

环境监测领域颠覆性技术的发展与展望

刘建国¹, 孟德硕¹, 桂华侨¹, 殷高方¹, 张甫², 张曙², 张红振³, 王金南³

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院环境光学与技术重点实验室, 合肥 230031;
2. 中国科学院合肥物质科学研究院信息中心, 合肥 230031; 3. 环境保护部环境规划院, 北京 100012)

摘要: 环境监测技术是支撑和保障环境管理的重要基础, 分析研判本领域颠覆性技术的发展态势, 有利于加快推进我国生态文明建设与环保产业发展。本文结合文献计量与专利情报分析方法, 全面分析评价国内外环境监测领域颠覆性技术的发展历程及最新态势。针对我国环保发展对环境监测技术的重大需求, 提出了基于大数据融合的多介质环境与生态系统感知技术、基于新材料与器件的微型智能化环境要素传感技术、基于光谱质谱的环境痕量污染物快速在线监测技术以及基于卫星遥感的区域/全球生态环境要素的高分辨率遥感技术等发展方向, 以期为我国环境管理与环保产业发展规划提供决策依据。

关键词: 环境监测; 颠覆性技术; 发展现状; 未来展望

中图分类号: X-1 **文献标识码:** A

Development and Prospects of Disruptive Technologies in Environmental Monitoring

Liu Jianguo¹, Meng Deshuo¹, Gui Huaqiao¹, Yin Gaofang¹, Zhang Fu², Zhang Shu²,
Zhang Hongzhen³, Wang Jinnan³

(1. Key Laboratory of Environment Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. Information Center of Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 3. Chinese Academy for Environmental Planning, Ministry of Ecology and Environment of the PRC, Beijing 100012, China)

Abstract: Environmental monitoring technology is an important foundation for supporting and ensuring environmental management. Analyzing and predicting the development trend of disruptive technologies in environmental monitoring is helpful to accelerate China's ecological civilization construction and environmental protection. This paper combines literature measurement and patent intelligence analysis methods to comprehensively analyze and evaluate the history and latest situation of disruptive technologies in environmental monitoring in China and abroad. According to the major demand for environmental monitoring technology by China's environment protection development, this paper puts forward the multi-media environment and ecosystem sensing technology based on big data fusion, micro-intelligent environmental element sensing technology based on new materials and devices, fast online monitoring technology for environmental trace pollutants based on spectral mass spectrometry, and high-resolution remote sensing technology based on satellite remote sensing for regional/global ecological environment elements, so as to provide a decision-making basis for China's environmental management and development planning of its environmental protection industry.

Keywords: environmental monitoring; disruptive technology; development status; future expectation

收稿日期: 2018-10-30; 修回日期: 2018-11-15

通讯作者: 刘建国, 中国科学院合肥物质科学研究院, 研究员, 主要研究方向为环境监测技术; E-mail: jgliu@aiofm.ac.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“工程科技颠覆性技术战略研究”(2017-ZD-10); 大气重污染成因与治理攻关项目课题“攻关项目成果集成与应用示范”(DQGG0307)

本刊网址: www.enginsci.cn

一、前言

环境监测技术是支撑和保障环境管理的基础, 不仅为环境污染防治提供决策依据, 也为污染防治效果评估提供先进的技术手段。“十二五”以来, 国务院陆续出台《“十三五”生态环境保护规划》《生态环境监测网络建设方案》, 深入实施大气、水、土壤污染防治三大行动计划, 进一步推动了我国生态环境监测技术体系建设。2018 年 5 月 28 日, 习近平总书记在 2018 年两院院士大会上强调, 要以关键共性技术、前沿引领技术、现代工程技术、颠覆性技术创新为突破口, 敢于走前人没走过的路, 努力实现关键核心技术自主可控。

因此, 在当前背景下, 围绕国家生态环境保护与环境安全的重大需求, 深入剖析环境监测技术领域颠覆性技术的发展态势, 思考技术未来的发展方向, 有望为我国环境领域科技发展规划及政策提供决策支撑, 为我国环保产业未来优先发展方向提供重要参考。

二、国内外环境监测颠覆性技术发展现状

19 世纪末, 英国、美国等国家首先开展环境监测, 第二次世界大战后, 随着工业的迅速发展, 英美等国多次发生严重的污染事件, 引起了世界的广泛关注, 自此环境监测技术开始迅速发展。基于环境监测技术的发展历程, 可将其分为三个阶段。

(一) 分光光度和电化学技术迅速崛起, 初步建立环境污染物检测标准

20 世纪 50 至 80 年代初, 重金属、有机氯化物、芳香烃、卤代烃等污染物成为环境监测的重点, 分光光度法和电化学法迅速崛起 [1], 并逐步建立起环境污染物检测标准。电化学法在监测水体中重金属元素时具有选择性高、分析准确、可在线监测等优势, 使环境监测技术从实验室检测走向了现场、原位、在线分析。在这期间, 初步建立了各项环境污染物的检测标准。

(二) 化学发光等技术快速发展, 逐步形成环境质量自动监测与分析技术体系

从 20 世纪 80 年代开始, 英国、美国等发达

国家的环境质量明显好转, 其研究重点也开始转向 PM_{2.5}、机动车尾气等方面。水体、空气、土壤、固体废物中的监测组分、监测技术均已明确与完善。与此同时, 随着信息、新能源、生物技术、新材料技术的快速发展, 检测速度更快, 监测范围更广的光学技术开始引入环境监测领域, 并推动了环境监测技术的进一步发展 [2]。诸多跨领域的技术开始应用到环境监测当中, 如化学发光法以其高灵敏、高选择性、仪器简便等优势在环境监测领域迅速发展, 并有效支撑了业务化环境质量自动监测网络建设。

(三) 光学遥测技术获得广泛应用, 开始构建典型区域大气环境综合立体监测网络

进入 21 世纪后, 由于光电技术的巨大进步, 光学遥测技术迅速发展, 环境监测技术进入新的发展阶段。光学遥测技术通常能够远距离监测目标环境状况, 避免了取样、预处理以及实验室检测等繁琐步骤, 极大地提高了环境监测效率。2005 年以来, 差分吸收光谱 (DOAS)、可调谐半导体激光吸收光谱 (TDLAS)、傅立叶转换红外光谱 (FTIR)、激光雷达 (LIDAR)、卫星遥感等光学遥测技术获得广泛应用。

目前我国环境监测单项技术已取得重要突破, 初步形成了满足常规监测业务需求的技术体系。研发的部分高端科研仪器如气溶胶雷达、单颗粒气溶胶飞行时间质谱仪等已得到应用, 并自主构建了我国首个大气环境综合立体监测系统。基于生物、质谱、色谱的环境监测手段也迅速发展, 共同奠定了我国现代环境监测技术体系的基础。近年来我国在卫星遥感、激光雷达等环境监测技术领域已达到国际先进水平 [3]。

为分析全球环境监测领域技术总体研究布局, 对 1930—2017 年的发明专利进行检索并进行专利技术聚类分析。可以看出, 全球环境监测技术专利主要集中于化学发光、色谱、质谱、FTIR、LIDAR、激光诱导击穿光谱 (LIBS) 等方面。

对近三年 (2015—2017 年) 的环境监测技术专利进行聚类分析, 可以看出环境监测技术领域呈现出数据处理、智能监测、生物传感器、三维激光雷达、无人机等新的技术特点。

对于专利检索结果中的授权专利, 进一步采用

Innograophy 专利分析平台来分析环境监测技术领域的核心专利 [4]，如图 1 所示。由图 1 可知，从 2010 年开始，中国的核心专利授权量迅速增长，并在 2014 年超越美国。环境监测领域核心专利国家及地区分布如图 2 所示，我国所拥有的核心专利总数量已仅次于美国。我国环境监测技术领域核心专利的不断增长标志着我国环境监测技术研究已取得显著进步。

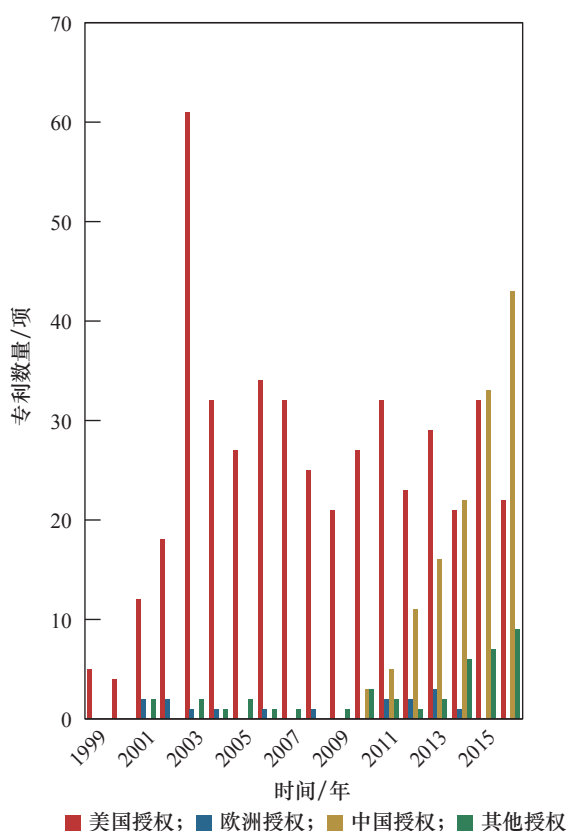


图 1 环境监测领域核心专利数量变化

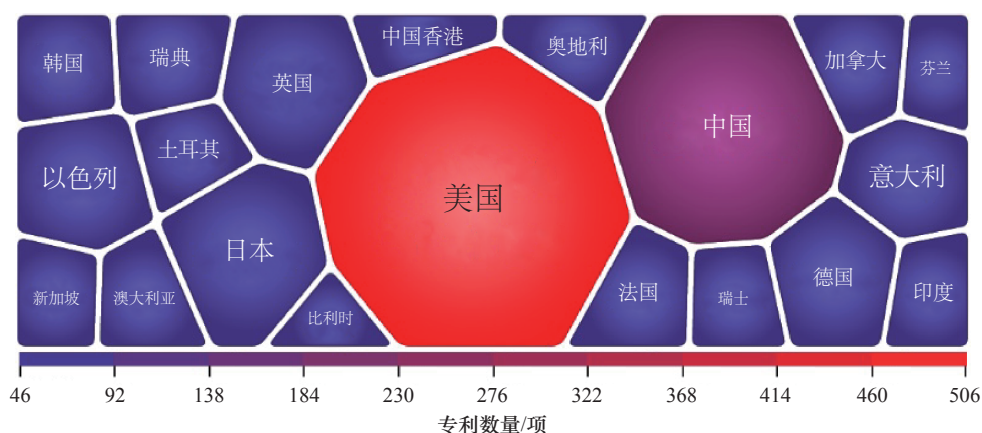


图 2 环境监测领域核心专利国家及地区分布

三、环境监测颠覆性技术发展态势分析

环境监测领域的颠覆性技术与常规技术相比，通常在样品处理方式、数据处理速度与精度、监测范围等方面存在显著优势，随着科技的发展，颠覆性技术也通常会演化为常规技术，20 世纪 50 年代发展起来的颠覆性技术，如分光光度法、电化学技术等，已成为当前环境监测领域的常规技术。随着光学、电子、信息、生物等相关领域的技术进步，环境监测领域的颠覆性技术正向灵敏度高、选择性强的光学 / 光谱学分析、质谱 / 色谱分析方向发展；向多监测参数实时、在线、自动化监测，以及区域动态遥测方向发展 [5]；向环境多要素、大数据综合信息评价技术方向发展。

(一) 更高精度

国内外已经形成了较为完善的环境标准、监测技术与方法体系，但在大气复合污染形成过程监测中的大气氧化性现场监测、纳米级颗粒物在线测量、超低排放污染源监测，以及水土重金属在线检测等方面还存在检测限低、时间分辨率不高等问题。需进一步提高检测精度，使光学监测技术应用于光化学反应机理研究、工业过程控制、生产安全监控。

(二) 更多成分

随着工业的迅速发展，需要监测的污染物种类快速增加、组分更加复杂，常规分析法分析空气中 PM_{2.5}、PM₁₀、总悬浮颗粒物 (TSP)，以及水中总磷、总氮、化学需氧量 (COD)、生化需氧量 (BOD)

等已经不能满足日益增加的检测项目需求,亟需发展大气自由基、全组分有机物、重金属、生物气溶胶、二次有机气溶胶示踪物,水体细菌、浮游植物、有机物、重金属,以及土壤中残留农药和其他有机污染物的检测等。

(三) 更大范围

区域立体遥测技术和卫星遥感技术能够快速准确得到一个区域的污染状况。发展基于区域立体遥测技术的区域排放、输送总量、排放源清单、污染物成像探测技术,可为污染源的实时监测和治理提供技术支撑。污染源监测是环境监测的重要内容,通过卫星遥感技术,可对污染源进行快速定位与评估,可对环境污染事故进行跟踪调查,预报事故发生点、污染面积与扩散速度及方向,也能够得到痕量气体、藻类等监测对象的全球分布与变迁,探究污染对气候的影响规律,并为污染物排放控制提供数据支持。

(四) 更加智慧

未来生态环境污染防治工作手段将会更加科学

与智能。发展多平台、智能化、网络化,且具有特异选择性的环境监测仪器,实时获取环境多要素监测数据,通过对海量、分散变化数据的深度挖掘、模型分析,利用大数据分析区域、流域污染源与环境质量的相应关系,构建智能管理决策平台,使环境管理向精细化、精准化转变,实现主动预见、大数据科学决策,形成生态环境综合决策科学化、监管精准化和公共服务便民化的智慧环保体系 [6]。

四、我国战略需求分析

我国在快速推进工业化、现代化的同时,也更加注重环境质量改善。图3是2009年以来我国环境监测领域的相关政策。“创新、协调、绿色、开放、共享”五大发展理念的提出,表达了我国推进生态文明建设的坚定决心,而环境监测技术的发展正是保障生态文明建设顺利实施的条件之一。

(一) 推动生态环境质量持续改善

“十三五”以来,我国环境污染治理已从排放总量控制过渡到环境质量改善阶段。在未来一段时

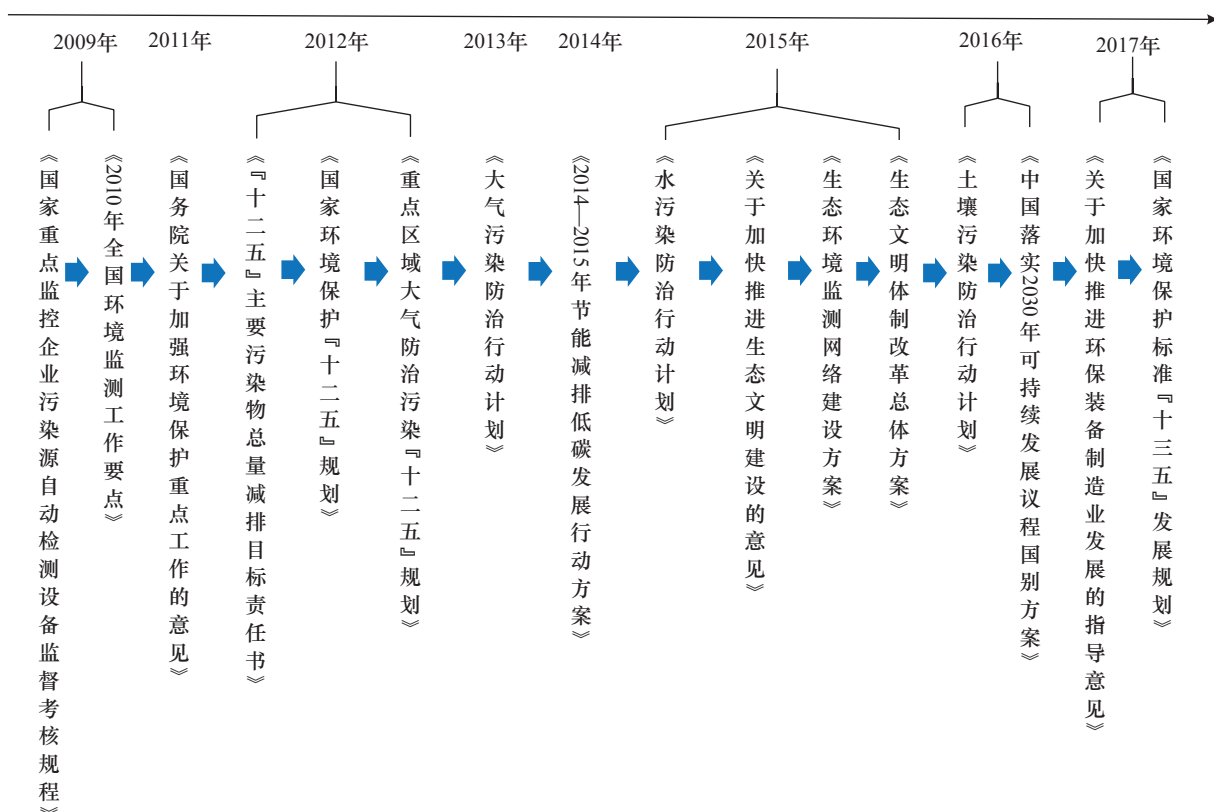


图3 我国环境监测领域相关政策

间内，要坚决打赢蓝天保卫战，重点保障饮用水安全，强化土壤污染管控和修复，开展农村人居环境整治行动。但我国生态环境监测网络仍存在范围和要素覆盖不全、监测数据质量有待提高等问题。通过加快推进环境监测技术与设备发展，能够有效支撑我国生态环境网络建设。

（二）防范环境风险，保障环境安全

生态环境安全是国家安全的重要组成部分，是经济社会持续健康发展的重要保障。目前我国环境安全形势依然严峻，突发环境事件处于高发期，对人民安全及生态环境造成了极大的危害。我国针对环境安全的应急技术严重不足，在先进应急监测技术领域与国际存在较大差距，难以对环境污染事故进行快速、准确和全面地监测预警评估，极大地制约了对突发污染事故的快速处置及正确决策。

（三）应对全球环境变化与科学评估

随着环境问题日益国际化，环境保护工作已越来越多地与国家的权益联系在一起，只有掌握了环境监测的主动权，在维护国家的权益和外交活动中才有更多的发言权。目前，我国大气污染的跨境输送已引起相关国家的高度关注，我国环保工作面临的国际压力日益增大，环境外交面临巨大挑战。因此，要研发相应的环境监测技术及设备，为环境外交提供科学与技术支持。

（四）推动我国环保产业快速发展

环保产业是我国新兴产业的重要组成部分，工业和信息化部制定了《关于加快推进环保装备制造业发展的指导意见》，并指出到2020年我国环保装备制造产业产值将达到1万亿元。但目前我国高端环境监测设备市场仍被国外企业所占据，发展环境监测领域颠覆性技术能够打破欧美企业对高端环境监测设备的垄断，提升我国环保企业的市场竞争力，从而推动我国环保产业的快速发展。

五、未来发展展望

生态文明建设是关系中华民族永续发展的根本大计。环境监测领域技术与产业发展，一方面要紧紧瞄准国际发展前沿，另一方面更要紧密结合我国

实际国情，大力发展具有自主知识产权的先进环境监测技术与设备，推动产业化进程，促进生态环境防治体系的现代化，为建设生态文明和美丽中国提供强有力的科技支撑与保障。图4给出了我国未来20年环境监测技术的可能发展方向。

环境监测技术主要由物理、光学、信息、电子、材料、化学等众多学科交叉融合而成，在相关领域颠覆性技术发展突破的基础上，气、水、土等单项监测和综合监测技术水平将会得到迅速提升，从而产生对环境科学研究与业务化监测有重要影响的颠覆性环境监测技术，以下列举出四项可能的颠覆性技术方向。

（一）基于大数据融合的多介质环境与生态系统感知技术

大数据、物联网、云计算等新一代信息技术的突破发展，为环保信息化建设注入了新的活力。该技术主要利用智能多元化环境传感器、深度挖掘和模型分析、智能管理决策和信息技术等创新，通过大规模的系统应用和大数据服务，使环境管理从粗放型向精细化、精准化转变，从被动响应向主动预见转变，从经验判断向大数据科学决策转变，真正形成源头防控、过程监管、综合治理、全民共治的环境管理闭环，从而实现从“数字环保”向“智慧环保”的跨越。

（二）基于新材料与器件的微型智能化环境要素传感技术

新材料、新型器件等领域的技术突破，有望为环境监测技术带来革命性突破或现有仪器性能的极大提升，实现微型化、智能化的环境要素传感监测。比如，基于胶体量子点纳米材料，可以制作微型光谱仪[7]，能将原本几万美元的成本降至几美元，从而带来基于光谱分析原理的环境监测技术的重大突破。基于微机电系统（MEMS），有望实现气溶胶质量浓度与粒径谱分布的高灵敏度测量。

（三）基于光谱、质谱的环境痕量污染物快速在线监测技术

基于光谱、质谱技术的高端环境监测仪器能够为环境部门在解决复杂污染问题、有效控制污染源、节能减排、应对环境变化等方面提供有效的技术支

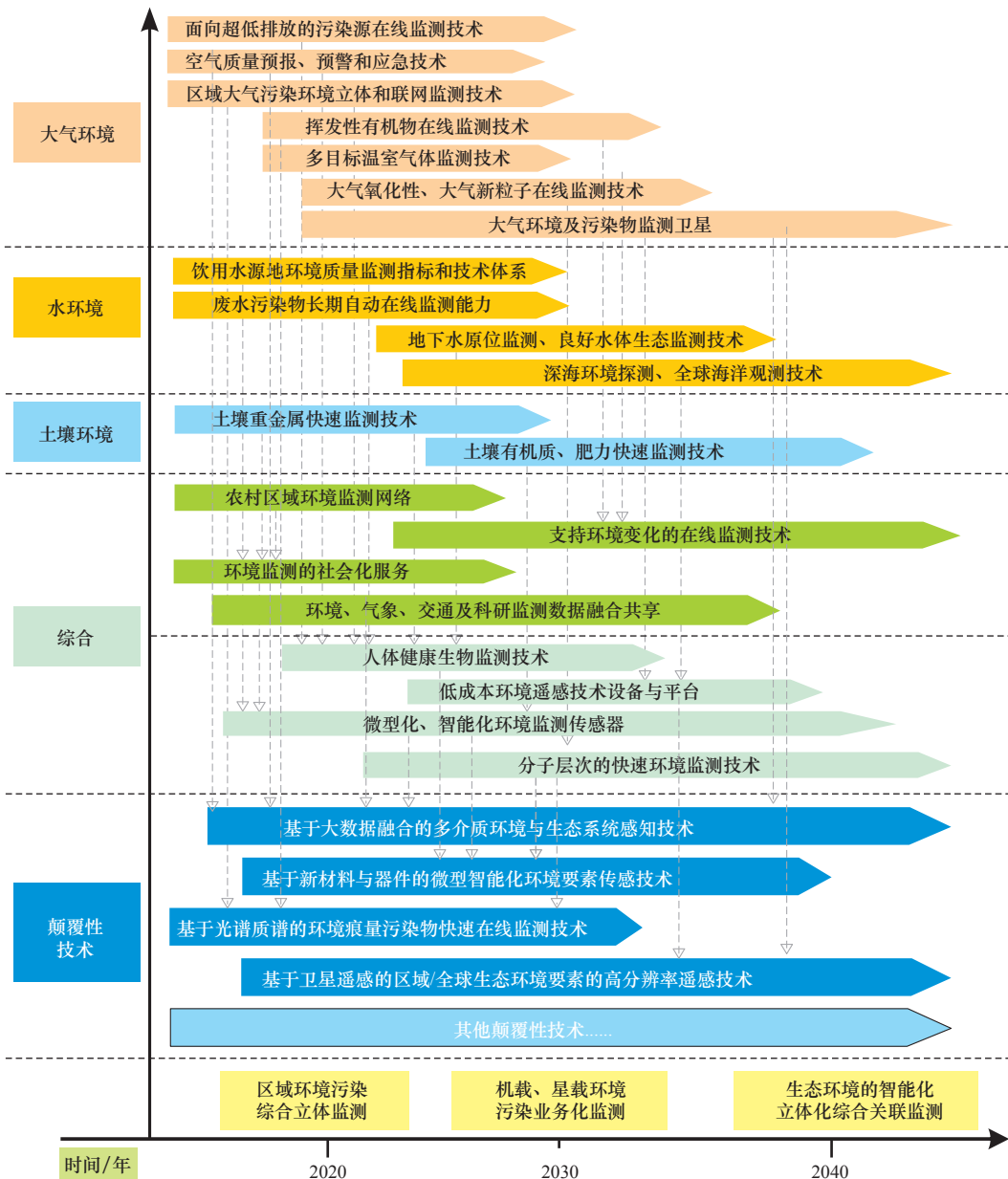


图 4 环境监测技术未来发展方向

撑。比如，在高分辨率紫外-可见成像光谱测量、质谱分析模块突破的基础上，有望实现全挥发性有机物、重金属、超细颗粒物全化学组分等痕量环境污染物的灵敏、高时间分辨率探测，满足现代环境科学研究和业务化监测需要，形成较大规模的高端环境监测仪器产业。

(四) 基于卫星遥感的区域/全球生态环境要素的高分辨率遥感技术

小卫星、火箭发射等领域的技术突破，有望带来基于机载和星载平台的环境污染物遥感监测技术

的重大突破，对于提升大气环境遥感动态监测、农作物估产及农业灾害监测能力，提高环境遥感资源综合应用效能等具有重要意义。比如，大面阵高量子效率探测器、自由曲面光学设计与加工等关键技术的突破，将显著提高载荷的空间分辨率与数据反演精度，从而实现千米级以内空间分辨率的环境要素区域分布遥感。

六、结语

在环境监测技术与设备方面，国内的技术创新

能力正逐步加强,技术储备和潜力较大,但国产高端环境监测技术设备明显偏少。因此,提高自主创新能力,加强颠覆性技术的超前布局,是当前十分迫切的战略任务。针对我国经济社会发展的战略需求,研究开发环境监测领域新一代颠覆性技术,将会有效提升我国生态环境综合监测能力,推动环保产业快速发展。

参考文献

- [1] Baker A. Fluorescence excitation-emission matrix characterization of some sewage-impacted rivers [J]. *Environment Science & Technology*, 2001, 35(5): 948-953.
- [2] Burrows J P, Weber M, Buchwitz M, et al. The global ozone monitoring experiment (GOME): Mission concept and first scientific results [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1999, 56(2): 151-175.
- [3] 刘文清, 陈臻懿, 刘建国, 等. 我国大气环境立体监测技术及应用 [J]. *科学通报*, 2016, 61(30): 3196-3207.
- [4] Allison J, Lemley M, Moore K, et al. Valuable patents [J]. *Berkeley Olin Program in Law & Economics Working Paper*, 2003, 92(3): 435-479.
- [5] 谢辉. 我国环境监测技术的现状与发展 [J]. *环境与发展*, 2018, 30(2): 161-162.
- [6] 刘文清, 杨靖文, 桂华侨, 等. “互联网+”智慧环保生态环境多元感知体系发展研究 [J]. *中国工程科学*, 2018, 20(2): 111-119.
- [7] Bao J, Bawendi M G. A colloidal quantum dot spectrometer [J]. *Nature*, 2015, 523(7558): 67-70.