

山地遥感主要研究进展、发展机遇与挑战

李爱农, 边金虎, 张正健, 赵伟, 尹高飞

中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所 数字山地与遥感应用研究中心, 四川 成都 610041

摘要: 山地遥感是研究在山地这一特定环境中的遥感基本原理、方法及其应用的科学技术。从山地遥感研究的基本内涵出发, 总结面临的若干前沿科学问题, 指出当前主要研究内容: (1)电磁波与山地地表相互作用机理及建模理论; (2)山地遥感数据时—空—谱归一化处理方法; (3)山地地表信息遥感建模、反演与同化方法; (4)山地遥感尺度效应与算法/产品验证; (5)山地遥感信息综合应用等。从山地遥感研究的基础理论方法以及山地遥感应应用两个层面回顾了近年来山地遥感研究取得的进展, 并就新时代背景下山地遥感研究面临的机遇与挑战进行了分析, 最后对山地遥感研究前景进行了展望。

关键词: 山地遥感, 模型, 尺度转换, 病态反演, 数据同化, 地形效应

中图分类号: TP701 **文献标志码:** A

引用格式: 李爱农, 边金虎, 张正健, 赵伟, 尹高飞. 2016. 山地遥感主要研究进展、发展机遇与挑战. 遥感学报, 20(5): 1199–1215
Li A N, Bian J H, Zhang Z J, Zhao W and Yin G F. 2016. Progresses, opportunities, and challenges of mountain remote sensing research. Journal of Remote Sensing, 20(5): 1199–1215 [DOI:10.11834/jrs.20166227]

1 引言

1962年第1届国际环境遥感大会在美国密西根州召开, 会议上“遥感”一词首次被国际科技界正式使用, 标志着现代遥感的诞生(郭华东等, 2013)。遥感自诞生之日起, 就面临着山地带来的复杂问题。虽然“山地遥感”一词在20世纪80年代中期才由中国学者提出(周万村, 1985; 陈昱等, 1986), 但航空摄影测量遥感领域很早便进行了大比例尺山地地形测绘工作, 对山地遥感的探索距今实际已近百年历史。山地遥感是研究在山地这一特定的环境中, 遥感基本原理、方法及其应用的科学技术, 是遥感科学的重要组成部分。近年来, 山地遥感的基础理论问题及其综合应用引发了国内外学者广泛关注(Colby, 1991; 李新等, 1996; 阎广建等, 2000; Giles, 2001; Weiss和Walsh, 2009; 王少楠和李爱农, 2012; Zhao和Li, 2015; Yan等, 2016; 李爱农等, 2016), 已成为遥感科学的热点研究领域之一。

山地占据全球陆地表层空间约24%, 中国山地

面积更是约占陆地国土面积的65%。山地具有集中而丰富的生物气候垂直带谱, 在维持生物多样性、调节区域气候和涵养水源等方面具有重要的生态服务功能(方精云等, 2004), 是社会发展的资源基地和重要的生态屏障。然而, 山地特有的能量梯度使之成为泥石流、滑坡、崩塌、雪崩、土壤侵蚀、山洪等自然灾害的集中发育区, 严重威胁山区人民生命财产和工程建设安全, 制约山区资源开发与经济发展(崔鹏, 2014)。同时, 山地系统特有的环境梯度使其成为全球变化的敏感指示器, 山地还是当前全球变化研究的热点和重点关注区域(Beniston, 2003, 王根绪等, 2011)。遥感技术的优势在于频繁和持久地提供地表特征的面状信息(童庆禧, 2005), 它是山地科学研究的重要手段, 能够为山地研究的诸多领域提供地物分布、要素现状与历史演变的时空连续信息(李爱农等, 2016)。然而, 山地除了具有迥异于平地的几何形态特征外, 其特殊的水热特征也形成了特有的生态系统结构和功能。山地这种特殊的环境特征给遥感科学及其应用带来了诸多困难, 如几何

收稿日期: 2016-06-20; 修订日期: 2016-07-05; 优先数字出版日期: 2016-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 41271433, 41571373, 41301385, 41401425); 中国科学院“百人计划”项目; 中国科学院战略性先导专项子课题(编号: XDA05050105); 中国科学院国际合作重点项目(编号: GJHZ201320)

第一作者简介: 李爱农(1974—), 男, 研究员, 研究方向为山地定量遥感及其应用。E-mail: ainongli@imde.ac.cn

(Bian 等, 2013)与光谱畸变(Li 等, 2015)更加严重, 生态参量病态反演更加突出(李爱农 等, 2016), 能量平衡更加复杂(Zhao和Li, 2015)等。

国际上山地遥感相关研究的广泛开展大致始于20世纪70年代。自卫星遥感诞生以来, 遥感学家们较早认识到山区地形起伏造成了影像几何和光谱特征的变化(Van Wie和Stein, 1977; Townshend 等, 1992), 先后发展了多种山地几何(Dai和Khorram, 1998; Gao 等, 2009)和地形光谱校正模型(Teillet 等, 1982; Gu和Alan, 1998)。近年来, 在定量遥感基础理论与方法的促进下(梁顺林 等, 2013), 各种新的山地地形辐射校正模型(Li 等, 2015)、坡地冠层反射率模型(Fan 等, 2014)以及生态过程模型(Soenen 等, 2010)逐渐丰富起来, 各种山地遥感反演方法与策略也层出不穷(顾行发 等, 2005)。在以全球对地观测计划(EOS)为代表的重大国际遥感科学计划中, 已把利用遥感提取山地地表参量作为研究的重点(Chen 等, 2003)。中国科学院、国家自然科学基金委员会、科技部等部门也相继启动了“山地地表覆被空间信息定量遥感关键技术”、“山地典型生态参量遥感反演建模及其时空表征能力研究”、“复杂地形区地表短波辐射估算及时空扩展研究”、“复杂地表遥感信息动态分析与建模”等一系列重点科研项目, 围绕山地地表遥感辐射传输建模、地表参数遥感定量反演以及山地遥感综合应用, 开展了持续性研究。山地遥感研究在国内外均得到空前重视。

现阶段山地遥感研究主要包括以下几个方面的内容: (1)电磁波与山地地表相互作用机理及建模理论; (2)山地遥感数据时—空—谱归一化处理方法; (3)山地地表信息遥感建模、反演与同化方法; (4)山地遥感尺度效应与算法/产品验证; (5)山地遥感信息综合应用等。值得指出的是, 与其他专题遥感技术类似, 山地遥感的各个研究内容不是孤立的, 而是相辅相成, 并将随着遥感科学相关研究的发展而不断深化。

2 山地遥感面临的若干前沿科学问题

美国已故地理学遥感之父David Simonett指出, 遥感不单是一门应用技术, 还是一门科学, 有其自身的科学问题(李小文, 2006)。遥感技术飞速发展的背后面临着诸多科学问题和挑战(徐冠华 等,

1996; 陈述彭, 1997; 周成虎和鲁学军, 1998; 龚健雅和李德仁, 2008)。本文将山地遥感面临的若干前沿科学问题梳理为以下几个方面:

2.1 电磁波与山地地表环境相互作用机理及遥感建模理论

电磁波与地表环境的辐射传输机理是遥感研究的基础理论(柳钦火 等, 2009)。自诺贝尔奖获得者Chandrasekhar(1960)于20世纪50年代创立辐射传输学派以来, 遥感机理研究先后从大气拓展到植被、土壤、冰雪等多个研究领域。针对辐射传输理论的局限性, 李小文与Strahler(1985)发展的几何光学学派将遥感基础理论研究推向了一个新的发展方向。相比于平坦地表, 山地环境特有的地形复杂性以及由此引起的生态系统复杂性, 致使辐射传输过程各分量间的耦合更为紧密, 模型对自然现象的刻画更加困难。在山区, 如何准确揭示地物光谱信号与复杂地表的相互作用, 定量描述电磁波与山地环境相互作用的机理是山地遥感面临的重要基础科学问题。

2.2 山地遥感影像归一化处理技术

海量遥感数据的综合高效应用, 必然要优先解决遥感影像的归一化处理技术。山地遥感影像的几何和光谱畸变问题是山地遥感较早关注的问题之一(Hoffer, 1975)。尽管近半个世纪以来学者们发展了许多用于山地遥感影像几何与光谱辐射畸变的校正方法, 随着当前对地观测卫星数据的不断增多, 多源、多时相、多角度、异构的山地遥感影像归一化处理仍是制约山地遥感发展的重要因素之一。新的时代背景下, 如何开展海量山地遥感影像高精度的几何、光谱归一化, 并在此基础上进行多源遥感影像的协同应用, 是当前山地遥感面临的前沿科学技术难题之一。

2.3 山地地表生态参量遥感反演理论与方法

遥感反演问题是在给定前向模型的基础上, 寻找一组输入参数, 使其能够最佳地解释当前遥感观测的过程。由于山地地表的复杂性, 开展山地地表生态参量反演需要更多的植被或地形参数, 山地定量遥感反演模型的解算难度也更大, 遥感“病态”反演在山区更为严重, 反演结果不确定性更为突出(李爱农 等, 2016)。常规的生态参量遥

感反演模型在山区适用性如何？如何在遥感反演模型中结合多源遥感信息与山地地表参数先验知识，充分考虑并消弱地形带来的不确定性影响？这些问题是山地生态参量遥感反演的核心科学问题。

2.4 山地遥感研究中的尺度效应

尺度效应是遥感科学的关键科学问题之一。与传统地学研究中的地学现象和规律表现的尺度效应不同，作为地学研究的重要数据源，遥感研究中的尺度效应一般更重视不同分辨率影像及其反演产品之间的关系和尺度转换问题(李小文和王祎婷, 2013)。山地遥感尺度差异受地形影响更为显著。山地陆表生态参量的尺度效应及其尺度转换机理是将多源、多尺度信息通过模型同化于遥感反演过程的基础，同时也是揭示不同尺度遥感产品不确定性的桥梁。遥感常用的尺度转换模型与方法在山区是否仍然适用？如何将多源和多尺度的遥感产品与地面观测资料相结合，应用于山地水文、生态及流域集成模型？还需要在实验和理论上进一步研究。

2.5 山地遥感研究中的多学科交叉方法

遥感是一门综合性的科学，需要借助物理学、数学、计算机、地学、生物学等学科的原理、方法和分析手段，解决对地遥感的科学理论与实际应用问题。山地遥感研究中如何将山地科学以及相关学科中的基础理论、方法及研究成果吸收进来，加深遥感在山地中的理解是山地遥感实现突破的重要方面。

3 山地遥感研究进展

3.1 山地遥感基础理论与方法研究进展

3.1.1 山地遥感辐射传输机理

遥感辐射传输理论是遥感研究的基础与前沿领域。近半个世纪以来，国内外学者在遥感辐射传输建模领域做出了重大贡献，先后发展了如辐射传输模型(Verhoef, 1984)、几何光学模型(Li和Strahler, 1992)、混合模型(Li等, 1995)和计算机模拟模型(Goel等, 1991)等，并已广泛应用于地表参量定量反演等领域，极大促进了定量遥感的发展。

山地地表会显著影响光学遥感的成像过程，

使遥感传感器接收到的地表信号发生畸变(Li等, 2015)。早期山地遥感影像可见光/近红外波段辐射机理研究中，大多通过坐标旋转将平地模型拓展到坡地情况下，如Schaaf等人(1994)发展的坡地GOMS(Geometric Optical Mutual Shadowing)模型。但是坐标转换后的模型暗含了植被垂直于坡地生长的假设，与实际情况下植被的向地生长特性不符，因此有学者提出直接修改模型的参数化方案来发展山地模型，如Combal等人(2000)通过对叶倾角分布函数的调整，将Ross模型(Ross 1981)扩展到了坡地情况下；Fan等人(2014)则通过3维空间的投影算法将四尺度模型扩展到坡地，发展了坡地几何光学模型GOST(Geometrical-Optical model for Sloping Terrains)。山地遥感成像过程除了受目标像元自身地形特征(局地地形效应)影响外，还受邻近地形的影响，即非局地地形效应。Mousivand等人(2015)通过耦合已有山地下行短波辐射模型和平地冠层反射率，综合考虑了辐射在冠层内和邻近坡地间的传输过程。然而，该研究忽略了植被的向地生长特性，用于结构参数反演时仍存在较大不确定性。

山地遥感辐射传输机理研究逐渐成为当前遥感科学研究的热点领域，学者们已经取得了许多研究成果。但是山地遥感信号成像过程中的很多关键环节尚未完全厘清，尚缺乏一些关键物理变量在山地的等效定义，还需要进一步加强山地遥感信号成像过程的机理研究。

3.1.2 山地遥感数据归一化处理技术

(1)几何校正。山地遥感影像的几何畸变是卫星影像处理关注的重要内容和山地遥感较早关注的问题之一(Van Wie和Stein 1977)，其校正的主要思路是结合数字高程模型DEM (Digital Elevation Model)，利用多项式或有理函数模型建立像点与真实3维地理坐标之间的函数关系，根据待校正影像成像规律去除由地形引起的非系统误差(李德仁等, 2012)。

几何校正模型可以分为严格几何校正模型和一般数学函数模型。严格几何校正模型的基本原理基于摄影测量中的共线条件方程，理论严密，几何处理精度高。国内外学者(张祖勋和周月琴, 1988；黄玉琪, 1998；王任享等, 2001；Toutin, 2004)在遥感影像的外方位元素定向参数解算和误

差平差设计方面提出了多种严格几何校正模型。然而,严格几何校正模型形式复杂,对使用人员的理论背景要求较高且卫星参数不易获取。一般数学函数模型无需影像的内外方位元素信息,形式简单且便于计算。但一般数学函数模型忽略了几何校正过程中由山地地形起伏引起的影像变形。学者们通过结合光学影像的3维几何模型和DEM,对成像过程中的高程变形规律加以表示,提高了山地遥感影像的几何校正精度(Gao等,2009;李爱农等,2012;Bian等,2013)。

自动化的几何校正算法是海量遥感图像处理的需求和主要发展方向。目前国内外学者发展了如AROP(Automatic Registration and Orthorectification Package)(Gao等,2009)、SIFT(Scale Invariant Feature Transform)(Fan等,2007)等多种自动几何配准算法。相关算法的关键是在几何校正模型基础上,利用控制点自动匹配与筛选方法自动搜索控制点信息。影像的局地灰度特征(Kennedy和Cohen,2003)、矢量特征(Ali和Clausi,2002)及二者的综合(Dare和Dowman,2001)是控制点自动搜索方法的重要信息源。然而,由于不同传感器的设计原理有很大差异,多源卫星影像山地畸变规律有很大不同,目前还难以发展一种普适的山地几何校正模型。自动化、高精度、准实时的山地多源卫星影像几何校正算法是今后重要的研究内容。

(2)地形辐射校正。山地光学遥感影像中,地形起伏导致不同方位向的坡面接收的太阳辐射不同,致使相同地物在向阳面与阴面存在较大光谱差异(Meyer等,1993)。20世纪70年代中后期,研究发现由于地形起伏,山地影像中相同地表覆被类型的光谱差异较大,直接进行土地覆盖分类精度较低(Hoffer,1975)。此后,很多研究开始关注山地卫星影像光谱辐射畸变的校正与归一化处理问题(Holben和Justice,1979;Civco,1989)。该领域一直是山地遥感研究的难点和热点领域(王少楠和李爱农,2012)。

Holben和Justice(1981)最早提出了采用影像不同波段比值的方法以降低山地地形效应。随后,各种经验、半经验以及物理的地形辐射校正模型得到了快速的发展。最初的地形辐射校正方法以经验模型(如C校正、SCS+C校正)为主,一般仅考虑太阳直射辐射在不同坡向的分布,校正结果与

地表真实情况有较大差别,且在局地入射角较大时会出现过校正现象(Meyer等,1993)。随着对遥感机理认知的不断深入,学者们开始尝试从机理角度对太阳辐射的不同分量进行校正(Proy等,1989;Sandmeier和Itten,1997),取得了较好的校正效果。然而,这些模型大多假设地表是各向同性的,不符合地表真实情况。以Minnaert模型(Cavayas,1987)、ACTOR 3模型(Richter,2010)等为代表的非朗伯体模型逐渐发展起来,但此类模型中有关地表非朗伯特性的参数主要以经验参数为主。近年来,国内外学者将大气校正、地形辐射校正及BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function)校正视为一个耦合的过程开展了协同校正研究,并取得了较好的效果(Li等,2012b,2015)。然而,如何获取对应尺度的BRDF校正参数是制约该模型广泛应用的关键问题(Flood,2013),也是今后山地影像地形辐射校正模型研究的一个重要方向。

(3)时空信息融合。山地地表的高时空异质性和快速变化特征对遥感影像时空分辨率提出更高要求。时空融合技术充分发挥了多源、多时相遥感影像的优势,利用影像间的互补信息,能够从不同角度提高影像时空连续性和时空分辨率,满足山地生态环境监测需求(边金虎等,2010;Shen等,2015)。

根据不同应用目的,现有影像时空融合技术可分为以提升时空连续性的多时相融合(Roy等,2010;Bian等,2015)、以提升空间分辨率的空谱融合(Pohl和Van Genderen,1998)和以提升时间分辨率的时空融合(Gao等,2006;Zhang等,2013)3类。以提升时空连续性为目标的多时相影像融合技术以单源或多源卫星的多次对地观测为基础,在某一特定的时间窗口内通过设定不同规则,选择最佳像元代表该时间窗口内的地表特征(Maxwell等,2007;Roy等,2010;Griffiths等,2013;Zeng等,2013)。针对不同的应用目标,目前已有多种不同的时相合成准则,如最大NDVI法(Holben,1986)、最小蓝波段反射率法(Vermote和Vermeulen,1999)、最大红波段差异法(Luo等,2008),以及多规则组合法(Carreiras和Pereira,2005)等。以提升空间分辨率为目标的多源数据融合技术充分利用高空间分辨率全色影像的空间细节信息和多光谱影像的光谱信息,进行以提高多

光谱影像空间分辨率为目标的融合。这类融合算法包括基于变量替换技术的融合算法(彩色变换、主成分替换、小波分解)、基于调制融合的方法以及基于多尺度分析的融合方法等(Pohl和Van Genderen, 1998)。在多源多时相影像融合方面,多源影像时空融合法能够利用低空间分辨率影像的时相信息和高空间分辨率影像的纹理信息,获得具有高时空分辨率的预测影像(Gao等, 2006; Roy等, 2008; Zhu等, 2010; Shen等, 2013)。以时空自适应滤波算法为代表的多源影像时空融合法得到了遥感界广泛的关注和应用(Gao等, 2015)。

已有影像时空融合技术大多未考虑山地地形特征,基本假设是用于时空融合的多源或多时相影像间具有较好的时空谱一致性。然而,山地地形起伏导致多源或多时相影像光谱辐射差异更加剧烈。有学者研究对比了地形辐射校正对合成影像应用效果的影响。如Vanonckelen等人(2015)采用地形辐射校正后的合成影像进行区域森林分类研究表明,地形辐射校正后的合成影像显著提高了分类精度;Chance等人(2016)发现地形辐射校正后的合成影像也能够提高森林变化监测精度。目前,尚缺乏专门针对山地影像的时空融合技术。此外,多源遥感数据时空融合获得的数据集其时空分辨率能否满足山地监测需求还有待进一步验证。

3.1.3 山地地表信息遥感提取

地表信息的涵盖面广,包括生态参量、土地覆被、水热通量等多个方面。遥感技术的发展为提取山地地表信息提供了重要的技术手段,其所要解决的主要问题之一就是如何建立遥感数据与山地地表信息之间的关系模型,以达到准确提取地表信息的目的。

(1)山地地表参量遥感提取。使用遥感手段提取山地地表参量的方法主要有经验模型法和物理模型法。经验模型法主要建立遥感观测信号与地表参数之间的经验回归模型,其原理简单且运算效率高。为有效提高山地遥感估算精度,国内外学者主要从以下2种方式构建经验模型:一是地形校正后的遥感数据参与经验模型构建(鲍晨光等, 2009; Yang等, 2013);二是地形数据(如海拔、坡度、坡向)直接参与经验模型构建(Blackard等, 2008; 靳华安等, 2016)。不过经验模型方法时空

外延性不强,其适用性经常受到时间和空间的限制。地表具有复杂的3维结构,电磁辐射与山地地表之间的相互作用是非常复杂的过程。目前,基于物理模型反演山地地表信息主要有以下策略(李爱农等, 2016):一是在考虑局地地形对成像几何影响的基础上,利用适用于平坦地表的物理模型提取地表信息(Gonsamo和Chen, 2014);二是在考虑山地空间异质性的基础上,适当调整已有平地物理模型驱动数据的取值范围,使之更符合山地实际情况(Pasolli等, 2015);三是发展专门针对山地的物理模型(Soenen等, 2010)。其中第3种策略建模思路较为复杂,但也将是山地生态参量反演建模可能取得重大突破的方向。

上述山地地表信息遥感提取方法主要基于瞬时的遥感观测数据,其估算结果在时间上不连续,不能有效反映地表信息的动态变化,也限制了其在陆面过程、气候模拟,以及全球变化等具有明显时间连续性特点研究中的应用。基于过程模型的陆表参量反演能够获得时间序列连续的反演产品(Wang等, 2016)。就复杂山地而言,由于目前大部分过程模拟模型并未表征水热能量等因素受地形影响而在地表进行再次分配的过程,因此将此类模型直接应用到复杂地形区时,可能会引入一定的偏差,同时降低了模拟结果的精度。针对这些问题,采用过程模型开展山地时间序列生态/陆表过程参量反演需从以下几个方面进行改进与突破:一是在地表过程模型中引入合适的地形因子,如Chen等人(2007)在进行山区景观尺度地形对BEPS(Boreal Ecosystem Productivity Simulator)模型模拟NPP(Net Primary Productivity)的影响研究发现,在不考虑地形效应时,模拟结果会产生5%的高估现象;二是通过模型耦合方法解决环境因子的地形问题。如Govind等人(2009)将TerrainLab模型与BEPS模型进行耦合,成功模拟了地形对土壤水分迁移的影响,提高了BEPS模型的模拟能力;三是将遥感反演的地表动态信息利用数据同化方法耦合到陆表过程模型中去。同化中需要设计多种同化策略,以选择最佳的适合山区陆表参量的同化策略。

(2)土地覆被信息遥感提取。山地土地覆被异常破碎,地形起伏,阴影、云雪常见,“同物异谱,异物同谱”现象突出,植被具有显著的地带性空间分布特征,野外实地空间采样困难,土地覆

被遥感自动制图的所有难题在山区都体现得非常充分。山地土地覆被信息遥感提取,既需要尽可能多的多源、多时相遥感信息和已有知识的参与,又需要发展科学的方法,有效融合异构信息,消除冗余,准确提取目标物土地覆被信息。

针对山地土地覆被制图的难点和特殊性,目前已发展了多种融合多源信息的方法,可归纳为以下3个方面:一是引入当前较为成熟的人工智能算法或数学方法,如物元模型(Li等,2012a)、高斯混合模型(Chen等,2013)、决策树模型(Zhu等,2014)、马尔可夫链模型(Aurdal等,2005)等,发展适用于山地的土地覆被分类算法并应用于山地土地覆被制图;二是发展新的分类算法,有效协同多源、多时相遥感数据(Campos等,2010;雷光斌等,2014;Reese等,2015)。当前,协同光学、微波和LiDAR等多源异构数据开展大面积山地土地覆被制图仍需克服数据归一化、地形起伏干扰等技术难题。三是引入各类专题信息和相关地学知识,参与到多源、异构信息的山区土地覆被制图研究中(Li等,2012a;Osman等,2013;吴炳方等,2014)。专题信息包括地形信息(海拔、坡度、坡向)、专题数据(植被图、土地利用图、土壤图)等,参与分类的知识包括各类地学规律(如垂直地带性规律、邻近相似规律等)、野外样点信息等。如何将各类专题数据和知识定量化引入到山地土地覆被分类工作中发展适用算法和知识挖掘器,是今后的重要研究内容。

3.1.4 山地遥感产品验证与尺度转换

为实现遥感数据与产品的有效验证,指导产品反演建模算法的改进并最终提高反演结果的应用化水平,国内外进行了大量的遥感产品验证工作。例如,美国国家航空航天局(NASA)特别成立了MODIS陆地产品(MODLAND)检验小组,对基于MODIS开发的各种全球陆地数据产品进行系统性的验证。欧洲太空局(ESA)也启动了欧洲陆地遥感仪器验证计划(VALERI),对MODIS、VEGETATION、AVHRR、POLDER、MERIS等传感器数据反演的多种陆地遥感数据产品进行全球范围的验证工作。在这些机构的推动下,遥感产品的验证理论、方法与技术取得显著进展(Wan,2002,2008;Coll等,2009;Hulley等,2009)。中国遥感界也开展了很多关于遥感产品验证方面

的研究和实验工作。如气象FY系列,中巴资源CBERS、海洋HY卫星和环境卫星HJ-1A/B等卫星数据的场外定标实验和验证(胡秀清等,2002;陈清莲等,2003;巩慧等,2010;韩启金等,2013)。此外,中国还设计并开展的一系列野外观测实验,如早期的“黑河地区地气相互作用野外观测实验研究”、国家重点基础研究发展计划支持的北京顺义遥感实验以及近期开展的黑河综合遥感联合实验等,在获取大量地面观测数据集的基础上也为当前遥感产品验证与遥感产品估算方法发展和改进奠定了实验基础(马明国等,2009;Li等,2013)。为了满足定量遥感和陆地表层系统科学研究等需求,中国建设了如怀来综合遥感试验站、黑河遥感试验研究站、长春净月潭遥感试验站等多个综合遥感野外台站,初步形成了遥感试验与地面观测网络。

由于地面观测站点与遥感产品空间尺度的不一致性,目前许多验证工作主要选择地表相对平坦均一的区域进行,这种评估结果在山区可能严重偏离实际情况。当前山地遥感产品的精度验证仍然存在一些问题,主要体现在:检验场不足、遥感像元尺度数据获取不确定性大、地面观测零散且可持续性差、地面观测自动化水平相对较低等。山地遥感实验可从3个方面提高:(1)发展可以兼顾样点代表性和可达性的山地空间采样方法;(2)发展尺度嵌套的“永久样点”布设方案;(3)改进已有观测方法,设计针对山地生态参量的测量仪器(李爱农等,2016)。

用于遥感产品验证的观测数据(地面、航空)是在不同时空尺度上对地表参量或过程的观测结果。观测数据的空间尺度包含植被的叶片、冠层、遥感像元等尺度,时间尺度又包括连续观测(如以分钟、小时等为间隔的涡动相关、气象观测等)和离散观测(如以月、季节、年等为间隔的地面采样观测)。因此,研究遥感产品的精度水平及其对陆表参量的时空表征能力,需要开展地面观测向遥感像元的时空尺度扩展。尺度扩展包括空间尺度扩展和时间扩展两个积分过程(Leuning等,1995)。以植被冠层空间尺度扩展为例,主要是将冠层内观测的所有叶片的相关生态参量(LAI、CO₂通量等)积分到整个冠层,从而上推到群落、遥感像元和区域尺度。然而,山地的地形及生态系统的复杂性导致山地遥感尺度转换机理更为复

杂。目前,学者们提出了多种异质地表尺度转换方法,但仍大多针对平坦地表,面向山地复杂地形条件下的尺度转换方法还处于起步阶段,其关键难点之一在于是如何选择恰当的参数化方案表达复杂地形特征(Helbig和Lowe, 2012)。

3.2 山地遥感综合应用研究进展

遥感科学研究的目的是为了应用。国际上,为了系统了解山地生态系统的各个要素及其相互作用,国际科学界相继提出了一系列山地研究计划。在以“全球山地计划(GMP)”、“全球高山生态环境观测研究计划(GLORIA)”、“全球山地生物多样性评估计划(GMBA)”等为代表的多个重大国际山地研究计划中,无不以遥感信息科学作为不可或缺的科学和技术基础。国内方面,中国约65%陆地国土为山地范畴,为山地遥感应用提供了大有可为的地表空间。学者们在中国山地环境、生物多样性、地质灾害,乃至流域可持续发展等领域已开展了大量山地遥感综合应用研究。山地遥感在中国的生态功能区划,生态安全屏障建设,山地国土空间安全等领域均发挥着不可替代的作用。山地遥感综合应用范围非常广泛,难以全面综述所有进展。本文仅以少数案例来说明山地遥感综合应用研究大体上表现出以下几个特点:

(1)山地遥感综合应用广度不断扩大。早期受遥感观测条件和信息提取能力的限制,山地遥感应用以直接基于山地地物的光谱特征进行地形制图、山区资源环境调查、地质灾害点判别为主。信息提取方法主要采用目视解译结合专家经验的方式(颀耀文等, 2002)。近年来,随着定量遥感技术、新型传感器技术以及信息自动提取技术的发展,山地遥感综合应用广度不断扩大。例如,在山地生态环境质量综合评估方面,在现有定量遥感模型或社会经济模型的支持下,遥感技术既可直接获取山地生态环境评估的相关参量,如植物多样性、初级生产力、水资源、土地资源现状及变化情况等(刘彦随等, 1997; 廖克, 2005; Li等, 2006),也可间接模拟如动物多样性、人类社会经济数据等(Zhao和Liang, 2009)。又如,在山地生物多样性调查方面,人们可利用山地遥感数据直接提取生物物种及其分布信息,表征区域生物多样性水平(胡海德等, 2012),也可间接通过遥

感获取生物的生境类型、生产力、光谱异质性以及环境要素,结合实地采样结果,构建相关模型来预测物种分布和多样性的格局(Nagendra, 2001; Leyequien等, 2007)。再如,以无人机、无线传感器网络、地基激光雷达等为代表的新型遥感对地观测技术的出现,为山地生物多样性调查提供亚米级的观测数据(Gonçalves等, 2016),也为山地灾害的快速应急响应提供支持。山地遥感在山区城镇化建设、山区精准农业发展、山地水土流失调查、山地河流健康评估等诸多领域应用越来越广泛。

(2)山地遥感传统应用领域深度不断深化。除新的山地遥感应用领域不断得到拓展外,传统山地遥感应用综合性及其深度也在不断深化。以山地灾害遥感调查为例,早期,国内外学者针对山地灾害遥感影像特征及提取技术研究做出了大量工作。如苏凤环等人(2008)、范建容等人(2008)、赵福军(2010)、葛永刚等人(2014)、Youssef等人(2015)对典型山地灾害如崩塌、滑坡、泥石流在遥感影像中的光谱、形状和纹理特征进行了总结。随后,学者们针对山地遥感影像提取的灾害特征与社会经济、生态环境等的损失程度建立了相关关系,发展了多种社会经济与生态系统山地灾害致损的遥感评估方法(Metternicht等, 2005; 花利忠等, 2008)。近年来,基于遥感技术的山地灾害危险性评估对于认识区域灾害发生规律以及防灾、减灾、救灾具有重要作用。山地灾害危险性评估包括重点区域的危险性分区、次生山地灾害的发生概率等。基于遥感技术的危险性分区的常规方法是将植被、地形、土壤、岩性、降水等关键因子栅格化,利用层次分析法、空间多尺度评价法、线性加权组合法等对山地灾害的危险性进行评估与分级(Shahabi和Hashim, 2015; 南希等, 2015)。国内学者对山地灾害的遥感预警研究也处于不断深化的发展阶段。以滑坡预警为例,主要是在高危险区域布设多种地面监测设备,对滑坡体深部位移、地表位移、应力应变、地下水、地声、降水等激发因子进行实时监测,根据激发因子的活跃程度、临界条件等对山地灾害的发生进行预警。遥感技术的作用主要为山地灾害提供直观的影像监测,以及提供地形、植被等辅助参数

(王玉和陈晓清, 2009)。近年来, 有学者号召将物联网技术引入山地灾害预警研究, 提高人类感知山地灾害的“智慧”程度(陈宁生和丁海涛, 2014)。可见, 山地遥感综合应用研究随着相关领域技术与方法的发展而不断深入。

(3)山地遥感综合应用多学科融合日趋紧密。近年来, 山地遥感的综合应用研究体现出多学科融合日趋紧密的趋势。以山地社会经济可持续发展管理为例, 服务山地社会经济可持续发展是山地遥感综合应用的重要目标。由于山区人口众多, 人地矛盾突出, 山地灾害频发, 决定了山区可持续发展研究是一项世界性的课题(邓伟等, 2013)。山地社会经济可持续发展管理需要从山地自然与人文的众多联系出发, 分析和决策过程中需考虑众多目标, 体现生态、文化、社会和经济目标的综合集成。

早期, 人们主要通过分析遥感获取的土地利用现状及其变化信息, 为可持续发展评估提供数据支撑(Chen, 2002; 刘彦随和陈百明, 2002; Foody, 2003)。近年来, 遥感与GIS技术的结合为可持续发展研究提供了重要技术手段和平台, 在各种可持续发展评估方法与评价模型的支持下, 国内外学者开展了山地土地资源、林地资源、山地城市发展形态等可持续发展的评估与模拟(Cassells等, 2009; 严冬等, 2016)。山地遥感数据是各种可持续发展评价指标的重要数据源, 通过遥感提取的自然因子与社会经济发展因子进行有机融合, 能够有效支撑社会可持续发展的管理。在山地遥感与其他学科的综合应用中, 需要解决多学科数据之间的时空尺度匹配问题、度量统一问题、误差累计问题等。此外, 不同学科模型(如辐射传输模型、水文模型、陆面过程模型、社会经济模型等)之间耦合方法也是山地可持续发展综合应用面临的重要难题。山地遥感在可持续发展管理研究中还需进一步打破不同应用领域隔离的现状, 推进山地人口、资源、环境和发展之间的协调研究。

4 山地遥感发展新机遇

4.1 “高分”等对地观测新技术的不断涌现

近年来, 对地观测技术迅速发展, 逐渐形成

了地—空—天一体化协同观测体系(Li等, 2013)。在近地遥感方面, 各种自动观测设备和观测网络不断出现, 以地基激光雷达技术、涡动相关技术、无线传感网技术为代表的新型遥感技术在植被状态、土壤水分等的监测中得到了广泛的应用(宫鹏, 2010; 于贵瑞等, 2014), 使空间分布式的长期定点观测成为可能; 在空基遥感方面, 无人机技术逐渐兴起, 各种适用于无人机的新型载荷如机载激光雷达、高光谱、多光谱相机不断涌现, 无人机在防灾减灾、资源环境调查、精细农业等领域正发挥重要作用(Verger等, 2014); 在天基遥感方面, 国内外遥感卫星数量不断提高(Gu和Tong, 2015), 特别是高分辨率、高光谱、高频、多角度对地观测传感器的发展, 具备了立体、多维、高中低分辨率结合的综合观测能力, 逐渐形成一星多用、多星组网、多网协同的联动机制。这些新型对地观测技术的出现为山地遥感基础理论的验证和山地地学现象的认知提供了新的契机, 对交通不便、时空异质性强烈的山地进行多维、立体和连续观测成为可能。

4.2 山地遥感基础理论与方法研究的系统发展

国内外学者在遥感基础理论与方法的研究成果为山地遥感带来了广阔的发展空间。在传统遥感科学研究理论发展的促进下, 目前山地遥感理论体系也不断取得新的进展(李爱农等, 2016)。首先, 在山地遥感数据处理方面, 已发展涵盖遥感数据的几何纠正、云雪自动检测、大气校正、地形辐射校正等山地针对性处理方法和技术, 为进一步技术集成和构建山地遥感归一化处理系统奠定了基础; 其次, 在基于山地遥感数据开展的山地地表关键参量遥感反演研究方面, 已出现很多开拓性探索工作, 在山地遥感辐射建模、山地遥感参量反演模型建立等方面取得了一系列研究成果; 最后, 已开展面向山地的遥感数据与产品验证研究工作, 如山地地面参量采样策略、采样结果验证等, 逐步认识到山地地面数据采集及空间尺度差异对山地遥感验证的重要影响。由此可见, 当前山地遥感的相关理论和方法研究, 为山地遥感的进一步发展奠定了很好的基础。

4.3 空间地球大数据的驱动作用

目前, 随着大数据时代的来临, 科学范式已经从模型驱动向数据驱动发生了转变(郭华东等,

2014)。遥感数据具有大数据的鲜明特点，正在融入大数据研究的主流，为地球系统科学研究带来了新的机遇。当前大数据的技术与方法主要集中在互联网大数据和商业大数据的应用。而以遥感数据为代表的科学大数据的深入研究将有助于推动地球科学和相关科学基础理论与研究方法的跨越发展。在当前大数据、稀疏表达、深度学习等最新信息科学技术的带动下(张良培, 2014)，遥感研究的方式与方法正变得多样化，为驱动面向山地的遥感技术应用与推广奠定了很好的技术基础。

4.4 山地遥感巨大的应用需求

在气候变化和人类作用不断增强的背景下，山地的响应与适应及其对全球经济、社会、环境可持续性的影响，已经引起科学界的高度关注。国际上先后发起的多项研究计划，遥感技术都成为这些计划具体实施的重要组成部分(邓伟等, 2013)，这些举措为山地遥感的发展创造了良机。此外，近年来，国家“一带一路”战略、长江经济带已经成为中国新时期重要发展战略。中国西南山区是“一带一路”战略、长江经济带的重要交汇点，尤其是面向南亚和东南亚的“一带一路”战略实施，中巴经济走廊、孟中印缅经济走廊、中尼印经济走廊的建设与中国西南山区的发展密切相关。“一带一路”沿线地域辽阔，亟需通过遥感的技术优势获取这些地区资源环境数据，特别是重要交通走廊山地灾害遥感调查与风险评估、跨境河流水资源开发利用及水灾害防治、山地生态环境演变及生计安全等方面，相关研究将进一步丰富山地遥感应用模型，并为机理探索与数据处理中关键问题的解决提供实践之道。

5 山地遥感研究面临的挑战

5.1 山地遥感基础理论与方法有待进一步突破

山地电磁波与地表的相互作用较平原地区更为复杂，信号失真严重，现有大部分遥感物理模型还难以准确诠释与表达山地遥感辐射特征。地形效应增加了山地遥感反演的难度，致使定量遥感技术在山地的发展受到限制(李爱农等, 2016)。此外，遥感像元本身具有一定的空间尺度，由于像元内部异质性可能造成不同分辨率数据得到的结果不匹配(李小文和王祎婷, 2013)。同时，由于

遥感观测数据和遥感物理模型本身的不确定性及其尺度依赖性，以及精度验证等环节的不确定性，给山地地表信息遥感提取及应用也带来了不确定性。在当前山地光学遥感数据处理及相关模型应用水平情况下，模型的适用尺度、适用边界需要科学界定，新的理论和模型需要不断推陈出新，山地遥感研究理论与方法有待进一步取得根本性突破。

5.2 山地多源遥感数据协同亟需加强

随着对地观测技术的发展，各种新型传感器不断涌现，为山地多源遥感数据协同应用创造了条件。单一遥感数据源在山地遥感研究中存在复杂的地形和尺度敏感性特征，基于单一遥感数据源的山地遥感研究效果仍不理想。多源遥感数据协同能够综合各种遥感观测手段的优势，弥补单一传感器的不足，是山地遥感研究可期取得突破的重要研究方向之一。多源遥感数据协同可分为3个层次：具有类似光谱和空间分辨率的多源遥感数据协同(如HJ-1A/B与Landsat-8)；具有相同观测原理但不同特征的多源遥感数据协同(如Landsat TM与MODIS)；不同观测原理遥感数据间的协同(如光学与微波、光学与激光雷达)。多源异构(波段设置、辐射性能、光谱响应、文件存储模式、不同的产品生产流程与算法差异等)遥感数据的归一化处理问题、多源遥感协同信息深层次挖掘问题、山地多尺度长时间序列遥感数据集构建问题仍是未来山地遥感多源数据协同研究面临的严峻挑战。

5.3 山地遥感综合应用有待进一步深入和“综合”

山地遥感可以看做遥感科学和山地生态、山地资源、山地灾害、山区发展等山地科学的交叉融合。除了要解决遥感自身理论和方法在山区的适用性问题外，山地遥感还需与其他应用领域紧密结合，在服务山地科学相关研究的同时进一步完善山地遥感理论。由于山地地表过程的复杂性以及山地遥感理论的不完善，目前山地遥感综合应用还存在很多不足，主要体现在应用领域和应用深度还有很大拓展和提升的空间。山地生态、水热参量遥感定量反演、数字山地模型构建及应用、生物多样性调查等领域还处于不断发展阶段，山地遥感应用还应更加“综合”。

6 结 语

山地复杂地表给遥感基础理论及其应用带来的困难是目前遥感学界普遍认同的问题,也是多年来学者们努力研究的内容。多年来,遥感学者们在山地光学遥感数据几何、光谱、角度归一化处理方法和实用技术以及生态参量反演算法等方面持续取得了显著进展。但是,目前,很多方法都是针对特定的传感器或地形特征发展起来的,不同模型和算法的普适和推广还有待进一步发展。山地遥感综合应用领域的发展特点主要包括应用范围日趋广泛、应用领域逐渐深化、多学科结合日趋紧密。在以“高分”、激光雷达、无线传感器网络等为代表的新对地观测技术的不断涌现、山地遥感理论研究的不断深入、以及山地遥感应应用领域的重大需求的新时代背景下,山地遥感的发展面临着重大的发展机遇。然而,山地遥感相关理论和方法的深入研究、多源遥感数据的协同以及山地遥感与相关学科的深度综合还需持续加强。

广义上,与山地表层信息获取及山地研究应用有关的遥感方法与技术均属于山地遥感的范畴,相关研究的实质是从对地观测电磁波信号中更好地提取和更综合地应用复杂山地地表信息与参量。不同历史时期人们对遥感内涵的认识是不同的,同样地,山地遥感的基本内涵也是随着科学研究的进展而不断深化。山地遥感的发展需要继承已有遥感科学的方法论,更需要以系统论的观点,更加整体和全面地统合山地生态和水文、物质和能量等各个子系统,借助物理学、地理学、数学和计算机科学等各个领域最新的研究成果不断促进学科发展。

志 谢 特别感谢曾给予本文指导和支持的各位领导、老师和朋友们!

参考文献(References)

Ali M A and Clausi D A. 2002. Automatic registration of SAR and visible band remote sensing images//Proceedings of the 2002 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toronto, Ontario, Canada: IEEE: 1331-1333[DOI: 10.1109/IGARSS.2002.1026106]

Aurdal L, Huseby R B, Eikvil L, Solberg R, Vikhamar D and Solberg A. 2005. Use of hidden Markov models and phenology for multi-temporal satellite image classification: applications to mountain

vegetation classification//Proceedings of the International Workshop on the Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images. Biloxi, MS, USA: IEEE: 220-224[DOI: 10.1109/AMTRSI.2005.1469877]

Bao C G, Fan W Y, Li M Z and Jiang H H. 2009. Effects of topographic correction on remote sensing estimation of forest biomass. Chinese Journal of Applied Ecology, 20(11): 2750-2756 (鲍晨光, 范文义, 李明洋, 姜欢欢. 2009. 地形校正对森林生物量遥感估测的影响. 应用生态学报, 20(11): 2750-2756)

Beniston M. 2003. Climatic change in mountain regions: a review of possible impacts//Climate Variability and Change in High Elevation Regions: Past, Present & Future. Netherlands: Springer: 5-31 [DOI: 10.1007/978-94-015-1252-7_2]

Bian J H, Li A N, Jin H A, Lei G B, Huang C Q and Li M X. 2013. Auto-registration and orthorectification algorithm for the time series HJ-1A/B CCD images. Journal of Mountain Science, 10(5): 754-767 [DOI: 10.1007/s11629-013-2545-4]

Bian J H, Li A N, Wang Q F and Huang C Q. 2015. Development of dense time series 30-m image products from the Chinese HJ-1A/B constellation: a case study in Zoige Plateau, China. Remote Sensing, 7(12): 16647-16671 [DOI: 10.3390/rs71215846]

Bian J H, Li A N, Song M Q, Ma L Q and Jiang J G. 2010. Reconstruction of NDVI time-series datasets of MODIS based on Savitzky-Golay filter. Journal of Remote Sensing, 14(4): 725-741 (边金虎, 李爱农, 宋孟强, 马利群, 蒋锦刚. 2010. MODIS植被指数时间序列Savitzky-Golay滤波算法重构. 遥感学报, 14(4): 725-741)

Blackard J A, Finco M V, Helmer E H, Holden G R, Hoppus M L, Jacobs D M, Lister A J, Moisen G G, Nelson M D, Riemann R, Ruefenacht B, Salajano D, Weyermann D L, Winterberger K C, Brandeis T J, Czaplowski R L, McRoberts R E, Patterson P L and Tymcio R P. 2008. Mapping U.S. forest biomass using nationwide forest inventory data and moderate resolution information. Remote Sensing of Environment, 112(4): 1658-1677 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.08.021]

Campos N, Lawrence R, McGlynn B and Gardner K. 2010. Effects of LiDAR-Quickbird fusion on object-oriented classification of mountain resort development. Journal of Applied Remote Sensing, 4(1): 043556 [DOI: 10.1117/1.3519370]

Carreiras J M B and Pereira J M C. 2005. SPOT-4 VEGETATION multi-temporal compositing for land cover change studies over tropical regions. International Journal of Remote Sensing, 26(7): 1323-1346 [DOI: 10.1080/01431160512331338005]

Cassels G F, Woodhouse I H, Mitchard E T A and Tembo M D. 2009. The use of ALOS PALSAR for supporting sustainable forest use in southern Africa: a case study in Malawi//Proceedings of the 2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Cape Town: IEEE: II -206- II -209 [DOI: 10.1109/IGARSS.2009.5418042]

Cavayas F. 1987. Modelling and correction of topographic effect using multi-temporal satellite images. Canadian Journal of Remote Sensing

- ing, 13(2): 49–67 [DOI: 10.1080/07038992.1987.10855108]
- Chance C M, Hermosilla T, Coops N C, Wulder M A and White J C. 2016. Effect of topographic correction on forest change detection using spectral trend analysis of Landsat pixel-based composites. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 44: 186–194 [DOI: 10.1016/j.jag.2015.09.003]
- Chandrasekhar S. 1960. *Radiative Transfer*. New York: Dover Publications Inc.
- Chen C X, Tang P and Wu H G. 2013. Improving classification of woodland types using modified prior probabilities and Gaussian mixed model in mountainous landscapes. *International Journal of Remote Sensing*, 34(23): 8518–8533 [DOI: 10.1080/01431161.2013.843805]
- Chen J M, Liu J, Leblanc S G, Lacaze R and Roujean J-L. 2003. Multi-angular optical remote sensing for assessing vegetation structure and carbon absorption. *Remote Sensing of Environment*, 84(4): 516–525 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00150-5]
- Chen N S and Ding H T. 2014. The application of the internet of things technology in mountainous hazards monitoring and warning: demand, current situation, problem and breakthrough prospect. *Chinese Journal of Nature*, 36(5): 352–355 (陈宁生, 丁海涛. 2014. 物联网技术在山地灾害监测预警中的应用——需求、现状、问题与突破展望. *自然杂志*, 36(5): 352–355)
- Chen Q L, Li T J and Ren H Q. 2003. The Radiometric Calibration and Validation of HY-1/COCTS. *Ocean Technology*, 22(1): 1–9 (陈清莲, 李铜基, 任洪启. 2003. HY-1卫星水色扫描仪的辐射定标与真实性检验. *海洋技术*, 22(1): 1–9)
- Chen S P. 1997. Geo-spatial/temporal analysis in geo-processing. *Journal of Remote Sensing*, 1(3): 161–171 (陈述彭. 1997. 遥感地学分析的时空维. *遥感学报*, 1(3): 161–171)
- Chen X W. 2002. Using remote sensing and GIS to analyse land cover change and its impacts on regional sustainable development. *International Journal of Remote Sensing*, 23(1): 107–124 [DOI: 10.1080/01431160010007051]
- Chen X F, Chen J M, An S Q and Ju W M. 2007. Effects of topography on simulated net primary productivity at landscape scale. *Journal of Environmental Management*, 85(3): 585–596 [DOI: 10.1016/j.jenvman.2006.04.026]
- Chen Y, Cheng D J and Song Y K. 1986. The development of mountain remote sensing and cartography. *Mountain Research*, 4(1): 92–95 (陈昱, 程地玖, 宋玉康. 1986. 山地遥感与地理制图的发展. *山地研究*, 4(1): 92–95)
- Civco D L. 1989. Topographic normalization of landsat thematic mapper digital imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55(9): 1303–1309
- Colby J D. 1991. Topographic normalization in rugged terrain. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57(5): 531–537
- Coll C, Wan Z M and Galve J M. 2009. Temperature-based and radiance-based validations of the V5 MODIS land surface temperature product. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D20): D20102 [DOI: 10.1029/2009JD012038]
- Combal B, Isaka H and Trotter C. 2000. Extending a turbid medium BRDF model to allow sloping terrain with a vertical plant stand. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(2): 798–810 [DOI: 10.1109/36.842009]
- Cui P. 2014. Progress and prospects in research on mountain hazards in China. *Progress in Geography*, 33(2): 145–152 (崔鹏. 2014. 中国山地灾害研究进展与未来应关注的科学问题. *地理科学进展*, 33(2): 145–152)
- Dai X L and Khorram S. 1998. The effects of image misregistration on the accuracy of remotely sensed change detection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(5): 1566–1577 [DOI: 10.1109/36.718860]
- Dare P and Dowman I. 2001. An improved model for automatic feature-based registration of SAR and SPOT images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 56(1): 13–28 [DOI: 10.1016/S0924-2716(01)00031-4]
- Deng W, Xiong Y L, Zhao J D, Qiu D L, Zhang Z Q and Wen A B. 2013. Enlightenment from international mountain research projects. *Journal of Mountain Science*, 31(3): 377–384 (邓伟, 熊永兰, 赵纪东, 邱敦莲, 张志强, 文安邦. 2013. 国际山地研究计划的启示. *山地学报*, 31(3): 377–384)
- Fan J R, Zhang J Q, Tian B W, Yan D and Tao H P. 2008. Investigation to the damaged farmland as a result of disasters induced by Wenchuan earthquake based on remote sensing: a Case Study of Tangjiasan area, Beichuan County, Sichuan Province. *Journal of Remote Sensing*, 12(6): 917–924 (范建容, 张建强, 田兵伟, 严冬, 陶和平. 2008. 汶川地震次生灾害毁坏耕地的遥感快速评估方法——以北川县唐家山地区为例. *遥感学报*, 12(6): 917–924)
- Fan W L, Chen J M, Ju W M and Nesbitt N. 2014. Hybrid geometric optical-radiative transfer model suitable for forests on slopes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(9): 5579–5586 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2290590]
- Fan Y Z, Ding M Y, Liu Z F and Wang D Y. 2007. Novel remote sensing image registration method based on an improved SIFT descriptor//*Proceedings of the SPIE 6790, MIPPR 2007: Remote Sensing and GIS Data Processing and Applications; and Innovative Multispectral Technology and Applications*. Wuhan, China: SPIE [DOI: 10.1117/12.751479]
- Fang J Y, Shen Z H and Cui H T. 2004. Ecological characteristics of mountains and research issues of mountain ecology. *Biodiversity Science*, 12(1): 10–19 (方精云, 沈泽昊, 崔海亭. 2004. 试论山地的生态特征及山地生态学的研究内容. *生物多样性*, 12(1): 10–19)
- Flood N. 2013. Testing the local applicability of MODIS BRDF parameters for correcting Landsat TM imagery. *Remote Sensing Letters*, 4(8): 793–802 [DOI: 10.1080/2150704X.2013.798709]
- Foody G M. 2003. Remote sensing of tropical forest environments: towards the monitoring of environmental resources for sustainable development. *International Journal of Remote Sensing*, 24(20):

- 4035–4046 [DOI: 10.1080/0143116031000103853]
- Gao F, Hilker T, Zhu X L, Anderson M, Masek J, Wang P J and Yang Y. 2015. Fusing Landsat and MODIS data for vegetation monitoring. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 3(3): 47–60 [DOI: 10.1109/MGRS.2015.2434351]
- Gao F, Masek J, Schwaller M and Hall F. 2006. On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: predicting daily Landsat surface reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(8): 2207–2218 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.872081]
- Gao F, Masek J and Wolfe R E. 2009. Automated registration and orthorectification package for Landsat and Landsat-like data processing. *Journal of Applied Remote Sensing*, 3: 033515 [DOI: 10.1117/1.3104620]
- 葛永刚, 崔鹏, 林勇明, 庄建琦, 贾松伟. 2014. 综合¹³⁷Cs, RS和GIS的土壤侵蚀评估和预测——以云南小江流域为例. *遥感学报*, 18(4): 887–901 [DOI: 10.11834/jrs.20143128]
- Giles P T. 2001. Remote sensing and cast shadows in mountainous terrain. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67(7): 833–839
- Goel N S, Rozehnal I and Thompson R L. 1991. A computer graphics based model for scattering from objects of arbitrary shapes in the optical region. *Remote Sensing of Environment*, 36(2): 73–104 [DOI: 10.1016/0034-4257(91)90032-2]
- Gonçalves J, Henriques R, Alves P, Sousa-Silva R, Monteiro A T, Lomba Â, Marcos B and Honrado J. 2016. Evaluating an unmanned aerial vehicle-based approach for assessing habitat extent and condition in fine-scale early successional mountain mosaics. *Applied Vegetation Science*, 19(1): 132–146 [DOI: 10.1111/avsc.12204]
- Gong H, Tian G L, Yu T, Gu X F, Gao H L and Li X Y. 2010. Vicarious radiometric calibration and validation of CBERS02B CCD data. *Journal of Remote Sensing*, 14(1): 1–12 (巩慧, 田国良, 余涛, 顾行发, 高海亮, 李小英. 2010. CBERS02B卫星CCD相机在轨辐射定标与真实性检验. *遥感学报*, 14(1): 1–12)
- Gong J Y and Li D R. 2008. Review of the development of geospatial information service technology. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (5): 5–10 (龚健雅, 李德仁. 2008. 论地球空间信息服务技术的发展. *测绘通报*, (5): 5–10)
- Gong P. 2010. Progress in recent environmental applications of wireless sensor networks. *Journal of Remote Sensing*, 14(2): 387–395 (宫鹏. 2010. 无线传感器网络技术环境应用进展. *遥感学报*, 14(2): 387–395)
- Gonsamo A and Chen J M. 2014. Improved LAI algorithm implementation to MODIS data by incorporating background, topography, and foliage clumping information. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(2): 1076–1088 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2247405]
- Govind A, Chen J M, Margolis H, Ju W M, Sonnentag O and Giasson M-A. 2009. A spatially explicit hydro-ecological modeling framework (BEPS-TerrainLab V2. 0): model description and test in a boreal ecosystem in Eastern North America. *Journal of Hydrology*, 367(3/4): 200–216 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.01.006]
- Griffiths P, van der Linden S, Kuemmerle T and Hostert P. 2013. A pixel-based landsat compositing algorithm for large area land cover mapping. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(5): 2088–2101 [DOI: 10.1109/JSTARS.2012.2228167]
- Gu D G and Alan G. 1998. Topographic normalization of Landsat TM images of forest based on subpixel sun-canopy-sensor geometry. *Remote Sensing of Environment*, 64(2): 166–175 [DOI: 10.1016/S0034-4257(97)00177-6]
- Gu X F, Tian G L, Li X W and Guo J Y. 2005. Remote Sensing Information Rationalization. *Science In China (Series E)*, 35(z1): 1–10 (顾行发, 田国良, 李小文, 郭建宁. 2005. 遥感信息的量化. *中国科学 E 辑*, 35(增刊): 1–10)
- Gu X F and Tong X D. 2015. Overview of China earth observation satellite programs [Space Agencies]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 3(3): 113–129 [DOI: 10.1109/MGRS.2015.2467172]
- Guo H D, Chen F and Qiu Y B. 2013. Development of earth observation over the past half century and future direction. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 28(Z1): 7–16 (郭华东, 陈方, 邱玉宝. 2013. 全球空间对地观测五十年及中国的发展. *中国科学院院刊*, 28(Z1): 7–16)
- Guo H D, Wang L Z, Chen F and Liang D. 2014. Scientific big data and digital Earth. *Chinese Science Bulletin*, 59(12): 1047–1054 (郭华东, 王力哲, 陈方, 梁栋. 2014. 科学大数据与数字地球. *科学通报*, 59(12): 1047–1054) [DOI: 10.1360/972013-1054]
- Han Q J, Fu Q Y, Pan Z Q, Wang A C and Zhang X W. 2013. Absolute radiometric calibration and validation analysis of ZY-3 using artificial targets. *Infrared and Laser Engineering*, 42(S1): 167–173 (韩启金, 傅俏燕, 潘志强, 王爱春, 张学文. 2013. 资源三号卫星靶标法绝对辐射定标与验证分析. *红外与激光工程*, 42(S1): 167–173)
- Helbig N and Lowe H. 2012. Shortwave radiation parameterization scheme for subgrid topography. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 117(D3): D03112 [DOI: 10.1029/2011JD016465]
- Hoffer R. 1975. Natural Resource Mapping in Mountainous Terrain by Computer Analysis of ERTS-1 Satellite Data. *Agricultural Experiment Station Research Bulletin. Agricultural Experiment Station Research Bulletin. No. 919*
- Holben B and Justice C. 1979. Evaluation and modeling of the topographic effect on the spectral response from nadir pointing sensors. *NASA TM 80305, Goddard Space Flight Centre*
- Holben B and Justice C. 1981. An examination of spectral band ratioing to reduce the topographic effect on remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 2(2): 115–133 [DOI: 10.1080/01431168108948349]
- Holben B N. 1986. Characteristics of maximum-value composite im-

- ages from temporal avhrr data. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11): 1417–1434 [DOI: 10.1080/01431168608948945]
- Hu H D, Li X Y, Du Y F, Zheng H F, Du B X and He X Y. 2012. Research advances in biodiversity remote sensing monitoring. *Chinese Journal of Ecology*, 31(6): 1591–1596 (胡海德, 李小明, 杜宇飞, 郑海峰, 都本绪, 何兴元. 2012. 生物多样性遥感监测方法研究进展. *生态学杂志*, 31(6): 1591–1596)
- Hu X Q, Rong Z G, Qiu K M, Zhang Y X, Zhang G S and Huang Y B. 2002. In-flight radiometric calibration for thermal channels of FY-1C meteorological satellite sensors using Qinghai Lake, water surface radiometric calibration site. *Journal of Remote Sensing*, 6(5): 328–333 (胡秀清, 戎志国, 邱康睦, 张玉香, 张广顺, 黄意玢. 2002. 利用青海湖水表面辐射校正场对FY-1C气象卫星热红外传感器进行绝对辐射定标. *遥感学报*, 6(5): 328–333)
- Hua L Z, Cui S H, Li X H, Yin K and Qiu Q Y. 2008. Remote sensing identification of earthquake triggered landslides and their impacts on ecosystem services: a case study of Wenchuan County. *Acta Ecologica Sinica*, 28(12): 5909–5916 (花利忠, 崔胜辉, 李新虎, 尹锴, 邱全毅. 2008. 汶川大地震滑坡体遥感识别及生态服务价值损失评估. *生态学报*, 28(12): 5909–5916)
- Huang Y Q. 1998. The method of compute the exterior orientation elements of SPOT image based on ridge estimation. *Journal of the PLA Institute of Surveying and Mapping*, 15(1): 25–27 (黄玉琪. 1998. 基于岭估计的SPOT影像外方位元素的解算方法. *解放军测绘学院学报*, 15(1): 25–27)
- Hulley G C, Hook S J, Manning E, Lee S-Y and Fetzer E. 2009. Validation of the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) version 5 land surface emissivity product over the Namib and Kalahari deserts. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D19): D19104 [DOI: 10.1029/2009JD012351]
- Jie Y W, Chen H L and Xu K B. 2002. The using of digital remote sensing image method in soil erosion survey. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 38(2): 157–162 (颀耀文, 陈怀录, 徐克斌. 2002. 数字遥感影像判读法在土壤侵蚀调查中的应用. *兰州大学学报(自然科学版)*, 38(2): 157–162)
- Jin H A, Li A N, Bian J H, Zhao W, Zhang Z J and Nan X. 2016. Leaf Area Index (LAI) estimation from remotely sensed observations in different topographic gradients over Southwestern China. *Remote Sensing Technology and Application*, 31(1): 42–50 (靳华安, 李爱农, 边金虎, 赵伟, 张正健, 南希. 2016. 西南地区不同山地环境梯度叶面积指数遥感反演. *遥感技术与应用*, 31(1): 42–50 [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2016.1.0042]
- Kennedy R E and Cohen W B. 2003. Automated designation of tie-points for image-to-image coregistration. *International Journal of Remote Sensing*, 24(17): 3467–3490 [DOI: 10.1080/0143116021000024249]
- Lei G B, Li A N, Bian J H, Zhang Z J, Zhang W and Wu B F. 2014. A practical method for automatically identifying the evergreen and deciduous characteristic of forests at mountainous areas: a case study in Mt. Gongga region. *Acta Ecologica Sinica*, 34(24): 7210–7221 (雷光斌, 李爱农, 边金虎, 张正健, 张伟, 吴炳方. 2014. 基于阈值法的山区森林常绿、落叶特征遥感自动识别方法——以贡嘎山地区为例. *生态学报*, 34(24): 7210–7221)
- Leuning R, Kelliher F M, de Pury D G G and Schulze E D. 1995. Leaf nitrogen, photosynthesis, conductance and transpiration: scaling from leaves to canopies. *Plant, Cell & Environment*, 18(10): 1183–1200 [DOI: 10.1111/j.1365-3040.1995.tb00628.x]
- Leyequien E, Verrelst J, Slot M, Schaepman-Strub G, Heitkönig I M A and Skidmore A. 2007. Capturing the fugitive: applying remote sensing to terrestrial animal distribution and diversity. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9(1): 1–20 [DOI: 10.1016/j.jag.2006.08.002]
- Li A N, Jiang J G, Bian J H and Deng W. 2012a. Combining the matter element model with the associated function of probability transformation for multi-source remote sensing data classification in mountainous regions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 67: 80–92 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2011.10.008]
- Li A N, Jiang J G, Bian J H, Lei G B and Huang C Q. 2012. Experiment and accuracy analysis of automated registration and orthorectification for landsat-like images based on AROP. *Remote Sensing Technology and Application*, 27(1): 23–32 (李爱农, 蒋锦刚, 边金虎, 雷光斌, 黄成全. 2012. 基于AROP程序包的类Landsat遥感影像配准与正射纠正试验和精度分析. *遥感技术与应用*, 27(1): 23–32)
- Li A N, Wang Q F, Bian J H and Lei G B. 2015. An improved physics-based model for topographic correction of Landsat TM images. *Remote Sensing*, 7(5): 6296–6319 [DOI: 10.3390/rs70506296]
- Li A N, Wang A S, Liang S L and Zhou W C. 2006. Eco-environmental vulnerability evaluation in mountainous region using remote sensing and GIS - A case study in the upper reaches of Minjiang River, China. *Ecological Modelling*, 192(1/2): 175–187 [DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2005.07.005]
- Li A N, Yin G F, Jin H A, Bian J H and Zhao W. 2016. Principles and methods for the retrieval of biophysical variables in mountainous areas. *Remote Sensing Technology and Application*, 31(1): 1–11 (李爱农, 尹高飞, 靳华安, 边金虎, 赵伟. 2016. 山地地表生态参量遥感反演的理论、方法与问题. *遥感技术与应用*, 31(1): 1–11)
- Li D R, Tong Q X, Li R X, Gong J Y and Zhang L P. 2012. Current issues in high-resolution Earth observation technology. *Science China Earth Sciences*, 55(7): 1043–1051 (李德仁, 童庆禧, 李荣兴, 龚健雅, 张良培. 2012. 高分辨率对地观测的若干前沿科学问题. *中国科学: 地球科学*, 42(6): 805–813 [DOI: 10.1007/s11430-012-4445-9]
- Li F Q, Jupp D L B, Thankappan M, Lyburner L, Mueller N, Lewis A and Held A. 2012b. A physics-based atmospheric and BRDF correction for Landsat data over mountainous terrain. *Remote Sensing of Environment*, 124: 765–770 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.06.018]
- 李新, 陈贤章, 增群柱. 1996. 利用数字地形模型计算复杂地形下的

- 短波辐射平衡. 冰川冻土, 18(S1): 344–353
- Li X, Cheng G D, Liu S M, Xiao Q, Ma M G, Jin R, Che T, Liu Q H, Wang W Z, Qi Y, Wen J G, Li H Y, Zhu G F, Guo J W, Ran Y H, Wang S G, Zhu Z L, Zhou J, Hu X L and Xu Z W. 2013. Heihe watershed allied telemetry experimental research (HiWATER): scientific objectives and experimental design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(8): 1145–1160 [DOI: 10.1175/BAMS-D-12-00154.1]
- Li X W. 2006. Retrospect, prospect and innovation in quantitative remote sensing. *Journal of Henan University (Natural Science)*, 35(4): 49–56 (李小文. 2006. 定量遥感的发展与创新. 河南大学学报(自然科学版), 35(4): 49–56)
- Li X W and Strahler A H. 1985. Geometric-optical modeling of a conifer forest canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-23(5): 705–721 [DOI: 10.1109/TGRS.1985.289389]
- Li X W and Strahler A H. 1992. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: effect of crown shape and mutual shadowing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2): 276–292 [DOI: 10.1109/36.134078]
- Li X W, Strahler A H and Woodcock C E. 1995. A hybrid geometric optical-radiative transfer approach for modeling albedo and directional reflectance of discontinuous canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2): 466–480 [DOI: 10.1109/36.377947]
- Li X W and Wang Y T. 2013. Prospects on future developments of quantitative remote sensing. *Acta Geographica Sinica*, 68(9): 1163–1169 (李小文, 王祎婷. 2013. 定量遥感尺度效应刍议. 地理学报, 68(9): 1163–1169)
- Liang S L, Li X W, Wang J D. 2013. *Quantitative Remote Sensing, Concept and Algorithm*. BeiJing, Science Press (梁顺林, 李小文, 王锦地. 2013. 定量遥感: 理念与算法. 北京: 科学出版社)
- Liao K. 2005. Mapping method of eco-environmental remote sensing complex series. *Acta Geographica Sinica*, 60(3): 479–486 (廖克. 2005. 生态环境遥感综合系列制图方法. 地理学报, 60(3): 479–486)
- Liu Q H, Tang Y, Li J, Du Y M, Wen J G, Yao Y J, Huang H G and Tian G L. 2009. Research progress on forward modeling and inversion of remote sensing radiative transfer. *Journal of Remote Sensing*, 13(S1): 168–182 (柳钦火, 唐勇, 李静, 杜永明, 闻建光, 姚延娟, 黄华国, 田国良. 2009. 遥感辐射传输建模与反演研究进展. 遥感学报, 13(S1): 168–182).
- Liu Y S and Chen B M. 2002. The study framework of land use/cover change based on sustainable development in China. *Geographical Research*, 21(3): 324–330 (刘彦随, 陈百明. 2002. 中国可持续发展问题与土地利用/覆被变化研究. 地理研究, 21(3): 324–330)
- Liu Y S, Ni S X and Jiang J J. 1997. A synthetical evaluation of the eco-environment quality in the mountainous region of Southern Shaanxi Province. *Mountain Research*, 15(3): 178–182 (刘彦随, 倪绍祥, 蒋建军. 1997. 陕南山地生态环境质量综合评价. 山地研究, 15(3): 178–182)
- Luo Y, Trishchenko A P and Khlopenkov K V. 2008. Developing clear-sky, cloud and cloud shadow mask for producing clear-sky composites at 250-meter spatial resolution for the seven MODIS land bands over Canada and North America. *Remote Sensing of Environment*, 112(12): 4167–4185 [DOI: 10.1016/j.rse.2008.06.010]
- Ma M G, Liu Q, Yan G J, Chen E X, Xiao Q, Su P X, Hu Z Y, Li X, Niu Z, Wang W Z, Qian J B, Song Y, Ding S S, Xin X Z, Ren H Z, Huang C L, Jin R, Che T and Chu R Z. 2009. Simultaneous remote sensing and ground-based experiment in the Heihe River Basin: Experiment of forest hydrology and arid region hydrology in the middle reaches. *Advances in Earth Science*, 24(7): 681–695 (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. 2009. 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, 24(7): 681–695)
- Maxwell S K, Schmidt G L and Storey J C. 2007. A multi-scale segmentation approach to filling gaps in Landsat ETM+ SLC-off images. *International Journal of Remote Sensing*, 28(23): 5339–5356 [DOI: 10.1080/01431160601034902]
- Metternicht G, Hurni L and Gogu R. 2005. Remote sensing of landslides: an analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments. *Remote Sensing of Environment*, 98(2/3): 284–303 [DOI: 10.1016/j.rse.2005.08.004]
- Meyer P, Itten K I, Kellenberger T, Sandmeier S and Sandmeier R. 1993. Radiometric corrections of topographically induced effects on Landsat TM data in an alpine environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 48(4): 17–28 [DOI: 10.1016/0924-2716(93)90028-L]
- Mousivand A, Verhoef W, Menenti M and Gorte B. 2015. Modeling top of atmosphere radiance over heterogeneous non-lambertian rugged terrain. *Remote Sensing*, 7(6): 8019–8044 [DOI: 10.3390/rs70608019]
- Nagendra H. 2001. Using remote sensing to assess biodiversity. *International Journal of Remote Sensing*, 22(12): 2377–2400 [DOI: 10.1080/01431160117096]
- Nan X, Yan D, Li A N, Lei G B and Cao X M. 2015. Mountain hazards risk zoning in the Upper Reaches of Minjiang River. *Journal of Catastrophology*, 30(4): 113–120 (南希, 严冬, 李爱农, 雷光斌, 曹小敏. 2015. 岷江上游流域山地灾害危险性分区. 灾害学, 30(4): 113–120)
- Ross J. 1981. *The radiation regime and architecture of plant stands*. Springer Science & Business Media.
- Osman J, Inglada J, Dejoux J-F, Hagolle O and Dedieu G. 2013. Crop mapping by supervised classification of high resolution optical image time series using prior knowledge about crop rotation and topography//Proceedings of the 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Melbourne, VIC: IEEE: 2832-

- 2835 [DOI: 10.1109/IGARSS.2013.6723414]
- Pasolli L, Asam S, Castelli M, Bruzzone L, Wohlfahrt G, Zebisch M and Notarnicola C. 2015. Retrieval of Leaf Area Index in mountain grasslands in the Alps from MODIS satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 165: 159–174 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.04.027]
- Pohl C and Van Genderen J L. 1998. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. *International Journal of Remote Sensing*, 19(5): 823–854 [DOI: 10.1080/014311698215748]
- Proy C, Tanré D and Deschamps P Y. 1989. Evaluation of topographic effects in remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 30(1): 21–32 [DOI: 10.1016/0034-4257(89)90044-8]
- Reese H, Nordkvist K, Nyström M, Bohlin J and Olsson H. 2015. Combining point clouds from image matching with SPOT 5 multispectral data for mountain vegetation classification. *International Journal of Remote Sensing*, 36(2): 403–416 [DOI: 10.1080/215704X.2014.999382]
- Richter R. 2010. ACTOR-2/3 User Guide Version 7. 1: DLR-German Aerospace Center Remote Sensing Data Center
- Roy D P, Ju J C, Lewis P, Schaaf C, Gao F, Hansen M and Lindquist E. 2008. Multi-temporal MODIS-Landsat data fusion for relative radiometric normalization, gap filling, and prediction of Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 112(6): 3112–3130 [DOI: 10.1016/j.rse.2008.03.009]
- Roy D P, Ju J C, Kline K, Scaramuzza P L, Kovalskyy V, Hansen M, Loveland T R, Vermote E and Zhang C S. 2010. Web-enabled Landsat Data (WELD): Landsat ETM+ composited mosaics of the conterminous United States. *Remote Sensing of Environment*, 114(1): 35–49 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.08.011]
- Sandmeier S and Itten K I. 1997. A physically-based model to correct atmospheric and illumination effects in optical satellite data of rugged terrain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(3): 708–717 [DOI: 10.1109/36.581991]
- Schaaf C B, Li X W and Strahler A H. 1994. Topographic effects on bidirectional and hemispherical reflectances calculated with a geometric-optical canopy model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(6): 1186–1193 [DOI: 10.1109/36.338367]
- Shahabi H and Hashim M. 2015. Landslide susceptibility mapping using GIS-based statistical models and Remote sensing data in tropical environment. *Scientific Reports*, 5(3): 9899 [DOI: 10.1038/srep09899]
- Shen H F, Li X H, Cheng Q, Zheng C, Yang G, Li H F and Zhang L P. 2015. Missing information reconstruction of remote sensing data: a technical review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 3(3): 61–85 [DOI: 10.1109/MGRS.2015.2441912]
- Shen H F, Wu P H, Liu Y L, Ai T H, Wang Y and Liu X P. 2013. A spatial and temporal reflectance fusion model considering sensor observation differences. *International Journal of Remote Sensing*, 34(12): 4367–4383 [DOI: 10.1080/01431161.2013.777488]
- Soenen S A, Peddle D R, Hall R J, Coburn C A and Hall F G. 2010. Estimating aboveground forest biomass from canopy reflectance model inversion in mountainous terrain. *Remote Sensing of Environment*, 114(7): 1325–1337 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.12.012]
- Su F H, Liu H J and Han Y S. 2008. The extraction of mountain hazard induced by Wenchuan Earthquake and analysis of its distributing characteristic. *Journal of Remote Sensing*, 12(6): 956–963 (苏凤环, 刘洪江, 韩用顺. 2008. 汶川地震山地灾害遥感快速提取及其分布特点分析. *遥感学报*, 12(6): 956–963)
- Teillet P M, Guindon B and Goodenough D G. 1982. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 8(2): 84–106 [DOI: 10.1080/07038992.1982.10855028]
- Tong Q X. 2005. Earth observation from space and human demension for global change studies. *Advances in Earth Science*, 20(1): 1–5 (童庆禧. 2005. 空间对地观测与全球变化的人文因素. *地球科学进展*, 20(1): 1–5)
- Toutin T. 2004. Review article: geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. *International Journal of Remote Sensing*, 25(10): 1893–1924 [DOI: 10.1080/0143116031000101611]
- Townshend J R G, Justice C O, Gurney C and Mcmanus J. 1992. The impact of misregistration on change detection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(5): 1054–1060 [DOI: 10.1109/36.175340]
- Van Wie P and Stein M. 1977. A landsat digital image rectification system. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 15(3): 130–137 [DOI: 10.1109/TGE.1977.6498970]
- Vanonckelen S, Lhermitte S and Van Rompaey A. 2015. The effect of atmospheric and topographic correction on pixel-based image composites: improved forest cover detection in mountain environments. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 35: 320–328 [DOI: 10.1016/j.jag.2014.10.006]
- Vergier A, Vigneau N, Chéron C, Gilliot J-M, Comar A and Baret F. 2014. Green area index from an unmanned aerial system over wheat and rapeseed crops. *Remote Sensing of Environment*, 152: 654–664 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.06.006]
- Verhoef W. 1984. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model. *Remote sensing of environment*, 16(2): 125–141 [DOI: 10.1016/0034-4257(84)90057-9]
- Vermote E and Vermeulen A. 1999. Atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (MOD09). ATBD version. 4
- Wan Z M. 2002. Estimate of noise and systematic error in early thermal infrared data of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). *Remote Sensing of Environment*, 80(1): 47–54 [DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00266-8]
- Wan Z M. 2008. New refinements and validation of the MODIS Land-Surface Temperature/Emissivity products. *Remote Sensing of En-*

- vironment, 112(1): 59–74 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.06.026]
- Wang G X, Deng W, Yang Y and Cheng G W. 2011. The advances, priority and developing trend of alpine ecology. *Journal of Mountain Science*, 29(2): 129–140 (王根绪, 邓伟, 杨燕, 程根伟. 2011. 山地生态学的研究进展、重点领域与趋势. *山地学报*, 29(2): 129–140)
- Wang J Y, Li A N and Bian J H. 2016. Simulation of the grazing effects on grassland aboveground net primary production using DNDC model combined with time-series remote sensing data—A case study in Zoige Plateau, China. *Remote Sensing*, 8(3): 168 [DOI: 10.3390/rs8030168]
- Wang R H. 2001. EFP aerial triangulation of satellite borne three-line array CCD image. *Science of Surveying and Mapping*, 26(4): 1–5 (王任享. 2001. 卫星摄影三线阵CCD影像的EFP法空中三角测量(一). *测绘科学*, 26(4): 1–5)
- Wang S N and Li A N. 2012. The progress in the study of topographic radiometric correction models. *Remote Sensing for Land & Resources*, (2): 1–6 (王少楠, 李爱农. 2012. 地形辐射校正模型研究进展. *国土资源遥感*, (2): 1–6)
- Wang Y and Chen X Q. 2009. Design of the geohazard monitoring and warning system in Wenchuan Earthquake Area. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 41(S1): 37–44 (王玉, 陈晓清. 2009. 汶川地震区次生山地灾害监测预警体系初步构想. *四川大学学报(工程科学版)*, 41(S1): 37–44)
- Weiss D J and Walsh S J. 2009. Remote sensing of mountain environments. *Geography Compass*, 3(1): 1–21 [DOI: 10.1111/j.1749-8198.2008.00200.x]
- Wu B F, Yuan Q Z, Yan C Z, Wang Z M, Yu X F, Li A N, Ma R H, Huang J L, Chen J S, Chang C, Liu C L, Zhang L, Li X S, Zeng Y and Bao A M. 2014. Land cover changes of China from 2000 to 2010. *Quaternary Sciences*, 34(4): 723–731 (吴炳方, 苑全治, 颜长珍, 王宗明, 于信芳, 李爱农, 马荣华, 黄进良, 陈劲松, 常存, 刘成林, 张磊, 李晓松, 曾源, 包安明. 2014. 21世纪前十年的中国土地覆盖变化. *第四纪研究*, 34(4): 723–731)
- Xu G H, Tian G L, Wang C, Niu Z, Hao P W, Huang B and Liu Z. 1996. Remote sensing information science: progress and prospect. *Acta Geographica Sinica*, 51(5): 385–397 (徐冠华, 田国良, 王超, 牛铮, 郝鹏威, 黄波, 刘震. 1996. 遥感信息科学的进展和展望. *地理学报*, 51(6): 385–397)
- Yan D, Li A N, Nan X, Lei G B and Cao X M. 2016. The study of urban land scenario simulation in mountain area based on modified Dyna-CLUE model and SDM: a case study of the upper reaches of Minjiang river. *Journal of Geo-information Science*, 18(4): 514–525 (严冬, 李爱农, 南希, 雷光斌, 曹小敏. 2016. 基于Dyna-CLUE改进模型和SD模型耦合的山区城镇用地情景模拟研究——以岷江上游地区为例. *地球信息科学学报*, 18(4): 514–525)
- Yan G J, Wang T X, Jiao Z H, Mu X H, Zhao J and Chen L. 2016. Topographic radiation modeling and spatial scaling of clear-sky land surface longwave radiation over rugged terrain. *Remote Sensing of Environment*, 172: 15–27
- Yan G J, Zhu C G, Guo J, Wang J D and Li X W. 2000. A model based radiative transfer algorithm to correct remotely sensed image in mountainous area. *Journal of Image and Graphics*, 5(1): 11–15 (阎广建, 朱重光, 郭军, 王锦地, 李小文. 2000. 基于模型的山地遥感图像辐射订正方法. *中国图象图形学报*, 5(1): 11–15)
- Yang G J, Pu R L, Zhang J X, Zhao C J, Feng H K and Wang J H. 2013. Remote sensing of seasonal variability of fractional vegetation cover and its object-based spatial pattern analysis over mountain areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 77: 79–93 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.11.008]
- Youssef A M, Pradhan B, Al-Kathery M, Bathrellos G D and Skilodimou H D. 2015. Assessment of rockfall hazard at Al-Noor Mountain, Makkah city (Saudi Arabia) using spatio-temporal remote sensing data and field investigation. *Journal of African Earth Sciences*, 101: 309–321 [DOI: 10.1016/j.jafarearsci.2014.09.021]
- Yu G R, Zhang L M and Sun X M. 2014. Progresses and prospects of Chinese terrestrial ecosystem flux observation and research network (ChinaFLUX). *Progress in Geography*, 33(7): 903–917 (于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏. 2014. 中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)的主要进展及发展展望. *地理科学进展*, 33(7): 903–917)
- Zeng C, Shen H F and Zhang L P. 2013. Recovering missing pixels for Landsat ETM + SLC-off imagery using multi-temporal regression analysis and a regularization method. *Remote Sensing of Environment*, 131: 182–194 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.12.012]
- Zhang L P. 2014. Advance and future challenges in hyperspectral target detection. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 39(12): 1387–1394, 1400 (张良培. 2014. 高光谱目标探测的进展与前沿问题. *武汉大学学报(信息科学版)*, 39(12): 1387–1394, 1400)
- Zhang W, Li A N, Jin H A, Bian J H, Zhang Z J, Lei G B, Qin Z H and Huang C Q. 2013. An enhanced spatial and temporal data fusion model for fusing Landsat and MODIS surface reflectance to generate high temporal landsat-like data. *Remote Sensing*, 5(10): 5346–5368 [DOI: 10.3390/rs5105346]
- Zhang Z X and Zhou Y Q. 1988. The solution of spot satellite image exterior orientation elements. *Journal of Geomatics*, (2): 29–35, 43 (张祖勋, 周月琴. 1988. SPOT卫星图像外方位元素的解求. *武测科技*, (2): 29–35, 43)
- Zhao F J. 2010. Seismic Disaster Information Extraction from Remotely Sensed Imagery. Haerbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration (赵福军. 2010. 遥感影像震害信息提取技术研究. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所)
- Zhao R and Liang D-S. 2009. Research on expression method of GDP data based on GRID//Proceedings of the 2nd International Congress on Image and Signal Processing. Tianjin: IEEE: 1–4 [DOI: 10.1109/CISP.2009.5303078]
- Zhao W and Li A N. 2015. A review on land surface processes modeling over complex terrain. *Advances in Meteorology*, 2015: Art-

- icle ID 607181 [DOI: 10.1155/2015/607181]
- Zhou C H and Lu X J. 1998. Preliminary discussion on geo-information science. *Acta Geographica Sinica*, 53(4): 372–380 (周成虎, 鲁学军. 1998. 对地球信息科学的思考. *地理学报*, 53(4): 372–380)
- Zhou W C. 1985. The applications of digital image processing for remote sensing to mountain research. *Mountain Research*, 3(3): 189–192 (周万村. 1985. 遥感数字图象处理在山地研究中的应用. *山地研究*, 3(3): 189–192)
- Zhu L J, Xiao P F, Feng X Z, Zhang X L, Wang Z and Jiang L Y. 2014. Support vector machine-based decision tree for snow cover extraction in mountain areas using high spatial resolution remote sensing image. *Journal of Applied Remote Sensing*, 8(1): 084698 [DOI: 10.1117/1.JRS.8.084698]
- Zhu X L, Chen J, Gao F, Chen X H and Masek J G. 2010. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions. *Remote Sensing of Environment*, 114(11): 2610–2623 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.05.032]

Progresses, opportunities, and challenges of mountain remote sensing research

LI Ainong, BIAN Jinhu, ZHANG Zhengjian, ZHAO Wei, YIN Gaofei

Center for Digital Mountain and Remote Sensing Application, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

Abstract: Global mountainous areas account for about 24 percent of the total global terrestrial area. The mountain area in China makes up approximately 65 percent of the national land area. Thus, China can be described as a mountainous country. Mountains are an important resource foundation and are a vital ecological defense for the existence and development of human beings. However, because of the special energy gradients, mountainous regions are centralized areas for the development of natural hazards. Besides, mountainous areas also serve as a sensitive indicator for global change studies because of their vertical environment gradient. Mountainous areas has become a hotspot and area of focus for many earth system studies. Remote sensing is one of the most important and effective tools for mountain studies. It can provide continuous spatio-temporal land cover, feature status, and historical change information. However, given the dramatically different geometric characteristics of mountainous surface and the various special ecosystem structures and functions, remote sensing applications in mountainous areas still face many challenges and difficulties, including serious geometric and radiometric distortion problems, more complex energy balance process, and more prominent ill-condition retrieving problem for ecosystem parameters than that of the plain area. Mountain remote sensing, which mainly focuses on the basic theories, methodologies, and integrated applications of remote sensing in mountainous environments, is a research branch of the remote sensing science. Although the word “mountain remote sensing” firstly began to be used in the middle 1980s, the research on remote sensing in mountainous areas can be tracked back to nearly 100 years ago because topographic mapping began early in the photogrammetry remote sensing field. In recent decades, issues regarding the basic theories and integrative applications of mountain remote sensing have attracted worldwide attention. Mountain remote sensing has become one of the most popular research areas in remote sensing sciences. We summarized the scientific significance and several frontier issues in mountain remote sensing studies. Currently, the main contents of mountain remote sensing research should include but not be limited to the following aspects: (1) the interaction mechanism and modeling theory between electromagnetic signatures and mountain land surfaces; (2) spatial-temporal-spectral normalization methodologies for mountainous remote sensing data; (3) remote sensing modeling, retrieving, and assimilation methodologies for land surface information in mountainous areas; (4) scaling effects and the validation of remote sensing products in mountainous areas; and (5) the integrated applications of remote sensing information in mountain studies. Currently, mountain remote sensing faces unprecedented developing opportunities because of the following reasons: (1) emerging novel remote sensing observation technologies, (2) in-depth development of basic theories and methodologies of mountain remote sensing, (3) driving forces from earth science big data studies, and (4) great application demands of mountain remote sensing. In this work, we reviewed the research progresses of basic theories and applications of mountain remote sensing in recent years, and analyzed the opportunities, challenges, and future prospects of mountain remote sensing in the modern era.

Key words: mountain remote sensing, model, scale conversion, ill-conditioned inversion, data assimilation, topographic effect

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41271433, 41571373, 41301385, 41401425)