

李信茹,周民,米屹东,等.智慧环保体系在环境治理中的应用[J].环境工程技术学报,2021,11(5):992-1003.

LI X R,ZHOU M,MI Y D, et al. Application of smart environmental protection system in environmental management [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(5): 992-1003.

## 智慧环保体系在环境治理中的应用

李信茹<sup>1</sup>,周民<sup>1,2</sup>,米屹东<sup>1,2</sup>,苏海磊<sup>1</sup>,陈海燕<sup>1</sup>,王凡凡<sup>1</sup>,杨硕<sup>3</sup>,沈亚琴<sup>1</sup>,魏源<sup>1\*</sup>

1.环境基准与风险评估国家重点实验室,中国环境科学研究院

2.河海大学环境学院

3.铜陵市凤凰山景区

**摘要** 随着大数据时代的到来,智慧环保体系已经成为推动环境治理能力和治理体系现代化的重要理论支撑,建立完善的智慧环保体系更是我国进一步提高环境治理效率的必然要求和重要举措。将当前快速发展的物联网技术应用到环境治理中,建立智能的环境数据获取和处理分析系统,做出合理的决策,进而提高环境管理效率是建立和完善智慧环保体系的关键措施。智慧环保体系与城市环境治理的结合能实时高效地监测城市污染源、生态管理等多领域环境问题,并对可能出现的环境问题做出应急响应及决策。系统地介绍了智慧环保体系的总体架构及支撑整个系统的标准体系,同时提出了智慧环保体系建设过程中遇到的困难,分析了智慧环保体系在环境治理与保护不同领域的应用,以为未来智慧环保体系应用于环境治理和管理提供建议和参考。

**关键词** 智慧环保;物联网;污染源;生态安全管理;核安全

中图分类号:X324 文章编号:1674-991X(2021)05-0992-12 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20200282

## Application of smart environmental protection system in environmental management

LI Xinru<sup>1</sup>, ZHOU Min<sup>1,2</sup>, MI Yidong<sup>1,2</sup>, SU Hailei<sup>1</sup>, CHEN Haiyan<sup>1</sup>, WANG Fanfan<sup>1</sup>,  
YANG Shuo<sup>3</sup>, SHEN Yaqin<sup>1</sup>, WEI Yuan<sup>1\*</sup>

1.State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

2.College of Environment, Hohai University

3.Tongling Fenghuang Mountain Scenic Area

**Abstract** With the approaching of the era of big data, the smart environmental protection system has become an important theoretical support of promoting the modernization of environmental governance capabilities and governance systems. Establishing a sound smart environmental protection system is an inevitable requirement and important measure to further improve the efficiency of environmental governance in China. Applying the rapidly developing Internet of Things technology to environmental governance, establishing an intelligent environmental data acquisition and processing analysis system, making reasonable decisions and improving the efficiency of environmental management, are the key measures to establish and improve smart environmental system. The combination of smart environmental system and urban environment governance could effectively monitor urban pollution sources, ecological management and other environmental problems in many fields on time, and could help make prompt emergency response and decision-making to the environmental problems that may arise. The overall structure of the smart environmental protection system and the standard system that supported the entire system were

收稿日期:2020-11-30

基金项目:国家自然科学基金项目(41977294);科学技术部科研院所技术开发研究专项(2014EG166135)

作者简介:李信茹(1996—),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤污染修复,18813145607@163.com

\* 责任作者:魏源(1983—),男,副研究员,博士,主要研究方向为重金属地球化学行为,craes\_wy\_team@163.com

systematically introduced. At the same time, the difficulties encountered in the construction of the smart environmental protection system was put forward, and the application smart environmental protection system in different fields of environmental governance and protection was analyzed, in order to provided suggestions and references for the future application of smart environmental protection system in more aspects of environmental governance and management.

**Key words** smart environment protection; Internet of Things; pollution sources; ecological safety management; nuclear security

环保事业产生的海量数据处理分析是开展环境保护工作的重要基础<sup>[1]</sup>。目前的环境管理体系仍采用人工监测污染源和记录数据,这大大增加了环境数据获取及分析处理的时间,同时,由于人为测定的时效性,环境管理决策人员无法获取污染源等地的实时环境数据,从而无法及时侦测和应对可能发生的异常事件。由于环保数据海量庞杂,数据获取和分类成为环保系统面临的难题,因此智慧环保体系一词应运而生。智慧环保体系通过自动化的监测系统实时获取环境监测站点数据,再通过大数据处理技术对环境数据进行分析<sup>[2]</sup>,最终实现对污染源等环境监测站点的实时监控,有效预防环境突发事件的同时最短时间内提出应急管理措施。环境保护工作的实际开展需要自然资源部、生态环境部等多部门协同合作,因此,环境数据的共享是各部门间开展环境保护工作的重要基础。智慧环保体系将各部门获取的环境数据统一传输到云平台层进行处理,再归置至相应部门,实现了部门间数据共享,降低了部门间数据获取的难度,解决了部门间存在的“信息孤岛”现象。当前环境工作体系面临着实时数据获取困难、部门间信息共享困难、环境数据分析技术落后等问题。基于此,笔者介绍了以物联网技术为基础的智慧环保体系架构及其所需遵循的相关标准体系,并对智慧环保在环境治理中的实例进行分析,总结了智慧环保在不同环境保护工作中的体系,以期智慧环保体系在环境治理中的实际应用提供理论参考。

## 1 数字环保—智慧环保的发展及转变

### 1.1 数字环保概念

随着对环境保护工作重视度的提高,环境保护任务越来越艰巨,标准也越来越高。当前,环境保护正向着信息化蓬勃发展,如何处理海量、无序化的信息已经成为环保任务面临的挑战之一。

数字环保主要通过虚拟现实(virtual reality, VR)技术、3S技术、云计算技术和海量存储技术等对环保信息进行处理、分析和整合,确保有序高效地

完成环保业务工作。VR技术主要是通过已有的大量数据建立虚拟世界<sup>[3]</sup>,环保工作者可以通过这一虚拟世界更透彻地认知污染源监测、生态规划、环境管理等工作,为预测未来环境发展趋势、环境演替规律提供科学依据。3S技术是地理信息系统(geography information systems, GIS)、全球定位系统(global positioning systems, GPS)和遥感(remote sensing, RS)技术的总称。RS技术主要用于环境信息获取,它能通过卫星或飞机以电磁波的形式收集环境信息,并识别地物。GIS依托计算机软件和硬件,对获取的环境空间信息进行综合处理和分析。GIS的空间信息处理和分析能力较强,通过GIS获得的环境制图能有效反映各环境要素间的拓扑关系,并为污染源监测、环境实时信息获取及处理分析提供基础知识。GPS具有全天候、实时性、快速性、准确性等特点,通过对各种对象的准确定位,使其在测绘<sup>[4]</sup>、环境<sup>[5]</sup>、矿产<sup>[6]</sup>等领域广泛应用。RS、GPS和GIS三者之间并不是相互独立的,通过3S技术集成,能够构成更为完整的监测系统(图1和图2)。这一集成技术目前在很多方面都有应用,例如Zheng等<sup>[7]</sup>应用3S技术对水文参数模型进行了分析,证实2个相似流域参数距离较小,说明二者在几何空间上很接近。谷金英等<sup>[8]</sup>结合2013年北京市TM遥感影像和地面样地调查,构建三维绿量模拟方程,调查了北京大尺度上的森林绿化情况,结果表明通过结合3S技术和理论模型能够准确地反映城市绿化情况,为研究城市森林生态功能,提高环保产业效益和布局优化提供基础数据资料。



图1 3S技术之间的关系<sup>[9]</sup>

Fig.1 Relationships between 3S technologies

### 1.2 数字环保向智慧环保的转变

IBM(International Business Machines Corporation)

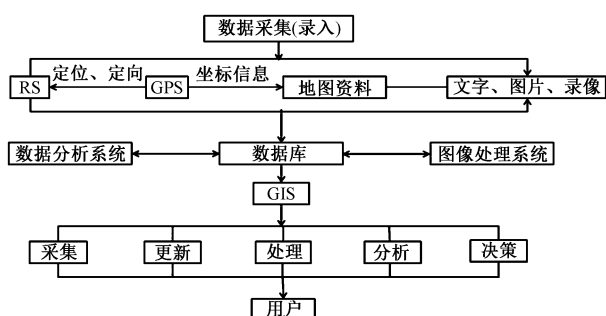
图 2 3S 技术一体化<sup>[10]</sup>

Fig.2 Integration of 3S technologies

于 2008 年 11 月首次提出了智慧地球 (smarter planet) 的概念<sup>[11]</sup>; 2009 年 8 月, 其发布了《智慧地球赢在中国》计划书, 正式拉开了中国智慧地球发展战略的序幕。智慧地球的主要任务是把新一代的 IT 技术充分应用到生活的方方面面, 通过传感器将各种生活设备连接起来形成物联网, 再利用超级计算机和云计算等将物联网联合起来, 实现网络地球建设和人类社会系统的整合<sup>[12]</sup>。智慧地球的核心和基础是物联网。为了满足智慧城市建设过程中海量环保数据的分析、整合和处理的要求, 智慧环保的理念应运而生。物联网技术在数字环保应用的基础上形成了智慧环保体系, 即将装备和多种感应传感器应用到环境中以获取多种环境信息, 并利用云计算、数据挖掘等处理环境信息, 通过环境保护事业与环境物联网技术的结合, 最终提出更智慧的决策和管理方式<sup>[13]</sup>。智慧环保以绿色环保理念为基础, 以物联网作为核心技术。物联网技术为智慧环保体系提供的数据量、集成度、可访问性和及时性改变了之前单一的以采样—测定—数据分析为基础的环境治理方式。例如, 国外的许多学者已将人工智能、大数据分析、机器学习、3D 物体识别算法和遗传学习等技术应用于生态过程的研究和管理, 而这些技术的创新发展极大地提高了非生物条件下生物及微生物群落时空变化的评估能力<sup>[14]</sup>。除了生态环境管理研究, 更多的学者将智慧环保体系的应用放在了地理安全和灾害管理方面<sup>[15]</sup>。Resch 等<sup>[16]</sup>开发了一种保护分布式地理服务基础设施的轻量级 AAA 方法以解决分布式地理基础设施信息获取和处理的安全问题。Goodchild 等<sup>[17]</sup>综述了地理灾害发生前后的地理空间数据获取及分析, 通过自愿地理信息 (volunteered geographic information) 这一特殊的地理空间工具, 研究地理灾害过程中潜在信息和事后调查信息。但是, 智慧环保体系在污染防治、生态破坏修复等方面的应用仍存在不足。

目前人们的需求已逐渐从简单的物质必需品转变为享受优雅生活的精神需求, 这一变化促使传统的环境治理模式向智慧环保体系转变。如何利用大幅度发展的信息技术实现人们的生态环境需求是当前面临的重要难题。而这一难题催生了智慧环保体系的产生及应用。

## 2 利用物联网技术构建智慧环保体系

### 2.1 基于物联网的智慧环保体系总体架构

智慧环保体系由智慧感知层、传输层、智慧云平台层、云服务层和终端用户层组成 (图 3)<sup>[18]</sup>。感知层是通过传感器、视频监控、卫星遥感等感知设备获取污染源、环境质量、辐射层面、生态多样性等方面的实时 (real-time) 数据, 实现“更透彻的感知”。感知层发展的基础是传感网络技术。随着环境经济的发展, 环境感知的硬件和软件成本大幅降低, 无线网络技术快速创新, 使环境传感器网络 (environmental sensor networks, ESN) 开始形成和发展。ESN 是应用于污染源监测、环境质量变化等方面的无线传感器网络, 其检测覆盖范围极其广泛。例如, 乔欣等<sup>[19]</sup>提出的基于 Zigbee 技术的巢湖水质监测系统, 能通过相应传感器节点的设计, 获取温度、pH、溶解氧参数, 全天候、实时对巢湖水质进行监测, 收集到的数据能够直接远距离传输到相应的计算机软件模块, 从而实现了巢湖水质监测的远程实时监控和数据传输。除了水质监测, ESN 同样能应用到大气中。李春明等<sup>[20]</sup>通过构建室内空气质量在线监测系统, 实现了对甲醛、总挥发性有机物、一氧化碳、二氧化碳等指标的实时监测, 再将已经设置好的无线传感器模块应用到车间、矿井和化工厂中, 扩大了空气传感器网络的使用范围, 极大地提高了传感器网络的实用性。

传输层是利用卫星网络、移动通信等技术, 收集感知层获取的环境数据, 实现环境数据交互共享, 从而实现“更全面的互联互通”。

智慧云平台层的工作运行基础是传感网络技术手段和通信网络技术。云平台层首先整合来自传输层的海量数据, 再通过数据挖掘、海量存储技术、超级计算技术、虚拟化等对数据进行分析处理, 实现“更深入的智能化”。智慧环保体系的建设过程中需要面对海量的、多样化的数据, 如何妥善处理及分析环境数据, 并根据环境数据做出智慧决策是智慧环保的重点。智慧云平台层承担环境数据处理分析的工作, 并将分析好的数据传递到云服务层使公众



图 3 基于“物联网模式”的智慧环保架构

Fig.3 Smart environmental protection framework based on Internet of Things

能实时了解环境信息。这不仅极大地提高了监测工作的透明度和公众参与度,也大大减轻了工作人员的工作压力,更有利于工作人员结合实际情况和环境数据做出科学合理的决策。云计算、数据挖掘及 GIS 技术是智慧云平台层十分重要的数据处理分析技术。云计算能通过网络将复杂庞大的计算机程序分成多个子程序,再经由多台服务器对数据进行计算并将结果反馈给使用者。数据挖掘融合了人工

智能、数据库技术和机器学习等多种理论和技术,通过分析大量数据能揭示许多有意义的新的关系、趋势和模式。通过 GIS 能够得到全面、实时、准确、客观和有效的环境监测信息, GIS 能处理多源环境信息,并将环境的变化情况及规律以图片的形式直观表达出来,实现对环境的动态监测。

智慧环保体系中可能涉及的核心技术的优缺点对比见表 1。

表 1 基于物联网的智慧环保体系中核心技术优缺点对比

Table 1 Comparison of core technologies in the smart environmental protection system based on Internet of Things

| 技术                                     | 应用对象                                                                | 优点                                | 缺点                                               |
|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------|
| 雾计算<br>(fog computing)                 | 物联网 (IoT)、人工 智能 (artificial intelligence, AI)、虚拟现实 (VR)、5G 等 业务场景需求 | 解决低时延和实现用户位 置感知问题,本地化安全、 灵活,部署可扩展 | 对节点依赖严重,在处理节点 出错时,容易发生执行时间较 长、错误性较高、数据融合效果 不佳等问题 |
| 微云计算<br>(cloudlet)                     | VR、虚拟客户端设备、企业服务 (如虚拟 桌面)、公共安全、传感器数据服务                               | 与终端距离更近、传输延 迟更小                   | 存储资源有限,处理速度相对 较慢                                 |
| GIS 技术、GPS 技术、RS                       | 药材、土壤、水体、林业、生态等多种环 境系统                                              | 调查结果具有客观性、应 用速度快、现势性强             | 数据安全性不高                                          |
| 移动边缘计算<br>(mobile edge computing, MEC) | 企业所需的各类服务、数据、安全、大数 据分析及挖掘等,网络性能和 QoE 提升                             | 具有实时接入能力,低延 时及高带宽的优势              | 存在安全漏洞,使用费昂贵                                     |

云服务层。构建云服务平台,建设业务系统及信息平台,提高数据透明度,方便各使用机构及公民获取数据,为环境管理、污染源治理、生态环境保护、辐射管理实现“更智慧的决策”。

应用层及用户端。智慧环保最终的目标是为了做出更智能的决策。通过感知层、传输层和服务层,数据已经经历了收集、处理、分析的形态,需要进一步分配到相应的部门或单位进行应用。如何使用处理分析完成的数据并以此为依据作出合理、智能的决策是应用层存在的意义。

生态环境保护的主要目标是维护和提升生态系统完整性及其生态服务功能。经济社会活动产生的环境污染和对生态系统的破坏是当前生态环境保护工作面临的巨大挑战。智慧环保体系的感知层和智慧云平台层能实现环境信息的智能处理,并通过集中多个层面的环境资源,建立高效安全的环境信息系统,实现环境信息的智能处理。智慧环保体系的信息收集仍以人工监测为主,通过污染现状监测和信息收集,智慧环保体系能提供环境问题的基础数据,提高科研工作者及广大人民群众对环境治理工作的重视及关注程度。

## 2.2 物联网在智慧环保体系构建中的应用

智慧环保体系的每个层次都需要物联网的参与。智慧感知层是整个智慧环保体系的基础,发挥着信息收集的作用。智慧感知层通过智能网关系统与现场的环境检测设备及传感器、监控摄像等检测系统获取所需要的环保数据、相应设备的数据,现场环境状况及可能存在的环境报警信息,为服务层提供所需的数据,实现对监测环境的一体化感知和认识。这一过程中物联网作为技术支持为数据获取提供支撑。传输层是通过各种传输网络,将智慧感知层获取的数据安全、准确和高效地传输到管理层。环保领域数据具有多样性,对传输要求较高。针对不同的传输业务需求,所能选取的无线广域网也有所不同。针对功耗较低、覆盖较广的业务传输工作需求,主要选用低功耗的无线广域网,常见的窄带物联网有 NB-IoT 网络<sup>[21]</sup>、LoRa 网络<sup>[22]</sup>和基于 LTE 优化的 e MTC 网络<sup>[23]</sup>等。针对长距离实时传输及大数据传输,需要使用 4G、5G、以太网和 WIFI 等带宽更大的传输网络。智慧云平台层主要实现对传输层来源的数据进行智能管理,并对获得的监测数据进行存储和可视化分析展示,全程为服务层提供全面的数据支撑。IoT 设备管理服务平台<sup>[24]</sup>是目前较常用的支撑上下层服务的智慧云平台层设备。针对

环保领域,环境管理部门构建了环保 IoT 设备管理平台,这一平台能通过使用智慧环保边缘智能网关实现监测现场设备的接入、数据获取及远程配置和调控,同时提供数据接口供服务层使用。云服务层所针对的服务对象和用户类别较多,需要对数据进行更为精细的划分及分析,从而实现对各种环境问题的预警预报和追踪溯源,为环保部门及环保行业提供精细化服务和科学决策依据。整个云服务层通过智慧环保智能网关为环保行业提供有效数据,对外提供的服务是,针对一些比较严重和需要及时处理的污染信息,云服务层能及时反馈到应用平台,为污染追踪溯源提供有效依据。终端用户层对数据的获取需要依赖物联网技术,通过智慧环保智能网关,用户能更方便快捷地获取所需的环保数据。

## 2.3 智慧环保体系建设面临的问题

(1)环境监测设备成熟度低。数据获取是整个环境物联网的基础。只有获取完善、可靠的数据才能为智慧环保体系运行提供数据支撑,基础数据缺失导致智慧环保体系分析对象缺失,最终严重阻碍智慧环保体系的运行。

(2)信息孤岛现象严重。各部门之间缺少统筹规划和组织协调,导致获取的环境信息相对封闭、业务系统相对独立。此外,部门之间尚未建设完备的共享平台,数据采集具有重复性,数据利用率低,这些问题大大降低了工作效率,导致资源浪费严重,信息共享率低,很大程度上增加了环保工作者的工作量。

(3)信息透明度低。环保工作不能只依赖于环保部门工作人员,而应该协调公众,提高公众参与度。由于缺乏统一的标准,各部门之间对涉密、非涉密的工作数据规定各不相同,能与公众分享的数据也相对有限。公众只能通过已公布的环境数据了解地方环境质量,但事实上公众往往很难通过环境数据形成对环境质量的自我判断,长此以往,公众对于环境保护工作的关心和参与度逐渐下降。同时,信息不透明在某种程度上忽视了公众在环保工作中的作用,这不利于公众配合环保工作,无形中增加了环保工作开展的难度。

(4)环境信息庞杂,无法共享。环境保护系统不仅具有丰富的环境监测在线数据、污染源普查数据、节能减排数据等环保相关数据,还有人事部门的人事数据,科技部门的标准数据等,这些数据目前是由各部门分开管理使用,存放于不同的数据平台,很难做到数据共享,同时由于缺少统一的数据平台,数据无法被统一整合。科学研究的数据获取一直是研

究人员面临的困难,数据共享平台的开通,能够加强各部门的合作,有利于整体环保研究工作的开展。

2.4 智慧环保环境信息化标准体系构建

智慧环保环境信息化标准体系建设包括环境信息标准规范、环境信息运行管理和环境信息安全保障三大类(图 4),这三大类标准最终服务于环境基础设施标准。

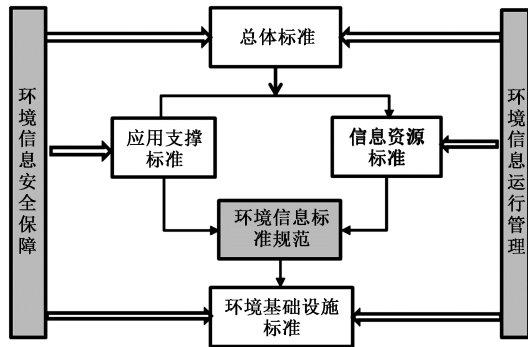


图 4 环境信息化标准体系架构<sup>[25]</sup>

Fig.4 Environmental informatization standard system framework diagram

当前环境信息化存在着数据更新不及时、透明度低、各自为政的问题,急需统一规范化的标准体系。建立信息标准体系,能够为环境保护工作提供指导和规范,使环保部门人员的工作有章可循,最终将所有环保信息部门归纳到同一个标准体系下工作。环境信息标准规范是推动和促进环境信息化发展的依据和保障,加快环境信息化标准体系建设是智慧环保工作的重要内容之一。

智慧信息运行管理需要从监测系统建设、运行及管理等方面进行分析,从管理及决策角度提出环境保护方案及建议。智慧信息运行管理通过完善环境信息运行管理系统,加强环境信息网络维护,故障报告和应急处理工作,以保证整个智慧环保体系安全高效稳定的运行。

智慧环保体系需要统筹兼顾实时监测环境数据、国家电子政务数据及业务应用系统,对数据安全性要求较高。因此,智慧环保体系必须以环境数据为基础,建设一个完整、多方面、多层次的安全保障体系,其中全方位、易于管理和维护的安全防御体系是智慧环保体系建设的保障。

智慧标准体系的最终目标是保障智慧环保体系正常、合理的运行,最根本宗旨是满足人们对美好生态环境的需求,因此整个标准体系需要政府把关,通过政府出面统筹完成信息的整合,为智慧环保体系

建成统一可行的标准体系。

3 智慧环保体系在环境治理中的应用

城市是环境治理的平台,智慧环保体系需要以城市为依托,有针对性地对城市土壤、大气、水体、噪声等要素建设完善的监管体系。目前,智慧环保在城市治理上的应用尚属探索阶段。由于智慧环保的城市治理的建设经验、模式等方面存在不足,需要将智慧环保体系由以人工监测管理为主的环保模式转变为以物联网为主的智慧模式,通过物联网自动实时监测,加强环境管控,提高城市环境质量,减少环境能源和资源的浪费,提高整体环境能效。智慧环保的建设经验、模式能够为智慧环保城市治理的推进提供良好的范例和可行的路径,为将来全面推进智慧环保体系建设打下坚实的社会和技术基础。城市环境治理是整个城市建设的重要模块,智慧环境治理作为智慧城市建设的尝试和创新,其应用和实现效果对未来智慧城市发展方向和治理水平具有直接影响,对城市治理具有重要的指导意义和现实意义。污染源监控管理信息系统、生态环境保护管理系统、核安全与辐射管理信息系统和环境应急信息管理系统是目前应用智慧环保体系最多的几个环境行业。

3.1 污染源监控管理信息系统

环境质量好坏直接影响人类健康和生态环境安全,保证环境质量良好、减少和控制环境污染是人类在自然界生存及与自然和谐相处的保障。保证环境质量的前提是随时随地掌握环境质量情况,而污染源监控工作是了解环境质量状况的根本性手段。然而,常规环境监测技术目前面临着样品采集困难、数据更新不及时等问题。环境污染源自动监测管理信息系统能有效解决这一问题。通过常规环境监测与信息通信技术的结合,将高密度的传感器和监控网络布置到环境空间中,能随时获取海量的环境数据,完成实时数据获取和环境监测。例如,南京市建邺区的水环境自动监测系统能根据区内水环境质量现状及要求分配不同采样点。监测位点设置方面,在保证监测数据可靠性的同时,根据区内莫愁湖和南湖湖泊水系分布现状,将监测位点设置在河面 4 个方向。监测指标方面,遵循“代表性指标必须要监测,其他指标酌情考虑”的原则有针对性地选择监测点参数指标。通过建立完整的智慧环境监测体系,解决了以往人工采样的低效率问题<sup>[26]</sup>。Yan 等<sup>[27]</sup>通过建设自动采样传感器获取环境监测点位

数据,再通过向科研人员和专业人士收集信息,将水质监测和先进数据技术联系起来,以支持生态系统服务评估,并将所有的数据分解、合成进行大数据分析,用于评估与水质相关的生态系统服务。最后,从大数据生态系统的角度,探讨生态系统服务评价中水质评价的技术障碍和机遇。自动监测系统能屏蔽人工检测受到的天气、排污等因素影响,实时获取水体质量变化,对突发事件做出预警,减少重大环境灾害发生的可能性。近年来,国家对大气环境质量的要求越来越高,大气环境质量监测系统也一直在发展进步。智慧环保大气实时监测系统对获取数据进行大气质量统计分析,再根据分析结果提供空气污染精细化服务,同时提供相应数据平台和手机 APP 进行数据显示,方便用户实时查看和监管数据。图 5 展示了智慧环保大气环境系统架构。该监测系统有效提高了数据实时性和信息透明度。公众能随时随地查看大气质量,有利于公众深入了解大气质量变化对其生活的影响,同时,公众会更加配合未来科研工作者开展的实地调查工作。

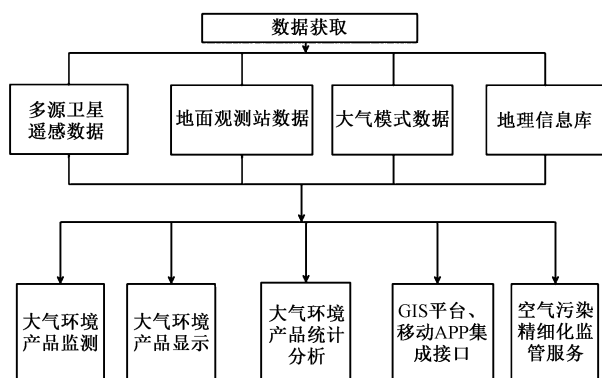


图 5 智慧环保大气环境实时监测分析服务平台架构<sup>[27]</sup>

Fig.5 Schematic diagram of the architecture of intelligent environmental protection atmospheric environment real-time monitoring and analysis service platform

### 3.2 生态环境保护管理系统

生态监测是利用物理、化学、生态学手段,对生态环境中的特定地域范围生态系统或生态系统中各要素的类型、数量、结构和功能进行定期、系统性监测<sup>[28-29]</sup>。一般来说,生态监测根据监测对象的空间尺度可以分为宏观和微观生态监测。宏观生态监测的对象是某特定生态系统。在宏观生态监测过程中,研究人员应用生态效果图技术、遥感技术,辅以专业的信息处理分析系统,构建科学合理的地理信息系统,最终获取生态系统信息,了解生态系统的变化,对任何可能的突发紧急事件采取紧急措施。微

观生态监测对象的地域等级可以包括几个生态系统组成的景观生态区,也可以是代表单一的生态类型。微观生态监测需要大量工作基站,采用物理、化学和生物学方法对生态系统各组成成分进行分析并提取数据信息。微观生态监测是宏观生态监测的基础,宏观生态监测又是微观生态监测的主导方向,一个完整的生态监测网络应当同时具备宏观和微观 2 种尺度生态监测方案。如图 6 所示,生态环境实时监测分析服务平台首先通过野外传感器对生态环境中各种参数进行自动检测,并经由通信网络获取实时数据,数据经过自动处理和分析后交予数据使用门户,由管理者进行进一步分析和操作。

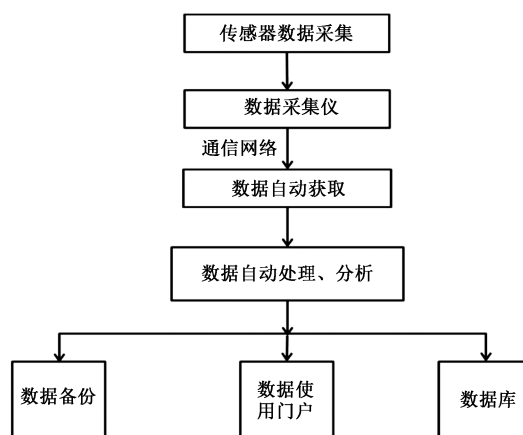


图 6 智慧环保生态环境实时监测分析服务平台架构<sup>[38]</sup>

Fig.6 Schematic diagram of intelligent environmental protection ecological environment real-time monitoring and analysis service platform architecture

同常规的环境生态监测技术相比,遥感技术与生态监测技术的结合不仅能够提高生态监测的效率,更重要的是能解决一些常规监测技术无法解决的问题。例如,薇甘菊是一种入侵性极强的杂草,20 世纪 80 年代初入侵我国后造成了巨大的经济损失。尽管我国学者一直在研究其生长特性、入侵机制和防控策略<sup>[30-31]</sup>,但是防控效果不理想,区域性的爆发时有发生且难以监测。遥感技术具有一定的时空分辨率,能有效区分环境中入侵物种和本土物种<sup>[32]</sup>。孙中宇等<sup>[33]</sup>提出了无人机遥感技术识别和监测薇甘菊爆发点,通过连接无人机飞行平台、可见光相机和影像处理系统成功建立低空遥感系统,该系统基于低空获取高分辨率的红绿蓝波段影像,并利用波段运算、深度学习和影像分割对薇甘菊进行识别,最终确定薇甘菊爆发点。某一区域尺度上对薇甘菊的扩散机制、预警防控研究主要依赖于空间上识别和定量化,而无人机遥感因其特殊的分辨率

能有效进行入侵植物识别和定量研究<sup>[34]</sup>,有望推动区域尺度上预警、防控入侵植物的研究。除了单一入侵物种研究之外,生态监测的区域也可以覆盖整个植被范围。受气候条件影响,植物生长状况变化较为明显,及时开展植被生态质量监测,了解植被生长状况是生态系统监测的重要组成部分<sup>[35]</sup>。信息化在农业上的应用也逐渐增多。在完善的农业环境监测系统的支持下,农民可以简单地使用数字操作系统,在短时间内提高农作物产量并降低成本。智慧农业系统能通过已有的数据对农田肥料用量和植物生长状况进行精确估算,降低农药过量施用对土壤造成的危害<sup>[36]</sup>。钱拴等<sup>[37]</sup>采集 MODIS 卫星与 NDVI 数据,相关气象数据,植被类型、土地质地和利用方式等数据进行植被覆盖率和初级生产力(net primary productivity, NPP)的估算,并构建植被生态质量变化趋势监测评价模型。利用该模型对比2017年植被生态质量指数和多年均值,绘制全国地理空间植被综合生态质量指数多年变化趋势图,较为直观地展示了我国年植被生态质量优劣的分布格局,也反映了植被-气候带的对应关系。

### 3.3 环境应急信息管理系统

近年来,我国环境紧急突发事件频发,如2005年松花江水污染事件,“8·12”天津滨海新区爆炸事故,广西镉污染事件,“11·24”甘肃锑泄漏事件等,这些突发事件严重威胁了人体健康。如何妥善处置各类突发环境事件,扎实完成环境风险防控工作,减少突发事件中人员伤亡和经济损失,并做出合理的应急方案是当前应对环境突发事件的最主要目标。

智慧环保体系下环境应急信息管理系统能在第一时间给出相应的应急预案,做出最为合理的人员调配和物资分配。环境应急信息管理系统需要搭建一套应对突发环境事故的管理系统和平台,对重点河流、工厂园区等地进行实时监控,最终目标是提高政府部门应对环境突发事件的能力,增强部门间联动,以最快速度对突发事件做出响应<sup>[39]</sup>。环境应急信息管理系统主要由8个系统组成(图7)。

数据交换平台是整个突发事件应急信息管理系统的基礎。数据库包括环境数据信息和管理部门的管理数据。通过数据交换平台将应急管理涉及的部门纳入到同一个大的数据获取及交流网络,增强部门间交流,实现多部门、多层次的协同合作。

预测预警平台是对可能发生的环境突发事件的信息进行预警分级的直接平台。预警系统包括信息监测和报告生成、隐患分析和风险评价、预警分级和

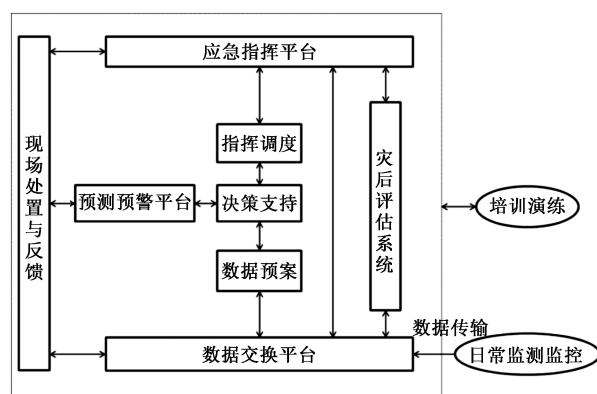


图7 环境应急信息管理系统

Fig.7 Environmental emergency information management system

发布的功能。通过信息监测生成报告,工作人员能直接获取地区基本信息及可能出现的不正常参数,第一时间发现异常,通过风险评估系统对事故严重性进行分级,决策人员可以通过事故预警分级采取相应的应急措施,并通报公众以减少公众恐慌。

数据预案系统和决策支持系统共同作用能对突发事件做出合理可行的决策。环境应急管理信息系统能在突发事件发生后迅速作出反应,提出切实可行的应急方案。而数据预案系统能按照预警分级、事件预案类别、分析模型提前做出一套预警方案,这套预警方案会根据预设条件的改变而做出调整,由于环境突发事件具有不确定性,所以数据预案系统可以作为突发事件发生后管理决策的参考。传统的决策系统很多时候需要依靠决策者个人的经验和直觉判断,而处理复杂的环境突发事件时,决策的影响因素增加,这就要求决策者在指定决策时需要考虑更多要素。当前,环境突发事件越来越复杂,仅靠决策者经验和直觉判断并不能做出一份相对完善的应急管理决策,借助决策支持系统,以信息和计算机、仿真技术为基础,通过空间数据处理系统,结合能支撑决策活动的智能人机系统,能提供更为科学合理的应急管理决策和方案。

指挥调度系统能实现应急决策指挥数据的发布、实时会议沟通及数据信息反馈和显示。整个应急指挥系统能为所有参与突发事件应急管理的决策者及工作人员提供便利的、实时交流的平台。环境应急事故现场处理是指指挥调度的目标。工作人员需要根据现场实际情况调整指挥决策,而现场处置与反馈系统能实时反映现场情况,有利于指挥调度系统指导工作人员根据实际情况进行决策调整,因此现场处置与反馈系统作为应急管理系统中决策和现

场行动的连接系统,需要具有较高的机动性和响应能力。灾后评估系统一般从社会、经济和生态环境 3 个方面对危险物质和灾害损失进行评估。通过相应的监测手段,灾后评估系统需要对自然生态环境所遭受的污染及生态破坏程度、经济社会损失进行评估,再根据灾害分级建设相应的损失补偿机制。

培训演练系统应当贯穿于整个环境应急信息管理系统。其功能是通过模拟实际情况,加强应急平台相关工作人员对应急管理系统和突发事件处理的熟悉度。通过应急事件培训演练系统,相关人员可以深入了解自身在整个环境应急信息管理系统的岗位职责,有利于增强整个应急系统的协作性。

### 3.4 核安全与辐射信息管理系统

核技术目前广泛应用于国防、医学、环境保护等领域<sup>[40-42]</sup>,然而核素不稳定产生的电离辐射和不当的安全防护措施都有可能造成严重的环境污染问题。核辐射波及的范围较大,放射物质一旦进入湖泊、河流等生态环境中,会严重危害生态环境和人类健康,因此核安全问题更应受到重视。构建合理可靠的核安全与辐射信息管理系统,借助物联网技术对放射性污染源进行 24 h 连续监测,避免核设施破坏及放射性物质泄漏,或是在事故发生后第一时间做出相应应急预案,减少人员伤亡和经济损失,是目前核科学技术发展亟待解决的重要问题。核安全与辐射信息管理系统分为实时数据采集获取、无线数据传输和核辐射应急处理决策 3 个部分。首先,对已有的核资源进行实际考察,根据核资源数量和分布建立基本的数据库。为了获取实时数据信息,建设移动源污染监测设备,实现动态化计算管理。其次,建立以物联网技术为基础的辐射监测网络。建设一个相对完善和自动预警的全国性辐射监测网络是实现动态监测核辐射事故的最根本措施。这一系统能第一时间感应环境变化,对突发事件做出响应,并及时给应急管理部门提供信息,极大地提高了应急管理部门应对突发核辐射事故的反应速度。最后,建立核安全突发事件的应急决策系统。通过构建适合我国情况的核辐射突发事件应急系统,对我国可能出现的核辐射突发事件做出分析和预警,为决策者做出合理科学的应急防护措施提供技术支持,是核辐射应急决策系统最主要的目标。刘占阳等<sup>[43]</sup>建立了以滨海核电站海上  $\gamma$  辐射剂量率为基础的智能化自动监测系统,该系统能在无人值守的情况下为核电站提供实时有效的监测数据,能有效提高管理层对核电站信息的掌握程度和速度,对可

能产生的问题做出最快响应。核辐射自动监测作为智慧环保体系的一环,能有效减少环境突发事件产生的可能,同时,完善了智慧环保在环境管理系统中的应用。

## 4 智慧环保体系在环境治理中应用面临的困难及发展方向

环境监测技术是制约整个智慧环保体系发展的重要因素。以土壤监测为例,各省(区、市)地势和地理资源各有特点<sup>[44]</sup>,人为采样难度大、效率低、耗时长,因此土壤自动监测设备在土壤监测中尤其重要。相较大气和水体,旱地土壤和湿地在测定时更为复杂,对自动监测设备的要求也更高。FDR 土壤水分自动监测仪是新研发的土壤水分监测设备,主要是通过土壤的介电特性来反演土壤水分含量,其构造合理,精度较高<sup>[45]</sup>,可以适用于小范围内土壤环境监测。土壤作为不均匀的介质,取样点的随机性会导致其数据具有较大误差,为了降低这种误差,一般在土壤环境指标监测时需要充分混合土壤样品,但自动监测仪的监测位点是确定的,这就造成环境土壤样品自动监测系统误差相对较大。因此,提高土壤样品自动监测系统的精度成为当前土壤环境质量监测面临的问题。环境质量监测工作是环境污染治理、环境管理的基础,及时、迅速地掌握环境质量状况需要强大的环境质量监测系统支持。环境质量自动监测仪精度的提高是整个环境质量自动监测系统准确及时开展工作的重要起点,也是整个智慧环保体系工作的基础。

越来越多的生态大数据项目的建立增加了环境信息风险发生的可能<sup>[46]</sup>。智慧环保体系需要以大数据和物联网为依托,海量环境信息贯穿了整个智慧环保体系,如何保证环境信息安全,防止数据泄露是智慧环保的重要议题之一。例如,环境质量检测结果大多数是可公开的,对保密要求低,但是一些环境行业的数据具有敏感性,如自然保护区、风景名胜区、国家重点文物等地的环境数据需要进行保密<sup>[47]</sup>,这就涉及信息泄露,网络安全的问题。为了满足环境自动检测数据传输和网络安全要求,需要在局域网各连接口建立安全可靠的链接并定时更新维护,提高对信息安全的重视程度。整体来说,智慧环保体系网络安全要求如下:需要高效的网络管理软件完成对海量环境信息的处理;需要构建网络拓扑结构直观准确地了解环境数据网络实际运行情况;需要网络管理软件对故障网络进行预警,以保证

管理人员及时做出响应,保障环境信息网络系统的正常运行<sup>[48]</sup>。

我国智慧环保产业发展前景广阔,推动智慧环保体系的产业化和商业化是推动环保和经济同时发展的重要措施。自2015年国务院印发《促进大数据发展行动纲要的通知》,2016年国家发展和改革委员会印发《“互联网+”绿色生态三年行动实施方案》以来,智慧环保已经成为蓬勃发展的朝阳产业。当前,智慧环保产业市场需求巨大,各省(区、市)对环保尤其是智慧环保产业的重视度逐渐提高,大大推动了智慧环保体系向产业化和商业化发展。当前,我国智慧环保建设仍是以政府为主导、市场运营为辅的模式<sup>[49]</sup>。如衢州市智慧环保体系是典型的政府购买服务、企业组织运行、公众参与的三位一体智慧环保建设模式<sup>[50]</sup>,同时也是目前应用较为广泛的智慧环保产业商业化模式。政府购买服务的商业化模式增加了政府资金缺口,加大了政府压力,不利于一些经济落后地区推行智慧环保政策,因此如何增加智慧环保和环境治理的商业化模式,推动企业参与智慧环保体系建设,减轻政府负担是智慧环保在环境治理应用上的关键问题之一。

未来,智慧环保体系发展的方向主要是深度和广度2个方面。广度就是扩大智慧环保体系的应用范围。当前,智慧环保体系涵盖了水体(地表水和地下水)<sup>[51]</sup>、土壤<sup>[52]</sup>、大气<sup>[53]</sup>、噪声<sup>[54]</sup>等多个方面,涉及环境质量自动检测、污染源监测、环境应急系统处理及环境突发事件处理等多个层面。海洋环境自动监测,核辐射和电磁辐射安全管理及化学废物、危险品安全管理等其他环境管理的重要组成部分尚未得到重视。固体废物和化学危险废物处理一直是实验室、化工产业面临的重要问题。固体废物,尤其是危险废物处理不当极易产生安全事故,通过智慧环保体系中的危险废物运输自动监测系统,对危险废物的运输路线及运输过程中的性质进行监测,可以保证化工企业管理人员随时掌握危险废物在运输过程中发生的化学、物理变化,并能在发现异常变化的第一时间做出应对,降低事故发生的可能性及危害性。深度就是通过提高智慧环保体系自身的准确性和时效性,提升整个系统的应用水平。监测技术和数据处理网络始终是智慧环保体系发展的制约因素。提高环境监测数据的准确度能从根本上提高智慧环保体系网络对环境的感知能力,强大的数据处理系统能保证整个系统正确的运行,有效的环境信息安全管理系统能保障整个系统安全平稳地运行。

## 参考文献

- [1] 郑石明.数据开放、公众参与和环境治理创新[J].行政论坛,2017,24(4):76-81.  
ZHENG S M. Open data, public participation and environmental governance innovation[J]. Administrative Tribune, 2017, 24(4): 76-81.
- [2] FAZIO M, CELESTI A, PULIAFITO A, et al. Big data storage in the cloud for smart environment monitoring [J]. Procedia Computer Science, 2015, 52: 500-506.
- [3] POTKONJAK V, GARDNER M, CALLAGHAN V, et al. Virtual laboratories for education in science, technology, and engineering: a review[J]. Computers & Education, 2016, 95: 309-327.
- [4] 吴前梅, 田时达. GPS在高速公路测绘中的运用[J]. 西部资源, 2020(4): 152-154.
- [5] LARSON K M, MACFERRIN M, NYLEN T. Brief communication: update on the GPS reflection technique for measuring snow accumulation in Greenland[J]. The Cryosphere, 2020, 14(6): 1985-1988.
- [6] 陶延林, 张明. 基于北斗系统的矿山地表GPS监测研究[J]. 矿产勘查, 2019, 10(12): 2990-2994.  
TAO Y L, ZHANG M. Research on mine surface GPS monitoring based on Beidou system[J]. Mineral Exploration, 2019, 10(12): 2990-2994.
- [7] ZHENG S, TAN H X, CHEN H B, et al. Hydrological parameter analysis based on similarity theory and 3S technology[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 218: 012132.
- [8] 谷金英, 冯仲科. 基于3S技术的北京市三维绿量估测研究[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(1): 240-244.  
GU J Y, FENG Z K. 3S technology-based estimation model of tridimensional green biomass in Beijing[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(1): 240-244.
- [9] 何绍福, 马剑, 李春茂. “3S”技术发展综述[J]. 三明高等专科学校学报, 2001(3): 50-54.  
HE S F, MA J, LI C M. Review of 3S technology development[J]. Journal of Sanming Academy of Higher Learning, 2001(3): 50-54.
- [10] 王振中. “3S”技术集成及其在土地管理中的应用[J]. 测绘科学, 2005, 30(4): 62-64.  
WANG Z Z. The integration of “3S” techniques and their applications in land management[J]. Science of Surveying and Mapping, 2005, 30(4): 62-64.
- [11] 许晖, 郭铁成. IBM“智慧地球”战略的实施及对我国的影响[J]. 中国科技论坛, 2014(3): 148-153.  
XU Y, GUO T C. The influence of IBM “smarter planet” on China[J]. Forum on Science and Technology in China, 2014(3): 148-153.
- [12] 李德仁, 龚健雅, 邵振峰. 从数字地球到智慧地球[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(2): 127-132.  
LI D R, GONG J Y, SHAO Z F. From digital earth to intelligent earth[J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2010, 35(2): 127-132.

- [13] 徐敏,孙海林.从“数字环保”到“智慧环保”[J].环境监测管理与技术,2011,23(4):5-7.  
XU M, SUN H L. From “digital environmental protection” to “smart environmental protection”[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2011, 23(4): 5-7.
- [14] GALE F, ASCUI F, LOVELL H. Sensing reality: new monitoring technologies for global sustainability standards [J]. Global Environmental Politics, 2017, 17(2): 65-83.
- [15] KOOMEY J G, MATTHEWS H S, WILLIAMS E. Smart everything: will intelligent systems reduce resource use [J]. Annual Review of Environment and Resources, 2013, 38(1): 311-343.
- [16] RESCH B, SCHULZ B, MITTLBOECK M, et al. Pervasive geo-security: a lightweight triple: a approach to securing distributed geo-service infrastructures [J]. International Journal of Digital Earth, 2014, 7(5): 373-390.
- [17] GOODCHILD M F, GLENNON J A. Crowdsourcing geographic information for disaster response: a research frontier [J]. International Journal of Digital Earth, 2010, 3(3): 231-241.
- [18] SHAHID N, NAQVI I H, QAISAR S B. Characteristics and classification of outlier detection techniques for wireless sensor networks in harsh environments: a survey [J]. Artificial Intelligence Review, 2015, 43(2): 193-228.
- [19] 乔欣,孔兵.基于 ZigBee 技术的巢湖水质监测系统[J].巢湖学院学报, 2019, 21(3): 7-13.  
QIAO X, KONG B. Design of Chaohu water quality monitoring system based on ZigBee technology [J]. Journal of Chaohu University, 2019, 21(3): 7-13.
- [20] 李春明,张会,陈丁楷.室内空气质量在线检测系统的研制[J].环境科学与技术, 2017, 40(5): 141-144.  
LI C M, ZHANG H, CHEN D K. Development of online detecting system for indoor air quality [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(5): 141-144.
- [21] 杨康,刘文强,万骏.基于 NB-IoT 的化工厂爆炸性环境监测及预警系统[J].物联网技术, 2020, 10(12): 20-23.
- [22] 姚引娣,王磊,花静云,等.基于 B/S 架构的 LoRa 远程温室监测系统[J].传感器与微系统, 2021, 40(1): 78-80.  
YAO Y D, WANG L, HUA J Y, et al. LoRa remote greenhouse monitoring system based on B/S architecture [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(1): 78-80.
- [23] 金舰,蒋鑫,吴星,等.NB-IoT 与 eMTC 技术对比与发展现状分析[J].信息通信技术与政策, 2019(1): 89-94.
- [24] 汪康.基于 NB-IoT 的智能楼宇环境监控系统设计[D].南京:南京邮电大学, 2019.
- [25] 周博雅,徐若然,徐晓林,等.智慧环保在城市环境治理中的应用研究[J].电子政务, 2018(2): 82-88.
- [26] 葛锡志.智慧环保大气环境遥感实时监测分析服务平台助力大气污染精准监测[J].卫星应用, 2020(2): 32-35.
- [27] YAN W G, HUTCHINS M, LOISELLE S, et al. An informatics approach for smart evaluation of water quality related ecosystem services[J]. Annals of Data Science, 2016, 3(3): 251-264.
- [28] BUKIN O A, PROSCHENKO D Y, CHEKHLENOK A A, et al. Methods for optical monitoring of oil pollution of sea water basins using unmanned aerial vehicles [J]. Atmospheric and Oceanic Optics, 2019, 32(4): 459-463.
- [29] 黄诗曼,胡庆武,李海东,等.基于 RS 和 GIS 的峨眉山风景区生态风险评价[J].环境科学研究, 2020, 33(12): 2745-2751.  
HUANG S M, HU Q W, LI H D, et al. Ecological risk assessment of mount Emei based on RS and GIS [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(12): 2745-2751.
- [30] 张知晓,泽桑梓,季梅,等.薇甘菊替代控制技术研究[J].西部林业科学, 2018, 47(3): 123-128.  
ZHANG Z X, ZE S Z, JI M, et al. The replacement control technology of *Mikania micrantha* [J]. Journal of West China Forestry Science, 2018, 47(3): 123-128.
- [31] 李云琴,季梅,刘凌,等.云南省林地薇甘菊防控研究进展[J].生物安全学报, 2019, 28(1): 1-6.  
LI Y Q, JI M, LIU L, et al. Progress in prevention and control of *Mikania micrantha* in Yunnan forestland [J]. Journal of Biosafety, 2019, 28(1): 1-6.
- [32] 焉恒琦,朱卫红,毛德华,等.长江三角洲国际重要湿地人为胁迫遥感解析[J].中国环境科学, 2020, 40(8): 3605-3615.  
YAN H Q, ZHU W H, MAO D H, et al. Landsat-based observation of human pressure to wetlands in Ramsar sites over the Yangtze River Delta [J]. China Environmental Science, 2020, 40(8): 3605-3615.
- [33] 孙中宇,荆文龙,乔曦,等.基于无人机遥感的盛花期薇甘菊爆发点识别与监测[J].热带地理, 2019, 39(4): 482-491.  
SUN Z Y, JING W L, QIAO X, et al. Identification and monitoring of blooming *Mikania micrantha* outbreak points based on UAV remote sensing [J]. Tropical Geography, 2019, 39(4): 482-491.
- [34] SANDINO J, GASTON K J, GONZALEZ F, et al. UAVs and machine learning revolutionising invasive grass and vegetation surveys in remote arid lands [J]. Sensors, 2018, 18(2): 605.
- [35] QIAN S, WANG L Y, GONG X F. Climate change and its effects on grassland productivity and carrying capacity of livestock in the main grasslands of China [J]. The Rangeland Journal, 2012, 34(4): 341.
- [36] MÜNZENMAY M, TANIMOU M, KURRE H. Digital ecosystem nevonex for smart agriculture [J]. ATZheavy Duty Worldwide, 2020, 13(2): 44-49.
- [37] 钱拴,延昊,吴门新,等.植被综合生态质量时空变化动态监测评价模型[J].生态学报, 2020, 40(18): 6573-6583.  
QIAN S, YAN H, WU M X, et al. Dynamic monitoring and evaluation model for spatio-temporal change of comprehensive ecological quality of vegetation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6573-6583.
- [38] 徐腾腾,于秀丽.基于 GIS 的城市级环境应急管理系统设计[J].电脑与信息技术, 2019, 27(3): 59-62.  
XU T T, YU X L. Design of urban environmental emergency management system based on GIS [J]. Computer and Information Technology, 2019, 27(3): 59-62.
- [39] 葛智刚,陈永静.我国核数据发展现状与未来发展的思考[J].科学通报, 2015, 60(32): 3087-3098.

- GE Z G, CHEN Y J. Status and prospects of nuclear data development in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60 (32): 3087-3098.
- [40] VIGNE J, MANRIQUE A, MOUET A, et al. Nuclear cardiology in the COVID-19 pandemic era [J]. Archives of Cardiovascular Diseases, 2020, 113(6/7): 374-377.
- [41] BURGER J, GOCHFELD M, CLARKE J, et al. An ecological multidisciplinary approach to protecting society, human health, and the environment at nuclear facilities [J]. Remediation Journal, 2013, 23(3): 123-148.
- [42] 李雪琴, 曹吉生, 张伟军. 浅谈辐射安全与防护管理工作[J]. 中国辐射卫生, 2011, 20(3): 279-280.
- [43] 刘占阳, 胡澄, 孙雪峰, 等. 一种基于滨海核电站海上 $\gamma$ 辐射剂量率的智能化自动监测系统研究与设计[J]. 应用海洋学报, 2020, 39(2): 273-278.
- LIU Z Y, HU C, SUN X F, et al. Development of an intelligent automatic monitoring system for marine radiation dose rate measurement for coastal nuclear power plant [J]. Journal of Applied Oceanography, 2020, 39(2): 273-278.
- [44] 唐倩, 王金满, 荆肇睿. 煤炭资源型城市生态脆弱性研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(7): 825-832.
- TANG Q, WANG J M, JING Z R. Ecological vulnerability of mining resource-based cities: a review [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(7): 825-832.
- [45] 陈海波, 冶林茂, 李树岩, 等. FDR 土壤水分自动监测仪的标定与检验[J]. 微计算机信息, 2009, 25(31): 104-106.
- CHEN H B, YE L M, LI S Y, et al. The calibration and verification for auto soil moisture monitor FDR [J]. Microcomputer Information, 2009, 25(31): 104-106.
- [46] 郭站君. 环境保护行业信息化过程中的信息安全分级保护研究[J]. 中国信息化, 2019(4): 72-73.
- [47] 李春艳. 浅析环境信息网络安全管理[J]. 中国战略新兴产业, 2017(24): 99.
- [48] 秦宇, 孙宇, 邢可佳, 等. 基于生态环境大数据建设的环境信息安全监管体系研究[J]. 环境保护, 2018, 46(21): 56-60.
- QIN Y, SUN Y, XING K J, et al. Investigation on the supervision system of environmental information security in the construction of ecological environment big data [J]. Environmental Protection, 2018, 46(21): 56-60.
- [49] 胥彦玲, 李纯, 闫润生. 中国智慧环保产业发展趋势及建议[J]. 技术经济与管理研究, 2018(7): 119-123.
- XU Y L, LI C, YAN R S. Trends and suggestions for the development of smart environmental protection industry in China [J]. Journal of Technical Economics & Management, 2018(7): 119-123.
- [50] 王苏苏. 政府环境治理的困境与对策研究: 以衢州市政府“智慧环保”项目为例[D]. 苏州: 苏州大学, 2016.
- [51] 刘柏音, 刘孝富, 王维. 长江生态环境保护修复智慧决策平台构建与初步设计[J]. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1276-1283.
- LIU B Y, LIU X F, WANG W. Construction and design of intelligent decision-making platform for environmental protection of the Yangtze River [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(5): 1276-1283.
- [52] 赵小强, 权恒, 晏珠峰, 等. 面向智慧农业的分层土壤墒情监测仪的设计及应用[J]. 物联网学报, 2020, 4(4): 43-50.
- ZHAO X Q, QUAN H, YAN Z F, et al. Design and application of the layered soil moisture monitor for the smart agriculture [J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(4): 43-50.
- [53] 崔伟. 智慧治理: 大数据时代京津冀大气污染治理之创新[J]. 知与行, 2016(7): 85-88.
- CUI W. Wise controlling: innovative air pollution control in Beijing, Tianjin and Hebei Province in big data era [J]. Cognition and Practice, 2016(7): 85-88.
- [54] 刘野, 舒磊, 霍志强, 等. 基于无线传感器网络的环境噪声感知研究进展[J]. 南京农业大学学报, 2020, 43(5): 808-819.
- LIU Y, SHU L, HUO Z Q, et al. Research progress of wireless sensor networks for noise monitoring [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2020, 43(5): 808-819. ⊗