

引用格式:王桥,赵少华,封红娥,等.国家城镇生态环境综合监测技术体系构建[J].地球信息科学学报,2020,22(10):1922-1934. [Wang Q, Zhao S H, Feng H E, et al. Construction of technical system for national urban ecological environment comprehensive monitoring[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(10):1922-1934.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190488

国家城镇生态环境综合监测技术体系构建

王 桥¹,赵少华^{1*},封红娥^{1,2},王 玉¹,白志杰¹,孟 斌¹,陈 辉¹

1. 生态环境部卫星环境应用中心 国家环境保护卫星遥感重点实验室,北京 100094;
2. 河北省水文工程地质勘查院,石家庄 050000

Construction of Technical System for National Urban Ecological Environment Comprehensive Monitoring

WANG Qiao¹, ZHAO Shaohua^{1*}, FENG Hong'e^{1,2}, WANG Yu¹, BAI Zhijie¹, MENG Bin¹, CHEN Hui¹

1. State Environmental Protection Key Lab of Satellite Remote Sensing, Ministry of Ecology and Environment Center for Satellite Application on Ecology and Environment, Beijing 100094, China; 2. Hebei provincial institute of hydrology and engineering geology, Shijiazhuang 050000, China

Abstract: More and more people have paid attention to the severe problems of urban ecological environment in recent years, such as air pollution in key urban agglomerations, water pollution, urban black and odorous water, risk of drinking water source, urban heat island, soil pollution, municipal solid waste, and so on. As a vital part of environment protection, with the rapid urbanization, the monitoring of urban ecological environment is becoming more and more important and the demand is getting higher and higher. Many studies have documented the monitoring of urban ecological environment at home and abroad, however, these works are discrete and unsystematic. There is a lack of general technical system in China, including key technology system, index system, and technical standards. The integrated space and ground monitoring is very urgent and necessary, and it is badly need to establish its technical system to guide and normalize the development of comprehensive monitoring of urban ecological environment. Given the national demand, this work (1) designs and constructs the technical system framework, index system framework, and standard system framework of urban ecological environment comprehensive monitoring from three aspects: urban polluted gas, water quality, and ecological resource; (2) puts forward the series concerned key technologies, gives the current monitoring status and accuracy of main indices of urban ecological environment; (3) on the untangling basis of key science problems, in combination with the characteristics of remote sensing data and the needs of national ecological environment monitoring, the study subsequently designs the operational application scheme of ecological environment comprehensive monitoring, gives the main monitoring emphasis of urban polluted gas, water quality, and ecological resource, plots the application scheme which includes the region demonstration, application products

收稿日期:2019-09-04;修回日期:2020-03-13.

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0503905)。[**Foundation item:** National Key Research and Development Program of China, No.2017YFB0503905.]

作者简介:王 桥(1957—),男,重庆江津人,中国工程院院士,国际宇航科学院院士,主要从事国家生态环境卫星立项论证、生态环境遥感研究与应用等工作。E-mail: wangqiao@mee.gov.cn

*通讯作者:赵少华(1980—),男,河南许昌人,博士,正高级工程师,主要从事国家生态环境卫星立项论证、生态环境遥感研究与应用。E-mail: zshyytt@126.com

and services based on the constructed information service platform of urban ecological environment comprehensive monitoring, and provides the application examples of theme maps of PM_{2.5}, urban black and odorous water, and urban island effect. The work will provide important support for the state and local government monitoring and management in urban ecological environment.

Key words: technical system; index system; standard system; pollution gas; water quality; soil pollution; ecological resources; application scheme

***Corresponding author:** ZHAO Shaohua, E-mail: zshyytt@126.com

摘要:近年来,我国城镇突出的生态环境问题受到社会广泛关注,作为生态环境保护工作的重要组成部分,随着城镇化的快速发展,城镇生态环境监测任务也越来越重、要求越来越高,对结合空间信息的天地一体综合监测的需求非常迫切,急需建立其技术体系,以指导城镇生态环境综合监测工作的开展。本文面向城镇生态环境综合监测的需求,从城镇污染气体、水体水质、生态资源3个方面出发,通过梳理城镇生态环境综合监测中的关键科学技术问题,结合开展的关键技术攻关研究,经过分析论证,构建了城镇生态环境综合监测技术体系框架、指标体系框架以及标准体系框架。在此基础上,根据遥感数据特点及国家生态环境监测需求,提出城镇生态环境综合监测业务应用方案,为国家和省市地方下一步有效开展城镇生态环境监测、管理等工作提供重要指导和支撑。

关键词:技术体系;指标体系;标准体系;污染气体;水体水质;土壤污染;生态资源;应用方案

1 引言

近几十年来我国生态环境监测工作在技术方法、内容和支撑管理方面都取得了显著的进步,监测和评价方法也在不断完善,但面对严峻的城镇环境污染、生态破坏形势和十分繁重的生态环境管理任务,以定点采样为主的地面环境监测已不能满足我国新常态经济模式下城市健康可持续发展和新型城镇化与经济转型升级对城—镇—乡—村一体化资源规划、生态安全、生态环境保护的需求,国家迫切需要开展高分辨率遥感与地面观测协同的城镇生态环境动态监测,从政府和社会对生态环境的关注点出发,探讨城镇生态环境综合监测技术体系的构建对我国环境保护的发展具有重要意义,技术体系的建立可以大幅提升国家环境监测、监管的定量化和精细化水平,促进新时期我国环保领域监测技术的应用与发展^[1]。

欧美、日本等发达国家在全球生态环境遥感观测方面长期处于主导地位,其在城镇污染气体、水体水质和生态资源方面都开展了大量成熟的研究,建立了相关技术体系^[2-6]。在大气环境方面,对气溶胶和污染气体遥感监测已有30多年的历史,但主要是针对洁净大气下晴空气溶胶与污染气体,并不适于中国霾污染状态。在水环境监测方面,美国环保署建立了水环境监测方法体系,但其以地面监测为主^[5]。生态方面,从生态系统分类、生态参数反演,到监测评估形成了一系列实用技术标准、方法和产

品,如美国宇航局持续发布的全球植被指数、土地覆盖、地表温度等生态遥感产品,支撑了全球宏观生态环境监测与综合评估,成为生态环境遥感监测业务化运行范例^[6]。但欧美等环境遥感监测工作并不在环保部门,而是分散在不同部门,如美国主要是国家海洋和大气管理局、国家航天局等在负责,美国环保署以地面监测为主,这样就缺乏对大气、水体、土壤、生态等综合监测技术体系的顶层设计。

我国很多学者对生态环境监测的技术体系进行了初步探讨与研究,如潘本峰等^[7]针对京津冀区域构建了大气污染联防联控的大气环境监测体系;王霞等^[8]基于水生态功能分区建立了水环境监测的指标体系与评价体系;魏曦等^[9]针对面源污染防治和水土保持监测网点建设,结合实际构建了小流域面源污染监测技术体系;夏新等^[10]针对国家土壤环境监测的管理需求与技术特点,设计了土壤环境监测质量监督体系。上述研究构建的技术体系均是针对单个环境领域,尚未针对整个生态环境的综合监测进行分析研究。我国的环境监测方法标准体系面临着生态监测方法体系薄弱,遥感监测方法体系空白的问题^[11]。随着环境遥感监测技术的研究与发展,王桥等^[12]初步建立了国家环境遥感监测体系,并提出环境遥感监测体系的发展思路与下一步重点任务;刘方等^[13]对近岸海域生态环境监测的技术体系进行了探讨,并提出未来应通过完善环境标准和方法等优化生态环境监测体系,但该体系主要是针对近岸海域环境的监测与评价;李艳萍等^[14]对

完善环境监测技术监督体系进行了思考,提出多项技术监督及资源整合机制进一步完善技术监督体系,主要强调了技术监督体系的必要性。上述研究都在一定程度上对环境监测技术体系进行了研究分析,促进了环境监测技术体系的发展,但仍缺乏针对城镇对象为主的生态环境综合监测技术体系的系统研究。也有一些研究虽然针对城镇生态环境监测开展研究,但其只对城镇某一方面或某个城市区域如热岛效应等进行监测评价或构建生态遥感评价指数尝试综合评价^[15-17],基本未系统涉及城镇生态环境综合监测的技术体系、指标体系、标准体系等内容,所以这些研究尚远不能满足我国目前城镇生态环境综合监测的迫切需求。赵少华等^[6]对我国当前城镇生态环境遥感监测的现状、问题和发展趋势综合研究,建议应该紧密结合国家大气污染防治、水污染防治、土壤污染防治等管理需求,尽快建立我国城镇生态环境综合监测技术体系、规范体系等。

通过梳理城镇生态环境综合监测中的关键科学技术问题,结合目前开展的国家城乡生态环境综合监测关键技术攻关研究,通过分析论证,从城镇生态环境综合监测的技术体系框架、指标体系框架、标准体系框架3个方面出发,初步对城镇生态环境综合监测技术体系的构建进行探析。需要说明的是,文中的综合监测指包括卫星遥感、地基遥感、

地面观测、模型模拟等综合协同监测技术;此外,从城镇污染气体、水体水质、生态资源遥感监测3个方面简要设计出城乡生态环境综合监测的业务应用方案,以期对国家和省市地方开展城乡生态环境监测提供重要技术指导支持。

2 我国城镇生态环境综合监测技术体系构建

2.1 关键科学技术梳理和技术体系框架构建

城镇生态环境综合监测技术体系是开展城镇生态环境综合监测、了解城镇生态环境动态变化的重要基础,可为生态环境保护和污染防治决策提供技术依据,为生态环境质量的监测与评价提供支撑。城镇生态环境综合监测包括较多方面,本文主要侧重城镇污染气体协同监测技术、城镇水体水质协同监测技术、城镇生态资源协同监测技术3个方面。因此,面向国家城镇生态环境综合监测的应用需求,根据典型性、科学性、实用性、可操作性的原则^[18],通过梳理城镇生态环境综合监测中的关键科学技术,结合开展的关键技术攻关研究,按照3个层次,初步建立了城镇生态环境综合监测技术体系框架,如图1所示。

城镇污染气体协同监测方面的科学技术主要包括:①基于高分多源卫星数据和地面观测数据的

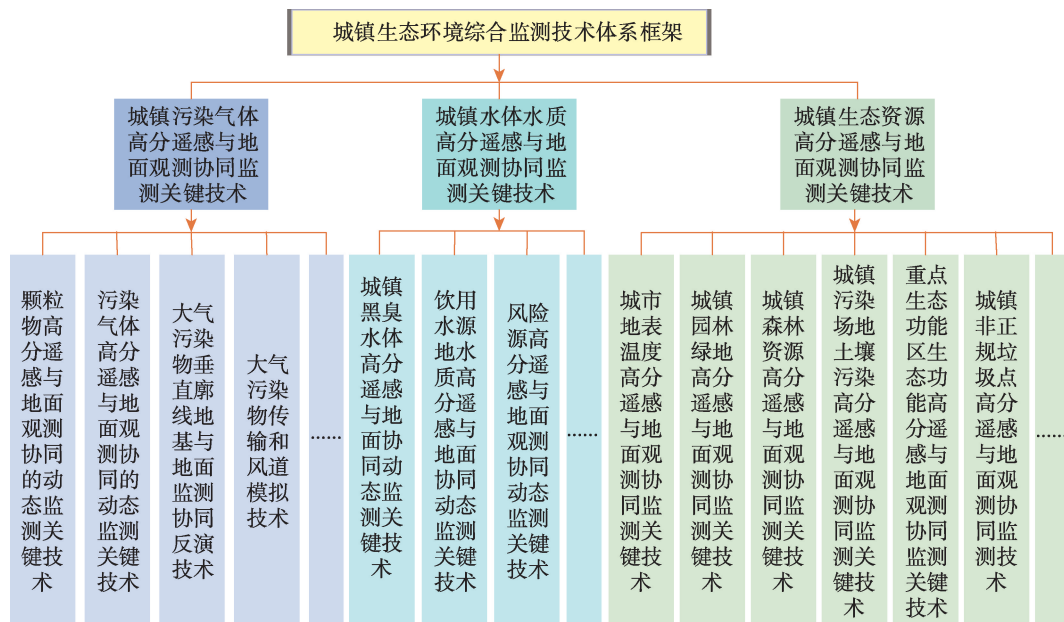


图1 城镇生态环境综合监测技术体系框架

Fig. 1 Frame of technology system for urban ecological environment comprehensive monitoring

霾、雾和云识别技术,气溶胶光学厚度、颗粒物高精度反演技术;② 基于高分多源卫星数据和地面观测数据的二氧化硫、二氧化氮、臭氧高精度反演技术等;③ 多角度离轴差分吸收光谱仪的污染气体优化反演技术,二氧化氮、臭氧垂直廓线和甲醛垂直柱浓度的多轴差分吸收光谱、地基雷达和地面观测协同反演技术;④ 大气污染物传输通道模拟技术、城市风道模拟技术等。

城镇水体水质协同监测方面的科学技术主要包括:① 基于高分多源卫星数据和地面观测数据的城镇黑臭水体遥感信息机理分析、黑臭化参数的星地协同定量反演模型构建、城镇黑臭水体遥感识别技术等;② 基于高分多源卫星数据和地面观测数据的叶绿素a浓度、悬浮物浓度、透明度、化学需氧量、总磷浓度等水质参数高精度反演技术等;③ 基于高分多源卫星数据和地面观测数据的饮用水源地风险源遥感目标识别、特征级水源地重点风险源目标遥感变化检测技术等。

城镇生态资源协同监测方面的科学技术主要包括:① 基于城市像元结构、城市下垫面特有发射率、城市特征大气廓线等参数的城市像元地表温度反演技术等;② 基于高分遥感影像纹理、光谱等特征的城镇园林绿地边界的智能识别和分类技术,基于深度学习算法的城镇园林绿地资源高分遥感与地面观测协同监测技术等;③ 高分遥感与地面观测协同的城镇森林资源识别与提取技术,城镇森林资源类型快速识别和动态监测方法,城镇森林净初级生产力遥感估算模型等;④ 基于红外、多光谱、高光谱等多源遥感数据的污染场地土壤污染风险三要素识别技术,基于地物光谱和土壤介电特征的裸露土壤污染综合监测模型构建等;⑤ 基于时间序列S-G滤波植被指数优化、基于像元二分法的植被覆盖度优化技术,基于高分遥感与地面观测协同的高精度重点生态功能区服务功能参数监测技术,耦合生态要素特征、生态系统空间格局与服务功能时空变化的生态服务功能综合评估技术等;⑥ 基于深度学习方法的高分影像农村垃圾分布提取和不同行业垃圾污染特征集构建技术。

2.2 指标体系框架构建

随着科学技术的进步,新型遥感监测技术方法不断涌现,传统的环境监测内容越来越不能满足生态环境保护的需要,使我们需要及时增加生态环境监测的评价内容,探知城镇生态环境领域的环境状

况^[19]。根据可反映城镇生态环境状态,具有科学性、代表性、实用及操作性强的指标选取原则,结合国家重点研发项目“城乡生态环境综合监测空间信息服务及应用示范”关键技术的研究进展,筛选出这些关键技术的主要核心指标,采用综合指标法^[20-21],先从国家关注急需的关键技术等顶层目标提出,再结合研究基础、数据源等从底层分解,按照3个层次构建了城镇生态环境遥感监测指标体系框架,包括各指标定义及其计算方法,如表1所示。第一层共包括灰霾范围及强度、城镇黑臭水体空间分布、重点生态功能区水源涵养功能等40项指标;第二层包括城镇污染气体高分遥感协同监测、城镇水体水质高分遥感协同监测、城镇生态资源高分遥感协同监测;第三层为顶层指标城镇生态环境遥感监测。同时给出这些指标可用的国内外主要卫星遥感数据源和现有研究基础水平,通过对第一、二层指标进行综合分析,可以实现对城镇生态环境的综合监测与评价。本文所构建的城镇生态环境遥感监测指标体系可为国家环境治理改善、政府管理决策和生态文明建设提供重要技术支撑。

2.3 标准体系框架构建

城镇生态环境遥感监测标准体系是生态环境监测活动的技术依据。我国在生态环境地面监测领域已发布了多项标准,包括少量的生态环境遥感监测标准,已在生态保护工作中发挥了重要作用,但目前仍缺乏针对城镇生态环境遥感监测的相关标准,标准体系的建设仍然面临很多问题与挑战^[43]。随着我国卫星环境遥感监测技术和应用的不断发展,遥感监测在环境保护领域发挥的作用不断增强,急需完善相关的标准体系^[44-45],因此根据统一、规范、科学、严谨的原则,面向我国环境领域准确客观、实时高效的遥感监测需求^[46],在城镇污染气体、水体水质、生态资源遥感与地面观测协同监测3个方面初步制定了包括气溶胶高分遥感与地面观测协同监测、城镇水体水质遥感影像数据预处理、城市地表温度高分遥感与地面协同监测等27项标准规范,规定了相关内容、指标、主要方法及技术流程,如表2所示。

3 城镇生态环境综合监测业务应用方案设计

高分辨率卫星在环境保护领域具有巨大的应

表1 城镇生态环境综合监测指标体系框架

Tab. 1 Frame of indices system for urban ecological environment comprehensive monitoring

序号	类别	监测内容/ 专题产品	指标名称	指标定义	计算方法	数据源	备注说明/ 现有基础
1	城镇污 染气体 高分遥 感协同 监测	灰霾范围、 强度	灰霾范围及 强度	大量干尘颗粒积聚在大气 中,造成能见度小于10 km 的普遍空气浑浊现象	反演霾光学厚度后 进行分级	MODIS、Himawari-8、 HJ-1、GF-4等	遥感监测相对成 熟,精度约70% ^[22]
2		气溶胶光学 厚度	气溶胶光学 厚度	介质的消光系数在垂直方 向上的积分	暗像元法;结构 函数法;高反差 地表法	MODIS、Himawari-8、 HJ-1、GF-1/4/5/6等	遥感监测较成 熟,精度约80%~ 85% ^[6,23]
3		PM _{2.5}	PM _{2.5}	指环境空气中空气动力学 当量直径小于等于2.5 μm 的颗粒物	利用AOD和线性 混合效应模型反演	MODIS、HJ-1、 GF-1/4/5/6等	遥感监测相对成 熟,精度约70%~ 80% ^[24-25] ,待提高
4		PM ₁₀	PM ₁₀	指粒径在10 μm以下的颗 粒物	利用AOD和线性 混合效应模型反演		遥感监测较成 熟,精度约80% ^[26]
5		SO ₂ 柱浓度	SO ₂ 柱浓度	从地面到高空垂直柱中 SO ₂ 气体分子的总个数	差分吸收光谱法、 波段残差法	OMI、AIRS、GOME、 Sentinel-4/5P、GF-5等	遥感监测技术可 行,但含量低、难 监测,精度约 60%~70% ^[27]
6		NO ₂ 柱浓度	NO ₂ 柱浓度	从地面到高空垂直柱中 NO ₂ 气体分子的总个数	差分吸收光谱法		遥感监测较成 熟,精度约80% ^[28]
7		O ₃ 对流层柱 浓度	O ₃ 对流层柱 浓度	从地面到高空垂直柱中O ₃ 气体分子的总个数。	差分吸收光谱法		遥感监测较成 熟,精度约95% ^[28]
8		甲醛柱浓度	甲醛柱浓度	从地面到高空垂直柱中甲 醛气体分子的总个数	差分吸收光谱法		遥感监测开展 晚、精度低,约 60%~75% ^[29]
9		污染物传输 通道	污染物传输 通道	指某个区域中进行大气污 染物传输的多个城市	模式模拟等	污染物、大气廓线、 地形数据等	非遥感获取
10		城市风道	水平风速	单位时间内空气在水平方 向上所移动的距离	风速计	风场、地形数据等	非遥感获取
11			城市通风 系数	大气对污染物稀释扩散能 力的污染气体参数	大气混合层高度乘 以混合层内的平均 风速		
12			城市通风 潜力	由地表植被和建筑覆盖及 周边开放区域程度而确定 的空气流通能力	由天空开阔度和粗 糙度长度获得		
13			粗糙度	边界层大气中,近地层风速 向下递减到零时的高度	拟合风廓线法, 利用中性大气条 件下实测的风速 廓线推算		
14	城镇水 体水质 高分遥 感协同 监测	城镇黑臭水 体空间分布	城镇黑臭水 体分布	指城镇黑臭水体在空间上 的分布规律	单波段阈值法、差 值法、比值法	GF-1/2/6、ZY-3、World View、QuickBird、PLAN- ET、SPOT-5等	遥感监测相对成 熟,精度约70% 待提高 ^[30]
15		城镇黑臭水 体相关参数	黑臭水体 色度	对黑臭水体进行颜色定量 测定的指标,反映黑臭水体 的色调和饱和度	半经验模型、色度 指标遥感反演		遥感监测技术可 行,精度约60%~ 70%,待提高 ^[31-32]
16			有色可溶性 有机物	广泛分布于水体中的一种 溶解有机物	半经验模型、遥感 指标反演		
17		城镇黑臭水 体分类分级	黑臭水体污 染等级	指城镇黑臭水体污染程度 的等级划分	黑臭水体识别与分 级模型		遥感监测相对 成熟
18		饮用水源地 水域消落带 分布	饮用水源地 水域消落带 面积	饮用水源地水域与陆地环 境系统的过渡地带的面积	面向对象的水体信 息提取	GF-1/2/5/6、ZY-3、HJ-1、 Landsat、Sentinel-2/3、 World View、QuickBird、	遥感监测相对成 熟,精度约75% 待提高 ^[33]
19		饮用水源地 水体叶绿素 a浓度	饮用水源地 水体叶绿素a 浓度	饮用水源地水体藻类细胞 内的主要光合色素在总量 中所占的分量	波段组合法、半分 析模型法等	PLANET、SPOT-5等	
20		饮用水源地 水体悬浮物 浓度	饮用水源地 水体悬浮物 浓度	饮用水源地水体颗粒直径 约在10 nm~0.1 μm之间的 微粒在总量中所占的分量	波段组合法、半分 析模型法等		

续表 1

序号	类别	监测内容/ 专题产品	指标名称	指标定义	计算方法	数据源	备注说明/ 现有基础
21	城镇水 体水质	饮用水源地 水体透明度	饮用水源地 水体透明度	饮用水源地水体透光的 程度	半经验算法	GF-1/2/5/6、ZY-3、HJ-1、 Landsat、Sentinel- 2/3、 World View、QuickBird、 PLANET、SPOT-5等	遥感监测相对成 熟,精度约75%, 待提高 ^[33]
22	高分遥 感协同 监测	饮用水源地 水体化学需 氧量	饮用水源地 水体化学需 氧量	饮用水源地水体水样中还原性物质所消耗的氧化剂 的量	单波段模型、波段 比值模型等半经验 算法	World View、QuickBird、 PLANET、SPOT-5等	待提高 ^[33]
23		饮用水源 地水体总 磷浓度	饮用水源 地水体总 磷浓度	饮用水源地水体水样经消 解后将各种形态的磷转变 成正磷酸盐后测定的结果 在总量中所占的分量。	半经验算法(单波 段模型、波段比值 模型)、间接反演		遥感监测技术可 行,精度约70%, 待提高 ^[34]
24		饮用水源地 环境风险源 空间分布	饮用水源地 保护区土 地覆盖类型	饮用水源地保护区土地 覆盖的类型	支持向量机 SVM 法、矩阵法		遥感监测较成 熟,精度约80%~ 90% ^[35]
25			饮用水源地 保护区环 境风险级别	饮用水源地保护区环境 风险等级	模糊数学法、层次 分析法		遥感监测相对 成熟
26	城镇生 态资源 高分遥 感协同 监测	重点生态功 能区水源涵 养功能	重点生态功 能区水源涵 养量	生态系统通过其特有的结 构与水相互作用,对降水进 行截留、渗透、蓄积,并通过 蒸散发实现对水流、水循环 的调控	水量平衡法、综合 蓄水能力法、降水 贮存量法	MODIS、HJ-1、 GF-1/4/6等	需结合地面观测 数据,精度约 80% ^[36]
27		重点生态功 能区水土保 持功能	陆地生态 系统水土 保持量	生态系统在极度退化状况 下的水土流失量与现实状 况下水土流失量的差值	差值法		遥感监测可行, 需结合地面观测 数据
28			水土保持 服务功能 保有率	土壤保持量与生态系统在 极度退化状况下的水土流 失量的比值	比值法		
29		植被覆盖度	植被覆盖度	指植被面积占土地总面积 之比	归一化植被指数法 NDVI		遥感监测较成 熟,精度约85% ^[37]
30		水体面积	水体面积	以水体与陆地的交界线为边 界,由水体表面构成的多边 形的面积,构成水体面积	归一化水体指数法 NDWI		
31	城镇绿地 信息	绿地覆盖率 人均绿地面积	绿地覆盖率 人均绿地面积	指城镇地表的绿化程度 信息	归一化植被指数法 NDVI	GF-1/2/5/6、ZY-3、HJ-1、 Landsat、Sentinel- 2/3、 World View、QuickBird、 PLANET、SPOT-5等	遥感监测较成 熟,精度约85% ^[38]
32							
33	城镇公园服 务水平	公共设施服 务水平	公共设施服 务水平	指城镇公园中的公共设施 以及公园绿地为市民所提 供的综合服务水平	定性定量相结合		
34		公园绿地服 务水平	公园绿地服 务水平				
35	城镇森林资 源类型	城镇森林资 源类型	城镇森林资 源类型	指城镇森林中树木的种类	深度学习分类	GF-1/2/5/6、ZY-3、HJ-1、 Landsat、Sentinel- 2/3、 World View、QuickBird、 PLANET、SPOT-5、 LiDAR等	遥感监测较 成熟,精度 约85% ^[39-40]
36	城镇森林资 源净初级生 产力	城镇森林资 源净初级生 产力	城镇森林资 源净初级生 产力	指森林光合作用所产生的 净有机质总量	Miami 模型; BEPS 模型; GLO-PEM 模型		
37	潜在污染场 地裸露土壤 污染	潜在污染场 地裸露土壤 污染物浓度	潜在污染场 地裸露土壤 污染物浓度	潜在污染场地中人为活动 产生的污染物进入土壤并 积累到一定程度,引起土壤 质量恶化,并进而造成农作 物中某些指标超过国家标 准的现象	遥感光谱回归建 模等	GF-1/2/5/6、ZY-3、HJ-1、 Landsat、Sentinel- 2/3、 World View、QuickBird、 PLANET、SPOT-5等	遥感监测技术可 行,但起步较晚, 精度约70%,待 提高 ^[41]
38	土壤污染敏 感受体	土壤污染敏 感受体数量	土壤污染敏 感受体数量	易受污染而使土壤质量恶 化的受体数量	面向对象的分类并 结合风险分级评价		
39	城市地表 温度	城市地表 温度	城市地表 温度	指城市地面的温度	单窗或分裂窗算 法等	MODIS、Landsat、 ASTER、GF-5等	遥感监测较成熟, 精度约1~2 K,待 提高 ^[42]
40	城市热岛 效应	热岛效应 的强度	热岛效应 的强度	指城市因大量的人工发热、 建筑物和道路等高蓄热体 及绿地减少等因素,造成城 市“高温化”	均值-标准差划分 法、温度归一化分 级法、温度差值分 级法等		遥感监测较成熟

表2 城镇生态环境综合监测标准体系框架

Tab. 2 Frame of standard system for urban ecological environment comprehensive monitoring

序号	类别	标准规范名称	主要内容	
1	城镇污染气体高分遥感与地面观测协同监测标准规范	气溶胶高分遥感与地面观测协同监测标准规范	规定了基于高分一号等卫星数据的气溶胶遥感与地面协同监测的内容、指标、方法、技术流程等	
2		颗粒物质量浓度(PM _{2.5})高分遥感与地面观测协同监测标准规范	规定了基于高分一号等卫星数据的颗粒物(PM _{2.5})遥感与地面协同监测的指标、方法以及技术流程等相关内容	
3		颗粒物质量浓度(PM ₁₀)高分遥感与地面观测协同监测标准规范	规定了基于高分一号卫星数据的颗粒物(PM ₁₀)高分遥感与地面协同监测的指标、方法以及技术流程等相关内容	
4		灰霾范围高分遥感与地面观测协同监测标准规范	规定了基于高分一号等卫星数据的灰霾范围遥感监测的内容、指标、方法、技术流程等	
5		灰霾强度高分遥感与地面观测协同监测标准规范	规定了基于高分一号等卫星数据的灰霾强度遥感监测的内容、指标、方法、技术流程等	
6		NO ₂ 对流层垂直柱浓度高分遥感与地面观测协同监测标准规范	规定了基于高分五号等卫星数据的对流层大气NO ₂ 高分卫星遥感的内容、指标、方法、技术流程等	
7		SO ₂ 垂直柱浓度高分遥感与地面观测协同监测标准规范	规定了基于高分五号等卫星数据的对流层大气SO ₂ 高分卫星遥感的内容、指标、方法、技术流程等	
8		HCHO垂直柱浓度高分遥感与地面观测协同监测标准规范	规定了基于高分五号等卫星数据的对流层大气HCHO高分卫星遥感的内容、指标、方法、技术流程等	
9		O ₃ 对流层垂直柱浓度高分遥感与地面观测协同监测标准规范	规定了基于高分五号数据和SuomiNPP等卫星数据的对流层O ₃ 柱浓度高分卫星遥感的内容、指标、方法、技术流程等	
10		近地面NO ₂ 质量浓度高分遥感与地面观测协同监测标准规范	规定了近地面NO ₂ 质量浓度高分遥感与地面观测协同监测项目的指标、方法以及技术流程等相关内容	
11		NO ₂ 垂直廓线地基与地面观测协同监测标准规范	规定了大气污染物NO ₂ 垂直廓线地基与地面观测协同监测的术语和定义、原理、流程、方法、产品制作和质量控制	
12		HCHO垂直柱浓度地基与地面观测协同监测标准规范	规定了大气污染物HCHO柱浓度地基与地面观测协同监测的术语和定义、原理、流程、方法、产品制作和质量控制	
13		O ₃ 垂直廓线地基与地面观测协同监测标准规范	规范了环境空气臭氧激光雷达连续监测系统的术语和定义、系统组成和原理、日常运行维护要求、质量保证和质量控制方法、数据有效性判别方法	
14	城镇水体水质高分遥感与地面观测协同监测标准规范	城镇水体水质遥感影像数据源及影像预处理技术规范	规定了基于高分一号等卫星数据进行城镇河网黑臭水体遥感监测、饮用水水源地水质遥感监测和饮用水源地风险源遥感提取与变化检测时的影像数据预处理工作的内容、指标、方法和技术流程等	
15		城镇水体水质高分遥感地基观测技术规范	规定了城镇黑臭水体、饮用水水源地水质、饮用水水源地风险源高分遥感地基实验观测内容、指标、方法和技术流程等	
16		黑臭水体高分遥感监测标准规范	规定了基于高分一号等卫星数据对城镇黑臭水体进行遥感监测的内容、指标、方法和技术流程等	
17		饮用水水源地水质高分遥感监测技术标准规范	规定了基于高分一号等卫星数据对饮用水水源地水质进行遥感监测的内容、指标、方法和技术流程等	
18		饮用水水源地风险源高分遥感监测技术标准规范	规定了基于高分一号等卫星数据对饮用水水源地风险源进行遥感监测与评价的内容、指标、方法和技术流程等	
19		城镇水体水质综合监测业务运行标准规范	规定了城镇黑臭水体、饮用水源地风险源等水体水质遥感监测业务运行的数据输入、产品输出等业务运行流程	
20		城镇水体水质高分遥感监测产品示范生产标准规范	规定了城镇黑臭水体、饮用水源地风险源等水体水质遥感监测的产品生产、质量控制等内容	
21		城镇水体水质高分遥感监测产品真实性检验标准规范	规定了城镇黑臭水体、饮用水源地风险源等水体水质高分遥感与地面观测协同的应用示范结果的真实性检验的内容、方法、流程等内容	
22		城镇生态资源高分遥感与地面观测协同监测标准规范	城市地表温度高分遥感与地面观测协同监测	规定了利用高分五号等卫星数据对城镇地表温度高分遥感与地面协同监测的技术内容、程序和方法
23			城镇园林绿地高分遥感与地面观测协同监测	规定了利用高分一号等卫星数据对城镇园林绿地高分遥感与地面协同监测的技术内容、程序和方法
24	城镇森林资源高分遥感与地面观测协同监测		规定了利用高分一号等卫星数据对城镇森林资源高分遥感与地面协同监测的技术内容、程序和方法	
25	城镇污染场地土壤污染高分遥感与地面观测协同监测		规定了利用高分一号等卫星数据对城镇污染场地土壤污染高分遥感与地面协同监测的技术内容、程序和方法	
26	重点生态功能区生态功能高分遥感与地面观测协同监测		规定了利用高分一号等卫星数据对重点生态功能区生态功能高分遥感与地面协同监测的技术内容、程序和方法	
27		乡镇固体废弃物监测产品真实性检验技术	规定了利用高分一号等卫星数据对乡镇固体废弃物监测产品真实性检验的技术内容、程序和方法	

用潜力,为生态环境保护工作带来了巨大的机遇和挑战^[47]。截止到2019年11月,我国高分辨率科技重大专项的高分一号到七号民用卫星全部成功发射,其中,高分一号、六号卫星为2 m/8 m分辨率光学卫星,高分二号卫星为1 m/4 m分辨率光学卫星,高分三号卫星为1 m分辨率C波段合成孔径雷达卫星,高分四号卫星为50 m分辨率地球静止轨道光学卫星,高分五号卫星为高光谱观测光学卫星,高分七号卫星为1 m立体测绘光学卫星。七颗高分系列卫星中,高分一号、二号、六号、七号为高空间分辨率光学卫星,可用于水环境、生态等监测和空气质量保障,高分一号、六号卫星还携带宽覆盖相机,可用于空气质量、水环境和生态监测;高分三号卫星为高空的雷达卫星,可用于水环境、生态等监测;高分四号卫星为高时间分辨率光学卫星,可用于大气气溶胶、水环境、生态等监测;高分五号卫星携带4台大气观测载荷和2台陆地观测载荷,主要用于大气空气质量、污染气体、温室气体和水环境、生态高光谱等监测。生态环境部为高分五号卫星的牵头用户和高分一号卫星的主用户,随着卫星遥感数据在我国生态环境保护领域中越来越广泛的应用,本研究在所构建的城镇生态环境综合监测技术体系基础上,通过分析国家生态环境综合监测的业务需求,结合我国高分专项系列等国内外主要卫星数据的不同特点,针对城镇污染气体、水体水质、生态资源3个方面设计了遥感监测业务应用方案,生产大气环境、水环境、生态资源遥感监测相关专题图产品30余种,见表1所示,并在全国范围内选取京津冀、长江三角洲、太湖等10个典型城镇区域设计应用示范布局。

3.1 城镇污染气体遥感监测业务

针对城镇污染气体在重点城市群灰霾及颗粒物监测分析与预警、污染气体监测分析与预警、京津冀污染物传输和北京市风道模拟研究及应用方面的监测业务需求,从以下4个方面设计了城镇污染气体遥感监测业务应用方案。

(1)气溶胶、颗粒物污染遥感监测。利用高分五号卫星、MODIS等数据,对京津冀、长江三角洲、珠江三角洲等重点研究区进行颗粒物污染监测,主要监测指标是气溶胶光学厚度、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度分布和等级。

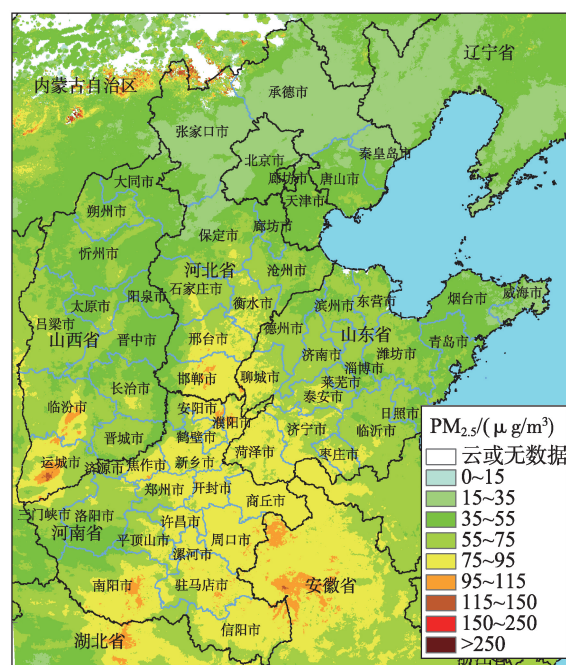
(2)霾等级及污染遥感监测。利用高分五号卫

星、MODIS等数据,对京津冀等典型区域进行霾等级及污染监测,监测指标为霾分布、等级、面积分析及统计。

(3)污染气体遥感监测。以高分五号卫星、OMI、AIRS等为数据源,在京津冀等典型区域进行污染气体遥感监测,监测指标为二氧化氮、二氧化硫、臭氧、甲醛浓度及分布。

(4)区域环境空气质量遥感分析与评价。以高分五号卫星、MODIS及国外卫星气体监测数据为数据源,在京津冀等重点研究区开展区域环境空气质量评价工作,主要包括 PM_{10} 、 NO_2 等指标。

限于篇幅,本文以2017年京津冀及周边地区 $PM_{2.5}$ 监测的专题图(图2)为例,清楚地展示该区域 $PM_{2.5}$ 的空间分布情况。



制作单位: 环境保护部卫星环境应用中心
遥感数据源: MODIS数据
制作时间: 2018年1月24日

图2 2017年12月基于MODIS数据的京津冀及周边地区 $PM_{2.5}$ 月均浓度分布

Fig. 2 The $PM_{2.5}$ map of Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding areas by MODIS data on Dec, 2017

3.2 城镇水体水质遥感监测业务

针对城镇水体水质在黑臭水体、饮用水源地水质、饮用水源地风险源方面的遥感监测需求,从以下2个方面设计了城镇水体水质遥感监测业务应用方案。

(1)城镇黑臭水体遥感监测。利用高分一号、

二号、六号等卫星数据开展典型示范区城镇黑臭水体遥感识别,筛查遗漏黑臭水体,摸清黑臭水体本底情况;开展城市黑臭水体整治过程监督、治理成效评估及治理后跟踪监测,为全国黑臭水体整治工作提供监管支持。

(2)典型饮用水源地遥感监测。利用高分一号、二号、六号等卫星数据,对典型饮用水源地进行遥感监测与评价。主要监测内容为水体消落带的提取、叶绿素、悬浮物、透明度、化学需氧量、总磷浓度、饮用水源地环境风险源空间分布,最后结果以专题图与综合报告的形式显示。

以2018年南京黑臭水体监测的专题图(图3)为例,可直观清楚地展示该区域黑臭水体的空间分布和治理情况,南京市基本消除城镇黑臭现象。

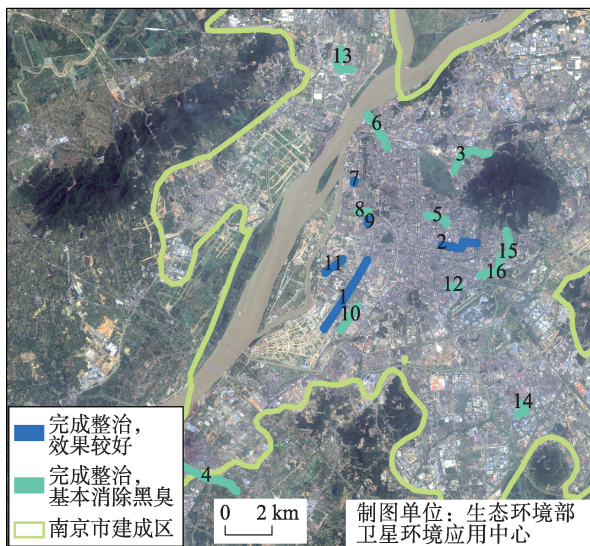


图3 2018年基于高分一号卫星数据的南京市黑臭水体治理效果分布

Fig. 3 The governance effect map of urban black and odorous water by GF-1 data in Nanjing, 2018

3.3 城镇生态资源遥感监测业务

针对城镇生态资源在城市地表温度、城镇园林绿地、裸露土壤污染、重点生态功能区方面的遥感监测需求,从以下3个方面设计了城镇生态资源遥感监测业务应用方案。

(1)重要生态功能保护区生态遥感监测。利用多源卫星数据、生态系统分类产品数据、土地利用产品数据和其他辅助数据,监测生态系统结构及面

积变化;生态类型转移分析;人类干扰和生态破坏程度;景观格局指数;主要生态功能变化等生态功能保护区的生态环境状况,并对重要生态功能区的生态系统结构和服务功能进行评价,为国家的重要生态功能区管理提供监测与评价应用产品。

(2)城市生态状况遥感监测。利用多源卫星遥感数据,对示范区城市等进行生态环境质量遥感监测,制作应用数据产品。内容包括城市土地利用遥感监测、城镇生态绿地遥感监测、城市地表温度遥感监测、城市热岛效应遥感监测等,为城市生态管理和决策提供相关技术支持。

(3)土壤污染遥感监测。利用高分等多源卫星遥感数据,对示范区城镇进行土壤污染场地/污染源遥感动态监测,重点监测污染场地分布及利用方式类型等的动态变化、土壤敏感受体、污染源周边植被胁迫状况变化并进行评估。

以2018年北京市热岛效应监测的专题图(图4)为例,可直观清楚地展示该区域热岛效应的空间分布情况,即中南部特别是南部热岛效应较强,北部较弱。

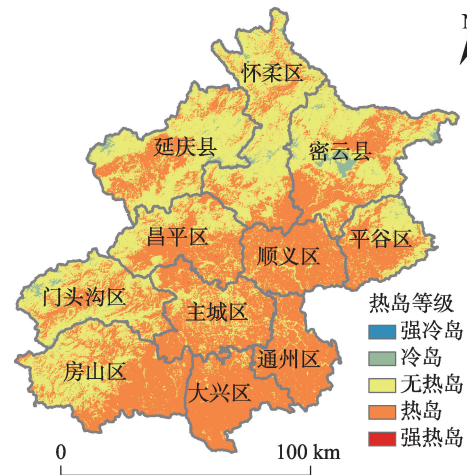


图4 2018年基于Landsat-8数据的北京市热岛效应分布
Fig. 4 The map of urban island effect by Landsat-8 data in Beijing, 2018

利用上文构建的城镇生态环境综合监测技术体系,基于生态环境部卫星环境应用中心的城乡生态环境综合监测空间信息服务平台,设计出由城镇污染气体、水体水质、生态资源遥感监测的应用示范、服务产品、服务3个部分组成的业务应用方案,结构组成如图5所示,利用该方案可以实现城镇污染气体、水体水质和生态资源的高分遥感监测业务

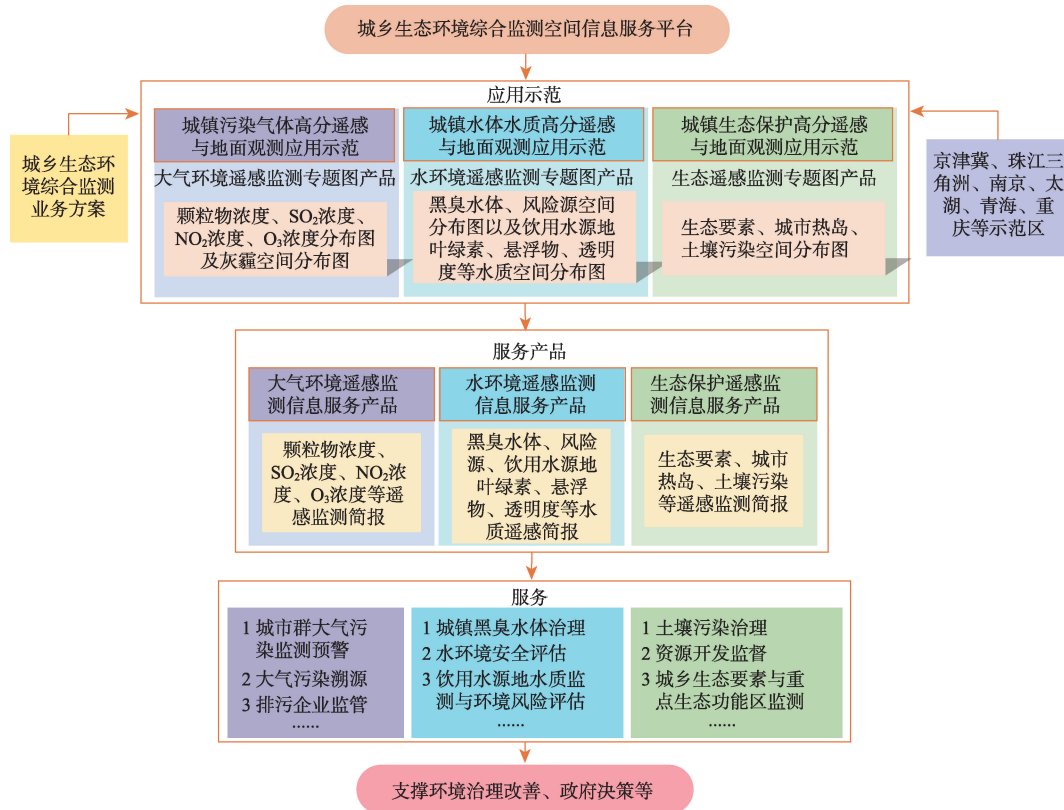


图5 城镇生态环境综合监测业务应用方案结构组成

Fig. 5 Application scheme structure of urban ecological environment comprehensive monitoring

化运行,为国家生态环境管理业务应用、环境治理改善提供空间信息服务等有力支持。

面向全国区域特征及监测需求,选取京津冀、长江三角洲、华中区域作为城镇污染气体的示范区,基于国产系列卫星数据对颗粒物、灰霾、SO₂、NO₂等指标开展应用示范;选取北京、南京、太湖区域作为城镇水体水质的示范区,基于国产系列卫星数据对黑臭水体分布、水源地水质、风险源分布等指标开展应用示范;选取青海、西宁、重庆区域作为城镇生态资源的示范区,基于国产系列卫星数据对植被覆盖度、水体面积、绿地信息等指标开展应用示范,通过制作遥感监测专题图与遥感监测简报,形成相关专题图的业务化生产能力和应用示范作用。

4 结论与展望

城镇生态环境综合监测是国家生态环境保护工作的重要组成部分,技术体系的构建可以促进我国生态环境综合监测能力的提升及环境遥感应用水平的提高,加快实现生态环境监测的业务化运行

与量化监测。本文通过梳理国内外城镇生态环境的主要监测现状,针对当前我国生态环境保护所关注的污染气体、水体水质、生态资源,建立了包含技术体系框架、指标体系框架、标准体系框架的城镇生态环境综合监测技术体系。在此基础上,设计了城镇生态环境综合监测业务应用方案和应用示范布局,成果可为国家和地方开展天空地一体化生态环境监测提供重要的技术参考依据。

本文提出的技术体系、指标体系、标准体系框架和应用方案基本覆盖了现阶段城镇生态环境综合监测的主要内容,下一步还需要结合国家和地方城镇生态环境监测工作的实际应用情况,积极跟踪国内外相关技术与政策研究前沿,与时俱进,通过验证评价、迭代优化,进一步丰富拓展其内容,进而构建完整完善的城镇生态环境综合监测技术体系,为全面推进蓝天保卫战、碧水保卫战、净土保卫战提供技术支撑。

参考文献(References):

[1] 赵少华,刘思含,毛学军,等.新时期我国环保领域卫星遥感技术的应用与发展[J].无线电工程,2017,47(3):1-7.

- [Zhao S H, Liu S H, Mao X J, et al. The application and development of satellite remote sensing technology in the field of environmental protection in the new period[J]. *Radio Engineering*, 2017,47(3):1-7.]
- [2] Nur Hidayati Iswari, Suharyadi R, Danoedoro Projo. Environmental quality assessment of urban ecology based on spatial heterogeneity and remote Sensing imagery[J]. *KnE Social Sciences*, 2019,3(21):363-379.
- [3] Ban Y, Salvatore Marullo, Lars Eklundh. European remote sensing: Progress, challenges, and opportunities [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017,38(7): 1759-1764.
- [4] Patino J E, Duque J C. A review of regional science applications of satellite remote sensing in urban settings[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2013,37:1-17.
- [5] 张晓岭,邓力,孙静,等. 欧美等发达国家水环境监测方法体系[J]. *四川环境*, 2012(1):49-54. [Zhang X L, Deng L, Sun J, et al. Aquatic environmental monitoring method system in developed countries[J]. *Sichuan Environment*, 2012(1):49-54.]
- [6] 赵少华,刘思含,刘芹芹,等. 中国城镇生态环境遥感监测现状及发展趋势[J]. *生态环境学报*, 2019,28(6):1261-1271. [Zhao S H, Liu S H, Liu Q Q, et al. Progress of urban ecological environment monitoring by remote sensing in China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019,28(6):1261-1271.]
- [7] 潘本锋,许人骥,宫正宇,等. 支撑京津冀区域大气污染联防联控的大气监测体系构建[J]. *中国环境监测*, 2017,33(5):57-63. [Pan B F, Xu R J, Gong Z Y, et al. Study on constructing the ambient air monitoring system to sustain the united prevention and control of air pollution in Beijing- Tianjin- Hebei region[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2017,33(5):57-63.]
- [8] 王霞,郭传新,张丽杰. 基于水生态功能分区的流域水环境监测网络体系构建[J]. *环境与可持续发展*, 2018,43(2): 46-48. [Wang X, Guo C X, Zhang L J. Build of watershed water environment monitoring network system based on the water ecological function regionalization[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2018,43(2): 46-48.]
- [9] 魏曦,史明昌,郭宏忠,等. 小流域面源污染监测技术体系的构建[J]. *中国水土保持*, 2010(11):14-16. [Wei X, Shi M C, Guo H Z, et al. Construction of non-point source pollution monitoring technology system in small watershed[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2010(11): 14-16.]
- [10] 夏新,田志仁,姜晓旭,等. 土壤环境监测质量监督体系的设计与实践[J]. *环境监控与预警*, 2019,11(4):1-4. [Xia X, Tian Z R, Jiang X X, et al. Design and Application of the Supervision System for Soil Environmental Quality [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2019,11(4):1-4.]
- [11] 马莉娟,付强,姚雅伟. 我国环境监测方法标准体系的现状与发展构想[J]. *中国环境监测*, 2018,34(5):30-35. [Ma L J, Fu Q, Yao Y W. Current situation and development conception of environmental monitoring method standard system in China[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2018,34(5):30-35.]
- [12] 王桥,刘思含. 国家环境遥感监测体系研究与实现[J]. *遥感学报*, 2016,20(5):1161-1169. [Wang Q, Liu S H. Research and implementation of national environmental remote sensing monitoring system[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016,20(5):1161-1169.]
- [13] 刘方,李俊龙,丁页,等. 关于近岸海域生态环境监测技术体系的探讨[J]. *中国环境监测*, 2017,33(2):17-22. [Liu F, Li J L, Ding Y, et al. Discussion on ecological environmental monitoring system in marine[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2017,33(2):17-22.]
- [14] 李艳萍,张浩,周国栋. 完善环境监测技术监督体系的思考[J]. *环境监测管理与技术*, 2014,26(6):5-8. [Li Y P, Zhang H, Zhou G D. Thinking about perfecting the technology supervision system of environmental monitoring [J]. *Environmental Monitoring Management and Technology*, 2014,26(6):5-8.]
- [15] Yang J, Su J, Xia J, et al. The impact of spatial form of urban architecture on the urban thermal environment: A case study of the Zhongshan district, Dalian, China[J]. *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *IEEE Journal of*, 2018,11(8):2709-2716.
- [16] Li S W, Yang X, Ma J, et al. Application of dynamic and reusable report generation system in urban environmental remote sensing monitoring[J]. *Advanced Materials Research*, 2012(424-425):18-22.
- [17] Cheng P G, Tong C Z, Chen X Y, et al. Urban ecological environment monitoring and evaluation based on remote sensing ecological index[C]. *International Conference on Intelligent Earth Observing and Applications 2015*. *International Society for Optics and Photonics*, 2015.
- [18] 夏新,姜晓旭. 中国土壤环境监测方法体系现状分析与对策[J]. *世界环境*, 2018(3):33-35. [Xia X, Jiang X X. Analysis of current soil environmental monitoring method system in China and relevant countermeasures[J]. *World Environment*, 2018(3):33-35.]
- [19] 赵少华,王桥,游代安,等. 卫星红外遥感技术在我国环保领域中的应用与发展分析[J]. *地球信息科学学报*, 2015, 17(7):855-861. [Zhao S H, Wang Q, You D A, et al. Pre-

- liminary analysis on the application of satellite infrared remote sensing techniques in environmental protection of China[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2015,17(7):855-861.]
- [20] 边博,程小娟.城市河流生态系统健康及其评价[J].*环境保护*,2006(4):66-69. [Bian B, Cheng X J. The health and evaluation of urban river ecosystem[J]. *Environmental Protection*, 2006(4):66-69.]
- [21] 吴敬东,叶芝菡,梁延丽,等.生态清洁小流域水生态环境监测指标体系初探[J].*中国水土保持*,2007(9):8-9,60. [Wu J D, Ye Z H, Liang Y L, et al. Study on the index system of the water eco-environmental monitoring in the small watershed of the ecological clean[J].*Soil and Water Conservation in China*, 2007(9):8-9,60.]
- [22] 向嘉敏,祝善友,张桂欣,等.灰霾遥感监测研究进展[J].*遥感技术与应用*,2019,34(1):12-20. [Xiang J M, Zhu S Y, Zhang G X, et al. Progress in haze monitoring by remote sensing technology. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019,34(1):12-20.]
- [23] http://m.haiwainet.cn/middle/348231/2015/1028/content_29297535_1.html.
- [24] Li Z, Zhang Y, Shao J, et al. Remote sensing of atmospheric particulate mass of dry PM_{2.5} near the ground: Method validation using ground-based measurements. *Remote Sensing of Environment*, 2016,173:59-68.
- [25] 陈辉,厉青,李莹,等.京津冀及周边地区PM_{2.5}时空变化特征遥感监测分析[J].*环境科学*,2019,40(1):33-43. [Chen H, Li Q, Li Y, et al. Monitoring and analysis of the spatio-temporal change characteristics of the PM_{2.5} concentration over Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding regions based on remote sensing[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(1):33-43.]
- [26] 沈丹.利用霾优化变换(HOT)估算大气污染颗粒物的研究[D].南京:南京师范大学,2011. [Shen D. Estimation of atmosphere particular matter by using Haze Optimized Transformation method[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2011.]
- [27] 闫欢欢,李晓静,张兴赢,等.大气SO₂柱总量遥感反演算法比较分析及验证[J].*物理学报*,2016,65(8):084204. [Yan H H, Li X J, Zhang X Y, et al. Comparison and validation of band residual difference algorithm and principal component analysis algorithm for retrievals of atmospheric SO₂ columns from satellite observations[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016,65(8):084204.]
- [28] 张兴赢,周敏强,王维和,等.全球卫星大气成分遥感探测应用进展及其展望[J].*科技导报*,2015,33(17):13-22. [Zhang X Y, Zhou M Q, Wang W H, et al. Progress of global satellite remote sensing of atmospheric compositions and its' applications. *Science & Technology Review*, 2015,33(17):13-22.]
- [29] 焦骄,刘旻霞,李俐蓉,等.近12年华北五省区域对流层甲醛柱浓度时空变化及影响因素[J].*环境科学学报*,2018,38(6):2191-2200. [Jiao J, Liu M X, Li L R, et al. Spatio-temporal change and influencing factors of tropospheric HCHO column density of the five Provinces of North China in the 12 years[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018,38(6):2191-2200.]
- [30] 温爽,王桥,李云梅,等.基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别:以南京为例[J].*环境科学*,2018,39(1):57-67. [Wen S, Wang Q, Li Y M, et al. Remote sensing identification of urban black-odor water bodies based on high-resolution images: A case study in Nanjing[J]. *Environmental Science*, 2018,39(1):57-67.]
- [31] 王桥,朱利.城市黑臭水体遥感监测技术与应用示范[M].北京:中国环境出版集团,2018. [Wang Q, Zhu L. Urban black and odorous water monitoring technique and application using remote sensing[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2018.]
- [32] https://www.sohu.com/a/323299255_119490.
- [33] 曹引,冶运涛,赵红莉,等.内陆水体水质参数遥感反演集合建模方法[J].*中国环境科学*,2017,37(10):3940-3951. [Cao Y, Ye Y T, Zhao H L, et al. Ensemble modeling methods for remote sensing retrieval of water quality parameters in inland water[J]. *China Environmental Science*, 2017,37(10):3940-3951.]
- [34] 杜成功,李云梅,王桥,等.面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究[J].*环境科学*,2016,37(3):862-872. [Du C G, Li Y M, Wang Q, et al. Inversion model and daily variation of total phosphorus concentrations in Taihu lake based on GOCI data[J]. *Environmental Science*, 2016,37(3):862-872.]
- [35] 朱海涛,张霞,王树东,等.基于面向对象决策树算法的半干旱地区遥感影像分类[J].*遥感信息*,2013,28(4):50-56. [Zhu H T, Zhang X, Wang S D, et al. Objected-oriented and decision tree classification for remote sensing data in semi-arid areas[J]. *Remote Sensing Information*, 2013,28(4):50-56.]
- [36] 张堡宸,胡建荣,李新军,等.基于遥感数据的森林水源涵养估测研究[J].*中国农学通报*,2013,30(1):98-102. [Zhang B C, Hu J R, Li X J, et al. Estimation and research of forest water conservation based on remote sensing[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013,30(1): 98-102.]
- [37] 贾坤,姚云军,魏香琴,等.植被覆盖度遥感估算研究进展[J].*地球科学进展*,2013,28(7):774-782. [Jia K, Yao Y J, Wei X Q, et al. A review on fractional vegetation cover es-

- timation using remote sensing[J]. *Advances in Earth Science*, 2013,28(7):774-782.]
- [38] 张金营. 基于高分辨率遥感影像提取城市绿地信息的方法研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2012. [Zhang J Y. Study on the methods for extracting city green land information based on the high-resolution remote sensing images[D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2012.]
- [39] 颜伟, 周雯, 易利龙, 等. 森林类型遥感分类及变化监测研究进展[J]. *遥感技术与应用*, 2019,34(3):445-454. [Yan W, Zhou W, Yi L L, et al. Research progress of remote sensing classification and change monitoring on forest types[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019,34(3):445-454.]
- [40] 娄雪婷, 曾源, 吴炳方. 森林地上生物量遥感估测研究进展[J]. *国土资源遥感*, 2011,23(1):1-8. [Lou X T, Ceng Y, Wu B F. Advances in the estimation of above-ground biomass of forest using remote sensing. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2011,23(1):1-8.]
- [41] 熊文成, 聂忆黄, 王桥, 等. 土壤污染遥感研究进展及应用展望[J]. *环境与可持续发展*, 2017(6):53-56. [Xiong W C, Nie Y H, Wang Q, et al. Progress in soil pollution remote sensing and its application Prospect[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2017(6):53-56.]
- [42] 李召良, 段四波, 唐伯惠, 等. 热红外地表温度遥感反演方法研究进展[J]. *遥感学报*, 2016,20(5):899-920. [Li Z L, Duan S B, Tang B H. 2016. Review of methods for land surface temperature derived from thermal infrared remotely sensed data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016,20(5):899-920.]
- [43] 周月敏, 周翔. 中国高分辨率对地观测系统共性应用技术规范体系框架研究[J]. *地球信息科学学报*, 2018,20(9):1298-1305. [Zhou Y M, Zhou X. The system framework of technical standards for common applications in China high resolution earth observation system[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2018,20(9):1298-1305.]
- [44] 唐兆军, 俸强, 王宇星, 等. 国家大气污染排放标准中环境监测相关问题的研究[J]. *环境科学导刊*, 2019,38(3):84-88. [Tang Z J, Feng Q, Wang Y X, et al. Research on the problems of national air pollutants emission standards on environmental monitoring[J]. *Environmental Science Guide*, 2019,38(3):84-88.]
- [45] 雷晶, 张虞, 朱静, 等. 我国环境监测标准体系发展现状、问题及建议[J]. *环境保护*, 2018,46(22):37-39. [Lei J, Zhang Y, Zhu J, et al. The development status, problems and suggestions of Chinese environmental monitoring standards [J]. *Environmental Protection*, 2018,46(22):37-39.]
- [46] 赵磊. 生态环境动态监测体系优化研究[J]. *环境与发展*, 2019,31(6):183-185. [Zhao L. Research on optimization of ecological environment monitoring system[J]. *Environment and Development*, 2019,31(6):183-185.]
- [47] 赵少华, 王桥, 游代安, 等. 高分辨率卫星在环境保护领域中的应用[J]. *国土资源遥感*, 2015,27(4):1-7. [Zhao S H, Wang Q, You D A, et al. Application of high resolution satellites to environmental protection[J]. *Remote Sensing For Land & Resources*, 2015,27(4):1-7.]