



辽宁工程技术大学

硕士学位论文

永定河生态修复决策系统空间

数据库构建及应用

**Spatial database construction and its application to the
decision-making support system for ecological restoration of
the Yongding River**

作者姓名 胡倩倩
指导教师 王明玉教授
学科专业 环境工程

二〇一二年十二月

学位论文书脊样式：

永定河生态修复决策系统空间数据库构建及应用

胡倩倩

辽宁工程技术大学

关于论文使用授权的说明

本学位论文作者及指导教师完全了解辽宁工程技术大学有关保留、使用学位论文的规定，同意辽宁工程技术大学保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，学校可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编本学位论文。

保密的学位论文在解密后应遵守此协议

学位论文作者签名：_____

导师签名：_____

年 月 日

年 月 日

分类号 X523

学校代码 10147

UDC 504

密级 公开

硕士学位论文

永定河生态修复决策系统空间

数据库构建及应用

**Spatial database construction and its application to
the decision-making support system for ecological
restoration of the Yongding River**

指导教师 王明玉教授

申请学位 工学硕士

学科专业 环境工程

研究方向 水污染控制与治理

辽宁工程技术大学

致 谢

本论文的工作是在导师王明玉教授的悉心指导下完成的，王老师严谨的治学态度和科学的工作方法给了我极大的帮助和影响，在我的论文完成过程中给出了很多宝贵的建议以及指导，对我的学习、生活给予了很大的关心和帮助，在此衷心感谢两年多来王老师对我的关心和指导。

感谢陈建平老师在我的在学习和生活上给予的关心和帮助，对于我的科研工作和论文都提出了宝贵意见。

在实验室工作及撰写论文期间，李致宇师兄、赵建辉师兄、于森师兄等对我论文中的技术方法研究工作给予了热情帮助，在此诚挚的向他们表达我的感激之情，谢谢你们一直以来对我的帮助和关怀。谢谢师妹万长园在我撰写论文期间的帮助与理解，谢谢室友王晓明、宋萌等对我的关心与照顾。感谢环境 10 级同学李艳、王舒扬、董思宏同学对我的帮助，非常感谢班长申晓强在我外出学习期间对我的帮助。

另外也感谢我的家人朋友，感谢你们的理解和支持，使我能够在学校专心完成我的学业。

最后，谨向所有支持、关心、帮助我的老师、朋友和亲人们致以深深的谢意！

摘 要

河流生态修复决策是一个多目标、多层次、多约束条件的复杂系统优化问题。本文针对河流生态修复工程方案设计与实施过程中的复杂性，以及对多尺度、多来源、多类型等海量数据的需求，面向永定河生态环境修复以及决策系统需要，基于压力-状态-响应模式，研究了合理有效的数据库指标体系。本文采用空间数据引擎 ArcSDE 集成关系数据库 Oracle 的模式，应用 GIS 的线性参考系统与动态分段技术，构建了一个由多数据源组成的永定河生态环境修复数据库。

本文构建的永定河生态修复空间数据库结构设计其整体上合理有效，实现了从数据库中动态获取数据信息并进行查询显示的功能，解决了空间属性数据分开存放及数据利用效率低的问题，可高效地为河流生态修复决策系统提供必要的数据管理与应用支持。论文采用 Oracle 结合 ArcSDE 的方式，并应用线性参考与动态分段技，使得数据利用和共享效率更高，是一种比较可行有效的数据交互方式，具有较强的实用性，对类似缺水型河流生态修复空间数据库的构建提供了参考。

关键词：永定河 ； 生态修复 ； 空间数据库 ； 决策系统

Abstract

Decision-making of ecological restoration is a complex system optimization problem with multi-objectives, multi-levels, and multi-constraints. This study aims to offer an effective approach for processing mass data with multi-scales, multi-sources, and multi-types, oriented to the Yongding River ecological restoration research and the needs of decision-making system and based on the pressure - state - response mode. That was in order to build a reasonable and effective research database index system and provide optimal schemes in design and assessment of the river ecosystem restoration. Particularly, the pattern of the spatial data engine ArcSDE was integrated with the relational database Oracle and GIS linear reference system as well as the dynamic segmentation. Specifically, the Yongding River ecological restoration spatial database has been established.

The construction of the Yongding River ecological restoration spatial database ,on the whole, is reasonable and effective, and realize the function of inquiring and displaying information dynamically from the database. It has solved the problem of spatial and attribute data stored separately and used with low efficiency, and can provide necessary data management and application support for the Yongding River ecological restoration. It has been demonstrated that the proposed approach is effective and practical for data supporting in assessment and decision-making for the ecosystem restoration of artificially recharged rivers. The method of Oracle integrated with ArcSDE way, using linear referencing and dynamic segmentation technology, can make full use of data and share data more efficiently. It is a more feasible and effective data interactive way. Moreover, And it provided a reference for similar rivers to build an ecological restoration spatial database.

Key Words: Yongding River ; ecological restoration ; spatial database ; decision-making system

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
1 绪论.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 研究背景及意义.....	1
1.3 国内外研究现状.....	3
1.3.1 国内研究现状.....	4
1.3.2 国外研究现状.....	5
1.4 研究内容及技术路线.....	7
1.4.1 主要内容.....	7
1.4.2 研究目标.....	8
1.4.3 研究方法及技术路线.....	8
2 研究区概况及问题.....	11
2.1 研究区概况.....	11
2.1.1 地理位置.....	11
2.1.2 地形地貌.....	11
2.1.3 水资源.....	12
2.1.4 气候.....	13
2.1.5 社会经济.....	14
2.2 永定河生态环境问题.....	14
2.2.1 水资源问题.....	14
2.2.2 水环境质量.....	14
2.2.3 河道生态用水.....	15
3 永定河生态修复数据库指标体系分析.....	16
3.1 决策系统功能模块需求.....	16
3.2 基于“压力-状态-响应”模型的指标选取.....	17
3.3 指标体系及其在评价目标中的应用.....	20

3.3.1	水环境目标.....	20
3.3.2	生态目标.....	22
3.3.3	社会经济目标.....	24
4	永定河生态修复空间数据库设计与实现.....	25
4.1	数据库及 GIS 技术在永定河生态修复中的应用.....	26
4.2	数据收集与处理.....	26
4.3	数据需求分析.....	27
4.4	数据库指标体系结构分析.....	29
4.5	数据库逻辑结构设计.....	30
4.5.1	永定河生态修复空间数据库体系结构.....	30
4.5.2	属性数据表结构设计.....	31
4.5.3	线性参考及动态分段技术.....	34
4.6	空间属性数据入库实现与集成.....	39
4.7	物理结构设计.....	40
4.7.1	安全性.....	40
4.7.2	数据的维护及更新.....	41
5	永定河生态修复空间数据库的应用.....	42
5.1	模拟评估模块.....	42
5.1.1	区段选择.....	44
5.1.2	修复前评估.....	45
5.1.3	修复中评估.....	46
5.1.4	修复后评估.....	48
5.1.5	评估结果分析.....	49
5.2	综合决策模块.....	50
5.3	小结.....	54
	结论与展望.....	55
	参 考 文 献.....	57
	作 者 简 历.....	61
	学位论文原创性声明.....	62

学位论文数据集.....	63
--------------	----

1 绪论

1.1 引言

水资源是全世界社会经济发展的支撑资源，保障着人类社会的发展与繁荣。然而，近年来随着社会经济的不断发展，水体污染现象日趋严重，水环境问题以及由此导致的生态问题已经成为全球性的环境问题^[1]。我国的水资源相对其他国家而言属于短缺型，人均淡水资源量仅为 2200m³，仅为世界平均水平的 1/4，且时空分布相当的不均匀，尤其是华北、西北等地区，水资源严重不足^[2]。

永定河从 70 年代起开始出现断流，到 70 年代末永定河断流已相当严重，全年断流达到了 282 天；80 年代断流期达到了 299 天；自 20 世纪初起，永定河三家店以下河道常年处于干涸状态^[3]。由于天然降水减少、流域用水量增加、水资源过度开发利用，沿岸地区地下水位不断下降，永定河生态系统严重退化，河道现状与北京城市发展定位极不协调，加快永定河生态治理与修复已刻不容缓。

当前北京市已将永定河定位于“京西绿色生态走廊与城市西南生态屏障”，制定《永定河绿色生态走廊建设规划》，提出于 2010 年开始对永定河实施大规模的生态修复工程建设，把永定河打造成生态走廊与水岸经济发展区。由于工程范围广、周期长、投资大、综合性强，涉及生态整治和区域经济发展，因此如何对工程的建设及运行进行科学管理，是关乎永定河的生态修复目标能否实现，工程建设能否保质保量完成及两岸经济可否保持可持续发展的关键。针对永定河流域当前的生态环境问题，从不同的方面都进行了大量的研究和探索，包括水环境，生态环境以及社会经济方面。不同学者从水量、水质方面，生态健康以及对永定河修复带来的社会经济价值等方面进行了大量的研究。但尚未有基于永定河生态修复问题的软件系统，来为永定河的生态修复提供决策支持。鉴于此，中国科学院大学水系统安全研究中心针对永定河的生态修复构建了一个综合评价与模拟决策系统，为永定河生态修复方案的确定提供辅助支持，为科学决策提供有效的数据支撑，本文所构建的数据库也是基于课题组开发的决策系统而构建的。

1.2 研究背景及意义

生态修复的目的是为了使已经受到损害的生态系统结构及其功能恢复到受人类损害前的自然状态^[4]，对河流进行生态修复就应该恢复河流生态系统的功能，让其恢复到自然健康状态。它是一个多目标、多层次、多措施、多约束条件的复杂问

题^[5]，因而对河流的生态修复必须针对其受损现状采取有针对性的修复方案，着手恢复其各项功能。由于对受损河流系统的各项功能进行修复十分复杂，工程期较长，而且实施的工程方案效果具有不确定性，仅凭人工方式来评估与预测制定修复工程方案，具有较大的主观臆测性。为了综合全面考虑修复方案，达到预期修复效果，避免工程方案实施后产生的负面影响，必须对当前河流现状进行适时评估，调整未修复河流段工程实施方案的设计与运行。

永定河生态修复工程是一项极其复杂的系统工程，生态修复过程中所面临的生态、环境、社会、经济等各方面的挑战，对生态修复效果具有极其重要的影响。同时地表、地下、生态环境等数据量大，用户希望通过高效、快速的计算机处理能力，来对生态修复进行模拟、评价和决策。此外，如何对永定河生态修复制定科学的决策方案进行合理规划，指导永定河的生态修复建设，是当前决策管理者所面对的关键问题。当前还没有一套成熟、实用、综合、高效的模拟评估和综合决策系统可以应用到永定河生态修复当中，为决策者提供决策支撑服务。因此，开发一套永定河生态修复模拟评价与综合决策系统软件十分有必要。

根据永定河生态修复工程设计和决策管理的需要，迫切需要一套模拟评估与综合决策系统对永定河生态修复前后的环境进行综合评估，指导实施工程方案和优化工程方案的布局。同时对将来需要规划的修复区段进行情景方案模拟评估，为将来的生态修复提供科学的决策方案。而决策支持系统能够提供强大的信息支撑和信息供给能力，以及友好的人机交互界面，正逐渐成为水资源及流域等管理人员制定科学决策的有效辅助工具。决策支持系统（DSS）为人们提供了分析问题、构建模型、模拟决策过程和效果的决策环境，成为解决半结构化问题和非结构化问题的实用有效工具^[6]。国内水环境决策支持系统的研究起步较晚，但发展较快，尤其是在水环境管理及防洪决策支持等方面进行了很多研究，在有关部门进行城市流域水环境管理及制定工程方案方面做出了很大贡献。但在城市河流水环境管理决策支持系统中尚存在一些不足，如在用户的交互方式、数据信息的获取方面等，尤其是在城市河流生态修复方面应用的还很少。

但在进行任何规模的水环境规划、水质预测或是河流湖泊的修复工程之前，为了满足各方面的工作需求，都需要处理大量的水环境及生态环境等相关数据以有效开展各项工作，数据更是决策系统各功能模块发挥效用与联系的中心部分。在永定河生态修复模拟评价与综合决策系统中，任何修复工程方案的形成，都需大量相关数据为方案生成过程中的模拟、评价、比选及决策提供数据支撑。永定河生态修复需要海量信息，涉及的数据来源广泛，量大、种类多，在格式上也存在较大的差异。

不仅有属性数据，还有大量描述地理要素特征的空间数据，空间属性数据间的关系十分复杂。同时各种数据类型的多尺度、多来源性，更增加了数据的复杂度。并且由于数据的动态时空性，要精确获取不同时间地理位置的数据，必须对对象的存储状态按条件进行筛选。因而很有必要构建一个结构合理的数据库来有效组织存储相关数据，易于数据查询与管理，提供多用户并发访问的能力，为永定河生态修复决策系统提供有效的数据支撑。

空间数据以几何级数的形式增长，传统基于文件和关系数据的管理方式已经无法满足海量数据的存储需求。即使能解决属性数据的存储，但海量空间数据的存储是个亟待解决的问题。不同数据源、不同尺度空间属性数据的集成管理问题，导致了对数据的增删改等操作十分的不方便，检索查询效率十分低^[7]。且常常因为文件的删除、移动等操作而无法管理数据，不能根据空间范围（如流域范围、行政区域等）等条件查询检索数据。通过分析用户对空间数据的访问需求，数据库技术的发展以及优化，解决海量空间属性数据的存储问题，实现其一体化的存储已经成为设计空间数据库的核心思想^[8]。其次，决策系统本身的优势及其特性也在于能够提供一空间数据库来支持实现决策和分析，为决策者直观便捷的进行决策分析提供了一个有力工具。利用数据库及计算机技术建立一个河流生态修复决策支持系统，用来辅助河流生态修复技术及方案的制定，为河流生态修复工程提出更为优化的实施方案，对潜在的问题提出相应有效的改进措施与应对手段。

1.3 国内外研究现状

决策支持系统是从管理学和运筹学基础上发展起来的，起初仅局限运用于辅助决策模型^[9]。随着数据库、人工智能以及数据仓库、数据挖掘技术的发展，决策支持系统的应用更为广泛。在国外，决策支持系统的使用已经非常的普遍，我国的决策系统随着信息化进程也在逐渐广泛应用于各个领域。将决策支持系统应用于水资源规划管理等领域，解决水环境、生态问题，以实现合理的使用水资源、控制水污染、修复生态状况等。20世纪80年代末，决策支持系统应用就在欧美等发达国家有了较大的发展，如加拿大Manitoba大学开发的ID SSREZES就取得了较好的效果^[10]。我国虽然起步比较晚，但是发展较快，出现了大量基于决策支持系统的理论研究及应用系统。如广东环境信息中心于2001年开发的东深流域水环境管理辅助决策系统，梁文斌等建成的京津唐水资源规划决策支持系统等，这些研究与应用为管理流域水资源提供了有力的帮助。但是目前关于流域生态修复方面的决策支持系统还是相对较少，而且是流域就不可避免的涉及到地理空间位置以及大批量的数据，

必然要把地理信息系统 GIS、数据库技术等结合到一起来应用，实现更为强大和完整的决策数据支持。

数据库技术已经在众多领域中有了广泛的应用，它是决策系统的核心底层，决策系统在所建立的数据库的基础上，实现对数据的统一存放、编辑、修改、分析等功能。对于流域水资源管理、环境生态修复等问题，管理者利用决策系统处理大量的非结构化问题，大大提高了工作效率及其科学性，是一个非常实用的辅助工具。地理信息系统 GIS 是能够存储、分析、评价空间信息，并能辅助决策的计算机硬件和软件系统。

利用 GIS 管理水文水资源数据，生态环境数据，包括矢量、栅格、时空、遥感数据等。GIS 对水文数据，尤其是水质、遥感数据的管理分析非常有效，大大降低了相关部门的工作量。把 GIS 应用于水文数据的管理，主要是对水质、供水部门及遥感数据进行管理与分析。美国在 20 世纪初对近 200 家水质部门进行调查，结果显示有超过 1/3 的部门利用 GIS 来管理地表和地下水水质^[11]，且 GIS 的功能特性提高了水质数据在相关部门间的共享度，从而水资源领域在利用 GIS 来管理相关数据的应用越来越广泛。

尽管全国各地的水资源及监测部门耗费了大量的时间精力监测并记录了大量的水环境数据，为水环境治理等工作的开展提供了重要的数据基础，但是这些数据由于采集处理手段和方式不够系统和先进，缺乏统一的标准和管理方式。并且部门间缺乏有效的共享机制，导致了数据重复获取的浪费及利用效率不高的状态，无法满足和解决水环境问题的需要，更加无法为水环境决策问题提供支持^[12]。各个管理部门之间的数据相对独立，缺乏共享机制，数据利用率极低，远不能满足现代水资源水环境管理的需要。并且对水环境的管理，涉及方方面面，信息量很大，要是没有科学实效的管理手段，必然会影响水资源合理利用与水环境问题治理的效果。因而，结合数据技术、地理信息系统 GIS 技术，开发建立水资源及其水环境、生态修复等的数据库是一项意义重大的工作，也是决策系统发挥效用不可或缺的部分。

1.3.1 国内研究现状

我国自 1990 年水利部全国水文数据库工作启动后，全国各省市、各级流域都全面展开了构建水文数据库的工作，并不断融合新的技术（如 GIS 等），提高数据库系统的存储分析能力^[13]。靳孟贵等在 1991 年就研制出了格尔木地区地下水动态数据库系统，实现了对数据库的修复、查询、报表、绘图等功能，还能进行动态分析与预测等。1994 年铁锋等开发的大同市水资源数据库与管理系统，建立了大同市 7

个方面的数据库文件,包括水文地质、地形地貌、水文气象、水质污染状况及图形化显示等,提供了对数据库进行检索维护、统计分析等功能,并融合了 GIS 技术,使得图形功能更为强大。1995 年张国生和吕武采用 C 集合 Foxbase 开发了区域地下水信息管理系统。该系统数据涵盖了地理、文字和统计数据,结合空间统计数据绘制了地图,使得统计效果更为直观。1998 年郭东东、周新国研究开发了泰山地区地下水资源评价数据库系统,能够统计分析、评价泰山地区的降雨、蒸发、径流量等。而 1999 年宫力辉等研建的决策支持系统,已经应用到郑州市的水资源管理中,并取得了良好的效果。2000 年卞建民、杨健强等建立了松嫩盆地水资源开发管理信息系统,以 MapInfo 为开发平台,对松嫩盆地水资源开发利用现状进行评价,为管理决策提供科学依据。中国地质大学李门楼等在 2002 年构建河北平原区域地下水资源决策支持系统,具有实时评价、预测等辅助决策的功能,能够实现模拟模型与数据库间的动态交互。在水资源的管理方面,北京大学和长江流域水环境监测中心开发的全国水环境决策支持系统,具有多目标、多层次、多参数性,能够分析水环境管理信息、模拟优化^[14]。2006 年高振东用 Visual Basic 6.0 语言开发了基于 ArcView3.3 的水资源信息管理系统,用 GIS 来反应沈阳地区的水资源极其动态变化情况,不仅实现了部门间的信息共享,还为管理和科研部门提供了科学依据。2008 年张俊耀、成药、郑丙辉采用 ArcIMS、SQL Server 作为开发和数据平台,设计了基于 WebGIS 的河口水环境管理信息系统。2009 年徐洁研建了基于 ArcSDE 的太湖流域水环境空间数据库,冯雅倩的合肥市水环境决策支持系统成为水环境管理信息化的重要工具,对流域水环境进行管理、规划非常有效。麻德明,爱平在 2010 年构建了基于 ArcSDE 和 Oracle 的海岛空间数据库框架,融合了更为先进的数据库及 GIS 技术。

1.3.2 国外研究现状

国外不少国家在水资源管理及水环境问题解决方面都已经取得了不同程度的效果,其中比较有代表性的国家有美、法、英、日、韩^[15]等。泰晤士河、莱茵河以及特拉华河等曾被严重污染过的河流,利用所建立的系统及其水质模型来进行水质规划和管理,非常有效地改善了污染水质。美国国家环保局基于 GIS 技术开发了全美河段管理系统,采用 ArcView 作为集成环境,将整个国家的流域数据、水质分析数据等都统一存储起来,为用户提供了一个统一点源、面源等流域管理辅助工具^[16]。而欧洲国家一些机构综合利用 GIS、数据库、模拟技术等联合开发了具有水文模拟、污染控制功能的流域规划决策支持系统,并用 GIS 显示分析和模拟结果^[17]。美国

Purdue 大学 1977 年研制的河流净化决策支持系统 GPLAN 是最早的水质管理决策支持系统之一^[18]。H.U.Khan、S.M.Khan 和 T.Husain 1988 年为沙特阿拉伯王国农业水利部门研究开发了国家水资源数据库管理系统^[19]，用来存储管理沙特境内的地下水信息、水质、降雨、径流等数据资料。1989 年，美国的 Bartholic J 和 Vieux B 将空间信息技术与有限元法结合，从数学算法上进行改进，研制了为水资源管理者提供决策支持信息的美国密执安州内陆水资源环境管理系统^[20]。90 年代，葡萄牙开发了大量由污染源和水质数据为数据源的数据库，为决策支持系统的污染模型、扩散模型以及处理优化模型等提供数据支持，很好地解决了一些污染严重工厂的选址问题，具有较大的实用性^[22]。1996 年 J.L.Laxton 等为地质制图设计实现了一种空间数据库模型。2002 年 Daene C McKinney 等研究了面向对象的水资源管理模型与 GIS 的集成，解决了流域水资源分配中的空间和目标信息收集等问题^[22]。2004 年 P.A. 沃伯斯基于流域的水文条件等决策指标建立了流域水资源管理模型^[23]。2005 年，Stratos Arabatzis 等从水资源监测、水资源评价和管理三个方面对整个流域水资源管理进行了研究，强调了应对随着社会发展水平的提高来不断量化评估水资源信息服务的经济效益，并提出了评价方法^[24]。Daene C M 等建立的流域水资源决策支持系统能够对流域的水资源使用进行规划和管理。此外近年来很多国家研发的决策支持系统不仅各具特色，而且都有很好的辅助功能，如美国的多目标河流水质规划管理决策支持系统、海湾水质管理决策支持系统，西班牙的河流水质管理决策支持系统，澳大利亚的水库水质保护决策支持系统等^[25]。

目前对空间数据库的应用十分的广泛，并且各具特色与建库标准。2007 梁国玲等以 GIS 为技术基础，从数据库的构建流程、结构、标准化方面着手，设计了中国地下水资源数据库^[26]；2008 年母海东等通过整理研究区域水文地质图空间数据库建立的相关规则，指出空间数据库设计成败的关键在于数据库建设规则的理解是否正确^[27]；2009 年王磊提出了基于对象特征的数据动态更新机制，为城市数据库建设的“更新冲突”问题提供了参考解决方案。2008 年谢忠等通过分析对空间数据库的不同需求，引入了“一库两用”的思想^[50]。2009 年王艳东等提出了一种省级空间数据库的构建方案，设计了相应的逻辑模型和概念模型。

虽然国内外水资源、水环境领域决策支持系统以及数据库的研究应用已取得一定的成果，但还是存在很多的不足，如在用户的交互方式、数据库结构的扩展、数据信息的理解与获取等方面。尤其是河流生态修复方面，目前还没有比较成型的决策支持系统能应用于河流生态修复工程中，相关的生态修复数据库也仅是针对某个问题，具有一定的局限性。本文针对永定河存在的生态环境问题，以及永定河以人

工补水方式进行修复的特性，设计开发决策支持系统以及构建数据库，不仅仅能解决针对永定河的特有问题，还能为其他类似永定河的生态修复提供借鉴作用。这使得本文所依托的课题及构建永定河生态修复模拟评估与综合决策系统的研究更有意义，对决策支持系统的数据库进行研究及创新性构建也十分有必要，是完善决策系统功能的重要方面。

随着数据库技术的不断发展，中间件技术的不断成熟，以及对水环境信息数据更高质量的需求，目前数据库技术在流域水资源、水环境问题方面的应用已进入一个全新的阶段。主要是把关系数据库系统（RDBMS）和 GIS 应用平台结合，开发新的功能，如系统管理功能、水文资料整编功能、图形处理功能、统计分析功能及可视化等，并通过空间数据引擎，实现属性与空间数据的无缝连接。这样在增强数据的安全性、共享性的同时，也提高了对数据的存储与访问效率。

1.4 研究内容及技术路线

1.4.1 主要内容

流域决策支持系统的研究与开发是流域管理迈向数字化的新阶段^[28]，而数据库的构建是不可或缺且十分关键的部分。在永定河生态修复以及模拟评价与综合决策系统开发过程中涉及的数据具有明显的多源异构、空间性、时间性、动态性，数据构成和格式非常复杂。本课题中采用 Oracle10g 数据库来进行数据的一体化存储管理，该数据库不仅具有一般数据库如 SQL Sever, Informix 等良好的安全措施、多用户访问、并发控制和数据恢复机制，而且跨平台性、移植性、可扩展性更好，能够存储复杂的数据类型，对非结构的数据类型，也有提供了相应的数据类型。以 AcrGIS 作为空间数据存储平台，通过空间数据引擎 ArcSDE 把空间数据和属性数据统一集成到 Oracle 中。

本文的主要研究内容有：

(1)数据库指标体系及结构研究：研究决策系统需求及生态修复目标，基于压力-状态-响应模式，选取指标框架，构建数据库指标体系。研究永定河生态修复过程中数据间的关联，将关联作为设计数据库结构的关键。使得永定河数据库具有可扩展性，添加新的指标到数据库中，仅需添加新的数据记录而无需改变数据结构。

(2)数据库逻辑模型：数据的组织结构和存储模式影响着数据库提供数据服务的质量，如何根据永定河流域水环境特性和生态问题、以及项目系统功能需求，有效

的融合 GIS 的线性参考与动态分段技术来组织数据，建立更有效的数据存储模型，是本文的一个重要研究点。

(3)数据库物理模型：在统一的信息标准规范下，按照永定河生态修复数据库的逻辑模型组织数据入库。对于属性数据，创建属性数据表，直接在 Oracle 中完成各种数据表记录的加载；而对于对空间数据，建立空间数据引擎 ArcSDE 与 Oracle 的连接，通过它们间的数据通道存入 Oracle 中。

(4)如何有效的为决策支持系统提供数据支撑：根据系统四个模块（信息管理、综合评价、模拟决策、方案可视化）的数据及功能需求，研究如何有效地为永定河生态修复综合评价与模拟决策系统提供数据支撑。

1.4.2 研究目标

本文的研究是基于永定河生态修复与模拟决策系统的功能需要，考虑永定河修复工程方案以及现实约束条件等，在处理分析永定河历史和现势调查数据的基础上，采用 Oracle 结合 ArcSDE 的模式，应用 GIS 的线性参考与动态分段技术而设计的数据库总体构架。通过构建的永定河生态修复空间数据库，能够方便永定河数据的统一管理，灵活查询、高效检索和统计，为决策系统提供数据支撑。同时也能克服工程人员直接进行决策的主观性，为流域修复工程方案的确定提供快速、直观、多层次的决策支持。对永定河流域的生态修复具有相当的意义，并可作为其他类似流域生态修复工程方案制定的借鉴方式。

1.4.3 研究方法及技术路线

本文的河流生态修复数据库是基于永定河生态修复模拟评估与综合决策系统而构建的，采用关系数据库管理系统（Oracle）和地理信息系统（ArcGIS）相结合来存储和管理具有多源、时空特性的水环境、生态环境等数据，并通过 ArcSDE 实现了空间数据数据的集成管理。ArcSDE 是一种中间件技术，它为 GIS 应用程序和基于 RDBMS 的空间数据库提供了一个接口^[29]。ArcSDE 可以把空间数据导入 Oracle 中，由关系数据库来统一存储、管理，并且用户通过它也能从 Oracle 中获取空间数据。本文充分利用 Oracle 的安全性、稳定性、数据一致性等优点，将空间属性数据由其统一管理。建立永定河生态修复空间数据库的最终目的是为了给永定河生态修复综合模拟与决策支持系统提供数据支撑，使得决策系统的情景方案更为合理准确。本文主要由如下几个步骤来完成整个数据库的设计与实现：

(1)资料的收集与处理：相关数据资料的电子化与规范化，包括相关电子地图与属性数据及纸质地图的数字化。

(2)文献调研：包括所使用软件的操作、使用说明及应用，以及河流生态修复中所涉及的技术理论方法等的研究。

(3)确定研究思路及方法：根据已有的文献资料与数据情况，明确数据库设计与实现的数据需求，以及所要掌握的各方面的理论及软件操作应用能力。

(4)指标体系分析：根据永定河属于人工补给河流的特性，PSR 模式以及河流生态修复过程中所需综合考虑的指标、影响因素，用户及决策系统需求等构建数据库的指标体系

(5)永定河生态修复数据库构建

属性数据入库：河流生态修复中所涉及到的描述属性状态的信息，包括数据、图片、文本等。

空间数据入库：与永定河空间位置相关的数据信息，包括地理位置、河流区段、监测井、修复工程区域等研究对象的空间地理信息。

空间属性数据的管理：基于 ArcSDE，把属性空间数据导入数据库，实现 Oracle 对空间属性数据的统一存储管理。

(6)数据库测试与改进。

(7)数据库与应用开发程序的连接。

(8)数据库在决策系统中的应用：把构建的永定河生态修复数据库应用于永定河生态修复模拟评估与综合决策系统中，为其提供决策时的数据支撑。

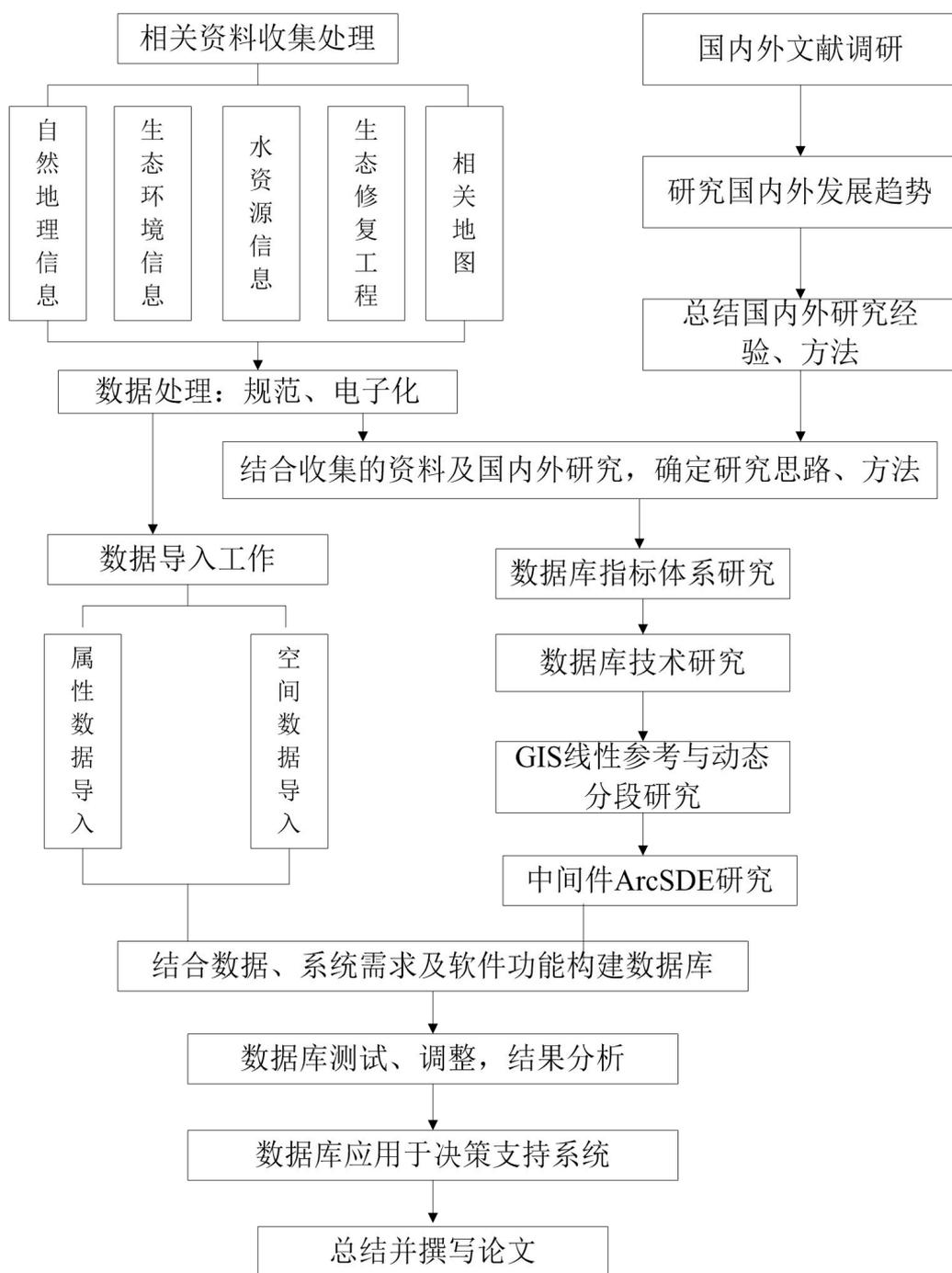


图 1.1 研究技术路线图

Fig 1.1 Research Technology Roadmap

2 研究区概况及问题

永定河是北京地区的第一大河，全长 747km，其中北京境内约为 170km。按照其所处地理位置及河道特征，大致分为 3 段：城市河段（官厅水库以上河段）、官厅山峡段（官厅水库至三家店之间）、平原河段（三家店以下河段）的。永定河是北京的母亲河，是北京的重要水源地，它流经北京市石景山、丰台、房山、门头沟、大兴五个区，对沿河地区社会经济发展具有重大带动作用。

2.1 研究区概况

永定河是全国四大重点防洪江河之一，是北京的重要水源地，对北京市的发展起着重要的作用^[3]。社会经济的发展用水量的剧增，以及永定河京外段水源的被其他省份的拦截，导致了永定河北京段水资源的锐减。并且境内污水排放量猛增，水质急剧恶化，永定河北京段的生态环境问题不断涌现，如河道断流、水质下降、风沙侵扰等。

2.1.1 地理位置

永定河流域位于东经 112° ~117° 45'，北纬 39° ~41° 20'之间，自内蒙古高原的南源和山西高原的北部发源，东临潮白河和北运河、南有大清河、西临黄河流域、北为内陆河，水资源相当的丰富^[3]。北京段全长 170km，流域面积为 3168km²，流经北京市内的石景山、丰台、房山、门头沟、大兴五个区。

2.1.2 地形地貌

永定河北京段地势北高南低，最高海拔约 2263m，最低为 17m。从官厅水库到三家店间为上游山峡段，区段山坡多且陡峭，水流落差较大，长约 93km；三家店至卢沟桥为中游卢三段，河道相对较宽且平缓，长约 17km；卢沟桥至梁各庄段为下游卢梁段，河道长约 61km。



图2.1 永定河生态修复研究区

Fig 2.1 The Study Area of Yongding River Ecological Restoration

2.1.3 水资源

永定河近 10 年来平均入京流量 4.07 亿 m^3 ，出境流量 4.13 亿 m^3 ，可供水资源量仅 0.53 亿 m^3 /年^[3]。自上世纪八十年代后，永定河流域天然降水减少，流域水资源蓄水总量严重不足。流域内城市及工农业用水的剧增，导致了用水需求无法满足，三家店以下的河道出现常年干涸断流，有的甚至出现了干河床。地表水的缺乏，导致了地下水的过度开发利用，地下水水位不断下降。永定河流域水环境的突出问题是永定河下游断流不仅造成地表干枯、河床沙化、植被退化，而且使区域内生态环境遭到严重破坏，河流生态系统不复存在。而永定河多年的治理以防洪工程为主，虽然初步建立了生态功能分区，但是由于河道生态构建目标不明确，没有形成统一的目标体系，河道生态环境治理滞后，河道及周边环境问题比较突出。

表 1.1 永定河三家店站径流量

Table 1.1 Sanjiadian Station Runoff of Yongding River

年份	三家店站径流 (万 m ³)	年份	三家店站径流 (万 m ³)	年份	三家店站径流 (万 m ³)
1956	257530	1974	16460	1992	896
1957	163500	1975	13350	1993	0
1958	103010	1976	400	1994	1137
1959	155010	1977	7140	1995	16120
1960	102640	1978	4370	1996	35068
1961	50350	1979	51830	1997	5648
1962	107660	1980	51953	1998	1953
1963	40850	1981	8153	1999	287
1964	79200	1982	6823	2000	2610
1965	55870	1983	13305	2001	10
1966	17160	1984	3744	2002	0
1967	86880	1985	6	2003	35
1968	43480	1986	183	2004	0
1969	34710	1987	171	2005	0
1970	46550	1988	1673	2006	0
1971	13180	1989	0	2007	0
1972	3630	1990	0	2008	0
1973	3670	1991	1941		

永定河北京段每年不断有污水排入河内，包括工业和生活污水，以及大量农药、化肥、养殖粪等污染水质。有的排入或渗入永定河，严重污染了永定河水质，破坏了饮用水源水质和生态环境。水体污染主要是氮、磷污染，有的已经基本达到了富营养化水平，大部分样点超过地表水中湖泊水库Ⅳ类水质标准，有的甚至超过了Ⅴ类水质标准，总体上处于轻度污染。

2.1.4 气候

永定河北京段位于东部湿润区和西部干旱区之间，大陆性气候明显。春季风大且干燥，夏季酷热暴雨，冬季长且寒冷，西北风猛烈，春秋时节多风沙。由于上游地形起伏较大，因地形的变化局部气候差异很大，随海拔升高，温度和降水的垂直

递变明显。永定河北京段在 6-9 月份降雨比较集中，尤其是 7、8 月份降雨超过了北京全年的 80%，且降雨多为大到暴雨。不仅不同月份的降雨量存在差异，而且不同年份间也存在较大变化，丰雨年可超过 1300 mm，而少雨年则仅为 200~300mm。

2.1.5 社会经济

永定河北京段的 5 个区 2008 年户籍人口为 298.6 万人，地区生产总值 1231 亿元，三产比例为 2.6: 40.9: 56.5，人均地区生产总值 4.1 万元，城市化率 69.9%，人口密度为 613.6 人/km²，建成区面积占 17.7%（以上数据源自 2009 年北京统计年鉴）^[37]。境内有京广铁路、京九铁路、京石高速公路等重要交通设施，有供油、汽、水管道、大型变电站等重要生产生活设施，有首钢、北京电力设备总厂、长辛店车辆厂等重要经济设施。

2.2 永定河生态环境问题

自上世纪 90 年代以来，随着流域内社会经济的不断发展，城市规模的不断扩大，以及流域内降雨不断减少，永定河上游段的官厅水库水质遭到了严重污染，水质已经达不到生活水源的标准。并且永定河河道的干涸带来了很多的生态环境问题，如生态环境恶化、河床裸露、空气污染严重、河道内砂石无序开采造成河道主槽及滩地的不平整等。

2.2.1 水资源问题

水资源锐减是永定河北京段生态环境系统退化的主要因素，官厅水库来水量以年均 2300 万 m³ 的速率锐减，官厅水库出库水量相应减少。随着三家店饮水占来水比例的增加，三家店径流量减少至几乎为零，下游平原段常年断流。地下水埋深呈下降趋势，其中城近郊埋深从 1980 年的 15m 增加到 2008 年的 30m^[51]。

2.2.2 水环境质量

永定河流域村镇聚集在主河道两岸，人口集中，过去这些位于河边的城镇生活污水、工厂废水没有经过处理，直接排入永定河造成水体污染。自 1960 年以来，永定河官厅山峡地区工业发展很快，永定河成了这些污水排放企业单位的工业废水和生活污水的汇集地。70 年代初期，官厅水库的水变得浑浊，出现了死鱼，永定河的水质明显恶化。根据 1980 年代中期的调查，永定河山峡段排污口大约有 30 个，

主要排污单位有 15 个。2005 年调查显示，永定河水污染以点源为主，三家店以上河段共有 7 个污水口，三家店至大宁水库段共有 14 个污水口。可见，随着时间推移，永定河山峡段的排污口逐年减少，但向永定河排放的各种废水仍然存在，对永定河的水污染控制提出了严峻挑战^[38]。

2.2.3 河道生态用水

自上世纪八十年代后，永定河流域天然降水减少，流域内水资源蓄水总量严重不足。但是流域内的城市、生活、工农业用水还在不断增加，三家店的水都被引入了市区以缓解用水需求，结果导致了三家店以下河道常年断流干涸。地下水被过度开发利用，河道两岸的地下水位不断下降。永定河下游断流不仅使得地表水缺乏、河床滩地干涸、沙化，植被退化等，还严重破坏了流域内的生态环境，导致野生动物几乎灭绝，植物种类锐减，生物多样性及河流的生态系统已然不存。

3 永定河生态修复数据库指标体系分析

3.1 决策系统功能模块需求

永定河生态修复模拟评价与综合决策系统是一个多目标、多属性、多层次、多功能、多阶段的综合决策系统，具有模拟、规划、预测和比选功能，由多个模型高效集成^[39]。

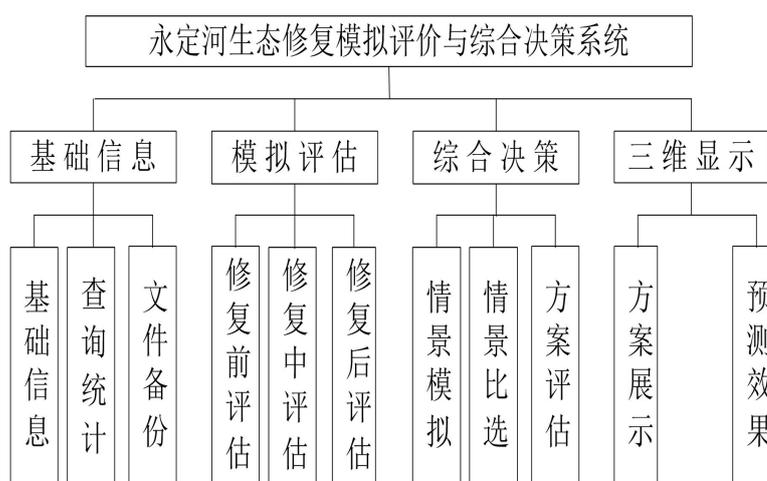


图 3.1 决策系统逻辑结构

Fig.3.1 Logic Structure of the Decision System

该系统是一个多目标、多层次，集评估、模拟、比选等功能于一体的决策系统。综合考虑了永定河多种功能之间的协调以及生态系统平衡的基本要求，模拟预测不同生态修复方案和可用技术措施组合情况下的生态修复效果及所需资金。根据规划方案投资、目标及相关约束条件进行综合比选，合理提出治理工程方案，提高永定河生态修复的管理决策能力。系统主要分为四个功能模块，即基础信息、模拟评估、综合决策与三维显示。

基础信息模块是为用户提供对永定河空间地理信息的综合分析和查询功能，并提供对模拟评估模型和综合决策模型中的参数设置和计算支持。模拟评估模块提供对永定河修复前、修复中、修复后的目标区域的综合评价功能；同时对于修复的区段进行不同水量（清水和再生水）配比模拟评估，优化可调整的修复工程，以及进一步提高永定河生态修复的效果。综合决策可以让用户根据修复目标选择相应的决策目标、决策变量及限制条件，建立合理的决策模型，根据模型来产生不同的决策情景方案。通过对不同情景方案进行模拟评估、情景比选、专家综合评估，最终比选出科学、合理的决策情景方案，为永定河将来规划生态修复的区域提供决策支撑。

三维显示主要是为用户提供便捷、直观的数据分析展示和结果的可视化输出。所以在数据库体系指标选取中，必然需要考虑系统功能需求，为其提供有效的数据支撑。

针对回灌补给到河道不同类型的水资源水质不同，可能会污染当地地表水，甚至会发生水体富营养化。同时河道入渗后可能会对当地的地下水资源造成二次污染，因此必须要保证地表、地下水资源的水环境安全。为满足不同生态健康的基本需水量，同时能够提供绿色健康的水体景观，构建健康和谐的休闲空间环境，在不破坏永定河流域生态系统的条件下，从观赏性、适应性、安全性及方便管理等角度来构建生态多样性，保持永定河流域的生态平衡，提高河流的生态服务价值，这是所要达到的生态修复目标。与此同时，在对永定河进行生态修复过程中，必须要考虑人、财、物等因素，优化其生态修复条件的配置，达到已有条件下的最佳修复效果。因而本文研究中，对永定河生态系统及其修复状况的评价以及要实现的修复效果，所要实现的三个目标即水环境目标、生态环境目标、社会经济目标，这是对永定河进行生态修复的意义所在，在数据库指标体系构建中这是首要考虑的因素及需求。

3.2 基于“压力-状态-响应”模型的指标选取

指标体系的建立在数据库构建中占有极其重要的地位，根据评价目的和需求，本文采用压力-状态-响应（Pressure-State-Response, PSR）模型来建立一个全面实用，可以指导永定河生态修复的相对完善的指标体系。

压力-状态-响应(PSR)模型是 1979 加拿大统计学家 Rapport 和 Friend 提出来的，体现了人与自然环境间的相互作用关系，在 20 世纪八九十年代由经济合作与发展组织和联合国环境规划署共同发展起来的用于研究环境问题的框架体系^[37]。人类在自然环境中获取各种生存发展所必须的资源，但其各种活动却向环境排放了大量废弃物，对环境质量及自然资源产生了负面影响。与此同时，自然环境的不良反应又会影响人类的社会经济活动，此时人类社会会通过一些行为或者意识如环境经济政策等来解决这些不良反应带来的系列问题。如此反复，形成了自然和人类社会间的压力-状态-响应关系^[38]。该模型有压力、状态和响应 3 类指标，其中压力指标是人类的社会经济活动对环境产生作用的表征，如人类向大自然索取资源，排放废弃物，物质消耗等对环境造成的破坏和干扰。状态指标是用来表征环境变化及环境现状的，如生态自然环境和生态系统健康现状等。响应指标是指人类社会、个体的社会活动对环境产生的负面影响的恢复和前期预防，以及对已经出现的生态环境问题采取补救措施进行修复等^[38]。永定河生态修复和构建，首先要分析产生对永定河流域

地区产生压力来源和类型；然后针对这些压力所产生的影响是什么(状态)，引起哪些危害和风险等问题；针对这些影响采用相应的措施来修复、治理和保护生态环境，促进其良性循环发展，建立人与自然和谐的友好环境。因此，建立永定河生态系统评价指标体系，要全面真实衡量永定河生态系统的状态水平以及可持续发展的能力，评价指标的选取必须具有相当的完备性和代表性，以便能够综合地反映影响永定河生态系统发展的各种因素。

永定河生态系统的压力来自自然灾害及其人类活动产生的作用，由经济、社会和自然多方面的压力构成；永定河生态系统的结构、功能状况与动态特征用来表征整个流域的生态系统状态；响应指标是对永定河生态环境问题处理和改善永定河生态系统健康状况的反应；压力、状态、响应三方面相互联系构建出永定河生态系统的压力-状态-响应模型^[39] (如图 3.2)，形成了对永定河进行生态修复的指标体系框架 (见表 3.1)。

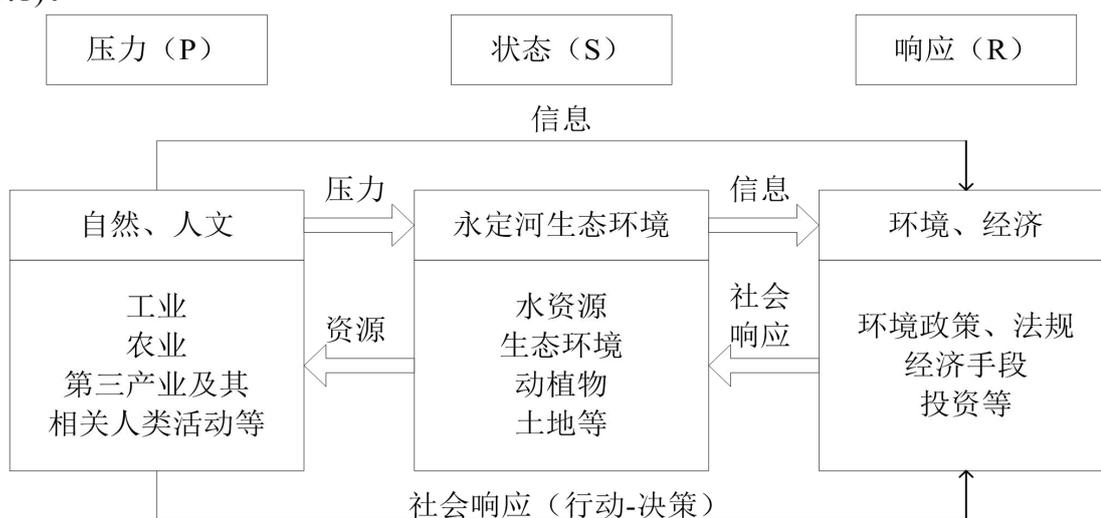


图 3.2 永定河生态系统的 PSR 模型

Fig 3.2 The Yongding River Ecosystem PSR Model

(1) 压力指标的选取

“压力”指标是永定河生态环境变化的驱动力，影响生态环境质量的重要因素。鉴于永定河的特殊地理位置及其社会经济地位，压力主要为自然因素和人为因素，包括气候条件，自然灾害，人类对永定河生态系统的社会经济活动及其资源的利用等。

(2) 状态指标的选取

生态系统状态是各种生态因子随时间相互耦合综合反映出来的，是生态系统所反映的一种趋势。本文以永定河流域内的社会、经济与环境三者间的相互作用为机

理依据，考虑 PSR 模型中三要素间的关联，从水环境、生态环境、社会经济三个角度来确定对永定河进行生态修复所需要考虑的系统指标。

(3)响应指标的选取

当永定河生态环境恶化或者生态系统结构受到人类社会活动的干扰破坏时，人类社会需做出一定的反应来改善和恢复永定河的生态环境质量，防止永定河的生态环境继续退化。其响应程度的大小主要由人类对生态环境保护、修复的投入（人、财、物、力等）来反映，主要体现在修复的力度、公众的参与度、生态修复工程方案的实施状况、景观文化等方面。

表 3.1 永定河生态修复指标框架

Table 3.1 Yongding River Ecological Restoration Indicator Framework

指 标		解 释
压 力 指 标	气候条件、自然灾害、社会经济、资源利用	主要包括当地地形地貌、平均气温、降水量、水资源补给量及类型、行政区划、人口密度、旅游业产值、GDP、土地资源利用率、水资源利用率、资源开发利用程度等影响因素
	水体富营养化	回灌补给再生水，造成河道、湖泊水体富营养化
	地表水综合污染风险指数	回灌补给再生水，造成对地表水源的污染
状 态 指 标	地下水水质污染综合风险指数	回灌补给再生水，入渗到地下的造成地下水源的污染
	地下补水量	河道水资源回灌补给地下生态环境所提供的需水量
	绿地覆盖率	绿地面积越大，生态多样性越好，生态越健康
响 应 指 标	水面恢复率	水面面积越大，水环境越健康
	生态服务价值	生态修复主要考虑的是构建人与自然和谐的环境，修复后生态环境的生态服务价值越大越好
	生态修复工程建设费用	采取合理高效的修复工程进行生态修复，修复工程(包括水质净化工程等)从安全性、可靠性、稳定性、高效性等方面进行建设和投资
	维护管理运行费用	对建设的工程运营维护和管理等

3.3 指标体系及其在评价目标中的应用

在借鉴中国科学院大学水系统安全研究中心《永定河生态修复模拟评价与综合决策系统》已有研究成果基础上，基于“压力-状态-响应”模型选取的永定河生态修复指标框架，决策系统功能模块的数据需求，以及所要实现的水环境目标、生态环境目标以及社会经济目标，永定河以人工补水形式进行修复的工程特性、人工修复力度等，选取建立永定河生态修复数据库的指标体系如图 3.3 所示：

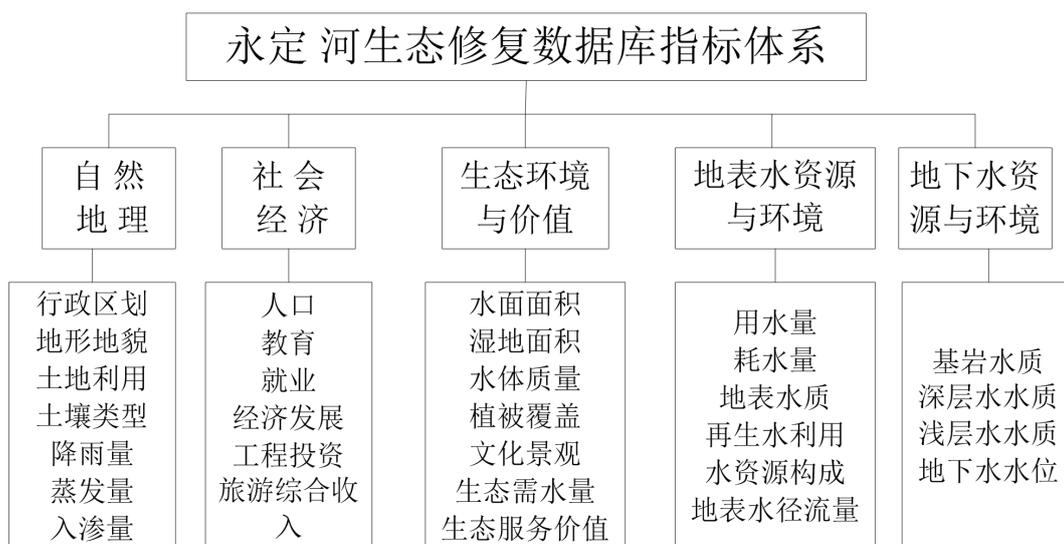


图 3.3 永定河生态修复数据库指标体系

Fig 3.3 The Yongding River Ecological Restoration Database Indexes

这些指标值为决策系统的功能模块提供数据支撑，对永定河的生态系统及修复状况进行评价，主要应用于实现水环境目标、生态环境目标以及社会经济目标模型的计算中。

3.3.1 水环境目标

(1)地表水水质综合污染风险指数^[51]

① 计算公式：

$$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n P_i, \quad P_i = C_i / S_i \quad (3.1)$$

其中 P 表示综合污染指数； P_i 表示第 i 种污染物的污染指数； N 为污染物的种类； C_i 为第 i 种污染物实测浓度平均值（单位：毫克/升，或个/升）； S_i 为第 i 种污染物评价标准值（单位：毫克/升，或个/升）。

② 风险级别

表 3.2 风险级别

Table 3.2 Risk levels

风险级别	严重污染风险	重度污染风险	中等污染风险	轻度污染风险
P	10≤	5≤~<10	1≤~<5	<1

(2)地下水水质综合污染风险指数

地下水污染风险指数进行风险表征可分为单因子污染风险指数评价和综合污染风险指数评价两种^[51]：

① 单因子污染风险指数：

根据模拟期的模拟预测值计算污染风险指数，计算方法如下：

$$R_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (3.2)$$

式中： R_i -地下水中第 i 种污染物的污染风险指数，无量纲； C_i -地下水中第 i 种污染物的模拟浓度平均值，mg/L； S_i -各价值水平下地下水标准浓度，mg/L。

② 综合污染风险指数

针对不同污染源，选取不同的典型污染组分进行分析，求取典型污染组分的平均污染风险指数。

$$R_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i$$

(3.3)

其中： R_n —地下水 n 种污染物的综合污染风险指数，无量纲； n —研究区内污染物总数

③ 风险指数分级

表 3.3 风险指数分级

Table 3.3 Risk index classification

风险级别	严重污染风险	重度污染风险	中等污染风险	轻度污染风险
R	10≤	5≤~<10	1≤~<5	<1

(3)湖泊水库富营养化计算

采用卡尔森营养状态指数 (TSI) ^[41] 来计算综合营养状态指数:

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot TLI(j) \quad (3.4)$$

其中: $TLI(\Sigma)$ 表示综合营养状态指数; W_j 表示第 j 种参数的营养状态指数的相关权重;

$TLI(j)$ 代表第 j 种参数的营养状态指数。单个营养状态指数计算式为:

$$\left. \begin{aligned} TLI(chla) &= 10(2.5 + 1.086 \ln chla) \\ TLI(TP) &= 10(9.436 + 1.624 \ln TP) \\ TLI(TN) &= 10(5.453 + 1.694 \ln TN) \\ TLI(SD) &= 10(5.118 - 1.94 \ln SD) \\ TLI(COD_{Mn}) &= 10(0.109 + 2.661 \ln COD_{Mn}) \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

其中: $chla$ 单位为 mg/m^3 , SD 单位为 m ; 其它项目单位均为 mg/L 。

依据范围富营养化程度有贫营养、中营养、富营养、轻度富营养、中度富营养和重度富营养, 分级方式如下所示^[51]:

表 3.4 水质类别与评分区域

Table 3.4 Water Quality Categories and Rated Value

营养状态分级	评分区域 TLI (Σ)	定性评价
贫营养	$0 < TLI(\Sigma) \leq 30$	优
中营养	$30 < TLI(\Sigma) \leq 50$	良好
(轻度) 富营养	$50 < TLI(\Sigma) \leq 60$	轻度污染
(中度) 富营养	$60 < TLI(\Sigma) \leq 70$	中度污染
(重度) 富营养	$70 < TLI(\Sigma) \leq 100$	重度污染

3.3.2 生态目标

(1)生态服务价值

采用线性规划方法, 将永定河生态系统服务价值计算模型设为目标函数, 土地利用类型面积为决策面积。因此, 生态服务价值计算公式为:

$$Y = 26108.5X_1 + 2709.4X_2 + 1613.9X_3 + 179185.1X_4 + 664X_5 + 2061100 \quad (3.6)$$

其中 X_1 为林地面积； X_2 为草地面积； X_3 为耕地面积； X_4 为水面面积； X_5 为其他面积； Y 为永定河生态系统服务总价值为； X_i 单位为 km^2 ， Y 单位为万元（模型来自中国农业大学课题组）。

(2) 地下水水位抬高

① 地下水入渗量

$$\begin{cases} Q = \frac{H_{\text{湖深}} + M_{\text{防渗层厚度}}}{M_{\text{防渗层厚度}}} \times S_{\text{湖面积}} \times K_{\text{防渗系数}} \quad (\text{防渗}) \\ Q = \frac{H_{\text{湖深}} + H_{\text{包气带厚度}}}{H_{\text{包气带厚度}}} \times S_{\text{湖面积}} \times K_{\text{包气带垂直渗透系数}} \quad (\text{不防渗}) \end{cases} \quad (3.7)$$

② 地下水水位抬高

根据永定河回灌补给会造成当地地下水位抬高，因此需要对当地地下水位抬高进行风险评估和预测。隆起高度用来作为地下水位抬高的评价指标，用 S_w 表示：

$$Q = 1.366 \times K \times \frac{(2H_0 + S_w)S_w}{\lg\left(\frac{R}{r_w}\right)}$$

(3.8)

其中影响半径： $R = r_w + r$ ， $r_w = \sqrt{F/\pi}$ ， $r = 10 \times S_w \sqrt{K}$

进而可得：

$$Q = 1.366 \times K \times \frac{(2H_0 + S_w)S_w}{\lg\left(\frac{\sqrt{F/\pi} + 10 \times S_w \sqrt{K}}{\sqrt{F/\pi}}\right)}$$

(3.9)

由此关系可求得 S_w ，其中， F 表示湖的面积； r_w 表示湖的半径； K 表示渗透系数； H_0 表示初始水位； S_w 表示地下水位抬高值； R 表示影响半径。

③ 地下水浓度计算公式：

$$C_{\text{地下水浓度}} = \frac{Q \times C_i}{Q + 2 \times r_w (L - r_w) \times P \times t \times \lambda} \quad (3.10)$$

其中， Q 为入渗量， P 为降雨入渗量， λ 为入渗率， L 为湖至设定目标点的距离。

(3) 地下补水量

地下补水量主要是指通过湖底、溪流和绿地入渗到地下对地下水资源的补给量。具体数学关系如下：

$$\text{地下补水量} = \text{湖底入渗} + \text{溪流入渗} + \text{陆地入渗} \quad (3.11)$$

$$\text{湖底入渗} = \frac{H_{\text{湖深}} + M'_{\text{湖防渗层厚度}}}{M'_{\text{湖防渗层厚度}}} \times S_{\text{湖面积}} \times K'_{\text{湖防渗系数}} \quad (3.12)$$

$$\text{溪流入渗} = \frac{H_{\text{溪流深}} + M''_{\text{溪流防渗层厚度}}}{M''_{\text{溪流防渗层厚度}}} \times S_{\text{湖面积}} \times K''_{\text{溪流防渗系数}} \quad (3.13)$$

$$\text{陆地入渗} = S_{\text{绿地}} \times Q_{\text{年降水量}} \times \lambda_{\text{降水入渗率}} \quad (3.14)$$

(4) 水面覆盖率

水面覆盖率是水面覆盖面积占河道总面积的大小（水面覆盖面积是指人工补水后在河道中溪流和湖泊中水面面积的大小）。因此，用水面覆盖作为评价生态修复的评价指标：

$$\text{水面覆盖率} = \frac{S_{\text{水面面积}}}{S_{\text{永定河总面积}}} \times 100\% \quad (3.15)$$

3.3.3 社会经济目标

(1) 生态修复建设工程费用 C_C

主要包括湖泊建设费用 $C_{\text{清水}}$ 、溪流建设费用 $C_{\text{再生水}}$ 、绿化面积建设费用 $C_{\text{绿化面积}}$ 、供配水管线费用 $C_{\text{人工湿地}}$ 、堤岸生态修复费用 $C_{\text{堤岸生态修复}}$ 和其它工程费用 $C_{\text{其它净化工程}}$ 等，根据当地的市场价值计算得到：

$$C_C = C_{\text{湖泊}} + C_{\text{溪流}} + C_{\text{绿化面积}} + C_{\text{供配水管线}} + C_{\text{堤岸生态修复}} + C_{\text{其它工程}} \quad (3.16)$$

(2) 维护管理费用 C_M

主要包括人工管理费用 $C_{\text{人工管理}}$ 、管理运营电费 $C_{\text{电费}}$ 、再生水水费 $C_{\text{再生水}}$ 、清水水费 $C_{\text{清水}}$ 、混合水水费 $C_{\text{混合水}}$ 和其他费用 $C_{\text{其他}}$ 等，根据当地的市场价值计算得到：

$$C_M = C_{\text{人工管理}} + C_{\text{电费}} + C_{\text{清水}} + C_{\text{混合水}} + C_{\text{其他}} \quad (3.17)$$

4 永定河生态修复空间数据库设计与实现

目前很多的生态修复数据库应用面较窄，不仅仅指标较少，而且在数据库设计时，直接将指标映射到数据库表结构，指标与数据库表一一对应。尽管这些数据都是系统所需要的，但是这种方式导致数据库表的数量随指标的加入而急剧膨胀，系统的维护成本很高，而且数据库不具有扩展性。鉴于这种不足，本文在对永定河生态修复数据进行分析及系统需求的基础上，从数据组织及数据库指标建立方面入手，提高永定河生态修复数据库的扩张性及实用性。数据库的构建流程如下所示：

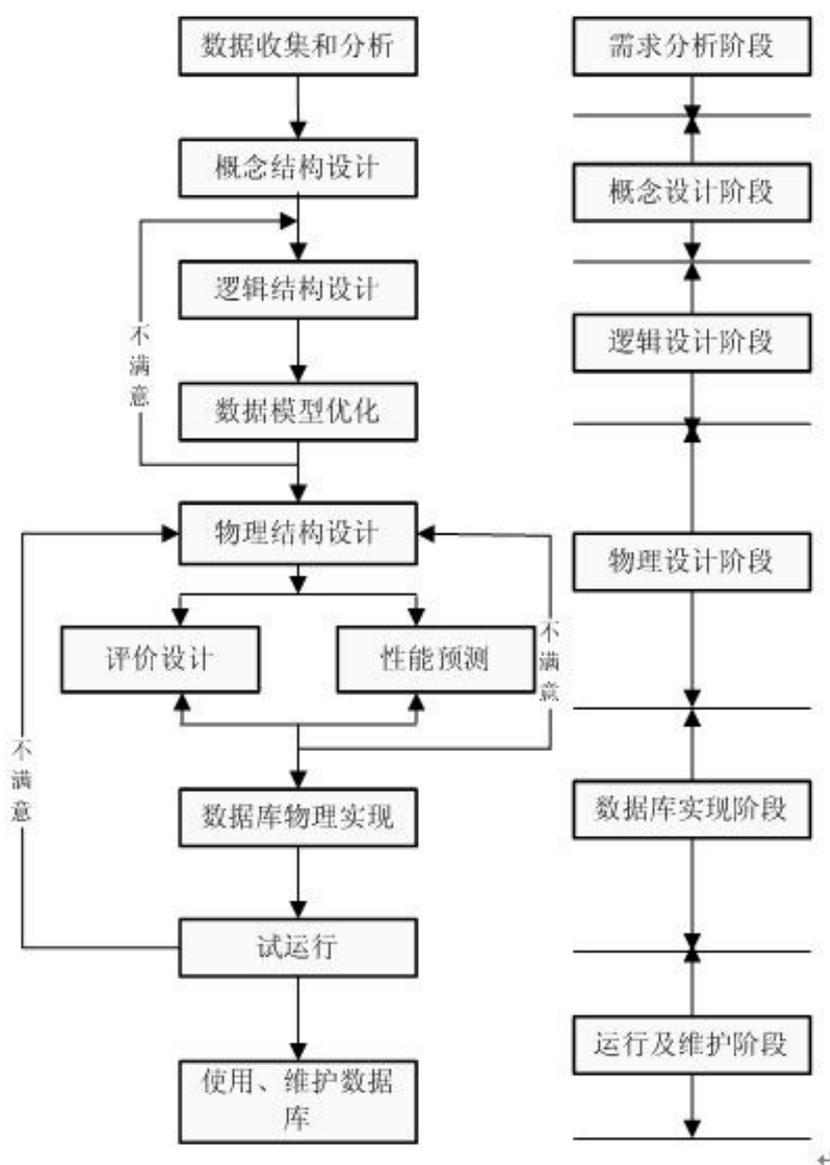


图 4.1 数据库建立流程图

Fig 4.1 Flowchart of Creating Database

4.1 数据库及 GIS 技术在永定河生态修复中的应用

空间数据库^[33]是一定空间范围内具有地理特征要素数据集合，具有时空特性，数据的特征随时间和空间变化。这些数据量大且类型来源多样，空间参考系和文件格式也不同，需要进行图幅拼接、投影转换、统一文件格式、删除冗余字段、修改拓扑错误等不同程度的处理，可以利用关系型数据库来统一存储管理这些数据。

但是利用空间数据库怎么来存储、管理复杂数据，能够支持各种空间运算及分析，怎么才能让用户在不知道数据的存储结构、状态的情况下能快捷的访问所需要的数据，这是采用空间数据库技术来组织存储空间数据所必须要考虑和解决的问题^[34]。空间数据引擎 ArcSDE 是在关系数据管理系统（RDBMS）中实现存储和管理多用户空间数据库的中间件，起到了连接桥梁的作用^[35]。Esri 的 ArcSDE 具有海量数据存储、多用户并发访问、版本管理、长事务处理等强大优势^[36]。提供 MapInfo、AO 等的接口来实现空间数据的前台展现与后台数据库的相连，既可在前台对数据进行图形展示，又能实时的修改后台数据库，提高了在 Oracle 中对空间属性数据进行高效率操作的服务质量。ArcSDE 以层的方式来管理空间数据，以 Oracle 中的组合表来存储管理属性数据，并利用空间数据的要素标识码来建立空间属性数据间的关联，从而把地理空间数据与属性数据统一地集成在关系数据库中，进行统一而有效的管理。

在河流生态修复的数据中，有多源、多尺度的各类空间数据，包括不同比例尺的矢量、栅格影像数据，各种经济统计数据，现状及实时监测数据等。针对永定河生态修复数据的特点、系统和用户的需求，以及相关技术的优势，本文采用 Esri 的空间数据引擎（ArcSDE）结合关系数据库（Oracle）的方式对空间与属性数据进行一体化的存储管理。对于属性数据，可直接在 Oracle 中创建属性数据表，完成数据库各数据基表记录的加载；对空间数据，通过空间数据引擎 ArcSDE，将大量的空间数据导入并存储在 Oracle 中，并把 GIS 的线性参考和动态分段技术应用到数据组织及数据库构建中。

4.2 数据收集与处理

(1)地理数据资料收集：研究区的基础地理数据，主要通过网络下载，协作单位提供，购买各种出版地图进行扫描数字化等各种渠道收集整理得来。永定河流域北京段基础地理信息数据，包括永定河流域北京段范围、永定河主流、支流、水面、断点、行政区等数据，如 1:10 万，1:25 万地形数据，1:100 万中国土壤数据库等。

(2)遥感数据：永定河流域的遥感数据主要通过购买影像及本教研室的历史积累数据组成。永定河流域北京段遥感影像套图，选用六期遥感数据。把收集到的数据资料进行融合校正处理，投影到统一的坐标系中，本文中采取北京 54 坐标系，中央经线 117° 来规范标准化地理数据。

4.3 数据需求分析

永定河生态修复工程是一项极其复杂的系统工程，生态修复过程中所面临的生态、环境、社会、经济等各方面的挑战，对生态修复效果具有极其重要的影响。同时地表、地下、生态等数据量大，用户希望通过高效、快速的计算机处理能力，来对生态修复进行模拟、评价和决策。此外，如何对永定河生态修复制定科学的决策方案进行合理规划，指导永定河的生态修复建设，是当前决策管理者所面对的关键问题。文中的空间数据库是基于课题开发的永定河生态修复模拟评估与综合决策系统所构建，在满足用户需求的同时还得满足系统的数据需要。为实现决策支持系统对永定河生态修复前后的生态环境能够进行综合评估，指导工程建设及优化工程布局，同时对将来要规划的修复区段能够进行情景方案的模拟和评估等提供数据支持。

本文依据河流生态修复的多目标、多层次、多约束性，以水环境、生态环境、社会经济作为永定河生态修复所要达到的修复目标，选取对应的评价指标及约束条件构建一个空间数据库，主要数据源包括基础地理信息数据、水资源数据、生态环境及修复工程数据、实时模型数据等，主要有：

(1)矢量数据，包括：研究区域地理信息、土地利用及变化信息、研究区生态修复后效果信息，其他信息等。

(2)少量永定河流域遥感影像数据。

(3)数字高程模型（DEM）数据。

(4)元数据，是各种数据自身的描述数据，包括研究区域空间数据库元数据、DEM 元数据、遥感影像数据元数据等，为文本数据。

(5)其他相关数据，包括数据清单列表、各研究成果包括、取样数据等。

上述数据，空间数据都为 WGS-84 坐标系，矢量数据的格式为 ArcGIS shp 格式；影像数据为 ermaper ecw 格式；DEM 为 grid 格式；文本数据位.txt 格式；照片数据格式为 tiff；其他文本数据位 word(doc)、xls、pdf 等。对主要数据组织分类如表 4.1 所示：

表 4.1 永定河生态修复基础数据

Table 4.1 Basic Ecological Restoration Data of Yongding River

大类	子类	格式	说明
基础地理数据	境界线	.shp	北京市区县分布
	交通	.shp	流域境内交通路线
	土壤类型数据	.shp	土壤类型数据
	植被类型数据	.shp	植被分类数据等
	水系数据	.shp	河流/湖泊空间数据
	流域土地利用数据	.ecw	流域土地利用情况
	地形图数据	.shp	河流基础地形图
	遥感影像数据	.tif	河流遥感影像图
	DEM 数据	.dem	数字高程图
	CAD	.dwg	工程图
水资源数据	水资源数据	.xls	水量、需水量等
	水文特征	.xls	水位、水雨情数据等
	水环境质量数据	.xls	水质数据等
生态环境及修复工程数据	生态环境现状信息	.xls	植被、生物多样性等
	生态环境修复信息	.xls	生态服务价值等
	生态修复工程	.xls	修复工程、费用等
实时数据	在线监测	.xls	实时更新交互数据
专业参数	数学模型及公式	.xls	公式及模型参数

基础地理数据指的是有空间地理信息的数据，包括各种地图数据、遥感影像、DEM 数据等。这些数据以图形化要素集存在，每一要素都是一个独立的图层，并具有相同的参考坐标系，通过 ArcGIS 以图形化的方式表现出来，用户可以直观的了解这些地理信息所处的位置及空间分布情况。

水资源数据包括各种监测站的观测数据及永定河流域的相关基础信息，是最基础的数据资料，包括降雨量、水位、流量，其原始存储格式往往是 csv 文件、txt 文件或是 excel 文件。这种传统文件方式存储散乱，不利于数据的管理维护及应用。因而将这些数据按照规范化的数据模型存储在关系数据库 Oracle 中，便于统一管理与查询检索。

数学模型在永定河流域决策支持系统中是不可或缺的一部分，模型调用中需要运用到各种参数，并将模拟中调用的各种参数存储到相应的数据库表中，决策系统通过调用模型库中的基础模型和组合模型来搭建并进行计算和运用。

4.4 数据库指标体系结构分析

在已有的生态修复系统应用中，基本上都是针对特定领域的特定问题进行设计、开发、使用的。所涉及的指标是生态修复相关指标的一个子集，对这些指标及其数据进行管理，并据此进行综合分析处理，为用户提供信息资料。但这些应用系统的指标都是特定的相关集合，想要扩展这些指标集，必须改变数据表结构。即使系统管理的生态指标有重叠，重叠部分的重复建设也会造成不必要的代价；而且不是同一数据体系结构下的，系统数据都不易于共享。

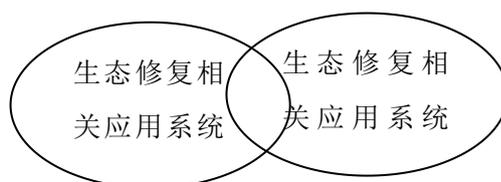


图 4.2 不同应用系统间的重叠

Fig 4.2 Overlap between Different Application Systems

为解决这样的问题，就需要研究分析出河流生态修复指标间的关联，将关联作为数据库结构设计的依据。当添加新的指标时，只需添加新的数据记录而不需改变数据库表结构。这样能使得指标体系的扩展、调整通过系统自身的功能来实现，而无需再重复构建新的数据库，这种自扩展性无需再次设计、开发系统，称为自扩展。采用自扩展的方式可满足生态修复过程中任意指标变化，使得河流生态修复领域采用一致的数据库表结构，也实现了数据共享。

在本文指标体系构建过程中，采取自上而下的五个级别，即：河流生态修复组分、指标集、指标、观察项、观测层次，各层次间的相互关系如下示例：

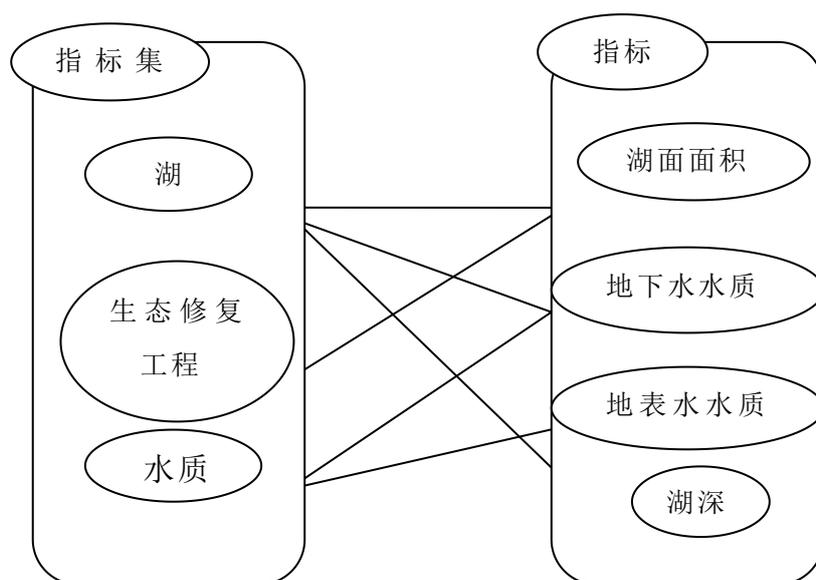


图 4.3 指标集到指标的多对多映射

Fig 4.3 Many-to-many Mapping of Index Set to Index

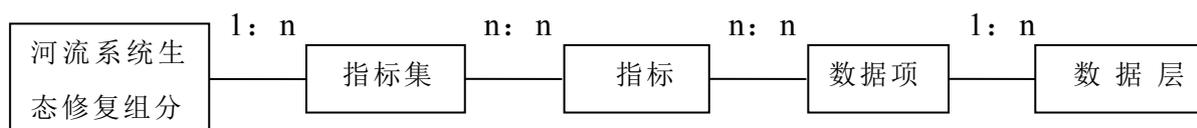


图 4.4 指标体系各级别间的联系

Fig 4.4 The Relation of different levels of Index System

在永定河生态修复研究必须需建立完整的可量化指标体系才能满足决策系统的数据需求，在遵循完整性、可行性、准确性等原则的前提下，还得保证这些指标的选取及关系构建能在实际应用中发挥作用。本文通过对指标体系分级、定义各级间关联而确立指标关系集，建立指标间的归属、约束关系。

4.5 数据库逻辑结构设计

4.5.1 永定河生态修复空间数据库体系结构

根据用户及决策系统整体功能模块的需求，通过采用关系数据库、海量数据管理、GIS 线性参考与动态分段等技术，组织分析由各种数据集集合组成的数据源，也可以同时存储矢量数据集集合，构建的数据库体系结构如图 4.5 所示：

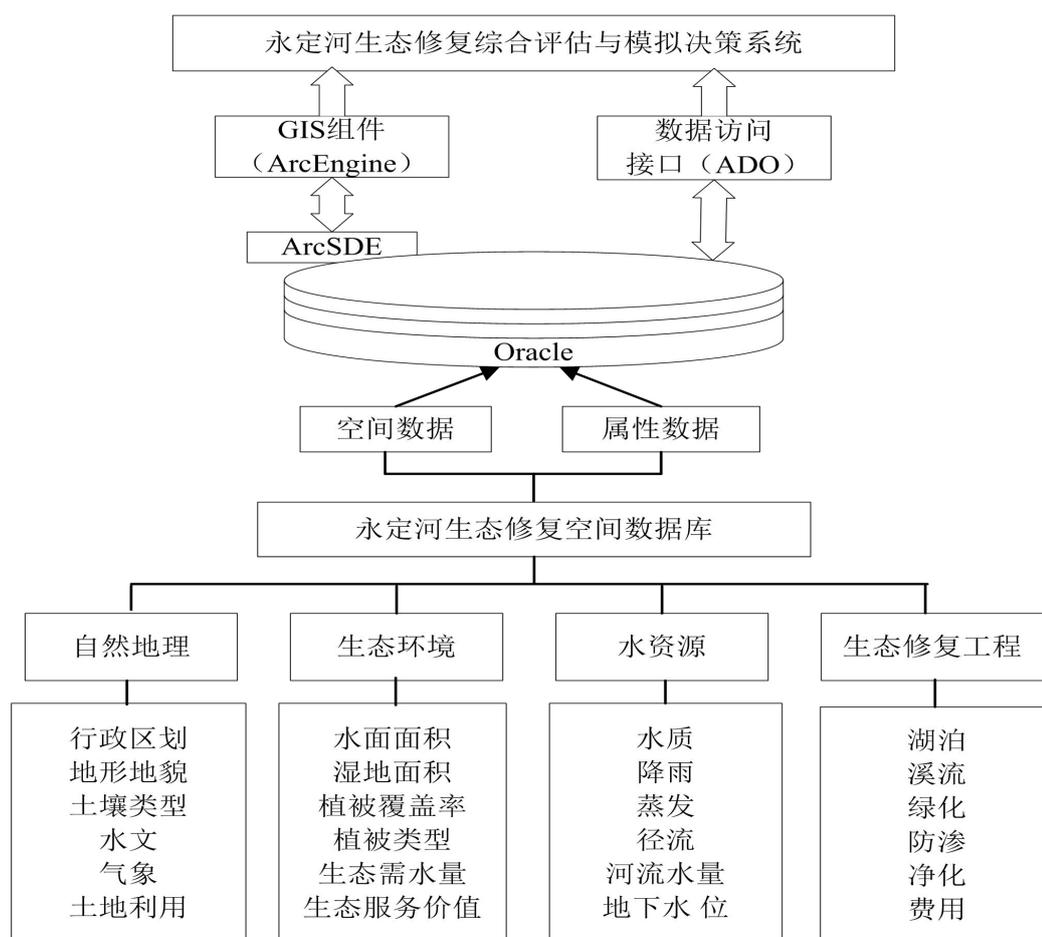


Fig 4.5 The Database Architecture

在对永定河生态修复相关数据组织分类基础上，建立数据库的指标集合-指标-观测项结构，以自然地理、生态环境、水环境、生态修复工程为指标集合，每个指标集合下又包含若干指标，每个指标集下包含若干观测项，如指标集合水资源包含水质、降雨等指标，而水质又包含温度、pH 等监测项。在相关规范、标准及原则指导下，采用数据库、中间件、GIS 及相关技术，以 ArcSDE 作为空间数据进出 Oracle 的通道，由 Oracle 来统一存储管理空间属性数据。应用程序通过 GIS 组件（ArcEngine）与数据库访问接口（ADO）访问数据库，并以 ArcGIS 地图形式动态展示提取的河流区段信息，从而为永定河生态修复综合评估与综合决策系统提供数据支持。

4.5.2 属性数据表结构设计

河流生态修复的属性数据包括描述河流特性的数据和描述河流相关的数据等，可以数据表形式把相关的属性数据组织关联起来。永定河的生态修复依据河流的自

然属性进行分段修复，每段具有不同的特性，在设计中需综合考虑不同段的各种特性来确定修复工程方案，这就需要通过有效的设计来组织相关的数据信息，以方便的查询显现方式为工程方案的确定提供有效的辅助。本文依据河流生态修复中的业务数据需求特性，以及动态分段中数据关联特性，以河段的里程为线性参考来动态获取相关数据信息，建立属性数据的逻辑结构关系。在这一结构图中并为将系统的数据表全部列出，只是为了说明系统数据的层次关系，选取一些比较重要的信息表，系统数据库表关系结构设计如图 4.6 所示：

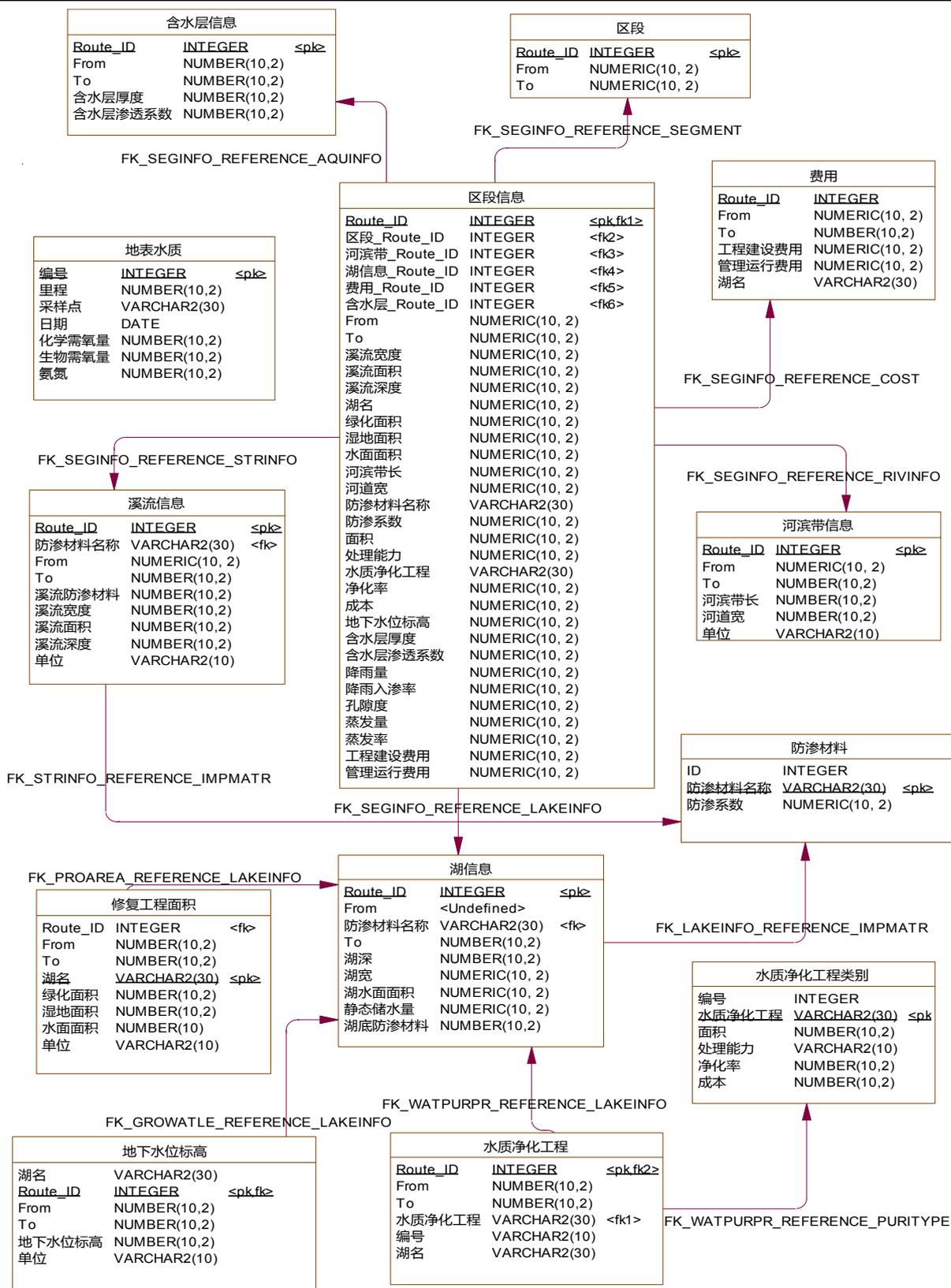


图 4.6 永定河生态修复数据库表结构关系

Fig 4.6 The database tables' structure relationship

注：1) 箭头-参照关系；2) pk-主键；3) fk-外键；4) Route_ID-路线编号；5) From-起点里程；6) To-止点里程

在本数据库表中，凡是包含字段 From 与 To 的都是与里程相关的关系表，存储一些与空间位置相关的数据信息。一般的数据表主要是通过外键来建立表间关联，但是在河流生态修复中，一般的外键参照关系无法完全建立表间的关联，需要在应用端通过程序代码来建立表间关系，获取所需的数据信息。在永定河生态修复中，依据选取河段的起始点位置，与河段本身的功能区间段进行比较，确定是否按比例取值，或是依据权值获取重叠部分的数据信息。如永定河本身依据功能分区为平原段、城市段、郊野段，但在动态选段获取信息时，很有可能所选段落落在平原、城市、郊野任何两段间，要获取跨区段的信息，仅依据表间关系通过简单的 SQL 语句难以获取所需信息，需用扩展的 PL/SQL 过程化 SQL 语言把对数据的操作和查询语句组织起来，通过逻辑判断、循环等实现复杂的操作。采用过程化 SQL 语言的意义有：

(1)模块化程序，减少代码开发量：传统的表，主要是通过主外键关系来建立表间关联，由于河流生态修复数据间关系的复杂性，仅仅依据主外键关系是无法完全获取所需数据信息的，应用程序需要大量的代码来提取信息。而通过 PL/SQL 语句把所有表的操作模块化，程序的分析 and 执行完全在数据库内部进行，在永定河生态修复模拟与综合决策系统开发过程中只需发出调用 PL/SQL 的执行命令即可，大大减少了系统代码开发量。

(2)提高运行性能，调用更快：把 PL/SQL 语句块嵌入到应用程序，数据交互是在数据库内进行的，大大提高了应用程序响应速度，提高了运行性能。

(3)数据库具有扩展性：永定河生态修复空间数据库的逻辑结构也能应用于类似的需建立线性参考、分段评估的河流生态修复中，如潮白河、北运河等，只需更改河段的具体数据信息或是增加新的数据关系表，而不需更改表结构。

(4)数据可实时更新：通过设计对应的表结构与关联，能够实时存储永定河在线监测系统数据。

4.5.3 线性参考及动态分段技术

(1)线性参照系统的建立

河流生态修复的属性数据包括描述河流特性的数据和描述河流相关的数据等^[42]，通过线性参考系统把所有的数据关联起来，并抽象成线性参考中的事件，即点事件和线事件。在修复工程中，把永定河分为上、中、下三段，文中选取官厅山峡、三家店、卢沟桥、梁各庄作为整个河流的分段点。把各区段的所有属性抽象成点事件和线事件，并基于同一线性参照系统以数据表形式组织入库存储。在每个数据表中都包含三个特殊字段即线路编码，起点里程值，止点里程值，它们分别表示一条

属性记录所对应的河流路线编码及在河流上的位置。通过这三个字段可建立各数据表间的关联，且能够实现属性数据记录与其描述河段的关联，它们在线性参照系中的关系如图 4.7 所示：

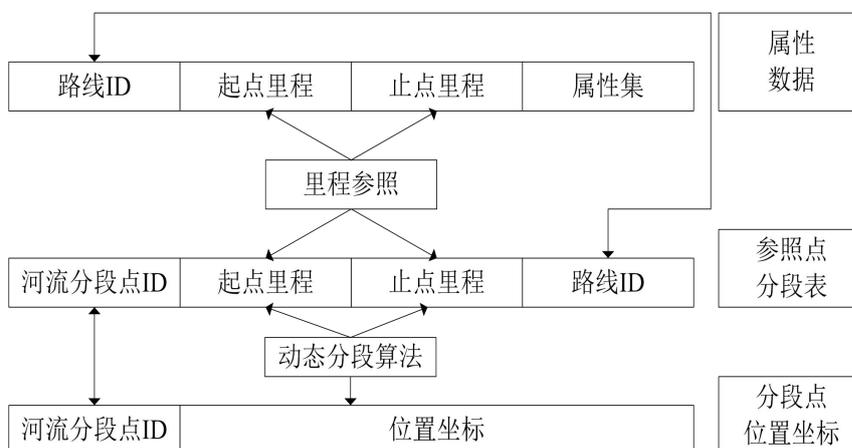


图 4.7 线性参照关系示意图

Fig 4.7 Relationship diagram of linear reference

线性参照系统和参照点是实现动态分段的关键^[31]，然后通过动态分段算法就能计算出相应属性数据集的分段位置并动态显示信息。为便于说明，选取永定河生态修复中几组属性数据进行分段，并以线性投影覆盖形式在河段上表示，如图 4.8 所示。其中以永定河功能分区点官厅山峡、三家店、卢沟桥及梁各庄，作为线性参考系建立过程中对路径事件进行校准的参照点。不同里程范围内的数据信息都投影到属性集合表中，该表是一个实际上并不存在的虚表，即数据库里的视图。为清楚描述属性集合表内不同里程范围内的属性信息，将其分别列入动态分段属性投影表，如表 4.2 所示。

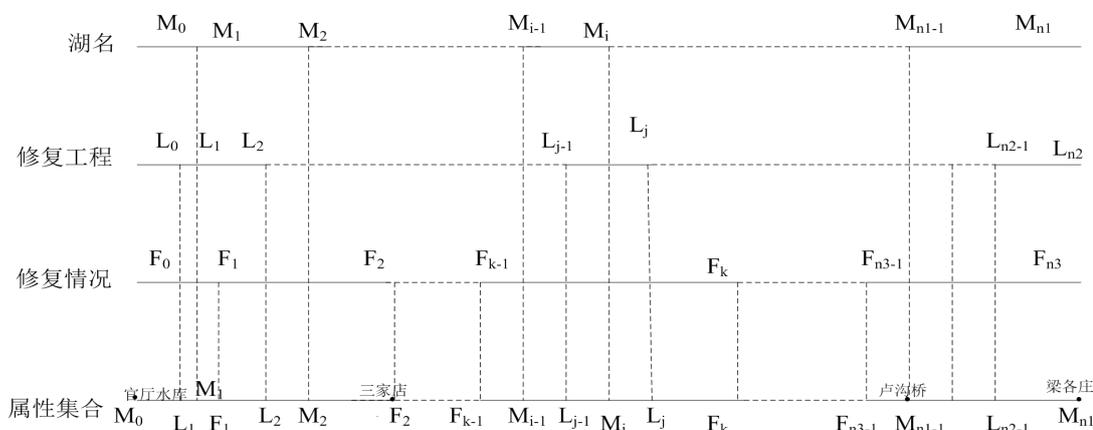


图 4.8 动态分段示意图

Fig 4.8 Diagram of dynamic segmentation

表 4.2 动态分段属性投影表

Table 4.2 Attribute projection table of dynamic segmentation

河流编号	起点里程	止点里程	湖名	修复工程	修复情况
11101	M_0	L_1			修复前
11101	L_1	M_1			修复前
11101	M_1	F_1			修复前
11101	F_1	L_2			修复前
11101	L_2	M_2			修复前
...
11101	F_{k-1}	M_{i-1}	门城湖	人工湿地	修复后
11101	M_{i-1}	L_{j-1}	莲石湖	人工湿地	修复后
11101	L_{j-1}	M_i	莲石湖	人工湿地	修复后
11101	M_i	L_j	园博湖	人工浮岛	修复中
11101	L_j	F_k	圆博湖	人工湿地	修复中
...
11101	F_{n3-1}	M_{n1-1}	晓月湖	水生植物	修复后
11101	M_{n1-1}	L_{n2-1}			修复前
11101	L_{n2-1}	M_{n-1}			修复前

(2)动态分段的实现过程

由于在动态选取河段时，需查询显示的数据信息较多，且获取信息是一个复杂的过程，因此可在属性数据表入库过程中建立一个视图表，把动态分段过程中投影形成的属性集合表中的数据存入视图表中。这样该视图就成为一个经动态分段技术处理后的复杂查询结果集，类似于从各个基本表中获取数据后的组合表，这样再进行查询操作时，直接查询视图即可，简化了对数据的操作，提高了查询显示速度。在动态选段时，依据选取河段的起、止点里程值，与线性参照系统中已有里程点值进行快速匹配，生成一个选段范围，然后从视图表中获取选段信息并进行显示。具体的数据处理流程如图 4.9 所示：

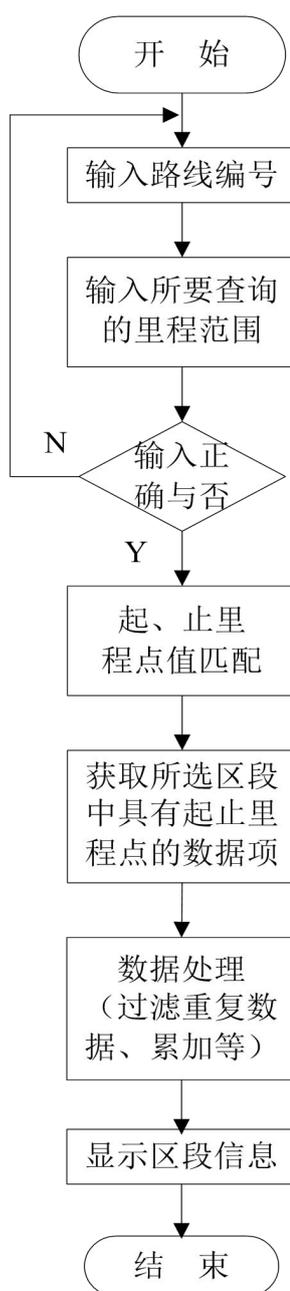


图 4.9 动态获取数据流程图

Fig 4.9 Flowchart of getting data dynamically

(3)线性参考及动态分段的应用

充分利用线性参考和动态分段技术是本文数据组织及空间数据库构建的核心与优势，以线性参考为主，并适当结合传统平面坐标的方式，解决了以 X、Y 坐标形式对事件进行存储，提取信息不方便的先天性不足问题，大大减少了数据的存储量。而且以 X、Y 为坐标的二维坐标系统只具有静态特性，而类似河流的这种线性要素常常具有动态特性。通过构建一维的线性参考系统，采用动态分段方法，能根据需求将河流进行逻辑分段，保证了信息的完整存储与灵活提取，并在永定河生态修复中解决了工程中的实际问题。现以一实

例来说明该方法提取信息时最明显的优势，如图 4.10 所示：

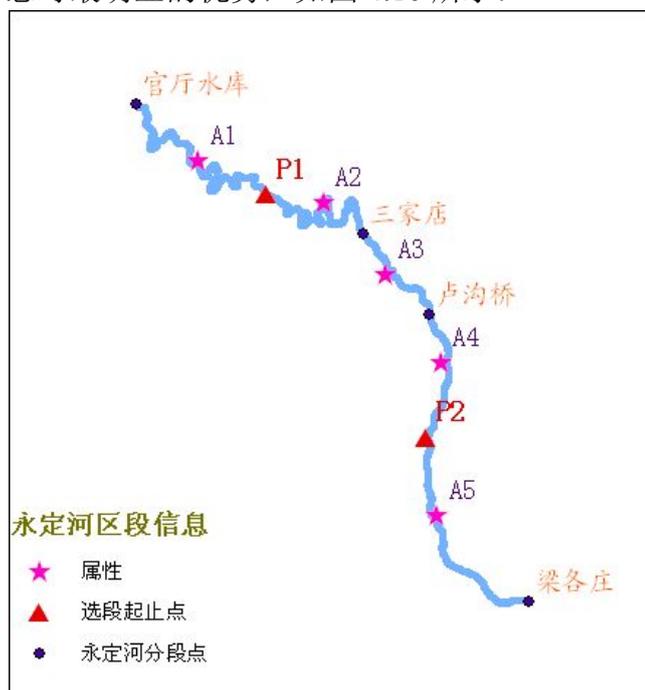


图 4.10 永定河区段信息

Fig 4.10 Segmentation information of Yingding River

设 P1 点坐标为 (X_1, Y_1) ，P2 点坐标为 (X_2, Y_2) ，提取永定河数据信息的区间段为 (P_1, P_2) ，其中 M1 为区段 (P_1, P_2) 的起点里程值，M2 为终点里程值，图 4.10 中的 A1、A2、A3、A4 及 A5 分别为永定河不同区段的数据信息，即线性参考中点事件或线事件。传统方式要获取区段 (P_1, P_2) 的信息，只能根据 X、Y 坐标来获取具体位置的某个属性，即只能获取点事件信息而无法获取线性事件信息，要完整获取所选区段内的信息，不仅数据的存储量非常的大，而且数据提取过程也是非常繁琐的。而通过建立一维的线性参考系，和动态分段技术把起止点里程值 M1, M2 与各属性如图 4.10 中 A1, A2, A3, A4, A5 的起止里程值进行比较与匹配，则能同时获取 (P_1, P_2) 整个区段内的信息，包括点事件和线事件，有效的提高了数据信息获取的速度及完整性，同时还方便灵活。

此外采取动态分段的方式，并没有根据对象的属性数据集对河流进行真正的分段，而是在需要进行分析与查询时，动态分段显示各种属性数据集的信息。其灵活的查询方式，可把河段的某些空间属性与其线性特征直接关联起来，并且在应用端提取数据信息时，大大减少了程序代码编写量。如在获取永定河所选区段信息的过程中，通过所选区段的起止点里程值，依据起止点相对距离对永定河进行动态的逻辑分段。这样能够动态的计算出属性数据的空间位置进行区段信息的显示与分析，而不需写大量代码来实现动态分段技术所实现的功能，提取信息的过程方便灵活且速度快。

4.6 空间属性数据入库实现与集成

永定河生态修复中涉及大量的属性及空间数据，通过对数据进行组织分类后，对属性数据直接以数据表形式存入 Oracle 数据库。而地理空间数据，大部分是以矢量或栅格图层形式存储在地理信息系统 ArcGIS 中，为了能够实现 GIS 数据与一般属性数据的统一存储，可利用空间数据引擎 ArcSDE 把空间数据以图层表的形式存储于 Oracle 中，各表通过唯一要素标识码建立关联而获取图层完整的信息，并能通过查询操作获得空间位置上的其他属性信息。本文列举一个矢量图层（YDWatershed）存入 Oracle 的过程：

(1)用 SDE 命令把矢量数据入库，建立 YDWatershed 图层：

```
shp2sde -o create -l YDWatershed, shape-f E:\YDHRelated\YDHBASIC  
\YDWatershed.shp-i sde:oracle10g -g 600,3000,10000 -e a+n -a all -u YDH -p YDH
```

对其参数进行说明：

-o create（参数）建立一个新层

-l YDWatershed 所建层名，shape 类型

-f E:\YDHRelated\YDHBASIC\YDWatershed.shp 入库路径

-g 600,3000,10000 索引网格大小-e a+n 输入 shp 的类型（a+n 为面）

-a all 所有的地物都要载入

通过此法实现把空间要素存入 Oracle 中，生成名为 YDWatershed 的图层表，并能通过 B 表、F 表，S 表间的关联来获取 YDWatershed 在 ArcGIS 以图层形式存储时的数据信息。

(2)采用 ArcSDE 的压缩二进制存储方式来存储栅格影像数据，通过创建影像金字塔不仅能提高搜索与传输速度，还能节省存储空间^[43]。

(3)当数据量较小时，可以通过在 ArcCatalog 中建立 sde geodatabase，选择需要的文件（如 shp 文件）批量导入到 sde geodatabase 中，在 Oracle 用户下也能获取相关数据信息在相应的用户下通过图层要素表获取相应数据信息。

在永定河生态修复相关数据入库过程中，使用空间数据引擎 ArcSDE 作为空间数据进入 Oracle 的通道，而属性数据可以数据表的形式直接存入 Oracle 中，实现了由 Oracle 来统一存储管理空间属性数据。同时利用 Oracle 的高效管理与查询功能，也提高了数据的访问速度与海量数据存储管理的效率，更易于查询与获取永定河不同地理位置区段的数据信息。ArcSDE 也解决了 Oracle 中空间数据与应用程序的接口问题，实现了多用户并发访问同一类数据，保证了两种数据类型的无缝集成^[44]。

空间数据引擎 ArcSDE 结合关系数据库 Oracle 的模式，并利用 GIS 的线性参考与动态分段技术，很好的解决了空间与属性数据的分开存储管理问题。使得数据能被更充分的利

用与共享，较好的解决了 GIS 应用与空间位置相关数据的提取与访问的瓶颈问题，是一种比较可行的方案。不仅从理论上保证了数据的完整性和数据的共享性，从实际上也为永定河生态修复模拟评价与综合决策支持系统提供更为完整的数据支撑。

4.7 物理结构设计

4.7.1 安全性

权限用于决定授权用户对数据和地理数据库执行何种操作，应根据所执行的工作类型来分配。ArcSDE 是否安全完全依赖于 Oracle，任何用户（包括 SDE），需要 Oracle 用户密码才能访问空间数据，而 ArcSDE 本身不保存任何认证信息^[45,47]。在 ArcSDE 空间数据库中，依据权限管理级别有 SDE 用户和 Oracle 用户，SDE 用户是空间数据管理员，而 Oracle 用户是除 SDE 用户外的一般用户，可对数据进行编辑、浏览等。根据数据应用需求及安全性，采用分级用户设置，对不同用户赋予不同的数据访问权限，只有通过密码验证才能进入系统，按照本身所具有的使用权限进行数据操作。

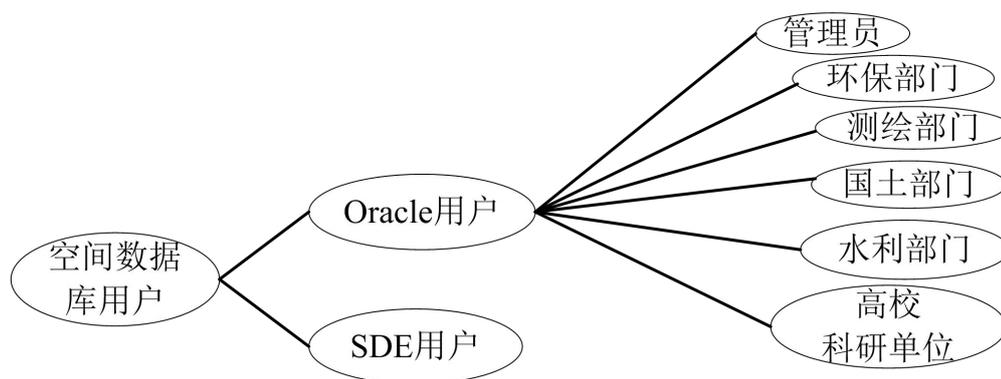


图 4.11 用户权限管理

Fig 4.11 User privilege management

Oracle 系统用户下创建 6 个普通用户，分别命名为管理员、测绘部门、水利部门、环保部门、国土部门、高校、科研单位，与 ArcSDE 空间数据库建立连接，由 Oracle 对所有数据进行存储管理。管理员为一级用户，可以对永定河生态修复空间数据库中所有的数据进行管理与维护；测绘部门、水利部门、环保部门、国土部门、高校、科研单位为二级用户，根据所在部门职能分工授予不同的数据访问权限，每个用户都能看到整个数据库当前数据状态，但不能对未授予权限数据进行任何操作。虽然不同的用户管理的数据集类型及个数不同，但是每个用户都可以看到所有的数据集，可以知道目前整个数据库中的数据状态，但不能对非赋予权限的数据进行任何操作，数据集里面的要素类是受权限控制的。这种利用角色管理员来管理不同用户，保证了每个用户只能在自己的权限范围内使用系统和

操作数据，使系统的保密性得到保障^[48]。

4.7.2 数据的维护及更新

要实现对数据完善的更新，不仅要保证数据库能保存历史数据已恢复过去任意时刻的数据，还要能够实时获取数据，并对数据库进行更新维护^[49]。对永定河生态修复空间数据库维护，主要是对数据库的数据结构、数据关系、GIS 数据等进行维护。数据结构维护通过对数据库表中系统描述表的修改，建立新的数据结构，并维护数据表内及数据表间的数据关系，将分散采集、录入的数据汇总到完整的数据库中。永定河生态修复空间数据库可以根据系统及用户需求进行数据表关系的动态修改，通过设计一个描述数据库表结构的表把这属性表管理起来，查看各个表结构、字段、数字类型等。这种可扩展的建库的思想，使得数据库更为灵活，共享性更高^[46,51]，可是适应新的变化需求。

5 永定河生态修复空间数据库的应用

永定河生态修复空间数据库是基于永定河生态修复模拟评估与综合决策系统平台构建起来的，为决策系统辅助管理与规划设计人员制定修复工程方案提供数据支撑。整个系统在逻辑上分为 4 个模块，各个模块以构建的空间数据库为中心组织在一起，数据库与各子模块的关系如图 5.1 所示：

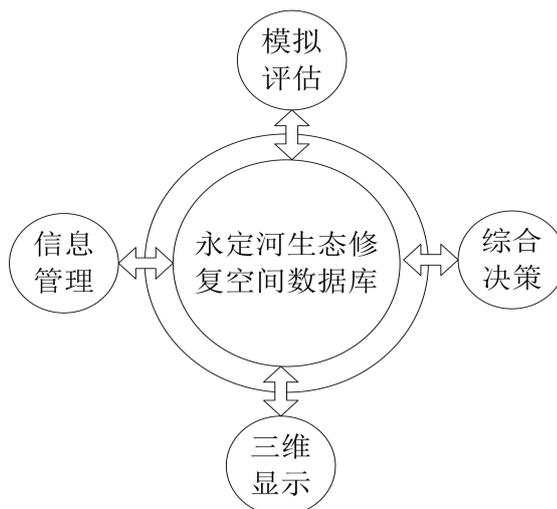


图 5.1 数据库-模块关系图

Fig 5.1 Diagram of database-modules

用户可从基础信息子模块中查询浏览永定河流域的自然地理信息、水文地质参数、水质、生态修复工程等各类信息，并进行备份与恢复；在模拟评估模块中，动态选取永定河的修复段，从数据库中获取相关数据信息，依据评价指标（如富营养化、水质综合污染风险指数、水面覆盖率、生态服务价值、费用等）进行综合评估，获取河段修复前、中、后的状态信息，并进行修复效果的对比。综合决策子模块能对未来规划修复区域的工程方案设计进行辅助决策，对未修复区段建立决策模型，构建情景方案，并依据约束条件对情景方案进行比选，最后通过专家评估决出较优的情景方案，作为修复工程实施的建设性方案，并对修复效果进行三维显示。

5.1 模拟评估模块

永定河生态修复的效果主要以实现的水环境目标、生态目标和社会经济目标程度来评估，其中包含了各种评价指标，如富营养化指数，地表水水质污染风险指数，地下水水质污染风险指数，地下水入渗量、地下水位抬高、地下水补给量、水面绿地覆盖面积、生态修复工程费用、维护费用等。除此之外，还需要大量的支撑信息，

如修复区段的地理属性信息，包括以人工方式修复的门城湖、莲石湖、宛平湖、晓月湖、园博湖的信息，永定河的水量值以及评估模型中的各种参数等。对永定河生态修复状况进行模拟评估的数据信息都来自所构建的永定河生态修复空间数库，数据库基础数据信息如图 5.2、5.3 所示：

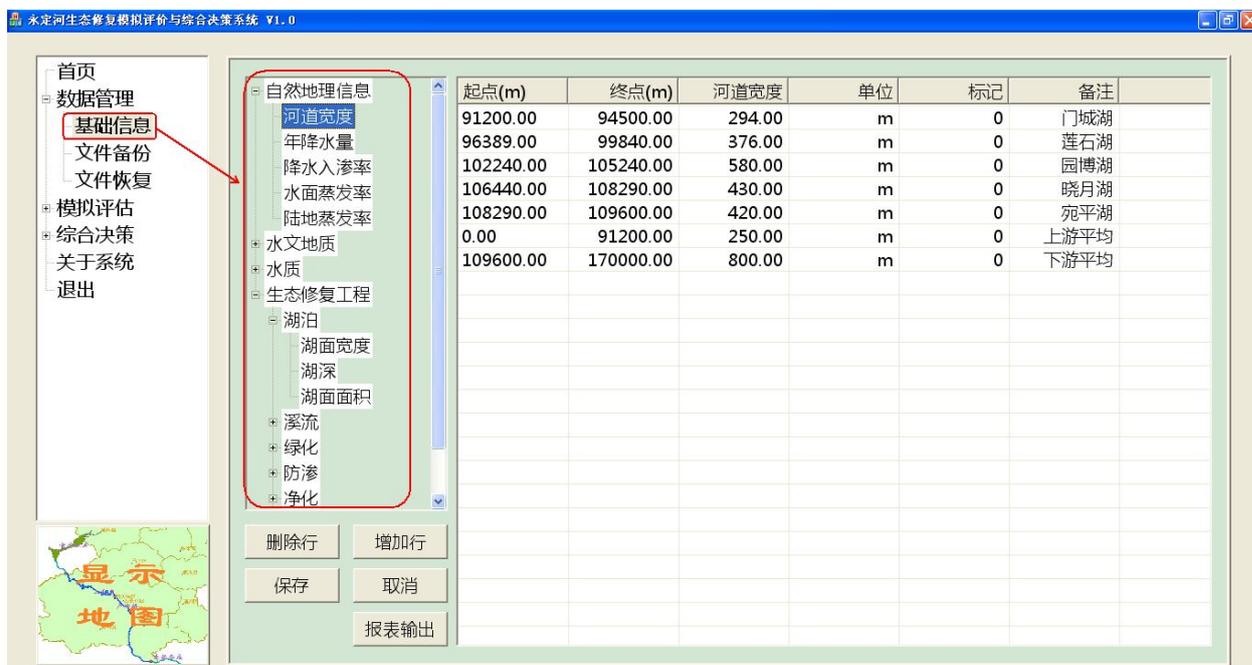


图 5.2 数据库属性信息

Fig 5.2 Database attribute information

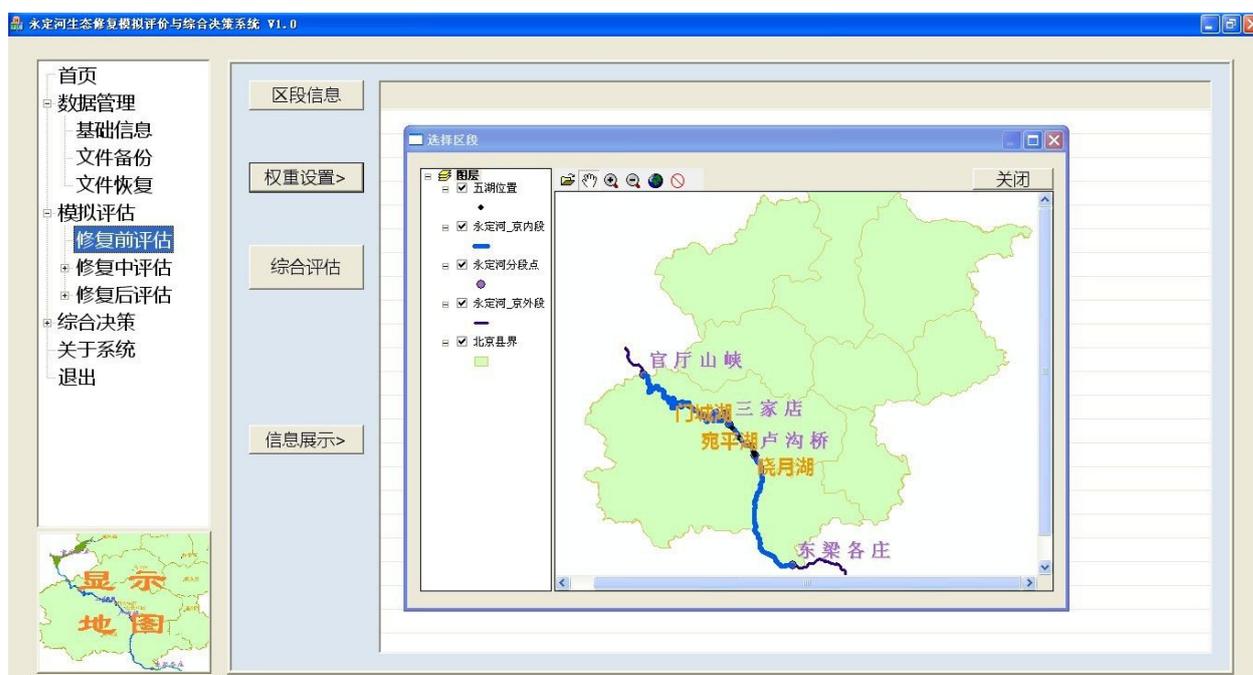


图 5.3 数据库空间信息

Fig 5.3 Database spatial information

文中选取永定河当前已治理修复的 14.2 公里在决策系统中进行修复前、修复中、修复后的模拟评估。对当前修复工程方案实施的效果进行评估，进一步优化和改进现有方案，实施高效安全的技术措施，使得永定河生态修复的效果最佳，达到健康良好的生态环境修复效果，建立人与自然友好和谐的空间环境。

5.1.1 区段选择

选取三家店—卢沟桥（主要包括“四湖一线”），长约 14.2 公里，如下图所示：

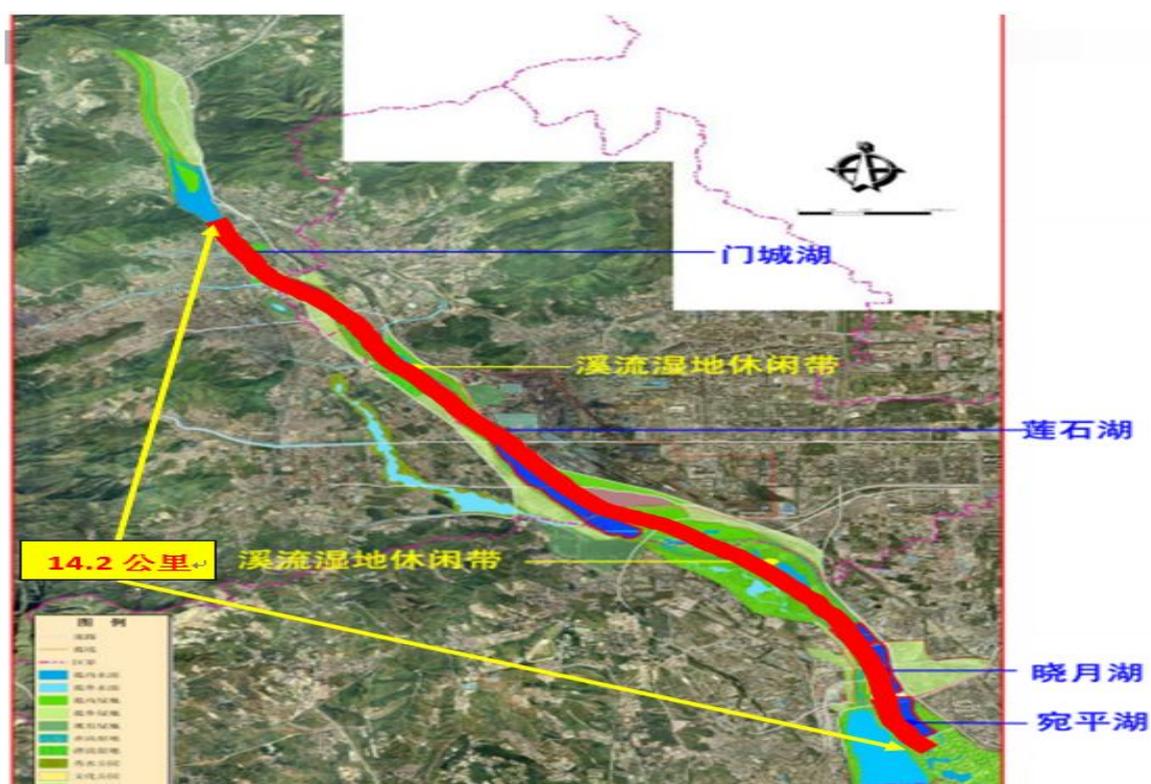


图 5.4 选取的修复区段

Fig 5.4 Repaired sections selected

永定河生态修复空间数据库存储了大量区段的地理信息，并能以绘制的地图形式展现选取的区段信息，如下图所示：

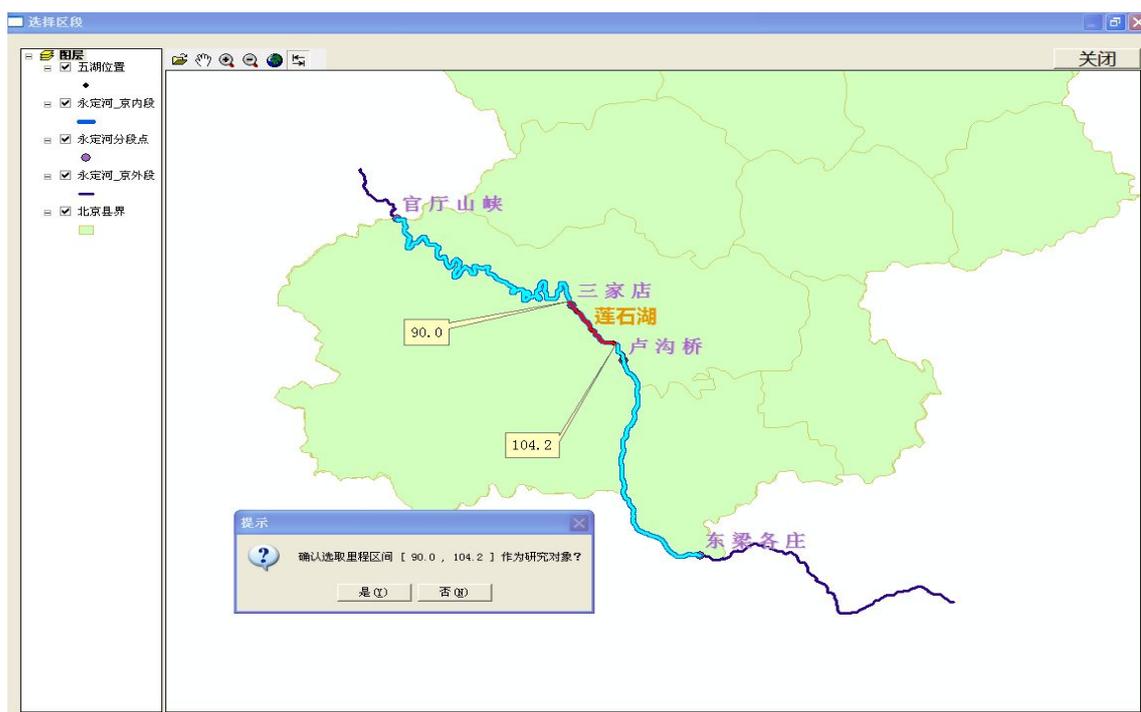


图 5.5 区段信息展示

Fig 5.5 Repaired sections' information showed

5.1.2 修复前评估

修复前评估主要是针对三家店—卢沟桥（主要包括“四湖一线”）区段 14.2 公里未修复之前的现状进行综合评估。以是否有人工干预为标准，假设修复前没有任何人工修复，永定河河道干涸无水、生态植被严重退化。修复前的水环境目标、生态目标、社会经济目标都未实现，因而选取的评价指标如水面覆盖率、绿地覆盖率、地下水补给量、地下水位抬高和生态服务价值等在数据库中的数值都为 0，评估结果如图 5.6 所示。



图 5.6 修复前评估值

Fig 5.6 Assessment data before repaired

5.1.3 修复中评估

修复中评估主要是针对三家店—卢沟桥（主要包括“四湖一线”）区段 14.2 公里当前已经施工，生态修复工程已初步建成（包括河道已回灌补水、河道内乔灌草植被已初步修复完成等），但水质净化工程（人工湿地、人工浮岛等）措施还未建成运行条件下，对该区域段进行综合评估。永定河生态修复空间数据库为修复中的模拟评估提供更多的评估参数值，包括富营养化、地表水综合污染风险指数、地下水综合污染风险指数、水面覆盖率、绿地覆盖率、地下水补给量、地下水位抬高、生态服务价值、生态修复工程费用等，为计算实现水环境目标、生态目标、社会经济目标的程度提供数据支持服务。

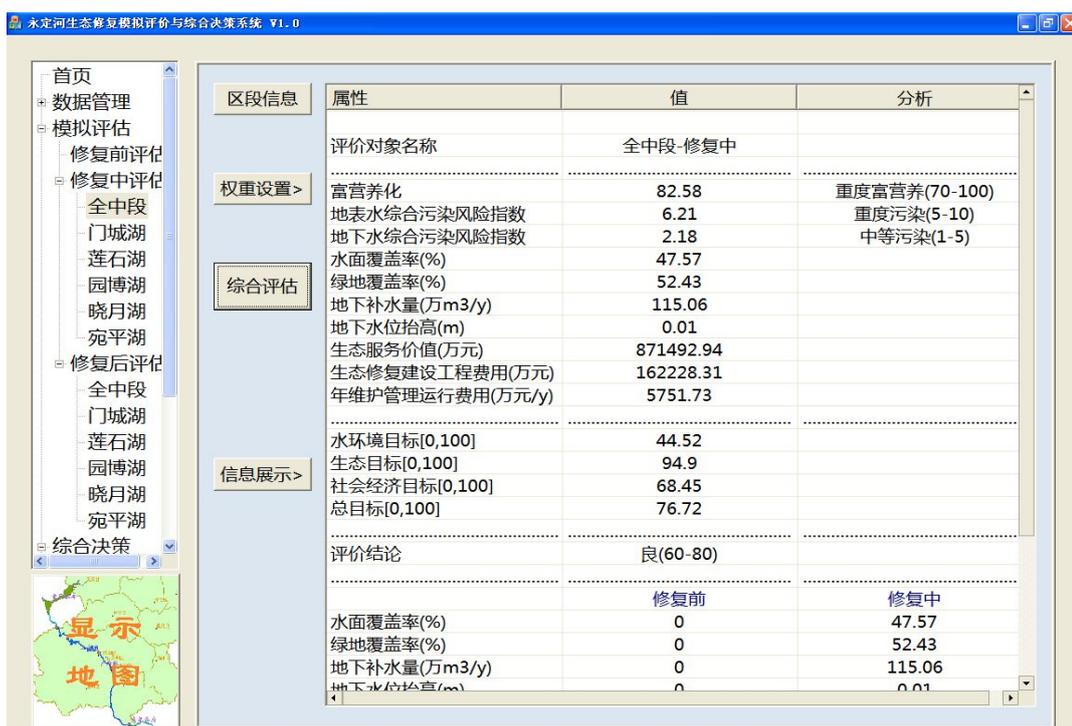


图 5.7 修复中综合评价值

Fig 5.7 Assessment data in repairing

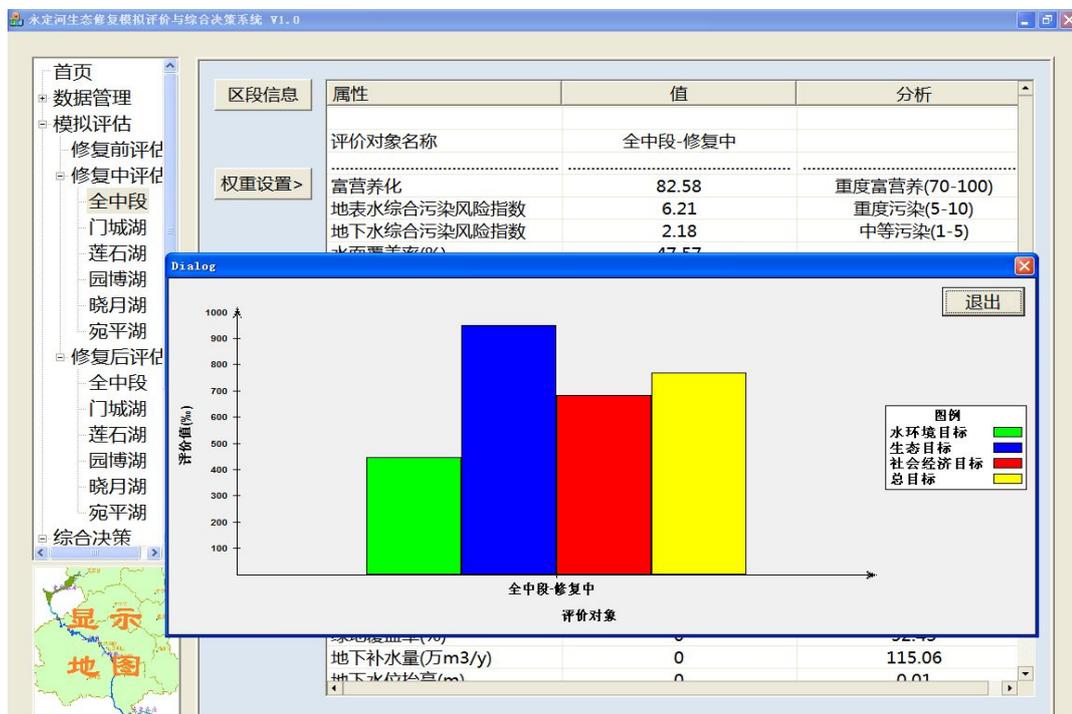


图 5.8 修复中评估值图示

Fig 5.8 Graphical display of assessment data in repairing

修复中水质净化工程和人工湿地工程未完全建成运行，河道水质较差，容易产生富营养化；修复中对河道和湖底采取了防渗减渗措施，减少了河道内地表水渗

漏造成对地下水的污染；同时修复中绿地和水面都得到了恢复，生态环境得到了一定的改善。

5.1.4 修复后评估

修复后评估主要是针对三家店—卢沟桥（主要包括“四湖一线”）区段 14.2 公里，生态修复工程（包括河道已回灌补水、河道内乔灌草植被已达到规划设计预期目标等），水质净化工程（人工湿地、人工浮岛等）措施也已建成并运行条件下，对该区域段修复效果进行综合评估。永定河生态修复空间数据库为修复后提供的参数信息，都是为了评估水环境目标、生态目标以及社会经济目标的实现程度。



图 5.9 修复后评估值

Fig 5.9 Assessment data after repaired

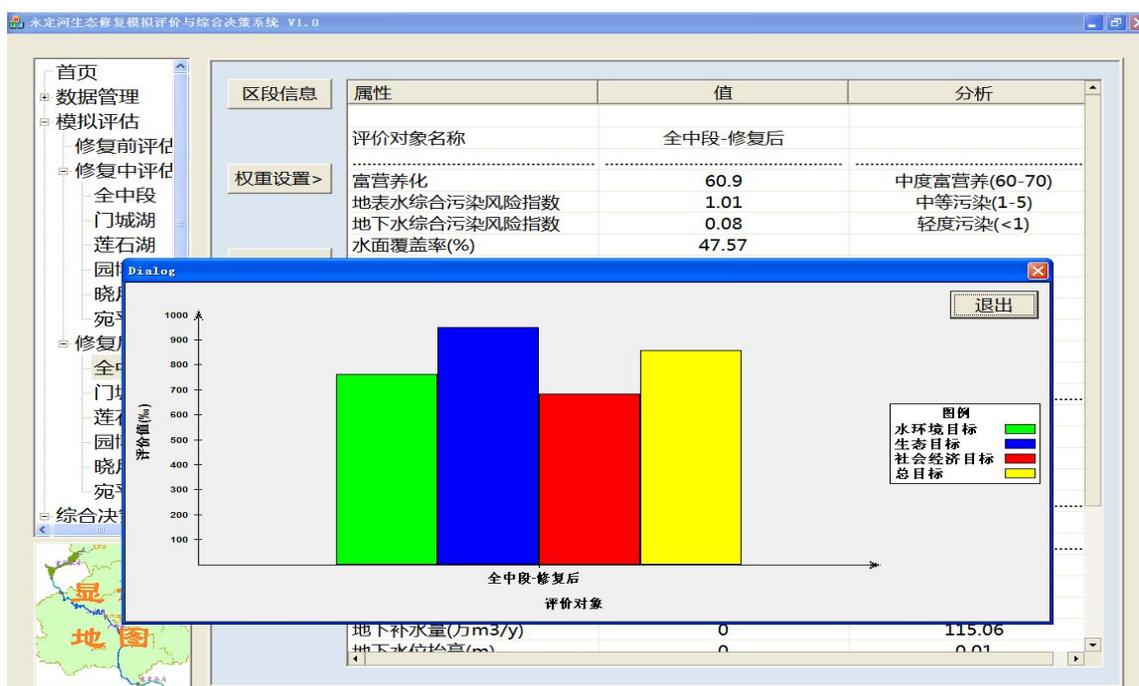


图 5.10 修复后评估值图示

Fig 5.10 Graphical display of assessment data after repaired

由于水质净化工程和人工湿地工程完全建成运行，修复后河道水质得到改善，水环境质量显著提高；修复后对河道和湖底采取了防渗减渗措施，对地下水影响得到有效控制；同时修复后绿地和水面修复效果显著改善，达到永定河生态修复预期效果和目标。

5.1.5 评估结果分析

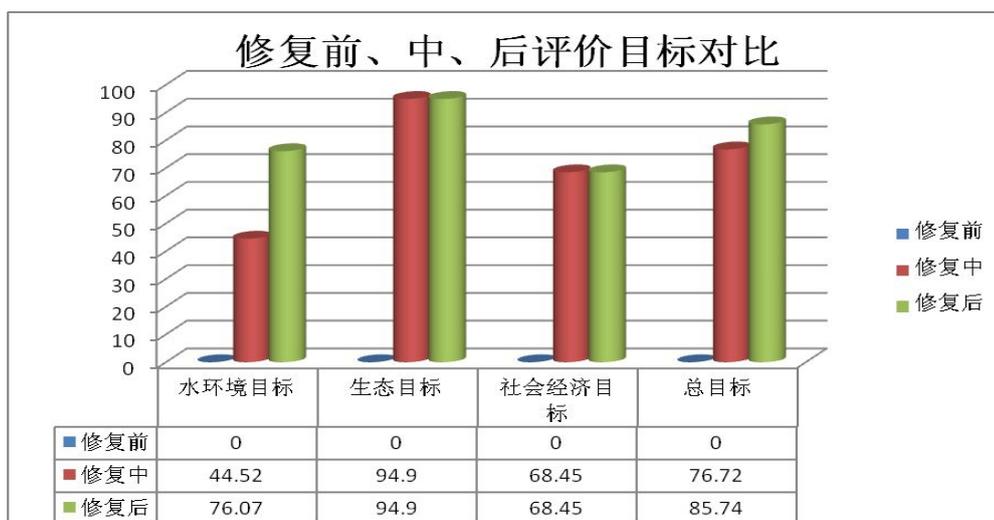


图 5.11 综合评价目标结果对比

Fig 5.11 Results contrast of comprehensive evaluation target

通过对比修复前、中、后所评估的目标值，可以看出修复后通过实施水质净化工程和建立人工湿地工程，永定河水环境得到显著改善，生态目标、社会经济目标比修复前显著增加，生态修复所带来的社会经济价值明显增加。评价结果说明了通过人工补水对永定河（四湖一线区段）生态环境进行修复，提高了生态的需水量，改善了生态环境现状，促进了生态系统良性循环，同时也说明通过人工补水对缺水河流生态修复的方案是可行合理的。

5.2 综合决策模块

在综合决策模块中，不仅需要对不同指标进行多种组合，还需对同一指标的不同值域进行不同组合，由不同的数据组合来模拟产生不同的情景方案。通过比较情景方案预期的工程效果即实现的水环境目标、生态目标以及社会经济目标值，来选取较优方案。在这个最优方案的选取过程中，永定河生态修复空间数据库起了重要的作用。它不仅要为情景方案的产生提供不同指标的组合值，还需要实时存储模拟过程中产生的成千上万情景，让用户能够随时进行查询对比，进行图形化展示等。

文中选取永定河下游未修复段（郊野段），进行实施生态修复工程的模拟决策，通过永定河生态修复空间数据库提供的数据库，应用决策系统来产生不同情境下的修复方案，并能对预期的修复效果进行评估，从而选取合理科学的情景方案，为决策者制定永定河郊野段的修复方案提供决策支持和科学指导。

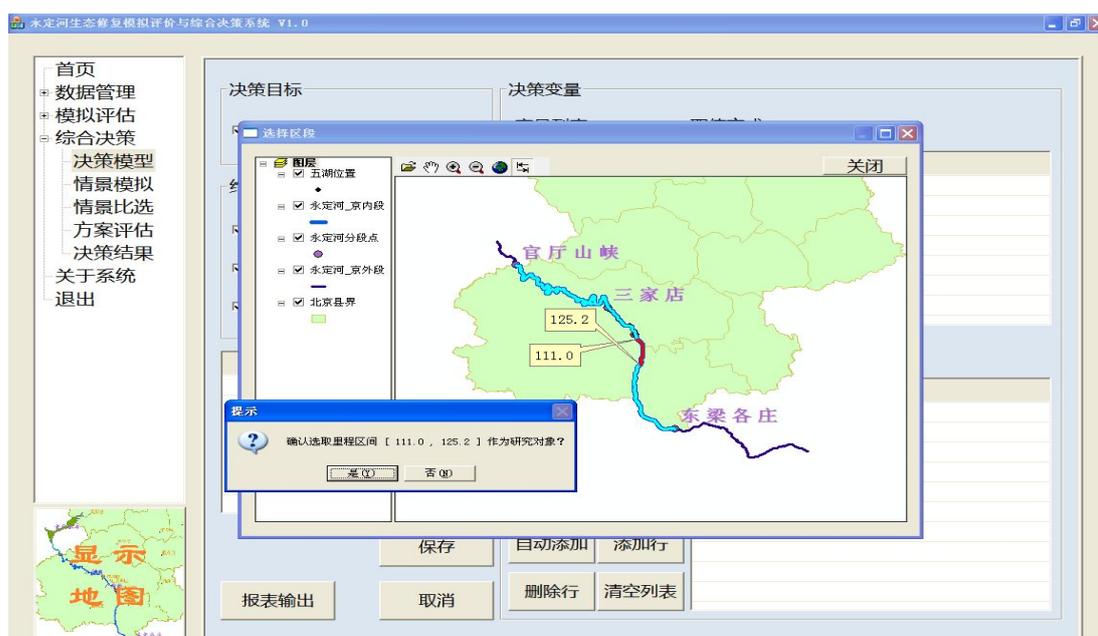


图 5.12 未修复区段选取

Fig 5.12 Unrepaired section selected

通过模拟不同生态修复方案实施后的河道水面面积、地表水水质污染指数、地下水水质污染指数、绿地覆盖面积和总修复资金等修复效果及投入，比选出较优的方案。而在这个过程中需要所构建的永定河生态修复空间数据库来提供数据服务，并要实时动态的存储已模拟产生的情景方案，供决策者来查询比较，产生的情景方案以及情景模拟结果如图 5.13 及 5.14 所示。

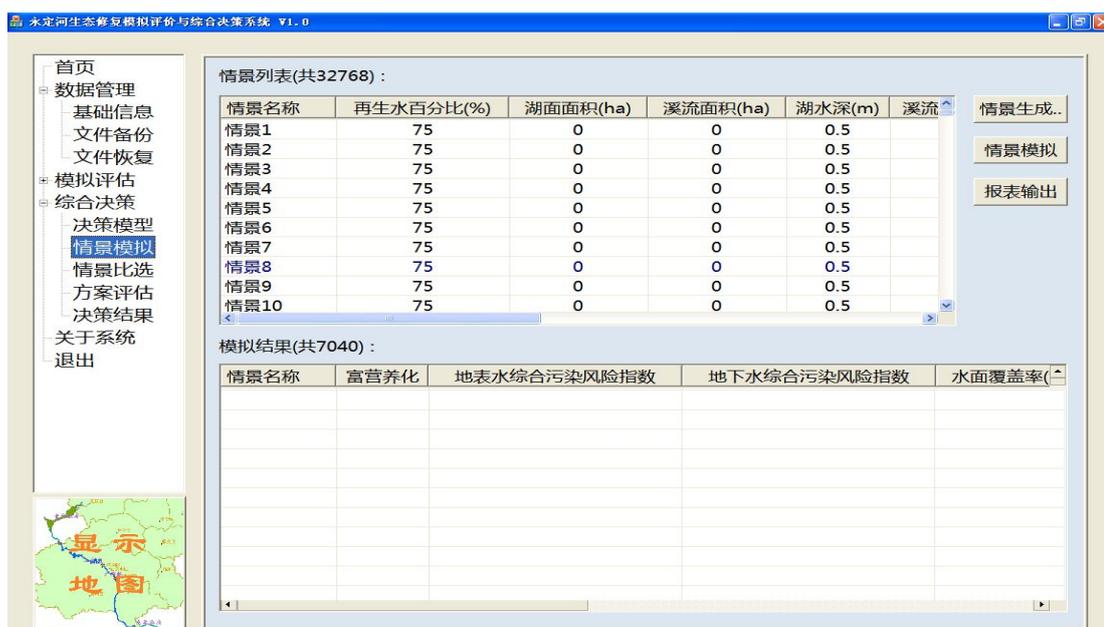


图 5.13 情景方案产生

Fig 5.13 Scenario schemes generated

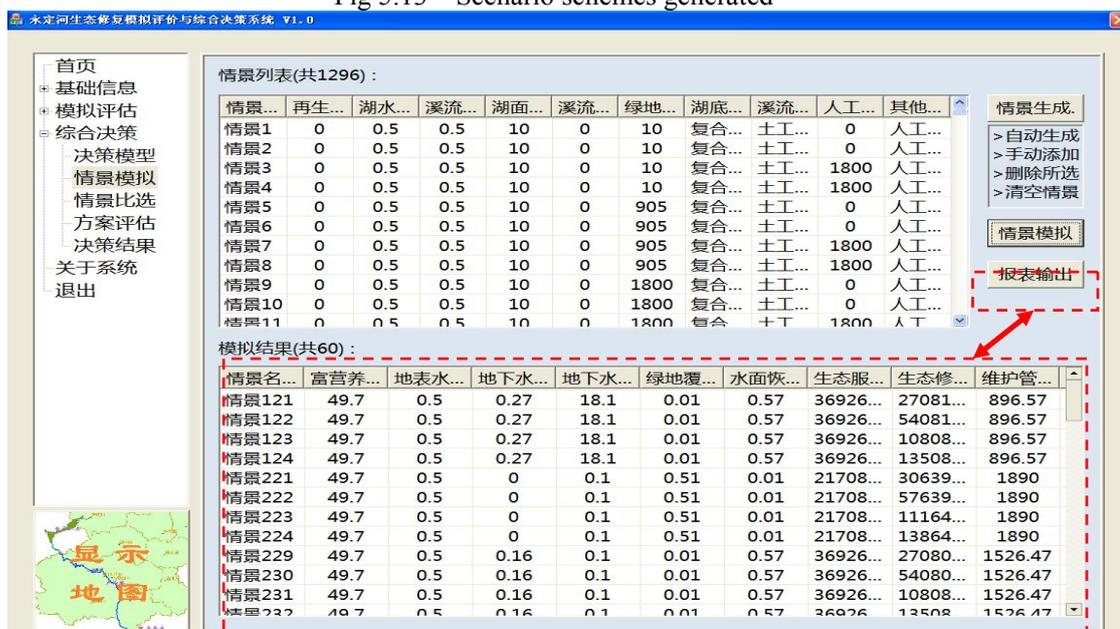


图 5.14 情景模拟结果

Fig 5.14 Results of scenario simulation

在情景模拟基础上对形成的情景方案进行比选，如图 5.15 所示，根据制定的情景评价准则和评价模型对情景进行综合评价。对于不同的情景方案，提供了层次分析模型和综合评估模型来进行综合评估，获得不同情景方案的综合评价值以及水环境目标、生态目标和社会经济目标值等。根据不同修复需求，选择相应的排序结果，来比选出合理的情景方案，情景比选结果如图 5.16 所示。

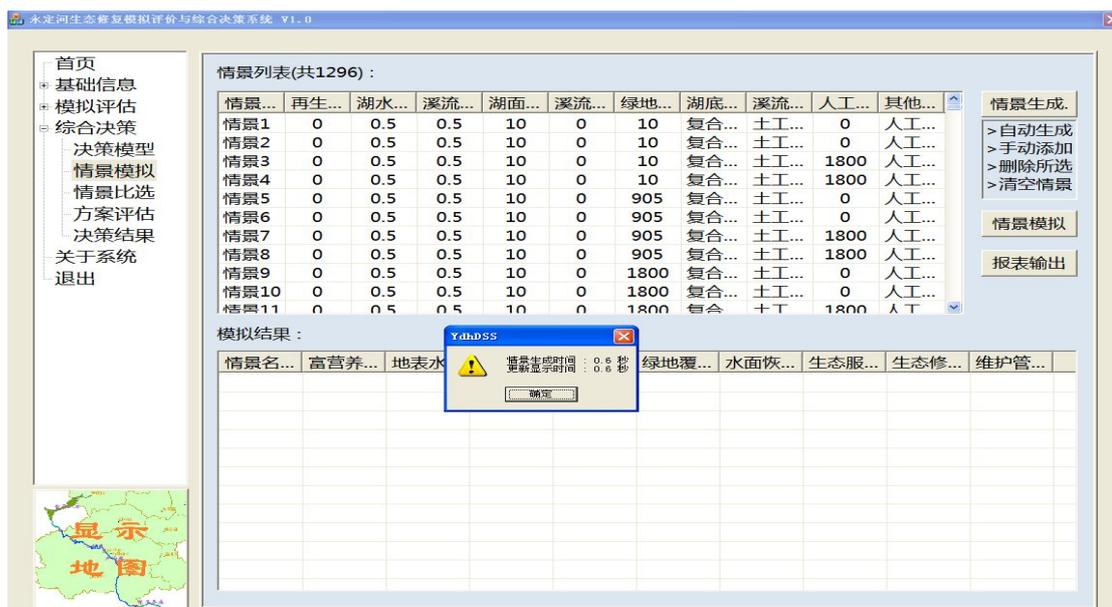


图 5.15 情景比选

Fig 5.15 Scenarios selected

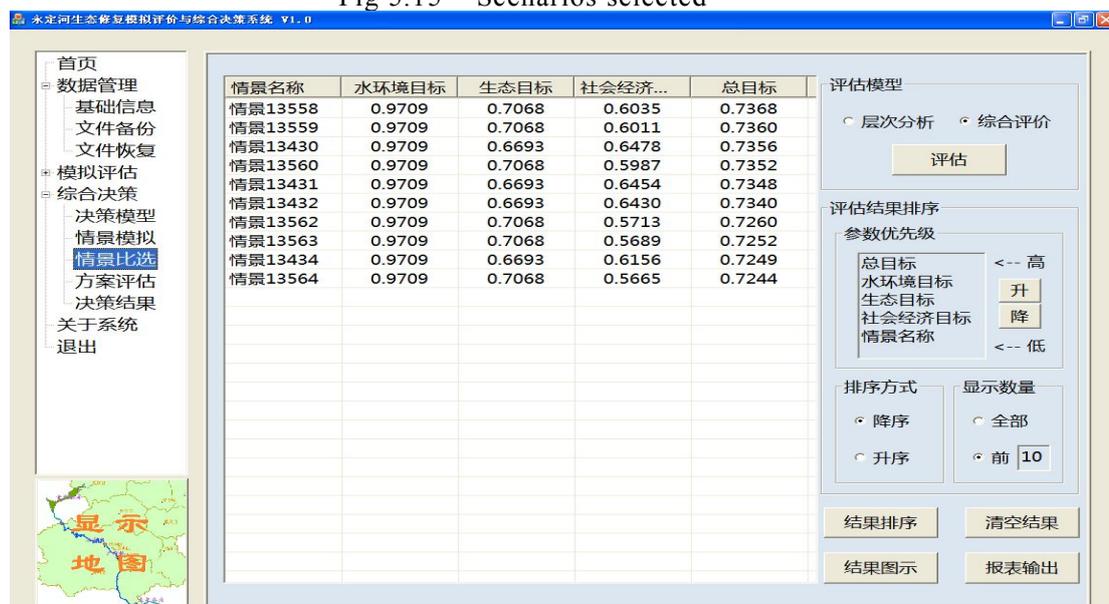


图 5.16 情景比选结果

Fig 5.16 Result of optimal scene schemes

通过决策系统比选出较优方案后，需要专家评分来对综合评估得到的情景方案进行优选（如图 5.17 所示），从工程安全性、技术先进性、技术可行性、景观效果等方面进行综合考虑，综合决出最满意的情景方案作为工程实施的决策方案。



图 5.17 专家评估

Fig 5.17 Expert assessment

通过综合分析系统以及专家评估得出最终的较优决策方案，为工程实施方案的确定提供决策依据，决策情景方案如图 5.18 所示：



图 5.18 决策情景方案

Fig 5.18 Decision scenarios

通过决策构建和综合评价，选取最优情景方案“情景 13558”分析水资源配比比例、绿地结构、湖面面积、水面面积、人工湿地面积、湖深、水深等工程具体实施项，所实现的水环境目标、生态目标和社会经济目标对比值如下图所示：

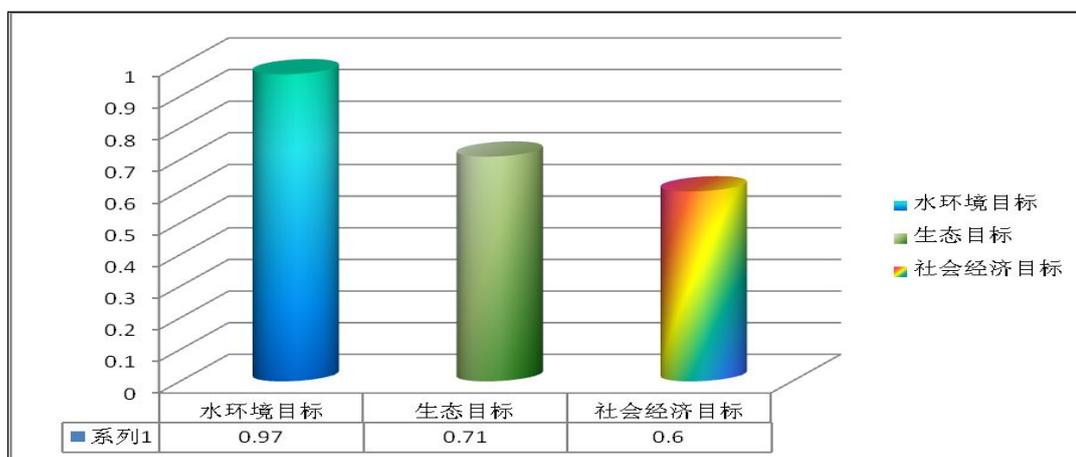


图 5.19 修复目标对比

Fig 5.19 Comparison of restoration targets

在决策系统中比选的情景方案都是以水环境目标和生态目标为所要实现的最大修复目标，社会经济目标相对次之，由上图分析可看出与预期规划设计目标相符合，选出的情景方案合理、可行。决策系统合理的评估与模拟结果，很好的验证了所构建的永定河生态修复空间数据库合理有效，能够为决策系统提供良好的数据支撑服务。

5.3 小结

在永定河生态修复模拟评估与综合决策系统中，不论是动态获取区段信息对河段现状进行评估，还是从数据库中获取决策模拟过程中所需的评价指标值、决策变量及阈值、模型参数、约束条件值等，不仅需要属性数据，还涉及大量具有空间地理位置的数据，而且属性空间数据间还存在着复杂的关联，因而对属性空间数据的有效组织与存储至关重要。空间属性数据的统一存储，线性参考与动态分段技术的采用，使得对河流区段数据信息的提取方式更为灵活快捷，更为直观的反映属性数据在空间位置上的相关性。通过应用系统对永定河修复现状进行综合评估，以及对未修复段的情景模拟，比选出了合理的情景方案，对永定河郊野段的修复规划设计方案的合理制定提供了有力的工具与技术支持。总之，永定河生态修复空间数据库是模拟评估与综合决策系统进行高效科学决策必不可少的数据支持源。

结论与展望

本文针对用户及系统数据需求，提出了一种构建河流生态修复空间数据库的方法，有如下研究结论：

(1)基于系统用户需求、修复目标以及压力-状态-响应模式构建了数据库指标体系，能够用来对不同河流生态修复情景所对应的水环境、生态以及社会经济目标的评估提供有效与必要的数据库支持，为河流生态修复的优化决策提供了重要保障；以此为基础，采用自扩展的数据库结构设计方式，有效实现了在数据库中添加新指标而无需改变数据库的功能。

(2)针对空间与属性数据的特性，采用空间数据引擎 ArcSDE 集成了空间属性数据在 Oracle 中的一体化存储管理，可有效解决空间属性数据分开存放及数据利用效率低的问题；确认了 Oracle 结合 ArcSDE 的方式可使得数据利用及共享效率更高，是一种比较可行有效的数据库交互方式，具有较强的实用性。

(3)把线性参考和动态分段技术可有机整合应用于数据组织与数据库结构设计中，并通过实例说明了从数据库中动态获取数据信息并进行查询显示具有一定的优势，是一种十分合理有效的方式，对类似缺水型河流生态修复空间数据库的构建提供了参考。

(4)通过在永定河生态修复模拟评价与综合决策系统中耦合应用所构建的空间数据库，结果证明所构建的空间数据库能够很好地支持有效评估永定河已实施生态修复工程的合理性、有效性以及工程长期运行效果，还能为永定河未修复段确定出合理的决策情景方案，从而进一步说明了所构建的永定河生态修复空间数据库结构设计其整体上的合理有效，可高效地为河流生态修复决策系统提供必要的数据库管理与应用支持。

但由于时间、现有基础资料及本人水平等诸多因素的限制，所做工作还有待进一步深入，需要进一步研究的完善的问题主要有：

(1)对永定河生态修复空间数据库中的空间属性数据间的关系结构进一步优化；对后期可能涉及的海量空间数据，采用关系数据库结合空间数据引擎的模式还需要建立缓存机制，这样能提高对大数据进行操作的响应速度，提高决策系统各功能模块的运行速度。

(2)在对现有空间数据分析的基础上，可以进一步完善面向河流生态修复的各种数据关联，使其能为智能数据分析及辅助决策提供更多的支持。如有机会还可以进一步完善与深入研究决策系统模块与 GIS 模块的结合及其一体化应用。使得地图服务与决策系统的业务及功能进行合理的数据交互，提高相互服务的功能。

(3)由于数据资料的有限性，为系统提供的分析与三维显示的数据支持还不够；数据间的结构关系以及索引等研究还可以深入，研究提高数据库访问及处理速度的解决方案，特别

是在多用户并发操作时，提高数据响应速度及其系统的整体运行效率显得尤其重要。

参 考 文 献

- [1] Vurusmarty C J, Green P, Salisbury J, et al. Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth. *Science*, 2000, 289(5477): 284-288.
- [2] 董哲仁. 河流生态恢复的目标[J]. *中国水利*, 2004(10): 1-5.
- [3] 尹钧科. 论永定河与北京城的关系[J]. *北京社会科学*, 2003(4): 12-16.
- [4] 倪晋仁. 刘元元. 论河流生态修复[J]. *水利学报*, 2006, 9(27): 102-1037.
- [5] 董哲仁. 河流生态修复的尺度格局和模型[J]. *水利学报*, 2006, 37(12): 1476-1481.
- [6] Gottinger H W, Weimarin P. Intelligent Decision Support Systems[J]. *Decision Support Systems*, 1992, 8(4): 317-332.
- [7] 王怀宝. 基于 Oracle10g 的 WebGIS 空间数据一体化存储研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2007.
- [8] 梁国玲, 张永波, 张礼中, 周小元, 张春英. 基于 GIS 的中国地下水资源空间数据库建[J] *地球学报*, 2007, 12(6): 572-578.
- [9] 陈文伟. 决策支持系统及其开发[M]. 北京: 清华大学出版社.
- [10] Dimitri Theodoratos, Timos Sellis. Designing Data Warehouses[J]. *Data and Knowledge Engineering* 1999, 31(3): 127-301.
- [11] 黄诗峰, 李纪人, 徐美. 基于 WebGIS 的全国水环境信息系统的设计与初步实现[J]. *水文*, 2003, 8: 22-25.
- [12] 汤君友, 高峻峰. 数字流域研究与实践[J]. *地与研究与开发*, 2003, 22(3): 49-51.
- [13] 季芳, 张万昌. 基于 WebGIS 探讨数字流域平台构建[J]. *计算机与数字工程*, 2008, 36(3): 66-69.
- [14] 崔宝侠. 基于 GIS 的水环境评价决策支持系统研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2005.
- [15] Bennett D A. A framework for the integration of geographical information systems and model based management[J]. *Geographical Information Science*, 1997, 11(11): 337-357.
- [16] Bernard A Engel, Jin-Yong Cho, Jon Harbor, Shilpam Pandey. Web-based DSS for hydrologic impact evaluation of small watershed land use changed[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2003, 39: 241-249.
- [17] Ribeiro RA, Powell PL, Baldwin JF. Uncertainty in Decision-making: An Abduetive Perspective[J]. *Decision Support Systems*, 1995, 13(2): 183-190.
- [18] DePablo CL, DeAgar PM, Barturent R, et al. Design of an information system for environmental planning and management (SIPA)[J]. *Journal of Environmental Management*, 1994, 4: 231-243.

- [19] 吴建寨, 赵桂慎. 生态修复目标导向的河流生态功能分区初探[J]. 环境科学学报, 2011, 31(9): 1843-1850.
- [20] Brook.D.Kendrick, A.Meeraus, GAMS User' s Guide, the Science Press, USA 1988: 33-39.
- [21] 魏加华, 王光谦, 李慈君等. GIS在地下水研究中的应用进展[J]. 水文地质工程地质, 2003, (2): 94-98.
- [22] Daene C McKinney, Ximing Cai. Linking GIS and water resources management models: an object-oriented method[J]. Environmental modeling and software, 2002(17): 413-425.
- [23] .PA. 沃伯斯. 美国得克萨斯州的流域水资源管理模型[J]. 水利水电快报, 2004(9): 1-5.
- [24] Stratos Arabatzis Basil Manos. An Integrated System For Water Resources. Monitoring, Economic Evaluation and Management[J]. Operational Research. An International Journal 2005, Vol.5(1): 193-208.
- [25] Daene C. Mckinney Ximing Cai David R. Maidment, A prototype GIS-based decision support system for river basin management[OL]. [http:// www. ersi. com/library/](http://www.ersi.com/library/).
- [26] 吴晓峰. GIS空间数据的研究与应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.
- [27] 冯雅倩. 合肥市水环境管理决策支持系统研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2009.
- [28] 于淼, 魏源送, 刘俊国, 刘培斌. 永定河(北京段)水资源、水环境的变迁及流域社会经济发展对其影响[J]. 环境科学学报, 2011, 31(9): 1817-1825.
- [29] 赵村民, 宋利好, 赵晓民. 基于 Oracle 数据库与 ArcSDE 的空间数据访问优化[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2004, 22(3).
- [30] 梁国玲, 张永波, 张礼中, 周小元, 张春英. 基于 GIS 的中国地下水资源空间数据库构建[J], 2007, 26(6): 572-578.
- [31] 孟华, 李晓东, 韩敏, 邢军, 丁蕾. 基于 GeoDatabase 和 ArcSDE 的湿地 GIS 数据库技术研究与应用实例[J]. 计算机应用研究, 2005, 9(10).
- [32] 李小秋, 尹志永. 基于 ArcSDE 的数字正射影像(DOM)数据库的建立[J]. 测绘工程, 2005, 14(4): 36-38.
- [33] 黄杏元, 马劲松, 汤勤. 地理信息系统概论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [34] 王广杰, 何政伟, 许辉熙等. 基于 ArcSDE 与 ArcIMS 的海量空间数据存储管理与网络发布-以三峡库区为例[J]. 测绘科学, 2007, 32(5): 173-176.
- [35] 崔健, 李健. 城市空间数据库建设中数据模型的研究[J]. 山东建筑工程学院学报, 2005, (3): 203-241.
- [36] 王疆霞. 鄂尔多斯盆地白垩系地下水水化学空间数据库的构建及应用[D]. 西安: 长安大

- 学, 2003.
- [37] 徐洁. 基于 ArcSDE 的太湖流域水环境空间数据库构建研究[J]. 现代商贸工业, 2009.
- [38] Woolsey S, Capelli F, Gonser T O M, et al. 2007. A strategy to access river restoration success[J]. *Freshwater Biology*, 52: 752-769.
- [39] 中国科学院大学水系统安全研究中心. 永定河生态修复模拟评价与综合决策系统[R]. 北京: 北京市科学技术委员会. 2012.
- [40] 黄锦楼, 欧金明等. 北京市门头沟区生态修复模式探讨[J]. 生态学杂志, 2008, 27(2): 273-277.
- [41] 夏军, 朱一中. 水资源安全度量: 水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 262-269.
- [42] 李向辉, 笪可宁. 基于 PSR 框架的小城镇可持续发展相关策略[J]. 沈阳建筑大学学报. 2005, 7(8): 48-51.
- [43] 乔彦友, 武红敢. 地理信息系统中动态分段技术的研究[J]. 环境遥感, 1995, 19(3): 211-216.
- [44] 傅作良, 王立平, 朱剑勇. 动态分段技术研究及实现[J]. 计算机世界月刊, 1994(4), 130-134.
- [45] 李小秋, 尹志永. 基于 ArcSDE 的数字正射影像(DOM) 数据库的建立[J]. 测绘工程, 2005, 14(4): 36-38.
- [46] ESRI. ArcSDE Config_GD Oracle[M]. Redlands: ESRI Press, 2006.
- [47] 杨鲲鹏. 基于 ArcSDE 的空间数据库技术与工程实现[D]. 上海: 同济大学, 2008 .
- [48] 熊丽华, 杨峰. 基于 ArcSDE 的空间数据库技术的应用研究[J]. 计算机应用, 2004, 24(3): 90-96.
- [49] 张黎明, 苏厚勤. Oracle DB 动态 SQL 应用方法的研究与实践[J]. 计算机应用与软件, 2008, 25(1): 198-200.
- [50] 王艳华. 基 ArcGIS 的重庆市地下河数据库设计实现和系统开发[D]. 西安: 西南大学, 2010.
- [51] 张改云. 沧州市深层地下水资源评价及利用对策[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [52] 浙江环境办. 关于印发浙江省农村饮用水水源地基础环境调查与评估工作方案的通知 [EB/OL]. <http://www.wzepb.gov.cn/files/2009-6/htm>.
- [53] 钮新强, 文丹, 吴德绪. 南水北调中线工程技术研究[J]. 人民长江, 2005, (7): 31-35.
- [54] 谢新民, 蒋云钟, 闫继军. 水资源实时监控管理系统理论与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.

- [55] 魏加华, 王光谦, 陈志祥等. 南水北调中线电子渠道平台建设[J]. 南水北调与水利科技, 2007, 5(2): 28-30.
- [56] 蒋云钟, 赵红莉, 董延军等. 南水北调中线水资源调度关键技术研究[J]. 南水北调水利科技, 2007, (4): 1-5.
- [57] 高小明, 唐新明, 张春玲. 动态分段技术及其在 GIS 中的应用[J]. 测绘通报, 2007(10): 54-56.
- [58] 尹海龙, 徐祖信. 可视化黄浦江水环境数学模型系统设计与开发[J]. 环境污染与防治, 2005, 27(1): 65-71.
- [59] 张行南, 耿庆斋, 逢勇. 水质模型与地理信息系统的集成研究[J]. 水利学报, 2004(1): 90-94.
- [60] 孙启宏, 乔琦, 孔益民等. 利用动态分段技术进行河流一维水质扩散模拟[J]. 环境科学研究, 1997, 10(5): 43-461.
- [61] L. Zhang, G. Q. Wang, B. X. Dai and T. J. Li. Classification and codification methods of stream networks in a river basin: a review[J]. Environmental Informatics Archives, Volume 5(2007): 364-372.
- [62] 罗翔宇, 贾仰文, 王建华等. 基于 DEM 与实测河网的流域编码方法[J]. 水科学进展, 2006, 17(2): 259-264.
- [63] SL249-1999, 中国河流名称代码[S].
- [64] Bell M , Dean C , Blake M. Forecasting the Pattern of Urban Growth with PU P:a Web based Model Interfaced with GIS and 3D Animation [J]. Computers Environment and Urban Systems, 2000 , 24: 559-581.
- [65] Pew K L, Larsen C P S. GIS Analysis of Spatial and Temporal Patterns of Human caused Wildfires in the Temperate rain forest of Vancouver Island[J]. Forest Ecology and Management, 2001, 140: 1-18.
- [66] Michele Crosctto, Stcfano Tarantola , Andrea Saltelli. Sensitivit yand Uncertainty Analysis in Spatial Modeling Based on GIS[J]. Agriculture Ecosystem and Environment, 2000, 81: 71-79.
- [67] Poudevigne I, Alard D, Leuven RSE W, Nienhuis P H. A Systems Approach to River Restoration : a Case study in the Lower Seine Valley[J]. River Research and applications , 2002, 18: 239-247.

作者简历

一、基本情况

姓名：胡倩倩 性别：女 民族：汉 出生年月：1987-02-23 籍贯：湖南衡阳

2005-09—2009-06 吉首大学信息管理与工程学院管理学学士；

2010-09—2013-01 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院攻读硕士；

二、在学期间从事的科研工作

1. 永定河生态修复综合评价与模拟决策系统. 北京市科技项目，编号：D09040903700801，参加人员；

2. 南水北调总干渠两侧复杂介质地下水污染模拟预报系统. 国家科技重大专项（863），编号：2011ZX05060-005，参加人员；

3. 华北平原地下水演变机制与调控. 国家重点基础研究发展计划（973 计划），编号：2010CB428801，参加人员；

三、在学期间发表的学术论文

胡倩倩，王明玉，李致宇，赵建辉. 人工补水河流生态修复决策系统空间数据库[J]. 计算机工程与设计，2013（5）

学位论文原创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。其他同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

本人学位论文与资料若有不实，愿意承担一切的法律责任。

学位论文作者签名：_____

年 月 日

学位论文数据集

关键词*	密级*	中图分类号*	UDC	论文资助
生态修复；空间数据库；永定河	公开	X523	504	北京市科技项目
学位授予单位名称*	学位授予单位代码*	学位类别*	学位级别*	
辽宁工程技术大学	10147	工学	硕士	
论文题名*	并列题名*			论文语种*
永定河生态修复决策系统空间数据库研究及应用				中文
作者姓名*	胡倩倩	学号*	471020385	
培养单位名称*	培养单位代码*	培养单位地址	邮编	
辽宁工程技术大学	10147	辽宁省阜新市	123000	
学科专业*	研究方向*	学制*	学位授予年*	
环境工程	水污染控制与治理	2.5	2013	
论文提交日期*	2012. 11			
导师姓名*	王明玉	职称*	教授	
评阅人	答辩委员会主席*	答辩委员会成员		
电子版论文提交格式 文本 () 图像 () 视频 () 音频 () 多媒体 () 其他 ()				
推荐格式: application/msword; application/pdf				
电子版论文出版(发布)者	电子版论文出版(发布)地	权限声明		
论文总页数*	60			
注: 共 33 项, 其中带*为必填数据, 为 22 项。				