

基于 GIS 的水文生态空间数据库及管理系统研发

徐 斌^{1,2}, 张 艳³

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054;

3. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为了解决水文生态空间数据的海量存储、时空一体化管理问题, 探讨 GIS 在自动化、标准化和可视化的数据管理与服务平台构建中的作用, 提高水文生态空间数据管理、分析能力和工作效率。以干旱区新疆石河子垦区为例, 针对基础空间数据和人文生态专题数据, 从数据的分类组织、数据库系统的总体结构、建库技术流程和数据集成方法等方面, 探讨了水文生态空间数据库的设计思想及关键技术, 构建了基于 ArcGIS Geodatabase 的石河子垦区水文生态空间数据库。运用系统工程理论, 对水文生态空间数据库管理系统的总体结构和系统功能进行了设计, 开发了基于 ArcGIS Engine 的水文生态空间数据库管理系统, 实现了水文生态空间数据的数据库管理、数据预处理、数据浏览、数据服务和安全维护功能, 为干旱区水文生态及水安全评价提供了一体化的数据支撑服务平台。研究表明, 通过构建以 GIS 为核心的水文生态空间数据库及管理系统, 实现了水文生态研究中属性数据和空间数据自动化、标准化和可视化的海量存储和统一管理, 增强了水文生态空间数据管理与分析能力, 提高了水文生态研究的工作效率。

关键词: 水文生态; 空间数据库; 地理信息系统

中图分类号: P208 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2018)05-0007-06

长期以来, 对于水文资料处理、保存与服务, 主要采用水文年鉴方式(孙国宾, 2008)。该方式由人工摘录、按水文资料整编规范要求进行分析处理、刊印成年鉴保存及提供服务(孔金玲, 2004)。由于水文资料内容丰富、数据量大、整编规范要求严格等特点, 使得这种资料处理方式费时费力、开销大, 保存年鉴需专门场地、设备和工作人员, 并且不易长期保存。随着在水文领域引入 GIS 技术, 水文数据的管理进入了新的发展阶段, 各类水文数据管理信息系统被开发并应用到相关研究中, 其发展大致经历了基础数据库管理、GIS 集成开发应用、专业模型集成应用 3 个阶段, 目前发展趋势为水文、生态、环境、地质等多学科数据综合管理与时空一体化应用研究(章树安等, 2006; 吴小芳等, 2007)。

水文生态系统研究是 21 世纪以来受到关注的热门课题之一, 解决好干旱地区的水文生态问题, 对于实现水资源的可持续利用和保护干旱区脆弱的生态环境具有深远的意义。水文生态系统中监测种类繁多, 数据量极为庞大, 并且在水文生态空间数据中集成了观测站、点、井的空间位置信息, 将每一条观测数据都关联到具体的位置, 使得数据处理分析的能力从时间轴拓展到空间维度, 将数据的时空特性关联起来分析(张艳, 2010; 李佩成, 2012)。水文数据管理研究为水文生态空间数据的有效管理打下了基础, 但其海量存储、时空一体化、专题分析、可视化表达与高效利用等问题亟待解决。

以 GIS、空间数据库为核心的空间信息技术能够实现空间数据和属性数据统一管理, 图属互相查询, 使水文生态信息的表达能够更为直观, 也更利于专业问题分析。本文就水文生态空间数据库的构建关键技术及水文生态空间数据库管理系统的研发进行讨论, 并依托“111 引智计划—干旱半干旱地区水文生态及水安全学科创新引智基地”项目, 以干旱区新疆石河子垦区为例, 建立干旱区水文生态空间数据库, 设计并开发基于 ArcGIS Engine 的水文生态空间数据库管理系统, 从而实现水文生态空间数据的海量存储和统一管理, 提供自动化、标准化和可视化

收稿日期: 2017-03-02

基金项目: 国家外专局和教育部项目—高等学校学科创新引智计划(B08039); 国家自然科学基金面上项目(41273104); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(310829171005, 310827171006, 310829161010)。

作者简介: 徐斌, 1978 年生, 男, 博士, 工程师, 主要从事地下水科学与工程、地理信息系统和水文水资源的教研工作。E-mail: xubin@chd.edu.cn

通信作者: 张艳, 副教授。E-mail: zyzhangy@chd.edu.cn

的数据管理与服务平台,有效地提高了水文生态空间数据管理、分析能力和工作效率。

1 水文生态空间数据库建设内容

50年来,国家和新疆对石河子垦区的玛纳斯河流域进行了多次大型的综合考察,积累了丰富的资料,包括出版各类专题图件、大量的多媒体数据、历史与实时水文资料、社会经济、水利工程、灌区数据以及多比例尺基础地理图形数据、遥感影像数据、各种专题数据、生态监测数据等(李俊峰等,2006;章曙明等,2007;余凡,2009)。这些数据都是进行流域水文生态管理的基础,为了能有效地管理这些海量数据,更好地实现对石河子垦区水资源的统一管理和相应评价,必须以数据库及空间信息技术为主要技术手段,在统一的规范和标准下,设计合理的存储结构,构建水文生态空间数据库,完成基础数据的采集工作,并建立相应的数据维护管理体系,形成可运行化的水文生态安全海量数据服务平台,有效地为水资源的合理利用和水文生态环境保护提供基础服务,为其他专业研究工作提供数据服务(张艳,2010)。因此,将水文生态空间数据库建设内容重点划分为以下几项内容:

(1)根据国家标准规范、行业标准规范,结合石河子垦区水文生态系统的特殊要求,制定数据代码体系、系统建设规范和标准等,为基础库、专题数据库、成果数据库建设提供统一的标准。

(2)在属性数据采集的基础上,建立水文地质、生态环境、社会经济等专题属性数据库,在数据库统一标准和规范的要求下,进行数据的综合与整理,完成系统开发应用。

(3)在统一的空间框架下,以数字化的各类地形图和专题图为基础,建立流域矢量数据库和数字地面模型,并建立基于GIS平台的数据库管理系统。

2 资料与方法

2.1 数据的标准化设计

为了有效地组织各类空间数据,提高数据传输和利用效率,达到空间数据共享目的,对水文生态空间数据按相关的标准与规范进行标准化,是水文生态空间数据库建设的基础和前提。

引用的标准和规范包括《测绘基本术语(GB/T 14911-2008)》、《国家基本比例尺地形图分幅和编号(GB/T 13989-2012)》、《专题地图信息分类与代码(GB/T 18317-2009)》、《基础地理信息数字产品元

数据(CH/T 10072001)》、《1:5000/1:10000地形图图式(GB/T 5791-1993)》、《地下水质量标准(GB/T 14848-2017)》、《地下水资源数据文件格式(DZ/T 0128-1994)》、《水文地质钻孔数据文件格式(DZ/T 0124-1994)》、《水文地质术语(GB/T 14157-1993)》和中国地质调查局工作标准《地质图空间数据库建设工作指南》。

2.2 水文生态空间数据分类

根据数据标准化设计的要求,结合水文生态研究中的数据功能需求,将水文生态空间数据库的管理内容划分为基础空间数据和人文生态专题数据两大类,各大类数据按空间信息所描述的实体特性不同再分为不同的亚类,各类数据具有各自的空间内涵(Xu & Zhang, 2011a; 2011b; 李磊等, 2013; 曾国金等, 2014; 孙晶等, 2017)。水文生态空间数据的分类结构见图1。

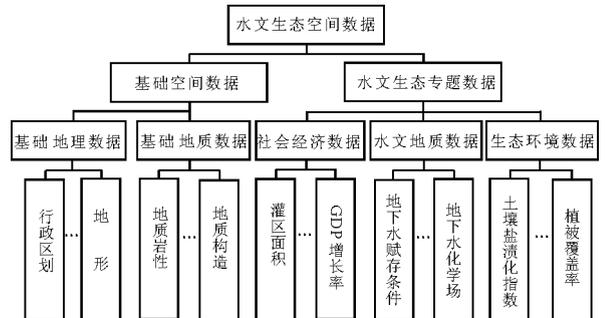


图1 水文生态空间数据分类

Fig.1 Structure of hydroecological spatial data classification

基础空间数据划分为基础地理数据、基础地质数据2个亚类。基础地理数据又包括境界、水系、交通、地形、地貌、植被、测站。境界包括行政区、境界、灌区界;水系包括河流、湖泊、水库、水系附属物;交通包括铁路、公路;地形要素包括等高线、高程点;地貌要素包括不同地貌分区和地貌状态;植被要素包括植被类型和植被分区;测站包括气象测站和水文测站;基础地质数据包括地层、岩性、构造等基础性的地质类空间数据。

水文生态专题数据按照空间数据的专题特征划分为社会经济数据、水文地质数据、生态环境数据3个亚类。社会经济数据包括灌区面积、土地利用类型、国民生产总值、农业产值及农作物播种面积、人口、GDP增长率、灌溉定额等;水文地质数据包括地下水系统分区、区域地下水赋存条件、地下水埋藏特征、地下水水化学场、地下水水动力场、水文地质特征点、水文地质参数分区、水资源开发利用等;生

态环境数据包括土地沙漠化类型、土壤盐渍化程度、土壤含盐量、土壤含水率、植被覆盖率、地下水水位下降速率分区、地下水埋深分区、地下水污染程度分区、地下水矿化度分区以及地下水水质恶化分区。

2.3 数据组织

2.3.1 空间数据组织 空间数据组织是在数据分类的基础上, 根据所使用空间数据库的数据结构进行逻辑划分与物理划分, 与数据分类的层级结构略有不同。水文生态空间数据库以 ArcGIS 的 Geodatabase 为核心数据库, 根据 Geodatabase 空间数据的层次结构模型, 数据的最高层次为数据库, 数据库由图类(数据集)组成, 图类可以分为不同的子图类, 子图类由若干个图层组成, 即: 数据库-图类-子图类-图层。按照数据的这种逻辑层次结构, 将水文生态空间数据库包含的各类数据, 按空间信息所描述的实体类型以及用于描述这些实体特征的属性数据划分为不同的图层。在系统中, 数据以层的形式进行组织与管理。图层划分要考虑到便于图形的操作、管理和计算, 同时考虑数据本身的专业特点(米玮洁等, 2012; 龚健雅等, 2014; 孙晶等, 2017)。如水文生态空间数据库-水文地质数据图类-地下水化学场子图类-水化学类型分区图层。

2.3.2 属性数据结构 属性数据是描述图元的性质、状态、联系、变化规律等特征的非空间数据(孙晶等, 2017)。在信息系统中, 采用 2 种管理方式:

(1) 建立图元的内部属性表, 对内部属性进行组织与管理。

(2) 建立外挂数据库, 对图元的动态特征数据进行管理。

为了提高管理效率, 水文生态空间数据的属性数据采用内部属性表进行组织管理, 在数据表的设计时, 主要考虑属性数据结构设计, 通常包括数据项名称、数据项编码、数据类型、存储长度等内容, 属性数据结构设计要能够充分反映图元的固有特征, 清晰地表达其基本属性。以水文生态监测点的属性数据表为例, 其属性数据结构设计如表 1 所示。其中, 数据项名称和数据项编码用于描述具体的属性, 数据项编码是数据项名称的英文缩写; 类型是用于存储具体属性时使用的数据类型, 如文本、浮点数等; 长度为具体数据类型对应的字节数。每一项属性都有具体的数据取值范围, 如图素名称, 其数据内容包括地下水水位动态观测点、泉流量动态观测点、开采井流量动态观测点、水质动态观测点、土壤含水盐量观测点。

表 1 水文生态空间数据库的属性数据结构

Tab.1 Attribute table structure for the hydroecological spatial database

数据项名称	数据项编码	类型	长度	说明
图元序号	ID	N	8	系统自动给出
图元编号	CHFCAC	C	8	用户按标准定义输入
图素类型编码	CHFCAA	C	8	用户按标准定义输入
图素名称	CHFCAD	C	16	监测点类型
图元名称	GSAE	C	30	图元的实际名称
含水层类型	SWAG	N	3	按 GB/T9649-SWAG 项列填

2.4 水文生态空间数据库的建立

空间数据库建设主要包括资料收集、数据整理、属性数据采集、空间数据采集、遥感影像数据采集、图形编辑、拓扑处理、投影变换、图幅拼接、格式转换、空间数据与属性数据的关联等内容(Zhang et al, 2011a)。水文生态空间数据库的建立借助于 ArcGIS 空间数据管理模块, 以目录树的形式组织空间数据, 数据库建立步骤如下:

(1) 按系统数据库设计结构, 定义和建立各专题数据库。

(2) 按各专题数据库所包含的数据子类内容, 在相应的位置建立要素数据集, 并定义其空间参考。

(3) 按各子类所包含的图层, 在相应位置建立要素类。

(4) 利用 Feature Class to Geodatabase 工具, 将转换后的数据导入到空间数据库。

3 系统设计与实现

3.1 系统结构与功能设计

水文生态空间数据库管理系统是对数据库进行建库、管理、服务、浏览、维护等工作的系统, 由空间数据引擎在系统和空间数据库之间进行数据交换。根据系统的需求目标, 将水文生态空间数据库管理系统划分为数据库管理、数据预处理、数据浏览、数据服务和安全维护共计 5 个模块(Zhang et al, 2011)。系统的功能模块结构如图 2 所示。

3.1.1 数据库管理模块 该模块主要实现数据库的基础维护功能, 包括数据库备份与恢复、数据库访问配置和运行配置, 最大限度保障数据库的可靠运行, 并为数据库损坏等突发情况提供恢复能力。

3.1.2 数据预处理模块 该模块主要完成各类数据的预处理和整编入库工作, 包括新建空白数据库、不同格式数据的导入和导出、数据类型与坐标系统转换、数据整编入库等功能, 为用户提供建立水文生态空间数据库的必要工具。

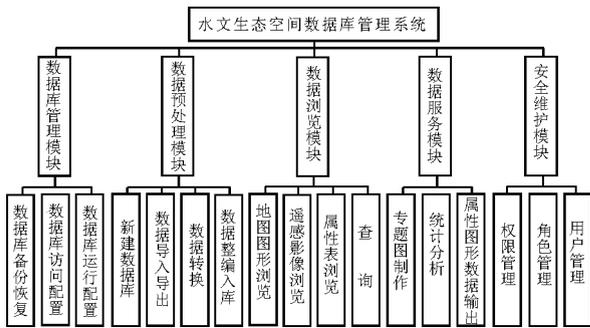


图2 水文生态空间数据库管理系统功能结构

Fig.2 Functional structure of the hydroecological spatial database management system

3.1.3 数据浏览模块 该模块主要实现水文生态空间数据的可视化管理,包括基于SQL的图形属性查询、基于图形的属性浏览、地图与遥感影像的显示功能,对图形数据的可以实时缩放、漫游和坐标定位,同时提供多种形式的人机交互界面,以便于浏览不同类型的水文生态数据。

3.1.4 数据服务模块 该模块主要为水文生态空间数据的分析应用提供服务接口,包括图形属性数据的输出、统计分析、专题地图制作3项主要功能。图形属性数据输出功能从数据库中查找用户所需的数据,将属性数据以Excel或文本格式输出,图形数据则可以转换为图片格式输出;统计分析功能实现属性数据的极值、均值、标准差、变异系数等统计分析,并以直方图、折线图等形式绘制统计图表,便于用户对比分析;专题图制作是用于分析和表现数据的有力工具,以多种颜色、符号和图案将数据直观地绘制于地图上,为用户分析数据现状与发展趋势提供可视化手段。

3.1.5 安全维护模块 该模块用于系统的安全访问维护,包括数据库用户的角色设定、权限设置和用户的增加、删除与修改功能。

3.2 系统实现

按照系统功能和数据库的设计方案,采用可复用式软件体系结构,依托于面向对象分析与设计技术,在Microsoft .Net Framework 框架支持下,结合ArcGIS Engine 平台,开发水文生态空间数据库管理系统。系统实现了数据库管理、数据预处理、数据浏览、数据服务和安全维护等主要功能,并通过友好的用户界面为用户提供方便快捷的操作平台(Zhang et al, 2011; 欧阳斌等, 2014)。

通过综合运用水文生态空间数据库的数据库管理、数据预处理和安全维护功能模块,对新疆石河子

垦区收集整理的数据资料,按照数据标准进行分类、组织和整编入库,建立了水文生态空间数据库,实现数据的高效集成管理,确保了数据的安全与有效性。图3为系统界面与石河子垦区水文生态空间数据库。

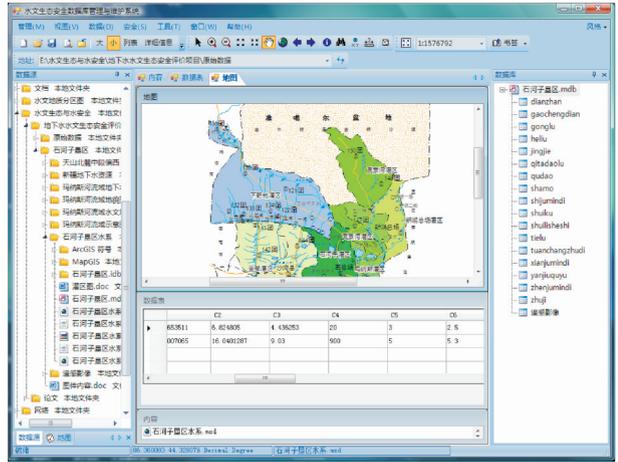


图3 水文生态空间数据库管理系统界面

Fig.3 Hydroecological spatial database management system interface

运用水文生态空间数据库管理系统的数据库浏览和数据服务功能模块,对石河子垦区的水文生态空间数据进行查询与分析,并成功应用于该地区的水文生态安全评价研究中,实现了评价指标筛选、统计分析以及水文生态安全评价图件的综合成图,提高了数据获取与存储的工作效率,丰富了数据分析的技术手段,增强了对科学问题的分析能力,对于研究水文生态系统问题起到了重要的作用。图4为运用查询功能为水文生态安全评价进行指标筛选服务(张艳, 2010; Zhang et al, 2011)。

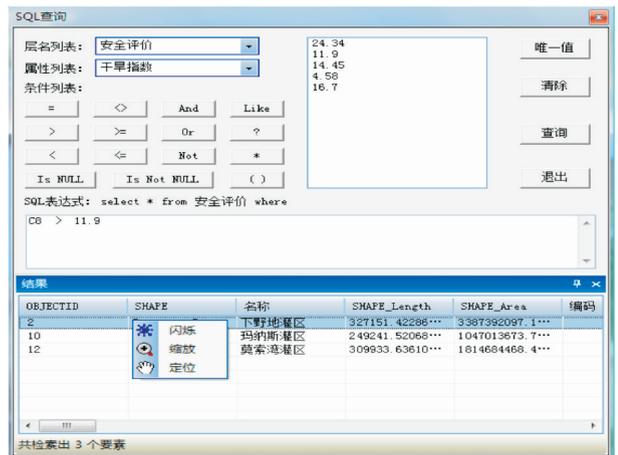


图4 查询功能的实现

Fig.4 Implementation of the query function

4 结语

干旱区水文生态空间数据库是“干旱半干旱地区水文生态及水安全学科创新基地”项目的重要研究成果之一。本文从数据的组织和分类、数据库系统的总体结构、建库技术流程和数据集成方法等方面阐述和探讨了水文生态空间数据库的设计思想及关键技术;以新疆石河子垦区为例,针对基础空间数据和生态专题数据,构建了石河子垦区水文生态空间数据库,实现了水文生态研究中属性数据和空间数据自动化、标准化和可视化的海量存储与统一管理,有效提高了水文生态空间数据管理的工作效率。

在建立水文生态空间数据库的基础上,设计开发了基于 ArcGIS Engine 的水文生态空间数据库管理系统,实现了水文生态空间数据的数据库管理、数据预处理、数据浏览、数据服务和安全维护功能,为干旱区水文生态及水安全评价提供了一体化的数据支撑服务平台,促进了水文生态科学研究技术手段和分析能力的发展。

水文生态空间数据库及管理系统能有效地实现水文生态基础数据与空间图形数据的管理,但对于与水文生态演化密切相关的动态数据管理,仍存在管理效率低、查询复杂等问题,需要在进一步的研究中,结合时空数据模型理论进行完善。

参考文献

- 龚健雅, 李小龙, 吴华意, 2014. 实时 GIS 时空数据模型 [J]. 测绘学报, 43(3): 226 - 232.
- 孔金玲, 2004. 水文地质空间信息系统研究[D]. 西安: 长安大学.
- 李俊峰, 叶茂, 范文波, 等, 2006. 玛纳斯河流域生态与环境需水研究[J]. 干旱区资源与环境, 20(6): 89 - 93.
- 李磊, 徐宗学, 李艳利, 2013. 流域生态水文专题图集的制作[J]. 测绘科学, 38(4): 175 - 177, 183.
- 李佩成, 2012. 论水文生态学的建立及其历史使命[J]. 灌溉排水学报, 31(1): 1 - 4.
- 米玮洁, 胡菊香, 赵先富, 2012. Ecopath 模型在水生态系统

评价与管理中的应用[J]. 水生态学杂志, (1): 127 - 130.

- 欧阳斌, 张连蓬, 刘伟, 等, 2014. 青海湖流域生态环境信息集成平台设计与实现[J]. 工程勘察, (8): 49 - 54.
- 孙国宾, 2008. 浅谈水文数据库开发利用存在的主要问题及对策[J]. 江苏水利, (12): 26 - 27.
- 孙晶, 高井祥, 史绍雨, 等, 2017. 分布式空间数据库在海量卫星影像管理中的应用[J]. 测绘通报, (5): 56 - 61.
- 吴小芳, 胡月明, 徐智勇, 等, 2007. 基于 GIS 的水文信息系统的设计与实现[J]. 水文, 24(4): 71 - 79.
- 余凡, 2009. 基于生态经济功能区划的玛纳斯河流域绿洲生态安全评价[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学.
- 张艳, 2010. 干旱区地下水文生态安全评价信息系统研究——以新疆石河子垦区为例[D]. 西安: 长安大学.
- 章曙明, 王志杰, 尤平达, 2007. 新疆地表水资源研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社.
- 章树安, 吴礼福, 林伟, 2006. 我国水文资料整编和数据库技术发展综述[J]. 水文, 26(3): 48 - 52.
- 曾国金, 凡宸, 邓焕祥, 等, 2014. 基于 ArcSDE 和 ArcServer 的生态环境数据库的构建[J]. 环境科学与技术, 37(S1): 339 - 345.
- Xu B, Zhang Y, 2011a. Constructing and optimizing of index system in evaluation of groundwater hydro-ecological security[A] //Wang W K. Proceedings of 2011 international symposium on water resource and environmental protection[C]. Beijing: IEEE Press; 189 - 192.
- Xu B, Zhang L, 2011b. Groundwater hydro-ecological security evaluation based on generalized multi-level fuzzy comprehensive evaluation model: A case of Shihezi reclamation area in Xinjiang province, China[A] //Wang W K, Proceedings of 2011 international symposium on water resource and environmental protection[C]. Beijing: IEEE Press; 384 - 387.
- Zhang L, Xu B, Zhang Y, Zheng M M, 2011. Research and development of hydro-ecological spatial database and management system[A] //Wang W K, Proceedings of 2011 international symposium on water resource and environmental protection[C]. Beijing: IEEE Press; 1128 - 1131.

(责任编辑 万月华)

Development of a Hydroecological Spatial Database and GIS-Based Management System

XU Bin^{1,2}, ZHANG Yan³

(1.School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054,P.R.China;

2.Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region,

Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054,P.R.China;

3.School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054,P.R.China)

Abstract: A study was carried to solve the problem of mass storage and develop an integrated management system based on hydroecological spatiotemporal data. The role of GIS in automation, standardization, and visualization of data is discussed and a service platform was constructed to improve hydroecological spatial data management, analysis capabilities and efficiency. A typical arid reclamation area of Shihezi in Xinjiang, China was selected as the study area and gathering basic spatial data and hydroecological thematic data was the main objective. Aspects of data classification, the process of structuring the database, data integration methods, design concepts and hydroecological spatial database technology are discussed. The hydroecological spatial database for the Shihezi reclamation area was constructed using ArcGIS Geodatabase and a GIS database management system was developed based on the ArcGIS Engine. The overall structure and functionality of the hydroecological spatial database management system were designed using systematic engineering theory. Procedures for database management, data preprocessing, data browsing, data services and security for the hydroecological spatial database were put in place. The system provides an integrated data support platform for hydroecology and water safety assessment in arid areas. This development project demonstrates that building a hydroecological spatial database and developing a GIS-based management system enhances hydroecological research and improves efficiency.

Key words: hydroecology; spatial database; geographic information system