

# 河流水情要素遥感研究进展

史卓琳, 黄 昌\*

(西北大学, 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127)

**摘要:**河流是促进地貌形成和演化的重要因素,也是地球上最重要的淡水资源之一。河流的水体范围、水位/水深、流量、水质和冰情等水情要素在水资源动态监测和水文生态环境保护等研究中具有至关重要的作用。通过水文站观测河流可获得站点上的水情信息,但该方法在财力、物力方面均耗费巨大。同时,对于日益增长的河流水情信息需求,迫切需要一种能够快速、准确补充河流实测数据的方法。遥感凭借全方位、多时相的对地观测能力极大地提升了河流水情信息获取的效率,已广泛应用于多尺度水情监测、无资料流域水文模拟等多个方面,取得了丰硕的研究成果。因此,有必要对近年来遥感应用于河流水情要素反演所取得的进展进行归纳、总结和展望,以期进一步促进遥感数据和方法在该领域的应用。论文以“河流水情要素遥感”为主题,系统归纳了河流水体遥感提取的常用传感器及方法、水位/水深遥感反演方法、河道流量遥感估算、河流水质及河冰遥感监测的研究进展,详细归纳了利用光学/微波遥感等不同类型的遥感手段获取河流水体范围、水位、水深的优势与不足,总结得出了河流水情要素遥感研究的数据、方法及应用方面的主要结论:① 新型遥感数据在河流水情要素监测中的应用愈加广泛,在空间分辨率、时间分辨率或光谱分辨率等方面不断突破,进一步丰富了河流水情要素研究的数据来源;② 多数中低空间分辨率光学影像依旧面临混合像元影响水体提取精度的问题,合成孔径雷达影像也存在数据处理算法开发难度大的问题,细小河流及非开阔水体的提取方法仍需探索;③ 大数据和云计算技术的发展为实现大尺度、长时序的河流水情要素高时空分辨率遥感监测提供了高效手段。

**关键词:** 水体;水位/水深;河道流量;水质;河冰;光学/微波遥感

河流的水体范围、水位/水深、流量、水质和冰情等水情要素与生物多样性、生态保护和修复密不可分,更与人类社会经济发展所面临的粮食危机、能源风险、水安全等现存或潜在问题息息相关<sup>[1]</sup>。获取河流水情要素的传统方式是设立水文监测站点进行观测,但这种方式获得的只是点位信息,而且,很多地区由于位置偏远、气候恶劣等原因,站点稀疏甚至缺失,所能获得的水情要素方面的信息极其有限。相比于传统的观测方法,遥感技术可以及时、稳定地获得全方位、多时相、大区域的河流水情信息。

早在20世纪80年代,研究者就探索将遥感技术应用于水文水资源管理中<sup>[2]</sup>,随着遥感技术的发

展,越来越多的研究者使用遥感手段监测和分析河流等地表水体<sup>[3]</sup>。近年来,部分国内外学者先后从不同的角度对相关研究领域进行了综述,如基于光学和微波遥感的地表水探测及提取<sup>[4-5]</sup>。此外,还有部分学者归纳了针对各种不同河流水情要素的遥感研究进展,如复杂水体范围提取<sup>[6]</sup>,河流水位、水深、流量遥感估算<sup>[7-11]</sup>,河流水质、冰情遥感反演<sup>[12-13]</sup>等。2003年,国际水文科学协会(International Association of Hydrological Sciences, IAHS)提出无资料流域预测(Prediction in Ungauged Basins, PUB)水文计划后<sup>[14]</sup>,遥感数据在较大尺度地区、欠发达地区补充实测水情要素数据的研究正受到越来越多的

收稿日期:2019-03-18;修订日期:2019-09-23。

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC1502501, 2017YFC0404302);国家自然科学基金项目(41501460)。[Foundation: National Key Research and Development Program of China, No. 2017YFC1502501 and 2017YFC0404302; National Natural Science Foundation of China, No. 41501460.]

第一作者简介:史卓琳(1996—),女,陕西铜川人,硕士生,主要从事水文遥感研究。E-mail: shizl@stumail.nwu.edu.cn

\*通信作者简介:黄昌(1986—),男,江西丰城人,副教授,主要从事水文遥感研究。E-mail: changh@nwu.edu.cn

引用格式:史卓琳,黄昌. 河流水情要素遥感研究进展 [J]. 地理科学进展, 2020, 39(4): 670-684. [Shi Zhuolin, Huang Chang. Recent advances in remote sensing of river characteristics. Progress in Geography, 2020, 39(4): 670-684.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.04.014

重视<sup>[15]</sup>。但是,以上综述或关注河流水位、河道流量问题,或关注一般性的地表水探测问题,缺少专门基于遥感进行河流水情要素提取的全面、细致的综述研究。作为地表水的一种,河流水体的遥感监测可沿用地表水遥感的相关方法,同时,由于河流存在流动、侵蚀和变化的特性,利用遥感研究河流水情要素也有其独特之处,有必要对此作系统归纳和总结,为相关研究提供参考和支持。

本文通过调研国内外遥感在河流水情要素监测中的相关应用研究,分别从河流水体遥感提取、河流水位/水深遥感、河道流量遥感估算、河流水质及河冰遥感监测等方面进行梳理,对光学和微波这2种不同类型的遥感传感器在河流水情监测中的特点及应用方法进行对比和分析,归纳已有研究在各水情要素监测中所取得的进展和面临的挑战,以期进一步促进遥感技术在该领域中的应用。

## 1 河流水体遥感提取

### 1.1 光学传感器及提取方法

#### 1.1.1 光学传感器类型

早在20世纪80年代,便有学者使用千米级空间分辨率的NOAA/AVHRR监测大型河流的洪水<sup>[16]</sup>,

此后,应用类似的低分辨率光学传感器(如MODIS、NPP-VIIRS)进行河流提取和湿地水体变化的研究不断涌现<sup>[17-19]</sup>。Landsat卫星系列和Sentinel-2卫星上搭载的传感器可以获得10~30 m中等空间分辨率的遥感影像,适合于大部分河流水体的提取<sup>[20-22]</sup>。然而,多数光学影像存在时空分辨率相互制约的矛盾:高空间分辨率的影像,其时间分辨率较低;而高时间分辨率的影像,其空间分辨率较低。表1列出了部分常用光学传感器及其核心参数。

近年来,一些空间分辨率极高的传感器(如ZY-3、IKONOS、Rapid-Eye、Worldview等)也开始用于河流水体提取。中国首颗自主民用高分辨率立体测绘卫星ZY-3上搭载的多光谱相机,已应用于一些城市水体提取并达到了较高精度<sup>[23]</sup>。此外,随着近期CubeSat等高时空分辨率商业小卫星群的发射,一般光学影像时空分辨率相互制约的矛盾得到了有效解决<sup>[24]</sup>。

#### 1.1.2 光学影像河流水体提取方法

基于水体的光谱反射特性,先后发展了一系列如监督分类和非监督分类<sup>[25-26]</sup>、决策树分类<sup>[21]</sup>、面向对象分类<sup>[27-28]</sup>、水体指数<sup>[29-31]</sup>等提取方法。其中,水体指数法应用甚广,但其提取精度与研究区的地物组成关系密切<sup>[32]</sup>。表2列出了部分常用水体指数及

表1 部分常用光学传感器及其核心参数

Tab.1 Parameters and characteristics of some popular optical sensors

卫星/传感器名称	数据起始年份	空间分辨率/m	时间分辨率/d
NOAA/AVHRR	1979	1100	0.5
Terra/Aqua MODIS	1999	250~1000	0.5
Suomi NPP-VIIRS	2012	375~750	0.5
Landsat MSS/TM/ETM+/OLI	1972	15~80	16
Sentinel-2 MSI	2015	10~60	5
ZY-3	2012	2.1~5.8	5
Planet CubeSat	2013	3	<1

表2 部分常用水体指数及其特点

Tab.2 Some popular water indices and their characteristics

水体指数	计算公式	局限性
TCW <sup>[35]</sup>	$TCW=0.0315 \times BLUE+0.2021 \times GREEN+0.3102 \times RED+0.1594 \times NIR-0.6806 \times SWIR1-0.6109 \times SWIR2$	易受建筑及其阴影影响
NDWI <sup>[36]</sup>	$NDWI=(GREEN-NIR)/(GREEN+NIR)$	受建筑和山体阴影影响
MNDWI <sup>[37]</sup>	$MNDWI=(GREEN-SWIR1)/(GREEN+SWIR1)$	建筑物、雪有时被错提为水体
AWEI <sup>[38]</sup>	$AWEI_{sh}=4 \times (GREEN-SWIR1)-(0.25 \times NIR+2.75 \times SWIR2)$ $AWEI_{nsh}=BLUE+2.5 \times GREEN-1.5 \times (NIR+SWIR1)-0.25 \times SWIR2$	高反射率地表可能被错提为水体,易受建筑噪声影响
WI <sub>2015</sub> <sup>[32]</sup>	$WI_{2015}=1.7204+171 \times GREEN+3 \times RED-70 \times NIR-45 \times SWIR1-71 \times SWIR2$	有时不能有效增强水体信息

注:BLUE、GREEN、RED、NIR、SWIR1、SWIR2分别对应蓝、绿、红、近红外、短波红外1、短波红外2波段的反射率;AWEI<sub>sh</sub>、AWEI<sub>nsh</sub>分别表示适合有阴影和无阴影场景下的水体提取。

其特点,关于不同水体指数在复杂河流、湖泊环境下的适用性研究,具体可参考文献[33-34]。

与湖泊等其他水体不同,河流一般呈细长、弯曲的形态,其宽度一般在数米至数十米之间(少数超大型河流宽度可达数百米)。因此,对大部分光学影像而言,河流边界的混合像元问题会显著降低河流水体的提取精度,常通过混合像元分解和重构方法来解决。对于混合像元的分解,线性光谱混合模型<sup>[39]</sup>由于物理基础明确、计算简单而应用广泛<sup>[40]</sup>。刘晨洲等<sup>[41]</sup>基于MODIS研究了一种改进的线性混合像元分解算法,结合MODIS温度产品和地形数据校正阴影对水体提取结果的影响,成功地突出了河流和湖泊的细节。混合像元分解之后,亚像元制图是常用的重构方法,通过不同的定位优化算法在地物相近相似的基本原理下实现不同类别亚像元在空间上的合理、重新配置。此外,水体与地形具有密切关系,亚像元级别的DEM数据常常可以辅助进行河流水体亚像元的制图,并取得更好的效果<sup>[42]</sup>。

虽然混合像元分解和重构能在一定程度上缓解河流边界混合像元的问题,但其在分解和重构中都会引入不确定性<sup>[43]</sup>,导致河流水体亚像元提取结果的可靠性难以得到保证。因此,河流水体的精确提取仍需依赖遥感影像空间分辨率的提高以及面向河流特征提取的算法创新。何智勇等<sup>[44]</sup>提出了多窗口线性保持技术,使用联合特征去噪,基于高分辨率影像获得细小河流水体信息。杨树文等<sup>[45]</sup>基于中分辨率TM影像建立了多波段谱间关系法自动提取水体,有效地去除了山区阴影对山间细小河流提取的干扰。Yang等<sup>[46]</sup>提出了一种新的自动化多尺度河流水体识别程序,并可生成河流网络。李艳华等<sup>[47]</sup>使用高分一号卫星影像,基于面向对象思想提取细小水体,可以适应多尺度的河流水体监测。未来,细小河流水体遥感提取研究在数据和方法上的发展和创新仍将继续。

## 1.2 微波传感器及提取方法

### 1.2.1 微波传感器类型

应用于河流水体提取的微波传感器大多为主动微波传感器,以合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)为典型代表。目前,ERS-1、ERS-2<sup>[48]</sup>、RadarSat-1和RadarSat-2<sup>[49]</sup>等卫星获取的SAR数据已广泛应用于水体提取。改进的RadarSat-2/ASAR增强了立体成像能力,具有多成像模式、多极化方式的特点,在空间分辨率、空间动态信息获取能力上均有进一步提升。近期,Sentinel-1卫星搭载的SAR可获得空间分辨率高达5 m×20 m的影像,支持双极化模式,其双星系统可实现近6d的重访周期,对河流水体提取研究具有较高的应用价值<sup>[50]</sup>。表3列出了部分常用的星载SAR传感器及其关键参数。

### 1.2.2 SAR影像河流水体提取方法

基于河流水体在SAR影像上的特征进行人工识别,简单目视解译法<sup>[51]</sup>可得到比较精确的结果,但往往耗时耗力。基于数学、图像学、计算机模式识别,自动分类法<sup>[52]</sup>、自动逻辑回归法、图像纹理算法、多时相变化检测、阈值法等显著提升了SAR影像提取河流水体范围的效率<sup>[4]</sup>。其中,阈值法能够迅速提取河流水体边界,适用于时效性要求高的提取研究,因而应用最为广泛。李晟铭等<sup>[53]</sup>使用李景刚等<sup>[54]</sup>提出的改进最大类间方差阈值法从Sentinel-1的SAR影像提取了长江中下游河流洪水淹没的范围,实现了快速灾情评估。

### 1.3 光学/微波传感器提取河流水体的对比

多数光学和微波传感器均可在大中型河流提取时实现较好的提取效果,而对于形状蜿蜒复杂的细小河流,需要遥感数据本身的空间分辨率和河流提取算法两方面的努力。目前,大部分可免费公开获取的遥感数据均存在时空分辨率相互制约的矛盾,难以满足高频率、高精度的河流水体动态监测

表3 部分常用SAR传感器及其关键参数

Tab.3 Key parameters of some popular SAR sensors

卫星/传感器	数据起(止)年份	极化方式	空间分辨率/m	卫星重访周期/d
ERS-1/SAR	1991—2000	VV	30	35
ERS-2/SAR	1995—2010	VV	30	35
RadarSat-1/SAR	1995—2013	HH	8~100	1~3
RadarSat-2/ASAR	2007—	HH、VV、HV、VH	1~100	1~3
Sentinel-1/SAR	2014—	HH、VV、HH-HV、VH-VV	5×20	6

需求。为解决这一问题,一方面可借助混合像元分解与重构、影像时空融合<sup>[55]</sup>等技术手段,另一方面可使用CubeSat等商业小卫星提供的高时空分辨率数据。微波传感器一定程度上可以克服光学传感器易受光线、天气条件影响的不足,但对于受植被、城市高楼或高山遮挡的非开阔河流水体,无论是光学还是微波遥感都受到较大限制。面对这类问题,一方面可以结合一些辅助数据,比如地形数据等帮助提高河流水体提取的准确性<sup>[56]</sup>;另一方面,还可以融合多源遥感数据,发挥其各自的优势,从而改善河流水体提取的效果<sup>[57-58]</sup>。此外,由于河流具有一定的长度,其所处的地理环境复杂多变,到目前为止,尚未有一种可以自动、准确地从光学或微波影像提取水体的普适性方法。

## 2 河流水位/水深遥感

河流水位是水域表面高程值,水深指从水域表面到水底的深度值。因此,当河底地形确定时,河流的水深与水位是直接对应的关系。同样,河流的水位/水深也可通过光学遥感和微波遥感2种不同的手段获得。

### 2.1 水位/水深光学遥感

激光具有亮度高、单色性好、射束狭窄、分辨力和抗干扰能力强的特点,已广泛应用于距离测量<sup>[59]</sup>,也可用于水位测量,表4为2种常用星载激光高度计及其参数。过去几年,ICESat/GLAS已广泛用于河流水位测高<sup>[60-61]</sup>,但由于工作寿命、重访周期和时间跨度等限制,ICESat/GLAS目前已难以适应河流水位监测的新形势。2018年9月发射的ICESat-2<sup>[62]</sup>搭载了高级地形激光测高仪ATLAS,每秒发射的脉冲次数显著增加,地面采样间隔显著减小。此外,中国于2019年发射的光学立体测绘卫星高分七号也将带来更先进的激光测高数据<sup>[63]</sup>。这些新兴的卫星计划都将为河流水位监测提供更加优质的数据源。

一般情况下,机载激光雷达LiDAR可测量水

深<sup>[64]</sup>,但水面风浪、由水体浑浊度引起的波束能量衰减及水底反射率变化等均会影响其测量精度<sup>[65]</sup>。基于光线对水体的透射原理,可见光蓝绿波段之间对水体的穿透性最好<sup>[66]</sup>。因此,多光谱遥感也可用于反演水深。相关方法包括理论解析模型、半理论半经验模型、统计模型等<sup>[64]</sup>。其中,理论解析模型<sup>[67]</sup>基于水光场传输方程,物理基础较强,但计算难度较大。半理论半经验模型主要包括对数线性模型、对数转换比值模型及改进的对数转换比值模型,需要结合部分实测水深数据进行建模,是目前最常用的一类方法<sup>[68]</sup>。统计模型则通过建立辐射亮度与实测水深之间的统计关系反演水深,其方法简单易行,但需大量实测水深数据,且模型在不同水体间无法直接移植使用。相关研究表明,反演模型、反演波段、水深范围、水深实测点数量、光线穿透水体的能力、水质、光学影像空间分辨率等因素均会影响水深反演的精度<sup>[69-71]</sup>。此外,对于有涨潮落潮等自然状况复杂河段的水深观测,观测时段的选择也至关重要<sup>[72]</sup>。

### 2.2 水位/水深微波遥感

微波传感器水位测高原理如图1,水面高程(水位) $h$ 应为卫星高度计到参考椭球面的高程 $H$ 与卫星高度计到水面的高程 $R$ 之差,水深主要结合水位微波测量结果与水底地形计算。目前,已有很多研究应用微波传感器进行水位测量,如Geosat<sup>[73]</sup>、TOPEX/Posiden<sup>[74]</sup>、ENVISAT<sup>[75]</sup>、Jason、CryoSat<sup>[76]</sup>等。此外,于2010年发射的CryoSat-2,搭载了合成孔径干涉雷达高度计、多普勒定位及无线电定位系统等,有效提升了河流水位测高精度<sup>[77]</sup>。

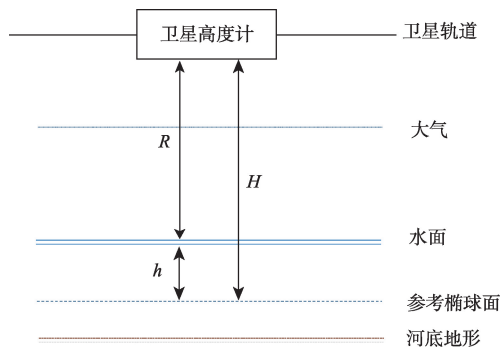
水位测量中,受传感器发射的波束宽度限制,星载雷达水位监测一般只能应用在大型河流<sup>[78]</sup>。很多时候,往往将雷达水位与其他水位观测数据相结合以获得更好的水位观测效果。例如,Koblinksky等<sup>[79]</sup>结合雷达监测与实测数据对亚马逊流域水位进行研究。Villadsen等<sup>[77]</sup>通过对比CryoSat-2和ENVISAT在Ganges-Brahmaputra流域的水位监测效果,发现二者具有较好的一致性(图2),结合两种

表4 两种常用星载激光高度计及其参数

Tab.4 Parameters of two popular laser altimeter

卫星/激光雷达	数据起(止)年份	脉冲次数/s	地面采样间隔/m	测量特点
ICESat/GLAS	2003—2009	40	约170	分周期工作,采集秋季、冬季、春季水位数据
ICESat-2	2018—	10000	约0.7	数据量显著增大,精度更高,更适用于近期内陆河流水位数据的获取

数据实现了对该流域更加密集、更加优化的水位监测。近期, Ekeu-wei 等<sup>[15]</sup>利用星载雷达高度计对尼日利亚尼日尔河的水位进行监测, 通过与地面实测水位进行对比发现, 高水位时期, 雷达测量水位的精度相对更高。同时, 为了进一步提高河流水位测量的精度, 水位反演方法的研究也是该领域的重要内容, 如赵云等<sup>[80]</sup>提出了基于星载雷达高度计波形数据重构的算法反演精确河流水位信息。



注: 据文献[78]修改。

图1 卫星测高原理解

Fig.1 Graphic illustration of satellite altimetry height measurement principle

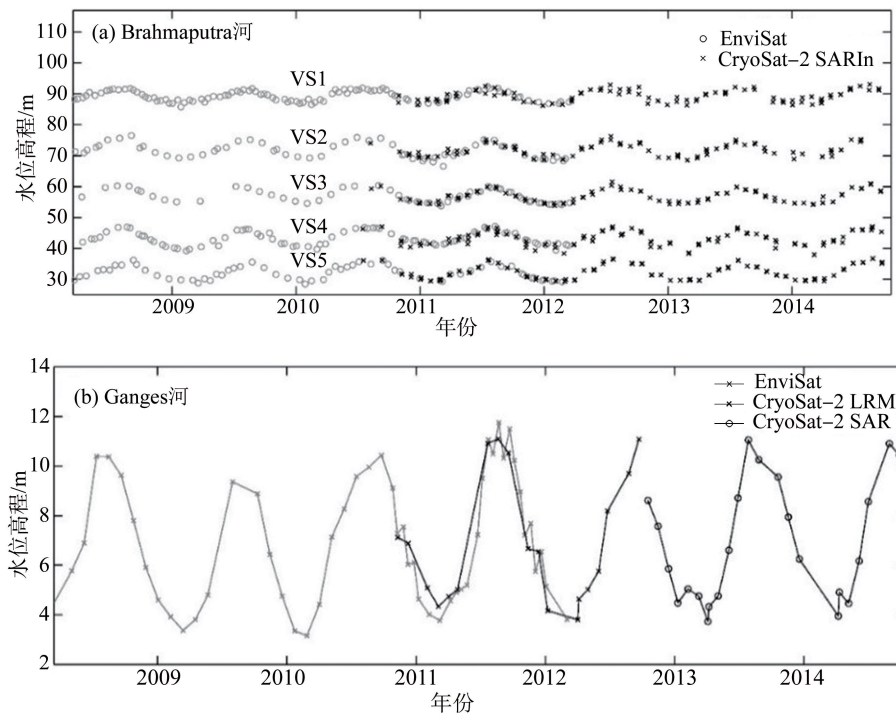
### 3 河道流量遥感估算

#### 3.1 流量遥感估算的传统方法

传统的流量遥感估算大致可归纳为3种方式: 一是通过遥感获得不同时期河流的水域面积或水位, 然后建立水域面积或水位与实测流量之间的统计关系模型<sup>[81]</sup>; 二是结合遥感影像与地形数据进行水文水力模拟<sup>[82]</sup>; 三是基于遥感获得与流量直接相关的水位、河宽, 再结合水力几何形态进行流量估算<sup>[83]</sup>。这些方法或以统计理论为支撑, 或结合水力几何及物理学原理, 对特定河道的流量估算有较高精度, 但均需一定的实测数据(如流量数据、水下地形数据等), 这限制了它们在无资料、资料稀缺地区或可达性较差地区的应用, 而往往这类地区对于流量估算的需求更加强烈。

#### 3.2 单纯基于遥感的流量估算

为了弥补传统遥感流量估算方法的不足, 很多学者开始关注单纯基于遥感数据估算流量的可行性<sup>[84-85]</sup>, 并先后提出一系列方法。一类方法是不依赖水文模型中的变量, 仅选择遥感数据中对水敏感的波段, 基于该波段关键位置反射率比值与流量的密切关系来估算流量。该方法最早由 Brakenridge



注: 据文献[77]修改, 图a中VS1、VS2、VS3、VS4、VS5为卫星虚拟观测站点。

图2 Ganges-Brahmaputra流域ENVISAT与Cryosat-2的水位监测对比

Fig.2 Comparison of water level monitoring between ENVISAT and Cryosat-2 in Ganges-Brahmaputra river basin

团队提出,他们先后使用MODIS和被动微波遥感的AMSRE数据进行分析,发现了关键位置的陆地像元与水体像元在敏感波段的比值与实测流量存在密切的相关关系<sup>[86-87]</sup>。基于该理论,Tarpanelli等<sup>[88]</sup>利用MODIS的近红外波段建立了关键位置反射率比值这一遥感指标,并发现了流速与该遥感指标的显著相关关系,证明了该方法应用于流量估算的可行性。然而,这类方法中关键位置的水陆像元难以通过自动化的方式确定。另一类方法是单纯利用遥感数据反演流量估算所需的全部参数,如Bjerklie等<sup>[89]</sup>提出的基于遥感反演水面流速、河宽和水深的三参数流量估算方法;Sichangi等<sup>[90]</sup>运用遥感数据估算河流流速、河宽、水深等参数,结合DEM获取的河道坡度进行流量估算;Huang等<sup>[85]</sup>使用Landsat和Sentinel影像及Jason卫星测高数据对高山区河流的流量进行了估算;Bjerklie等<sup>[91]</sup>利用基于Landsat的河流范围产品(Dynamic Surface Water Extent, DSWE)及Jason测高数据进行流量估算。这类方法需结合多种遥感数据,尤其是雷达获得的水位数据,对遥感数据的要求较高。

基于河流水力几何理论<sup>[92]</sup>,单个横断面的河道流量一般是河宽、平均径流深度与平均径流速度的函数,这三者与流量之间均存在幂律关系。Gleason等<sup>[93]</sup>发现,在一条河道的多个横断面之间,这些幂律关系的参数存在显著相关性,在多个不同河道均得到了验证,进一步发展了基于多个横断面水动力几何(At-many-stations Hydraulic Geometry, AMHG)估算河道流量的方法<sup>[94]</sup>,使单纯基于遥感提取河宽,进而估算河道流量成为可能。基于遥感提取河宽,一般是建立在提取到水体边界的基础之上,首先获得河道中心线,然后计算与中心线垂直的河宽信息。比如,Pavelsky等<sup>[95]</sup>开发了从遥感影像上直接提取河道中心线及河宽的工具RivWidth,并证明了其在多个河段的适用性;Isikdogan等<sup>[96]</sup>提出了基于奇点分析方法自动提取河道中心线及河宽的方法,并结合Google Earth Engine<sup>[97]</sup>开发了基于Landsat的自动化河流分析及制图工具<sup>[98]</sup>。因此,河宽可以通过多种手段从遥感影像上获取,这对于无资料河流的径流估算具有重要意义。

以上方法均可单纯基于遥感数据进行流量估算,不依赖实测数据且适用于不同河流,能够及时完善无资料、缺资料流域的流量信息。近年来,研究者对较大尺度甚至全球流量遥感监测的技术与

方法不断探索。全球洪水监测系统(Global Flood Detection System, GFDS)<sup>[99-100]</sup>基于Brakenridge团队的理论<sup>[86-87]</sup>,整合了多源遥感数据,提供全球尺度下近实时的流量估算及洪水监测数据<sup>[101-102]</sup>。

此外,计划于2021年发射的地表水和海洋地形计划(Surface Water Ocean Topography, SWOT)卫星,可获得近全球范围(约78°S~78°N)的高时空分辨率的海洋与地表水的表面高程、水面比降及水体范围,以服务于多尺度的流量估算<sup>[103]</sup>。作为SWOT计划的一部分,美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提出了一个通过无人机搭载与SWOT相似传感器的预研飞行实验计划AirSWOT,以试验其在地表水,尤其是湖泊水量与河流流量方面的应用效果。目前,该飞行实验已经取得了一系列的成果。例如,目前已经开发出了多种利用SWOT数据估算流量的算法<sup>[104-105]</sup>,这些方法的具体比较可以参考文献<sup>[106]</sup>。Pitcher等<sup>[107]</sup>和Altenau等<sup>[108]</sup>先后在阿拉斯加的育空河(Yukon River)以及塔那那河(Tanana River)开展实验,首先对利用AirSWOT获得的河面高程和水面比降进行了细致的精度验证,然后基于此开展流量估算,均得到了估算结果与实际观测流量高度一致的结论。

## 4 河流水质遥感监测

河流具有极强的流动、变化、侵蚀特性,易受工业污染、水土流失等影响导致水质下降,进而破坏生态环境,危及饮用水安全,影响社会生产生活。此外,部分河流可能因泥沙淤积而水位上涨,形成洪水风险,威胁周边居民生命财产安全。因此,河流水质的监测意义重大。

传统的水质监测包括水温、颜色、透明度、有机污染物、泥沙与叶绿素a等水质参数的监测,其中,泥沙和叶绿素a能够明显改变水体的光谱特性,因而成为遥感监测水质的主要内容。与传统实地监测水质的方法相比,遥感监测具有监测范围广、数据更新速度快、信息量大、可长期动态监测等诸多优势。用于水质监测的主要是光学传感器,按照波段数目不同分为多光谱传感器(CZCS、SeaWiFS、MODIS、Landsat、SPOT、ALOS、HJ-1A/CCD、FY系列、高分一号等)与高光谱传感器(AVIRIS、CASI、HJ-1A/HIS等)2类<sup>[109]</sup>。多光谱影像可用于大部分自

然水体的水质研究,其中,空间分辨率越高的影像,在细小河流水质监测方面的优势越明显。高光谱影像由于光谱特性极强而具备识别水体组分细微差别的能力,适宜对污染程度较高的河流进行水质监测,但当监测物质组成比较简单时,常常因为光谱信息过多而产生数据冗余,反而降低水质监测效率。此外,高光谱影像的空间分辨率一般较低,在对细小河流水质进行监测时也常常受到限制。因此,对于不同水域范围、水体组分的河流水质监测问题,应针对性地选择合适的遥感数据,也可通过融合多源数据进一步改善监测的结果<sup>[110]</sup>。

泥沙是河流中典型的固态无机悬浮颗粒物,是影响水体透明度、改变河流水质的关键物质,也是影响河流下游河口海湾自然生态的重要因素。Holyer<sup>[111]</sup>发现悬浮泥沙浓度与光谱数据之间的相关性,最早提出可使用遥感技术监测悬浮泥沙浓度。泥沙含量的监测与估算方法主要有分析方法、半分析方法、经验统计法等<sup>[112]</sup>。其中,经验统计法基于实测泥沙含量与遥感监测值之间的经验统计关系,建立最优波段或波段组合与实测泥沙含量之间的经验模型,是应用最广泛的河流泥沙监测方法<sup>[113]</sup>。例如,刘王兵等<sup>[114]</sup>通过对HJ-1/CCD数据和杭州湾的水体悬浮泥沙浓度实测数据进行相关性分析发现,泥沙浓度与红波段和近红外波段反射率存在显著的相关性,基于此建立泥沙含量的经验模型,得到了精度较高的泥沙含量估算结果。经验统计方法相对简单,特定情况下精度较高,但受地域影响较大,且统计模型的参数常需根据研究区的不同进行调整。此外,需要基于实测水质数据进行建模也是制约该方法广泛推广的重要因素。

一些污染严重的河流会呈现富营养化,导致叶绿素a含量迅速升高,对水生环境造成破坏。因此,叶绿素a含量的反演也是河流水质遥感的一项重要内容。水体中叶绿素a的存在,使得其在近红外波段反射率明显上升<sup>[115]</sup>,在红、蓝波段等也会发生明显的变化<sup>[116]</sup>。基于此,可以采用与泥沙含量反演类似的建模思路进行叶绿素a含量的遥感反演,但建模所用的最优波段或波段组合需要根据具体区域进行优化选取。例如,罗建美等<sup>[117]</sup>对HJ-1/CCD数据与滦河口北部近岸海域的实测叶绿素a含量进行相关性分析发现,红/蓝波段组合是用于此区域叶绿素a含量反演的最佳组合。此外,为了提高监测精度,潘梅娥等<sup>[118]</sup>基于HJ-1/HSI数据分析混合像元分

解的理论,在遥感影像上提取纯水和叶绿素a的端元波谱,建立叶绿素a浓度反演的混合光谱分解模型,既保留了光谱信息,又提高了空间分辨率,是高光谱遥感监测水质的一个重要方向。

## 5 河冰遥感监测

河冰是冰冻圈的重要组成部分,在寒区淡水环境下的生物、化学和物理过程中具有重要作用,影响着全球气候、地表能量、水分通量和水生、岸生生态系统的健康等多个方面。同时,河冰的存在也可能导致社会经济效应,包括影响水力发电和水上交通运输、由冰塞导致的洪水造成基础设施的破坏和人类生命财产的损失等<sup>[119]</sup>。此外,河冰也是气候波动和气候变化的重要指示器<sup>[13]</sup>。李辑等<sup>[120]</sup>应用河冰观测资料对1981—2009年辽宁省河流封冻期的特征及其对气候变暖的响应进行研究,发现虽然总体上气温的上升能导致全省河流封冻期的缩短,但不同河流的封冻对气温的响应也存在一定的空间差异性。

近30 a来,河冰实地观测的站点在全球范围内呈急剧减少的趋势<sup>[121]</sup>,遥感技术能够以更广的覆盖范围和更高的监测频率作为传统实地观测方式的有益补充。与液态水体相比,冰不论是在可见光近红外波段还是在微波波段,均具有相对明显的反射和散射特性,因此,河冰遥感提取方法相对简单,但若要实现自动化、准确的提取,仍有一定难度。此外,对于河冰厚度、流速等的遥感研究往往需要结合多种数据和手段,具体关于河冰遥感监测研究的详细综述可参见文献[13]。

由于大部分河流宽度有限,一些低分辨率的遥感影像,如AVHRR和MODIS等,更多地被应用于大型湖泊的冰情监测(湖冰的遥感监测综述可参考文献[122]),在河冰监测中应用相对有限。与湖冰相比,河冰处于更加复杂和动态的环境下,监测其形成和消融过程更加困难。Pavelsky等<sup>[123]</sup>使用逐日MODIS和AVHRR监测泛北极地区(如Lena河、Ob'河等)的河冰破碎时空模式。Chaouch等<sup>[124]</sup>和Gauthier等<sup>[125]</sup>开发了基于MODIS可见光和近红外波段识别河冰的自动化方法,并分别应用于美国的Susquehanna河以及加拿大的Peace河。Landsat系列影像由于其空间分辨率较高,更加适合用于监测河冰的分布<sup>[126]</sup>,但其时间分辨率较低,且常常受云

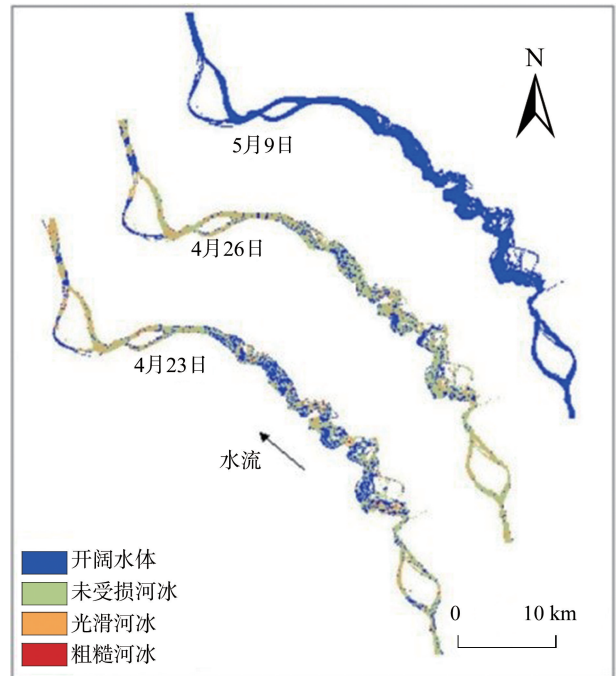
层及天气条件等限制,难以实现对河冰动态的高频密集监测。

SAR 影像可以不受天气和云层等限制,对水-冰表面、冰结构和冰厚度等均较为敏感,被广泛应用于河冰监测中<sup>[127-128]</sup>。但是,目前多数 SAR 影像的时间分辨率不高,难以实现河冰变化的高频率监测,而河冰的物候研究往往需要较为准确的时间信息,因此,单纯使用 SAR 影像进行河冰物候的研究较少<sup>[127]</sup>。包含双星的 Sentinel-1 卫星计划可以获得较高时空分辨率的 SAR 影像,已有研究尝试使用 Sentinel-1 数据进行河冰物候的研究<sup>[129]</sup>。鉴于光学影像和 SAR 影像各自的优势,融合多源影像进行河冰监测也是该领域的重要内容。例如,Chu 等<sup>[49]</sup>集成了 MODIS、RadarSat-2、航空相片等多种遥感数据对加拿大 Slave 河的河冰形成和消融过程进行了监测,在时间和空间尺度上均取得了较为细致的监测结果(图3)。

## 6 结论与展望

本文归纳了当前基于遥感技术进行河流水情要素监测的相关研究,对使用光学遥感与微波遥感提取河流水体范围及水位、水深等方面的优势与不足进行了对比(表5),总结得出河流水情要素遥感研究的数据、方法及应用方面的主要结论:

(1) 新型遥感数据在河流水情要素监测中的应用愈加广泛,在空间分辨率、时间分辨率或光谱分辨率等方面不断突破,进一步丰富了河流水情要素研究的数据来源。未来,如何更加高效地集成多源遥感数据,结合多类型的辅助数据,实现更高精度、更加全面的河流水情要素监测,将是该领域发展的重要方面。



注:据文献[49]修改。

图3 Slave河Fort Smith河段2014—2015年冬季破冰期的河冰覆盖

Fig.3 River ice covers during the breakup period in the Slave River at Fort Smith in the 2014–2015 winter

(2) 多数中低空间分辨率光学影像依旧面临混合像元影响水体提取精度的问题,SAR 影像也存在数据处理算法开发难度大的问题,细小河流及非开阔水体的提取方法仍需探索。基于遥感对水位/水深进行提取,对河道流量、水质参数及冰情进行研究已经取得一系列进展,但在复杂的河流水生态环境下,相关反演结果仍存在较大的不确定性,如何实现自动、高精度的河流水情要素反演是未来工作的重点内容。

(3) 大数据和云计算技术的发展,如 Google Earth Engine<sup>[97]</sup>和 Data Cube<sup>[130]</sup>等,为实现大尺度、长

表5 使用光学遥感/微波遥感提取河流水体范围、水位、水深的对比

Tab.5 Comparisons of extracting water extent, level, and depth applying optical/microwave sensors

水文要素	光学遥感	微波遥感
水体范围	优势:易得多种时空分辨率影像,可用于不同尺度的河流研究,数据处理及提取方法较简便。光谱信息丰富,结果可视化程度较高 不足:不适用于夜间观测,天气状况差及云层遮蔽的河流区域	优势:可以克服光学传感器易受光线、天气条件影响的不足 不足:SAR影像来源相对较少,处理难度较高,面临地形及建筑阻隔下河流水体提取的精度问题
河流水位	优势:激光测高应用广泛,数据密度较大,内陆河流水位数据的可用性较强 不足:无法获得较早年份的水位信息	优势:可以获得较早年份的水位信息 不足:雷达波束宽度限制观测河宽,仅适用于大型河流水位观测,水位精确反演算法难度较大
河流水深	Lidar及光学遥感反演方法可用于河流水深提取,但需要大量训练数据,且不确定性较高,普适性仍有待研究	无法直接获得水深信息,可通过结合水位与水底地形计算水深,但水底地形信息获取难度较大



时序的河流水情要素高时空分辨率遥感监测提供了高效手段。如何有效、合理地使用这些技术为河流水文水资源评价、气候生态响应等相关研究提供辅助,为水利工程建设服务,是未来仍需继续思考和探索的问题。

### 参考文献(References)

- [1] Palmer M, Ruhí A. Measuring earth's rivers [J]. *Science*, 2018, 361: 546-547.
- [2] Bhavsar P D. Review of remote sensing applications in hydrology and water resources management in India [J]. *Advances in Space Research*, 1984, 4(11): 193-200.
- [3] 宋平, 刘元波, 刘燕春. 陆地水体参数的卫星遥感反演研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2011, 26(7): 731-740. [Song Ping, Liu Yuanbo, Liu Yanchun. Advances in satellite retrieval of terrestrial surface water parameters. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(7): 731-740. ]
- [4] Schumann G, Moller D K. Microwave remote sensing of flood inundation [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2015, 83-84: 84-95.
- [5] Huang C, Chen Y, Zhang S Q, et al. Detecting, extracting, and monitoring surface water from space using optical sensors: A review [J]. *Reviews of Geophysics*, 2018, 56(2): 333-360.
- [6] 张国庆. 青藏高原湖泊变化遥感监测及其对气候变化的响应研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2018, 37(2): 214-223. [Zhang Guoqing. Changes in lakes on the Tibetan Plateau observed from satellite data and their responses to climate variations. *Progress in Geography*, 2018, 37(2): 214-223. ]
- [7] Smith L C. Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: A review [J]. *Hydrological Processes*, 1997, 11(10): 1427-1439.
- [8] Lyzenga D R. Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features [J]. *Applied Optics*, 1978, 17(3): 379-383.
- [9] Schumann G, Bates P D, Horritt M S, et al. Progress in integration of remote sensing-derived flood extent and stage data and hydraulic models [J]. *Reviews of Geophysics*, 2009, 47(4). doi: 10.1029/2008RG000274.
- [10] Hall A C, Schumann G, Bamber J L, et al. Tracking water level changes of the Amazon Basin with space-borne remote sensing and integration with large scale hydrodynamic modelling: A review [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2011, 36(7-8): 223-231.
- [11] 卢善龙, 吴炳方, 闫娜娜, 等. 河川径流遥感监测研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2010, 25(8): 820-826. [Lu Shanlong, Wu Bingfang, Yan Nana, et al. Progress in river runoff monitoring by remote sensing. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(8): 820-826. ]
- [12] Gholizadeh M H, Melesse A M, Reddi L. A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2016, 16(8). doi: 10.3390/s16081298.
- [13] Duguay C R, Bernier M, Gauthier Y, et al. Remote sensing of lake and river ice [M]// Tedesco M. Remote sensing of the cryosphere. New York, USA: Wiley, 2014: 273-306.
- [14] Sivapalan M. Prediction in ungauged basins: A grand challenge for theoretical hydrology [J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17(15): 3163-3170.
- [15] Ekeu-wei I T, Blackburn G A. Applications of open-access remotely sensed data for flood modelling and mapping in developing regions [J]. *Hydrology*, 2018, 5(3). doi: 10.3390/hydrology5030039.
- [16] Barton I J, Bathols J M. Monitoring floods with AVHRR [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1989, 30(1): 89-94.
- [17] Chen Y, Huang C, Ticehurst C, et al. An evaluation of MODIS daily and 8-day composite products for floodplain and wetland inundation mapping [J]. *Wetlands*, 2013, 33(5): 823-835.
- [18] Plumb E. River ice and flood detection products derived from Suomi NPP VIIRS satellite data to support hydrologic forecast operations in Alaska [R]. San Francisco, USA: AGU Fall Meeting, 2015.
- [19] Li S, Sun D, Goldberg M D, et al. Automatic near real-time flood detection using Suomi-NPP/VIIIRS data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 204: 672-689.
- [20] Frazier P, Page K, Louis J, et al. Relating wetland inundation to river flow using Landsat TM data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(19): 3755-3770.
- [21] Acharya T D, Lee D H, Yang I T, et al. Identification of water bodies in a Landsat 8 OLI image using a J48 decision tree [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2016, 16(7). doi: 10.3390/s16071075.
- [22] Du Y, Zhang Y, Ling F, et al. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(4). doi: 10.3390/rs8040354.
- [23] Yao F, Wang C, Dong D, et al. High-resolution mapping of urban surface water using ZY-3 multi-spectral imagery [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(9): 12336-12355.
- [24] Cooley S, Smith L, Stepan L, et al. Tracking dynamic northern surface water changes with high-frequency planet CubeSat imagery [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(12).

- doi: 10.3390/rs9121306.
- [25] Manavalan P, Sathyanath P, Rajegowda G L. Digital image analysis techniques to estimate waterspread for capacity evaluations of reservoirs [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1993, 59(9): 1389-1395.
- [26] Ozesmi S L, Bauer M E. Satellite remote sensing of wetlands [J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2002, 10(5): 381-402.
- [27] 贾明明, 刘殿伟, 王宗明, 等. 面向对象方法和多源遥感数据的杭州湾海岸线提取分析 [J]. *地球信息科学学报*, 2013, 15(2): 262-269. [Jia Mingming, Liu Dianwei, Wang Zongming, et al. Coastline changes in Hangzhou Bay based on object-oriented method using multi-source remote sensing data. *Journal of Geo-information Science*, 2013, 15(2): 262-269. ]
- [28] 王航, 秦奋. 遥感影像水体提取研究综述 [J]. *测绘科学*, 2018, 43(5): 23-32. [Wang Hang, Qin Fen. Summary of the research on water body extraction and application from remote sensing image. *Science of Surveying and Mapping*, 2018, 43(5): 23-32. ]
- [29] Chen Y, Wang B, Pollino C A, et al. Estimate of flood inundation and retention on wetlands using remote sensing and GIS [J]. *Ecohydrology*, 2014, 7(5): 1412-1420.
- [30] Tulbure M G, Broich M, Stehman S V, et al. Surface water extent dynamics from three decades of seasonally continuous Landsat time series at subcontinental scale in a semi-arid region [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 178: 142-157.
- [31] Mohammadi A, Costelloe J F, Ryu D. Application of time series of remotely sensed normalized difference water, vegetation and moisture indices in characterizing flood dynamics of large-scale arid zone floodplains [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 190: 70-82.
- [32] Fisher A, Flood N, Danaher T. Comparing landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 175: 167-182.
- [33] 王小标, 谢顺平, 都金康. 水体指数构建及其在复杂环境下有效性研究 [J]. *遥感学报*, 2018, 22(2): 360-372. [Wang Xiaobiao, Xie Shunping, Du Jinkang. Water index formulation and its effectiveness research on the complicated surface water surroundings. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(2): 360-372. ]
- [34] 王大钊, 王思梦, 黄昌. Sentinel-2 和 Landsat 8 的四种常用水体指数地表水体提取对比研究 [J]. *国土资源遥感*, 2019, 31(3): 157-165. [Wang Dazhao, Wang Simeng, Huang Chang. A comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 imagery for surface water extraction using four water indices. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2019, 31(3): 157-165. ]
- [35] Crist E P. A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1985, 17(3): 301-306.
- [36] McFeeters S K. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [37] Xu H Q. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(14): 3025-3033.
- [38] Feyisa G L, Meilby H, Fensholt R, et al. Automated water extraction index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 140(1): 23-35.
- [39] Haertel V F, Shimabukuro Y E. Spectral linear mixing model in low spatial resolution image data [R]. Anchorage, USA: IEEE Conference in Anchorage, 2005.
- [40] Huang C, Chen Y, Wu J P, et al. An evaluation of Suomi NPP-VIIRS data for surface water detection [J]. *Remote Sensing Letters*, 2015, 6(2): 155-164.
- [41] 刘晨洲, 施建成, 高帅, 等. 基于改进混合像元方法的 MODIS 影像水体提取研究 [J]. *遥感信息*, 2010(1): 84-88. doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2010.01.017. [Liu Chenzhou, Shi Jiancheng, Gao Shuai, et al. The study on extracting of water body from MODIS image using an improved linear mixture model. *Remote Sensing Information*, 2010(1): 84-88. doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2010.01.017. ]
- [42] Huang C, Chen Y, Wu J P. DEM-based modification of pixel-swapping algorithm for enhancing floodplain inundation mapping [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(1): 365-381.
- [43] Huang C, Chen Y, Zhang S Q, et al. Spatial downscaling of Suomi NPP-VIIRS image for lake mapping [J]. *Water*, 2017, 9(11). doi: 10.3390/w9110834.
- [44] 何智勇, 章孝灿, 黄智才, 等. 一种高分辨率遥感影像水体提取技术 [J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2004, 31(6): 701-707. [He Zhiyong, Zhang Xiaocan, Huang Zhicai, et al. A water extraction technique based on high-spatial remote sensing images. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2004, 31(6): 701-707. ]
- [45] 杨树文, 薛重生, 刘涛, 等. 一种利用 TM 影像自动提取细小水体的方法 [J]. *测绘学报*, 2010, 39(6): 611-617. [Yang Shuwen, Xue Chongsheng, Liu Tao, et al. A method of small water information automatic extraction from

- TM remote sensing images. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(6): 611-617. ]
- [46] Yang K, Li M C, Liu Y X, et al. River delineation from remotely sensed imagery using a multi-scale classification approach [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7 (12): 4726-4737.
- [47] 李艳华, 丁建丽, 闫人华. 基于国产GF-1遥感影像的山区细小水体提取方法研究 [J]. *资源科学*, 2015, 37(2): 408-416. [Li Yanhua, Ding Jianli, Yan Renhua. Extraction of small river information based on China-made GF-1 remote sense images. *Resources Science*, 2015, 37(2): 408-416. ]
- [48] Hsiao Y S, Hwang C, Cheng Y S, et al. High-resolution depth and coastline over major atolls of South China Sea from satellite altimetry and imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 176: 69-83.
- [49] Chu T, Lindenschmidt K E. Integration of space-borne and air-borne data in monitoring river ice processes in the Slave River, Canada [J]. *Remote sensing of environment*, 2016, 181: 65-81.
- [50] Torres R, Snoeij P, Geudtner D, et al. GMES Sentinel-1 mission [J]. *Remote Sensing Environment*, 2012, 120: 9-24.
- [51] Brivio P A, Colombo R, Maggi M, et al. Integration of remote sensing data and GIS for accurate mapping of flooded areas [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(3): 429-441.
- [52] Bonn F, Dixon R. Monitoring flood extent and forecasting excess runoff risk with RADARSAT-1 data [J]. *Natural Hazards*, 2005, 35(3): 377-393.
- [53] 李晟铭, 刘吉平, 王铭, 等. 基于 Sentinel-1A 的 2016 年长江中下游重灾区洪水遥感监测及灾情评估 [J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(10): 68-74, 91. [Li Shengming, Liu Jiping, Wang Ming, et al. Flood remote sensing monitoring and disaster assessment in heavy disaster area of the middle and lower reaches of Yangtze River in 2016 based on Sentinel-1A imagery. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2018, 46(10): 68-74, 91. ]
- [54] 李景刚, 黄诗峰, 李纪人. ENVISAT 卫星先进合成孔径雷达数据水体提取研究: 改进的最大类间方差阈值法 [J]. *自然灾害学报*, 2010, 19(3): 139-145. [Li Jinggang, Huang Shifeng, Li Jiren. Research on extraction of water body from ENVISAT ASAR images: A modified Otsu Threshold Method. *Journal of Natural Disasters*, 2010, 19 (3): 139-145. ]
- [55] Huang C, Chen Y, Zhang S Q, et al. Surface water mapping from Suomi NPP-VIIRS imagery at 30 m resolution via blending with Landsat data [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(8). doi: 10.3390/rs8080631.
- [56] Huang C, Nguyen B D, Zhang S Q. A comparison of terrain indices toward their ability in assisting surface water mapping from Sentinel-1 data [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2017, 6(5). doi: 10.3390/ijgi6050140.
- [57] Irwin K, Beaulne D, Braun A, et al. Fusion of SAR, optical imagery and airborne LiDAR for surface water detection [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(9). doi: 10.3390/rs9090890.
- [58] Slinski K M, Hogue T S, McCray J E. Active-passive surface water classification: A new method for high-resolution monitoring of surface water dynamics [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46: 4694-4704.
- [59] 卢乃锰, 闵敏, 董立新, 等. 星载大气探测激光雷达发展与展望 [J]. *遥感学报*, 2016, 20(1): 1-10. [Lu Naimeng, Min Min, Dong Lixin, et al. Development and prospect of spaceborne LiDAR for atmospheric detection. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(1): 1-10. ]
- [60] 范春波, 李建成, 王丹, 等. 激光高度计卫星 ICESAT 在地学研究中的应用 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2005, 25(2): 94-97. [Fan Chunbo, Li Jiancheng, Wang Dan, et al. Applications of ICESAT to geoscience research. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2005, 25(2): 94-97. ]
- [61] Urban T J, Schutz B E, Neuenschwander A L. A survey of ICESat coastal altimetry applications: Continental coast, open ocean island, and inland river [J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2008, 19(1-2):1-19.
- [62] Markus T, Neumann T, Martino A, et al. The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 190: 260-273.
- [63] 葛莉, 刁晓环, 王成, 等. ICESat-1/GLAS 数据湖泊水位监测研究进展 [J]. *遥感技术与应用*, 2017, 32(1): 14-19. [Ge Li, Xi Xiaohuan, Wang Cheng, et al. Research progress of ICESat-1/GLAS in lake level monitoring. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 32(1): 14-19. ]
- [64] 马毅, 张杰, 张靖宇, 等. 浅海水深光学遥感研究进展 [J]. *海洋科学进展*, 2018, 36(3): 331-351. [Ma Yi, Zhang Jie, Zhang Jingyu, et al. Progress in shallow water depth mapping from optical remote sensing. *Advances in Marine Science*, 2018, 36(3): 331-351. ]
- [65] Wang C K, Philpot W D. Using airborne bathymetric LiDAR to detect bottom type variation in shallow waters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106(1): 123-135.
- [66] 田庆久, 王晶晶, 杜心栋. 江苏近海岸水深遥感研究

- [J]. 遥感学报, 2007, 11(3): 373-379. [Tian Qingjiu, Wang Jingjing, Du Xindong. Study on water depth extraction from remote sensing imagery in Jiangsu coastal zone. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(3): 373-379. ]
- [67] Lyzenga D R. Shallow-water bathymetry using combined LiDAR and passive multispectral scanner data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1985, 6(1): 115-125.
- [68] Su H, Liu H, Wu Q. Prediction of water depth from multi-spectral satellite imagery: The regression Kriging alternative [J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2015, 12(12): 2511-2515.
- [69] 陆天启, 陈圣波, 郭甜甜, 等. 基于 SPOT-6 遥感影像的近海水深反演 [J]. 海洋学研究, 2016, 34(3): 51-56. [Lu Tianqi, Chen Shengbo, Guo Tiantian, et al. Offshore bathymetry retrieval from SPOT-6 image. *Journal of Marine Science*, 2016, 34(3): 51-56. ]
- [70] 陈安娜, 马毅, 张靖宇. 水深被动光学遥感反演模型适用性研究 [J]. 海洋环境科学, 2018, 37(6): 953-959. [Chen Anna, Ma Yi, Zhang Jingyu. Study on applicability of water-depth passive optical remote sensing inversion models. *Marine Environmental Science*, 2018, 37(6): 953-959. ]
- [71] 陈琛, 马毅, 张靖宇. GF-1 WFV 图像经验模分解的光谱保真性与水深遥感探测 [J]. 海洋学报, 2018, 40(4): 51-60. [Chen Chen, Ma Yi, Zhang Jingyu. Spectral fidelity and water depth remote sensing detection of EMD of GF-1WFV images. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 40(4): 51-60. ]
- [72] 黄家柱, 尤玉明. 长江南通河段卫星遥感水深探测试验 [J]. 水科学进展, 2002, 13(2): 235-238. [Huang Jiazhu, You Yuming. Experiment of water depth surveying in the Nantong section of the Yangtze River. *Advances in Water Science*, 2002, 13(2): 235-238. ]
- [73] Wagner C. A prograde Geosat exact repeat mission [J]. *Journal of the Astronautical Sciences*, 1991, 39(3): 313-326.
- [74] Birkett C M. Contribution of the TOPEX NASA radar altimeter to the global monitoring of large rivers and wetlands [J]. *Water Resources Research*, 1998, 34: 1223-1240.
- [75] Medina C, Gomez-Enri J, Alonso J, et al. Water volume variations in lake Izabal (Guatemala) from in situ measurements and ENVISAT Radar Altimeter (RA-2) and Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) data products [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 382(1-4): 34-48.
- [76] Kleinherenbrink M, Lindenbergh R C, Ditmar P G. Monitoring of lake level changes on the Tibetan Plateau and Tian Shan by retracking Cryosat SARIn waveforms [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 521: 119-131.
- [77] Villadsen H, Andersen O B, Stenseng L, et al. CryoSat-2 altimetry for river level monitoring: Evaluation in the Ganges–Brahmaputra River basin [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 168: 80-89.
- [78] Musa Z, Popescu I, Mynett A. A review of applications of satellite SAR, optical, altimetry and DEM data for surface water modelling, mapping and parameter estimation [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, 19: 3755-3769.
- [79] Koblinsky C J, Clarke R T, Brenner A C, et al. Measurement of river level variations with satellite altimetry [J]. *Water Resources Research*, 1993, 29: 1839-1848.
- [80] 赵云, 廖静娟, 沈国状, 等. 卫星测高数据监测青海湖水位变化 [J]. 遥感学报, 2017, 21(4): 633-644. [Zhao Yun, Liao Jingjuan, Shen Guozhuang, et al. Monitoring the water level changes in Qinghai Lake with satellite altimetry data. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(4): 633-644. ]
- [81] Smith L C, Isacks B L, Forster R R, et al. Estimation of discharge from braided glacial rivers using ERS1 synthetic aperture radar: First results [J]. *Water Resources Research*, 1995, 31(5): 1325-1329.
- [82] Brakenridge G R, Tracy B T, Knox J C. Orbital SAR remote sensing of a river flood wave [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(7): 1439-1445.
- [83] Alsdorf D, Birkett C, Dunne T, et al. Water level changes in a large Amazon lake measured with spaceborne radar interferometry and altimetry [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(14): 2671-2674.
- [84] Sichangi A, Wang L, Yang K, et al. Estimating continental river basin discharges using multiple remote sensing datasets [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 179: 36-53.
- [85] Huang Q, Long D, Du M, et al. Discharge estimation in high-mountain regions with improved methods using multisource remote sensing: A case study of the Upper Brahmaputra River [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 219: 115-134.
- [86] Brakenridge G R, Nghiem S V, Anderson E, et al. Orbital microwave measurement of river discharge and ice status [J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(4). doi: 10.1029/2006WR005238.
- [87] Brakenridge G R, Nghiem S V, Anderson E, et al. Space-based measurement of river runoff [J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2013, 86(19): 185-188.
- [88] Tarpanelli A, Brocca L, Lacava T, et al. Toward the estimation of river discharge variations using MODIS data

- in ungauged basins [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 136: 47-55.
- [89] Bjerklie D M, Dingman S L, Vorosmarty C J, et al. Evaluating the potential for measuring river discharge from space [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 278(1): 17-38.
- [90] Sichangi A, Wang L, Hu Z. Estimation of river discharge solely from remote-sensing derived data: An initial study over the Yangtze River [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(9). doi: 10.3390/rs10091385.
- [91] Bjerklie D M, Birkett C M, Jones J W, et al. Satellite remote sensing estimation of river discharge: Application to the Yukon River Alaska [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 561: 1000-1018.
- [92] Leopold L B, Maddock Jr T. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications [R]. USGS Professional Paper, 1953. doi: 10.3133/pp252.
- [93] Gleason C J, Smith L C, Lee J. Retrieval of river discharge solely from satellite imagery and at-many-stations hydraulic geometry: Sensitivity to river form and optimization parameters [J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(12): 9604-9619.
- [94] Gleason C J, Smith L C. Toward global mapping of river discharge using satellite images and at-many-stations hydraulic geometry [J]. *PNAS*, 2014, 111(13): 4788-4791.
- [95] Pavelsky T M, Smith L C. RivWidth: A software tool for the calculation of river widths from remotely sensed imagery [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(1): 70-73.
- [96] Isikdogan F, Bovik A, Passalacqua P. Automatic channel network extraction from remotely sensed images by singularity analysis [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(11): 2218-2221.
- [97] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202(S3): 18-27.
- [98] Isikdogan F, Bovik A, Passalacqua P. RivaMap: An automated river analysis and mapping engine [J]. *Remote Sensing Environment*, 2017, 202(SC): 88-97.
- [99] Kugler Z, De Groeve T. The global flood detection system [R]. Ispra, Italy: Joint Research Centre Scientific and Technical Reports, 2007.
- [100] De Groeve T, Brakenridge R G, Paris S. Global flood detection system: Data product specifications [R]. Ispra, Italy: Joint Research Centre Technical Report, 2015.
- [101] Khan S I, Hong Y, Gourley J, et al. Multi-sensor imaging and space-ground cross-validation for 2010 flood along Indus River, Pakistan [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(3): 2393-2407.
- [102] Shi Z L, Huang C. Evaluation of discharge estimation using global flood detection system [C]// IEEE. Proceedings of the 2018 7th International Conference on Agro-geoinformatics (Agro-geoinformatics). Hangzhou, China, 2018.
- [103] Biancamaria S, Lettenmaier D P, Pavelsky T M. The SWOT mission and its capabilities for land hydrology [J]. *Surveys in Geophysics*, 2016, 37(2): 307-337.
- [104] Hagemann M W, Gleason C J, Durand M T. BAM: Bayesian AMHG-Manning inference of discharge using remotely sensed stream width, slope, and height [J]. *Water Resources Research*, 2017, 53: 9692-9707.
- [105] Brisset P, Monnier J, Garambois P A, et al. On the assimilation of altimetric data in 1D Saint-Venant River flow models [J]. *Advances in Water Resources*, 2018, 119: 41-59.
- [106] Tuozzolo S, Lind G, Overstreet B, et al. Estimating river discharge with swath altimetry: A proof of concept using AirSWOT observations [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(3): 1459-1466.
- [107] Pitcher L H, Pavelsky T M, Smith L C, et al. AirSWOT InSAR mapping of surface water elevations and hydraulic gradients across the Yukon Flats basin, Alaska [J]. *Water Resources Research*, 2018, 55(2): 937-953.
- [108] Altenau E H, Pavelsky T M, Moller D, et al. Temporal variations in river water surface elevation and slope captured by AirSWOT [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 224: 304-316.
- [109] 庞毓雯, 周斌, 殷守敬, 等. II类水体悬浮泥沙遥感监测技术综述 [J]. *杭州师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 15(1): 108-112. [Pang Yuwen, Zhou Bin, Yin Shoujing, et al. Literature review of suspended sediment remote sensing monitoring technology in case II water. *Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, 15(1): 108-112.]
- [110] 彭翔翼, 沈芳. 多种卫星传感器反演长江口悬浮泥沙浓度的对比分析 [J]. *红外*, 2014, 35(4): 31-37. [Peng Xiangyi, Shen Fang. Comparative analysis of suspended particulate matter concentration in Yangtze estuary derived by several satellite sensors. *Infrared*, 2014, 35(4): 31-37.]
- [111] Holyer R J. Toward universal multispectral suspended sediment algorithms [J]. *Remote Sensing Environment*, 1978, 7: 323-338.
- [112] 王皓, 赵冬至, 王林, 等. 水质遥感研究进展 [J]. *海洋环境科学*, 2012, 31(2): 285-288. [Wang Hao, Zhao Dongzhi, Wang Lin, et al. Advance in remote sensing of wa-

- ter quality. *Marine Environmental Science*, 2012, 31(2): 285-288. ]
- [113] 栾虹, 付东洋, 李明杰, 等. 基于Landsat 8珠江口悬浮泥沙四季遥感反演与分析[J]. *海洋环境科学*, 2017, 36(6): 892-897. [Luan Hong, Fu Dongyang, Li Mingjie, et al. Based on Landsat 8 suspended sediment concentration of the Pearl River on each season inversion and analysis. *Marine Environmental Science*, 2017, 36(6): 892-897. ]
- [114] 刘王兵, 于之锋, 周斌, 等. 杭州湾HJ CCD影像悬浮泥沙遥感定量反演[J]. *遥感学报*, 2013, 17(4): 905-918. [Liu Wangbing, Yu Zhifeng, Zhou Bin, et al. Assessment of suspended sediment concentration at the Hangzhou Bay using HJ CCD imagery. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(4): 905-918. ]
- [115] 胡雯, 杨世植, 翟武全, 等. NOAA卫星监测巢湖蓝藻水华的试验分析[J]. *环境科学与技术*, 2002, 25(1): 16-17. [Hu Wen, Yang Shizhi, Zhai Wuquan, et al. Application of NOAA satellite for monitoring blue-green algal bloom in Chaohu Lake. *Environmental Science and Technology*, 2002, 25(1): 16-17. ]
- [116] 徐雯佳, 杨斌, 田力, 等. 应用MODIS数据反演河北省海域叶绿素a浓度[J]. *国土资源遥感*, 2012, 24(4): 152-156. [Xu Wenjia, Yang Bin, Tian Li, et al. Retrieval of chlorophyll-a concentration by using MODIS data in Hebei sea area. *Remote Sensing For Land and Resources*, 2012, 24(4): 152-156. ]
- [117] 罗建美, 霍永伟, 韩晓庆. 基于HJ卫星的近岸II类水体叶绿素a浓度定量遥感反演研究: 以滦河口北部海域为例[J]. *海洋学报*, 2017, 39(4): 117-129. [Luo Jianmei, Huo Yongwei, Han Xiaoqing. Inversion of chlorophyll a concentration in offshore II waters using HJ satellite data: Example in the north of the Luanhe Delta. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 39(4): 117-129. ]
- [118] 潘梅娥, 杨昆. 基于环境一号HSI高光谱数据提取叶绿素a浓度的混合光谱分解模型研究[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(6): 71-76. [Pan Mei-e, Yang Kun. Study on spectral unmixing model of chlorophyll-a concentration extraction based on HJ-1 HSI hyperspectral data. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(6): 71-76. ]
- [119] Prowse T, Alfredsen K, Beltaos S, et al. Effects of changes in Arctic lake and river ice [J]. *AMBIO*, 2011, 40(S1): 63-74.
- [120] 李辑, 胡春丽, 李菲, 等. 1981—2009年辽宁省河流封冻期特征及对气候变暖的响应[J]. *气候变化研究进展*, 2011, 7(6): 418-422. [Li Ji, Hu Chunli, Li Fei, et al. Characters of river's freeze/thaw date and their responses to regional warming in Liaoning Province during 1981–2009. *Advances in Climate Change Research*, 2011, 7(6): 418-422. ]
- [121] Prowse T, Alfredsen K, Beltaos S, et al. Arctic freshwater ice and its climatic role [J]. *AMBIO*, 2011, 40(S1): 46-52.
- [122] 魏秋方, 叶庆华. 湖冰遥感监测方法综述[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(7): 803-810. [Wei Qiufang, Ye Qinghua. Review of lake ice monitoring by remote sensing. *Progress in Geography*, 2010, 29(7): 803-810. ]
- [123] Pavelsky T M, Smith L C. Spatial and temporal patterns in Arctic river ice breakup observed with MODIS and AVHRR time series [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93: 328-338.
- [124] Chaouch N, Temimi M, Romanov P, et al. An automated algorithm for river ice monitoring over the Susquehanna River using the MODIS data [J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28: 62-73.
- [125] Gauthier Y, Hardy S, Gutiérrez C, et al. IceFRONT: Integration of radar and optical images for operational river freeze-up monitoring [R]. Quebec, Canada: CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment 18th Workshop on River Ice, 2015.
- [126] Gatto L W. Monitoring river ice with landsat images [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990, 32(1): 1-16.
- [127] Unterschultz K, Vander Sanden J, Hicks F. Potential of RADARSAT-1 for the monitoring of river ice: Results of a case study on the Athabasca River at Fort McMurray, Canada [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2009, 55: 238-248.
- [128] Chu T, Das A, Lindenschmidt K E. Monitoring the variation in ice-cover characteristics of the Slave River, Canada using RADARSAT-2 data: A case study [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(10): 13664-13691.
- [129] Łoś H, Pawłowski B. The use of sentinel-1 imagery in the analysis of river ice phenomena on the lower vistula in the 2015–2016 winter season [R]. Jachranka Village, Poland: IEEE Signal Processing Symposium, 2017.
- [130] Lewis A, Oliver S, Lymburner L, et al. The Australian geoscience data cube: Foundations and lessons learned[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 276-292.

## Recent advances in remote sensing of river characteristics

SHI Zhuolin, HUANG Chang\*

(Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity,  
Northwest University, Xi'an 710127, China)

**Abstract:** River is one of the most significant factors in driving the formation and evolution of landforms as well as one of the most important freshwater resources on the Earth. River characteristics, including water extent, water level/water depth, river discharge, water quality, and ice coverage, are vital to the dynamic monitoring of water resources and protection of eco-hydrological systems. Traditional methods of acquiring river characteristics are to use *in situ* data that were collected on hydrological gauges, which costs large amount of financial and material resources. It is urgent to develop a way of supplementing *in situ* data of rivers quickly and accurately for the increasing demand of river information. With the ability of omnidirectional and multi-temporal Earth observation, remote sensing has greatly improved the efficiency of acquiring river characteristics. It has been applied broadly in multi-scale river monitoring and hydrological simulation in ungauged basins. Therefore, it is necessary to summarize recent progresses in the field of remote sensing based river characteristics inversion, in order to further promote the application of remote sensing data and methods in this field. This article, therefore, focusing on remote sensing of river characteristics, summarizes recent progresses systematically on the extraction of water extent, inversion of water level/water depth, estimation of river discharge, and monitoring of water quality and ice coverage. Advantages and disadvantages of applying optical and microwave remote sensors for obtaining water extent and water level/depth are discussed in detail. The advanced data, specific methods, and related emerging technologies in this field are discussed and the following conclusions are made: 1) Newly available remotely sensed data have been making creative breakthroughs in spatial resolution, temporal resolution, and spectral resolution, which dramatically enrich data sources for river studies. 2) Most optical images still face the challenge of mixed pixels, while the application of SAR images is suffering from difficulties in developing complex processing algorithms. Meanwhile, accurate extractions of narrow and non-open waters need further research in the future. 3) The development of big data and cloud computing technologies provide excellent means for monitoring river characteristics at large spatial scales and long temporal scales, with both high spatial and high temporal resolutions.

**Keywords:** water extent; water level/water depth; river discharge; water quality; ice coverage; optical/microwave remote sensors