

大数据在生态环境领域的应用进展与展望

赵苗苗^{1,2} 赵师成³ 张丽云¹ 赵 芬¹ 邵 蕊¹ 刘丽香¹ 赵海凤¹ 徐 明^{1*}

(¹中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; ²中国科学院大学, 北京 100049;

³信阳农林学院, 河南信阳 464000)

摘 要 随着互联网和移动通讯技术的发展,生态环境领域从信息采集到加工处理也进入信息化和数字化时代,数据量呈现爆发式增长,生态环境大数据受到越来越多的关注.生态环境大数据是在对生态环境要素“空天地一体化”连续观测的基础上,集成海量的多源多尺度信息,借助云计算、人工智能及模型模拟等大数据分析技术,实现生态环境大数据的集成分析和信息挖掘.生态环境大数据存在数据来源多样、涉及部门广;数据采集方式不统一;服务对象众多、对专业化服务要求高等特点.大数据已在生态环境领域得到了初步应用,如在全球气候变化预测、生态网络观测与模拟和区域大气污染治理等方面作用明显.目前我国生态环境大数据的发展还存在诸多问题,包括数据共享难、监测技术落后、传感器等监测设备严重依赖进口、数据集成和深度分析能力不足等.随着大数据技术的进步,未来大数据在解决生态环境健康问题、提高重大生态环境风险预警预报水平、提高生态环境领域科学研究水平等方面都将发挥巨大作用.大数据将最终实现生态环境管理决策定量化、精细化,生态环境信息服务多样化、专业化和智能化,为中国社会经济可持续发展和生态文明建设提供技术保障.

关键词 大数据; 生态环境; 气候变化; 生态网络; 大气污染

Applications of eco-environmental big data: Progress and prospect. ZHAO Miao-miao^{1,2}, ZHAO Shi-cheng³, ZHANG Li-yun¹, ZHAO Fen¹, SHAO Rui¹, LIU Li-xiang¹, ZHAO Hai-feng¹, XU Ming^{1*} (¹Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³Xinyang Agricultural and Forestry University, Xinyang 464000, Henan, China).

Abstract: With the advance of internet and wireless communication technology, the fields of ecology and environment have entered a new digital era with the amount of data growing explosively and big data technologies attracting more and more attention. The eco-environmental big data is based airborne and space-/land-based observations of ecological and environmental factors and its ultimate goal is to integrate multi-source and multi-scale data for information mining by taking advantages of cloud computation, artificial intelligence, and modeling technologies. In comparison with other fields, the eco-environmental big data has its own characteristics, such as diverse data formats and sources, data collected with various protocols and standards, and serving different clients and organizations with special requirements. Big data technology has been applied worldwide in ecological and environmental fields including global climate prediction, ecological network observation and modeling, and regional air pollution control. The development of eco-environmental big data in China is facing many problems, such as data sharing issues, outdated monitoring facilities and technologies, and insufficient data mining capacity. Despite all this, big data technology is critical to solving eco-environmental problems, improving prediction and warning accuracy on eco-environmental

本文由青海生态系统服务功能监测与价值评估项目(2013-N-556)、国家重点基础研究发展计划项目(2012CB417103)和四川省林业厅项目(2009-204)资助 This work was supported by the Ecosystem Services Monitoring and Value Evaluation in Qinghai (2013-N-556), the National Key Basic Research and Development Plan of China (2012CB417103), and the Project of Forestry Department of Sichuan Province (2009-204).

2016-08-02 Received, 2017-02-05 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mingxu@igsnr.ac.cn

catastrophes, and boosting scientific research in the field in China. We expected that the eco-environmental big data would contribute significantly to policy making and environmental services and management, and thus the sustainable development and eco-civilization construction in China in the coming decades.

Key words: big data; ecological environment; climate change; ecological network; air pollution.

随着互联网与移动通信技术的发展,信息数据量呈现出史无前例的爆发式增长,“大数据”已经引发了学术界的广泛关注.从 2008 年《自然》杂志刊登出大数据专题,到 2012 年 3 月奥巴马政府发布“大数据研究和发展”倡议,再到 2015 年 9 月中国政府“关于促进大数据发展的行动纲要”的发布^[1],大数据已经引起越来越多人的重视.

在中国,国家非常重视大数据发展和应用的前景,已将大数据确立为国家发展战略^[2].“大数据”时代的到来被业界誉为又一次信息技术革命,正在给技术进步和社会发展带来全新的动力,并将对政府和管理与决策,以及人们的生活产生巨大而又深远的影响^[3-4].大数据将以一种更加理性的方式颠覆人们探索世界的方法,大数据更多地体现在思维方式的改变,是一种崭新的战略、认知和文化,必将引起经济、军事、交通、环境等领域的里程碑式的深刻变革^[5].

大数据是以“5V”为主要特征的数据集合,具体包括:存储空间大(volume)、快速访问(velocity)、类型繁多(variety)、应用价值大(value)和真实性高(veracity)^[6-7],大数据包括市场交易及其交互过程中产生的所有数据,数据来源众多,涉及各个行业部门,数据之间的关联性比较强,数据类型不仅包括结构化数据,还包括图像、视频等非结构化数据^[8].大数据的核心思想就是用崭新的思维、技术对海量数据进行整合分析,构建各类数据库,从中发现有用的知识和价值,带来知识和科技的大发展^[9].大数据集数据、技术和应用为一身,为决策问题提供服务.

近年来,大数据已经在农业、经济、气象、交通、医疗、通讯等领域得到了有效应用^[10].生态学领域也逐渐认识到了大数据的优势,并开展了相关研究^[11-13].近来,环境保护部门发布了“生态环境大数据建设总体方案”,该方案将生态环境大数据的构建作为推动生态文明建设的重要保障措施.

1 生态环境大数据

伴随着经济的高速发展,全世界的生态环境问题也愈发严重.目前,全球的生态环境问题主要表现

在环境污染、土地退化、森林锐减、生物多样性丧失和水资源枯竭等方面^[14-15].中国目前的环境问题突出表现在水土流失严重、湿地面积减少、淡水资源短缺加剧、生物多样性减少、草原退化和土地沙化尚未得到有效遏制等方面^[16],另外气候变化已经导致中国内陆冰川冻土加剧融化、局部沙漠化、海平面上升和海水倒灌、旱涝灾害增加、农业生产受损等^[17-18].这些问题往往涉及尺度大、过程复杂、驱动因素众多,解决起来难度大.

早在 20 世纪中叶,生态环境领域就出现了“大数据”的思想,宏观生态学研究首先发现了大数据的重要性.生态环境问题的解决需要长期的数据积累,大数据技术为解决当前复杂的生态环境问题带来了新的机遇.生态环境大数据则是在集成多个部门、多源、多尺度数据的基础上,经过对生态环境全要素“空天地一体化”的连续观测,收集了海量的信息,借助云计算、人工智能及模型模拟等大数据分析技术^[19],实现生态环境大数据的集成分析和信息挖掘,找到关键问题与关键区域,制定不同的解决方案与对策,通过对比分析找到最优解决途径,为解决中国目前生态环境问题、提高重大生态环境风险预警预报水平,以及制定相关政策法规提供科技支撑.生态环境大数据,就是通过运用大数据理念、技术和方法,对生态环境范畴数据的收集、存储、分析与利用,用以解决实际存在的各种生态问题,是大数据理论和技术在生态环境领域上的应用和实践.生态环境大数据不仅包括一般大数据的根本属性,并且具有其本身的特殊性和复杂性,如:数据来源多样、分布广泛,内容庞杂、涉及部门广;数据采集方式不统一、标准不一致;服务对象众多(包括政府、企业、科研院校、社会团体、公众等);对专业化服务要求高等^[2].

目前,中国生态环境领域所涉及的数据资源主要包括地面监测数据、遥感影像数据、社会经济数据、专项调查数据以及科学研究数据等.这些数据并不是由专门的部门统一管理,而是分布在环保、国土、水利、农业、林业、卫生、气象、海洋等多个政府部门.另外,生态环境的数据信息类型丰富多样,既有

像传统数据库数据等结构化信息,又有文本、图像、视频等非结构化信息,数据之间的关联性特别强.大数据的核心思想是在类型繁多、数量巨大的数据库中如何快速有效地提取出有价值的信息.

2 大数据在生态环境领域的应用进展

大数据的价值最终体现在大数据的应用上,人们关心大数据,最终还是关心大数据的应用,关心如何从业务和应用出发让大数据真正实现其所蕴含的价值,从而为我们的生产生活带来有益的改变.大数据在生态环境领域已得到初步应用,且成效显著.生态环境领域的研究已经进入信息化时代,利用现代化的数据采集与传输工具,开展数据密集型科学研究来解决错综复杂的生态环境问题,通过对海量数据的整合和分析,创新科学技术,挖掘出更大的价值^[20].大数据在生态环境领域得到了初步应用,主要突出表现在全球气候变化预测、生态网络观测与模拟、区域大气污染治理等方面.

2.1 全球气候变化预测

进入 20 世纪以来,随着生产力爆发式的提高,温室气体排放增多,全球气候变化出现异常.如何短期提高气象预报的精度,以及如何长期应对各种气象灾害及其带来的次生灾害,减少人员伤亡及财产损失,已经引发了越来越多的关注,这也是现在气象预报领域和气候变化预测中的重点和难点^[21-23].然而,因为气候体系是一个耗散的、具备多个不稳定源的高阶非线性系统,其内部相互作用非常复杂,由此导致了气候的复杂性和可变性.借助于大数据技术的应用,气候变化预测与气象预报精度将得到很大的提升.

随着新气象观测设备的推广和应用,气象观测水平由过去较少指标的常规观测到现在大量多指标的非常规观测,观测的频率和精度日益增加.气象监测站点遍布全球,到 2015 年年底,中国约有 5 万多个地面自动观测站,观测方法也由最开始的人为观测变为高水平的雷达卫星,观测的规模从地面到几千米的高空^[24].与此同时,为了真实地模拟全球大气走向,大量的模式数据也随之产生.根据实际的天气数据(包括地面、空中和卫星),高性能的计算机通过物理方程计算温度、空气湿度、气压、风速、风向等物理量^[25].随着对陆面和气候系统认识的逐步深入,研究者发现,气候变化不但与气候系统内部过程有关,还受到下垫面土壤和植被等因素的影响.气候模式由最初的大气环流模式发展到今天的陆、海、空

耦合模式,并向着包括人类生活圈在内的地球各个系统耦合的“气候系统模式”发展,所需的输入变量也从最初的气象数据拓展到现在的植被、土壤、水分、人类干扰等多方面全方位数据^[26-27].大数据技术有助于整合海量庞杂的观测数据及模式数据,提高数据的存储速度和管理效率,通过对海量气象数据的分析和挖掘,达到精确的气象预测预报和风险预警的水平.大数据技术有助于综合多源数据,能更好地评价长期气候系统状况,提高气象预报精度,尤其是对强大自然灾害天气的预报能力.

2015 年 6 月,美国宇航局联合超级计算机技术、地球系统模型、工作流管理和遥感数据协作分析平台,发表了从 1950 年到 2100 年全世界的气候变化预测数据,该数据库可以分析全球各地的气温与降水情况的变化,空间分辨率为 15 km.国内,谭清海等^[28]针对气候模式在超大规模数值模拟中所产生的 Tb 或 Pb 量级的四维一体数据的可视化和分析诊断方法,提出了基于 Server-Client 方式的远程数据抽取和并行可视化解决方案.中国的预报客户端简称“MICAPS”(气象信息综合分析处理系统),就是气象大数据应用的典型例子,它的主要功能是可视化显示存储在服务器中的全部气象数据,并且在客户端为用户提供了方便快捷的浏览和交互,然后预报员凭借预测的模式数据和全部实况数据,再结合已有的分析,就可以得到天气预报结果,将天气预报的结果出图或者写成文字发送给有关部门.黄刚等^[29]分析了大气科学数据的特点,结合 e-Science 的大气科学数据再分析平台,构建了一套新的大气科学数据的分析和可视化系统,并提出数据处理算法与数据分析系统结合的可行方案.贾韶辉^[30]基于大数据角度,研发了大数据的信息与专业服务集成平台,开展针对中国石油气象与地质灾害的预报预警工作.2015 年 5 月,中国气象局与阿里云合作,旨在挖掘全球尺度历史观测及预报数据等气象大数据的深层价值.2015 年 9 月,中国科学院大气物理研究所等发布了“地球数值模拟装置”原型系统,该系统集成了土壤、大气化学、植被动力学、生物地球化学等模式和模块,仅需一整天就能够估算地球的大气、水、岩土、生物等多个圈层长达 6 年的变化.

此外,气候变化观测数据包含的信息非常丰富,也发挥了跨行业的服务价值,有可能挖掘出新的信息,从而扩大业务和服务的范围.例如,美国硅谷的一家公司使用降雨、气温、土壤状况等气象数据与多年农作物产量进行关联分析,来预测出各地农场来

年的产量和适宜栽培的品种,这些结果以个性化保险服务的形式向农户出售,从而减少了气象灾害给当地农户带来的风险及损失.气象大数据应用还可在林业、海洋、气象灾害等方面拓展新的业务领域^[10].

2.2 生态网络观测与模拟

大数据在生态网络研究方面的应用,可以追溯到国际地球物理年(1957—1958年)以及国际生物学计划(IBM)(1964—1974年),当时被称作大科学研究,其目的是收集大量的数据,后来这种研究演变成了现在的国际长期生态研究计划(ILTER)^[31].ILTER主要是依托研究站开展生态系统过程与格局方面的研究工作,并系统地收集和存储所有观测数据.目前在国际上存在的观测网络,大部分都是基于长期定位观测,用来收集区域的生物、大气、水、土壤和污染物等的综合观测数据,如GEMS(全球环境监测系统)、FLUXNET(通量观测网络)以及GEO·BON(国际生物多样性观测网络)等^[32].这些网络采集的数据量大,涵盖内容丰富,具备生态环境大数据的典型特征.大数据在生态系统研究方面的应用,还需要依靠生态系统长期定位研究网络.

美国国家生态观测站网络是由17个地区网络构成一个国家级生态学研究 and 环境教育平台,包括遥感观测与陆地观测.陆地观测指标约有500个大类,包含气象、土壤、植被、大气化学和水体等^[33];遥感观测覆盖全球,不仅包括传统的多光谱数据,还包括新型的高分辨率和高光谱数据,甚至扩展至荧光数据与重力场数据.这些大范围、多变量数据的收集,促使科学家在更大时空尺度、更多领域进行更为复杂的综合分析,例如综合考察生物入侵模式^[34]、预测物种丰富度^[35]、统计森林覆盖变化^[36]与记录各生态区碳动态^[37]等研究.通过收集美国全境范围内的各种数据,对数据进行处理、挖掘和综合分析,阐明环境变化的成因和后果,预测生态系统健康状况及环境变化的趋势,保证美国的生物和生态安全.

中国已于1988年建立了由42个定位监测站组成,覆盖农田、森林、草原、沙漠等9类生态系统,280多个观测指标的生态系统研究网络(CERN)^[38-39],经过近30年的发展,该网络形成了长期服务于不同尺度的水-碳通量研究、生物多样性研究、陆地样带野外观测一体化的综合观测研究^[40].除了在国际上具有重要影响的CERN外,林业部门从20世纪50年代开始逐步建立的中国森林生态系统定位研究网络(CFERN)也具有重要影响.目前,CFERN有横跨

超过30个纬度、代表了不同气候带73个森林生态观测站,覆盖了中国主要森林生态系统分布区,同时也在积极建设湿地监测网络和荒漠监测网络,规划到2020年,森林生态站数量达到99个,湿地生态站达到50个,荒漠生态站达到43个^[41].此外,中国水利、农业、环保等部门也根据需求建立了各自的监测网络^[32].另外,2001年建立了China-FLUX(陆地生态系统通量观测研究网络),开始了长期联网观测.此外,中国也组建了包括同济大学东海海底观测、中国科学院南海研究所海底观测等在内的海洋生态系统观测网.以上网络主要通过生态系统研究网络的定位观测收集数据,利用生态学的方法进行统计分析和解释,在森林生态系统服务^[42-43]、土壤水资源生态功能服务和保护^[44-45]、土壤碳氮耦合^[46]、土壤热通量时空分布^[47]、光合有效辐射^[48-49]、湿地生态系统保护^[50]等方面进行研究.

生态系统长期定位观测网络的诞生,最大限度地摒除了采样和人为的误差,研究结果更加可靠.具有基于多方位全面覆盖的观测网络,观测数据的实时有效、自动传输,现代化的计算机水平,多源多尺度数据融合技术,以及数据共享策略等方面的优势.生态网络观测可以看作是生态环境领域加入大数据世界的重要一步.生态网络观测的好处主要有以下3点:首先,为科学研究提供各个时间尺度、空间尺度,以及各个生物学层次完善的数据支持服务;其次,是建立高速运转存储的生态环境大数据平台,它可以将散落在各地的生态系统观测平台联合在一起,及时高效地传输处理数据,使用户方便地查询并开展工作;最后,研究者可以通过生态环境大数据共享和综合分析,运用模型模拟来预测不同的政策和人类活动对自然生态系统和环境所造成的影响^[51].

2.3 区域大气污染治理

生态环境问题的复杂性不仅源于生态系统的内在复杂性,更受到地球、生命和社会等诸多领域的共同作用.改革开放以来,中国高消耗、高排放和高污染的“三高”粗放型发展模式,带来经济持续快速增长的同时,也带来了严重的生态环境污染问题^[52-53].美国国家航空航天局(NASA)分析了2005—2014年气流卫星观测图像,发现这10年间中国大陆、中东以及印度因为工业扩张的原因导致空气污染持续增加,雾霾越发严重^[54].据“2015年中国气候公报”统计,全国2015年全年总计出现过11次高强度、大范围的霾过程,持续时间长,具有强雾与重霾混合,以及能见度低、影响大等特点.

只有及时分析挖掘大气污染的时空数据,才能准确预测,及时反馈,预防生态环境灾难的发生。然而,大气污染数据呈现出复杂的时间和空间关系,涉及的数据多样、区域广泛,不仅包括环境监测数据、气象等常规数据,还需要考虑经济统计数据、交通流量数据等社会数据。对于大气污染治理,地区联防联控仍然是当下的共识,大数据为地区大气质量管理、区域间协调和合作机制提供了技术和决策支撑^[55],大数据技术通过对海量数据的有效整合、抽取、数据分析以及数据解释和挖掘,为实施地区间空气污染联防联控措施带来了新的机遇。传统的大气污染质量控制一般通过对监测数据、气象数据、地理数据等进行综合分析,可以起到一定的作用,但传统的数据分析方法处理大气污染的时空数据面临较多困难和局限。与之相比,大数据技术在对视频、语音、文档、图片这些非结构化数据的处理、分析和模拟预测方面更具有优势。

例如,武装等^[56]将空气污染观测数据与先进的 Hadoop 平台进行融合,通过对监测数据进行挖掘、分析,并结合未来天气预报数据,对区域空气污染情况的时间分布进行有针对性的研究,并将空气污染物的时空分布特征以可视化方法预测。曹骝等^[57]开发了基于大数据平台的 $PM_{2.5}$ 监测预警系统,该系统联合了 $PM_{2.5}$ 云监测仪和大数据处理平台,运用创新的设计理念,使环境质量控制与大数据技术进行有机的结合,为环境污染的保护创建了海量数据管理平台。“APEC 蓝”的发生也是大数据分析的结果。为了保障 APEC 会议期间的北京空气质量,2014 年 11 月 3—11 日,京津冀及周边地区启动了高强度的“空气保卫战”,除北京、天津之外,周边省份河北、山西、内蒙古、山东、河南等空气质量保障的重心区,在统一调度下,实施了区域大气污染联防联控。为预报空气污染状况,IBM 公司与北京市政府联合开发了“绿色地平线”大数据平台系统,该系统结合当时的气象卫星资料、地面监测资料,根据当时气象条件以及周围所有的企业排放数据进行大数据分析,预测未来 72 小时的空气质量。在预测空气质量较差的地区,政府通过该区工厂停工等辅助措施,减少空气污染物排入,这些措施的实施大幅减少了整个区域的大气污染物排放量^[58]。

2.4 其他方面

大数据在生态环境领域还有许多其他方面的应用。例如,在生态环境资源管理方面,由于涉及的数据内容众多、存储格式不一,传统的数据管理方法很

难对生态环境资源进行有效的管理。随着大数据存储、处理、智能分析技术的发展,基于生态环境大数据平台对各类生态环境资源数据进行整合,实现生态环境资源的优化配置及合理开发,解决目前存在的资源开发利用过度、配置不合理等问题;在生态环境评价方面,可以运用大数据在数据分析方面的优势,结合模型模拟、人工智能等先进技术,评价各类生态系统的现状和可能存在的不利于其稳定的各种问题,例如,进行生态环境质量评价、安全评价、风险评价、退化评价、脆弱性评价、多样性评价,以及工程影响评价和生态健康评价等,从而为生态环境的决策管理提供科学依据。

3 展 望

尽管大数据在生态环境领域得到了初步应用,但由于中国幅员辽阔,生态环境状况复杂,监测系统还无法完全满足生态环境建设的需要,很多监测网络设备有待进一步补充完善,数据多是野外实时观测获得的,具有体量大、类型多、结构复杂等特点。除数据本身特点之外,在管理与应用方面还存在很多不足,具体表现在以下几个方面:1) 缺乏数据共享。由于各部门收集数据的数据标准、格式和技术路线不统一,导致严重的数据割据,造成了“数据孤岛”。数据共享一直是限制生态环境大数据发展的重大问题,数据共享是开展生态环境大数据建设的条件和基础。2) 技术问题。从生态环境数据的采集、存储、管理、分析到应用都需要强有力的技术支持。对大数据所涉及的数据存储与压缩技术,网络传输速度、大数据专业模型的开发、计算机处理能力等提出了新的要求。3) 应用不足。中国生态环境大数据的创新应用仍然十分有限,大数据的力量还远远没有发挥出来,政府利用生态环境大数据的能力还很低,没有形成一个成熟的生态环境大数据产业链和有影响力的数据企业。

大数据在生态环境领域的应用前景非常广阔。借助云计算、人工智能及模型模拟等大数据分析技术,构建生态环境大数据存储与处理分析平台,实现生态环境大数据的集成分析和信息挖掘,实现生态环境大数据的查询、更新、维护、备份等功能,开发高价值的生态环境服务产品,在此基础上,对生态环境数据进行集成分析和信息提取,实现以下几个方面的应用和服务:

1) 构建生态环境大数据服务平台。发挥政府主导作用,增强政府各部门对生态环境大数据建设的

支持力度,同时鼓励各类市场主体、社会组织、科研机构等各类团体与个人共同参与大数据建设,建立便捷高效的生态环境公共服务体系,实现可视化及人机交互,构建生态环境数据交易平台,为公众和社会提供大数据服务,实现数据共享,同时便于公众查询和监督。

2) 为解决空气、土壤和水体污染、生态系统功能退化^[59]、生物多样性锐减^[60]、濒危物种研究^[11]、气候变化影响等一系列重大生态环境问题提供依据,提升地震、酸雨、泥石流等重大生态环境风险预警预报水平。

3) 依托生态环境大数据信息,对铁路、大坝等基础设施建设、相关工业、企业生产活动等进行生态环境风险评价,提高生态环境管理决策水平,为政府制定有关政策法规提供科技支撑,达到社会经济与生态环境和谐可持续发展。

4) 推动生态环境大数据与农业大数据、工业和新兴产业大数据,以及医疗健康和交通旅游服务大数据等大数据结合,探索各相关部门数据融合和协同创新应用,实现现代农业可持续发展、减少工业污染及碳排放,流行性疾病的预防,以及重点景区生态环境保护、风险预警等。

5) 实现大数据与生态环境模型的结合,通过数据集成、挖掘分析和模型模拟深刻理解生态系统结构、过程和机理,为科研教育提供基础数据和信息产品,提升中国生态环境领域科学研究的水平。

6) 加强国际交流,使中国生态环境大数据分析技术与国际接轨,推动实现中国生态环境大数据与国际同类生态环境大数据平台对接,通过对相关生态环境数据的综合分析,为解决跨国界跨区域的全球性生态环境问题提供科学依据,如在生物多样性保护(景观廊道)^[61]、国际河流管理、减缓全球气候变化等方面。

大数据在生态环境领域的应用尚在起步阶段,还存在诸多挑战,如何合理地开发、利用和保护大数据这一紧要的战略资源,从中挖掘出有价值的信息,提高生态环境领域的科学研究水平,需要人们探索认知的空间还很大,需要不断地探索发现。通过促进大数据在生态环境领域的应用,最终实现生态环境决策管理定量化、精细化,生态环境信息服务多样化、专业化和智能化,为中国社会经济可持续发展和生态文明建设奠定基础。

参考文献

- [1] Huang Z-X (黄哲学), Cao F-Y (曹付元), Li J-J (李俊杰), *et al.* Developing sea cloud data system key technologies for large data analysis and mining. *Journal of Network New Media* (网络新媒体技术), 2012(6): 20–26 (in Chinese)
- [2] Cheng C-M (程春明), Li W (李蔚), Song X (宋旭). Thinking on the big data construction for ecological environment. *Chinese Journal of Environmental Management* (中国环境管理), 2015(6): 9–13 (in Chinese)
- [3] Mayer-Schonberger V, Cukier K. Big Data: A Revolution That Will Transform How We Live, Work, and Think. Boston, USA: Houghton Mifflin Harcourt, 2013
- [4] Shin DH, Min JC. Ecological views of big data: Perspectives and issues. *Telematics & Informatics*, 2015, **32**: 311–320
- [5] Zhao G-D (赵国栋), Yi H-H (易欢欢), Mi W-J (糜万军), *et al.* Big Data Revolution: How Data Science Changes the World. Beijing: Tsinghua University Press, 2013 (in Chinese)
- [6] Gandomi A, Haider M. Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics. *International Journal of Information Management*, 2015, **35**: 137–144
- [7] Wei B (魏斌). The suggestion of promoting application and development of big data in environmental protection. *Environment Protection* (环境保护), 2015, **43** (19): 20–24 (in Chinese)
- [8] Liu SG. Development trend and coping strategies of financing sector in big data era. *Chinese Science Bulletin*, 2015, **60**: 453–459
- [9] Xu Z-P (徐子沛). The Big Data Revolution. Nanning: Guangxi Normal University Press, 2012: 57 (in Chinese)
- [10] Fang W (方巍), Zheng Y (郑玉), Xiu J (徐江). Big data: Conceptions, key technologies and application. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology* (Natural Science) (南京信息工程大学学报: 自然科学版), 2014, **6**(5): 405–419 (in Chinese)
- [11] Hampton SE, Strasser CA, Tewksbury JJ, *et al.* Big data and the future of ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2013, **11**: 156–162
- [12] Dai S-Q (戴圣骐), Zhao B (赵斌). Trends and challenges of ecosystem observations in the age of big data. *Biodiversity Science* (生物多样性), 2016, **24** (1): 85–94 (in Chinese)
- [13] Wu Z-F (吴志丰), Li Y-H (李月辉), Chang Y (常禹), *et al.* Historical range of variability in forest ecosystem management: Applications and prospects. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(7): 1859–1866 (in Chinese)
- [14] Chapin FS, Sala OE, Burke IC, *et al.* Ecosystem consequences of changing biodiversity. *Nature*, 1998, **405**: 234–242
- [15] Levin SA. The problem of pattern and scale in ecology. *Ecology*, 1992, **73**: 1943–1967
- [16] Zhang KM, Wen ZG. Review and challenges of policies of environmental protection and sustainable development

- in China. *Journal of Environmental Management*, 2008, **88**: 1249–1261
- [17] Grimm NB, Faeth SH, Golubiewski NE, *et al.* Global change and the ecology of cities. *Science*, 2008, **319**: 756–760
- [18] Qin D-H (秦大河), Ding Y-H (丁一汇), Wang S-W (王邵武), *et al.* Ecological and environmental change in west China and its response strategy. *Advance in Earth Sciences* (地球科学进展), 2002, **17**(3): 314–319 (in Chinese)
- [19] Wikle CK, Holan SH, Hooten MB. Guest editor's introduction to the special issue on 'modern dimension reduction methods for big data problems in ecology'. *Journal of Agricultural Biological & Environmental Statistics*, 2013, **18**: 271–273
- [20] Yang Z-X (杨宗喜), Tang J-R (唐金荣), Zhou P (周平), *et al.* Earth science research in U.S. geological survey under the big data revolution. *Geological Bulletin of China* (地质通报), 2013, **32**(9): 1337–1343 (in Chinese)
- [21] Li K-R (李克让). Research progress and prospects of the influence in the global climate change. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 1996, **51**(suppl.1): 1–14 (in Chinese)
- [22] Wu G-X (吴国雄), Lin H (林海), Zou X-L (邹晓蕾), *et al.* Global climate change research and scientific data. *Progress in Geography* (地理科学进展), 2014, **29**(1): 15–22 (in Chinese)
- [23] Peng Y-Z (彭昱忠), Wang Q (王谦), Yuan C-A (元昌安), *et al.* Review of research on data mining in application of meteorological forecasting. *Journal of Arid Meteorology* (干旱气象), 2015, **33**(1): 19–27 (in Chinese)
- [24] Steinbach M. Discovery of climate indices using clustering. ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. San Francisco, CA, 2003: 446–455
- [25] Oouchi K, Yoshimura J, Yoshimura H, *et al.* Tropical cyclone climatology in a global-warming climate as simulated in a 20 km-mesh global atmospheric model: Frequency and wind intensity analyses. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2006, **84**: 259–276
- [26] Han J, Kamber M. *Data Mining: Concepts & Techniques*. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers, 2001: 30–33
- [27] Chen B-X (陈宝学), Yu J-S (俞经善), Guan H-W (关宏伟). Feasibility study of applications of data mining to weather forecast. *Applied Science and Technology* (应用科技), 2004, **31**(3): 48–50 (in Chinese)
- [28] Tan Q-H (谭清海), Deng C-L (邓春林), Liu J (刘俊), *et al.* Remote data extraction and visualization in the simulation results of global climate change. *Earthquake* (地震), 2013, **33**(4): 153–161 (in Chinese)
- [29] Huang G (黄刚), Qu X (屈侠), Wang P-F (王鹏飞). Design of meteorological data analysis and diagnosis visualization system and its realization on the internet. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (大气科学学报), 2010, **33**(2): 153–159 (in Chinese)
- [30] Jia S-H (贾韶辉). Research and Application of Enterprise-level Meteorological Disaster Warning Technology. PhD Thesis. Beijing: China University of Geosciences, 2013: 32–36 (in Chinese)
- [31] Aronova E, Baker KS, Oreskes N. Big science and big data in biology: From the international geophysical year through the international biological program to the long term ecological research (LTER) network, 1957 – Present. *Historical Studies in the Natural Sciences*, 2010, **40**: 183–224
- [32] Liu H-J (刘海江), Sun C (孙聪), Qi Y (齐杨), *et al.* A brief review of progress of the eco-environmental research network in China and aboard. *Environmental Monitoring in China* (中国环境监测), 2014, **30**(5): 125–131 (in Chinese)
- [33] Johnson BR, Kampe TU, Kuester MA, *et al.* NEON: The first continental-scale ecological observatory with airborne remote sensing of vegetation canopy biochemistry and structure. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2010, **4**: 510–524
- [34] Melbourne BA, Cornell HV, Davies KF, *et al.* Invasion in a heterogeneous world: Resistance, coexistence or hostile takeover? *Ecology Letters*, 2007, **10**: 77–94
- [35] Sarahc E, Karaa M. Use of community composition data to predict the fecundity and abundance of species. *Conservation Biology*, 2008, **22**: 1523–1532
- [36] Huang CQ, Kim SH, Song K, *et al.* Assessment of Paraguay's forest cover change using Landsat observations. *Global and Planetary Change*, 2009, **67**: 1–12
- [37] Zulueta RC, Oechel WC, Loescher HW, *et al.* Aircraft-derived regional scale CO₂ fluxes from vegetated drained thaw-lake basins and interstitial tundra on the Arctic coastal plain of Alaska. *Global Change Biology*, 2011, **17**: 2781–2802
- [38] Yu G-R (于贵瑞), Yu X-B (于秀波). Chinese Ecosystem Research Network (CERN) and natural ecosystem protection. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences* (中国科学院院刊), 2013, **28**(2): 275–283 (in Chinese)
- [39] Fu BJ, Li SG, Yu XB, *et al.* Chinese ecosystem research network: Progress and perspectives. *Ecological Complexity*, 2010, **7**: 225–233
- [40] Fu B-J (傅伯杰), Niu D (牛栋), Yu G-R (于贵瑞). The roles of ecosystem observation and research network in earth system science. *Progress in Geography* (地理科学进展), 2007, **26**(1): 1–16 (in Chinese)
- [41] The State Forestry Administration (国家林业局). China Forest Ecosystem Research Network [EB/OL]. (1998-02-25) [2014-03-30]. <http://www.cfern.org/>
- [42] Li S-M (李士美), Xie G-D (谢高地), Zhang C-X (张彩霞), *et al.* Flow processes of forest ecosystem services: A case study on Qianyanzhou Plantation, Jiangxi Province. *Resources Science* (资源科学), 2010, **32**(5): 831–837 (in Chinese)
- [43] Song Q-F (宋庆丰), Niu X (牛香), Wang B (王兵). Review on forest ecosystem services assessment

- based on big data. *Chinese Journal of Ecology* (生态学报), 2015, **34**(10): 2914–2921 (in Chinese)
- [44] Liu WZ, Zhang XC, Dang TH, *et al.* Soil water dynamics and deep soil recharge in a record wet year in the southern Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*, 2010, **97**: 1133–1138
- [45] Pei S, Xie GD, Liu CL, *et al.* Dynamic changes of water conservation service of typical ecosystems in China within a year based on data from CERN. *Sustainability*, 2015, **7**: 16513–16531
- [46] Chai H, Yu GR, He NP, *et al.* Vertical distribution of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in typical Chinese terrestrial ecosystems. *Chinese Geographical Science*, 2015, **25**: 549–560
- [47] Zhang H, Hu B, Liu GR, *et al.* Temporal and spatial characteristics of soil heat flux in China. *Climatic and Environmental Research*, 2012, **17**: 515–522
- [48] Wang L, Gong W, Hu B, *et al.* Modeling and analysis of the spatiotemporal variations of photosynthetically active radiation in China during 1961–2012. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, **49**: 1019–1032
- [49] Tang W, Qin J, Yang K, *et al.* Reconstruction of daily photosynthetically active radiation and its trends over China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**: 13292–13302
- [50] Song X-L (宋晓龙), Li X-W (李晓文), Zhang M-X (张明祥), *et al.* Optimization of conservation network system for inter-basin wetland ecosystem in Huang-Huai-Hai Region. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(2): 475–482 (in Chinese)
- [51] Zhao S-D (赵士洞). United States National Ecological Observatory Network: With special references to its concepts, desing and progress. *Progress in Geography* (地理科学进展), 2005, **20**(5): 578–583 (in Chinese)
- [52] Zhang Z-Q (张志强), Xu Z-M (徐忠民), Cheng G-D (程国栋). The ecological footprints of the 12 provinces of West China in 1999. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2001, **56**(5): 598–609 (in Chinese)
- [53] Bai Y (白钰), Zeng H (曾辉), Wei J-B (魏建兵), *et al.* Optimization of ecological footprint model based on environment pollution accounts: A case study in Pearl Delta urban agglomeration. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(8): 1789–1796 (in Chinese)
- [54] NASA. The Global Map of Fog Health in China [EB/OL]. (2015-12-06) [2016-03-31]. http://www.360doc.com/content/15/1216/16/28349226_520854855.shtml
- [55] Yang Y (杨毅). The new mode has been explored of regional air pollution zone from spreading in the era of big data. *Science and Technology Communication* (科技传播), 2014(11): 107–108 (in Chinese)
- [56] Wu Z (武装), Qin A-M (覃爱明). Based on large data of air quality data visualization. *Chinese and Foreign Entrepreneurs* (中外企业家), 2015 (suppl. 1): 249–251 (in Chinese)
- [57] Cao L (曹骝), Wu X-W (吴修文). Research on PM2.5 monitoring and early warning system based on big data platform. *China Internet* (互联网天地), 2015 (4): 74–79 (in Chinese)
- [58] Beijing's air quality during the APEC Citizens to keep 'APEC blue'. The People's Daily [EB/OL]. (2014-11-17) [2016-03-31]. http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xmtjj/201411/t20141117_267109.html
- [59] Zhao P (赵平), Peng S-L (彭少麟). Species and species diversity in relation with restoration and persistence of degraded ecosystem functions. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2001, **12**(1): 132–136 (in Chinese)
- [60] Hallgren W, Beaumont L, Bowness A, *et al.* The biodiversity and climate change virtual laboratory: Where ecology meets big data. *Environmental Modelling & Software*, 2015, **76**: 182–186
- [61] Zhu Q (朱强), Yu K-J (俞孔坚), Li D-H (李迪华). The width of ecological corridor in landscape planning. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(9): 2406–2412 (in Chinese)

作者简介 赵苗苗, 女, 1991 年生, 硕士研究生. 主要从事全球气候变化和生态系统模型研究. E-mail: zhaomm.14s@igsnrr.ac.cn

责任编辑 肖红