

DOI: 10.5846/stxb202004150888

吴志峰, 曹峥, 宋松, 蒋卫国, 郭冠华, 吴艳艳. 粤港澳大湾区湿地遥感监测与评估: 现状、挑战及展望. 生态学报, 2020, 40(23): 8440-8450.

Wu Z F, Cao Z, Song S, Jiang W G, Guo G H, Wu Y Y. Wetland remote sensing monitoring and assessment in Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area: current status, challenges and future perspectives

.Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8440-8450.

粤港澳大湾区湿地遥感监测与评估: 现状、挑战及展望

吴志峰^{1,2,*}, 曹 峥^{1,2}, 宋 松^{1,2}, 蒋卫国³, 郭冠华^{1,2}, 吴艳艳⁴

1 广州大学地理科学与遥感学院, 广州 510006

2 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511485

3 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875

4 广东财经大学地理与旅游学院, 广州 510320

摘要: 粤港澳大湾区水热丰沛河网密布, 岸线曲折峡湾众多, 复杂的自然条件孕育了丰富的湿地资源, 构成了区域生态安全屏障的重要防线。近几十年来气候变化与区域高强度人类活动的双重胁迫下, 大湾区湿地资源面积衰减、质量退化趋势明显, 亟需开展湿地资源监测与评估研究, 为国家战略提供基础保障。现阶段湿地遥感已实现由最初的湿地面积、形态提取向湿地生物物理参量提取的过程转变, 然而粤港澳大湾区特有的气候特征, 限制了传统光学影像在湿地遥感领域的应用, 大大提升了此区域长时间序列湿地遥感数据获取的难度。此外, 如何实现湿地生态价值与生态资产对接与评估, 也是现阶段自然资源监测管理面临的重大课题之一。本文基于粤港澳大湾区建设的国家战略需求, 讨论湿地资源在构建大湾区生态安全保障体系中的重要地位, 厘清大湾区湿地资源保护与利用存在的关键技术瓶颈与核心科学问题, 围绕湿地遥感监测、湿地资源生态资产价值评估、湿地生态功能分区与定位等关键问题, 指出开展粤港澳大湾区湿地遥感监测与评估面临的挑战, 明确构建“天-空-地”湿地遥感监测的综合技术体系实施方案, 并展望粤港澳大湾区湿地常态化监测与资产评估的几个重要方向: 1 构建适用于不同自然环境特征的湿地分类体系; 2 融合升级现有湿地监测与评估技术手段, 发挥“天-空-地”一体化监测平台的技术优势; 3 全区域监测与重点调查相结合; 4 从调查监测迈向资源动态监控与演变机制分析; 5 面向陆海统筹的湿地区划与综合管治; 6 多学科、跨区域、跨行业协作。

关键词: 粤港澳大湾区; 湿地资源; 遥感监测; 生态功能; 资产评估

Wetland remote sensing monitoring and assessment in Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area: current status, challenges and future perspectives

WU Zhifeng^{1,2,*}, CAO Zheng^{1,2}, SONG Song^{1,2}, JIANG Weiguo³, GUO Guanhua^{1,2}, WU Yanyan⁴

1 Schools of Geographical Sciences and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China

2 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511485, China

3 Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

4 School of Geography and Tourism, Guangdong University of Finance and Economics, Guangzhou 510320, China

Abstract: Guangdong-Hongkong-Macau Greater Bay area has plenty of heat and precipitation, holding dense river network, tortuous coastline and numerous fjords. The complex natural conditions breed rich wetland resources and constitute an important defense line of regional ecological security barrier. With the rapid development of economy and urbanization in the last four decades, the shrinkage and deterioration of wetland resources are evident. Focusing on the nationally strategic

基金项目: 国家自然科学基金委-广东联合基金重点项目(U1901219); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0301)

收稿日期: 2020-04-15; 修订日期: 2020-10-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zfwu@gzhu.edu.cn

demands, a literature review from the follow aspects are addressed: development of wetland remote sensing monitoring and assessment, problems and challenges of current research, and the future perspectives of remote sensing monitoring and assessment. And then, key scientific questions and technical bottlenecks of wetland protection and utilization are clarified. Moreover, the importance of wetland resource in the construction of ecological safe guarantee system is stated. Based on the challenges the wetland remote sensing monitoring and evaluation confronting, the establishment and implementation of the integrated "sky-air-ground" wetland remote sensing monitoring technology scheme system is in urgent need. Furthermore, several research and application directions of wetland normalization monitoring and asset evaluation in "Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area" are prospected, 1) constructing wetland classification system applied to various natural environment characteristics; 2) upgrading and integrating existed wetland monitoring and evaluation technology, while maximizing the technical advantages of the integrated "sky-air-ground" monitoring platform; 3. combining regional monitoring with key component investigation; 4. expanding research from parameter investigation and monitoring to dynamic resource monitoring and evolution mechanism analysis; 5. developing wetland regionalization and comprehensive management oriented to land and marine coordination; 6. promoting multi-disciplinary, cross-regional and trans-departmental cooperation.

Key Words: Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area; wetland resources; remote sensing monitoring; ecological function; ecological assets assessment

湿地作为地球三大生态系统之一,是全球生态系统的重要组成部分,它具有极高的生态服务价值、生态多样性及生物生产力,对全球生态系统的健康及人类经济可持续发展具有重要的意义。进入 20 世纪,伴随着人口爆炸和城市化进程的推进,人类开始大规模开发利用湿地资源,围垦和基建占用了大量的优质湿地资源,过度捕捞、非法狩猎及外来物种入侵正在严重破坏着湿地的生物多样性^[1]。以我国为例,1950-1980 年,我国淡水湖泊面积减少 11%,天然红树林面积已由 50 年代初的 5 万 hm^2 下降至目前的 1.4 万 hm^2 ,已有 72% 的红树林物种丧失^[2-5]。且未来气候模拟结果表明,持续的全球增温将进一步导致湿地资源的破坏与丧失。在人为与自然驱动力的双重影响下,湿地资源与湿地生态系统面临的压力越来越大,因此,增加湿地资源总量,提升湿地资源质量,增强其生态功能,是我国生态可持续发展及我国生态文明建设的重要战略任务^[6-7]。

伴随着湿地资源的大量流失,人类对湿地资源重要性及湿地资源保护、修复的必要性有了新的认知^[8-11]。首先,湿地资源的经济价值发生转变,由最初的生产原料提供地变为休闲、观光、生物资源保护地,其次,湿地生态功能及其评估则由传统的水资源调蓄过渡到综合利用固碳释氧、水文循环调节、水质改善等功能。再次,地方政府与国家将湿地资源与全球需求对接。

在当前湿地资源与修复并存,全球化城市化持续推进的背景下,亟需一种能够对湿地资源进行快速识别、提取、分析及评估的手段与方法,遥感以其覆盖范围大、人力成本低、时空分辨率高的特点,成为实现湿地资源监测、评估的首选手段^[12-15]。但长时间序列湿地数据的缺乏、关键水文参数遥感反演结果与实地监测的差异、湿地生态资源与生态资产对接等问题,一直是制约现有遥感湿地监测分析的瓶颈。基于此,本文以多云多雨的粤港澳大湾区湿地为分析对象,首先对遥感湿地监测理论及方法进行回顾,分析遥感湿地监测所面临的问题与挑战,在此基础上,提出针对粤港澳大湾区湿地监测的可行手段及未来的发展方向与趋势。

1 湿地遥感监测与评估研究进展

1.1 湿地遥感数据源

遥感是通过对电磁波敏感的传感器,在远离目标和非接触目标物体条件下探测目标地物,获取其反射、辐射或散射的电磁波信息(如电场、磁场、电磁波、地震波等信息),并进行提取、判定、加工处理、分析与应用的一门科学和技术。随着遥感传感器数量和种类的增加,湿地遥感的信息的频谱更加多样化,从传统的可见光

遥感,到紫外遥感、红外遥感、微波遥感,均在湿地信息提取及动态监测中有广泛应用。湿地水体对可见光的蓝绿波段具有较强的反射,因此包含多光谱与高光谱在内的可见光遥感最早被应用于湿地遥感。高光谱技术的优势在于高光谱分辨率提供的精细地物信息,在湿地边界提取、植被信息识别、植被生产力估算等方面准确率较高,在湿地土壤湿度和土壤含水量的反演研究中也有广泛应用^[16]。雷达数据为最常用的微波遥感数据,主要数据源包含激光雷达、合成孔径雷达等,其在湿地遥感中的应用引导湿地生态环境分析从二维向三维挺进。激光雷达在探测目标的位置、速度、海拔等特征量方面具有先天优势,在湿地遥感研究中开拓了新的监测方向,如湿地植被高度、水面波动等生态环境信息特征。在雷达波段选择上以 L 波段和 C 波段应用最为广泛,其中 L 波段对植被结构较为敏感,林地覆盖率高的湿地多选 L 波段, C 波段更适于少叶和低生物量植被组成的湿地。雷达遥感与传统遥感最大的区别在于其主动性,雷达遥感利用遥感平台上的人工辐射源,向目标物发射一定形式的电子波,再由传感器接收和记录其反射波普信息,具有不依赖太阳光照及气候条件的全天时、全天候对地观测能力,其穿透云雾的特性,特别适合在多云多雨区域应用^[17-21],目前已成为目前湿地遥感领域的核心技术手段。

遥感数据源还存在很其他多分类体系,如根据传感器搭载平台,可以分为航空遥感、航天遥感与地面遥感,根据影像的空间分辨率,又可将遥感数据分为低空间分辨率、中空间分辨率(4-30m)和高空间分辨率(<4m)等类型。但由于遥感传感器的硬件技术瓶颈,遥感数据无法同时具有高空间分辨率、高光谱分辨率、高时间分辨率的指标特性,多源遥感数据融合可以兼顾影像的时间、光谱与分辨率特性,综合各种影像数据的优势,已成为湿地遥感常用的技术手段之一^[22]。

1.2 湿地遥感监测理论体系

不同于陆地遥感,由于湿地具有斑块破碎、类型多样、周期水位变化、受水力侵蚀严重等特点,湿地土地利用分布、土壤类型、植被覆盖、生态系统结构及服务价值具有复杂多变的特性,湿地遥感的理论及方法具有鲜明特色。湿地地物的光谱反射特征是湿地遥感监测分类的依据,反射光谱的特征分析关系到湿地遥感的分类精度,是湿地遥感研究的重要理论基础,也是困扰湿地遥感发展的重要瓶颈问题之一^[23]。基于多源遥感影像,利用植被指数或水体指数提取湿地范围简单高效,如利用归一化植被指数 NDVI 随时间变化的规律分辨不同植被特征下湿地的特征差异,进而对湿地种类进行识别与区分^[24-25];或根据湿地水体与周围背景地物间的光谱特征差异,采用波段阈值法和水体指数法进行湿地信息提取研究^[26-28],湿地生物量也是光谱信息研究的重要指标^[29-30]。

湿地遥感监测发展历程大致可分为三个阶段:(1)基于目视解译、经验模型的湿地水体基本属性要素提取阶段;(2)耦合机器学习、人工智能方法的湿地水体长时间序列数据构建及生态环境要素变化过程分析阶段;(3)利用多学科交叉的湿地变化过程机理挖掘阶段。湿地遥感研究的第一阶段,学者往往利用监督分类或非监督分类技术,开展湿地的界限提取、面积计算、水深反演等工作^[31-34],此外,大量学者还将遥感数据与现场实测数据结合,利用经验模型或半经验模型,开展湿地水质问题的研究^[35-37]。此阶段反演结果的精度受原始数据质量、野外观测数据精度及研究者主观作用的影响较大。这个应该是机器学习、人工智能等方法引入湿地遥感监测评估吧?,主要以大尺度、长周期的湿地生态环境要素构建及其变迁过程为主要研究对象^[38-40],但部分机器学习或深度学习方法为黑箱,其基本原理是用大量的数据样本,确定数据之间的潜在关联,但其分析过程与真实地理经验知识可能相悖,因此在开展研究时,应以地理学问题作为基本准则,限定数据的计算、开展结果的验证。第三阶段则是在多学科知识背景下探讨湿地遥感技术、理论、应用的发展与创新?探究人-地关系如何影响湿地水文生态过程,并挖掘其交互机理。在此阶段中,遥感是其他学科湿地分析的重要数据源,也是多学科方法耦合的重要桥梁^[41-44]。

湿地遥感监测是湿地生态价值评估的重要手段。传统湿地生态价值评估多集中于单一湿地或单一时段视角下的湿地价值,遥感监测技术的引入,使得大空间尺度、长时间序列的湿地价值评估成为可能。遥感技术的发展和运用,为湿地生态健康评价提供了多种数据源和有力的分析手段,开拓了湿地生态健康评价和分析

的一个新方向^[45]。湿地生态服务价值的科学评估是湿地保护和可持续利用的重要保证,当前对湿地生态服务价值评估多采用单一评价方法,但往往存在片面性和主观性。因此,在资源日趋紧束的当下,如何基于区域湿地复杂的非线性特征,依托海量遥感数据,充分挖掘湿地水文、生态与环境信息,耦合物质质量、价值量和能量三种生态系统服务功能评价方法,构建适于区域湿地生态服务评估体系与遥感计算模型,是湿地遥感研究的重要方向。

1.3 湿地遥感监测技术

1990s 以来,湿地遥感的相关研究开始得到广泛关注,公开发表物数量迅速增加,湿地遥感方法与技术类文献所占比例逐年提升。人工解译是最早用于湿地提取的方法之一,利用湿地植被与水体光谱反射特性,开展特征指数识别^[46-49],提取单时相或年际多时相的湿地分类及其变迁,分类精度较高但主观性较强,目前仍被广泛应用。计算机自动分类方法基于像素的光谱信息获取湿地信息,常用的自动分类方法包括监督分类与非监督分类,监督分类常采用最小距离分类法和最大似然比分类法进行地物解译,解译精度较非监督分类法高,但样本数据的采集和训练的时间、人力成本都较高^[50-51]。近年来广泛应用的高空间分辨率遥感图像在提供了更为详细的地表信息的同时,也识别出大量土地覆盖类型及其差异的冗余信息,催生了基于对象分类方法,其原理是将具有相似特征的对象(如相似的像素形状、颜色或纹理)分组,并根据对象特征对其进行分类,适用于高分辨率影像及集合的多源遥感数据库^[52]。伴随着海量遥感数据源的供应,一些自动提取与分类方法也开始出现,如决策树分类法、分层分类法、神经网络分类法^[53-54]、支持向量机(SVMs)法等等。深度学习、迁移学习等基于大数据分析的方法,为湿地水文特征快速自动提取提供了理论方法依据^[55-56]。采用具有强大分析与运算功能的机器学习算法在提取湿地覆被种类上具有优势^[57-59],而更为智能的优化算法,如人工神经网络、进化算法、蚁群算法、粒子群算法、量子算法、深度学习等由于简单有效,在大数据挖掘中广受青睐^[60-62]。其中粒子群算法(PSO)是一种基于群体优化的新型启发式全局随机搜索优化算法,具有可调参数少、算法易实现、全局搜索能力强、运行效率高等特点,成为发展最快的优化算法之一^[63-64]。各种分类方法各有优缺点,复合分类法克服了单方法的局限性,实现优势互补,有效地提高分类精度。利用 IKONOS、WorldView-2 等数据源的实证研究表明,基于像素与基于像元相结合的方法准确率更高^[65]。

1.4 湿地遥感监测应用

随着气候变化的深入发展与城市发展的不断推进,全球湿地面临面积萎缩、质量下降、生态系统退化、服务价值丧失等一系列生态环境问题。湿地遥感监测试图通过长序列影像资料,提取不同时段湿地边界范围、空间分布及生态系统结构等信息,进而监测湿地种类构成及其时空变迁过程。随着各类遥感卫星的成功发射和遥感技术的不断创新,湿地遥感从应用中高分辨率的光学遥感图像监测指定区域的湿地状况^[66],发展到利用多源融合数据开展湿地生态水文参数提取及时空演变动态监测,再到基于新技术支持的多尺度、精细化、自动化、智能化实时监测尝试^[67-68],多源遥感数据在湿地分类^[69-70]、湿地制图及变化检测^[71-72]、湿地生物多样性研究^[73-74]、湿地温室气体循环^[75-76]、湿地风险评估^[77-78]、湿地生态服务功能评估^[79-80]等方面得到了广泛应用。

2 粤港澳大湾区湿地遥感监测与评估面临的问题与挑战

粤港澳大湾区地处高温多雨的华南沿海地区,由于我国东部华夏构造与华南岸线走向交错,区内沿海峡湾发育,加上珠江口海陆交互频繁,发育了类型丰富、分布广泛、结构复杂的湿地生态系统。2000 多年的三角洲农耕历史,特别是近 40 年来,导致区域内湿地资源受人类活动干扰胁迫日益加剧,迫切需要对大湾区湿地资源开展系统性、全局性调查监测与生态资产评估。

截止 2015 年底,大湾区湿地面积 8650 km²,占全区面积的 15.45%,是大湾区可持续发展的重要物质基础和支撑平台。然而,近 40 年来工业化与城市化高速推进,高强度人类活动干扰不断影响湿地生态系统,导致湿地面积持续减少,内部景观破碎化严重,湿地生境质量恶化,湿地生态服务功能和资源供给能力不断下

降^[81]。粤港澳大湾区湿地遥感研究与应用起步于 20 世纪 90 年代中期^[82],不同研究的采用的数据精度及分类体系差异较大。数据源以光学遥感为主,研究兴趣集中在湿地资源概况调查、分类及动态变化监测,包含红树林、海岸带、基塘等特色湿地资源的提取、统计及变迁研究也较为常见,但水文生态参数、生物量、温室气体通量等反应湿地功能的关键指标反演尚未得到关注,高分影像、高光谱影像、雷达遥感数据支持下的湿地监测非常少见,新方法、新技术、新理论体系支持下的粤港澳大湾区湿地遥感亟需开展。粤港澳大湾区湿地遥感监测与评估存在以下四个方面的问题与挑战:(1)湿地类型多样,斑块破碎,分布范围广、生物多样性复杂、潮汐变化差异大。受人类活动与地质地貌因素的综合作用,粤港澳大湾区内湿地类型有十余种,包含城市内部坑塘、沙湾湿地、溪涧湿地、红树林、近岸水体等,湿地内植被类型丰富,受制于光学遥感的光谱分辨率,湿地内不同类型植被的遥感波谱反射率较为接近,使得湿地内植被高精度制图成为湿地研究的难点之一^[83-88]。(2)粤港澳大湾区多云多雨,光学影像成像比例低,质量差,无法形成长时间的光学原始影像数据集。4-9 月为粤港澳大湾区的主汛期,此时段内受降雨量的影像,湿地水文特征变化剧烈,但由于此时段遥感影像可利用率低,无法实现湿地水文生态特征的有效监测。此外,不同湿地遥感产品的湿地定义不同,源数据存在时间、空间、光谱分辨率的差异,且湿地反演方法也不尽相同,因此不能简单的将不同湿地遥感产品进行时间序列分析,需要重构一套具有数据标准一致、时空特征一致的湿地长时间序列数据集^[89-90];(3)遥感反演结果与地面实测数据不匹配,以归一化植被指数为例,光学遥感反演的归一化植被指数只能反映湿地植被冠层的属性特征,但湿地植被是由乔木、灌木、草本植物组成的生态系统,冠层植被信息无法真实表征生态系统的现状,但现有湿地缺乏地面监测站,因而无法利用地面监测数据对遥感反演结果进行校正^[91-92]。(4)在新的自然资源综合管理体系中,无法实现湿地管理在国土、林业、农业与环保部门中的有效衔接,不同职能属性部门,其所开展的遥感监测工作侧重点不同,导致不同部门间缺乏项目任务的协同性与整体性。且其遥感监测结果往往只反映湿地面积、结构及生态参数,对湿地生态服务价值、生态资产价值等挖掘不够深入。

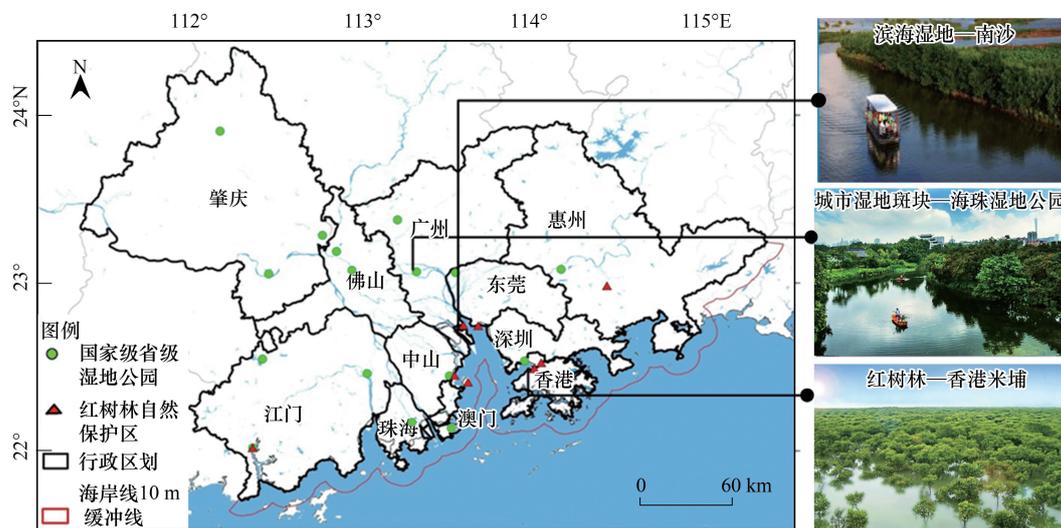


图 1 粤港澳大湾区主要湿地类型

Fig.1 Major wetland types in Guangdong-Hong Kong- Macau Greater Bay Area

3 粤港澳大湾区湿地遥感监测与评估发展趋势与展望

3.1 理论层面:构建大湾区湿地分类系统,完善复杂地区湿地“调查-监测-评估”体系

湿地分类是湿地科学理论的核心问题,标志着湿地科学的发展水平,科学合理的湿地分类是湿地监测与评估的基础^[93-95]。目前我国传统湿地分类系统存在分类过粗、标准不统一、多体系并存等问题。同时,很多

滨海湿地尚未纳入土地利用分类系统,导致现有湿地分类体系向上难以与土地利用分类系统衔接,向下难以指导具体类型导向的湿地管理、保育与修复等工作,难以同国际湿地分类系统接轨,同时存在不同行业湿地规范兼容性较差等问题。粤港澳大湾区湿地类型丰富结构复杂,涵盖了包括近海湿地与内陆湿地、自然湿地与人工湿地框架下的几乎所有的湿地类型。因此,针对多源数据建立统一性与定量相结合的湿地分类系统,创建湿地基础数据标准及完善的共享机制,并在此基础上架构大湾区湿地分类与编码的标准体系,是粤港澳大湾区湿地遥感监测与评估的重要理论方向。

粤港澳大湾区湿地分布广泛种类多样功能复杂,传统的遥感技术在湿地种类划分、生态系统结构、环境因素等信息获取方面作用不足,需结合湿地野外调查及新型遥感数据源获取环境因子、生物组成、生态监测等信息。完善湿地“调查-监测-评估”体系,建立湿地数据库,深入挖掘湿地的信息,判断湿地的价值与重要性,识别其受到威胁程度,科学评估其生态承载力,是实现湿地生态保护与资源可持续利用的基础,也是制定湿地保护、管理策略的重要依据。

粤港澳大湾区岸线曲折峡湾众多,人类活动广泛而强烈。区内湿地在地形地貌多样、水热丰沛等自然条件下,叠加了明显的人为活动痕迹,近海岸地区人工岸线绵长且发育了众多生境极为丰富的滨海湿地,内陆湿地则多见桑基鱼塘及城市小水体等形貌规则的人工湿地。滨海湿地具有更高的多样性、复杂性、破碎性、敏感性 & 生态服务能力,较难确定统一的光谱特征与解译标志,给信息提取造成很大困难,而人工湿地虽然在监测准确度上优势较大,但在水文生态过程、生境多样性及生态服务价值等方面退化更为严重。因此,针对高度敏感的滨海湿地资源类型,建立典型滨海湿地监测网络、资源信息系统及灾害预警系统,捕捉岸线及峡湾时空轨迹,实现统一的滨海湿地调查监测规程,实时动态监测滨海湿地变化是粤港澳大湾区滨海湿地监测重要内容。而针对人工湿地资源,刻画人工湿地的时空变迁,结合地面观测站点及野外勘测数据,监测人工湿地的生态要素及服务价值变迁,优化人工湿地的蓄滞洪水、污染净化、环境优化等服务效应,是大湾区人工湿地监测的另一个重点内容。

3.2 技术层面:多源数据融合,信息深度挖掘

受粤港澳大湾区多云多雨的天气特征所限,区域内传统遥感影像的高质量、高时空分辨率的影像数量较少,亟需新型遥感数据源的补充。低空无人机遥感、地面传感网监测、移动机器人监测及人工野外勘测无论是在湿地淹没范围、淹没频率,还是在湿地植被丰度、覆盖度等方面的准确性及稳定性均较高,是航空遥感数据的重要补充。空天地一体化的多角度、全方位、全时段的监测技术融合,集合不同数据源的优势兼顾影像的时间分辨率、空间分辨率及光谱分辨率,多模态挖掘湿地特征将极大的改进粤港澳大湾区湿地综合监测的时空精度及准确度。

航天航空遥感在影像覆盖度与获取效率方面具有天然的优势,然而影像解译过程的自动化程度相对较低,且对复杂地表监测结果较为粗糙,严重制约着其在湿地动态监测中的应用。互联网、物联网、大数据、云计算、人工智能等的高速发展和应用将着力缓解大湾区湿地监测在数据处理、信息提取、传输服务等方面能力不足的问题。因此,集成多源数据,建立空天地湿地观测传感网,实现多传感器资源耦合,最终实现多源数据平台耦合、实时互动、同化融合、智能感知及多层级服务,将是粤港澳大湾区湿地遥感与监测的重要技术开拓方向。粤港澳大湾区湿地监测最终将走向空天地协同化多传感监测和大数据融合智能监测方向发展。

3.3 应用层面:从调查监测迈向资源动态监控与演变机制分析

传统的湿地遥感监测与评估,注重湿地资源数量监测与时空分布动态追踪,对于关键水文参数、湿地生态水文过程缺乏关注^[96-98]。遥感监测及资源调查揭示了全球范围内湿地不断萎缩、生境持续退化、生物多样性锐减的趋势^[99-100],然而由于湿地水文过程、生态过程及土壤过程的定量监控与反演的缺失,导致对于湿地生态环境质量、服务价值及其对外界干扰的响应机理没有明确的结论。长期动态监测湿地生态系统的水文与生物格局、过程的耦合特征及其相互作用,结合大数据挖掘与数字模拟技术,定量揭示多空间尺度下湿地退化的驱动因子、动力及效应,建立“过程-功能”反馈指示体系,厘清粤港澳大湾区湿地变化规律,并提出问题导向的

响应机制与解决方案,对当前亟需开展的湿地生态修复与保育工作具有重要的指导意义。因此,未来粤港澳大湾区湿地遥感监测应由传统的“边界-要素-格局”分析,转向“水文-土壤-生态”过程监控,并深化湿地时空动态及功能演变的机理剖析。其实,逐步实现基于数据库的湿地动态管理。通过对湿地数据库的分析,掌握广东省湿地资源现状和动态变化趋势,为湿地生态红线管控、自然资源资产负债表、自然资源资产领导干部离任审计、资源有偿使用和生态补偿等提供基础数据和技术服务,更好地发挥湿地在维护生态平衡、维持生物多样性中的重要作用。再次,加强科学研究,全面开展湿地资源及其变迁的过程、规律、机理研究,探索湿地生态资产核算方法。长期的监测有助于揭示湿地功能与价值变化趋势及成因,评价湿地保护管理工作的成果;掌握外来干扰因素影响下湿地资源消长、关键生态过程及湿地功能价值的演变规律,有助于进一步完善湿地保护方案及修复手段。

3.4 管理层面:陆海统筹的湿地区划与综合管治

粤港澳大湾区湿地受到强烈的气候变化与人类活动干扰,是近几十年时空变异最为剧烈的用地类型,其面临的压力主要有三:(1)原位压力,如变化环境及其引起的生态环境退化、生态系统丧失;(2)陆源压力,如泥沙输入减少,营养盐与污染物超负荷运移;(3)海源压力,如海平面上升与风暴潮频发等。粤港澳大湾区不同空间分布及时空视角下的“内陆-海岸-海湾-近海”湿地具有明显的压力来源及组合差异,在湿地监测及区划与管理工作中,应依据陆海统筹的原则,监测陆源输入,预测海源入侵,评估原位压力,明确不同区位与时段条件下的湿地工作重点。同时,受周期性或阶段性淹没影响,湿地在水文过程与生态过程方面具有明显的“地表-地下-地上”分异与强烈的时间变化,多层次环境界面之间的水分、物质、能量的交互传输与转移是影响湿地生态环境效应的重要机制^[101-102]。因此,湿地监测、区划与管理工作中必须摒弃传统以植被景观主导的方式,采取“地表-地下-地上”多界面区划理念。

3.5 科学层面:多学科、跨区域、跨行业协作

湿地是极为复杂的过渡生态系统,空天地一体化的遥感监测技术是快速收集湿地数据的重要手段,需要地理学、水文学、生态学、环境科学、资源科学、统计学和计算机科学等多学科协同,推进科研、环保、物联网等行业的互联互通,实现高质量的湿地监测、模拟或预警,推进信息共享与数据互鉴,并最终构建粤港澳大湾区湿地大数据库及智能服务平台。随着“湾区经济”、“海洋经济”的推进,粤港澳大湾区湿地面临更加严峻的生

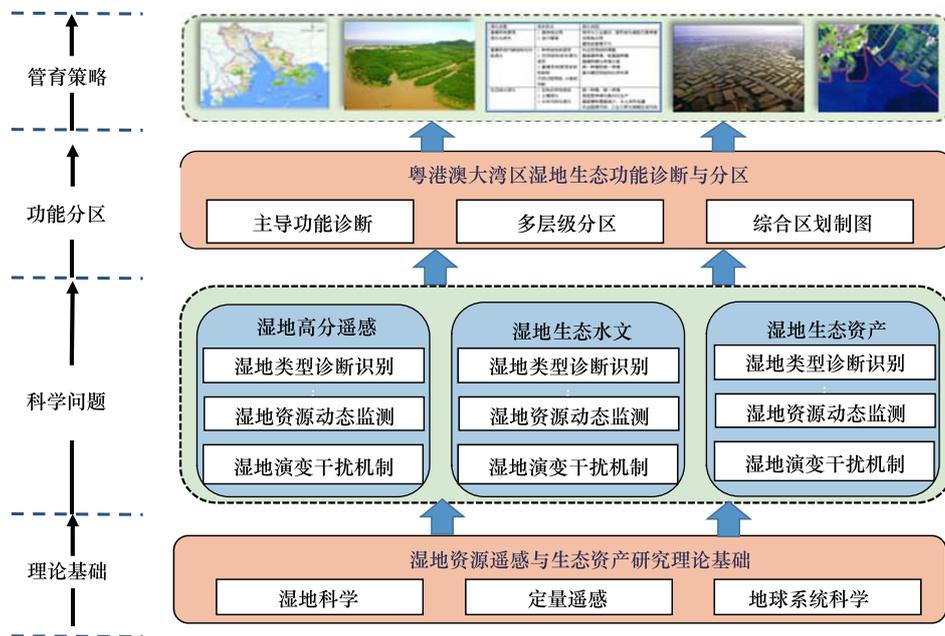


图2 粤港澳大湾区湿地遥感监测技术框架

Fig.2 Technical framework of wetland remote sensing monitoring and assessment in Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area

态环境挑战,加强国际与区域合作,融入国际未来地球海岸计划、湿地国际等全球框架下的湿地保护与恢复工作,发挥粤港澳大湾区湿地的生态安全屏障作用,有力支撑粤港澳大湾区乃至全国的可持续发展。

4 结论

粤港澳大湾区建设已经上升为国家战略,构建大湾区生态安全保障体系是推进实施这一战略的重要前提,湿地资源又是其中最为重要的物质基础之一。《粤港澳大湾区发展规划纲要》中提出的加强湿地保护修复,全面保护区域内国际和国家级重要湿地,开展滨海湿地跨境联合保护的工作部署对区内湿地遥感监测与评估保护提出了新的需求。受湾区内自然条件复杂、湿地资源破碎及遥感影像利用率低等因素限制,粤港澳大湾区湿地遥感研究仍缺乏系统性与全局性,亟需建立基于空天地一体化的湿地资源综合监测与评估体系,探索“时-空-谱”数据的一体化融合方法体系,开发多源数据融合、信息自动提取与大数据深度挖掘技术体系发展对地观测传感网络与数字模型的多参数联合同化系统,实现数据实时互动、同化融合、智能感知及多层次服务,系统揭示粤港澳大湾区湿地时空动态变迁与格局演变,聚焦湿地生态水文过程及动力机制,探究湿地退化的机理分析与主导驱动因素识别,多学科多行业协同作业推进湿地多层次区划与管育为粤港澳大湾区湿地生态资源的保护与恢复提供保障,服务国家战略需求与区域经济社会发展,实现湾区数字化、智能化与生态化发展。

参考文献 (References):

- [1] 安娜,高乃云,刘长娥. 中国湿地的退化原因、评价及保护. 生态学杂志, 2008, 27(5): 821-828.
- [2] Cui L L, Li G S, Ouyang N L, Mu F Y, Yan F, Zhang Y T, Huang X Y. Analyzing coastal wetland degradation and its key restoration technologies in the coastal area of Jiangsu, China. *Wetlands*, 2018, 38(3): 525-537.
- [3] Xu J H, Zhao Y, Zhong K W, Zhang F F, Liu X L, Sun C G. Measuring spatio-temporal dynamics of impervious surface in Guangzhou, China, from 1988 to 2015, using time-series Landsat imagery. *Science of the Total Environment*, 2018, 627: 264-281.
- [4] 臧淑英,张策,张丽娟,张玉红. 遗传算法优化的支持向量机湿地遥感分类——以洪河国家级自然保护区为例. *地理科学*, 2012, 32(4): 434-441.
- [5] 牛振国,张海英,王显威,姚文博,周德民,赵魁义,赵惠,李娜娜,黄华兵,李丛丛,杨军,柳彩霞,刘爽,王琳,李展,杨镇钟,乔飞,郑姚闽,陈炎磊,盛永伟,高小红,朱卫红,王文卿,王红,翁永玲,庄大方,刘纪远,罗志才,程晓,郭子琪,宫鹏. 1978—2008年中国湿地类型变化. *科学通报*, 2012, 57(16): 1400-1411.
- [6] Phillips O L, Aragao L E O C, Lewis S L, Fisher J B, Lloyd J, López-González G, Malhi Y, Monteagudo A, Peacock J, Quesada C A, Van Der Heijden G, Almeida S, Amaral I, Arroyo L, Aymard G, Baker T R, Bánki O, Blanc L, Bonal D, Brando P, Chave J, De Oliveira Á C A, Cardozo N D, Czimczik C I, Feldpausch T R, Freitas M A, Gloor E, Higuchi N, Jiménez E, Lloyd G, Meir P, Mendoza C, Morel A, Neill D A, Nepstad D, Patiño S, Peñuela M C, Prieto A, Ramírez F, Schwarz M, Silva J, Silveira M, Thomas A S, ter Steege H, Stropp J, Vásquez R, Zelazowski P, Dávila E A, Andelman S, Andrade A, Chao K J, Erwin T, Di Fiore A, Honorio C E, Keeling H, Killeen T J, Laurance W F, Cruz A P, Pitman N C A, Vargas P N, Ramírez-Angulo H, Rudas A, Salamão R, Silva N, Terborgh J, Torres-Lezama A. Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science*, 2009, 323(5919): 1344-1347.
- [7] 陈仲新,张新时. 中国生态系统效益的价值. *科学通报*, 2000, 45(1): 17-22.
- [8] Barbier E B, Koch E W, Silliman B R, Hacker S D, Wolanski E, Primavera J, Granek E F, Polasky S, Aswani S, Cramer L A, Stoms D M, Kennedy C J, Bael D, Kappel C V, Perillo G M E, Reed D J. Coastal ecosystem-based management with nonlinear ecological functions and values. *Science*, 2008, 319(5861): 321-323.
- [9] Kirwan M L, Megonigal J P. Tidal wetland stability in the face of human impacts and sea-level rise. *Nature*, 2013, 504(7478): 53-60.
- [10] Pekel J F, Cottam A, Gorelick N, Belward A S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 2016, 540(7633): 418-422.
- [11] Smith L C, Sheng Y, MacDonald G M, Hinzman L D. Disappearing arctic lakes. *Science*, 2005, 308(5727): 1429-1429.
- [12] Adam E, Mutanga O, Rugege D. Multispectral and hyperspectral remote sensing for identification and mapping of wetland vegetation: a review. *Wetlands Ecology and Management*, 2010, 18(3): 281-296.
- [13] Frappart F, Calmant S, Cauhopé M, Seyler F, Cazenave A. Preliminary results of ENVISAT RA-2-derived water levels validation over the Amazon basin. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100(2): 252-264.
- [14] Mueller N, Lewis A, Roberts D, Ring S, Melrose R, Sixsmith J, Lymburner L, McIntyre A, Tan P, Curnow S, Ip A. Water observations from space: mapping surface water from 25 years of Landsat imagery across Australia. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 174: 341-352.
- [15] Rebelo L M, Finlayson C M, Nagabhatla N. Remote sensing and GIS for wetland inventory, mapping and change analysis. *Journal of Environmental*

- Management, 2009, 90(7): 2144-2153.
- [16] 刘志伟, 李胜男, 韦玮, 宋香静. 近三十年青藏高原湿地变化及其驱动力研究进展. 生态学杂志, 2019, 38(3): 856-862.
- [17] Huang C Q, Peng Y, Lang M G, Yeo I Y, McCarty G. Wetland inundation mapping and change monitoring using Landsat and airborne LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 141: 231-242.
- [18] Klemas V. Remote sensing of emergent and submerged wetlands: an overview. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(18): 6286-6320.
- [19] Lang M, McDonough O, McCarty G, Oesterling R, Wilen B. Enhanced detection of wetland-stream connectivity using LiDAR. *Wetlands*, 2012, 32(3): 461-473.
- [20] Luo S Z, Wang C, Pan F F, Xi X H, Li G C, Nie S, Xia S B. Estimation of wetland vegetation height and leaf area index using airborne laser scanning data. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 550-559.
- [21] Rosso P H, Ustin S L, Hastings A. Use of lidar to study changes associated with *Spartina* invasion in San Francisco bay marshes. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100(3): 295-306.
- [22] 张立福, 彭明媛, 孙雪剑, 岑奕, 童庆禧. 遥感数据融合研究进展与文献定量分析(1992-2018). 遥感学报, 2019, 23(4): 603-619.
- [23] 张树文, 颜凤芹, 于灵雪, 卜坤, 杨久春, 常丽萍. 湿地遥感研究进展. 地理科学, 2013, 33(11): 1406-1412.
- [24] Xu P P, Niu Z G, Tang P. Comparison and assessment of NDVI time series for seasonal wetland classification. *International Journal of Digital Earth*, 2018, 11(11): 1103-1131.
- [25] Dong Z Y, Wang Z M, Liu D W, Song K S, Li L, Jia M M, Ding Z. Mapping wetland areas using landsat-derived NDVI and LSWI: a case study of West Songnen Plain, northeast China. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2014, 42(3): 569-576.
- [26] Behera M D, Chitale V S, Shaw A, Roy P S, Murthy M S R. Wetland monitoring, serving as an index of land use change—a study in samaspur wetlands, uttar pradesh, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2012, 40(2): 287-297.
- [27] Deng Y, Jiang W G, Tang Z H, Li J H, Lv J X, Chen Z, Jia K. Spatio-temporal change of lake water extent in wuhan urban agglomeration based on landsat images from 1987 to 2015. *Remote Sensing*, 2017, 9(3): 270.
- [28] Gabrielsen C G, Murphy M A, Evans J S. Using a multiscale, probabilistic approach to identify spatial-temporal wetland gradients. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 184: 522-538.
- [29] 于泉洲, 张祖陆, 吕建树, 孙京姐. 1987—2008年南四湖湿地植被碳储量时空变化特征. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1527-1532.
- [30] 谭清梅, 刘红玉, 张华兵, 王聪, 侯明行. 盐城海滨湿地植被地上生物量遥感估算研究. 自然资源学报, 2013, 28(12): 2044-2055.
- [31] Kovacs E, Roelfsema C, Lyons M, Zhao S H, Phinn S. Seagrass habitat mapping: how do Landsat 8 OLI, Sentinel-2, ZY-3A, and Worldview-3 perform? *Remote Sensing Letters*, 2018, 9(7): 686-695.
- [32] Renga A, Rufino G, D'Errico M, Moccia A, Boccia V, Graziano M D, Aragno C Zoffoli S. SAR bathymetry in the tyrrhenian sea by COSMO-SkyMed data: a novel approach. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(7): 2834-2847.
- [33] Mishra M K, Ganguly D, Chauhan P, Ajai. Estimation of coastal bathymetry using RISAT-1 C-band microwave SAR data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(3): 671-675.
- [34] El-Askary H, Abd El-Mawla S H, Li J, El-Hattab M M, El-Raey M. Change detection of coral reef habitat using Landsat-5 TM, Landsat 7 ETM+ and Landsat 8 OLI data in the Red Sea (Hurghada, Egypt). *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(6): 2327-2346.
- [35] Phinn S, Roelfsema C, Dekker A, Brando V, Anstee J. Mapping seagrass species, cover and biomass in shallow waters: an assessment of satellite multi-spectral and airborne hyper-spectral imaging systems in Moreton Bay (Australia). *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(8): 3413-3425.
- [36] 李凤秀. 小叶章生理参数高光谱反演模型研究[D]. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2008.
- [37] 章文龙, 曾从盛, 高灯州, 胡伟芳, 陈晓艳, 林伟. 闽江河口湿地秋茄叶绿素含量高光谱遥感估算. 生态学报, 2014, 34(12): 6190-6197.
- [38] Hird J N, DeLancey E R, McDermid G J, Kariyeva J. Google earth engine, open-access satellite data, and machine learning in support of large-area probabilistic wetland mapping. *Remote Sensing*, 2017, 9(12): 1315.
- [39] Tang Z Z, Li Y, Gu Y, Jiang W G, Xue Y, Hu Q, LaGrange T, Bishop A, Drahota J, Li R P. Assessing nebraska playa wetland inundation status during 1985-2015 using landsat data and google earth engine. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188(12): 654.
- [40] 郑姚闽, 牛振国, 官鹏, 王杰. 全球湿地验证样本库的研究和建立(英文). *Science Bulletin*, 2015, 60(4): 428-434.
- [41] Chuah C J, Tan E K H, Sermswan R W, Ziegler A D. Hydrological connectivity and *Burkholderia pseudomallei* prevalence in wetland environments: investigating rice-farming community's risk of exposure to melioidosis in North-East Thailand. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(6): 287.
- [42] 王玉, 高光彩, 付必谦, 吴专. 北京野鸭湖湿地地表甲虫群落组成与空间分布格局. 生物多样性, 2009, 17(1): 30-42.
- [43] 包玉斌, 刘康, 李婷, 胡胜. 基于 INVEST 模型的土地利用变化对生境的影响——以陕西省黄河湿地自然保护区为例. 干旱区研究, 2015, 32(3): 622-629.
- [44] 徐丹丹, 侯光雷, 董凯凯, 何洪林, 刘兆礼. 基于参照基准的湿地生物多样性保护成效区域对比评估. 湿地科学, 2018, 16(2): 120-129.
- [45] 李仁东, 刘纪远. 应用 LandsatETM 数据估算鄱阳湖湿生植被生物量. 地理学报, 2001, 68(5): 532-540.
- [46] Li Y Z, Gong X Q, Guo Z, Xu K P, Hu D, Zhou H X. An index and approach for water extraction using Landsat - OLI data. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(16): 3611-3635.

- [47] 吴际通, 谭伟, 喻理飞. 基于 TM/ETM+影像的不同水体指数对比研究. *测绘科学*, 2013, 38(4): 193-195.
- [48] Fan D K, Li M, He S S. Comparison and research on different indices for water extraction based on CCD images from HJ satellite. *Geography and Geo-Information Science*, 2012, 28(2): 14-19.
- [49] Liu S T, Wang M X, Yang S W, Yang M Z, Yang L H. Extraction accuracy and stability analysis of different water body index models in GF-2 images. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019, (8): 135-139.
- [50] Yang H, Du Q, Chen G S. Particle swarm optimization-based hyperspectral dimensionality reduction for urban land cover classification. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2012, 5(2): 544-554.
- [51] Wu W T, Zhou Y X, Tian B. Coastal wetlands facing climate change and anthropogenic activities; a remote sensing analysis and modelling application. *Ocean & Coastal Management*, 2017, 138: 1-10.
- [52] Heumann B W. An object-based classification of mangroves using a hybrid decision tree—support vector machine approach. *Remote Sensing*, 2011, 3(11): 2440-2460.
- [53] Bao Y H, Ren J B. Wetland landscape classification based on the BP neural network in DaLinor Lake Area. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10: 2360-2366.
- [54] 邓劲松, 王珂, 李君, 董云奇. 决策树方法从 SPOT-5 卫星影像中自动提取水体信息研究. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2005, 31(2): 171-174.
- [55] Xu X F, Ji W. Knowledge-based algorithm for satellite image classification of urban wetlands. *AIP Conference Proceedings*, 2014, 1618(1): 285-288.
- [56] Skurikhin A N, Wilson C J, Liljedahl A, Rowland J C. Recursive active contours for hierarchical segmentation of wetlands in high-resolution satellite imagery of Arctic landscapes//*Proceedings of 2014 Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation*. San Diego, CA, USA: IEEE, 2014: 137-140.
- [57] Huang X, Xie C, Fang X, Zhang L P. Combining pixel- and object-based machine learning for identification of water-body types from urban high-resolution remote-sensing imagery. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(5): 2097-2110.
- [58] Samardžić-Petrović M, Kovačević M, Bajat B, Dragičević S. Machine learning techniques for modelling short term land-use change. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2017, 6(12): 387.
- [59] Choung Y J, Jo M H. Comparison between a machine-learning-based method and a water-index-based method for shoreline mapping using a high-resolution satellite image acquired in Hwado Island, South Korea. *Journal of Sensors*, 2017, 2017: 8245204.
- [60] Masoumi Z, Maleki J, Mesgari M S, Mansourian A. Using an evolutionary algorithm in multiobjective geographic analysis for land use allocation and decision supporting. *Geographical Analysis*, 2017, 49(1): 58-83.
- [61] Rezaee M, Mahdianpari M, Zhang Y, Salehi B. Deep convolutional neural network for complex wetland classification using optical remote sensing imagery. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(9): 3030-3039.
- [62] 陆军辉, 梅志雄, 赵书芳, 肖艳云. 土地利用配置的混沌蚁群优化算法研究. *地球信息科学学报*, 2017, 19(8): 1026-1035.
- [63] Bhatt J S, Joshi M V, Raval M S. A data-driven stochastic approach for unmixing hyperspectral imagery. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(6): 1936-1946.
- [64] Jia K, Jiang W G, Li J, Tang Z H. Spectral matching based on discrete particle swarm optimization: a new method for terrestrial water body extraction using multi-temporal Landsat 8 images. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 209: 1-18.
- [65] Rokitnicki-Wojcik D, Wei A H, Chow-Fraser P. Transferability of object-based rule sets for mapping coastal high marsh habitat among different regions in Georgian Bay, Canada. *Wetlands Ecology and Management*, 2011, 19(3): 223-236.
- [66] Deka J, Tripathi O P, Khan M L. A multi-temporal remote sensing approach for monitoring changes in spatial extent of freshwater lake of Deepor Beel Ramsar Site, a major wetland of Assam. *Journal of Wetlands Ecology*, 2011, 5: 40-47.
- [67] Allen T R, Wang Y, Gore B. Coastal wetland mapping combining multi-date SAR and LiDAR. *Geocarto International*, 2013, 28(7): 616-631.
- [68] Hong S H, Kim H O, Wdowinski S, Feliciano E. Evaluation of polarimetric SAR decomposition for classifying wetland vegetation types. *Remote Sensing*, 2015, 7(7): 8563-8585.
- [69] Li X, Jiang W G, Sheng S, Chen Q. Research on wetland classification approaches based on Hyperion hyperspectral image//*Proceedings of Remote Sensing and GIS Data Processing and Other Applications*. Yichang: SPIE, 2009: 749810.
- [70] Han X S, Pan J Y, Devlin A T. Remote sensing study of wetlands in the Pearl River Delta during 1995-2015 with the support vector machine method. *Frontiers of Earth Science*, 2018, 12(3): 521-531.
- [71] 黎夏, 刘凯, 王树功. 珠江口红树林湿地演变的遥感分析. *地理学报*, 2006, 61(1): 26-34.
- [72] Zuo P, Li Y, Liu C A, Zhao S H, Guan D M. Coastal wetlands of China: changes from the 1970s to 2007 based on a new wetland classification system. *Estuaries and Coasts*, 2013, 36(2): 390-400.
- [73] 黄桂林, 张建军, 李玉祥. 辽河三角洲湿地分类及现状分析——辽河三角洲湿地资源及其生物多样性的遥感监测系列论文之一. *林业资源管理*, 2000, (4): 51-56.
- [74] Ai J Q, Gao W, Gao Z Q, Shi R H, Zhang C, Liu C S. Errata: integrating pan-sharpening and classifier ensemble techniques to map an invasive plant (*Spartina alterniflora*) in an estuarine wetland using Landsat 8 imagery. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2016, 10(2): 029901.
- [75] Zhang Y, Wang Y Y, Su S L, Li C S. Quantifying methane emissions from rice paddies in Northeast China by integrating remote sensing mapping

- with a biogeochemical model. *Biogeosciences*, 2011, 8(5): 1225-1235.
- [76] Jørgensen C J, Johansen K M L, Westergaard-Nielsen A, Elberling B. Net regional methane sink in High Arctic soils of northeast Greenland. *Nature Geoscience*, 2015, 8(1): 20-23.
- [77] Peng K F, Jiang W G, Deng Y, Liu Y H, Wu Z F, Chen Z. Simulation wetland changes under different scenarios based on intergrating the random forest and CLUE-S models: a case study of Wuhan urban agglomeration. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106671-106683.
- [78] Jiang W G, Wang W J, Chen Y H, Liu J, Tang H, Hou P, Yang Y P. Quantifying driving forces of urban wetlands change in Beijing City. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(2): 301-314.
- [79] Costanza R. Social goals and the valuation of ecosystem services. *Ecosystems*, 2000, 3(1): 4-10.
- [80] 苗李莉, 蒋卫国, 王世东, 朱琳. 基于遥感和 GIS 的北京湿地生态服务功能评价与分区. *国土资源遥感*, 2013, 25(3): 102-108.
- [81] Zhao H, Cui B S, Zhang H G, Fan X Y, Zhang Z M, Lei X X. A landscape approach for wetland change detection (1979-2009) in the Pearl River Estuary. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 1265-1278.
- [82] 黄慧萍. 遥感技术在广东省湿地类型调查中的应用. *国土资源遥感*, 1996, 8(9): 9-15.
- [83] 梁建平, 马大喜, 毛德华, 王宗明. 双台河口国际重要湿地芦苇地上生物量遥感估算. *国土资源遥感*, 2016, 28(3): 60-66.
- [84] 王鹏, 万荣荣, 杨桂山. 基于多源遥感数据的湿地植物分类和生物量反演研究进展. *湿地科学*, 2017, 15(1): 114-124.
- [85] 赵天舸, 于瑞宏, 张志磊, 白雪松, 曾庆奥. 湿地植被地上生物量遥感估算方法研究进展. *生态学杂志*, 2016, 35(7): 1936-1946.
- [86] Baker C, Lawrence R L, Montagne C, Patten D. Change detection of wetland ecosystems using Landsat imagery and change vector analysis. *Wetlands*, 2007, 27(3): 610-619.
- [87] Beeri O, Phillips R L. Tracking palustrine water seasonal and annual variability in agricultural wetland landscapes using Landsat from 1997 to 2005. *Global Change Biology*, 2007, 13(4): 897-912.
- [88] Michishita R, Gong P, Xu B. Spectral mixture analysis for bi-sensor wetland mapping using Landsat TM and Terra MODIS data. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(11): 3373-3401.
- [89] Jiang W G, Lv J X, Wang C C, Chen Z, Liu Y H. Marsh wetland degradation risk assessment and change analysis: a case study in the Zoige Plateau, China. *Ecological Indicators*, 2017, 82: 316-326.
- [90] Yan Y E, Ouyang Z T, Guo H Q, Jin S S, Zhao B. Detecting the spatiotemporal changes of tidal flood in the estuarine wetland by using MODIS time series data. *Journal of Hydrology*, 2010, 384(1/2): 156-163.
- [91] 李新, 马明国, 王建, 刘强, 车涛, 胡泽勇, 肖青, 柳钦火, 苏培玺, 楚荣忠, 晋锐, 王维真, 冉有华. 黑河流域遥感—地面观测同步试验: 科学目标与试验方案. *地球科学进展*, 2008, 23(9): 897-914.
- [92] 马明国, 刘强, 阎广建, 陈尔学, 肖青, 苏培玺, 胡泽勇, 李新, 牛铮, 王维真, 钱金波, 宋怡, 丁松爽, 辛晓洲, 任华忠, 黄春林, 晋锐, 车涛, 楚荣忠. 黑河流域遥感-地面观测同步试验: 森林水文和中游干旱区水文试验. *地球科学进展*, 2009, 24(7): 681-695.
- [93] 牟晓杰, 刘兴土, 阎百兴, 崔保山. 中国滨海湿地分类系统. *湿地科学*, 2015, 13(1): 19-26.
- [94] 唐小平, 黄桂林. 中国湿地分类系统的研究. *林业科学研究*, 2003, 16(5): 531-539.
- [95] 李玉凤, 刘红玉. 湿地分类和湿地景观分类研究进展. *湿地科学*, 2014, 12(1): 102-108.
- [96] 王永丽, 于君宝, 董洪芳, 栗云召, 周迪, 付玉芹, 韩广轩, 毛培利. 黄河三角洲滨海湿地的景观格局空间演变分析. *地理科学*, 2012, 32(6): 717-724.
- [97] 徐力刚, 赖锡军, 万荣荣, 王晓龙, 李相虎. 湿地水文过程与植被响应研究进展与案例分析. *地理科学进展*, 2019, 38(8): 1171-1181.
- [98] 闫晓露, 钟敬秋, 韩增林, 孙才志, 刘森. 近 40 年辽东湾北部围垦区内外滨海湿地景观演替特征及驱动力分析. *地理科学*, 2019, 39(7): 1155-1165.
- [99] Davidson N C, Finlayson C M. Extent, regional distribution and changes in area of different classes of wetland. *marine and freshwater research*, 2018, 69(10): 1525-1533.
- [100] Song S, Wu Z F, Wang Y F, Cao Z, He Z Y, Su Y S. Mapping the rapid decline of the intertidal wetlands of china over the past half century based on remote sensing. *Frontiers in Earth Science*, 2020, 8: 16.
- [101] 范伟, 章光新, 李然然. 湿地地表水—地下水交互作用的研究综述. *地球科学进展*, 2012, 27(4): 413-423.
- [102] 李新鸽, 韩广轩, 朱连奇, 孙宝玉, 姜铭, 宋维民, 路峰. 降雨量改变对黄河三角洲滨海湿地土壤呼吸的影响. *生态学报*, 2018, 39(13): 4806-4820.