16.48	26.37	42.84	0.857	好	1
2	43	4	9	17.81	26.61	44.42	0.888	差	5
3	48	2	9	16.91	27.83	44.73	0.895	较差	4
4	52	1	9	16.45	26.47	42.92	0.858	较好	2

5.3.7 方案评价及优选

对于区域水污染控制系统规划，要综合考虑环境、经济等因素后推荐出较优的规划方案，属于有限个方案的多目标决策问题。为使决策合理化，必须采用科学的决策方法。方案评价及优选的技术路线如图 5-14 所示。

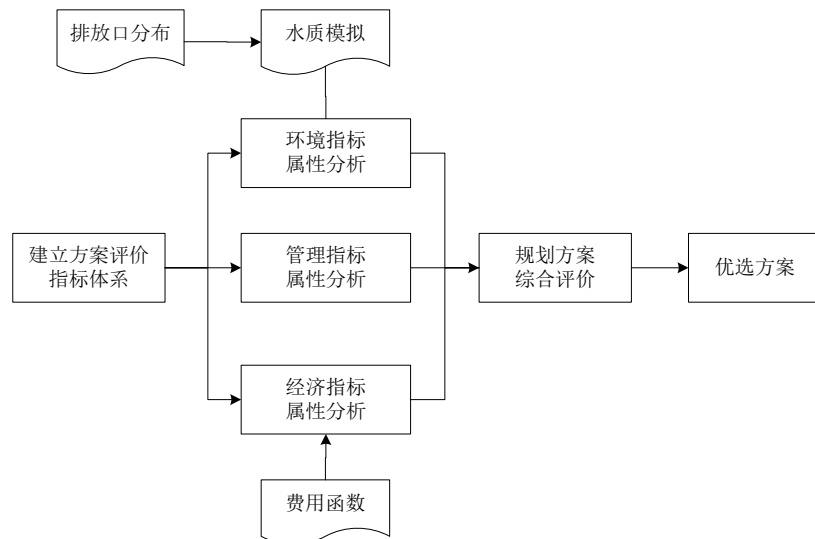


图 5-14 规划方案评价及优选技术路线

具体步骤如下：

（1）建立方案评价指标体系：指标体系的建立是规划方案多目标决策的基础^[66, 67]。本次规划根据佛山地区的实际情况和一般的工程方案决策分析方法，从工程经济、环境影响和管理等三方面建立了如图 5-15 所示的指标体系，并确定各底层指标的权重；

（2）方案属性分析：对于经济指标，可以通过建立费用函数对各类建设费用和运行费用进行计算^[68, 69]，最终以年均费用量化该指标；对于断面水质达标率指标，以断面平均负荷量化；对于周边居民生活影响指标，以污水处理厂距中心城镇的距离来量化该指标；对于管理方便性指标，选取跨越不同镇（街道办事处）的污水处理厂的数量量化该指标。最后的方案属性分析结果如表 5-5 所示；

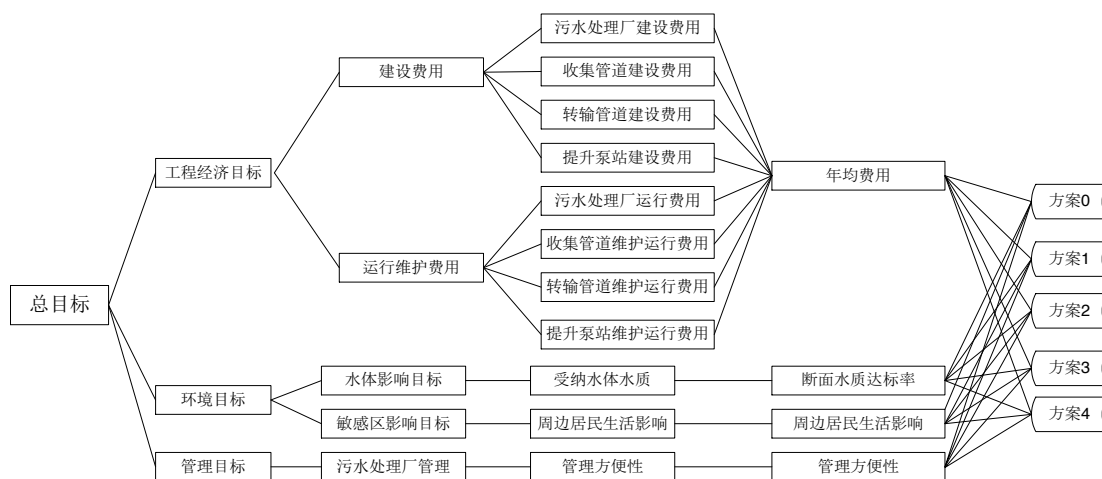


图 5-15 规划方案评价指标体系

表 5-5 方案属性分析结果

方案名称	方案 0	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
环境目标评价					
COD 负荷	16.04	16.48	17.81	16.91	16.45
氨氮负荷	27.52	26.37	26.61	27.83	26.47
COD 超标数	2	1	4	2	1
氨氮超标数	8	8	8	8	8
不达标断面数	8	8	8	8	8
距城镇中心较近的污水处理厂数目	25	17	22	23	19
距城镇中心较远的污水处理厂数目	31	36	21	25	33
经济目标评价					
年均费用（万元）	16.91	16.73	16.59	16.77	15.53
污水处理厂建设费用（万元）	40.04	39.38	39.16	39.51	39.55
运行费用（万元/年）	4.77	4.71	4.65	4.74	4.51
总建设费用（万元）	133.47	132.09	131.24	132.36	132.2
管理目标评价					
转输管道数目	0	8	13	9	4
其中跨河管道数目	0	4	7	2	3
泵站数目	0	3	4	1	0
跨行政区数目	12	13	16	9	13

（3）方案综合评价：将各方案的属性归一化，计算各指标的分值，并结合指标权重计算各方案的总价值。具体如表 5-6 所示：

表 5-6 方案综合评价指标属性归一化结果

名称	经济	水质影响	陆地影响	管理方便性	总值
方案 0	0.442	0.448	0.406	0.445	0.438
方案 1	0.447	0.456	0.505	0.411	0.453
方案 2	0.450	0.440	0.355	0.334	0.423
方案 3	0.446	0.436	0.378	0.594	0.449
方案 4	0.458	0.455	0.496	0.411	0.459

(4) 方案优选：从表 5-6 可以看出，方案 4 即相对集中相对分散的规划方案的投资费用最低，同时在 2020 年的水质模拟结果也相对较好，而且其在管理上也较为方便可靠。无论是从单项指标评价还是综合评价的角度，方案 4 都是较优方案，最后确定方案 4 为待实施的优选方案。

在以上四部分工作中，利用方法模型“CAL 基建费用”、“CAL 运行费用”中的费用函数，计算各方案的相应建设费用和运行费用，实现方案的经济指标评价；同时利用 ArcGIS 的空间分析功能，辅以 FSH-PSM 模型的方法模型“CAL 规划方案”和“CAL 方案综合评价”，实现各方案其他指标的评价和综合评价。

5.3.8 阶段实施方案的制定

在获得优选方案的基础上，还需要确定具体的水污染控制系统实施计划。其各阶段建设规模，除了参考各阶段预测来水量之外，还需要参考以下原则：

- (1) 要保证规划各阶段的监测断面水质达标率达到广东省和佛山市政府关于水环境保护的目标；
- (2) 远期重点考虑环境水质达标情况确定建设规模，近期主要考虑经济能力先建设最为必要的污水处理厂；
- (3) 水污染控制系统的建设要配合河流综合整治工作的开展；
- (4) 各阶段污水处理厂的规模的确定还要保证各阶段的污水处理率达到省市政府的目标。

参考以上原则，给出相应的阶段实施计划，各个区的计划如表 5-7 所

示，该实施计划可以保证 2006 年佛山市污水处理率达到 81%，2010 年达到 91%，2020 年全部处理。

表 5-7 污水处理厂分阶段实施计划

单位：万吨/日

序号	行政区	2020 年总规模	2010 年底前规模	2006 年底前规模
1	禅城区	127	66	61
2	高明区	17.1	12.8	11
3	南海区	100	56	33.5
4	三水区	45.5	22.5	10.6
5	顺德区	100	43	28.5
全市	总 计：	389.6	200.3	144.6

FSH-PSM 模型在“阶段实施方案的制定”这部分工作中主要起到了数据计算、统计，以及方案表达等功能。

5.4 模型应用评价

FSH-PSM 模型在佛山市水资源保护与水污染控制系统规划项目中，主要起到了规划相关数据的管理和计算，以及成果表达的功能，相比一般的 CAP 系统，FSH-PSM 模型具有较好的可移植性、可维护性和数据完整性。在本项目中 FSH-PSM 模型得以充分应用，这种 PSM-CAP 系统模式已经被证明在相关方面优于传统的 CAP 系统(MIS-CAP, DSS-CAP, GIS-CAP 和 PSS 等)。具体而言，FSH-PSM 具有如下特点：

- (1) 较强的适用性。FSH-PSM 模型在设计过程中考虑了系统较好的可移植性，对于其他区域的水污染控制系统规划，本模型同样适用，可以以较快的速度转移到其他规划项目中；
- (2) 功能强大。FSH-PSM 模型需要依赖 ESRI ArcGIS 和 Microsoft Access 平台实现辅助规划的功能，借助于地理信息系统专业平

台 ArcGIS 和桌面数据库通用办公软件 Access, 基于这种模式开发的 CAP 系统相比其他开发模式可以实现更多的空间分析处理与数据库管理的功能;

- (3) 便于规划数据管理。所有的空间数据和属性数据都保存于同一个关系数据库中, 提高规划数据的集成度;
- (4) 易于操作。只需要按照 PSM 模型要素模块的指定格式导入规划相关数据, 就可以利用 PSM 模型的方法模型对原始数据进行处理并获得目标数据;
- (5) 便于与其他平台进行数据交换。利用 ESRI ArcGIS 强大的空间数据输入输出功能, 以及 Microsoft Access 数据库的数据格式转换功能, 可以充分利用各种格式的原始数据, 同时还可将规划成果导出到其他平台进行后续处理;
- (6) 提高数据完整性。通过建立要素模型之间的关系以及要素模型的属性域, 可以提高系统的自动维护能力, 提高规划效率, 降低系统维护的工作量。

同时, 基于 Geodatabase 开发的 FSH-PSM 模型, 需要操作者熟悉 ESRI ArcGIS 平台的基本操作, 这种松散的开发模式, 在应用于规划的过程中, 相比其他的开发模式, 需要更多的 ESRI ArcGIS 和 Microsoft Access 方法模型的交互工作。

5.5 本章小结

在佛山市水资源保护与水污染控制规划项目中, 开发了 FSH-PSM 模型并得以成功应用。在对项目的背景进行介绍的基础上, 针对项目的具体特点, 选用 Geodatabase 作为 FSH-PSM 模型的开发模式, 然后具体针对规划的各个过程(数据标准化、水环境解析、污染源解析、基本服务区解析、方案生成、辅助水质模拟、方案评价及优选和阶段方案实施方案的制定)中 FSH-PSM 模型的应用方法和实现的功能进行了介绍。在该项目应用中, FSH-PSM 模型具有较好的可移植性, 同时开发工作少、规划效率高。

第6章 结论与建议

6.1 结论

本研究主要对区域水污染控制系统规划的计算机辅助规划系统的基础——规划支持模型（Planning Support Model, PSM 模型）进行了探讨，文中具体从国内外相关研究进展、区域水污染控制系统规划基础、PSM 模型需求分析、设计、开发模式以及应用整个流程进行了详细的介绍，主要取得了如下的研究成果：

一、区域水污染控制系统规划实质的分析和概括

提出区域水污染控制系统规划实质上是污染负荷空间重新分配的优化过程，每种规划方案对应于一种污染负荷的空间分配模式。

二、PSM 模型的总体设计和详细设计

针对区域水污染控制系统规划的内容和步骤给出 PSM 模型的需求分析、总体设计，并利用软件工程的通用建模语言 UML 进行模型的详细设计，包括要素模型、域模型、关系模型、方法模型和模拟模型。

三、PSM 模型开发模式探讨以及两种开发模式的深入研究

具体根据当前的计算机软件技术分析 PSM 模型的开发模式，针对规划项目的具体特点，有针对性地给出 COM 和 Geodatabase 两种开发模式：对于基于 COM 的开发模式，采用 COM 技术进行 PSM 模型中要素模型、域模型、关系模型和模拟模型的开发，并结合 COMGIS 提出相应的 PSM-CAP 系统的开发方式；对于基于 Geodatabase 的开发模式，提出了要素模型、域模型、关系模型、方法模型和模拟模型的不同开发方式，并对相应 PSM-CAP 的开发方式进行介绍。

四、组件式模拟模型

给出一种组件式模拟模型的解决方案，具体包括已有模型的组件式封装和基于组件的新模型的开发，同时给出一种基于组件开发的用于区域层次水质模拟的宏观水质模型——MWQM 的技术实现要点。

五、FSH-PSM 模型在佛山水资源保护与水污染控制系统规划中的应用

针对项目的具体特点，选用 Geodatabase 作为 FSH-PSM 模型的开发模式，在规划的各个过程（数据标准化、水环境解析、污染源解析、基本服务区解析、方案生成、辅助水质模拟、方案评价及优选和阶段方案实施方案的制定）中 FSH-PSM 模型取得成功的应用，证明该模型具有较好的可移植性，同时开发工作少、规划效率高。

本文 PSM 模型的研究方法同样适用于城市污水处理系统规划、流域水污染控制系统规划 CAP 系统的开发，同时在本研究的基础上，提高 PSM 模型研究的分辨率和尺度，从水量、水质、水力等方面进行区域水污染控制系统的仿真，将不仅适用于系统的规划，同样适用于规划后期建成系统的运行和管理。

6.2 建议

6.2.1 基于 COM 开发的 PSM

本文对 PSM 模型的开发模式进行了探讨，但只对 Geodatabase 这种模式进行了实际开发和应用尝试，建议采用 COM 开发模式进行 PSM 模型及 PSM-CAP 系统的开发。

6.2.2 智能 PSM

在规划过程中，常出现因为基础数据的支持能力不足而带来不良影响如决策失误，可以通过在 CAP 系统中引入知识库来部分解决这个问题。本研究提出的 PSM 模型，由于精力有限，并未涉及知识模型。建议在 PSM

模型中加入知识模型，提高 PSM 模型的智能化。从技术角度，PSM 模型中的知识模型，可以采用目前多人探讨过的基于关系数据库的方式^[70, 71, 72]。

6.2.3 协同式 PSM

区域水污染控制系统规划一般需要多人协作完成，一般每个规划师负责一个模块的工作，在规划中各个模块之间的数据一般具有较强的相互依赖性，一个模块的数据改动，往往影响后续各模块的数据，如污染源预测部分数据的改动，将影响规划方案生成、评价和优选等环节的相关数据。这就需要 PSM 模型能够较好控制规划数据的版本，建议针对较大规模的规划项目，利用空间数据引擎 ArcSDE 对规划数据进行管理，并实现多用户并发访问和版本管理功能，以满足多人协同工作的需求。

6.2.4 网络 PSM

在城市规划领域，已经普遍引入了公众参与的机制，公众参与机制可以提高规划的可实施性。区域水污染控制系统规划涉及到区域内的拆迁、环境保护等方面的工作，引入公众参与具有较为广泛的意义。通过开发基于 Web 的 PSM 模型，在此基础上构建 CAP 系统，可以从技术角度保证公众能够参与到规划的各个过程，并对规划成果有较为直观的认识，与规划师之间建立良好的反馈机制。

致 谢

在论文的完成之际，谨向悉心指导我的导师贾海峰副教授致以衷心的感谢，论文的研究内容和深度在与他的多次讨论中逐渐得以完善，同时在两年的研究生就读期间，贾老师在学习、科研和生活方面对我的言传身教将使我终身受益。

同时感谢程声通、杜鹏飞等系统所诸位老师对我的帮助，也要感谢六年来环境系老师对我的培养。在这里，我上完近二十年求学历程的最后一课，取得了为人、为学等方面最为主要的进步，这一切我定将铭记终生。

.....

声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名：_____日 期：_____

个人简历

本人 1980 年 5 月出生于吉林省四平市，1998 年 9 月进入清华大学环境科学与工程系学习，2002 年 7 月本科毕业并获得环境工程工学学士学位，同年 9 月免试保送清华大学环境科学与工程系攻读环境科学与工程硕士学位至今，师从贾海峰副教授。

攻读硕士学位期间参与的课题

1. 2004 年 3 月～2004 年 7 月 佛山水道流域
2005～2010 年综合整治方案
2. 2004 年 2 月～2004 年 6 月 绿色奥运北京城市节水研究
3. 2003 年 10 月～2004 年 6 月 佛山市水资源保护与水污染控制规划
4. 2003 年 9 月 京沪高速、京津城际铁路引入北京南站方案的环境影响分析
5. 2003 年 3 月～2003 年 6 月 佛山市生态环境规划预研究

攻读硕士学位期间发表的学术论文

1. 龙瀛，贾海峰. 基于 Geodatabase 的北京城市污水规划辅助系统的开发与应用. 给水排水. 2003, 29(8): 84～87
2. 龙瀛，张军龙，贾海峰. 虚拟现实技术的嗅频解决方案. 计算机工程与应用. 2004, 40(2): 87～89
3. 龙瀛. 建筑给排水 CAD 系统空间相容性分析模块的开发. 中国给水排水. 2004, 20(2)
4. 龙瀛，贾海峰. 城市污水系统仿真模型的设计与初步应用. 给水排水. 2004, 30(4)
5. 龙瀛，贾海峰. Geodatabase 与城市排水系统规划集成的研究与实践. 水科学进展. 2004, 5
6. 龙瀛，贾海峰. 城市公用事业设施管理 AF-FM-SS-RM 解决方案初步研究. 测绘通报. 2004, 5

参考文献

- [1] 欧志丹, 程声通, 贾海峰. 情景分析法在赣江流域水污染控制规划中的应用. 上海环境科学, 2003, 22(8)
- [2] 胡金柱. 模糊决策与决策支持系统. 武汉: 华中师大出版社, 1989 年 12 月
- [3] 韩笋生, 彭震. GIS 在国外城市规划中的应用. 国外城市规划, 2001, 10(1)
- [4] Robert A. Johnston, Tomas de la Barra. Comprehensive regional modeling for long-range planning: linking integrated urban models and geographic information systems. Transportation Research Part A, 2000, 34(2): 125~136
- [5] Harris B 1989 Beyond geographic information systems: computers and the planning professional. Journal of the American Planning Association 55:85~92
- [6] Harris B, Batty M 1993 Locational models, geographic information, and planning support systems. Journal of Planning Education and Research 12:184~98
- [7] Batty M 1995 Planning support systems and the new logic of computation. Regional Development Dialogue 16:1~17
- [8] Klosterman R E 1995 Planning support systems. In Wyatt R, Hossain H (eds) Proceedings, Fourth International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management. Melbourne, July Vol. 1:19~35
- [9] 刘楷 译. 与计算机技术创造性结合的规划支持系统. 国外城市规划建设, 2003, 18(5): 15~20
- [10] Bishop, I. Planning support: hardware and software in search of a system. Computers, Environment and Urban Systems. 1998, 22(3): 189~202
- [11] Stan Geertman, John Stillwell. Planning support systems an inventory of current practice. Computers, Environment and Urban Systems. 2004, (28):291~310
- [12] P. Rizze. Computers in urban planning and urban management at the turn of the millennium. Computers, Environment and Urban Systems. 1999, (23): 147~150.

- [13] 喻良. 基于地表水环境模型系统(SMS)的城市内河水污染控制研究: [博士学位论文]. 福州: 福州大学, 2002
- [14] 南水北调中线汉江中下游水质预测与水污染控制仿真研究: [博士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2000
- [15] 基于 MATLAB 的小清河非感潮(济南)段水质数学模型与水污染控制规划: [博士学位论文]. 曲阜: 山东师范大学, 2000
- [16] 曹瑜, 胡光道. 地理信息系统在国内外应用现状. 计算机与现代化, 1999, 61(3): 1~4
- [17] 李本纲, 陶澍. 地理信息系统在环境模型研究中的应用. 环境科学, 1998, 19(3): 87~90
- [18] 刘勇, 井文涌. 地理信息系统技术及其在环境科学中的应用. 环境科学, 1997, 18(2): 62~65
- [19] 陈建, 窦贻俭. 地理信息系统支持下的城市生态环境功能区划. 城市环境与城市生态, 1996, 9(1): 24~30
- [20] 涂新军. 水污染控制规划与 GIS. 环境污染与防治, 1999, 21(4): 38~40
- [21] 刘秀云, 徐少立. 三“S”技术在鸭绿江水污染防治规划中的应用. 辽宁城乡环境科技, 2003, 23(2): 39~40
- [22] 朱振卿, 朱重宁. 汉江流域水污染防治规划 GIS 系统. 环境科学与技术, 2001, 4: 43~46
- [23] 林逢春, 王玉. 论环境规划决策支持系统. 上海环境科学, 1995, 14(9): 1~3
- [24] 陈隽, 王红瑞. 区域环境规划专家系统设计的初步探讨. 环境保护, 1994, 12: 37
- [25] 李靖, 宋天文, 龚振文, 等. 区域水环境规划决策支持系统初步研究. 云南环境科学, 1999, 18(4): 1~3
- [26] 徐国华, 马众模, 等. 基于 GIS 的巢湖流域水环境综合治理决策支持系统研究. 安徽地质, 2001, 4
- [27] 张友静, 张元教, 姚琪. 三峡—葛洲坝区间水环境决策支持系统的开发. 河海大学学报(自然科学版), 2001, 2

- [28] 宣华. 秦皇岛市环境规划决策支持系统初探. 环境科学研究, 1995, 5
- [29] 孙启宏, 乔琦, 薛萍. 城市环境实用决策支持系统(UEDSS)的研制. 环境科学研究, 1994, 4
- [30] 李门楼, 胡成, 陈植华. 河北平原区域地下水资源决策支持系统设计与开发. 中国地质大学学报, 2002, 27(2): 222~226
- [31] 曾宪波. 水资源管理决策支持系统总体构想. 人民珠江, 2002, 4
- [32] 顾世祥, 李靖, 傅骅. 流域水资源调度决策支持系统. 黑龙江水专学报, 2002, 3
- [33] 王惠中. 区域水环境管理决策支持系统. 环境导报, 2000, 3
- [34] 梁季阳, 蒋业放, 成立, 等. 柴达木盆地水资源决策支持系统的设计与开发研究. 自然资源学报, 2000, 1
- [35] 薛松贵, 侯传河, 王军良. 黄河水资源规划决策支持系统研究. 人民黄河, 1996, 8
- [36] 翟淑华, 秦佩瑛. 太湖流域河网水质管理决策支持系统. 水资源管理, 2002, 3
- [37] 张德福. 全流域管理及自然资源规划决策支持系统. 东北水利水电, 1996, 11
- [38] 陈循. 用于流域规划模拟的计算机图模拟研究: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 1989
- [39] 蒋勇. 区域水污染控制系统规划方法学研究及其 CAP 技术的应用探讨: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 1993
- [40] 曾思育, 傅国伟, 刘志明, 等. 推进 GIS 在环境规划中应用的探讨. 城市环境与城市生态, 1996, 9(1): 1~5
- [41] 曾思育. 提高城市水污染物总量控制计算机辅助规划系统智能性的初步研究: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 1997
- [42] 曾思育, 傅国伟. 提高环境规划 CAP 系统智能性的集成方法. 环境科学, 1998, 19(5): 78~80
- [43] 李炜. 城市水污染物总量控制计算机辅助规划初步研究: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 1997
- [44] 贾海峰, 程声通, 高朗, 等. 流域计算机集成模型系统及其在水库流域水质规划中

- 的应用. 环境科学, 1998, 19(9): 75~77
- [45] 何强, 翟俊, 龙腾锐, 李惠鹏. 基于 GIS 的凤嘴江水污染控制规划数据库研究. 重庆环境科学, 2001, 23(3): 29~33
- [46] 何强. 基于地理信息系统(GIS)的水污染控制规划研究: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2001
- [47] 龙瀛. 基于 Geodatabase 的北京城市污水辅助规划系统: [学士学位论文]. 北京: 清华大学, 2002
- [48] 赵冬泉. 城市排水管网规划 GIS 辅助系统设计与建立: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 003
- [49] 王薇, 曾光明. 模拟退火算法在水污染控制系统规划中的应用. 水电能源科学, 2003, 21(1)
- [50] 黄国如, 胡和平, 等. 基于遗传算法的水污染控制系统规划. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(4)
- [51] 刘首文, 冯尚友. 遗传算法及其在水污染控制系统规划中的应用. 武汉水利电力大学学报, 1996, 29(4)
- [52] 蔡明, 白丹. 遗传算法在水污染控制系统最优规划中的应用. 西安理工大学学报, 2002, 18(1)
- [53] (美)Dale Rogerson 著, 杨秀章译. COM 技术内幕: 微软组件对象模型 COM 技术内幕. 北京: 清华大学出版社, 1999 年
- [54] 潘爱民. COM 原理与应用. 北京: 清华大学出版社, 1999
- [55] 宋关福, 钟耳顺. 组件式地理信息系统研究与开发. 中国图像图形学报, 1998, 3(4): 313~317
- [56] 刘丹, 郑坤, 彭黎辉. 组件技术在 GIS 系统中的研究与应用. 地球科学——中国地质大学学报, 2002, 27(3): 263~266
- [57] <http://www.esri.com/software/mapobjects/index.html>
- [58] <http://dynamo.mapinfo.com/miproducts/Overview.cfm?productid=1041>
- [59] <http://www.supermap.com.cn/maindoc/simchin/products/supermapIII/index.htm>

- [60] <http://www.mapgis.com.cn/product/dlxx.htm>
- [61] (美)Boggs, Michael 著, 邱仲潘译. UML 与 Rational Rose 2002 从入门到精通. 北京: 电子工业出版社, 2002
- [62] Armstrong Tom, Patton Ron. ATL 开发指南. 董梁, 丁杰, 李长业, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2001
- [63] Andy MacDonald, Building a Geodatabase. ESRI Press, 2001
- [64] (美)Martin Fowler, Kendall Scott 著, 徐家福译. UML 精粹—标准对象建模语言简明指南. 北京: 清华大学出版社, 2000
- [65] 党安荣, 贾海峰, 易善桢 等. ArcGIS 8 Desktop 地理信息系统应用指南. 北京: 清华大学出版社, 2003
- [66] 高朗, 程声通. AHP 与 SMART 方法在环境工程方案评比中的应用. 辽宁城乡环境科技, 1997, 17(4): 1~3
- [67] 程声通, 高朗. 工程方案选择的权重~属性决策分析方法. 环境科学, 2000, 5: 31~35
- [68] 王富康, 王曙光等. 工业废水和城市污水处理技术经济手册. 北京: 清华大学出版社, 1992
- [69] 邵玉林. 天津市工业污染治理费用函数研究. 城市环境与城市生态, 1999, 12(1)
- [70] 邓志强, 廖斌. 基于关系数据库的环境监测知识库的建立. 中国环境监测, 2003, 19(1): 5~8
- [71] 时密林, 许建潮, 胡明. 专家数据库系统中知识库与数据库的结合. 吉林工学院学报, 1995, 16(1): 21~23
- [72] 吴海桥. 基于关系数据库的知识库的建立. 微型电脑应用, 2001, 17(11): 52~55

参考文献
