DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.05.001
史文海, 娄黔方, 谢鑫杰, 等. 中国水力侵蚀监测方法研究进展. 土壤, 2024, 56(5): 921–927.

中国水力侵蚀监测方法研究进展①

史文海[1,2,3], 娄黔方[1], 谢鑫杰[1], 刘 亮[4], 宋若琪[1], 任兆粲[1], 刘 明[1], 唐铭君[1]

(1 长安大学水利与环境学院, 西安 710054; 2 长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054; 3 水利部旱区生态水文与水安全重点实验室(长安大学), 西安 710054; 4 南京林业大学林草学院、水土保持学院, 南京 210037)

摘 要: 水力侵蚀监测不仅是土壤侵蚀研究的难点, 同时也是土壤侵蚀动态评估和防治的基础。本文系统回顾了中国水力侵蚀监测方法的主要发展历程, 基于水力侵蚀监测方法的特点对其进行了分类, 并针对水力侵蚀不同监测方法的适用性及局限性进行了分析总结。最后, 结合近 20 年中国水力侵蚀研究的热点和前沿, 对未来水力侵蚀监测方法进行了前景展望, 阐明了目前中国水力侵蚀监测方法存在的问题以及发展需求。

关键词: 水力侵蚀; 监测方法; 发展历程; 研究展望

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A

Research Progresses and Prospects of Water Erosion Monitoring Methods in China

SHI Wenhai[1,2,3], LOU Qianfang[1], XIE Xinjie[1], LIU Liang[4], SONG Ruoqi[1], REN Zhaocan[1], LIU Ming[1], TANG Mingjun[1]

(1 *School of Water and Environment*, *Chang'an University*, *Xi'an* 710054, *China*; 2 *Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region*, *Chang'an University*, *Ministry of Education*, *Xi'an* 710054, *China*; 3 *Key Laboratory of Eco-hydrology and Water Security in Arid and Semi-arid Regions of the Ministry of Water Resources*, *Chang'an University*, *Xi'an* 710054, *China*; 4 *College of Forestry and Prataculture*, *College of Soil and Water Conservation*, *Nanjing Forestry University*, *Nanjing* 210037, *China*)

Abstract: Water erosion monitoring is not only a challenging aspect of soil erosion research but also a foundation for dynamic assessment and prevention of soil erosion. This study systematically reviews the major development stages of water erosion monitoring methods in China, classifies these methods based on their characteristics, and analyzes their applicability and limitations. Finally, by considering the hotspots and frontiers of water erosion research in China over the past 20 years, this study provides an outlook on the future of water erosion monitoring methods, highlighting current issues and development needs.

Key words: Water erosion; Monitoring methods; Development history; Research prospects

水力侵蚀是指在水的作用下, 土壤、土体或其他地表组成物质被破坏、搬运和沉积的过程, 如下雨落在坡面引起土粒移动, 形成细沟并逐渐积累变成较大的沟壑等, 其在全球范围内分布最广泛, 约占全球土壤侵蚀类型的 50%[1]。中国是世界上水力侵蚀最严重的国家之一, 其主要水力侵蚀区包括东北黑土区、北方土石山区、西北黄土高原区、南方红壤区、西南紫色土区和西南岩溶区[2]。根据第三次遥感数据调查结果[3], 中国水土流失面积达到 267.42 万 km^2, 其中水力侵蚀面积为 110.58 万 km^2, 约占国土面积的 11.56%, 占水土流失总面积的 41.35%。水力侵蚀会降低土地生产力, 是土壤退化及粮食作物减产的重要驱动因素之一[4], 并且会导致水源污染及生态环境破坏, 甚至危及人类赖以生存的水资源和自然环境[5], 对社会发展、国家生态安全和人民的生产生活造成严重影响。

水力侵蚀监测主要是对土壤水力侵蚀状况及其防治措施进行动态监测, 从而及时、准确、全面地掌握水土流失现状及动态信息, 对水土流失防治政策及规划的制定和实施具有重要意义。水力侵蚀监测与治理刻不容缓。然而如何准确有效地开展水力侵蚀监测, 是当前水力侵蚀监测研究工作的重要内容[6]。水力侵蚀监测方法是以水力侵蚀理论为基础, 以物理监测为主同时结合宏观、微观和典型监测的方

①基金项目: 国家自然科学基金青年项目(42107351)、陕西省重点研发计划项目(2022ZDLSF06-10)和长安大学大学生创业创新训练计划项目(G202210710125)资助。

作者简介: 史文海(1986—), 男, 安徽枞阳人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: shiwenhai@chd.edu.cn

法。国内外学者通过大量的研究和探索，提出了包括定性判断[7-8]以及定量计算[9-10]在内的各类水力侵蚀监测方法。当前水力侵蚀监测方法主要包括传统的径流泥沙监测和侵蚀针定位监测，以及伴随新理论新技术而出现的近景摄影、元素示踪、三维激光、遥感技术等监测方法，但目前相关学者对上述监测方法的总结和论述各有侧重，未能进行系统归纳和整理。鉴于此，本文在回顾我国水力侵蚀监测发展历程的基础上，对当前我国主要的水力侵蚀监测方法进行了系统归纳和总结并对其进行了分类，同时对各种监测方法的优点、不足及适用情况进行了比较分析，并针对我国现有水力侵蚀监测方法存在的问题，结合水土保持学科发展需求，对未来我国水力侵蚀监测方法研究进行了展望，以期推动我国水力侵蚀监测技术的发展与完善，为我国水土流失防治工作的政策制定和实践提供科学依据。

1 我国水力侵蚀监测发展历程

早在 20 世纪 20 年代，我国就开始利用径流小区进行水力侵蚀监测，如典型样地(观测小区)土壤侵蚀观测，主要研究土壤侵蚀与植被的关系。1942 年，时农业和林业部在甘肃天水建立了天水水土保持科学实验站[11]。1951—1952 年，水利部黄河水利委员会分别在甘肃庆阳及陕西榆林建立了西峰和绥德水土保持科学实验站。20 世纪 50 年代，水利部开展了第一次全国水土流失调查，完成了我国首次全国范围水力侵蚀面积初步估算，是我国最早的全国性水力侵蚀监测项目。1985 年，基于多光谱扫描仪(MSS)图像进行了全国第一次土壤侵蚀遥感调查，对全国水蚀区、风蚀区和冻融侵蚀区进行了全面系统的调查。1986—1995 年期间，国家组织开展了黄土高原地区治理的重点工程，分别在黄土台塬区、丘陵沟壑区及高原沟壑区建立了 11 个综合试验示范区[12]。自 1988 年以来，中国科学院在各实验站点对水土流失直接相关的水–土–气–生等关键指标进行监测，并组建了中国生态系统研究网络，标志着水力侵蚀监测工作全面开展。1999 年，基于专题绘图仪(TM)图像开展了第二次全国土壤侵蚀遥感调查[13]，结合地理信息系统(GIS)技术建立了全国 1∶10 万的土壤侵蚀和图形图像数据库。

进入 21 世纪后，随着水力侵蚀监测技术及设备的飞速发展，我国水力侵蚀监测方法也不断向自动化、集成化及智能化发展，极大地丰富了水力侵蚀监测手段和应用范围。在这一阶段，充分发挥水力侵蚀监测设备的集成化优势成为研发的重点[14]，其核心特点是数据的自动采集、分析和处理。全面引入典型实验观测数据的自动采集、测试分析、数据库建设和网络传输，使得监测频率设计、水力侵蚀过程记录及结果处理变得更加科学和可靠。此外，导航技术和野外精确定位技术的应用，为数据测量和分析提供了高效的手段。2004 年水利部启动了全国水土保持监测网络和信息系统项目，计划在全国建设 738 个监测点，创建科技示范园区[15]。2013 年水利部组织实施全国水土流失动态监测与公告项目，从监测点、小流域以及区域 3 个尺度开展了持续固定的动态监测[16-17]。2022 年颁布的《全国水土流失动态监测实施方案(2023—2027 年)》[18]指出：要全面实施年度全国水土流失动态监测，全面提升高新技术融合应用能力和监测数据智能管理水平，为智慧水利建设提供算据基础。2023 年中共中央办公厅及国务院办公厅在《关于加强新时代水土保持工作的意见》[19]中也提出：推进遥感、大数据、云计算等现代信息技术与水土保持深度融合，强化水土保持监管、监测等信息共享和部门间互联互通，提高管理数字化、网络化、智能化水平。综上所述，我国水力侵蚀监测技术及方法的研发已有一百多年的历史，逐步由传统的劳动密集及技术简单的单坡地面监测，向技术密集及区域规模的自动化、集成化及智能化连续监测发展，实现了水力侵蚀的多元及多尺度监测。

2 我国水力侵蚀监测方法研究进展

目前，水力侵蚀监测方法可根据测量技术原理不同，划分为径流泥沙测量法与地貌特征测量法。径流泥沙法可进一步划分为直接测量法(如称重法)和间接测量法(激光法、γ 射线法及超声波法等)，地貌特征法可进一步划分为接触式测量法(如测针法)和非接触式测量法(核示踪、三维激光扫描、近景摄影测量、卫星遥感及无人机法等)。

2.1 径流泥沙法

2.1.1 称重法　　称重法是一种最为常用的径流含沙量测量方法[20]。传统的烘干称重法是通过采集一定体积的代表性样品，预处理、烘干、称重样品以获得含沙量。随着水力侵蚀测量方法和仪器的发展，称重法目前通过测量浑水体积与质量，根据体积、质量与密度之间的关系计算出浑水中的含沙量。由于泥沙比重在天然条件下变化范围较小，因此称重法可以广泛用于测量自然界中的径流含沙量。称重法受温度影响较小，能有效实现全年径流含沙量监测[21]。程冬

兵等[22]基于长期水土流失观测试验，对比了称重法及比重计法测算泥沙含量的差异性，结果表明，称重法具有设备简单、方法易行、效率和精度较高的优点。但称重法也同时具有劳动强度大、无法实现实时自动观测，且其测量精度在很大程度上受到泥浆和水样体积影响等缺点[23](表 1)。考虑到称重法上述不足之处，为解决传统测量方法在石质山区适用性较差的问题，符素华等[24]提出了沉积物分层测量方法，而叶芝菡等[25]开发了收集径流桶中沉积物的全深度剖面采样器代替传统搅动浑水取样方法，显著提高了径流泥沙收集及测量精度。

2.1.2　激光法　　激光法是利用光传入水中时，水介质的散逸和吸收作用使其强度减弱且其减弱程度受水的含沙量影响的原理，将穿过待测水样的激光信号转换为电信号，根据电压信号的强弱和含沙量的函数关系来测定含沙量的方法[26]。激光法可以快速测出含沙量且误差较小，其时空相干性也较高，结合计算机及光纤的应用可以极大减少外部漂移或干扰[26]。其缺点是在测量坡面径流泥沙含量时泥沙颗粒分布不均匀会造成测量误差，此外，设备庞大、笨重，成本较高[27]，因此具有局限性。为了研究激光法的适用性，刘和远等[28]探讨了激光法和筛分法测量结果之间的相关关系，其选取黄河龙门水文站泥沙样品分别进行了测试，结果表明激光法测试结果比筛分法系统偏粗。王爱霞等[29]通过对比激光法与传统消光沉降法对不同砂型的泥沙样品的测试结果，得到了两结果之间的相互关系，从而解决了新旧泥沙颗粒级配资料的衔接问题。

表 1　径流泥沙监测方法特点

Table 1　Characteristics of runoff-sediment monitoring methods

类型	优点	不足
称重法	设备简单，方法易行，精度较高	劳动强度大，不能实时连续测量
激光法	速度快，精度高，人为因素影响小	成本较高，设备笨重，量程范围依然较窄
γ 射线法	快速简便，自动实时测量，不受泥沙粒径影响	放射源具有辐射性，安全防护难度较大
超声波法	方便快捷，测量低含沙量精度较高	适用范围有限，成本较高，易受外界干扰

2.1.3　γ 射线法　　γ 射线法是一种通过泥沙颗粒在溶液中的散射、折射及吸收作用过程中，射线强度不断减小的原理来测量含沙量的方法[30]。雷廷武等[31]首次采用 γ 射线法测量径流泥沙含量，试验表明测量结果与理想结果高度一致，泥沙溶液中 γ 射线的输运强度与水流泥沙浓度之间存在显著的线性相关关系；同时通过减小 γ 射线源与能谱探头之间的距离，可进一步缩短采样时间，是目前现场测量含沙量快速简便、科学可靠的良好手段。利用 γ 光衰减原理测量含沙量，测量精度高，不受泥沙颗粒、泥浆浓度、河流漂浮物等影响，设备易于保护，适合现场实时测量。王辉等[32]研制了 LTW-1 全自动径流泥沙含量动态测量仪，实现了径流泥沙含量的快速实时动态测量。γ 射线法测量结果与标准泥沙含量的相对误差在 1% 以内，其误差产生原因主要是由配置标准泥沙溶液的误差、仪器的不稳定性和射线脉冲的随机性造成的[33]。但 γ 射线放射源具有辐射性，安全防护难度较大，易对人体和环境产生危害。

2.1.4　超声波法　　超声波法是利用发射的超声波经悬浊液后发生衰减、遇到挡板后反射的原理，根据接收的反射信号来测量含沙量的方法[34]。超声波法主要包括超声波反射法和超声波衰减法。超声波法在测定含沙量时强度要求适中，目的是保证衰减后信号能被顺利接收。由于干扰水流改变其原有的动态特征且含沙量越大测量误差越大，超声波法的适用范围非常有限，更适用于含沙量较低的情况。方彦军和唐懋官[35]研制出由超声探测传感器、超声仪器和微处理机组合而成的测试系统，该系统采用面积比值法测定声吸收系数，提高了测量的灵敏度和精度。张民曦等[36]采用 3 种不同的粒度测量工艺对不同的泥水样品进行了颗粒粒径分析，结果表明，超声波振动分散方法能有效地测量泥沙的基本粒径。

2.2　地貌特征法

2.2.1　测针法　　测针法是指测针在测量过程中垂直或竖直插入坡面，其钉帽端露出坡面地表一定距离以测量初始坡面高程，并通过测量降雨侵蚀发生前后或一段时间内的坡面高差来估算相应水力侵蚀的方法[37]。测针法主要运用于地形相对复杂、区域较为分散及植被覆盖率高的小区域监测。如，孙根行等[38]利用该法对青海乐都县峰堆乡小流域 6 条冲沟的侵蚀量进行了观测研究，胡国庆等[39]采用测针法和磁示踪法比较了自然降雨条件下不同坡面土壤侵蚀的空间特征。但测针法也存在在室外条件下测针的刻度易发生锈蚀剥落从而导致数据丢失的问题。另外，测

针具有一定柔性，在锤击作用下会出现缩短的趋势，从而造成刻度不准确；且测针露出坡面地表刻度较短且视线难以水平，会造成读取难度大及数据采集效率低等问题(表 2)。

表 2 地貌特征法的优缺点

Table 2 Advantages and disadvantages of geomorphological characterization methods

类型	优点	不足
测针法	适用地形复杂，植被盖度高，遥感难以适用的区域	读数困难，刻度不准，数据采集效率低
核示踪法	不受场地的限制，操作简便快捷，节省人力物力	基准值不确定，采集测试任务繁重，费用高昂
三维激光扫描法	自动采集处理，快速高效，高精度三维空间数据	扫描视角不全，光线要求高，野外搬运不便
近景摄影测量法	测量时间短，便携性好，成本低，精度高	操作技术门槛高，图像数据处理复杂
卫星遥感法	更新周期短，覆盖范围广，信息量丰富	受天气影响存在盲区，无法反映水保措施
无人机法	时效强，精度高，机动灵活，数据直观	垂直误差大，人工成本高，长期使用费用高

2.2.2 核示踪法 核示踪法[40]是利用大气中的核素随着降雨或尘埃落到地面后被土壤颗粒迅速强烈地吸附并随着土壤颗粒的迁移进行再分布的特点，测量地表水平和垂直剖面核素的空间分布格局，通过建立数学模型计算侵蚀或沉积体的核素赋存量及相应的土壤侵蚀或沉积量。核示踪法分为单核素示踪、多核素复合示踪、稳定性稀土元素(REE)示踪法等[41]。核示踪法不受场地限制，简便快捷，省时省力[42]。但核素半衰期及监测点基准值具有不确定性，会对水力侵蚀模数估算精度产生影响。同时，采集土壤样品的任务繁重，相关分析测试费用较高。李雅琦等[43]基于水力侵蚀研究中的核示踪技术，提出了 REE 示踪法；袁东海等[44]采用定位土芯稀土元素(Eu)示踪法及中子活化技术，研究了蒋家塘小流域坡地不同空间上水力侵蚀的分布规律。

2.2.3 三维激光扫描法 三维激光扫描技术又称实景复制技术，其利用三维激光扫描仪精确完整地测量地表地形地貌的微观变化特征[45]。20 世纪 80 年代，美国学者制作了三维激光扫描仪对侵蚀小区的地表糙度与微观地形地貌展开观测[46]。在我国，唐辉等[47]利用三维激光扫描技术完整地模拟了不同降雨强度下黄土坡面微地形的变化特征。肖海等[48]利用三维激光扫描仪在降雨前后快速高效地扫描坡面形态，证明测量的土壤侵蚀量误差较小。但三维激光扫描技术存在一定局限[49]，该技术虽能自动采集和获取三维点云数据，但其扫描视角不全、扫描时对光线要求较高。同时，在野外实际操作过程中，该方法存在着搬运不方便等不足。

2.2.4 近景摄影测量法 近年来，随着水力侵蚀研究的需求及近景摄影测量技术发展，近景摄影测量技术更加广泛地应用于水力侵蚀监测。近景摄影测量法通过摄影测量，研究目标对象的外形、尺寸以及运动状态等特征[50]。近景摄影测量技术具有无需接触被测体、测量精度高、测量时间短、便携性好、成本低等优点。此外，技术能够采集多种尺度的地理形态数据，生成的影像信息丰富、易存储、能够重复使用。覃超等[51]采用近景摄影测量技术对人工模拟径流冲刷条件下黄土坡面侵蚀展开观测，生成了不同时段高精度数字地面模型数据；祁有祥等[52]利用近景摄影技术在北京延庆县水保示范区进行了水土流失速率的试点研究，证明了近景摄影测量技术精度可达到 90% 左右。但目前近景摄影测量技术仍面临很多不足，其操作技术门槛高，图像数据处理的过程复杂，需要使用空间插值才能生成数字高程模型(DEM)，可能导致细节信息损失。

2.2.5 卫星遥感法 卫星遥感法是借助电磁波原理以及各类传感器远距离收集和处理目标监测区域的辐射及反射电磁波信息得到相应的图像，并构建多元化模型以实现对水土流失监测的方法[53]。自 20 世纪 70 年代起，我国就开始运用遥感技术对全国不同尺度区域进行调查与监测，其方法包括目视解译法、指标综合法及遥感模型法等[54]。目视解译法是通过判读和解译主要侵蚀控制因素的遥感影像，划分侵蚀等级和类型；指标综合法是基于各侵蚀因子的重要性赋予不同的权重从而确定侵蚀风险等级。这两种方法分别应用在我国第一、二次土壤侵蚀遥感调查中，但受人为因素影响较大，属定性或半定量方法。而现常用的遥感模型法是人机交互解译各土壤侵蚀影响因子的遥感信息并建立数据库，最终结合土壤流失模型进行水力侵蚀定量评价[55]。卫星遥感法具有更新周期短、覆盖面广和信息量大等特点，在进行水力侵蚀监测中具有快速、准确、可操作性强等优点，因而发挥着重要作用[56]。卜兆宏等[57]在我国南北方水蚀区进行了土壤年流失量及其影响因素周年实测，建立了符合我国水土流失实际的定量遥感监测模型。陈玉东等[58]通过遥感模型法对龙墩水库小流域土壤侵蚀进

行了预测及空间分析与统计，为该区域后期的土地监管、防治与利用提供了可靠依据。但是卫星遥感法也存在受云雾天气影响，出现数据盲区等问题，且无法反映水土保持措施的分布情况。

2.2.6 无人机法　　无人机法通过无人机搭载雷达、红外线、超声波及高清摄影等传感器实现不同功能和精度的航拍影像及点云数据获取，建立侵蚀区高精度模型或解译土壤侵蚀因子，直接或间接地获取水力侵蚀量[59]。通过无人机与 GIS 结合，可以有效地提升水土保持监测工作的自动化程度、监测效率和监测精度。无人机法具有时效性高、精度高、机动灵活、能在高危区探测、数据直观的特点。代文等[60]以黄土高原小流域为例，利用无人机摄影测量技术得到了两期 DEM，从而计算了流域地形变化量及输沙率的空间分布；李志威和汤韬[61]利用无人机获取了黄河源区典型弯曲河道的低空影像数据，并对河道相邻凸岸及凹岸之间断面面积进行了计算；赵春敬等[62]研究分析了无人机和传统地面方法的差异性，结果表明无人机法可为西藏地区沟蚀监测提供便捷、可靠的数据源。但无人机法也存在垂直精度误差大、后期人工成本投入较大及长期使用费用高的问题[63]。

3　存在问题与研究热点

3.1　存在问题

随着多学科交叉融合，水力侵蚀监测手段得到了极大的丰富，然而现有的研究方法仍然难以满足实际需求，未来挑战和机遇并存。结合水力侵蚀监测方法的发展历程及优缺点，其主要存在以下问题：①全过程自动化监测水平不足。目前的径流泥沙法的监测数据大多是降雨事件的径流总量，为获得径流、泥沙的过程监测数据，就必须要人工监测降雨径流过程；而现有的地貌特征方法则是通过三维激光、近景摄像、无人机或卫星遥感等工具定期进行信息采集及处理获得水力侵蚀空间信息，但其自动化水平较低。因此，如何实现水力侵蚀监测全过程自动化以适应当前水土保持高质量发展仍是不小的挑战。②单一监测手段适应性较差。传统方法如称重法及测针法野外工作量大、效率低、周期长，不能很好适应现代水力侵蚀监测高时效性、自动化、系统化的发展趋势；现代新型监测方法如三维激光扫描、遥感监测、近景摄影测量易受气候、地形、人类活动等多方面因素制约，从而造成数据盲区及精度降低等情况。如何提高单一监测手段的适应性、稳定性以及多监测手段的结合性仍需大量的研究创新。

3.2　研究热点及趋势分析

本文以中国知网(CNKI)数据库核心合集作为数据源，以“水力侵蚀监测方法”为关键词，检索到 2002—2024 年的 330 篇相关文章，并利用 Citespace 软件对关键词进行可视化分析，得出当下水力侵蚀监测的研究热点。以关键词作图分析，图 1A 是以水力侵蚀为中心的 20 个关键词，其中红色条带表示该年份在水力侵蚀研究中的热点关键词；图 1B 中关键词词频在一定程度上反映水力侵蚀研究的主要热点领域，图中年轮的颜色和厚度分别表示关键词出现的时间和数量，节点大小表示关键词出现的频次，连线的粗细表示关键词之间共现的高低。由图 1 可知，“土

(A)

Keywords	Year	Strength	Begin	End	2002—2024
遥感	2002	3.37	2002	2005	
动态监测	2002	1.32	2002	2004	
小流域	2003	1.67	2003	2008	
黄土高原	2005	3.64	2005	2010	
模拟试验	2005	2.02	2005	2010	
监测	2005	1.67	2005	2011	
相似比尺	2006	1.94	2006	2010	
水土流失	2002	1.76	2007	2009	
土地利用	2007	1.51	2007	2009	
监测方法	2007	2.44	2007	2012	
抽样调查	2010	1.38	2010	2013	
侵蚀量	2012	1.82	2012	2016	
模拟降雨	2014	1.58	2014	2019	
含沙量	2015	1.66	2015	2017	
无人机	2010	3.06	2016	2019	
坡面侵蚀	2009	1.53	2018	2019	
侵蚀速率	2018	1.49	2018	2024	
影响因素	2014	1.41	2018	2022	
微地形	2019	1.27	2019	2024	
时空变化	2016	1.44	2020	2020	

(B)

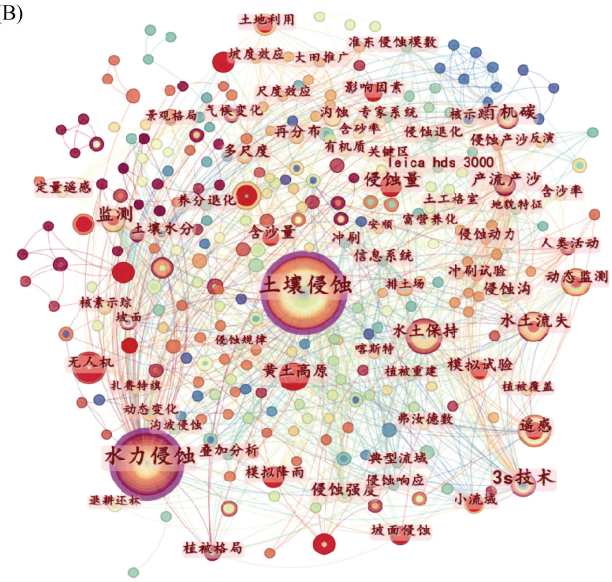

图 1　2002—2024 年水力侵蚀监测方法关键词突现图谱(A)及文献聚类视图(B)

Fig. 1　Keyword emergences (A) and literature cluster view (B) of water erosion monitoring methods from 2002 to 2024

壤侵蚀”和“水力侵蚀”是图谱中的最大节点，分别出现 64 次和 62 次。另外，“水土流失”“水土保持”“遥感”“监测”“无人机”“监测方法”“动态监测”等节点也非常显眼，反映了当下研究水力侵蚀监测方法的热点领域，表明在近 20 年的水力侵蚀监测方法研究中“遥感”与“无人机”监测方法是研究的热点方向，也是未来水力侵蚀监测方法的突破方向。

4 结论与展望

我国水力侵蚀监测技术及方法的研究经历了近百年的探索与发展，其逐步由传统的劳动密集及技术简单的单坡地面监测，向技术密集及区域规模的自动化、集成化及智能化连续监测发展，但仍存在一些主要问题，需要进一步开展研究。

1)加强水力侵蚀监测技术研发，实现全过程自动化监测。《全国水土保持规划(2015—2030 年)》[64]指出：围绕水土流失机理、防控原理和技术、动态监测技术、信息化技术等方面的应用基础研究，不断改进、创新各种监测技术，是全面深入研究水力侵蚀的重要前提。未来的研究中，应尝试集成水力侵蚀试验监测技术、精密传感技术、自动化控制技术等，开发一种操作简便、结构简单、自动化程度高的水力侵蚀自动采集系统，以实现水力侵蚀的实时全过程自动采集。此外，还应通过现代化技术提高国内水力侵蚀仪器的研发能力，升级改造相关监测技术与方法。

2)多种监测手段结合，实施天地一体化监测。水利部办公厅印发的《2024 年水土保持工作要点》[65]提出：加强遥感监测、地面观测、信息化监管数据的有机融合、系统分析，保证监测成果质量。未来水力侵蚀监测的重要方向，是建立以遥感等非接触测量为主，接触测量为辅，结合多种方法优势的天地一体化监测方法体系，从而为水力侵蚀监测提供更详细可靠的数据，为水力侵蚀高效精准监测做出有力贡献。

3)加强水力侵蚀监测网络的构建，实现数据高效传输及共享。《中华人民共和国水土保持法》[66]规定：水行政主管部门应当完善全国水土保持监测网络，鼓励支持水土保持科学技术研究。网络化是水力侵蚀监测的重要发展方向之一，随着水力侵蚀监测网络日新月异，完全实现网络化变得更加紧迫。在未来研究中数据资料和图形图像数据信息的网络共享和传输将占据越来越重要的地位。水力侵蚀监测的网络化有利于开展水土保持动态监测与预警，从而有利于相关部门更好地了解水土流失消长情况、重点生产建设项目水土保持治理措施的布局及治理效果，进而更好地为智慧水利建设服务，为国家水土流失战略方向提供指引。

参考文献：

[1] 赵晓丽, 张增祥, 周全斌, 等. 中国土壤侵蚀现状及综合防治对策研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 40–43, 46.

[2] 水利部水土保持监测中心. 我国水土保持监测工作发展成就与作用[J]. 中国水土保持, 2021(7): 1–4.

[3] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报[J]. 中国水土保持, 2013(10): 2–3,11.

[4] 史志华, 王玲, 刘前进, 等. 土壤侵蚀: 从综合治理到生态调控[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 198–205.

[5] 冷疏影, 冯仁国, 李锐, 等. 土壤侵蚀与水土保持科学重点研究领域与问题[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 1–6, 26.

[6] 史志华, 刘前进, 张含玉, 等. 近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1117–1127.

[7] Vrieling A, Sterk G, Vigiak O. Spatial evaluation of soil erosion risk in the West Usambara Mountains, Tanzania[J]. Land Degradation & Development, 2006, 17(3): 301–319.

[8] Bou Kheir R, Cerdan O, Abdallah C. Regional soil erosion risk mapping in Lebanon[J]. Geomorphology, 2006, 82(3/4): 347–359.

[9] Cohen M J, Shepherd K D, Walsh M G. Empirical reformulation of the universal soil loss equation for erosion risk assessment in a tropical watershed[J]. Geoderma, 2005, 124(3/4): 235–252.

[10] Schiettecatte W, D'hondt L, Cornelis W M, et al. Influence of landuse on soil erosion risk in the Cuyaguateje watershed (Cuba)[J]. Catena, 2008, 74(1): 1–12.

[11] 郭索彦, 李智广. 我国水土保持监测的发展历程与成就[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(5): 19–24.

[12] 邓岚, 宋桂琴. 我国城市水土流失研究进展初探[J]. 水土保持学报, 2001, 15(S1): 72–75.

[13] 曾大林, 李智广. 第二次全国土壤侵蚀遥感调查工作的做法与思考[J]. 中国水土保持, 2000(1): 28–31.

[14] 李月, 周运超, 白晓永, 等. 径流小区法监测水土流失的百年历程(1915—2014 年)[J]. 中国水土保持, 2014(12): 63–66.

[15] 夏小林. 开发建设项目水土保持地面监测方法和预测方法研究[J]. 水利水电技术, 2011, 42(8): 92–94.

[16] 马力, 卜兆宏, 梁文广, 等. 基于 USLE 原理和 3S 技术的水土流失定量监测方法及其应用研究[J]. 土壤学报, 2019, 56(3): 602–614.

[17] 曹梓豪, 赵清贺, 左宪禹, 等. 黄河下游河岸坡面产流产沙特征及其与汇流路径长度关系[J]. 土壤学报, 2018, 55(6): 1389–1400.

[18] 沈雪建. 强化新时代水土保持高质量发展监测和信息化基础支撑[J]. 中国水利, 2023(17): 14–18.

[19] 朱程清. 开启全面加强新时代水土保持工作新征程[J]. 中国水利, 2023(10): 1–3.

[20] 路炳军, 袁爱萍, 章文波. 径流小区集流桶(池)泥沙含量快速测定方法探讨[J]. 水土保持通报, 2009, 29(2): 15–17.

[21] Pinson W T, Yoder D C, Buchanan J R, et al. Design and evaluation of an improved flow divider for sampling runoff plots[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2004, 20(4): 433–438.

[22] 程冬兵, 张平仓, 张长伟, 等. 泥沙含量简易测算方法

的探讨[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 193–197.
[23] 温文杰, 张建军, 李依璇, 等. 径流含沙量测定方法研究[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(11): 155–162.
[24] 符素华, 付金生, 王晓岚, 等. 径流小区集流桶含沙量测量方法研究[J]. 水土保持通报, 2003, 23(6): 39–41.
[25] 叶芝菡, 刘宝元, 路炳军, 等. 径流小区集流桶含沙量全深剖面采样器的研制与试验[J]. 泥沙研究, 2005(3): 24–29.
[26] 赵昕, 田岳明, 徐汉光, 等. 激光类测沙仪在长江泥沙测验中的应用[J]. 水文, 2011, 31(S1): 117–120.
[27] 蒋建平, 朱汉华, 吴立键. 基于激光散射原理的含沙量快速施测方法研究[J]. 人民长江, 2020, 51(7): 89–92.
[28] 刘和远, 和瑞莉, 吉俊峰. 激光法与筛分法泥沙颗粒分析结果的相关性[J]. 人民黄河, 2005, 27(8): 24–25.
[29] 王爱霞, 孙章顺, 刘汉忠, 等. 激光法与消光沉降法测试泥沙粒径误差分析[J]. 水资源与水工程学报, 2006, 17(4): 86–88.
[30] Ferguson H, Gardner W H. Water content measurement in soil columns by gamma ray absorption[J]. Soil Science Society of America Journal, 1962, 26(1): 11–14.
[31] 雷廷武, 赵军, 袁建平, 等. 利用γ射线透射法测量径流含沙量及算法[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 18–21, 13.
[32] 王辉, 雷廷武, 赵军, 等. LTW-1 型径流泥沙含量与流量动态测量系统研究[J]. 水土保持通报, 2003, 23(2): 43–45.
[33] 雷廷武, 刘清坤, 黄兴法, 等. 伽玛射线测量径流泥沙含量算法中质量吸收系数优选及其对测量误差影响的分析[J]. 农业工程学报, 2003, 19(01): 51–53.
[34] 展小云, 曹晓萍, 郭明航, 等. 径流泥沙监测方法研究现状与展望[J]. 中国水土保持, 2017(6): 13–17.
[35] 方彦军, 唐懋官. 超声衰减法含沙量测试研究[J]. 泥沙研究, 1990(2): 1–12.
[36] 张民曦, 严建明, 王贤奔, 等. 超声波振动仪器在采用沉降法进行粘性泥沙粒径分析中的应用[J]. 水利水电技术, 2014, 45(2): 100–103.
[37] Davis R J, Gregory K J. A new distinct mechanism of river bank erosion in a forested catchment[J]. Journal of Hydrology, 1994, 157(1/2/3/4): 1–11.
[38] 孙根行, 王湜, 赵串串, 等. 青海省黄土丘陵沟壑区沟蚀影响因子的贡献率[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1402–1406.
[39] 胡国庆, 董元杰, 史衍玺, 等. 坡面土壤侵蚀空间分异特征的磁性示踪法和侵蚀针法对比研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 53–57.
[40] Fang H Y, Sun L Y, Qi D L, et al. Using 137Cs technique to quantify soil erosion and deposition rates in an agricultural catchment in the black soil region, Northeast China[J]. Geomorphology, 2012, 169/170: 142–150.
[41] 聂国辉, 叶永棋, 叶碎高, 等. 用 Cs-137 示踪法研究浙江天台县典型坡面的土壤侵蚀规律[J]. 土壤, 2009, 41(2): 303–307.
[42] 汤振权, 刘刚, 许文年. 稀土元素示踪技术及其在土壤侵蚀研究中的应用[J]. 中国稀土学报, 2011, 29(5): 515–522.
[43] 李雅琦, 田均良, 刘善灵. 土壤侵蚀研究中核示踪技术的应用[J]. 中国水土保持, 1998(12): 31–33.
[44] 袁东海, 王兆骞, 郭新波, 等. 基于土壤侵蚀定位土芯元素示踪法和 GIS 技术红壤小流域坡地土壤肥力的综合评价[J]. 水土保持学报, 2003, 17(5): 88–91, 157.
[45] Yang C X, Zhen B, Li L, et al. Application of fractal dimensions and GIS technology in the soil erosion field[J]. Advanced Materials Research, 2011, 271/272/273: 1146–1151.
[46] Huang C, White I, Thwaite E G, et al. A noncontact laser system for measuring soil surface topography[J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52(2): 350–355.
[47] 唐辉, 李占斌, 李鹏, 等. 模拟降雨下坡面微地形量化及其与产流产沙的关系[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 127–133.
[48] 肖海, 夏振尧, 朱晓军, 等. 三维激光扫描仪在坡面土壤侵蚀研究中的应用[J]. 水土保持通报, 2014, 34(3): 198–200.
[49] 唐强, 鲍玉海, 贺秀斌, 等. 土壤侵蚀监测新方法和新技术[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(2): 11–18, 23.
[50] 宋月君, 黄炎和, 杨洁, 等. 近景摄影测量在土壤侵蚀监测中的应用[J]. 测绘科学, 2016, 41(6): 80–83, 96.
[51] 覃超, 郑粉莉, 徐锡蒙, 等. 基于立体摄影技术的细沟与细沟水流参数测量[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 150–156.
[52] 祁有祥, 杨建英, 辜再元, 等. 土壤侵蚀速率近景摄影测量法(CRPE)的野外试验研究[J]. 中国水土保持, 2012(5): 36–37, 76.
[53] 张骁, 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.
[54] 张喜旺, 周月敏, 李晓松, 等. 土壤侵蚀评价遥感研究进展[J]. 土壤通报, 2010, 41(4): 1010–1017.
[55] 刘振坤, 刘峰, 郑光辉, 等. 基于 RUSLE 模型的青藏高原土壤保持功能定量评价[J]. 土壤, 2024, 56(1): 173–181.
[56] 张继真, 姜艳艳, 张月. 基于遥感技术的东北黑土区水土流失动态监测研究[J]. 中国水土保持, 2024(1): 26–29, 69.
[57] 卜兆宏, 孙金庄, 周伏建, 等. 水土流失定量遥感方法及其应用的研究[J]. 土壤学报, 1997, 34(3): 235–245.
[58] 陈玉东, 陈梅, 孙旭, 等. 基于 GIS 和 USLE 的龙墩水库小流域土壤侵蚀评估研究[J]. 土壤, 2016, 48(5): 1007–1014.
[59] 王志良, 付贵增, 韦立伟, 等. 无人机低空遥感技术在线状工程水土保持监测中的应用探讨——以新建重庆至万州铁路为例[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(4): 109–113.
[60] 代文, 汤国安, 胡光辉, 等. 基于无人机摄影测量的地形变化检测方法与小流域输沙模型研究[J]. 地理科学进展, 2021, 40(9): 1570–1580.
[61] 李志威, 汤韬. 基于无人机航测黄河源弯曲河道泥沙亏损量计算[J]. 水科学进展, 2020, 31(1): 39–50.
[62] 赵春敬, 焦菊英, 税军锋, 等. 西藏中南部侵蚀沟形态无人机航测与传统地面测量的对比分析[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 120–127.
[63] 曲伟, 庞治国, 雷添杰, 等. 中小河流治理及监测监管中的遥感技术应用综述[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(7): 23–32.
[64] 水利部. 全国水土保持规划(2015—2030 年) [R]. 北京: 水利部, 2015.
[65] 水利部办公厅. 关于印发 2024 年水土保持工作要点的通知(办水保[2024]54 号)[Z]. 北京: 2024.
[66] 中华人民共和国水土保持法[EB/OL]. (2012-11-13). https://www.gov.cn/bumenfuwu/2012-11/13/content_2601276.htm.