

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.06.008

菜子湖湿地生态数据库管理系统的设计与实现

成波,江波,李红清

(长江水资源保护科学研究所,湖北武汉 430051)

摘要:在探讨和分析菜子湖湿地生态数据的多源异构、时空相关和水位动态特性的基础上,提出一种基于“图层-对象-状态”的三域时空数据模型,并采用 ArcGIS 平台构建了菜子湖湿地生态数据库管理系统。该系统具有图库管理、查询操作和制图综合等功能,能够直观地呈现菜子湖湿地生境、越冬期水鸟种群数量和分布格局、栖息地选择对水位变化的响应关系,可为菜子湖不同适应性水位优化调度提供科学依据。

关键词:菜子湖;湿地管理;生态数据;时空数据模型;数据库管理系统

中图分类号:TV213.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)06-0046-07

Design and realization of Caizi Lake wetland ecological database management system//CHENG Bo, JIANG Bo, LI Hongqing(*Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan 430051, China*)

Abstract: Based on discussion and analysis of the multi-source heterogeneity, spatio-temporal correlation and water level dynamic characteristics of Caizi Lake wetland ecological data, a three-domain spatio-temporal data model on the basis of “Layer-Object-State” was proposed, and the ArcGIS platform was adopted to construct the Caizi Lake wetland ecological database management system. This system has the function of library management, query operation, cartographic generalization and so on. It can intuitively present the response relationship of the wetland habitat, the population number and distribution pattern of overwintering water birds and the habitat selection to water level changes, which provides scientific basis for the optimal operation of different adaptive water levels in Caizi Lake.

Key words: Caizi Lake; wetland management; ecological data; spatio-temporal data model; database management system

随着计算机技术和对地观测能力的提高,生态监测的方式从以往的单点观测逐渐转变为联网观测,生态监测的方法和手段也从单纯的地面现场调查逐渐转变为航天、航空和地面传感器自动监测与人工实地采样监测相结合的方式^[1-5]。湖泊湿地生态监测是对湖区湿地的水、大气、土壤和生物等方面进行观测^[6],由此产生一系列的与湖泊湿地有关的生态数据。

湖泊湿地生态监测数据往往存在数据碎片化、资源整合度低、信息共享程度差等诸多问题,难以描述和分析湿地生态系统结构、过程和功能的动态变化,无法满足湿地生态系统科学管理的需求。如何有效整合多源异构数据资源并建立生态监测的信息共享平台,推进湖泊生态系统可持续管理和湖泊湿地资源的可持续利用和发展,是

现阶段湖泊湿地资源保护和利用所面临的重要问题和科学难点^[7-9]。近年来,利用地理信息技术,建立了众多湿地管理系统^[10-12],但这些湿地管理系统大多缺乏湿地生态系统时态特性的表达,难以进行时空特性分析。此外,面对随水位动态变化的湖泊,无法揭示动态水位与湿地生态系统之间的相互关系,很难为湖泊湿地管理提供有效的决策信息。

本文在探讨和分析菜子湖湿地生态数据的多源异构、时空相关和水位动态特性基础上,采用数据模型层、数据存储层和数据可视层的架构,设计和开发了基于 ArcGIS 平台的菜子湖湿地生态数据库管理系统,能够更容易地发掘候鸟越冬期水位变化与湿地生态响应的关系,可为菜子湖水水位优化调度提供科学依据。

基金项目:安徽省引江济淮集团有限公司横向项目(H018006,H020008)

作者简介:成波(1989—),男,工程师,博士,主要从事 GIS、遥感在水资源与生态保护中的应用研究。E-mail:chengbo@whu.edu.cn

通信作者:李红清,教授级高级工程师。E-mail:449835011@qq.com

1 研究区概况

菜子湖(东经 $117^{\circ}01' \sim 117^{\circ}10'$ 、北纬 $30^{\circ}43' \sim 30^{\circ}58'$)位于大别山东南侧、长江北岸,地处北亚热带湿润气候区,气候四季分明,多年平均气温 16.5°C ,全年主导风向为东北风,降水受季风气候的影响较为明显,多年平均降水量为 $1\,389.1\text{ mm}$ ^[13]。菜子湖是长江中下游典型的浅水型湖泊,由嬉子湖、白兔湖和菜子湖3个彼此连通的湖泊组成。自枞阳闸建成后,菜子湖从原与长江天然相通变为水库型湖泊。菜子湖水位在7、8月最高,9月湖区水位开始逐渐下降,到次年3月水位又开始逐渐上升,具有明显的动态变化规律^[14]。水位动态变化造成菜子湖湿地生态系统组成动态变化,并进而影响菜子湖湿地生态系统的结构和功能^[15-16]。

菜子湖湿地是越冬候鸟的重要栖息地,对生物多样性维护和生态系统平衡具有重要意义。根据历史监测资料,菜子湖湖区分布有国家Ⅰ级重点保护水鸟4种,国家Ⅱ级重点保护水鸟6种,达到国际重要湿地1%标准的水鸟7种,越冬期候鸟数量也基本维持在20000只以上的水平^[16]。

2 系统需求分析

为了能够掌握菜子湖湿地生态背景状况,探索湿地生态水文过程的变化规律,揭示越冬期水鸟适宜生境和重要水鸟种群数量及分布格局对水位变化的响应关系,开展了生态环境野外监测工作,包括越冬期水鸟、湿地植被、湿地环境因子、湿地生境监测等,产生了大量湖泊湿地生态数据,其数据具有多源异构性、时空相关性和水位动态性等3个方面的特点。

a. 多源异构性。从数据来源来说,湖泊湿地生态数据包括水、大气、土壤和生物等监测数据,数据分布较为分散。除了传统的结构化数值型数据外,监测数据更多的是半结构化和非结构化类型的,例如报告文本、视频图像、遥感影像、地形数据等。由于各类数据的来源多样、结构不一,其数据格式也不尽相同,数据量相较以往也要大得多。

b. 时空相关性。湖泊湿地生态数据是带有时间标签的空间数据,具有时间和空间属性。时间特性描述监测对象在时间维度上的特性,反映其在一段时间内的连续动态性;而空间特性表征监测对象在空间域上的分布,反映其在一定空间内的异质性。二者相结合,表达了湖泊湿地生态系统结构、功能的时空动态变化过程。

c. 水位动态性。水位是揭示湖泊湿地生态水文相互作用过程的主要因素之一。湖泊水位动态变

化将直接改变湖区湿地的分布情况,从而对湖泊湿地生态系统的结构、功能产生影响^[15-16]。特别是浅水区域、泥滩和草本沼泽湿地的分布会随水位动态变化而发生相应的变化,影响着野生动物的栖息和觅食,从而使湖泊湿地生态系统的组成产生变化。

随着GIS技术的迅速发展,可以很好地对空间数据进行存储管理和可视分析。然而,在对菜子湖监测的湖泊湿地生态数据管理上,缺乏高效率的数据组织方法和模型让动态水位能关联不同的监测对象,且能表达湿地生态系统随时间的变化过程。特别是随着对地观测能力的提高,菜子湖湿地生态数据规模迅速增加,与湿地生态系统管理决策需求间的矛盾日渐显现,亟须一种新的数据模型组织数据,并建立数据库管理系统。建立的系统功能需求包括:①统一管理不同来源、不同类型的数据;②跟踪记录不同时间观测的越冬期水鸟、植物多样性、湿地生境等数据;③建立不同水位与不同监测对象之间的相互关系,为揭示水位变化对湿地类型、重要水鸟种群数量和分布格局的影响机制奠定基础。

3 系统设计

针对湖泊湿地生态数据的3个特性,构建了菜子湖湿地生态数据库管理系统的整体架构如图1所示。该架构从逻辑上分为数据模型层、数据存储层和数据可视层。其中,数据模型层设计一种基于“图层-对象-状态”的三域时空数据模型来统一组织;数据存储层根据应用需求及数据来源的不同,分为矢量数据库、栅格数据库和监测数据库,利用Geodatabase数据库对这些多源数据进行存储与管理;数据可视层基于ArcGIS Engine二次开发,提供各种专题图,实现生态数据的可视化。

3.1 基于“图层-对象-状态”的三域时空数据模型

菜子湖湿地生态数据库管理系统底层采用的是三域时空数据模型来组织湖区的湿地生态数据,从上到下依次是图层、对象和状态3个域。采用“分层”的思想将相同来源、相同结构、相同类型的对象组织在同一图层,一个对象在某个时段或某个特定位置的行为、状态等由相应时空范围内的若干连续对象状态来描述,对象状态带有空间位置、水位信息和时间标记,以实现多源异构、时空关联和水位动态的湖泊湿地生态数据的统一组织,表达湿地生境的演化过程,便于后续分析生态水文现象的变化机制。根据以上分析,本文提出一种基于“图层-对象-状态”的三域时空数据模型,用于存储与管理湖泊湿地生态水文过程中所涉及的时空数据,如图2所示。

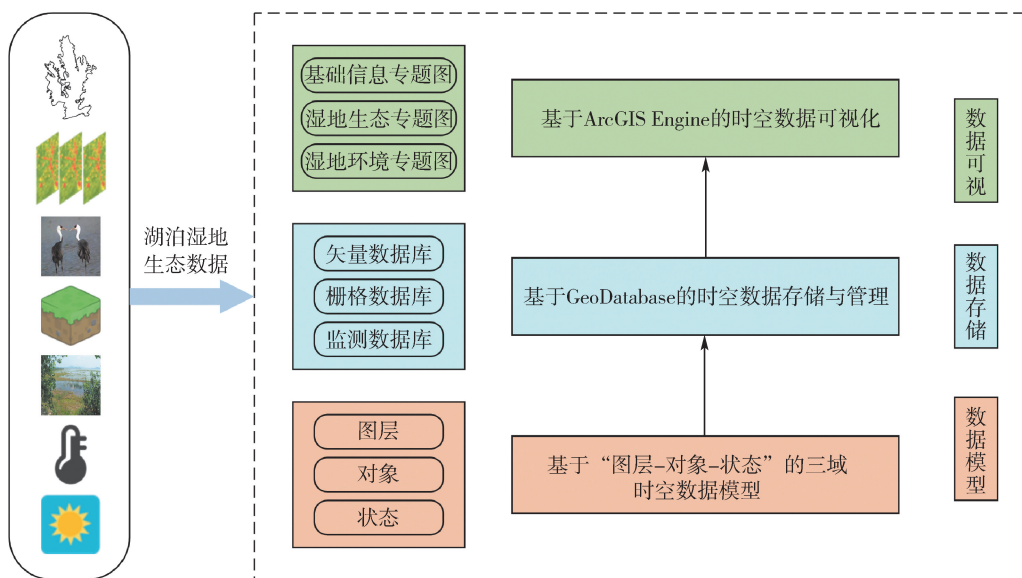


图1 菜子湖湿地生态数据库管理系统架构

Fig. 1 The framework of Caizi Lake wetland ecological database management system

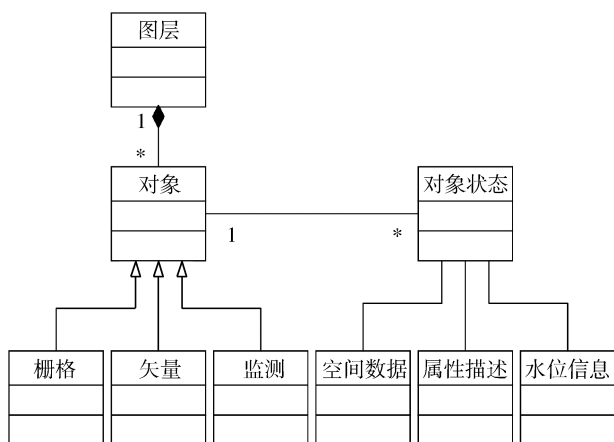


图2 基于“图层-对象-状态”的三域时空数据模型

Fig. 2 Three-domain spatio-temporal data model based on “layer-object-state”

a. 图层。图层是数据组织和管理的基本单位,按照一定的需要把相关的对象组合在一起,实现对复杂信息的分层管理^[17]。考虑到存储管理和应用的需要,同一图层存放相同类型的对象,可以是矢量、栅格和监测类别的。矢量类型数据主要包括点、线、面图层;栅格类型数据主要包括未经处理的原始影像图层和经校正、解译的土地覆盖类型图层;监测数据包括水位、植物、水鸟等要素的监测数据图层。图层间彼此可以相互独立,对一个图层进行修改,不会引起其他图层的改变;图层间也可以相互叠加使用,实现对湖泊湿地生态水文相互作用过程的完整表达。

b. 对象。对象是对现实世界客观存在的物理实体或自然现象的抽象表达,是生态水文现象表达的主体部分,是整个数据模型的基础^[18]。对象参与

和主导着生态水文现象的发生,决定着生态水文现象发展的方向。根据数据来源的不同,对象分为矢量、栅格和监测对象,都具有空间特征和专题属性的描述。研究生态水文交互过程需要围绕对象展开,通过空间特征和专题属性上的变化来对其进行刻画和表达。

c. 状态。状态是对象在某一时刻的数据快照,描述了对对象随时间的变化过程^[19]。状态通常记录了对对象在当前时刻的空间特征和专题属性,其中空间特征描述了对对象所在的空间位置和具有的几何形态信息,专题属性刻画了对对象自身蕴含的语义信息。对象的空间特征或者专题属性可能随时间而发生变化,从而产生一系列的在时间轴上无缝、有序排列的对象状态信息,能够表达对象的整个变化过程。在湖泊湿地生态水文交互过程中,由于湿地生态数据的水位动态特性,状态同时记录了对对象当前时刻的水位信息,通过状态序列数据,有助于分析和挖掘湿地生态系统随水位变化的动态变化过程。

3.2 基于 Geodatabase 的时空数据存储与管理

空间数据库是对真实世界实体的空间特征和空间过程的抽象表达,记录了对对象的几何、属性和位置关系数据,以存储和管理数据的方式来实现对现实世界的描述^[20]。Geodatabase 是一种常用的空间数据库,可以方便地存储空间位置、形状、范围和分布信息,并建立高效的索引,从而快速地将空间信息与属性信息联系起来,为上层应用的分析和决策提供支撑。

考虑到三域时空数据模型中对象存储管理和应用的不同需求,利用 Geodatabase 数据库,分别建立

矢量数据库、栅格数据库和监测数据库,在不同的数据库中,存储和管理不同来源、不同结构、不同类型的湖泊湿地生态数据,便于后续的查询、分析和应用。现有菜子湖湿地生态数据库中的数据组成见图 3。

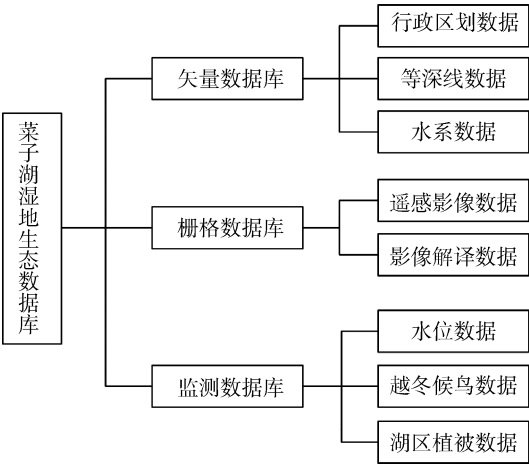


图 3 菜子湖湿地生态数据库数据组成

Fig. 3 Data composition of Caizi Lake wetland ecological database management system

3. 2. 1 矢量数据库

矢量数据库主要用于存放经数字化后的一系列湖泊湿地生态数据,涉及点、线和面 3 种不同的要素类。根据数据的不同来源,按照行政区划、基础地形和水系等图层进行组织。其中,基础地形图层包括菜子湖地形测量的等高点 and 等深线等数据;行政区划数据包括菜子湖所在区域的行政村、居民点数据;水系数据包括菜子湖水系和水系面数据。

3. 2. 2 栅格数据库

栅格数据库主要用于存放长时序的不同分辨率的原始影像和解译成果数据。原始影像数据包括资源三号、高分一号、Landsat5、Landsat7 和 Landsat8 等影像数据,原始影像数据经过影像配准、融合、镶嵌、裁剪和分类等操作后,得到解译成果数据,典型的解译成果数据包括湿地类型分布图和植被类型分布图。按照原始影像和解译成果图层来组织栅格数据,使得它们能够快速地被加载。

3. 2. 3 监测数据库

监测数据库主要用于存放气候、水文以及生物多样性的监测数据。为了更好地了解菜子湖湿地生态系统结构与功能的变化情况,除了采用遥感手段外,还需要利用传统的采样监测技术。通过观测越冬期水鸟种类、数量、时空分布等水鸟多样性信息,植物种类和植物区系、植被类型和分布等植物多样性信息,同时结合水文监测信息,可以研究湖区水鸟生境和种群分布、数量等变化情况,跟踪分析水位抬

升对其带来的影响。

监测数据库记录菜子湖迁徙水鸟及其栖息地生境的监测数据,以图层来组织水鸟、植物、水文等监测对象。其中,水鸟是重点监测的对象,采用路线调查与定点观察相结合的方法,水鸟状态表中记录观察范围内出现的水鸟种类和数量等信息;植物监测对象的数据包括植物的类别、数量、分布等特征信息;水文监测对象是一系列的水位站点,采集的信息主要是水位、水深等数据。

此外,由于监测对象可能一直产生新的状态信息,单个对象状态表的承载能力是有限的,当一个对象状态表存储的记录数量远远大于其所能支持的数量时,会对数据库端造成极大的负载,严重影响对象状态查询等的效率,因此考虑以时间段来拆分对象状态表。当一个对象状态表超过规定的时间段后,自动建立一个新的对象状态表,将后续数据写入新的对象状态表。分区表记录了每个对象状态表的起始时间范围,以及对应的图层。当需要查询某一时段范围内的对象状态记录时,借助分区表,缩小查询的范围,将查询目标确定在一个或几个对象状态表,以提高查询的效率。监测数据库的组成结构见图 4。

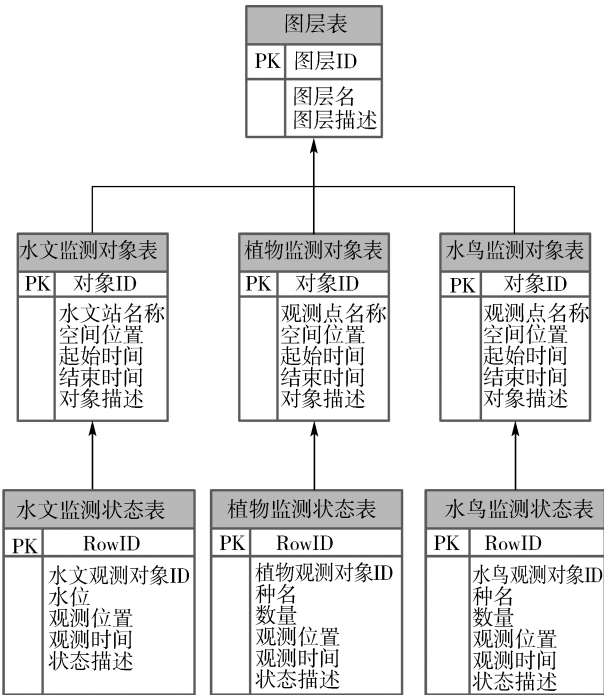


图 4 监测数据库的组成结构

Fig. 4 The component structure of monitoring database

3. 3 基于 ArcGIS Engine 的时空数据可视化

对湖泊湿地数据进行存储管理后,菜子湖湿地生态数据库管理系统还需要满足与时空信息有关的可视化需求,使得生态水文现象随时间变化的过程表达更直观、更容易被理解,从而有利于管理部门对

湖泊湿地的监管、保护和利用。ArcGIS Engine 是一款能够对空间数据进行处理、分析和可视化的组件库,具有强大的开发功能和独立性,可以快速方便地定制出满足不同需求的地理信息系统应用程序的平台。ArcGIS Engine 提供了漫游和缩放地图、绘制和查询要素、制作专题图等制图综合功能。数据可视模块以专题图的形式实现这些湖泊湿地生态数据的空间可视化,大大提高了数据的直观性。

由于湖泊气候、水位、地形条件等因子直接影响湿地生境,借助于数据可视层,通过不同图层生成的专题图,可以直观理解湖泊湿地生态系统组成与各因子间的响应关系。系统主要使用基础信息专题和湿地生态专题 2 种专题图层,其中,基础信息专题图主要是对菜子湖所在区域的行政区划、水系、地形、水位等基础数据进行符号渲染,并以专题图形式直观表达;湿地生态专题图主要是对菜子湖湿地生境的植被和动物等监测数据进行矢量化和绘制等操作,表达它们在空间上的分布。

4 系统实现与应用

菜子湖湿地生态数据库管理系统在 Microsoft Visual Studio. NET 2015 开发环境下,利用两层的 C/S 模式实现矢量、栅格和监测数据的统一存储和管理,其中客户端采用 DevExpress 15.2 开发的可视化界面,服务器端则是基于 Geodatabase 数据库,二者通过 ArcGIS Engine 10.2 组件库来实现数据间的通信。现阶段菜子湖湿地生态数据库中记录了菜子湖 2010—2018 年(水位 6.97 ~ 8.6 m) Landsat 系列和资源三号遥感影像数据及其解译成果数据,2018 年 8 月测量的等深线数据、2018 年 10 月至 2019 年 3 月的越冬期候鸟监测数据、1956—2019 年逐日的水位数据,总数据量约 30 GB。系统主界面包括菜单栏、工具栏、图层管理区、地图显示区等,如图 5 所示。

系统包括图库控制、查询操作和专题制图 3 个模块。其中,图库控制模块可以对矢量、栅格和监测数据进行加载和管理;查询操作模块分为图形查属性和属性查图形功能;专题制图模块可以生成基础信息专题图和湿地生态专题图。

2018 年 12 月,菜子湖车富岭平均水位为 7.34 m,共监测到国家重点保护水鸟 6 种,其中国家 I 级重点保护水鸟 3 种:白头鹤、白鹤、东方白鹤;国家 II 级重点保护水鸟 3 种:白琵鹭、白额雁、小天鹅(图 6(a))。2019 年 1 月,菜子湖车富岭平均水位为 7.42 m,共监测到国家重点保护水鸟 6 种,与 2018 年 12 月监测结果基本一致(图 6(b))。通过对比不同水位下的生态监测数据,可以看出随着水位的变

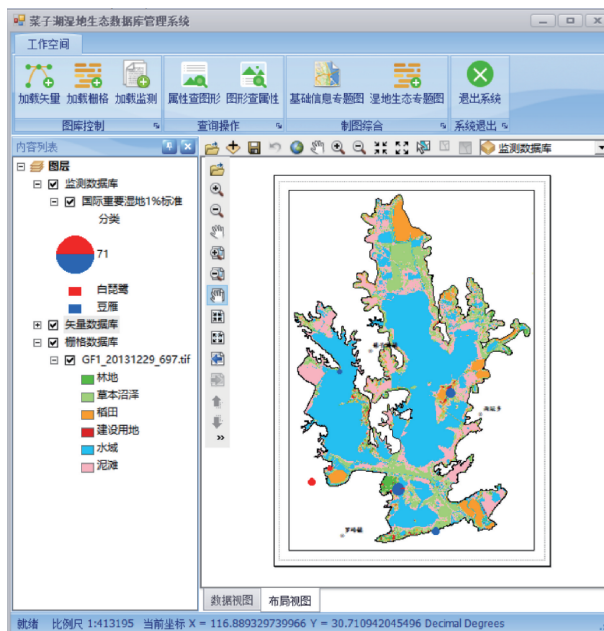


图 5 菜子湖湿地生态数据库管理系统主界面

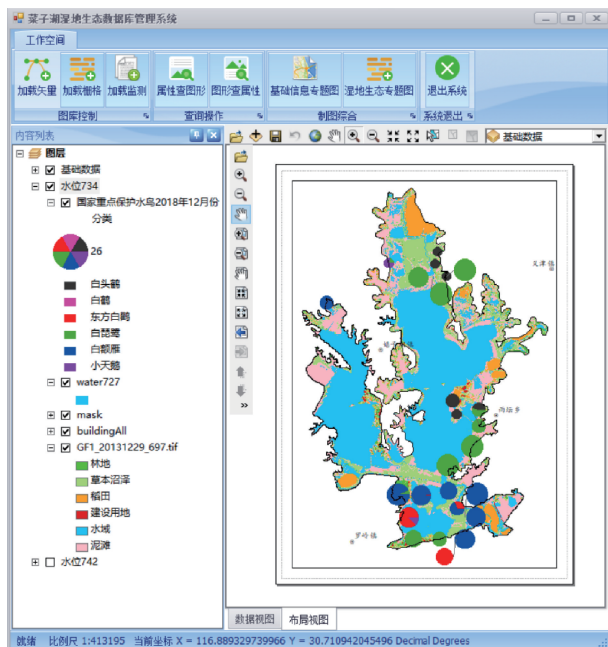
Fig. 5 The main interface of Caizi Lake wetland ecological database management system

化和时间的推移,菜子湖湿地的面积和结构也在不断发生变化,对越冬期水鸟的种类、数量及其栖息分布产生影响。

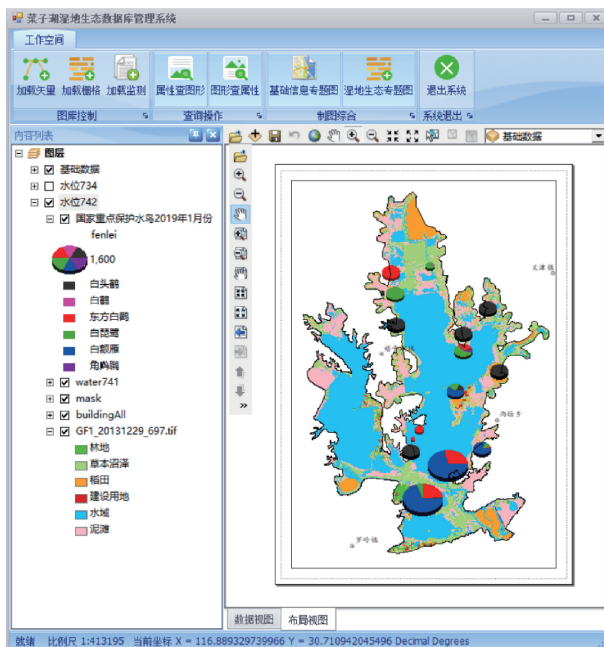
2018 年开始在菜子湖开展野外观测工作,本系统对这些监测数据进行统一存储和管理,能够直观地呈现菜子湖湿地生境、越冬期水鸟种群数量和分布格局、栖息地选择对水位变化的响应关系,用于制定菜子湖水水位调度方案,为菜子湖不同适应性水位下越冬期水鸟种群数量和空间分布格局的预测和评估提供依据。

5 结 语

本文针对菜子湖湿地生态数据的特点,设计和构建了菜子湖湿地生态数据库管理系统,提出一种基于“图层-对象-状态”的三域时空数据模型,以支持湿地生境演化过程的表达;利用 Geodatabase 数据库来对矢量、栅格和监测数据进行统一存储与管理;借助 ArcGIS Engine 实现各种专题图的可视化表达。该系统实现了矢量、栅格和监测数据的组织、存储和管理以及可视化,能直观反映菜子湖湿地生境对水位的动态响应过程,从而为菜子湖不同适应性水位调度对水鸟种群数量和空间分布格局的预测和评估提供依据,实现菜子湖水水位的优化调控和菜子湖湿地的科学管理。目前系统的主要功能是对菜子湖湿地生态数据管理、查询以及可视化,后续需要进一步在数据处理分析和业务化应用等方面进行研究,为水利工程与生态系统协同发展提供参考。



(a) 水位 7.34 m



(b) 水位 7.42 m

图 6 不同水位下菜子湖湿地重要水鸟分布

Fig. 6 The distribution of important water birds in Caizi Lake under different water levels

参考文献:

- [1] 傅伯杰,刘宇. 国际生态系统观测研究计划及启示[J]. 地理科学进展,2014,33(7):893-902. (FU Bojie, LIU Yu. Global ecosystem observation and research programs: evolution and insights for future development[J]. Progress in Geography,2014,33(7):893-902. (in Chinese))
- [2] 马克平. 中国生物多样性监测网络建设:从 CForBio 到 Sino BON[J]. 生物多样性,2015,23(1):1-2. (MA Keping. Biodiversity monitoring in China:from CForBio to Sino BON[J]. Biodiversity Science,2015,23(1):1-2. (in Chinese))
- [3] 李德仁,王密,沈欣,等. 从对地观测卫星到对地观测脑[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2017,42(2):143-149. (LI Deren, WANG Mi, SHEN Xin, et al. From earth observation satellite to earth observation brain [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017,42(2):143-149. (in Chinese))
- [4] 胡天宇,王宁宁,赵晓倩,等. 生物多样性监测网络建设进展[J]. 遥感学报,2018,22(4):709-712. (HU Tianyu, WANG Ningning, ZHAO Xiaoqian, et al. Advances in biodiversity observation network[J]. Journal of Remote Sensing,2018,22(4):709-712. (in Chinese))
- [5] 姜明,邹元春,章光新,等. 中国湿地科学研究进展与展望:纪念中国科学院东北地理与农业生态研究所建所 60 周年[J]. 湿地科学,2018,16(3):279-287. (JIANG Ming, ZOU Yuanchun, ZHANG Guangxin, et al. Progress and prospects of wetland science in China:commemoration on the 60th anniversary of the founding of Northeast

Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences [J]. Wetland Science, 2018, 16 (3): 279-287. (in Chinese))

- [6] 黄琪,方朝阳,胡启武,等. 鄱阳湖南矶湿地生态系统野外监测进展[J]. 湿地科学,2017,15(6):781-788. (HUANG Qi, FANG Chaoyang, HU Qiwu, et al. Progresses of wetland ecosystem field monitoring in Nanji wetland national nature reserve, south of Poyang Lake[J]. Wetland Science,2017,15(6):781-788. (in Chinese))
- [7] 盖世广,窦志国,汤日红. 湖泊湿地生态系统管理研究概述[J]. 湿地科学与管理,2017,13(4):67-70. (GAI Shiguang, DOU Zhiguo, TANG Rihong. An overview of studies on lake wetland ecosystem management research [J]. Wetland Science & Management,2017,13(4):67-70. (in Chinese))
- [8] 马克平,朱敏,纪力强,等. 中国生物多样性大数据平台建设[J]. 中国科学院院刊,2018,33(8):838-845. (MA Keping, ZHU Min, JI Liqiang, et al. Establishing China infrastructure for big biodiversity data [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2018,33(8):838-845. (in Chinese))
- [9] 刘丽香,张丽云,赵芬,等. 生态环境大数据面临的机遇与挑战[J]. 生态学报,2017,37(14):4896-4904. (LIU Lixiang, ZHANG Liyun, ZHAO Fen, et al. The opportunities and challenges presented by ecological environment big data[J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37(14):4896-4904. (in Chinese))
- [10] 陈碧宇,陈晓玲,陈慧萍. 鄱阳湖流域湿地管理信息系统的开发与应用[J]. 地球科学与环境学报,2007,29(2):205-209. (CHEN Biyu, CHEN Xiaoling, CHEN

- Huiping. Development and application of wetland management information system of Poyang Lake Watershed, China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2007, 29(2): 205-209. (in Chinese))
- [11] 刘恒飞, 王同琛. 湿地资源调查与管理的地理信息系统构建[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(11): 139-144. (LIU Hengfei, WANG Tongchen. Construction of geographic information system for wetland resources investigation and management [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2019, 42(11): 139-144. (in Chinese))
- [12] 严瑞, 仇海亮, 汪洋. 基于 GIS 的湿地保护管理信息系统设计与应用[J]. 现代测绘, 2020, 43(2): 62-64. (YAN Rui, QIU Hailiang, WANG Yang. Design and application of wetland protection information system based on GIS [J]. Modern Surveying and Mapping, 2020, 43(2): 62-64. (in Chinese))
- [13] 王钟, 范中亚, 杨忠勇, 等. “引江济淮”工程对安徽菜子湖水龄分布的影响[J]. 湖泊科学, 2018, 30(6): 1576-1586. (WANG Zhong, FAN Zhongya, YANG Zhongyong, et al. Effects of Water Diversion Project from the Yangtze River to Huaihe River on the water age distribution of Lake Caizi, Anhui Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(6): 1576-1586. (in Chinese))
- [14] 刘学文, 李红清, 杨寅群, 等. 基于长时间序列水位数据的长江下游菜子湖候鸟越冬期水位特征[J]. 湖泊科学, 2019, 31(6): 1662-1669. (LIU Xuewen, LI Hongqing, YANG Yinqun, et al. Water level characteristics of Lake Caizi, lower reaches of the Yangtze River during wintering period based on long-term hydrological alteration [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(6): 1662-1669. (in Chinese))
- [15] 姚鑫, 杨桂山, 万荣荣, 等. 水位变化对河流、湖泊湿地植被的影响[J]. 湖泊科学, 2014, 26(6): 813-821. (YAO Xin, YANG Guishan, WAN Rongrong, et al. Impact of water level change on wetland vegetation of rivers and lakes [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(6): 813-821. (in Chinese))
- [16] 王晓媛, 江波, 田志福, 等. 冬季安徽菜子湖水水位变化对主要湿地类型及冬候鸟生境的影响[J]. 湖泊科学, 2018, 30(6): 1636-1645. (WANG Xiaoyuan, JIANG Bo, TIAN Zhifu, et al. Impact of water level change in Lake Caizi (Anhui Province) on main wetland types and wintering bird habitat during wintering period [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(6): 1636-1645. (in Chinese))
- [17] KANTHA L H, CLAYSON C A. An improved mixed layer model for geophysical applications [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1994, 99(C12): 25235-25266.
- [18] 成波, 关雪峰, 向隆刚, 等. 一种面向时空对象及其关联关系动态变化表达的概念数据模型[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(11): 1415-1421. (CHENG Bo, GUAN Xuefeng, XIANG Longgang, et al. A conceptual data model for dynamic changes expression of spatio-temporal object and its association [J]. Journal of Geo-Information Science, 2017, 19(11): 1415-1421. (in Chinese))
- [19] YI J, DU Y, LIANG F, et al. A representation framework for studying spatiotemporal changes and interactions of dynamic geographic phenomena [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2014, 28(5): 1010-1027.
- [20] 吴信才. 空间数据库[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (收稿日期: 2019-09-29 编辑: 熊水斌)

(上接第 38 页)

- [28] TSAI W P, CHANG F J, HERRICKS E E. Exploring the ecological response of fish to flow regime by soft computing techniques [J]. Ecological Engineering, 2016, 87: 9-19.
- [29] 魏卿, 薛联青, 张敏, 等. 淮河流域环境流变化及其对洪泽湖鱼类栖息地的生态影响[J]. 水资源保护, 2019, 35(4): 89-94. (WEI Qing, XUE Lianqing, ZHANG Min, et al. Changes of environmental flow in Huaihe River Basin and its ecological impact on fish habitat in Hongze Lake [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4): 89-94. (in Chinese))
- [30] FIGUEROLA B, MACEDA V A, DE S A. Assessing the effects of sewage effluents in a Mediterranean creek: fish population features and biotic indices [J]. Hydrobiologia, 2012, 694(1): 75-86.
- [31] MACEDA V A, MAC N R, DE S A. Water-quality impacts in semi-arid regions: can natural ‘green filters’ mitigate adverse effects on fish assemblages? [J]. Water Research, 2018, 144: 628-641.
- [32] ZAJICEK P, WOLTER C. The gain of additional sampling methods for the fish-based assessment of large rivers [J]. Fisheries Research, 2018, 197: 15-24.
- [33] 帅方敏, 李新辉, 刘乾甫, 等. 珠江水系鱼类群落多样性空间分布格局[J]. 生态学报, 2017, 37(9): 3182-3192. (SHUAI Fangmin, LI Xinhui, LIU Qianfu, et al. Spatial patterns of fish diversity and distribution in the Pearl River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 3182-3192. (in Chinese)) (收稿日期: 2020-06-24 编辑: 王 芳)