

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.08.008

# 中国海绵城市源头设施数据库设计探讨

徐常青<sup>1,2</sup>, 张榕榕<sup>1</sup>, 史馨玫<sup>1</sup>, 陈正侠<sup>1</sup>, 贾海峰<sup>1</sup>

(1. 清华大学 环境学院, 北京 100084; 2. 北京理工大学 管理与经济学院, 北京 100081)

**摘要:** 我国开展城市雨洪管理研究起步较晚,在海绵城市建设中可参考借鉴的本地化数据不多,为可持续地支持我国海绵城市建设,亟需参照国外相关数据库建设的经验,对我国海绵城市试点建设实践取得的相关数据进行归纳整理,建立海绵城市源头设施数据库。首先分析了我国海绵城市试点建设中海绵城市源头设施相关数据的实际情况,借鉴美国国际BMP数据库的架构,完成了海绵城市源头设施数据库的需求分析,进而通过概念设计、逻辑设计和物理设计三个步骤,设计了一个结构清晰、管理方便、执行效率高的海绵城市源头设施数据库。该数据库主要分为海绵城市源头设施、研究区域、监测站、监测事件和监测数据五个实体集,包含45张表格和上千条字段属性。后续通过中国海绵城市源头设施数据库的建设,可为海绵城市源头设施的效能评估、运营维护和成本效益分析提供数据支持,服务于海绵城市的规划设计和建设。

**关键词:** 海绵城市; 需求分析; 源头设施; UML模型

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)08-0053-08

## Design of Source Control Facility Database for Sponge Cities in China

XU Chang-qing<sup>1,2</sup>, ZHANG Rong-rong<sup>1</sup>, SHI Xin-mei<sup>1</sup>, CHEN Zheng-xia<sup>1</sup>, JIA Hai-feng<sup>1</sup>

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Management and Economics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** China started the research on urban stormwater management relatively late, and there are not many localized data that can be referred to and learned from in sponge city construction. To sustainably support the construction of sponge city in China, it is urgent to refer to the experience of building related databases abroad, summarize and organize the relevant data obtained from the pilot construction of sponge cities in China, and establish a database of sponge city source control facilities. Firstly, the actual situation of sponge city source control facility data in the pilot construction of sponge cities in China was analyzed. Referring to the architecture of the American international BMP database, the demand analysis of the sponge city source control facility database was completed. Then, through three steps of conceptual design, logical design, and physical design, a sponge city source control facility database with clear structure, easy management, and high execution efficiency was designed. The database is mainly divided into five entity sets: sponge city source control facilities, research areas,

**基金项目:** 国家自然科学基金青年项目(52200218); 国家自然科学基金资助面上项目(52070112); 中国博士后科学基金资助面上项目(2021M691769); 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室开放基金资助项目(HYD20230F01)

**通信作者:** 陈正侠 E-mail: chenzhengxia@tsinghua.edu.cn; 贾海峰 E-mail: jhf@tsinghua.edu.cn

monitoring stations, monitoring events, and monitoring data, containing 45 tables and thousands of field properties. Through the construction of the Chinese sponge city source control facility database, data support can be provided for the efficiency evaluation, operation and maintenance, and cost-benefit analysis of sponge city source control facilities, serving the planning, design, and construction of sponge city.

**Key words:** sponge city; demand analysis; source control facilities; UML model

随着城市化进程的不断加快,城市不透水面积逐年增加,降雨径流量也迅速增加,随之而来的是一系列环境问题,如径流污染、内涝灾害、水资源短缺等<sup>[1]</sup>。2015年、2016年,国家先后筛选出两批共30个城市作为海绵城市国家试点城市,此外还有100多个省试点城市。但是我国开展海绵城市研究起步较晚,目前还缺乏可参考借鉴的数据,如对海绵设施全面深入的监测和模拟数据不足<sup>[2]</sup>,缺乏完善的源头设施效能评估体系<sup>[3]</sup>,直接采用国外的工程做法和经验而本地化不够<sup>[4]</sup>等。因此,我国不能一味照搬国外的经验和数据,需要建立自己的海绵城市数据库,以期为源头设施在降雨径流控制的效能评估、运营维护和成本效益分析中提供数据支持,并能因地制宜地指导我国未来海绵城市的建设。

与国外的雨洪管理实践相比,我国海绵城市建设规模大、措施种类丰富<sup>[5]</sup>,而且经过近几年海绵城市建设的实践,已积累了大量的资料和数据。但是,目前积累的全国不同级别试点城市的资料和数据都表现出了数据量大、种类繁多、格式多样、来源复杂、良莠不齐等特点,对这些数据进行有效的整理、存储和应用既非常必要,又是一大难题。因此需要对这些源头设施的数据和资源进行规范、简洁、高效的管理和应用,提炼中国本地化的海绵城市建设技术参数和规范,以支持海绵城市的持续推进<sup>[6]</sup>。在国际上,建立海绵城市相关的数据库早有先例。1996年,在美国土木工程学会(ASCE)和美国环保署(USEPA)的发起下,美国就根据本国及加拿大等国已运行的LID、BMPs等源头设施数据,建立了国际BMP数据库(International Stormwater BMP Database),记录不同源头设施在不同地区的运行效果、尺寸、成本等信息。利用这一数据库平台,研究者可以对源头设施的效能进行充分研究<sup>[7-8]</sup>。通过二十多年的积累,在2018年最新发布的版本中,该

数据库已经包含了6个国家的700多个源头设施的数据。此外,美国记录城市雨水径流特征的NSQD(National Stormwater Quality Database)、包含全球降雨数据的ERA-Interim database等数据库也可为我国海绵城市源头设施数据库的建设提供借鉴。为此,参考美国BMPs数据库的设计思路,对我国海绵城市源头设施数据库的需求进行了分析,进而通过概念设计、逻辑设计和物理设计三个步骤,设计了一个结构清晰、管理方便、执行效率高的源头设施数据库。

## 1 海绵城市源头设施数据库设计架构

### ① 数据库设计路线

一个数据库的建立和应用包括数据库设计、数据库实施和数据库运行与维护等阶段。为了达到设计目标,需要选取合适的设计路线。本研究设计路线包含需求分析、概念设计、逻辑设计和物理设计四个环节(见图1)。

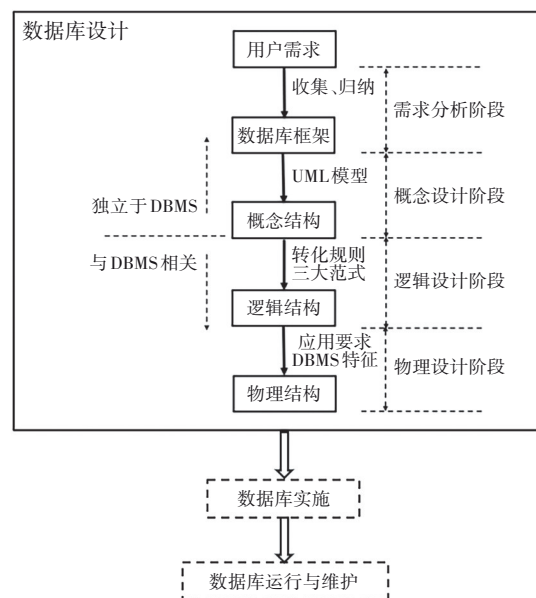


图1 数据库开发技术路线

Fig.1 Technical route of database development

需求分析是指对数据库的应用情况进行全面、

详细的调查,从而收集用户的需求,确定该数据库的设计目标。

概念设计是基于用户需求的提炼和抽象,形成独立于数据库管理系统(Database Management System, DBMS)的概念数据模型,实现从现实世界到信息世界的转化。

逻辑设计是将概念结构模型转化为某个DBMS所支持的数据模型,并对所得的关系模式进行规范化和优化。本数据库选用MySQL作为数据库管理系统。

物理设计是根据使用的计算机软硬件环境和DBMS,为数据模型选择合理的存储结构和存取方法,决定存取路径和分配存取空间<sup>[9-10]</sup>。

## ② 海绵城市源头设施数据库设计架构

海绵城市源头设施是海绵城市建设的重要组成部分,常用的源头设施包括生物滞留设施、绿色屋顶、透水铺装等小型源头设施以及湿塘、雨水湿地等大中型源头设施等<sup>[11]</sup>。建立海绵城市源头设施数据库的目的,是通过对不同来源的数据进行收集、整理和规范,从而为海绵城市的规划设计和建设以及源头设施的效能评估提供数据资源。根据需求分析调研,最终确定的源头设施数据库主要包含的研究对象有源头设施、研究区域、监测站、监测事件和监测数据等。通过对研究对象的梳理,形成了源头设施数据库的主体框架(见图2),其中具体的源头设施类型可以根据实际情况动态调整。

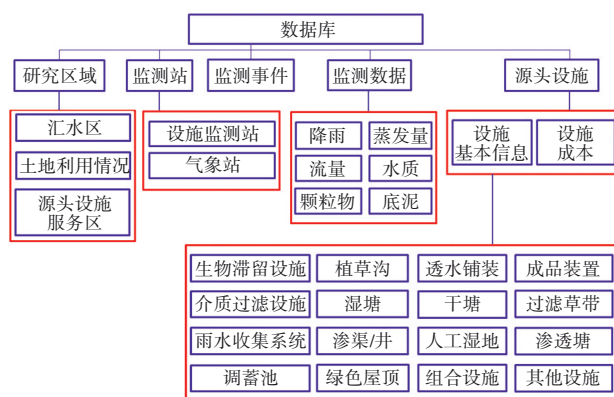


图2 中国海绵城市源头设施数据库框架

Fig.2 Database framework of source control facilities for sponge city

## 2 基于UML模型的概念设计

概念设计是根据需求分析的结果建立数据模型,是由抽象到具体的过程。应用最为广泛的概念

设计工具包括E-R(Entity-Relationship)模型和统一的建模语言(Unified Modeling Language, UML)模型<sup>[10]</sup>。E-R模型具有具体简单明了的特点,但对于结构复杂、规模庞大的数据库,无法清晰、详细地分析和描述关系数据库的建模问题<sup>[12]</sup>。UML是一种定义良好、易于表达、功能强大且普遍适用的建模语言,集软件研究领域的许多新思想、新方法、新技术于一体,能够强有力地支持软件开发的全过程<sup>[13]</sup>。UML最适于大型、复杂的应用建模,已被OMG(对象管理组织,属于国际化公益性的计算机行业协会)吸纳为软件界的规范<sup>[14-17]</sup>。基于我国源头设施的数据情况,选用UML模型进行数据库的实体对象及其相互关系的设计。根据研究得到的数据库框架,将研究实体对象划分为研究区域、源头设施、监测站、监测事件和监测数据5个实体集。先建立局部UML图进行实体间联系的设计与可视化表达,然后合并为全局视图。

### 2.1 研究区域实体集UML模型

研究区域实体集共包含8个实体对象,包括研究区域、源头设施服务区、汇水区、汇水区布局、土地利用情况、土地利用布局、源头设施基本信息和管理机构(见图3)。在研究区域实体集中,研究区域表作为主表,与汇水区、土地利用情况、源头设施服务区和管理机构相连接。

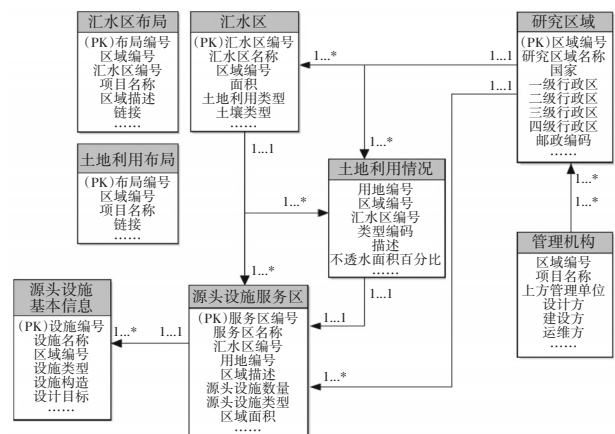


图3 研究区域实体集UML模型

Fig.3 UML model of the entity set of research site

### 2.2 源头设施实体集UML模型

源头设施实体集是实体集的重点,共包含了19个实体对象来详细描述研究区域部分的相关信息,包括源头设施基本信息、源头设施类型、源头设施成本和16个单项源头设施。具体说明如表1所示。

表1 源头设施实体集说明

Tab.1 Description of the entity set of source control facilities

实体名称	说明
源头设施基本信息 (Facility Info)	描述了源头设施的基本信息,包括源头设施的名称、类型、设计目的、投入使用时间等28条实体属性
源头设施成本 (Facility Cost)	描述了源头设施的成本信息,包括成本统计年、总建设成本、平均每年日常维护成本等18条实体属性
源头设施类型 (Facility Type)	描述了每类源头设施的英文简称和该类源头设施的基本特征
干塘 (Detention Basin)	干塘以削减峰值流量功能为主,也可起到一定的补充地下水和净化雨水的作用。包括容量、表面积、排空时间、有无前置塘等19条实体属性
湿塘 (Retention Pond)	湿塘是指具有雨水调蓄和净化功能的景观水体,可有效削减较大区域的径流总量、径流污染和峰值流量。包括容量、表面积、全排空时间、有无前置塘等19条属性
渗透塘 (Infiltration Basin)	渗透塘是一种用雨水下渗补充地下水的洼地,具有一定的净化雨水和削减峰值流量的作用。包括容量、表面积、土壤类型等20条属性
雨水湿地 (Wetland Basin)	雨水湿地是通过种植水生植物,利用基质、植物、微生物的理化作用使径流得到净化的设施。包括容量、长度、表面积、排空时间等24条属性
生物滞留设施 (Bioretention)	生物滞留设施是指在地势较低的区域,通过植物、土壤和微生物系统蓄渗、净化径流雨水的设施。包括容量、长度、表面积、有无地下排水管道等33条属性
植草沟 (Grass Swale)	植草沟是指种有植被的地表沟渠,可收集、输送和排放径流雨水。包括长度、纵向坡度、宽度、边坡坡度等16条属性
过滤草带 (Grass Filter Strip)	过滤草带主要处理平面流,通过过滤、渗透、沉降的方式去除污染物。包括长度、宽度、纵向坡度等15条属性
介质过滤设施 (Media Filter)	介质过滤设施是通过颗粒或膜过滤去除污染物的源头设施。包括表面积、排空时间、介质材料等15条属性
透水铺装 (Permeable Pavement)	透水铺装是指在保持原有使用功能的前提下,提高雨水下渗能力,减小下垫面径流系数的雨水控制措施。包括服务面积比、表面渗透率、地下水位深度等35条属性
CSO调蓄池 (Storm Detention Tank)	CSO调蓄池是在合流制系统中对暴雨期间超过截流管截流能力和污水厂处理能力的合流污水进行暂时储存的设施。包括容量、服务面积、溢流频次等13条属性
渗渠/渗井 (Percolation Trench/Well)	渗渠/渗井是指具有渗透功能的雨水渠/雨水井,用于收集径流并将其渗透到地下。包括表面积、长度、地下水位深度、填充材料等20条属性
绿色屋顶 (Green Roof)	绿色屋顶是以绿色植物为主要覆盖物,能有效延缓雨水径流、减少污染物排出、缓解热岛效应的设施。包括植被种类、屋顶介质、滞留体积等18条属性
成品装置 (Manufactured Device)	成品装置是指由公司生产的、通常有专利权的设备,它们可直接对径流进行处理,只需少量的土建和安装工程量。包括目标污染物、设计入流量、设计出流量等34条属性
雨水收集系统 (Rainwater Harvesting)	雨水收集系统包括各类收集贮存雨水的雨水桶、水缸或水槽。包括存储容积、排空时间、溢流方式等19条属性
复合源头设施 (Composite Facility)	复合源头设施是多种简单源头设施的组合。包括单个源头设施的描述、源头设施数量、主要结构特征等8条属性
其他源头设施 (Other Facility)	其他源头设施包括各类未单独列出的设施。包括名称、主要结构特征、主要植被特征等6条属性

以所有设施共有的基本信息为例,解释源头设施典型参数的选取。

① 控制目标:年径流总量控制率是我国海绵试点城市建设中最主要的控制指标,直接影响径流控制设施的选择和设计。此外,正确的安装和建设直接影响到径流控制设施的实际运行效果。

② 出入流信息:出入口的设置会影响径流

在设施内的流动状态。

③ 维护信息:不同的源头设施需要不同的维护和维修方式,维护方式一定程度上决定了设施在运行一段时间后的状态。

④ 与其他设施的关系:当源头设施上游有其他设施或预处理装置时,入流条件会受到影响。

⑤ 成本信息:源头设施的成本信息有多个组

成部分,详细的成本数据有助于设施的成本效益分析和不同地区的设施比选。

创建的源头设施实体集 UML 模型如图 4 所示。

在源头设施实体集中,源头设施基本信息表作为主表与源头设施类型表、源头设施成本表和 16 个单项源头设施表相连接。

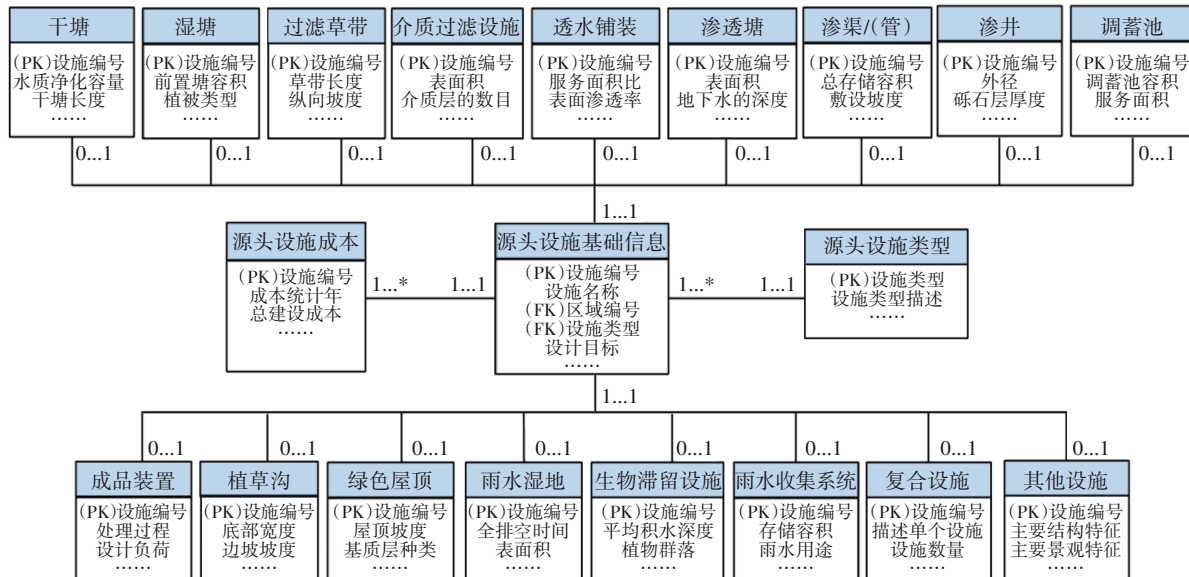


图 4 源头设施实体集 UML 模型

Fig.4 UML model of the entity set of source control facilities

## 2.3 监测站实体集 UML 模型

监测站监测事件实体集 UML 模型如图 5 所示。

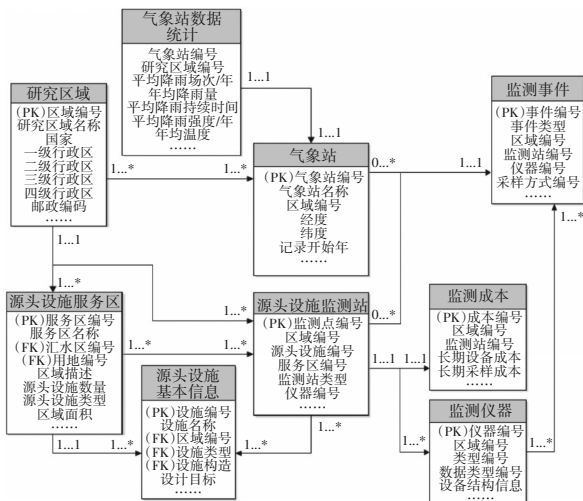


图 5 监测站实体集 UML 模型

Fig.5 UML model of the entity set of monitoring stations and events

监测站实体集共包含 4 个实体对象,包括气象站、气象站数据统计、源头设施监测站、监测仪器。监测事件实体集包括监测事件和监测成本。监测事件表主要是考虑到监测站与监测数据间较难建立起对应关系,通过监测事件表,可以与监测站产生空间关系,与监测数据产生时间关系,进而起到

监测站和监测数据间的枢纽作用。

## 2.4 监测数据实体集 UML 模型

监测数据实体集包含 4 个实体集,分别是降雨、流量、水质和水位。通过监测事件表,与监测站、海绵设施产生空间联系,进而与研究区域、汇水区等地理空间产生联系(见图 6)。

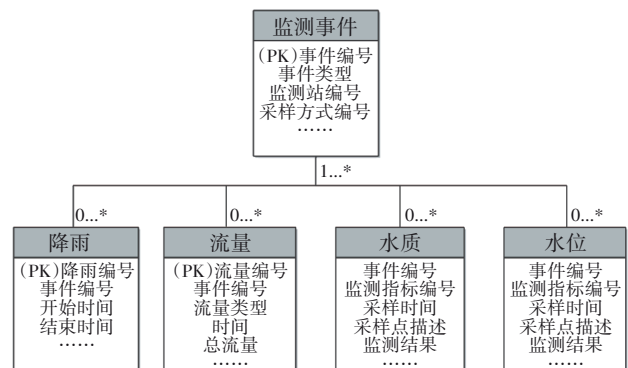


图 6 监测数据实体集 UML 模型

Fig.6 UML model of the entity set of monitoring data

## 2.5 海绵城市源头设施数据库表关系视图

根据设计出的局部 UML 图、实体间的联系及实体属性设置主键和外键。主键(Primary Key, PK)是唯一标识表中所有记录的属性,外键(Foreign Key, FK)用于创建表之间的关系。最终将各实体集的局部 UML 图合并得到的表关系视图如图 7 所示。

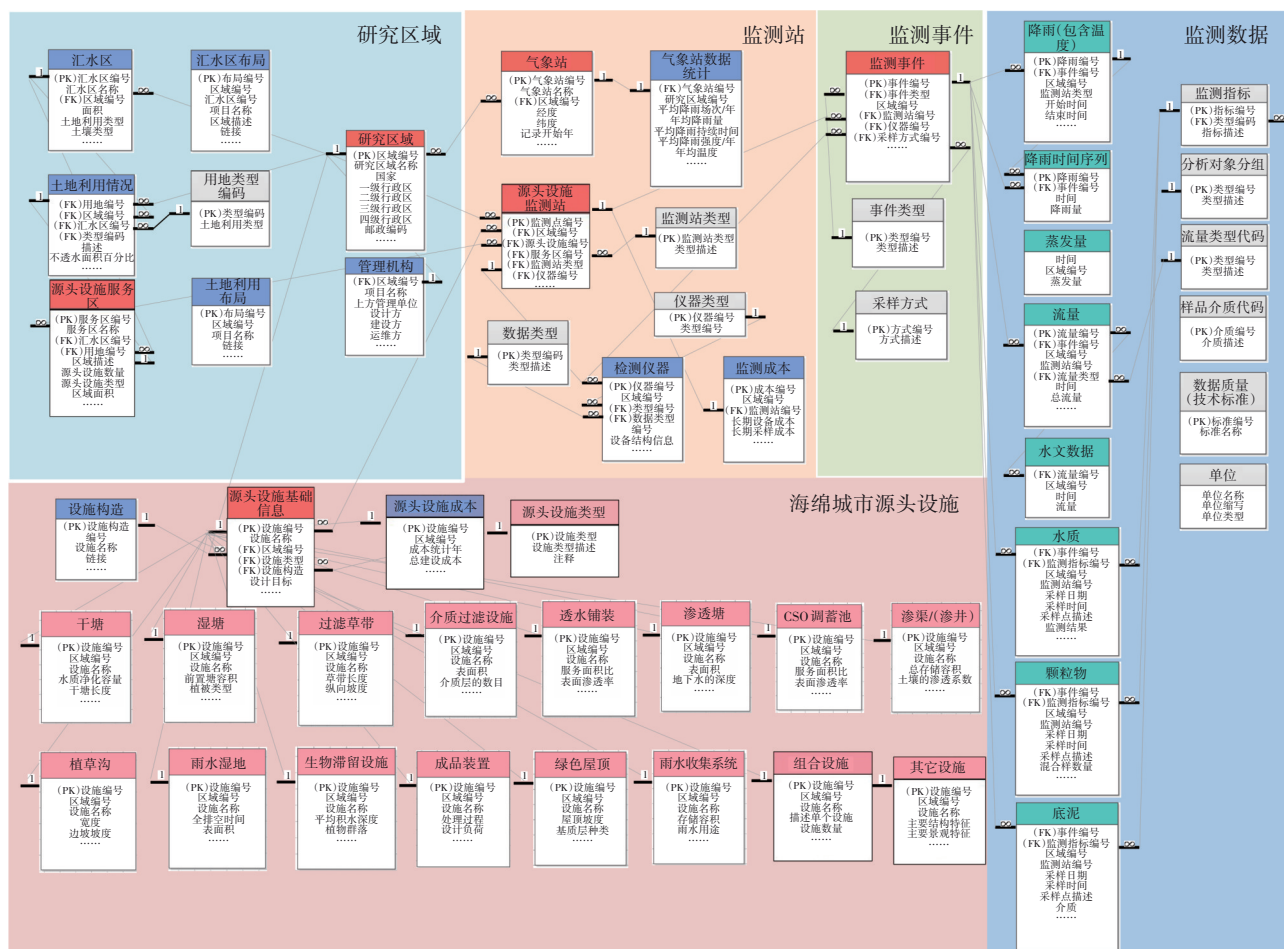


图7 源头设施数据库的表关系视图

Fig.7 Table relationship of source control facilities

在图7中,红色的表格是连接整个数据库的主体框架,包括研究区域、源头设施服务区、源头设施基本信息、气象站、源头设施监测站、监测事件6张表,通过这6张表,将研究区域的基本信息,源头设施、监测站、监测事件和监测数据连接起来。蓝色的表格提供数据支持,包括成本数据、土地使用、负责机构等。粉色的表格提供了源头设施的数据,包括生物滞留设施、植草沟、透水铺装、渗透井等16种源头设施。绿色的表格提供了监测数据,包括降雨、蒸发量、流量、水质、水位表。灰色的表格提供代码查询,包括用地类型编码、监测指标、样品介质等。

### 3 基于MySQL平台的关系型数据库逻辑设计

逻辑设计是数据抽象的中间层,主要任务是将概念设计阶段形成的概念模型变换为逻辑模型,目的是得到特定的DBMS可处理的数据逻辑结构。本次设计中选用的DBMS是关系型数据库管理系统MySQL。MySQL具有体积小、速度快、开放源码等

优点,同时MySQL的性能和安全性强,符合海绵城市源头设施数据库的设计和开发要求。

基于MySQL平台的关系型数据库逻辑设计,首先是将UML模型转化到关系数据模型,同时对关系数据模型进行优化。优化过程要基于三大范式进行规范化处理,然后根据实际情况进行逆规范化处理。关系数据之间存在不同形式的数据依赖,会产生数据冗余、插入异常、删除异常和更新异常等问题。为解决这些数据质量的问题,必须对数据库进行规范化,逐步解决数据中存在的依赖关系。同时,过于规范的数据可能会打破数据涵义上的完整性,产生过多的外键和关联关系。因此,还需要对关系模型进行逆规范化处理。

依据第一范式消除非原子项,使每个属性都是不可再分的最小数据单元。依据第二范式消除数据中非键属性对键的部分函数依赖,使得每一个非键属性都完全依赖于键。依据第三范式消除数据

中存在的传递函数依赖。最后进行逆规范化处理,常用的方法有增加冗余属性、增加派生属性、重建和分割关系等<sup>[10]</sup>。比如,在进行数据分析时,经常需要对单个设施和它所在的研究区进行关联查询,为减少查询时的联结操作,在源头设施总表和单项源头设施表中都包含“研究区编号”这一属性,该属性即为冗余属性。但考虑到操作与关联的便捷性,

增设此项属性。

通过基于三大范式和逆规范化处理的逻辑设计,得到了我国海绵城市源头设施数据库的逻辑结构模型,共包含源头设施、研究区域下垫面、研究对象监测数据、设施及监测成本等45张表格、上千条字段属性。将生物滞留设施表作为关系模型示例,如表2所示。

表2 生物滞留设施关系模型示例

Tab.2 Relational data model of bioretention

表格名称	关系模型
生物滞留设施 (Bioretention)	源头设施编号,源头设施名称,研究区域编号,项目编号,生物滞留设施的类型,地下水埋深,自然土壤入渗率,土壤类型,年径流总量控制率,设计雨强,设施表面积,服务面积比,饱和渗透系数,设计渗透系数,平均蓄水深度,蓄水体积,蓄水层排空时间,设施形状,溢流口相对高度,内部蓄水层深度,内部蓄水层体积,覆盖层描述,覆盖层厚度,种植土层类型,种植土层深度,滤水层材质,滤水层深度,砾石排水层孔隙率,砾石排水层深度,排水盲管的数量,排水盲管管径,排水盲管材质,表面径流的描述及其规模,防渗层描述,24 h耐淹植物,48 h耐淹植物,种植密度,注释

通过实体集的内容与实体间关联,基于MySQL平台,创建了国内首个海绵城市源头设施数据库。考虑到数据库的完整性和可拓展性,未来会根据我国海绵城市的实践发展和数据收集情况进行动态调整。

#### 4 结语

海绵城市数据具有来源差异大、构成复杂等特性,加大了数据分析的难度。因此,建立一个结构清晰、管理方便、执行效率高的海绵城市源头设施数据库就显得格外重要。通过数据库的建立,可以将杂乱无序的数据变得有序化,同时提高了数据的质量,扩大了分析研究的数据基础,为源头设施的效能评价分析奠定了扎实的基础。

本研究主要描述了源头设施数据库的结构设计,以源头设施为主要研究对象,对不同来源的数据进行收集、整理和规范,根据源头设施数据库建设的需求分析,利用UML建立了概念模型,并转换为关系模型,通过三大范式对关系模型进行优化,实现了源头设施数据库的设计。

随着信息化和大数据时代的开启,数据作为研究的基础支撑,起到了越来越重要的作用。下一步在建设源头设施数据库后,对收集的数据进行规范化处理并入库,可将杂乱无序、有效信息密度低的数据整理为整洁、可信的数据。基于这些数据,可以分析不同源头设施在不同自然环境条件、不同地区的运行效果及其尺寸、成本等信息,实现对不同

源头设施的效能分析评估,进而提炼出各种设施的本地化参数,为设施类型、设施规模、地点、布局和处理技术的选择提供依据,也可为日后建立科学有效的海绵城市规划技术体系,完善有关的降雨径流管理技术和法律法规奠定基础。

不过随着数据量的不断增加,数据质量良莠不齐,也会带来如何对数据质量进行把控的问题。大数据带来大量有用信息的同时,也产生了很多需要清洗的“脏数据”。如何开发科学有效的数据清洗技术进而能够产生高质量的数据成为下一步需要解决的问题。

#### 参考文献:

- [1] 王建龙,车伍,易红星. 基于低影响开发的雨水管理模型研究及进展[J]. 中国给水排水,2010,26(18): 50-54.  
WANG Jianlong, CHE Wu, YI Hongxing. Research and progress of stormwater management models based on low-impact development [J]. China Water and Wastewater, 2010, 26(18): 50-54 (in Chinese).
- [2] 刘文,陈卫平,彭驰. 城市雨洪管理低影响开发技术研究与利用进展[J]. 应用生态学报,2016,26(6): 1901-1912.  
LIU Wen, CHEN Weiping, PENG Chi. Advances in low impact development technology for urban stormwater management [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 26(6): 1901-1912 (in Chinese).

- [3] JIA H F, WANG Z, ZHEN X Y, *et al.* China's sponge city construction: a discussion on technical approaches [J]. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 2017, 11(4): 18.
- [4] 仇保兴. 海绵城市(LID)的内涵、途径与展望[J]. *建设科技*, 2015(1): 1-7.  
QIU Baoxing. Connotation, approaches and prospects of sponge city (LID) [J]. *Construction Science and Technology*, 2015(1): 1-7(in Chinese).
- [5] XIANG C Y, LIU J H, SHAO W W, *et al.* Sponge city construction in China: policy and implementation experiences[J]. *Water Policy*, 2018, 21(1): 19-37.
- [6] 宫永伟, 刘超, 李俊奇, 等. 海绵城市建设主要目标的验收考核办法探讨[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(21): 114-117.  
GONG Yongwei, LIU Chao, LI Junqi, *et al.* Discussion on acceptance evaluation method of main objectives for sponge city construction [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(21): 114-117(in Chinese).
- [7] CLARY J, STRECKER E, LEISENRING M, *et al.* International stormwater BMP database: new tools for a long-term resource [J]. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2017(15): 737-746.
- [8] CLARY J, QUIGLEY M, EARLES A, *et al.* Expanding the international stormwater BMP database reporting, monitoring, and performance analysis protocols to include low impact development (Part 1) [C]//ASCE. *Proceedings of the 2010 International Low Impact Development Conference*. California: ASCE, 2010.
- [9] 雷景生, 叶文珺, 楼越焕. *数据库原理及应用* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.  
LEI Jingsheng, YE Wenjun, LOU Yuehuan. *Database Principles and Applications* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012(in Chinese).
- [10] 陶宏才. *数据库原理及设计* [M]. 3版. 北京: 清华大学出版社, 2014.  
TAO Hongcai. *Database Principles and Design* [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2014 (in Chinese).
- [11] 车伍, 赵杨, 李俊奇, 等. 海绵城市建设指南解读之基本概念与综合目标[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(8): 1-5.  
CHE Wu, ZHAO Yang, LI Junqi, *et al.* Explanation of sponge city development technical guide: basic concepts and comprehensive goals [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(8): 1-5(in Chinese).
- [12] 袁瑛. 基于UML数据库建模分析与应用[J]. *电脑知识与技术*, 2014, 10(3): 457-460.  
YUAN Ying. Analysis and application of database modeling based on UML [J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2014, 10(3): 457-460(in Chinese).
- [13] 刘爱青. 一种UML建模产生的对象数据库关系模式验证的方法研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2018.  
LIU Aiqing. A Method of Relational Database Schema Validation Based on UML Modeling [D]. Hengyang: University of South China, 2018(in Chinese).
- [14] 孙振桓. 基于J2EE和UML的物联网设备网上推介系统构建[D]. 南京: 南京邮电大学, 2017.  
SUN Zhenhuan. Construction of Online Referral System for IoT Device Based on J2EE and UML [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2017(in Chinese).
- [15] 邓红. 电子商务网络营销平台的安全性分析[J]. *现代电子技术*, 2017, 40(7): 88-91.  
DENG Hong. Security analysis of e-commerce network marketing platform [J]. *Modern Electronics Technique*, 2017, 40(7): 88-91(in Chinese).
- [16] 吴清燕. Web框架下基于用户偏好的电子商务信息系统研究[J]. *现代电子技术*, 2016, 39(23): 144-147.  
WU Qingyan. Research on e-commerce information system based on user preference in Web framework [J]. *Modern Electronics Technique*, 2016, 39(23): 144-147 (in Chinese).
- [17] 王积鹏, 李伯虎. 复杂电子信息系统仿真实验方法体系探讨[J]. *电波科学学报*, 2014, 29(3): 586-594.  
WANG Jipeng, LI Bohu. System of simulation theory and method for complex electronic information system [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2014, 29(3): 586-594(in Chinese).

作者简介: 徐常青(1990- ), 女, 山东青岛人, 博士, 副教授, 研究方向为环境管理、环境系统工程。

E-mail: 2008changqing@163.com

收稿日期: 2019-05-20

修回日期: 2023-02-21

(编辑: 丁彩娟)