

饮水安全地理信息系统

侯景伟 著



科学出版社

饮水安全地理信息系统

侯景伟 著

国家自然科学基金项目 (41661026)

宁夏大学优秀学术著作出版基金

联合资助

宁夏大学西部一流专业建设经费

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书比较全面、系统地论述饮水安全地理信息系统的基本原理、最新理论、应用方法、编程思想与发展趋势,以及在饮水安全评价、饮水与人体健康、饮用水水源地、饮用地表水、饮用地下水和饮水管网方面的应用和开发实例。

本书内容丰富,范例典型,可作为工程建设指南,也可作为大专院校地理信息科学、水文水资源、计算机科学、资源科学及水利工程等专业的高年级本科生、研究生的教材或参考书,也可供水资源研究、饮水安全管理、城市规划、水资源行政管理、应用型地理信息系统设计与开发的技术人员参阅。

图书在版编目(CIP)数据

饮水安全地理信息系统 / 侯景伟著. —北京: 科学出版社, 2018.9

ISBN 978-7-03-058678-0

I. ①饮… II. ②侯… III. ①饮用水-安全管理-地理信息系统-研究
IV. ①TU991.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 201226 号

责任编辑: 祝 洁 徐世钊 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 9 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 9 月第一次印刷 印张: 11 1/4

字数: 267 000

定价: 90.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

目前地理信息系统 (geographic information system, GIS) 广泛应用于饮水安全领域, 包括饮用水水源及其环境保护、饮用水水质监测检验、饮用水供应系统管理维护、饮用水安全风险评估、饮用水水质与健康关联分析及突发水污染事件应急处置等。但这些研究和应用是碎片化的, 缺乏系统的理论总结和方法概括。因此, 系统地梳理和归纳 GIS 在饮水安全领域中的应用, 形成饮水安全地理信息系统的理论方法体系, 是地理信息分支学科发展的必然, 是扩大和深化 GIS 在饮水安全领域应用的一个紧迫课题, 也是本书出版的根本目的。

本人多年来一直从事 GIS 在饮水安全领域的应用研究, 积累了部分研究成果。为系统地梳理饮水安全地理信息系统的理论方法体系, 交流学术思想, 并将科研成果有效应用于课堂教学, 将自己的部分科研文章重新整理, 并借鉴同行专家和学者的科研成果编纂成书, 供大家参考讨论。

本书比较全面、系统地论述饮水安全地理信息系统的基本原理、最新理论、应用方法、编程思想与发展趋势, 以及在饮水安全评价、饮水与人体健康、饮用水水源地、饮用地表水、饮用地下水和饮水管网方面的许多应用和开发实例。本书结合饮水安全地理信息系统的时代发展, 吸收最新科研成果, 力求创新, 既注重其思想性、理论性和教育性, 也注重其基础性、知识性和实用性, 具有内容比较完备、结构比较合理、实用可操作和可读性强的特点。基本形成科学、完整的饮水安全地理信息系统理论框架和课程体系, 符合地理信息科学课程教学的客观实际, 有利于加强地理信息科学课程建设, 提高学生将 GIS 应用于饮水安全的实践能力和综合素质。

本书涉及的理论、方法和技术等借鉴了一些学者和专家的成果, 既有对别人理论和技术的借鉴、吸收与内化, 又有自己的科研成果、感悟和思想。除了对参考文献中提到的所有学者表示感谢以外, 作者特别引用和参考了以下各位专家和学者的理论、观点、方法和内容, 在此专门列出, 以示特别感谢。第 1 章引用了符刚和刘洪亮 (E-mail: hongliang_liu@sina.com) 等的研究成果; 第 2 章引用了翟俊、何强 (E-mail: hq0908@126.com)、肖海文和杨彦 (E-mail: yy129129@163.com) 等的研究成果; 第 3 章引用了杨春蕾、罗水莲和王若师等的研究成果; 第 4 章引用了孙钰、洪运富、姜鑫、汪先锋、王京、王越兴和韦金喜等的研究成果; 第 5 章引用了刘秀云、贾海峰、崔宝侠、钱胜、陈满荣、王俭 (E-mail: neuwangjian@sina.com)、荆平 (E-mail: Jingpping@eyou.com) 和周兴全等的研究成果; 第 6 章引用了田帅 (E-mail: jason.ts@163.com)、刘国东 (E-mail: liugd988@163.com)、赵旭、周中海、许传音和蔡子昭 (Email: shuiwencai@qq.com) 等的研究成果; 第 7 章引用了史义雄、于志斌、李海荣、吴科可、刘明春、刘烜、施银焕 (Email: 343119531@qq.com) 和蒋树芳 (Email: jiangsf@igsnr.ac.cn) 等的研究成果; 第 8 章引用了黄文彬等的研究成果。另外, 宁夏大学资源环境学院研究生余国良、武丹、

孙嘉欣和马永强分别为本书的第2~4章和第8章的资料搜集和初稿写作做了一些前期工作，在此一并感谢！

本书得到宁夏大学优秀学术著作出版基金、宁夏大学西部一流专业建设经费和国家自然科学基金项目（41661026）的资助，在此一并感谢！

最后，感谢科学出版社编辑祝洁、徐世钊和其他工作人员为本书的出版付出的辛勤劳动。

“书一旦脱稿之后，便以独立的生命继续生存了”（尼采）。但完成了最后一次书稿修改后，深觉惭愧。自己思考和研究了多年的“饮水安全地理信息系统”这个主题，由于成书匆匆，深感在结构安排、理论凝练、思路整理、体系构成和文字表达等方面都有所不足，囿于水平，书中不妥之处在所难免，恳请各位专家和读者批评指正。

侯景伟

2018年1月于宁夏大学

目 录

前言

第 1 章 饮水安全地理信息系统概述	1
1.1 饮水安全问题	1
1.2 地理信息系统	2
1.3 饮水安全地理信息系统及其应用	5
第 2 章 基于 GIS 的饮水安全评价	10
2.1 基于 GIS 的城市饮水安全评价	10
2.2 基于 GIS 的农村饮水安全评价	15
2.3 基于 GIS 的饮水污染评价	22
第 3 章 饮水安全地理信息系统与人体健康	26
3.1 不安全饮用水对人体健康的危害	26
3.2 饮水安全对人体健康影响的 GIS 方法研究	29
3.3 GIS 在饮水安全与人体健康关系中的应用	31
第 4 章 饮用水水源地地理信息系统	37
4.1 饮用水水源地空间分析方法	37
4.2 “3S” 技术在饮用水水源地中的应用	41
4.3 水源地水质监测与评价地理信息系统开发	46
第 5 章 饮用地表水地理信息系统	50
5.1 基于格网 GIS 的饮用地表水质量评价	50
5.2 GIS 与地表水水质模型 WASP5 的集成	54
5.3 基于 GIS 的饮用地表水环境影响评价	56
5.4 基于 GIS 的饮用地表水环境功能区划	59
5.5 饮用地表水监测地理信息系统的开发与设计	61
第 6 章 饮用地下水地理信息系统	64
6.1 基于 GIS 和 FEFLOW 的地下水数值模拟	64
6.2 基于 GIS 的地下水水化学特征及空间规律	80
6.3 基于 GIS 的地下水脆弱性评价	89

6.4	BP 与 GIS 耦合的地下水水质评价·····	95
6.5	地下水污染调查信息系统的开发与设计·····	98
第 7 章	饮水管网地理信息系统·····	102
7.1	饮水管网地理信息系统概述·····	102
7.2	城市供水管网地理信息系统的设计与实现·····	104
7.3	基于二三维一体化的城市给水管网空间分析·····	108
7.4	基于 GIS 的水务管网综合管理系统设计与实现·····	110
7.5	基于 GIS 和 GPS 的供水管网巡检养护系统设计·····	116
7.6	基于移动 GIS 的供水管网信息采集与管理·····	120
7.7	基于 GIS 的供水管网水力模型拓扑结构更新·····	122
7.8	基于 GIS 的输配水系统规划·····	124
7.9	人畜饮水管网地理信息系统的设计与开发·····	134
第 8 章	饮水安全地理信息系统设计与开发·····	140
8.1	饮水安全信息查询系统的开发与设计·····	140
8.2	饮水安全应急响应系统的开发与实现·····	144
8.3	饮水安全评价与预测系统的开发与实现·····	151
	参考文献·····	157
附录 1	全国重要饮用水水源地名录（2016 年）·····	163
附录 2	生活饮用水卫生标准（GB 5749—2006）（摘要）·····	172

第 1 章 饮水安全地理信息系统概述

本章概述了饮水安全的定义、饮水安全的重要性及饮水不安全的极大危害；地理信息系统的基本概念、发展现状、数据结构、数据源、空间分析及软件与开发；饮水安全地理信息系统的基本概念、基本组成、主要空间分析方法、主要特点和主要应用案例。

1.1 饮水安全问题

民以食为天，食以水为先，水以安为基。

饮水安全（drinking water safety）指从取水、供水、二次供水和饮水到遇到突发水污染事件影响供水的整个过程中，通过某种技术或方法彻底去除水中的细菌、农药残留、重金属等安全隐患，使饮用水达到国家生活饮用水标准。饮水安全包括饮用水水源、水量、水质和获得饮用水的方便程度等内容。

拥有足量、卫生、持续的饮用水是人类生存和健康的必要保证，是社会稳定和国家长治久安的基本需求。美国科学家约瑟华·巴兹勒（2003）曾指出，水中的任何污染物，即使极其微量，也可能在人体内终身存在，并不断累积，对人体及其子孙产生有害影响。饮用水中任何污染物即使发生很小的变化，也会对饮用者个人和社会带来显著且长期的影响。一处饮用水水源一旦受到污染，最终会使别处的水源也受到影响，而且造成的后果会增大许多倍（王强等，2010）。

日本著名医学博士林秀光先生在其著作《因水而死》中大声疾呼：“人类每年饮用水不干净是疾病的主要原因，如果不改变水的质量，人类将因水而死亡”。世界卫生组织研究表明，80%的疾病率和 50%的儿童死亡率都与饮用水的水质有关，由于饮水不安全而导致的疾病多达 50 多种，如消化疾病、癌症、皮肤病、传染病、糖尿病和心血管病等。美国在饮用水中发现的化学污染物已超过 2100 种，其中有 1900 种污染物被确认对健康不利，已确认的致癌物和可疑致癌物有 107 种，另有 133 种是致突变、致肿瘤污染物或有毒污染物，其余 1660 种污染物中是否有或有多少致癌物和毒性尚未确定。世界上平均每天有 2.5 万人死于通过水传染的疾病，平均每 8 秒钟就有一名儿童死于与水源有关的疾病。饮水安全问题已经严重威胁到人们的身体健康。

中国是世界上污水排放量最大也是增长最快的国家之一。中国科学院 1996 年发布的国情研究报告指出：全国 532 条流经城市的河流中，436 条已受到不同程度的污染；7 大江河流经的 15 个大城市的河段中，13 个河段受到污染；全国 90% 以上的城市水域已经受到不同程度的污染。水利部 2015 年监测了黄淮海平原、松辽平原、江汉平原、山西及西北地区盆地和平原的 2103 眼地下水水井，其中 IV 类水水井 691 眼，占 32.9%；V 类水水井 994 眼，占 47.3%，两者合计占比为 80.2%。2016 年 1 月，全国主要平原区由于地下水严重超采而使储存量比 2015 年同期减少 82.4 亿 m^3 。

1996 年国务院发展研究中心、国家教育委员会和卫生部等 13 部委联合发文指出：全国 97% 的人正在饮用有害的污染水，其中有 7 亿人饮用水大肠杆菌超标，3 亿人饮用水含铁量超标，1.7 亿人饮用水受到有机物的污染，1.1 亿人饮用高硬度水，0.7 亿人饮用高氟水，0.5 亿人不得不饮用高硝酸盐水，全国 35 个重点城市只有 23% 的居民饮用水基本符合卫生标准。据不完全统计，1996~2006 年我国饮用水污染案例共 271 起，涉及人数达 700 余万，其中 30798 人出现感染或中毒症状。卫生部 2011 年发布的《中国妇幼卫生事业发展报告（2011）》称，我国婴儿出生缺陷发生率由 1996 年的 87.7 万人上升到 2010 年的 149.9 万人，五年增长率为 70.9%。据调查，广东珠江三角洲地区新生儿先天性疾病（怪胎、贫血、心脏病和畸形胎等）发病率逐年提高，这些都是镉、汞和砷等重金属及化学污染物等环境激素造成的。2016 年发生了多起突发水污染事件，如广东省肇庆市怀集县城区饮用水源铊超标事件、福建省漳州市平和县自来水取水口水源铊超标事件和湖南省益阳市桃江县水厂水源锑超标事件，为饮水安全带来了重大风险。

水源污染速度已远远大于污水处理厂处理污水的能力。近 70% 的饮用水水源不符合国家规定的水源水质标准（罗兰，2008）。全国 1333 处水源地中，约有 3/4 为地表水水源地，1/4 为地下水水源地，北方多以地下水为主要饮用水水源（附录 1）。地下水水源污染物超标比例明显高于地表水水源，且污染持续的时间较后者更长（表 1-1）。

表 1-1 地表水和地下水水源污染因子构成及其所占比例 (单位：%)

地表水污染因子	氨氮	硫酸盐	高锰酸盐指数	锰	铝	BOD ₅	总磷	挥发酚	石油类
所占比例	15	12	2	8	8	8	31	4	12
地下水污染因子	氨氮	硫酸盐	高锰酸盐指数	锰	铁	氟化物	总硬度		
所占比例	17	8	1	29	28	4	13		

为了评价生活饮用水的安全卫生状况，我国制定了《生活饮用水卫生标准》（GB 5749—2006）。该标准共涵盖了 106 项水质指标，可分为感官性状指标、一般化学指标、微生物指标、毒理指标和放射性指标（附录 2）。安全饮用水首先要确保流行病学和水质微生物学质量的安全性，防止介水传染病的发生和传播；其次确保人群终身饮用不会引发急、慢性中毒和潜在的远期危害；然后确保感官性状良好，无色、无嗅和无味；最后必须要消毒，通过氯仿、二氯乙酸、氯化腈、溴酸盐、甲醛和亚氯酸盐等消毒剂或者紫外线消毒以杀死或灭活致病微生物，且饮用水中的消毒副产物不超过规定标准。

事实上，饮水安全所涉及的饮水过程（包括取水、供水、二次供水和饮水等）、饮水管理（包括监测、考核和评价等）、饮水产品（包括器具、设备和管材等）是在一定的地理空间中存在和运行的，都具有特定的地理位置信息。因此，将地理信息系统引入饮水安全的评价、管理、预测、可视化和分析等过程是饮水安全的发展趋势。

1.2 地理信息系统

地理（geography）是研究地球表面环境中各种自然现象和人文现象，以及它们之间相互关系的学科。信息（information）是通过某些介质向人们（或系统）提供关于现实世界新的事实的知识，它来源于数据且不随载体变化而变化，具有实用性、客观性、共

享性和传输性的特点。数据(data)是定性、定量描述某一目标的原始资料,包括文字、数字、符号、语言、图像和影像等,它具有可识别性、可扩充性、可存储性、可传递性、可压缩性和可转换性等特点。信息与数据是不可分离的,信息来源于数据,数据是信息的载体。数据是客观对象的表示,而信息则是数据中包含的意义,是数据的内容和解释。对数据进行处理(排序、运算、分类、编码和增强等)就是为了得到数据中包含的信息。数据包含原始事实,信息是数据处理的结果,是把数据处理成有意义和有用的形式。

地理数据(geographic data)是各种地理特征和现象间关系的符号化表示,是表征地理环境中要素的数量、质量、分布特征及其规律的数字、文字和图像等的总和。地理数据主要包括空间位置数据、属性特征数据及时域特征数据三个部分。空间位置数据描述地理对象所在的绝对或相对位置。属性特征数据是描述特定地理要素特征的定性或定量指标,如公路的等级、宽度、起点和终点等。时域特征数据是记录地理数据采集或地理现象发生的时刻或时段。空间位置、属性特征及时域特征构成地理空间分析的三大基本要素(刘南等,2002)。地理信息(geographic information)是地理数据中包含的意义,是关于地球表面特定位置的信息,是有关地理实体的性质、特征和运动状态的表征和一切有用的知识。地理信息具有客观性、可存储性、可传输性、可转化性、可共享性、区域性、空间层次性和动态性的特点。

GIS是在计算机硬件和软件系统的支持下,对整个或部分地球表层(包括大气层)的空间数据进行采集、存储、检索、管理、运算、分析、显示和描述的具有学科边缘性、综合性和交叉性的技术系统。GIS能够处理地球表面空间要素的位置和属性,即两种数据类型:与空间要素几何特性有关的空间数据和提供空间要素信息的属性数据。GIS以图形文件保存和管理空间数据,用关系数据库和数据表保存、管理属性数据,并通过要素标识码将二者连接起来(陈述彭,1999)。

1967年,“地理信息系统之父”——罗杰·汤姆林森博士开发出世界上第一个加拿大地理信息系统(Canada Geographic Information System, CGIS)。该系统提供了等级分类、覆盖和资料数字化/扫描功能,支持横跨大陆的国家坐标系统,在单独的文件中存储属性和区位信息,将线编码为具有拓扑结构的“弧”,以存储、分析和利用加拿大1:50000比例尺的农业、土壤、休闲、水禽、野生动物、土地利用和林业地理信息。随着微型计算机硬件的发展,美国环境系统研究所公司(Environmental Systems Research Institute, ESRI)等供应商兼并了大多数的CGIS特征,实现了空间与属性信息的分离以及对属性数据的组织。20世纪80~90年代,GIS的UNIX工作站和个人计算机桌面版得到了长足发展。20世纪末,WebGIS(万维网地理信息系统)的发展要求数据的格式和传输标准化,适应了GIS大众化的发展趋势。目前,GIS与全球定位系统(global positioning system, GPS)、遥感(remote sensing, RS)已经实现有效集成,构成“3S”系统,极大地促进了GIS的发展。

现实世界的客观对象(如土地利用、公路和海拔)可抽象为离散对象(如房屋)和连续对象(如海拔、降水量)。这些抽象体在GIS中以矢量和栅格形式存储。矢量数据利用点、线和面表现客观对象。例如,住房边界以多边形表示,住房位置以点来精确表示,海拔用等高线或不规则三角形网(triangular irregular network, TIN)来表示其连续变

化性。栅格数据由存放唯一值存储单元的行和列组成，各个单元记录的数值可以是土地使用状况、降水量或空值。

GIS 需要采集的数据源可以是印在纸或聚酯薄膜地图上的现有数据，通过扫描和数字化产生的向量数据，测量器械上的测量数据，GPS 的测量数据，航空器和卫星平台所携带的摄像机、数字扫描仪、激光雷达产生的遥感数据和航空照片。不同数据源输入到 GIS 中后，还要进行编辑，以消除错误或进一步处理。GIS 通过数据重构实现不同数据格式的转换，如卫星图像转换成向量结构、投影与坐标变换、具有相同分类的所有单元周围生成线、邻接和包含等空间拓扑关系的确定。

空间分析是 GIS 的主要功能，也是 GIS 与计算机制图软件相区别的主要特征。空间分析是从空间物体的空间位置、联系等方面对空间事物做出定量的描述，以空间统计学、图论、拓扑学和计算几何等为数学工具，以地理学、区域科学、经济学、大气科学、测绘学、地球物理学和水文水资源学等为理论基础，描述和分析空间构成，理解和解释地理图案的背景过程，模拟和预测空间动态过程，调控和优化地理空间事件（秦昆，2010）。

目前常用的 GIS 软件已达 400 余种，如 ESRI 的 Arc/Info 和 ArcView、美国 MapInfo 公司的 MapInfo、中国地质大学的 MapGIS 和北京超图地理信息技术有限公司的 SuperMap 等。

GIS 的开发工具主要有四种。①组件式 GIS：其核心技术为组件对象模型（component object model, COM）和 ActiveX 控件，有标准的开发平台和简单易用的标准接口，能自由、灵活地重组，如 ESRI 公司的 MapObjects。②集成式 GIS：其集合了各种功能模块的 GIS 开发包，如 ESRI 公司的 ArcGIS 和 MapInfo 公司的 MapInfo。③模块式 GIS：其是把 GIS 系统按功能分成一些模块来运行，如 Intergraph 公司的 MGE。④WebGIS：其是利用网络技术扩展和完善 GIS 的新技术，如 MapInfo 公司的 MapInfo ProServer。

GIS 可以分为人员、数据、硬件、软件和过程 5 部分。一个地理信息系统项目可能包括以下几个阶段：定义一个问题、获取软件或硬件、采集与获取数据、建立数据库、实施分析、解释和展示结果（图 1-1）。

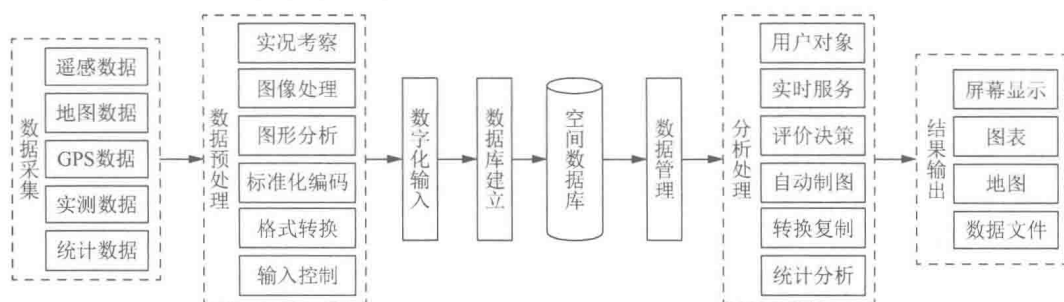


图 1-1 地理信息系统的工作流程

GIS 具有公共的地理定位基础，具有采集、分析、管理和输出多种地理空间信息的能力；以分析模型驱动，具有极强的空间综合分析和动态预测能力，并能产生高层次的地理信息；以地理研究和地理决策为目的，是一个人机交互式的空间决策支持系统。因此，GIS 已在国土资源、房地产、公共卫生、测绘、地矿、规划、景观建筑、考古、交

通、国防、水利、农业、林业和电力等领域得到广泛应用。

饮水安全可以表达成一系列地理信息要素和地理现象的集合。目前 GIS 在饮用水水源及其环境保护、饮用水水质监测检验、饮用水供应系统管理维护、饮用水安全风险预估、饮用水水质与健康关联分析和突发水污染事件应急处置等方面取得了一定的研究进展, 预示着其广阔的应用前景。

1.3 饮水安全地理信息系统及其应用

1.3.1 饮水安全地理信息系统

饮水安全地理信息系统 (geographic information system for drinking water safety, GIS-DWS) 是地理信息系统的一个分支, 在计算机硬件、软件和网络系统的支持下, 对涉及饮水安全的空间数据进行采集、存储、管理、查询、检索、处理、分析、运算、显示、更新和应用, 实现饮水安全科学化、可视化、智能化的管理、规划和决策。

饮水安全地理信息系统是 GIS 在饮水安全评价和规划、水源地管理及饮水管网优化配置等饮水安全领域中的具体应用 (Daene et al., 1993)。GIS-DWS 将饮水安全空间信息按其特性在空间数据库中进行分类和分层管理, 通过输入、存储、管理、空间查询、空间分析和显示等功能实现 GIS 与饮水安全信息分析和处理技术的集成, 是 GIS 技术在饮水安全领域的延伸。通过建立饮水安全地理信息系统, 实现饮水安全各种信息的数字化、标准化和计算机化, 从而达到统一管理、数据共享和办公自动化。

饮水安全地理信息系统由五部分组成。①GIS 硬件: 其是对空间数据进行输入、存储、查询和输出的基础平台, 包括主处理设施 (大中小型机、工作站、微机)、显示设备 (显示器)、外部存储设备 (硬盘和 XCD-ROM)、输入设备 (键盘、鼠标、数字化仪、绘图仪、打印机) 和网络连接设备 (网卡、网络配件) 等。②GIS 软件: 其是饮水安全地理信息系统的核心, 在计算机硬件系统的配合与协调下, 执行饮水安全地理信息系统各种功能的操作。③地理数据: 其包括描述与饮水安全有关的属性数据和空间数据。属性数据说明某个地理事物或现象是什么, 如地下管线的用途、管径和埋深; 空间数据通过点、线和面描述地理事物或现象在哪里。④应用分析模型: 其根据所表达的空间对象可分为理论模型 (数学模型)、经验模型和混合模型; 根据研究对象的状态和发展过程可分为静态模型、半静态模型和动态模型。建模步骤包括明确分析目的和评价准则、准备分析数据、空间分析操作、结果分析、解释和评价结果及结果输出。⑤参与饮水安全地理信息系统的人: 人是整个饮水安全地理信息系统得以运行的灵魂。人是 GIS 硬件的制造者、软件的开发者、数据的生产者、模型的建立者和项目的实施者。

饮水安全地理信息系统除了基本的编辑、显示和测量功能外, 空间分析是该系统的核心, 其中空间插值、叠加分析、地形分析和管网优化为饮水安全提供了强大的空间信息服务和广阔的应用空间。

空间插值常用于将离散点的测量数据转换为连续的数据曲面, 包括空间内插和空间外推两种算法。空间内插算法是通过已知点的数据推求同一区域未知点的数据。空间外

推算法是通过已知区域的数据,推求其他区域的数据。常用的空间插值方法有样条函数内插、双线性内插、最小二乘法内插、多项式拟合内插和移动拟合内插等。

叠加分析是通过多个图层在空间上的叠合来比较地图要素和属性特征,分为合成叠加和统计叠加。合成叠加得到一个新图层,它将显示原图层的全部特征,交叉的特征区域仅显示共同特征;统计叠加是统计一种要素在另一种要素中的分布特征。

地形分析主要通过数字高程模型(digital elevation model, DEM),以离散分布的平面点来模拟连续分布的地形,为饮水安全规划和设计创建一个三维地表模型,通过 DEM 的等高线、坡度和坡向等分析,为水源地、管网等的管理和规划提供基础数据。

管网优化是将建造、运行、维护费用和节点富余水头纳入目标函数,在保证管网经济性和使用要求的前提下,提高管网的可靠性。借助一些智能算法(遗传算法、蚁群算法等)在 GIS 平台上对供水管网的管径组合和铺设路径进行优化。

饮水安全地理信息系统的特点如下。①与一般地理信息系统相比,饮水安全地理信息系统的服务对象具有多样性。既要考虑水政主管和业务部门的管理、评价、分析、规划和预测需要,又要满足公众的查询等需求。②数据类型的复杂性。既有基础地理数据,又有资源、环境、社会和经济数据;既有多时相的时间数据,又有多层次的结构数据;既有以遥感为源的栅格数据,又有以图形为主的矢量数据,还有关系型的统计数据。③采集的数据要求精度很高。由于饮水安全关乎人体健康和人类生命,饮用水中某些浓度值很低的污染物可能对人体造成巨大的伤害,准确测得其含量至关重要。④信息更新的现势性很强。信息的及时更新是饮水安全地理信息系统真正为各类用户服务的基础,是确保饮水不安全造成的危害降到最低的前提。⑤模型化。饮水安全的评价、分析、预测和优化都需要有一整套的模型嵌入地理信息系统软件中,实现饮水安全的可视化评价、智能化分析和最优化管理。⑥实用化。饮水安全地理信息系统的用户明确,目标清楚,具有十分迫切的实用化需求,以实现经济效益和社会效益的有效统一。

1.3.2 饮水安全地理信息系统的应用

1. GIS 在饮用水水源及其环境保护中的应用

GIS 可应用于饮用水水源的污染监测、保护和规划(符刚等, 2015)。庄严等(2014)应用 RS、GIS 和 GPS 研究了蓝藻的空间分布,利用 GIS 的插值分析对 20 个 GPS 定位的监测点的叶绿素和蓝藻密度进行空间扩展,制作了分布专题图和环境一号卫星遥感影像图。陈家模等(2013)以 ArcGIS 为平台,建立基于 GIS 的水环境信息管理系统,利用市县边界、水库水源地、河流、水质和污染企业等环境监测数据和空间数据分析水质污染情况,利用实时检测数据动态监控水质的变化,解决了水环境的综合治理问题。顾蓓瑜等(2013)利用 ArcGIS 软件分析太湖水质及其富营养化状况,通过 GPS 精确定位 20 个采样点,利用 GIS 的空间插值功能绘制了太湖的总氮、总磷和溶解氧等富营养化指标的指数分布图,发现各项水质指标及富营养化指数呈现“西部高、东部低”的分布规律,其中竺山湖水域的污染最严重。左冠涛等(2013)基于 GIS 平台设计开发了郑州市水环境地理信息系统,该系统主要有 7 大功能模块:水环境质量模块、总量控制模块、

水环境统计模块、污染源监测模块、水环境容量分析模块、水质分析模块和排污申报登记模块,实现了对各类水环境数据的规范化管理。

2. GIS 在饮用水供应系统优化与管理中的应用

GIS 为输配水管网和供水构筑物等饮用水供应系统的空间优化和管理维护提供了可视化的途径(田一梅等,2000)。GIS 能直观、准确和全面地反映地上和地下饮水管线的空间特征、属性特征及相互关系,实现对输配水管网的实时、高效和动态管理。GIS 以数据库为核心,在供水管网管理中主要应用于现场工作管理、管网运行管理和资产管理。GIS 技术应用于供水管网的管理中,带来了巨大的经济效益和社会效益。陈文丰等(2009)在汕头澄海区建立了供水管网地理信息系统,利用道路、水系、桥梁、埋深、管线走向、监测点、分支节点和测压点等空间信息,在爆管事故中选择最优的关阀方案,分析爆管事故涉及的停水范围,结合供水调度系统和在线监测系统实时调度和监测饮用水,为综合调度和应急抢修提供科学的管理。吕琼帅等(2013)利用遗传算法和 GIS 优化饮水管网的铺设,即利用遗传算法设计适应度函数和总成本最低的评判标准,对管网铺设方案进行适应度计算和结果评判,反复迭代,直至选出最优的管网铺设路径;利用 GIS 的空间分析功能自动避开不可能铺设的限定区域,并计算铺设管网的直接和间接成本,得到一组最优的布局方案,使管网长度减少了 9.81%,投资总成本降低了 6.84%。肖靖峰等(2012)利用 ArcGIS 平台管理大型厂区地下 32 种、数十万条管线的复杂管网,在服务器端利用 GIS 处理和分析地下管网信息,包括获取、管理、存储、查询、分析、更新和输出等操作,实现对厂区地下管网的数字化管理。

3. GIS 在饮用水水质监测与评价中的应用

GIS 可以利用多种空间插值方法对有限的饮用水点源监测数据进行空间扩展(魏加华等,2003),通过制图符号化在地图上直观显示饮用水水质的空间分布规律,也可以通过增加时间滑块显示水质监测结果的时间变化,实现监测结果的空间和时间可视化(Wicnand et al., 2009)。张殿平等(2013)利用 GIS 管理淄博市饮用水卫生安全地理信息,发现饮用水的总硬度和氟化物之间具有空间正相关性。利用 GIS 评价饮用水的水质,可以揭示水质指标的时空分布规律和指标间的相互关系,为有效监督和管理饮用水水质提供科学依据。

4. GIS 在饮用水水质与健康关联分析中的应用

利用 GIS 分析疾病和某些危险因素的空间分布可探索疾病的病因。陶庄(2010)利用 GIS 的反距离权重空间插值方法研究了淮河流域“癌症村”的食管癌、胃癌和肝癌的疾病负担与饮水污染的关系,利用相对危险度和长期趋势估算累积的化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)浓度,分析 COD 与疾病负担指标(失能调整寿命年)之间的关联,发现水中 COD 污染浓度的增大将使疾病负担增加。董研等(2014)利用淄博市 2008~2012 年农村饮水安全工程监测点的水氟浓度数据进行 GIS 的空间插值分析,发现淄博市水氟分布具有明显的地区聚集性,高氟带为东西向,地氟病与水氟的空

间分布存在对应关系。吴库生等(2008)利用 GIS 绘制了我国食管癌的空间分布专题图,发现我国食管癌有明显的地区聚集性,通过多元回归分析和因子分析探索 24 种地理气候危险因素。结果表明,食管癌可能与区域相对干旱($R = 0.345$, $P < 0.01$)、月平均风速偏大($R = 0.189$, $P < 0.01$)及夏季植被覆盖率相对较低($R = 0.257$, $P < 0.01$)存在关联。Holtby 等(2014)利用 GIS 绘制饮用水中硝酸盐的分布专题图,以及非条件 logistic 回归方法分析水中硝酸盐与新生儿出生缺陷的关系,发现两者可能存在正向关联($OR = 2.44$, $95\%CI = 1.05 \sim 5.66$)。Jayasekara 等(2013)利用 GIS 绘制斯里兰卡中北部慢性肾病和居民水源环境分布地图,发现在 5 个慢性肾病高流行区域中,居住在水流相对缓慢的水库和河道周边乡村的居民患病率较高,而饮用天然泉水的人群患病率低,因此水源水的流动性可能是慢性肾病的危险因素。

5. GIS 在饮用水安全风险评估中的应用

通过 GIS 建模和插值分析可以估算个人的暴露剂量,提高环境流行病学的暴露评估水平(王浩等,2005)。利用 GIS 制作的暴露-疾病空间分布地图可以测量污染源的距离,查询污染物的空间变化,揭示疾病模式和环境暴露的变化及其可能存在的相关关系,快速评价健康危害与环境污染。Navoni 等(2014)利用 GIS 评估阿根廷饮用水中砷的健康风险,分别检测圣地亚哥省和查科省 650 名居民的尿砷及其饮用水的水砷,估计平均每天经饮水途径的砷摄入量、致癌危险性和危害系数等指标。通过人口统计学、Pearson 相关分析和反距离权重插值法对预期水砷进行空间分析,并计算居民的尿砷估计值,制作尿砷、水砷、预期尿砷、预期水砷、肿瘤风险因子和损伤因子的空间分布专题图,发现水砷增加了当地居民膀胱癌和肺癌的发病风险,尿砷预期值较实测值低说明可能存在着其他的砷暴露。

为了保障饮用水水质安全,2004 年世界卫生组织(World Health Organization, WHO)发起建立“水安全计划”,饮用水安全评价和安全管理涉及从水源到末梢的饮用水全过程。Wienand 等(2009)利用 GIS 探索水安全计划的设计和评估、监测体系的建立、交流和管理,通过叠置、合并、剪裁、重分类、融合、插值和核心密度等空间分析方法设计和评估水安全计划,通过泰森多边形等邻近分析方法建立了监测体系,通过插值分析对监测参数进行空间扩展和模拟,通过克里金插值法验证测量结果,实现了水安全计划决定性步骤的空间分析和可视化。

6. GIS 在水污染突发事件应急处置中的应用

1854 年,John Snow 利用地图有效处理了水污染事件。其借助一张标点地图发现伦敦宽街突发的霍乱疫情和供水的关系,通过针对性的措施成功控制霍乱的传播。雷晓霞等(2011)将二维瞬时排放水质模型集成在 ArcGIS 中,模拟邕江突发性水污染事故。首先利用 GIS 对监测断面图、水文图和污染物分布图等进行数字化,利用四边形网格法对邕江河道进行空间离散化,通过模型空间变量 x 、 y 与 GIS 中坐标 (x, y) 的联系实现模型与 GIS 的集成,模拟一次沉船漏油造成的突发性水污染事故,实时动态地显示污染物随着时间不断扩散的过程,反映污染物的时空分布状况,能实时查询污染物的特征,

为邕江水污染事故的预警预报提供技术支持。

肖泽云等(2011)基于 ArcGIS Engine 开发了水污染预警系统,能够进行数据管理、水质评价、信息查询、水质预测和结果可视化等。Chen 等(2012)在水质模拟计算中引入系统动力学,构建了水环境突发污染事故水质模拟的动力学模型,有效解决了突发污染事故的动态和非线性的复杂系统问题。陈诚等(2013)开发了基于 GIS 的桌面应急演练系统,其能根据污染物性质、泄漏源位置和天气等因素实时模拟污染物扩散的影响范围,根据位置信息、交通状况、车辆及人员调度模拟最佳的疏散救援方案,实现污染物扩散信息的实时查询和应急救援的科学调度与综合管理,提高了应急管理的智能化和信息化程度。郭诚等(2013)在云环境下开发了水质安全服务平台,具有水质仿真计算服务、水质数据与水质仿真可视化渲染等功能,并测试了突发性水质污染事件在水质安全服务平台上的应用。

综上所述, GIS 已经广泛应用于饮用水安全的调查、分析、监测、管理、应急处置和风险评估等多个方面。GIS 利用空间和属性数据,集成空间分析和数据库功能,能够智能化地分析、综合和查询空间数据。GIS 与计算机、空间定位、遥感、数据库和云计算等多种技术方法的集成以及与大型数据信息平台的有机结合将成为其发展的主要趋势,为饮用水安全保障提供更加广阔的应用空间。

第2章 基于GIS的饮水安全评价

我国水污染事故频繁发生。2001~2004年全国发生水污染事故共3988起,几乎每3天发生1起;2005年全国共发生水污染事故693起,2007年全国共发生水污染事故178起。这些水污染事故主要以企业泄露和违法排污为主,给地方经济和居民健康造成重大危害,引发水危机事件,影响饮水安全。

针对当前的饮水安全现状,寻找一种科学、有效的评价方法和检测手段是当务之急。GIS具有对地理数据进行输入、输出、处理、查询、管理、分析和辅助决策的强大功能,有助于开展具有空间异质性的饮水安全评价和地表水及地下水的水污染检测工作。本章将分别从城市饮水安全、农村饮水安全、非点源污染和饮用水污染源特性等方面开展基于GIS的饮水安全评价。

2.1 基于GIS的城市饮水安全评价

随着我国城市化进程的加快,城市规模和人口逐渐扩大,用水需求量与日俱增,污水排放量也逐日增加。城市的水环境污染、水资源短缺和突发性水污染事故频发等饮水安全问题日益突出,在一定程度上制约了城市经济的发展,对社会安定造成一定影响。与此同时,随着生活水平的提高,城市居民对饮水安全有着更高的要求。

2.1.1 城市饮水安全面临的主要问题

我国城市饮水安全面临的主要问题包括以下几个方面。

1. 水量供给不足

目前我国严重缺水或接近国际缺水警戒线的省、自治区和直辖市有18个,占全国(除台湾、香港和澳门)的58%。在全国600多座大中型城市中,缺水城市有400多个,严重缺水城市有114个,其中北方地区有71个,南方地区有43个。水量供给不足使我国城市饮水安全面临着严峻挑战。

2. 水源水质堪忧

2009年,国家环境监测网监测的长江、黄河、松花江、珠江、海河、淮河和辽河7大水系203条河流408个地表水国控监测断面中,仅有57.3%符合集中式供水水源水的水质要求,18.4%的河段已完全丧失水体基本使用功能,五日生化需氧量、高锰酸盐、氨氮和有机物浓度普遍较高。其中,长江、珠江水质良好,淮河、松花江为轻度污染,黄河、辽河为中度污染,海河为重度污染。地下水水质状况也不容乐观。北京、辽宁等8个省份641眼井的水质监测结果表明,仅有23.9%的监测井能用作集中式供水的饮用水