

遥感技术在土壤侵蚀研究中的应用述评

张 晓^{1,2}, 赵文武^{1,2}, 刘源鑫^{1,2}

(1. 北京师范大学 地理科学学部 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

2. 北京师范大学 地理科学学部 陆地表层系统科学与可持续发展研究院, 北京 100875)

摘 要: [目的] 对遥感技术在土壤侵蚀研究中的应用进行述评, 探索土壤侵蚀遥感研究的发展方向, 并为研究者快速选择适宜的遥感数据源和研究方法提供参考。[方法] 通过文献查阅, 从不同研究方面开展综述和分析。[结果] 针对不同研究区域和主题, 总结了土壤侵蚀研究中常用遥感平台和数据源, 综述了遥感技术在区域土壤侵蚀特征识别、监测与尺度效应研究中的应用。以及遥感技术在通用土壤流失方程关键因子获取中的应用。同时分析了目前研究中存在的问题并提出相应建议。[结论] 遥感技术作为开展大范围、长时间序列土壤侵蚀研究的重要技术手段, 在我国土壤侵蚀研究中发挥了巨大作用。但实际应用中也存在基层遥感数据时效性不强、数据源单一和识别因子针对性不强等问题。其高效应用和推广需要技术层面和人员、经济支持层面共同发展与创新。

关键词: 土壤侵蚀; 遥感; 监测; RUSLE

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2017)02-0228-11

中图分类号: TP79, S157.1

文献参数: 张 晓, 赵文武, 刘源鑫. 遥感技术在土壤侵蚀研究中的应用述评[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 228-238. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.035; Zhang Xiao, Zhao Wenwu, Liu Yuanxin. Application of Remote Sensing Technology in Research of Soil Erosion: A Review[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2): 228-238. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.035

Application of Remote Sensing Technology in Research of Soil Erosion: A Review

ZHANG Xiao^{1,2}, ZHAO Wenwu^{1,2}, LIU Yuanxin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of

Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Institute of Land Surface System and Sustainable Development, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: [Objective] This paper aimed to review the application of remote sensing technology in the research of soil erosion to provide some bases for the development of remote sensing research on soil erosion, and to provide references for researchers to select the appropriate remote sensing data sources and methods. [Methods] The application of remote sensing on soil erosion research was analyzed through literature review in different aspects. [Results] According to the research area and theme, erosion remote sensing platforms and data sources, and the usage of remote sensing technology in regional soil erosion feature recognition, monitoring and scale analysis were summarized. In addition, the application of remote sensing to obtain key parameters in RUSLE was introduced. The problems existed in the current research were also analyzed and some suggestions were put forward. [Conclusion] Remote sensing technology was an important technology to carry out large-scale and long time series of soil erosion research, and it has played a significant role in the study of soil erosion in China. However, there are some problems in practical application. The collaborative development of technology, personnel and economy was needed in the effective use and promotion of remote sensing on soil erosion research.

Keywords: soil erosion; remote sensing; monitoring; RUSLE

收稿日期: 2016-03-02

修回日期: 2016-05-07

资助项目: 国家重点研发计划项目“黄土高原生态修复的土壤侵蚀效应与控制机制”(2016YFC0501604)

第一作者: 张 晓(1990—), 女(汉族), 山东省泰安市人, 博士研究生, 研究方向为土地利用及生态响应。E-mail: sdtazx@sina.com。

通讯作者: 赵文武(1976—), 男(汉族), 山东省曹县人, 副教授, 主要从事土地利用与生态水文过程、景观格局与生态系统服务方面的研究工作。E-mail: zhaoww@bnu.edu.cn。

土壤侵蚀是世界最严重的环境危害之一,在全球范围内,土壤侵蚀面积占到陆地总面积的 11%,威胁着自然资源、环境质量、社会经济和食品安全^[1-2]。按照外营力不同,土壤侵蚀可分为水力侵蚀、风力侵蚀、冻融侵蚀和重力侵蚀等多种类型,土壤侵蚀不仅导致发生地的环境退化,同时也威胁着邻近区域的环境状况^[3]。中国是世界上土壤侵蚀最严重的国家之一,土壤侵蚀面积占到国土面积的一半以上。土壤侵蚀不仅破坏了土地资源,使得土壤肥力下降、粮食减产,还加剧了自然灾害的发生,造成水资源环境污染、库塘湖泊淤积、城市安全受到威胁等一系列危害^[4]。土壤侵蚀研究是一项任重道远的工作。随着科技的发展和计算机的普及,土壤侵蚀研究工作正向着大尺度、高精度的方向发展。依托于计算机软件系统的发展,各种新技术层出不穷。尤其是遥感技术的发展与应用,使得图像采集、分层处理等工作变得简单而精确。遥感技术具有宏观性、综合性、丰富性、实用性以及经济性等特点,使其在土壤侵蚀研究工作中的应用正变得日益广泛和不可或缺^[5]。特别是近年来高空分辨率的遥感卫星影像进入实用化阶段,充分发挥了其宏观快速、客观的优势,使之成为土壤侵蚀研究工作中的重要技术^[6]。另外,通过遥感图像与数字地形图结合,突破了传统的点线状静态研究的限制,将土壤侵蚀监测等工作推广到面上和动态研究中,在准确、快速、连续提取植被盖度、土地利用与覆盖、地形起伏度的指标并应用于土壤侵蚀的定量研究的基础上,提供研究所需的时空数据^[7],使调查研究的时空精度得到极大的提高。国际上基于遥感数据的土壤侵蚀模拟的理论和模型研究起步较早,早期遥感用于土壤侵蚀研究是通过航片判读来检测侵蚀特征并获取模型输入数据^[8]。常用模型包括 1959 年提出的通用土壤流失方程(USLE)及 1985 年提出改进后的通用土壤流失方程(RUSLE)^[9],此后 WEPP, EUROSEM, LISEM 等模型相继出现^[10]。随着 Landsat^[11]、SPOT^[12]等卫星的发射升空,卫片逐渐被广泛应用在环境监测和保护等领域。IKONOS, QuikBird 等高分辨率影像的出现,极大拓展了遥感在土壤侵蚀研究中的应用范围,并大幅提高了数据精度^[13-14]。中国传统的土壤侵蚀监测与评价主要通过建立监测站,实地考察获取参数进行研究,不仅费时费力,更难以在大区域进行推广。近年来,遥感技术已经成为区域土壤侵蚀监测工作的重要手段,显著提高了水土保持效益。本文通过查阅文献,介绍了我国土壤侵蚀研究中常用的遥感平台和数据源,总结了遥感技术在土壤侵蚀分区特征识别与监测、土壤侵蚀定量模型研究中

的应用现状,并针对当前研究存在的问题提出了相关建议,可为土壤侵蚀遥感研究的发展方向提供依据,并为研究者快速选择适宜的遥感数据源和研究方法提供参考。

1 土壤侵蚀研究中常用遥感平台和数据源

遥感技术系统主要包括平台、传感器和数据处理器等,通常按照平台不同可以分为地面遥感、航空遥感和航天遥感。一般来说,对于大范围资源调查和生态评价,选用覆盖范围大,周期短的卫星遥感影像将是比较经济适用的手段,但由于其精度较小,在开展小范围的区域研究时,选用大比例尺的具有立体像对的航空相片将会具有更好的解译效果^[15]。具体为:地面平台的高度一般在 100 m 以下,主要用于近距离测量地物波谱和获取供试验研究用的地物细节影像,为航空遥感和航天遥感做校准和辅助工作;航空平台高度一般在 80 km 以下,包括飞机和气球两种,应用广泛,有着机动灵活,分辨率好,调查周期短,不受地面条件限制及资料回收方便等优点;航天平台高度在 80 km 以上,且大多数在 150 km 以上,主要包括高空探测火箭、人造地球卫星及宇宙飞船等,在这个平台上进行的航天遥感可以对地球进行宏观、综合、动态和快速调查,成为目前应用最广泛、发展前景最好的遥感平台^[16]。

目前我国土壤侵蚀研究主要使用的是航天遥感中卫星遥感产品,按其服务内容可分为气象卫星系列、陆地卫星系列和海洋卫星系列^[17]。中国常用卫星遥感数据源有美国陆地卫星(Landsat)、地球观测试验卫星(SPOT)、中巴资源卫星(CBERS)、两种对地观测商用小卫星(IKONOS 和 QuikBird)以及近年来中国自主研发的一系列资源环境卫星。这些数据源具有不同的空间分辨率和时间序列长度等,可以针对土壤侵蚀研究的实际情况进行合理选择。此外还有中国研发的风云系列卫星以及我国参与研发的清华 1 号微型卫星等,目前在土壤侵蚀研究中尚不多见。我国土壤侵蚀研究中常用遥感数据源信息详见表 1。

2 遥感技术的区域土壤侵蚀特征识别、监测与尺度效应

中国土壤侵蚀遥感调查技术在 20 世纪 80 年代取得了迅猛发展,遥感技术逐渐成为了土壤侵蚀调查工作中不可缺少的工具^[18-19],其方法可概括为遥感影像目视解译检测法、遥感光谱分析检测法、人机交互

式解译监测法、智能化土壤侵蚀监测法和模型参数化监测法等^[20]。这些方法在区域土壤侵蚀监测、评估和模型因子反演中极大弥补了人为实地采样的不足。全国范围内的土壤遥感侵蚀调查已经进行了 3 次, 1983—1991 年首次调查使用的遥感资料是纸质的, 比例尺小、分辨率低, 准确度有待提高; 之后我国于 1999 年进行了第 2 次调查, 这次调查中采用了数字遥感技术, 极大提高了效率和准确度, 在 1995—1996 年 TM 影像的基础上按照 1:10 万比例尺, 快速准确查清了各类土壤侵蚀的分布、面积和侵蚀强度; 最近一次的调查是在 2001 年, 同样采用了数字遥感技

术, 在 2000 年数字遥感影像的基础上进行的^[21]。在全国土壤侵蚀遥感调查的基础上, 许多地区也已经或正在进行行政区域或地貌分区内的相关调查。但目前依旧存在着一些问题, 例如, 地表粗糙度、植被覆盖、土地利用结构等复杂因子影响下的土壤侵蚀研究精度有待提高; 遥感制图栅格网格尺寸的敏感性和误差有待进一步研究; 基层遥感资料更新不及时和图像解译中人为主观因素影响较大等^[7]。此外在水土保持遥感调查中, 不同尺度下遥感影像的选择同样重要, 同一环境下不同尺度的研究结果往往有较大差异^[22-23]。

表 1 中国土壤侵蚀研究中常用遥感数据源

卫星系列—编号	使用时段	空间分辨率/m	波长范围/ μm	特点
Landsat-4/5	1982—1999 年	30/120	0.45~12.50	目前世界范围内应用最广的民用对地观测卫星, 时间序列长达 40 余年, 新一代卫星在保证图像可比性和延续性的同时, 对光谱和波段范围进行优化 ^[18]
Landsat-7	1999 年至今	15 30 60	0.52~0.90 0.45~2.35 10.40~12.50	
Landsat-8	2013 年至今	15 30 100	0.50~0.68 0.43~2.29 10.60~12.51	可通过不同观测角观测同一地区的立体视觉效果来进行高精度高程测量 ^[16]
SPOT-1/2/3	1986 年至今	10 20	0.51~0.73 0.50~0.98	
SPOT-4	1998 年至今	10 20	0.51~0.73 0.50~1.70	首批商业卫星, 空间分辨率、过境率高
QuikBird	2001—2014 年	0.61/2.4	0.45~0.90	
IKONOS	2000—2015 年	1/4	0.45~0.90	1/2 星设置多光谱观察、数据信息收集快并且宏观直观, 扫描幅宽达 890 m。02B 星获取 2.36 分辨率影像, 打破了国外高分辨率卫星数据长期垄断国内市场的局面; 04 星多样的载荷配置可在多领域提供可用数据
CBERS-1/2 (中巴地球资源卫星)	1999/2003 年至今	260 19.5 78/156	0.63~0.89 0.45~0.89 0.50~12.50	
CBERS-02B (中巴地球资源卫星)	2007 年至今	20 2.36 258	0.45~0.73 0.50~0.80 0.63~0.89	国产卫星, 可以实现环境与灾害的大范围、全天候和全天时的动态监测
CBERS-04 (中巴地球资源卫星)	2014 年至今	5 10 40 80 73/20	0.51~0.85 0.52~0.89 0.50~2.35 10.4~12.5 0.45~0.89	
HJ-1-A/B(环境一号)	2008 年至今	30 100 150 300	0.43~0.90 0.45~0.95 0.75~3.90 10.50~12.50	可获立体像对, 填补我国立体测图空白
ZY-3(资源三号)	2012 年至今	3.6/2.1 5.8	0.45~0.80 0.45~0.89	
GF-1(高分一号)	2013 年至今	2 8/16	0.45~0.90 0.45~0.89	对提高我国高分影像自给率有重大战略意义
GF-2(高分二号)	2014 年至今	1 4	0.45~0.90 0.45~0.89	

注: 国产卫星数据来源于中国资源卫星应用中心 <http://www.cresda.com>。

2.1 区域识别和监测

在全国范围内,通常依据区域土壤侵蚀主导外营力,将全国分为 3 大土壤侵蚀类型区,即水力侵蚀区、风力侵蚀区和冻融侵蚀区^[24]。常见的几种分类方法各有优劣,对于 3 大 1 级侵蚀区的范围划定稍有不同但差异不大,但对于 1 级侵蚀类型区下对应的 2 级(或 2,3 级)区的划分,几种分类方法差异较大,各自成说,尚无定论^[24]。

中国水力侵蚀区大体分布在大兴安岭—阴山—贺兰山—青藏高原东缘一线以东地区,其中,西北黄土高原区是我国目前土壤侵蚀研究的重点区域^[15]。该区域大尺度土壤侵蚀遥感调查始于 80 年代中期,但因其调查的局限性和调查结果不适于基层应用等难以克服的缺点,科学工作者们逐渐将调查重点放在了小流域范围内的调查上。小流域的土壤侵蚀模数可以通过解译成果中所有划分单元的面积和土壤侵蚀强度推算出来,并且通过对比推算出的土壤侵蚀模数与野外实地调查取得的土壤侵蚀模数,可以验证解译成果中划分单元的土壤侵蚀强度赋值的总体精度^[24]。在黄土高原地区,遥感技术主要应用于以下 3 个方面:土壤侵蚀区域识别、坡耕地等土壤侵蚀重点区域研究^[7,25]和水库泥沙淤积研究^[26]。根据遥感卫星影像纹理及色彩提取该流域的土地利用现状及植被覆盖度信息,同时综合数字高程模型(DEM)提取坡度信息,可以判断出该流域的土壤侵蚀等级^[27]。在此基础上,通过决策树分类算法获取土壤侵蚀图,可以识别流域中度侵蚀区坡度大于 15°的地方,并以此为依据指导区域退耕还林还草规划布局,同时通过综合运用遥感(RS)、地理信息系统(GIS)技术并依托 SWAT 等模型模拟生态水文过程,构建出了全面的区域景观格局变化与土壤侵蚀耦合框架^[7,28]。在人机交互解译环境下,Gabor 滤波器和灰度共生矩阵(GLCM)被联合应用于解释坡耕地和梯田之间纹理趋势和密度分布的差异,通过基于窗口的纹理分析方法和实地调查的分类准确度评估表明,在研究区内该方法解释精度超过 80%^[25]。黄土高原以外的水力侵蚀区包含范围较广,按照我国地理区划,该区域包含了华南、东南、华北、华东全部地区和华中、西南、东北的大部分区域,这些区域地貌景观破碎程度小、包气带薄,能够更好地发挥遥感数据的优势。在华南和东南的广大红壤地区,遥感图像和 DEM 被综合应用于土壤侵蚀区域的识别^[29]。同时,遥感影像与通用土壤流失方程(USLE)被综合应用于广东山区土壤侵蚀特征分析^[30]。喀斯特石漠化是威胁我国西南地区可持续发展的主要生态环境之一,湄公河流域、丽江流域等均

是土壤侵蚀研究的重点区域^[31]。该区域多以遥感网格数据和通用土壤流失方程为基础,结合 STIRPAT 模型等,识别不同级别土壤侵蚀区域或分析植被覆盖及其驱动力、分析喀斯特石漠化的影响因素^[32-33]。华中地区桐柏—大别山区^[34]、河南燕山水库集水区^[2]的水土保持研究中,基于 3S 技术建立的土壤侵蚀敏感性评价指标体系和标准已用于确定高侵蚀敏感性地区;湘西梯田侵蚀条件下的模型框架平台被应用于确定梯田退化程度及其原因,这种梯田监督模型的交叉验证误差在 8% 以下,可以在山区梯田景观承载力研究和梯田规划等工作中推广应用^[35]。华东地区地势相对平坦,山东丘陵区的土壤侵蚀调查研究验证了以像元流失量为基础的定量遥感的可行性,避免了人为定级的主观性和时效性等不足;在河流入海口利用遥感图像监测运移物质沉积形成三角洲的面积变化,可以此分析河流泥沙运移变化^[36]。华北和东北地区工业发展较早,在大规模开发区进行土壤侵蚀实验涉及成本较高,而该区地势相对平坦,遥感图像阴影干扰较少,利用反向传播神经网络(backpropagation neural network)并基于遥感图像计算植被覆盖率(FVC),结合流域出口径流泥沙数据,能够在识别土壤侵蚀变化驱动力基础上定量分离生物物理和人为影响并确定对流域生态系统有极端影响的临界阈值^[37]。

风力侵蚀区大部分位于 400 mm 年降雨量线以内干旱和半干旱地区,且强度侵蚀、极强度侵蚀和剧烈侵蚀几乎都位于 200 mm 年降雨量线以内^[38]。该区具体分布在新疆、青海、宁夏、甘肃、内蒙古和陕西等省(区)部分地区,气候干旱、降水少、蒸发强、风力强劲加之植被稀疏或低矮,造成了这些地区强烈的风蚀和风沙迁移、堆积^[24]。基于地理信息系统和遥感技术的风力侵蚀研究还没有引起足够的重视,但在风力侵蚀强度和季节变化规律^[39]、沙地土壤侵蚀^[40-41]和草地土壤侵蚀方面也有了一些研究,部分区域建立了局部风力侵蚀数据库^[42]。沙尘暴是干旱、半干旱区灾害性气象过程,也是评价荒漠化水平的重要指标。科尔沁沙地和库布齐沙漠是该区风蚀研究的重点区域^[40-41]。中国政府已经启动了沙源控制方案,对科尔沁沙地进行了实地调查和遥感监测^[40]。而在库布齐沙漠,综合风蚀建模系统和 RS、GIS 综合应用与沙粒跃移的模拟,通过植被、土壤迎风面积、起沙风等指标校正突变模型,从而计算其总输沙率,这一结果已通过水文站监测数据验证^[41]。土壤侵蚀遥感调查与风洞实验、野外调查相结合用于监测沙地变化在内蒙古、西藏自治区等地取得了良好的监测效果^[43-44]。

冻融侵蚀区可分为北方冻融侵蚀区和青藏高原冰川冻融侵蚀区^[45]。其中北方冻融侵蚀区主要分布在东北大兴安岭山地和新疆天山山地,冻融侵蚀的发生主要受气候季节变化的影响,土体或岩体因冷暖、干湿交替而反复冻结、融化,最终破碎,造成沟蚀延伸扩展甚至引发滑坡、泥石流,严重危害该区人类生命财产安全^[45]。青藏高原冰川冻融侵蚀区分布于雪线之上,特别是现代冰川活动的地区,冰川侵蚀强烈,造成许多锥形山峰、角峰、冰斗和冰川槽谷,进而在各地造成冰碛堆积物及冰碛湖^[24]。冻融侵蚀是典型的侵蚀过程,同时伴随着风力侵蚀和水力侵蚀,还没有得到足够的重视^[46]。该区相关研究多基于微波遥感技术建立分析、评价模型,通过冻融循环天数、水形态变化水量等一系列指标确定冻融侵蚀的区域、评价冻融侵蚀的程度^[46-48]。在青藏高原冻融侵蚀区,微波遥感技术已在土壤侵蚀程度评价、变化监测和影响因素分析等研究中有所应用,并取得了良好效果^[46,48]。

2.2 尺度效应

土壤侵蚀的影响因素涉及气候、地形、土壤和土地利用等,驱动力的不同导致了侵蚀要素在作用形式上的时空差异性,从而导致了土壤侵蚀的尺度依赖性,在一种尺度空间下的结构性成分往往在另一尺度空间下成为噪声成分,因此通过遥感获取的土壤侵蚀特征信息并不能简单的由小尺度向大尺度推广^[22-23,49-50]。水土流失过程随着尺度变化趋于复杂化,随着分割尺度的增大,越来越多的其他地物混合进来,各类地物的标准差都在增大,而相同地物在不同尺度上的表现是不同的^[51]。这些都导致了尺度效应机理分析的诸多问题,例如小尺度研究数据对大尺度研究区的代表性不足、研究指标与响应尺度的主导影响因素不匹配等^[52]。

针对不同尺度的遥感影像,高分辨率影像精度较高但往往价格较高、时序较短,适合于小流域或县域等较小尺度的细节研究,而对于中尺度研究,Landsat, SPOT 等的时空分辨率虽无法反应短期生态变化,但在反应土地利用和覆盖的年际、季节变化中效果良好^[53-54]。尺度转换对影像对象分形维数、紧凑度、面积、均值、标准差等均有影响,对比不同分辨率的 DEM 数据,ASTER(30 m)数据在地形平坦地区有明显噪音且坡度表面结构的紊乱导致了实用价值的降低;而 SRTM(90 m)数据会因分辨率过低而导致坡度衰减,相比之下 25 m 分辨率的国产 Hc-DEM 数据能够对我国土壤侵蚀研究中需要的地貌情况进行较为科学准确的表征^[51,55],随着分辨率的降低,获取到土壤侵蚀程度高的面积减小且土壤稳定性增加^[56]。

对于地物描述与尺度转换而言,最优尺度往往是相对的,某一类别的最优尺度对于另一个类别可能不是最优的,因此最优尺度通常是一个范围而不是一个特定值^[22,51]。影像对象的与邻域绝对均值差分方差比〔the ratio of mean diff. to neighbors (ABS) to standard deviation, RMAS〕被认为是选择影像最优尺度效果较好的指示器,但地形的破碎会影响其精度^[57]。无论采取何种方法,在进行尺度间逐级转换时,需要满足不同尺度上过程与机理具有相似性这一前提^[22,57]。

3 土壤侵蚀控制因子的获取与制图

3.1 常用土壤侵蚀研究方法、模型及其效应

通常土壤侵蚀研究方法包括定性和定量方法。定性方法用来确定土壤侵蚀危险程度,定量方法可以用来计算土壤侵蚀量和侵蚀速率^[2]。土壤侵蚀量的估算是土壤侵蚀研究的核心问题之一,以小流域为单元进行土壤流失量的定量评价研究,是探索土壤侵蚀规律和评价流域治理效益的重要途径和内容^[57]。在我国土壤侵蚀量估算中,遥感技术在三峡库区、黄土丘陵沟壑区^[58]、云南太阳山去地区^[59]等均有相关的应用研究且取得了良好的估算效果。该类研究中,利用修正后的通用土壤流失方程(RUSLE)估算土壤流失量一直是研究热点,但其在在大尺度的应用受到了数据可用性和数据质量的巨大挑战。而 DEM 数据和 TM 影像与 RUSLE 模型的综合应用,可以采用多元回归分析法确定土壤侵蚀风险的主要影响因素,并且基于 DEM 坡度数据和 TM 提取土壤、植被图像判断土壤侵蚀风险空间分布^[60]。在土壤侵蚀量估算的基础上,可以进一步对土壤潜在危险进行评估。土壤侵蚀潜在危险程度是指生态系统失衡后出现的土壤侵蚀危险程度,包括无明显侵蚀区引起侵蚀的可能性大小、现状侵蚀区加剧侵蚀的可能性大小以及侵蚀区以当前侵蚀速率发展时土层可承受的侵蚀年限(即抗蚀年限)^[61]。基于遥感资料并结合 GIS 和 GPS 手段,可以对不同土地利用类型和不同土壤侵蚀强度的土地进行土壤侵蚀潜在危险程度分级和评价,对划定水土流失重点区域、监控库区水质和水迁移有重要意义^[61-62]。近年来,模糊决策树(FDT)等新方法也与遥感结合起来进行土壤侵蚀风险评估,研究表明土壤侵蚀风险高的时段集中在 6—8 月,其中 7 和 8 月最高风险面积覆盖研究区 85% 以上,而 11 月至次年 3 月低风险区域占研究区 90% 以上^[63]。为保障土壤侵蚀量估算和风险评估结果的实用性,原始数据的时效性显得尤为重要,因此土壤侵蚀动态监测是水土保持管理工作的主要内容之一,时段内土壤侵蚀动态变化的

查明必须依靠多时相的遥感信息元才能实现^[64]。在全国第二次土壤侵蚀遥感调查的基础上,许多地区采用遥感数据为基础数据源,选择植被覆盖、地形坡度和土地利用类型为参数,进行了土壤侵蚀数据库更新和快速调查^[65]。一些矿区也利用 TM 影像和 DEM 数据监测土壤侵蚀状况,并证实了矿区开采活动很大程度上加剧了土壤侵蚀总体情况的恶化^[66]。基于遥感的土壤侵蚀快速监测不仅能够满足小流域治理规划的精度要求,而且比传统的监测方法更具有灵活性^[67]。

利用修正版通用土壤流失方程(RUSLE)进行土壤侵蚀快速定量遥感监测的研究具有重要实践意义,但因该模型数据来源主要取自缓坡地段,模型预报精度随坡度增大而降低,往往不能直接应用于我国的大部分地区^[68-69],需根据实地情况进行修正。中国土壤流失方程(CSLE)即是在美国通用土壤流失方程(USLE)基础上依据我国实际情况改进而建立的^[70],用以评估山坡农田产流造成的土壤年平均流失量^[71]。CSLE 模型法与传统土壤侵蚀分类分级方法相比具有明显优越性,但在沟谷侵蚀量估算和其他地区土壤可蚀性、水土保持措施等侵蚀影响因子估计方面还有待于更深入研究^[72]。另一种与遥感相关的模型是由美国农业部开发的非点源污染(AnnAGNPS)模型,该模型是基于独立事件的 AGNPS 模型的升级,主要由降雨径流子模型、侵蚀子模型和物质迁移转化子模型组成^[72]。经实测验证,AnnAGNPS 模型能够比较理想的模拟流域长期的径流量和沉积物量^[72]。除上述经验模型外,常用的还有一类物理模型,如 WEPP, LISEM 和 EROSEM 等,但均因对侵蚀物理过程描述相对简单、缺乏我国感测数据验证,加之中国的水土保持措施远较 WEPP 模型中涉及的水土保持措施复杂,同样不能直接应用于中国大部分地区^[68,73-74]。通过模型研究与改进发现在三峡库区 WEPP 模型模拟效果在大部分情况下优于 SWAT 模型,并可应用于该流域土壤流失定量化研究^[75-76]。但黄土高原陡坡地区相关研究表明,无论 WEPP 运移能力方程还是改进后的方程,都不能很好的预报陡坡地表径流的运移能力,且由于模型无法实现流域内的动态模拟、降雨输入条件没有考虑次暴雨和次暴雨过程这两种不同的时间尺度,因此并不适合小流域,只适用于大中型流域,存在较大的局限性,仍有大量问题有待深入研究^[74,77-78]。

在土壤侵蚀定量评价中,基本侵蚀单元地表参数的定量描述是建立土壤侵蚀空间尺度转换模型的基础^[79]。由于上述模型局限性的存在,在不同尺度研究

中的模型效应是不同的,原因在于当研究尺度变化时,评价指标会相应发生变化,例如大尺度模型多以地带性因子作为评价指标,而小尺度则更多的以地区性和地方性因子作为评价指标^[51]。目前已建立的模型多是基于小尺度实验建立的(例如 RUSLE, WEPP 和 LISEM 等),其不同空间尺度上相互独立,模型之间不能进行有效的信息转换,选择适用于小尺度的模型研究大尺度区域时,往往会使指标对影响因素实际的刻画不准确,而现有区域尺度的模型多缺乏实际的应用价值^[51]。鉴于模型尺度范围的局限性,学者们^[49]试图通过对小流域土壤侵蚀时空耦合来实现大中尺度土壤侵蚀过程的模拟,弱化尺度性的模型研究成为模型研究的方向之一。

3.2 RUSLE 模型关键因子的获取与制图

综合国内外研究和上述模型的优缺点,目前应用最广的仍是修正后的通用土壤流失方程(RUSLE)。该模型中的重要因子包括降雨侵蚀力(R)因子;土壤可蚀性(K)因子;地形因子(L, S);植被管理因子(C)和水土保持措施因子(P)^[80]。其中, R 因子多使用流域水文站点数据,与遥感关系不大^[8]。在实地调查困难的区域,基于天气发生器和遥感图像获取 L, S, K 和 C 因子是经济实用的选择^[81]。在获取因子的基础上,可以试验土地利用与土壤侵蚀关系的定性分析。

地形因子在短时间内往往变化较小,目前几乎所有的土壤侵蚀模型都需要 DEM 输入作为坡度等地形因子的数据源^[8]。目前 DEM 数据获取也已由航天雷达获取发展到航空雷达获取,卫星搭载雷达(SAR)获取图像空间分辨率已可达 5m(例如中国发射的环境一号卫星 HJ-1C)。在此基础上建立坡度、坡向和坡位;地形起伏度;水文河网;流域边界等一系列地形指数提取方法,从而准确表达流域范围内地形地貌特征^[82]。

土壤因子的监测主要是通过对土壤的目视解译来绘制土壤类型图,从而进行土壤可蚀性差异的评估^[83]。大面积的裸土土壤侵蚀引起的暴露对区域的生态环境产生严重的影响,如提高地表温度(LST)^[84]。检测中表层土壤性质不同会引起颜色的不同,进而影响光谱特性,皴裂现象等也同样会引起光谱变化,当这种变化为人所知时,就可以应用遥感技术对土壤侵蚀状况进行空间与时间的评估^[83]。在评估过程中,可以直接通过遥感图像目视解译判定土壤属性,也可以间接通过提取相应参数推测土壤属性,但无论哪一种方法都只能获取表层土壤性质。

植被管理因子表现出很强的季节特性,当监测某一时期的变化情况时,选取适时的遥感图像非常重

要,而对于基于物理特性的模型需要同雨季和庄稼生长时期的遥感图像仔细匹配时,则需要多时相的遥感图像来说明季节性的变化^[83]。同时,为了能使分类错误的影响被控制在分类允许变动的误差范围内,可以在遥感图像的波段或比值之间建立线性回归方程,并且以野外调查结果来确定植被管理因子的值^[83]。从遥感角度估算植物不同生长时期潜在土壤流失率、结合同时期的降雨侵蚀指数模拟数据可以分阶段估算植被管理因子值^[85]。在诸多遥感估算植被因子的方法中,最为常用的是利用归一化植被指数(NDVI)来

进行估算^[86]。以 NDVI 为核心,一系列遥感提取的指数被综合利用于植被管理因子的估算,以提高估算精度。常见的有植被恢复度(VRD)、叶面积指数(LAI)、植被覆盖率指数(FVC)、归一化积雪指数(NDSI)和改进的归一化差异水体指数(MNDWI)等^[87]。归一化植被指数可以通过遥感数据波段直接计算,但在实际应用中往往直接使用加工过的 NDVI 产品数据集,不同的数据集因其分辨率、时段等的不同,试用于不同情况,有时需要对不同图像进行融合后使用^[88]。中国常用的 NDVI 数据集总结如表 2 所示。

表 2 中国常用 NDVI 数据产品

产品名称	投影	空间分辨率/m	时间分辨率/d	时间段	提供单位
NOAA AVHRR GIMMS 数据产品	ALBERS	8 000	15	1981—2006 年	NASA
MODIS 数据产品	Lambert	250~1 000	1,5,10,16	1999 年至今	NASA
SPOT-VEGETATION 数据产品	UTM	1 000	10 d	1998 年至今	Vito

水土保持措施因子与人类活动息息相关,其侵蚀控制措施包括等高耕作、等高带状种植、梯田种植、地埂、截流沟、植物防冲带等,实地测定较为困难,通常采用赋值法对不同措施在 0~1 间进行赋值^[89]。受分辨率限制,过去常用的 TM 影像等很难对该因子细节进行获取^[90]。随着 Quikbird 等高分辨率遥感影像的普及,这些特征得到了清晰的反应,可以较为准确的解译田块垄向。根据已有研究,等高耕作 P 值(P_h)为 0.352,顺坡垄作 P 值(P_s)为 1,其他夹角垄作对 P 因子的取值可以采用如下线性关系公式计算^[50,90]:

$$P = P_h + \frac{\alpha}{90^\circ} \times (P_s - P_h) \quad (1)$$

式中: P ——某一田块水土保持措施因子值; α ——田块垄向与等高线的夹角; P_h ——等高耕作时的水土保持措施因子值; P_s ——顺坡垄作时的水土保持措施因子值。对于遥感图像提取的其他土地利用形式,常用赋值为:林地=0.10,农业区、园艺区和果园等=0.40,新开垦土地=0.70,裸地和城市用地=1.0^[91]。

基于遥感数据绘制土壤侵蚀图有两种方法,直接方法是识别土壤侵蚀特征进行绘制,间接方法是通过获取侵蚀控制因子进行计算绘制^[8,92]。河道沟谷缘线是决定图斑格局的最基本的特征线,不同地质学历史时期侵蚀—堆积交替遗留下的界线可作为制图中地物定位、地图和信息源套合配准的控制参照,在早期研究中国内学者提出了分线控制、分层解译提取信息和分步转绘的制图程序^[93]。由于地表植被覆盖等影响,直接识别土壤侵蚀特征往往出现误差,随着高分辨率影像和算法的发展,遥感图像与模型结合的间

接绘图方法应用逐渐广泛,在绘图过程中一般仅一个指标是从图像中获取的,其他指标则由实测获取,以此提高制图准确性^[8,94-95]。黄土高原地区相关研究表明,土壤反射率与漫反射光谱有很好的相关性,证实了遥感定量测绘的可行性^[96]。同时结合决策树分类器(DTC)和遗传算法(GA)应用于土地利用自动分类,其结果与通过迭代法计算结果相比总准确率提高至 83.2%^[97]。在遥感制图的基础上,往往通过实测、高分辨率影像等获取的独立数据对图像进行校准。

4 结论与建议

遥感技术已经在我国的土壤侵蚀研究中得到了广泛的应用,也表现出了不可替代的优点。(1) 遥感技术获取的图像与传统纸质图像相比,有着可复制性,可实现资源共享,避免了重复调查带来的资源浪费,同时,遥感图像可作为输入项,借助 ArcGIS,ERDAS 等众多空间信息分析软件提取多种目标信息层,进而应用在空间信息分析和环境监测,极大提高了信息获取效率。(2) 传统人工方法进行土壤侵蚀研究时,人工调查绘制的图像资料往往受到调查者的主观影响,使得不同调查者所得的研究结果不具有可比性,因此很难在全国范围内制定统一的衡量标准,而遥感技术通过传感器采集图像,很好地弥补了传统人工方法的不足,使得研究结果可以量化。(3) 遥感数据在长时间序列研究中有巨大优势,以 TM 数据为例,时间序列可达 40 a 以上。(4) 大范围的土壤侵蚀概况变化较为缓慢,但局部地区,尤其是人为加速现代侵蚀区,往往有较快的变化,且土壤侵蚀严重地区往往地形复杂,许多地点人员难以到达,这些都导致

传统的调查方式虽费时费力但调查结果的精度和时效性较差。遥感技术的应用,特别是航空、航天摄影的辅助,使得图像获取的效率大大提高,且科研工作者可以综合多角度多时相的图像来提高研究结果的精度。

遥感技术虽然在我国土壤侵蚀研究工作中经历了30 a的应用与发展,但仍然是一门新技术,在运用中表现出了许多有待提高的方面。(1) 遥感资料更新不及时,许多当前的研究中使用的遥感资料陈旧,没有发挥出其时效性的优点,也降低了研究结果的准确性。(2) 遥感技术仍是一门比较复杂的技术,需要较强的科研力量做支撑,虽然在全国范围以及各省区范围的土壤侵蚀研究中的应用已经较为成熟,但是基层数据源选择单一,应用有待推广。影像分发单位多关注快速发展区域,对于边远落后地区的影像更新较慢,且县级遥感知识的普及还需大幅提升。(3) 遥感技术虽然避免了在图像获取阶段的人为主观影响,但在图像解译阶段仍存在着主观因素的影响。在前人研究的基础上建立的基于知识库与空间信息耦合的土壤侵蚀监测方法,克服了以往应用人机交互解译过程中人的主观性难以统一的缺点,理论上可完全降低遥感监测随机误差,但仍需要大量工作来归纳建立区域侵蚀知识库^[20]。现在广泛运用的遥感图像目视解译法中同样存在的主观性因素干扰、专家分类系统的任意性和不确定性以及缺乏统一且具普适性的土壤侵蚀模型等也是目前亟待解决的问题。(4) 遥感技术能够在很多方面为侵蚀评估做出贡献,但是遥感资料需要基于特定的状况来应用(如普通环境监测卫星易受云层等遮盖物影响),由于更为复杂的植被和覆盖情况,其不易转移应用到更为潮湿的环境中,需要寻找适合的参数指标来进行遥感数据的高精度应用^[10]。

综上所述,中国在今后土壤侵蚀遥感研究工作中可以考虑深化以下几方面的研究。(1) 是做好遥感资料的即时更新,保证研究结果的时效性,为水土流失防治工作提供更为有效的科学依据;(2) 完善县区级的土壤侵蚀遥感资料,探寻更具有实践性且更为经济的土壤侵蚀遥感研究方法,将遥感技术向基层,特别是偏远地区和地形复杂地区的科研单位推广,推动局部地区土壤侵蚀研究向更高效、更准确和量化的方向发展;(3) 努力探索新方法避免图像解译等过程中的人为主观因素影响,促进全国各地的土壤侵蚀定量研究建立统一的标准,使各地的研究结果之间更具有可比性和可借鉴性,以此来建立较为统一和具有普遍适用性的土壤侵蚀模型;(4) 加强遥感与GIS,

GPS的有机结合,探索更具有代表性的指标或因子进行模型模拟,以提高准确度;第五,整合近年来国内新出现的遥感数据源进行土壤侵蚀研究,使遥感技术在土壤侵蚀定量研究和动态监测等工作中发挥更大的作用。

[参 考 文 献]

- [1] Krishna Bahadur K C. Mapping soil erosion susceptibility using remote sensing and GIS: A case of the Upper Nam Wa Watershed, Nan Province, Thailand[J]. *Environmental Geology*, 2009, 57(3): 695-705.
- [2] Hu Yanfang, Tian Guohang, Audrey L M, et al. Risk assessment of soil erosion by application of remote sensing and GIS in Yanshan Reservoir catchment, China[J]. *Natural Hazards*, 2015, 79(1): 277-289.
- [3] Gao Xiaofei, Xie Yun, Liu Gang, et al. Effects of soil erosion on soybean yield as estimated by simulating gradually eroded soil profiles[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 145(1): 126-134.
- [4] 王占礼. 中国土壤侵蚀影响因素及其危害分析[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(4): 32-36.
- [5] Lu D, Li G, Valladares G S, et al. Mapping soil erosion risk in Rondonia, Brazilian Amazonia: Using RUSLE, remote sensing and GIS[J]. *Land Degradation & Development*, 2004, 15(5): 499-512.
- [6] 郭玉涛, 张生德. 遥感技术应用于水土保持监测[J]. *中国水利*, 2004(7): 59-60.
- [7] 卫亚星, 王莉雯, 刘闯. 基于遥感技术的土壤侵蚀研究现状及实例分析[J]. *干旱区地理*, 2010, 33(1): 87-92.
- [8] Anton V. Satellite remote sensing for water erosion assessment: A review[J]. *Catena*, 2006, 65(1): 2-18.
- [9] Dabney S M, Yoder D C, Vieira D A N. The application of the Revised Universal Soil Loss Equation, Version 2, to evaluate the impacts of alternative climate change scenarios on runoff and sediment yield[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 67(5): 343-353.
- [10] Fernandez C, Wu J Q, McCool D K, et al. Estimating water erosion and sediment yield with GIS, RUSLE, and SEDD[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 58(3): 128-136.
- [11] Gyanesh C, Brian L M, Dennis L H. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM⁺, and EO-1 ALI sensors[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(5): 893-903.
- [12] Li Shutao, James T K, Wang Yaonan. Using the discrete wavelet frame transform to merge Landsat TM and SPOT panchromatic images[J]. *Information Fusion*, 2002, 3(1): 17-23.
- [13] Peter H, Ralph D, Wayne W, et al. Mapping forest

- structure for wildlife habitat analysis using multi-sensor (LiDAR, SAR_InSAR, ETM⁺, Quickbird) synergy [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102(1/2): 63-73.
- [14] Wang Le, Wayne P S, Gong Peng, et al. Comparison of IKONOS and QuickBird images for mapping mangrove species on the Caribbean coast of Panama [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(3/4): 432-440.
- [15] 傅伯杰, 陈利顶, 邱扬. 黄土丘陵沟壑区土地利用结构与生态过程[M]. 北京: 商务印书馆, 2002.
- [16] 常庆瑞, 蒋平安, 周勇. 遥感技术导论[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [17] 毕华星. 3S 技术在水土保持中的应用[M]. 北京: 中国林业出版社, 2008.
- [18] 徐涵秋, 唐菲. 新一代 Landsat 系列卫星: Landsat 8 遥感影像新增特征及其生态环境意义[J]. *生态学报*, 2013, 33(11): 3249-3257.
- [19] 蔡继清, 任志勇, 李迎春. 土壤侵蚀遥感快速调查中有关技术问题的商榷[J]. *水土保持通报*, 2002, 22(6): 45-47.
- [20] 李智广, 杨胜天, 高云飞, 等. 土壤侵蚀遥感监测方法及其思考[J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6(3): 7-12.
- [21] 薛利红, 杨林章. 遥感技术在我国土壤侵蚀中的研究进展[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(3): 186-189.
- [22] 赵文武, 傅伯杰, 陈利顶. 尺度推绎研究中的几点基本问题[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(6): 905-911.
- [23] Vernon M. Geographical perspectives of space, time, and scale[J]. *Landscape Ecology*, 1989, 3(3/4): 163-173.
- [24] 刘秉正, 吴发启. 土壤侵蚀[M]. 陕西 西安: 陕西人民出版社, 1997.
- [25] Li Yi, Gong Jianhua, Wang Dongchuan, et al. Sloping farmland identification using hierarchical classification in the Xihe region of China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(2): 545-562.
- [26] Ran Lishan, Lu Xixi, Xin Zhongbao, et al. Cumulative sediment trapping by reservoirs in large river basins: A case study of the Yellow River basin[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 100(1): 308-319.
- [27] 党维勤, 王晓, 马三宝, 等. 黄土高原小流域坝系监测方法及评价系统研究[M]. 河南 郑州: 黄河水利出版社, 2008.
- [28] Li J, Zhou Z X. Coupled analysis on landscape pattern and hydrological processes in Yanhe watershed of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 505(500C): 927-938.
- [29] Liang Yin, Li Decheng, Lu Xixi, et al, et al. Soil erosion changes over the past five decades in the red soil region of Southern China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2010, 7(1): 92-99.
- [30] 文雅, 刘晓南, 程炯. 基于 USLE 的广东省山区土壤侵蚀量估算及特征分析[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(4): 112-118.
- [31] Xu Yueqing, Shao Xiaomei, Kong Xiangbin, et al. Adapting the RUSLE and GIS to model soil erosion risk in a mountains karst watershed, Guizhou Province, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, 141(1/3): 275-286.
- [32] Zhou Qiuwen, Yang Shengtian, Zhao Changsen, et al. A Soil Erosion Assessment of the Upper Mekong River in Yunnan Province, China[J]. *Mountain Research and Development*, 2014, 34(1): 36-47.
- [33] Peng Jian, Liu Yinghui, Shen Hong, et al. Vegetation coverage change and associated driving forces in mountain areas of Northwestern Yunnan, China using RS and GIS[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184(8): 4787-4798.
- [34] Zhang Ronghua, Liu Xia, Gary C H, et al. Assessment of soil erosion sensitivity and analysis of sensitivity factors in the Tongbai—Dabie mountainous area of China[J]. *Catena*, 2013, 101(2): 92-98.
- [35] Sarah S, Thorsten B, Karsten S, et al. Degradation of cultivated bench terraces in the Three Gorges Area: Field mapping and data mining[J]. *Ecological Indicators*, 2013, 34(6): 478-493.
- [36] Zhou Yuanyuan, Huang Heqing, Gerald C N, et al. Progradation of the Yellow (Huanghe) River delta in response to the implementation of a basin-scale water regulation program[J]. *Geomorphology*, 2015, 243: 65-74.
- [37] Niu Ruiqing, Du Bo, Wang Yi, et al. Impact of fractional vegetation cover change on soil erosion in Miyun reservoir basin, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(8): 2741-2749.
- [38] 张国平, 张增祥, 刘纪远. 中国土壤风力侵蚀空间格局及驱动因子分析[J]. *地理学报*, 2001, 56(2): 146-158.
- [39] Zhou Yi, Guo Bing, Wang Shixin, et al. An estimation method of soil wind erosion in Inner Mongolia of China based on geographic information system and remote sensing[J]. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(3): 304-317.
- [40] Zhou Yun, Chang Xueli, Ye Shengxing, et al. Analysis on regional vegetation changes in dust and sandstorms source area: A case study of Naiman Banner in the Horqin sandy region of Northern China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(5): 2013-2025.
- [41] Du Heqiang, Xue Xian, Wang Tao. Estimation of sal-

- tation emission in the Kubuqi Desert, North China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 479/480(1): 77-92.
- [42] 田夏青, 靳雅丽. 青海省风力侵蚀遥感调查与数据库更新[J]. *水利水电工程设计*, 2002, 21(2): 51-52.
- [43] 张国平, 刘纪远, 张增祥. 西藏自治区土壤风力侵蚀与沙地变化研究[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(1): 158-161.
- [44] Liu Shulin, Wang Tao. Aeolian processes and landscape change under human disturbances on the Sonid grassland of Inner Mongolian Plateau, Northern China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(5): 2399-2407.
- [45] 吴发启, 张洪江. 土壤侵蚀学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [46] Guo Bing, Zhou Yi, Zhu Jinfeng, et al. An estimation method of soil freeze-thaw erosion in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Natural Hazards*, 2015, 78(3): 1843-1857.
- [47] Chen Siyu, Liang Tiangang, Xie Hongjie, et al. Interrelation among climate factors, snow cover, grassland vegetation, and lake in the Nam Co basin of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, 8(5): 222-223.
- [48] Kong Bo, Yu Huan. Estimation model of soil freeze-thaw erosion in Silingco Watershed Wetland of Northern Tibet[J]. *The Scientific World Journal*, 2013, 65(3): 21.
- [49] 韩晓燕, 钱鞠, 王磊, 等. 黄土高原土壤侵蚀(水蚀)多尺度过程与水土保持研究进展[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(6): 1487-1498.
- [50] 赵文武, 傅伯杰, 吕一河, 等. 多尺度土地利用与土壤侵蚀[J]. *地理科学进展*, 2006, 25(1): 24-33.
- [51] 张奎奎, 许靖华, 卢秀琴, 等. 黑龙江省土壤流失方程的研究[J]. *水土保持通报*, 1992, 12(4): 1-10.
- [52] 王飞, 李锐, 杨勤科, 等. 水土流失研究中尺度效应及其机理分析[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(2): 167-170.
- [53] 滕明君, 曾立雄, 肖文发, 等. 长江三峡库区生态环境变化遥感研究进展[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(12): 3683-3693.
- [54] 翟然, 马宁, 赵帮元, 等. 黄土高原水土保持遥感监测影像配置方案研究[J]. *人民黄河*, 2014, 36(6): 97-100.
- [55] 郭明航, 杨勤科, 王春梅. 中国主要水蚀典型区侵蚀地形特征分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(13): 81-91.
- [56] 谭炳香, 杜纪山. 遥感数据分析林区的植被和土壤侵蚀特征[J]. *林业科学*, 2006, 42(4): 7-12.
- [57] 赵文武, 傅伯杰, 郭旭东. 多尺度土壤侵蚀评价指数的技术与方法[J]. *地理科学进展*, 2008, 27(2): 47-52.
- [58] 朱连奇, 史学建, 彭红. 基于 RS 和 GIS 的土壤侵蚀量估算方法研究: 以陕西省杏子沟流域为例[J]. *河南大学学报: 自然科学版*, 2007, 37(6): 601-606.
- [59] 徐雅莉, 武红敢, 马晓明. 基于遥感和 GIS 技术的土壤侵蚀量估算研究: 以澄江太阳山地区为例[J]. *遥感信息*, 2010(3): 65-70.
- [60] Huang Jianqin, Lu Dengsheng, Li Jin, et al. Integration of remote sensing and GIS for evaluating soil erosion risk in Northwestern Zhejiang, China[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2012, 78(9): 935-946.
- [61] 孙希华, 闫福江. 基于遥感与 GIS 的土壤侵蚀潜在危险度评价研究: 以青岛市为例[J]. *土壤*, 2004, 36(5): 516-521.
- [62] Wang Lihui, Huang Jinliang, Du Yun, et al. Dynamic assessment of soil erosion risk using Landsat TM and HJ satellite data in Danjiangkou Reservoir Area, China [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(8): 3826-3848.
- [63] Ai Lei, Fang Nufang, Zhang B, et al. Broad area mapping of monthly soil erosion risk using fuzzy decision tree approach: Integration of multi-source data within GIS[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2013, 27(6): 1251-1267.
- [64] 赵晓丽, 张增祥, 刘斌, 等. 基于遥感和 GIS 的全国土壤侵蚀动态监测方法研究[J]. *水土保持通报*, 2002, 22(4): 29-32.
- [65] 张思聪, 徐海波, 唐莉华. 基于 GIS 和 RS 技术的土壤侵蚀快速调查研究[J]. *水力发电学报*, 2005, 24(3): 70-74.
- [66] 汪炜, 汪云甲, 张业, 等. 基于 GIS 和 RS 的矿区土壤侵蚀动态研究[J]. *煤炭工程*, 2011(11): 120-122.
- [67] 李京, 李晓兵, 宫阿都. 基于遥感方法的小流域土壤侵蚀研究[J]. *自然灾害学报*, 2008, 17(6): 77-83.
- [68] 郑粉莉, 张勋昌, 王建勋. WEPP 模型及其在黄土高原的应用评价[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [69] 陈云明, 刘国彬, 郑粉莉, 等. RUSLE 侵蚀模型的应用及进展[J]. *水土保持研究*, 2004, 11(4): 81-84.
- [70] Zhang Yan, Liu Xianchun, Li Zhiguang, et al. Surveying soil erosion condition in Loess Plateau using soil erosion model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(10): 165-171.
- [71] Liu Baoyuan, Zhang Keli, Xie Yun. An empirical soil loss equation[C]// *Proceedings 12th International Soil Conservation Organization Conference*. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [72] Xu Kai, Wang Yunpeng, Su Hua, et al. Effect of land-use changes on nonpoint source pollution in the Xizhi River watershed, Guangdong, China[J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(18): 2557-2566.
- [73] Yang Tao, Xu Chongyu, Zhang Qiang. DEM-based numerical modelling of runoff and soil erosion processes in the hilly-gully loess regions[J]. *Stochastic Environ-*

- mental Research and Risk Assessment, 2012, 26(4): 581-597.
- [74] 张光辉. 土壤侵蚀模型研究现状与展望[J]. 水科学进展, 2002, 13(3): 389-396.
- [75] Shen Zhenyau, Gong Yongwei, Li Yanhong, et al. A comparison of WEPP and SWAT for modeling soil erosion of the Zhangjiachong Watershed in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(10): 1435-1442.
- [76] Li Zhi, Liu Wenzhao, Zhang Xunchang, et al. Assessing the site-specific impacts of climate change on hydrology, soil erosion and crop yields in the Loess Plateau of China[J]. Climatic Change, 2011, 105(1/2): 223-242.
- [77] 柳玉梅, 张光辉, 韩艳峰. 坡面流土壤分离速率与输沙率耦合关系研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(3): 24-28.
- [78] 周正朝, 上官周平. 土壤侵蚀模型研究综述[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(1): 52-56.
- [79] 倪九派, 魏朝富, 谢德体. 土壤侵蚀定量评价的空间尺度效应[J]. 生态学报, 2005, 25(8): 2061-2067.
- [80] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [M]. USA: United States Department of Agriculture, 1996.
- [81] Pan Jinghu, Wen Yan. Estimation of soil erosion using RUSLE in Caijiamiao watershed, China[J]. Natural Hazards, 2014, 71(3): 2187-2205.
- [82] 虎保成, 罗玉恒, 张虎林, 等. 基于 DEM 的颍川河流域地形因子的提取与量化分析[J]. 矿山测量, 2015(6): 89-93.
- [86] 王莉雯, 牛铮, 卫亚星. 应用遥感技术评估土壤侵蚀影响因素[J]. 水土保持研究, 2007, 14(5): 189-193.
- [84] Xu Hanqiu. Dynamic of soil exposure intensity and its effect on thermal environment change[J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(3): 902-910.
- [85] 宋现锋, 段峥, 牛海山, 等. 土壤侵蚀模型中植被管理因子的遥感估算[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(3): 58-63.
- [86] Yuan Wenping, Li Xianglan, Liang Shunlin, et al. Characterization of locations and extents of afforestation from the Grain for Green Project in China[J]. Remote Sensing Letters, 2014, 5(3): 221-229.
- [87] Zhang Haidong, Yu Dongsheng, Dong Linlin, et al. Regional soil erosion assessment from remote sensing data in rehabilitated high density canopy forests of southern China[J]. Catena, 2014, 123: 106-112.
- [88] Taramelli A, Pasqui M, Barbour J, et al. Spatial and temporal dust source variability in northern China identified using advanced remote sensing analysis[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2013, 38(8): 793-809.
- [89] 张俊, 朱国龙, 李妍. 面向对象高分辨率影像信息提取中的尺度效应及最优尺度研究[J]. 测绘科学, 2011, 36(2): 107-110.
- [90] 王文娟, 张树文, 李颖, 等. 高分辨率遥感影像在水土流失定量评价中的应用探讨: 以 Quickbird 影像为例[J]. 农业系统科学与综合研究, 2008, 24(4): 442-447.
- [91] Troeh F R, Hobbs A J, Donahue R L. Soil and Water Conservation[M]. 2 ed. USA: Prentice-Hall Incorporation, 1991.
- [92] Mulder V L, Bruin S de, Schaepman M E, et al. The use of remote sensing in soil and terrain mapping: A review[J]. Geoderma, 2011, 162(1/2): 1-19.
- [93] 姜永清, 武春龙, 雷会珠. 晋陕蒙黄河峡谷区土壤侵蚀遥感制图方法研究[J]. 水土保持学报, 1994, 8(3): 8-16.
- [94] Reiche Matthias, Funk Roger, Zhang Zhuodong, et al. Application of satellite remote sensing for mapping wind erosion risk and dust emission-deposition in Inner Mongolia grassland, China [J]. Grassland Science, 2012, 58(1): 8-19.
- [95] Yang Xihua. Digital mapping of RUSLE slope length and steepness factor across New South Wales, Australia[J]. Soil Research, 2015, 53(2): 216-226.
- [96] Ji Junfeng, Chen Jun, Jin Li, et al. Relating magnetic susceptibility(MS) to the simulated thematic mapper (TM) bands of the Chinese loess: Application of TM image for soil MS mapping on Loess Plateau[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109(5): 297-319.
- [97] Huang Mingxiang, Gong Jianghua, Shi Zhou, et al. Genetic algorithm-based decision tree classifier for remote sensing mapping with SPOT-5 data in the Hong-ShiMao watershed of the Loess Plateau, China[J]. Neural Computing & Applications, 2007, 16(6): 513-517.