

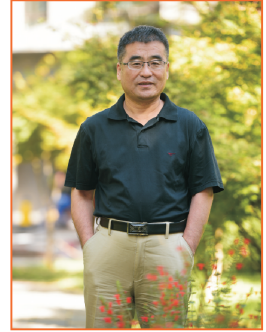
\*\*\*\*\*  
\* 专家论坛 \*  
\*\*\*\*\*

# 中国土壤侵蚀研究重大成就及未来关键领域

张科利<sup>1</sup>, 蔡强国<sup>2</sup>, 柯奇画<sup>1</sup>

(1.北京师范大学 地理科学学部 地理学院 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2.中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** [目的] 回顾中国土壤侵蚀研究的发展历程, 总结该领域的重大研究成果, 分析其现阶段存在的问题及未来关键研究领域, 旨在为中国水土保持及区域生态建设与绿色高质量发展提供参考。[方法] 基于多年的土壤侵蚀研究野外调查和学术研究工作, 对中国土壤侵蚀的有关重大问题进行了长期思考。经过多次学术研讨, 并与同行权威专家进行了交流和探讨。[结果] 中国土壤侵蚀研究领域近百年来取得了一系列重大研究成果, 也存在着一些不足和问题。中国土壤侵蚀研究未来应从土壤侵蚀预报模型完善推广及精度评价, 坡面径流计算方法及模型构建, 人工模拟降雨试验和水槽试验结果的代表性及真实性评价等方面开展重点研究, 并关注土壤侵蚀过程机理、模型应用、技术方法、响应评价、瓶颈问题等议题的研究。[结论] 近百年来研究实践证明, 中国土壤侵蚀研究只有立足于国情, 根据中国土壤侵蚀特点、研究现状及社会需求的变化确定和调整研究方向, 才有可能取得标志性成果。同时, 在国家大力推行生态文明建设的新时代, 土壤侵蚀研究也要调整思路和研究重点。此外, 水土保持工作还应与国家乡村振兴和生态建设相结合, 以先预防, 少扰动为主, 改变过去先破坏再治理的模式。



**关键词:** 中国; 土壤侵蚀研究; 重大成就; 重点领域; 乡村振兴; 生态建设

**文献标识码:** C

**文章编号:** 1000-288X(2022)04-0373-08

**中图分类号:** X171.1, S157.1

**文献参数:** 张科利, 蔡强国, 柯奇画. 中国土壤侵蚀研究重大成就及未来关键领域[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 373-380. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.046; Zhang Keli, Cai Qiangguo, Ke Qihua. Major achievements and future key fields of soil erosion research in China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 373-380.

## Major Achievements and Future Key Fields of Soil Erosion Research in China

Zhang Keli<sup>1</sup>, Cai Qiangguo<sup>2</sup>, Ke Qihua<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, School of Geography, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China)

**Abstract:** [Objective] The developing history of soil erosion research in China was reviewed, the major research achievements were summarized, and the current problems and key research fields in the future were analyzed to provide a reference for China's soil and water conservation, regional ecological construction, and high-quality green development. [Methods] Based on years of work experiences from field investigations and academic research on soil erosion, long-term consideration has been given to major issues related to soil erosion in China through numerous academic discussions and communications with leading experts. [Results] A series of major research achievements have been obtained in the field of soil erosion in China during the last one hundred years, but there have also some drawbacks and problems. In the future, soil erosion research in China should focus on several key fields, such as the improvement, promotion, and accuracy evaluation of

收稿日期: 2022-05-27

修回日期: 2022-07-21

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“西南黄壤区不同尺度土壤侵蚀与泥沙运移规律耦合关系”(41730748)

第一作者: 张科利(1962—), 男(汉族), 陕西省宝鸡市人, 博士, 教授, 博士生导师, 北京师范大学地理科学学部地理学院院长, 中国水土保持学会工程绿化专业委员会副主任, 主要从事土壤侵蚀及水土保持等方面的研究。Email: keli@bnu.edu.cn。

soil erosion prediction models; calculation methods and model construction for slope runoff; evaluation of the representativeness and validity of results from simulated rainfall and flume scouring experiments; and so on. More attention should be given to the mechanisms of soil erosion processes, model applications, technical methods, response evaluations, bottleneck problems, and other issues. [Conclusion] Researches over the past century has shown that soil erosion research should be conducted based on national conditions. Symbolic achievements could only be achieved by determining and adjusting research directions according to the characteristics of soil erosion, the research status, and the changes in social demands in China. Meanwhile, in the new era when the country is vigorously promoting the construction of ecological civilization, soil erosion research must be refreshed with new ideas and emphases. Moreover, soil and water conservation practices should also be integrated with rural revitalization and ecological construction by giving priority to soil erosion prevention and reducing disturbance to soil. Besides, we should change the previously used model of instituting laws and regulations after soil destruction and water loss occurred.

**Keywords:** China; soil erosion research; major achievements; key research fields; rural revitalization; ecological construction

中国是世界上土壤侵蚀最为严重的国家之一。土壤侵蚀引起的水土流失,导致土壤退化、土地生产力降低,严重威胁国家粮食安全。同时,侵蚀产生的泥沙还会污染水体,淤积河道而加剧洪水威胁。因此,土壤侵蚀长期以来都是中国诸多环境问题的根源。进入 21 世纪以来,随着“退耕还林还草”等一系列国家生态工程建设的全面展开,中国生态环境得到了明显改善,水土流失形势也发生了根本性好转。然而,根据《中国水土流失公报(2021 年)》文件<sup>[1]</sup>,目前全国水土流失面积仍有  $2.67 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,其中,水力侵蚀面积  $1.11 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,风力侵蚀面积  $1.57 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。侵蚀程度属于强烈及以上的面积也有  $5.02 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,占全国水土流失总面积的 18.93%。特别是在西北黄土高原、西南岩溶区、东北黑土区、南方红壤区和北方风沙区等水土流失严重区,土壤侵蚀仍然是头号生态环境问题。随着国家整体经济水平的提高,以及农村土地利用方式和产业结构的不断调整,土壤侵蚀过程、主导因素和作用程度等都在发生变化。特别是在当代生态文明建设新理念下,需要对土壤侵蚀研究和水土保持工作有新认识和新对策。因此,有必要回顾和梳理从 20 世纪 30 年代至今的近 100 a 来中国土壤侵蚀研究和水土保持工作的成就,并对未来土壤侵蚀研究的重点领域进行展望。

本文基于多年的野外调查和学术研究工作经验,对中国土壤侵蚀的有关重大问题进行了长期思考。经过多次学术研讨,并与同行权威专家进行交流和探讨,对中国土壤侵蚀研究发展历程及重大成就进行了总结和分析,探讨其现阶段存在的问题及未来的关键研究领域,旨在为中国水土保持及区域生态建设与绿色高质量发展提供参考。

## 1 中国土壤侵蚀基本特征

作为长期以来世界上人口最多的国家,中国农业历史悠久,人类活动影响强烈,陡坡开垦普遍。加之,国土面积大,地貌类型复杂和气候类型多样,使得中国土壤侵蚀无论在发生程度还是在表现特征上都有别于其他国家(见图 1—3)。<sup>①</sup>中国土壤侵蚀环境复杂,自然因子和人为因素相互交织,共同作用。同时,土壤侵蚀的主要影响因子都存在显著的时空变异性,决定了土壤侵蚀规律也存在区域差异性。<sup>②</sup>土壤侵蚀类型齐全,过程复杂。由于不同侵蚀类型或方式在空间上或时间上存在叠加现象,决定了土壤侵蚀影响因子作用复杂,监测评价不易。<sup>③</sup>由于中国陡坡耕地所占比例大,侵蚀强度普遍较大,防治难度大。<sup>④</sup>由于中国土壤侵蚀强度大,侵蚀严重区的径流含沙量高,侵蚀产沙及泥沙运移方式呈高含沙特征,水沙关系复杂,泥沙运移过程不同于一般河流动力学理论或低含沙条件下得出的计算公式。上述特征决定了中国的土壤侵蚀防治不能简单地照搬国外的研究成果,只有立足于中国国情的系统观测及深入研究,才能从根本上解决问题。

## 2 中国土壤侵蚀研究历程

世界近现代土壤侵蚀研究的开端,以德国学者 Ewald Wollny<sup>[2]</sup>(1846—1901)在 19 世纪 70 年代建立的世界第一批土壤侵蚀研究小区为标志。Wollny 首次对土壤流失量进行了科学定量的测量,并于 19 世纪 90 年代见于报道<sup>[3]</sup>。美国的土壤侵蚀研究起始于 20 世纪 10 年代,其中最早尝试测量土壤侵蚀量工作的是由密西西比大学 M. F. Miller<sup>[4]</sup>指导的本科生 R. W.

McClure 和犹他州的美国林业局<sup>[5]</sup>完成的;受 Miller 思想的影响,F. L. Duley 于 1917 年在密苏里大学校园内建了 7 个径流小区。这些小区的观测数据催生了美国最早报道土壤侵蚀科学测量和最早关注农地土壤侵蚀的研究<sup>[6]</sup>。作为土壤侵蚀定量研究的见证,这些小区被保留至今,供人们参观和学习。中国在世界范围内也属于较早开展土壤侵蚀研究的国家之一。中国土壤侵蚀研究一般认为始于 20 世纪 30 年代,开始的时间比德国晚 50~60 a,比美国晚 20~30 a。

根据中国土壤侵蚀科学发展过程及水土保持工作的重点,可将中国土壤侵蚀研究划分为:萌芽阶段、发展阶段、成熟阶段、繁荣阶段这 4 个时段。① 萌芽阶段(1930—1949 年):以在重庆市北碚区、福建省长汀县、甘肃省天水市、陕西省西安市等地设立径流小区为标志,表明中国现代土壤侵蚀研究的开始。② 发展阶段(1950—1980 年):这一阶段中国的农业贯彻以粮食生产为主的方针,水土保持工作就是为粮食生产和水患防治服务。土壤侵蚀研究也主要围绕认识规律、查找沙源和治理措施效益评价开展。主要开展水土流失的全面调查,以了解水土流失现状并建站观测,积累数据,探索土壤侵蚀发生规律,为水土保持工作提供理论基础。③ 成熟阶段(1981—1998 年):随

着全国农村土地承包制政策的实施,国家农业发展方针调整为“以粮食生产为主,兼顾多种经营”。这就要求水土保持工作生态效益、经济效益和社会效益全面抓。这一阶段的研究是在侵蚀理论研究的基础上,探索土壤侵蚀模型,确定水土保持方针政策,筛选和研发水土流失防治技术,为粮食生产和经济发展提供保障。④ 繁荣阶段(1999 年至今):随着“退耕还林还草”等生态工程的实施,国家农业战略强调生态建设的重要性。在新的国家农业发展战略指导下,发生水土流失的下垫面条件发生了重大变化,土壤侵蚀研究开始关注重大生态工程实施之后的土壤侵蚀发展演变趋势,以及未来生态效益评估等问题。同时,土壤侵蚀研究内容也由过去集中在径流泥沙过程及区域特征等方面逐渐拓宽到水土流失治理生态效益评价等方面。围绕发展治理模式,要求水土保持为资源评估、生态建设和环境治理提供技术保障。党的十八大以来,生态文明建设被纳入中国特色社会主义建设“五位一体”总体布局。水土保持工作也应该随之进入新的时代,需要在“两山理论”指导下,追求绿色高质量发展。土壤侵蚀研究和水土保持工作也应该服务于区域生态建设和整体发展,将以往以控制径流泥沙为目标上升到为区域发展和乡村振兴提供理论支撑为目标。



图 1 黄土高原地区沟间地和沟谷地 (2017 摄于陕西省绥德县韭园沟)



图 2 东北黑土区耕地上发育的切沟 (2015 年摄于黑龙江省鹤山农场)

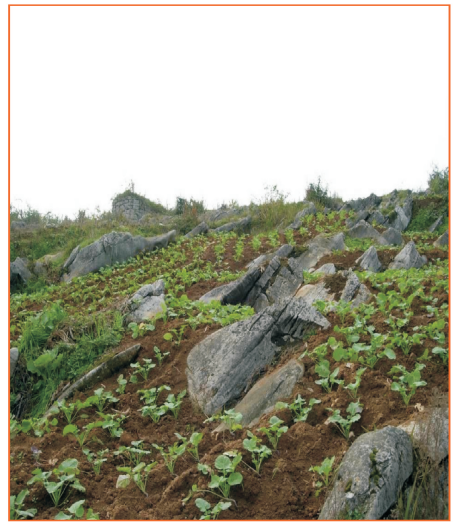


图 3 西南喀斯特地区基岩出露的坡耕地 (2006 年摄于贵州省安顺市)

### 3 当代中国土壤侵蚀研究的重大成就

中国土壤侵蚀研究经过近百年的发展,经历了从无到有,从定性到定量,从研究方向到成熟学科的发展过程。经过几代人的探索和努力,中国在土壤侵蚀理论和水土保持实践等方面都取得了丰富的成果。这些成果对认识中国土壤侵蚀发生规律和区域分异

特征,以及水土保持实施战略和水土流失治理模式的确定都起到了极大的推动作用。

#### 3.1 黄土高原土壤侵蚀分类和分区理论与实践

迫于黄河下游洪水隐患的压力,20 世纪 50 年代,国家组织了大规模的黄土高原水土流失考察,对黄土高原水土流失及区域分布特征有了科学的认识。根据野外调查成果及黄土高原地区的地貌特征,黄秉

维<sup>[7]</sup>、朱显谟<sup>[8]</sup>、罗来兴<sup>[9]</sup>等学者对黄土高原地区的土壤侵蚀类型及划分原则、依据等进行了系统研究,提出了黄土高原土壤侵蚀分区。后来,张宗祜<sup>[10-11]</sup>于 20 世纪 80 年代也建立了黄土高原土壤侵蚀类型分类体系并将其编制进了 1:50 万的黄土高原地貌类型图。黄土高原地区土壤侵蚀类型的划分和土壤侵蚀分区图的编制对后来全国不同地区土壤侵蚀规律研究和水土保持规划及实践都起到了较强的引导作用。

### 3.2 黄河下游河床淤积以大于 0.05 mm 粗泥沙为主现象的科学发现

钱宁<sup>[12]</sup>对黄河下游河床泥沙进行了调查和试验分析,发现在黄河下游淤积的泥沙以粒径大于 0.05 mm 的粗颗粒泥沙为主,只要控制此粒径以上的粗泥沙进入河道,就能减缓河床的淤积抬升。基于这一重大发现,龚时旻和熊贵枢<sup>[13]</sup>等学者利用水文站泥沙数据,确定了位于晋、陕、蒙接壤区约  $8.00 \times 10^4 \text{ km}^2$  的“粗沙多沙”区。这一重大成果为黄河下游泥沙淤积的减缓和黄土高原水土保持重点区的确定奠定了理论基础。

### 3.3 不论是小流域还是大中流域,黄河中游黄土丘陵沟壑区多年平均泥沙输移比都接近 1

龚时旻等<sup>[13]</sup>和牟金泽等<sup>[14]</sup>学者利用绥德水土保持监测站流域观测资料,对小流域及大中流域等不同尺度的土壤流失量进行估算后,再用相同范围的水文泥沙数据计算输移比。结果发现,黄河中游黄土丘陵沟壑区的多年平均泥沙输移比都接近 1。这一重大成果为实现小区观测资料由点向面转换,以及利用河流水文泥沙数据进行区域土壤侵蚀制图提供了理论支撑,为黄河中游以及其他地区河流泥沙输移比研究和应用做出了特殊贡献。

### 3.4 沟间地和沟谷地两大侵蚀单元,以及坡面侵蚀垂直分带理论

地形是影响土壤侵蚀的重要因子,土壤侵蚀方式及产沙强度都会随地形而变化,而坡度是影响土壤侵蚀过程最重要的地形因子。龚时旻<sup>[15]</sup>、承继成<sup>[16]</sup>、陈永宗<sup>[17-18]</sup>等发现黄土高原地区土壤侵蚀随地形的变化表现出明显的垂直分带规律,从坡顶到沟谷,依次为面状侵蚀带、细沟侵蚀带、浅沟侵蚀带和切沟侵蚀带。侵蚀垂直分带理论不仅为黄土高原地区土壤侵蚀规律研究和水土保持措施配置提供了理论指导,也为全国其他地区土壤侵蚀规律研究提供了参考。

### 3.5 坡耕地是侵蚀泥沙主要来源和退耕还林的科学倡议

从 20 世纪 80 年代开始,唐克丽<sup>[19]</sup>、蔡强国<sup>[20]</sup>等

学者<sup>[21-22]</sup>对坡耕地土壤侵蚀开展了系列调查和试验研究,挑战了当时已经占据主导地位的两个“70%”认知(即自然侵蚀占 70%和沟谷地侵蚀占 70%),提出了坡耕地是侵蚀泥沙主要来源的科学论断,指出人类活动才是当今水土流失严重的根源所在。在此基础上,唐克丽于 1986 年在《人民日报》撰文《为什么黄河泥沙不见减少》,论证了“退耕还林是控制水土流失最有效的措施”战略,指出实施“退耕还林”才是解决或缓解水土流失的根本途径。之后,又论证了 25°坡度为实施退耕的上限坡度<sup>[23]</sup>。这一科学认识为国家 20 世纪 90 年代末开始的“退耕还林还草”工程的实施提供了理论依据。

### 3.6 全国水土保持分区图编制及侵蚀强度分级标准

水利部组织编制并首次在 2002 年《全国水土流失公告》<sup>[24]</sup>上发布的全国水土流失分区图,首先按侵蚀营力将全国分为水蚀区、风蚀区和冻融侵蚀区。在水蚀区,再结合大的地貌类型进一步划分次一级类型区。将全国分为东北黑土区、北方土石山区、西北黄土高原地区、南方红壤丘陵区、西南石质山区、北方风沙区和青藏高原区等七大类型区。该分类体系在 2012 年发布的《全国水土保持区划(试行)》<sup>[25]</sup>中进行了修订,进一步将西南石质山区分为西南紫色土区和西南岩溶区。目前,中国水土保持区划<sup>[26]</sup>采用三级分级体系,共有 8 个一级区,41 个二级区,117 个三级区。同时,在水利部 2008 年发布的中华人民共和国水利行业标准(SL 190-2007)<sup>[27]</sup>中,确定了土壤侵蚀分类分级标准,为全国土壤侵蚀调查与制图制定了标准。全国水土保持区划图及侵蚀强度分级标准,为从全国尺度认识水土流失规律,开展区域水土流失评价,以及国家层面水土保持方略制定提供了技术支撑。

### 3.7 水土流失治理方针及水土保持技术体系

朱显谟提出的黄土高原综合治理的“28 字方略”<sup>[28]</sup>,既是水土保持成功实践的科学总结,也从理论上为水土保持研究指明了方向,为水土流失综合治理总方针的确定奠定了理论基础。水利部门提出和推广以小流域为单元开展水土流失治理,是中国水土保持工作的伟大创举。以小流域为单元,便于进行科学的水土保持规划和措施配置,同时也能对水土保持效益进行准确评价。几十年来,以小流域为单元,在全国各地研发出多种水土保持综合治理模式或范式,为黄河泥沙减少、黑土地保护和石漠化防治做出了重要贡献,也极大地推动了水土保持规范化和标准化进程<sup>[29]</sup>。

### 3.8 中国土壤侵蚀估算模型(CSLE)构建及应用

从 20 世纪 80 年代开始,受美国通用流失方程

USLE(universal soil loss equation)<sup>[30]</sup> 思路的影响,中国学者江忠善<sup>[31-32]</sup>、卢宗凡<sup>[33]</sup>等在黄土高原地区,张宪奎<sup>[34]</sup>等在东北黑土区,史学正<sup>[35]</sup>、陈法扬<sup>[36]</sup>、黄炎和<sup>[37]</sup>等在南方红壤区等地区,针对 USLE 中降雨侵蚀力、土壤可蚀性、地形、作物和水土保持措施因子等开展了一系列的观测、研究和修正应用。王万中<sup>[38]</sup>等则利用全国不同地区的小区资料和气象站降雨观测数据,系统地研究了中国降雨侵蚀力的计算方法及其分布特征。2000 年以后,以刘宝元为学术带头人的北京师范大学土壤侵蚀团队在已有研究工作的基础上,着眼全国水土流失特征及实际应用需求,完成了中国土壤侵蚀模型 CSLE(Chinese soil loss equation)<sup>[39-41]</sup> 的构建。CSLE 模型将 USLE 模型中的作物覆盖与管理因子(C)和水土保持措施因子(P)概括为 B, E, T 因子(分别代表生物措施、工程措施和耕作措施),与中国水土保持传统习惯保持一致,以便于因子计算及应用。CSLE 模型的提出使中国成为世界上少数几个拥有自己土壤侵蚀估算模型的国家之一,并且已经成功地应用于水利部组织的第一次水利普查<sup>[42]</sup>及后续的水土流失动态监测<sup>[43]</sup>中,极大地促进了中国土壤侵蚀估算与制图研究成果的应用。

### 3.9 西南喀斯特地区地上/地下土壤流失并存现象的发现

由于喀斯特地区在地质构造上存在独特的二元结构,侵蚀过程中的水沙运移规律不同于其他水土流失地区,存在复杂多变的迁移过程。早在 1963 年,刘志刚<sup>[44]</sup>就指出在喀斯特发育强烈的地区,石灰岩风化残留的土壤颗粒会随着地表径流经落水洞流入地下造成流失。张信宝<sup>[45-46]</sup>于 2007 年正式提出了土壤地下漏失的概念,于 2016 年更加明确地界定了地下漏失的范畴。土壤地下流失或地下漏失现象的发现,不论是在理论探索还是在过程监测上,均为喀斯特地区的水土流失研究指明了新的方向。近十多年来,张信宝等学者<sup>[45,47]</sup>一致呼吁在喀斯特地区的土壤侵蚀研究中应该重点关注地下漏失现象,使喀斯特地区的土壤侵蚀研究进入一个新阶段。

### 3.10 东北黑土区切沟防治技术及其应用

切沟侵蚀是中国东北地区重要的侵蚀方式之一。由于该区的切沟侵蚀大多发生在耕地上,其发生发展不仅导致表层肥沃土壤流失,同时切割地表,导致耕地破碎化,影响正常的农耕活动,大大降低了大型农机的效率。在漫岗丘陵区,耕地坡长很长,汇水面积很大,加之土壤黏重,渗透性差,导致大量地表径流汇集冲刷。这是切沟形成和发展的主要原因。但由于东北黑土区的切沟主要形成于耕地上,很难像黄

土高原及南方地区一样通过截流排水的方式来抑制其发展,因此东北黑土区切沟侵蚀的防治必须探索出一条新路。根据黑土区切沟形成机理和分布特征,张兴义等<sup>[48-49]</sup>总结了一套农田侵蚀沟填埋复垦工程技术,充分利用当地作物秸秆,变地表径流为地下径流,减少地表冲刷,抑制切沟发展,显著减少了切沟侵蚀量。此项技术已在东北地区被广泛采用,为黑土地保护做出了重要贡献。

## 4 未来中国土壤侵蚀研究的关键领域

根据中国土壤侵蚀特点以及近几十年来的研究现状,未来几十年中国土壤侵蚀研究应该在以下几个关键领域寻求发展和突破。

### 4.1 土壤侵蚀预报模型完善推广及精度评价

中国自然环境和社会经济活动存在显著的区域差异性,决定了土壤侵蚀过程及其与影响因子关系的时空变异性。即使构建了适合中国环境特征的侵蚀估算模型,模型中各种参数及其估算方法仍需要用不同地区的实测数据支撑和率定。同时,每一个模型在推广应用中都会存在精度不同的问题。因此,围绕中国侵蚀模型的推广应用及精度评价仍有许多问题需要深入研究。同时,由于中国不同地区的土壤侵蚀机理和物理模型研究与国际上还有一定差距,我们必须加快有关研究及自主创新步伐。

### 4.2 坡面径流计算方法及模型构建

坡面径流既是降雨过程中降雨与下垫面相互作用的结果,同时也是分离和搬运土壤的动力及载体。地表产流及其集汇过程是土壤侵蚀过程中重要的中间环节,但以往研究多集中在降雨—产流、径流—泥沙等关系方面,而对于坡面产流计算及估算模型关注不够。目前,在中国仍然没有一个类似于美国径流曲线数法(SCS-CN)<sup>[50]</sup>的成熟技术用来估算地表径流。坡面径流准确估算是土壤侵蚀动力学过程研究及过程模型构建必不可少的环节,今后应该重视研究,并尽早构建适合中国具体情况的坡面径流估算模型或技术。

### 4.3 人工模拟降雨试验结果的代表性及真实性评价

自 20 世纪 50 年代末 Meyer 降雨机(摆动下喷槽式)<sup>[51]</sup>问世以来,人工模拟降雨方法作为一种快速、高效、可控的研究手段被广泛地用于土壤侵蚀机理和水土保持效益评价研究。自 20 世纪 80 年代开始,中国学者们也逐步将人工模拟降雨方法用于土壤侵蚀研究<sup>[52]</sup>,其中以静止喷嘴式(侧喷式<sup>[53]</sup>和下喷式<sup>[54]</sup>)降雨机为代表。尽管国内外学者使用模拟降雨开展了大量试验工作,推动了土壤侵蚀过程及其与影响因

子关系研究的深入和定量化。但是,与天然降雨相比,模拟降雨的雨滴尺寸一般较小,雨滴着地速度也很难达到自然条件下的雨滴终速,因此模拟降雨的雨滴动能往往低于天然降雨<sup>[55]</sup>。早在 20 世纪 60 年代,L. D. Meyer 就对模拟降雨的能量相似性进行了研究<sup>[56]</sup>,发现雨强 0.85 mm/min 条件下单位模拟降雨的动能只有天然降雨的 77%。这意味着即使是先进的 Meyer 降雨机,其模拟降雨产生的侵蚀量也会小于同等自然降雨造成的侵蚀量。为了验证这一猜想,R. A. Young 等人<sup>[57]</sup>和 A. P. Barnett<sup>[58]</sup>等人进行了长达数年的野外小区对比试验。他们在 1972 年发表的研究成果均表明,尽管模拟降雨的侵蚀力只有天然降雨的 75%左右,但两者在单位降雨侵蚀力下的土壤侵蚀量几乎相等,从而奠定了“人工模拟降雨可用于土壤侵蚀研究”的理论基础。但这一结论是在缓坡条件下利用 Meyer 摆动下喷槽式降雨机得出的,是否也适用于中国陡坡较多、模拟降雨装置以静止喷嘴式为主的情况,需要进一步验证。针对这一问题,柯奇画等研究者<sup>[59]</sup>通过对比分析发现,中国黄绵土室内模拟降雨试验中单位降雨侵蚀力下的土壤侵蚀量平均不到天然降雨野外小区的 50%。这说明利用不同类型降雨装置得到的试验结果和规律可能存在可比性大小问题。因此,今后需要开展中国人工模拟降雨试验结果的代表性和真实性等问题的系统研究,建立模拟试验结果与野外小区观测数据之间,以及不同类型降雨装置试验结果之间的类比关系,提高模拟降雨试验结果的可推广性和适用性。

#### 4.4 水槽试验结果的代表性及真实性评价

20 世纪 80 年代初,G. R. Foster<sup>[60]</sup>利用石膏制作实体模型研究细沟流的水动力学特征之后,有关细沟侵蚀的模拟试验在世界各地持续进行。水槽试验用于侵蚀研究在中国始于 20 世纪 90 年代末<sup>[61]</sup>。根据模拟条件,水槽试验大体上分为动床和定床两类。尽管水槽试验方法在定量研究土壤侵蚀过程机理方面发挥了重要作用,但也存在缺陷和问题。首先,目前定床试验中都存在水深与流速不匹配的问题,即与实际细沟流相比,模拟的水深太小,但流速过大。试验结果在绝对量上必然与实际细沟侵蚀存在差异。其次,在冲刷开始和终止时间的确定上存在人为主观性,即一定程度上存在因人而异的误差现象。未来需要开展将水槽试验结果或参数向坡面实际侵蚀应用方面推广的系统研究。建议今后在进行室内的沟蚀模拟试验时,能考虑不同沟道侵蚀发育的基本过程,根据自然界沟道发育的基本特征概化试验参数,不宜简单地以试验者的主观经验为判断依据。

#### 4.5 不同研究方法或技术资料的相互印证

关于土壤侵蚀过程机理和强度评价研究目前存在多种方法,包括小区观测法、核素示踪技术、磁化率技术、光释光沉积断代技术、复合指纹技术、摄影测量技术、3D 扫描技术、GPS 测量技术等。但每一种方法都有优点和不足,也有其最适用的时空尺度。对同一个地区和同一时间段而言,不论采用什么方法和技术,得到的侵蚀量应该大体接近。而实际工作中常常会出现不同方法之间无法相互印证的现象。因此,需要加强不同技术和方法之间类比性等问题研究,使不同方法的结果之间具有更大的可比性。

#### 4.6 不同地区目前尚待进一步探索的土壤侵蚀问题

综上所述,中国土壤侵蚀与水土保持不论在理论上还是在应用实践中都取得了丰富的成果。但由于研究历程及队伍力量的不平衡,或者由于下垫面条件发生重大变化,现在仍有许多问题尚不清楚,需要进一步深入研究。例如,在喀斯特地区,仍需要对土壤侵蚀过程、机理及其评价问题进行系统研究,特别是对地下漏失问题需要定量化实测资料的印证。在东北黑土区和青藏高原地区,需要强化冻融对土壤侵蚀的作用和贡献研究,特别是对青藏高原地区土壤侵蚀现状,水蚀、风蚀强度评价等问题需要形成共识。在南方红壤丘陵地区,仍需要深入开展侵蚀过程及崩岗发生机理及其评价方面的研究。在黄土高原地区,应加强土壤侵蚀未来演变及水土流失预测,以及生态文明理念下的水土保持问题等方面的研究。

### 5 中国土壤侵蚀研究需要关注的议题

除了以上重点研究领域外,针对中国土壤侵蚀特点、研究现状及社会需求,建议有关研究在未来重点关注以下议题。

(1) 过程机理研究。①中国不同地区土壤侵蚀机理的探讨;②不同侵蚀因子之间交互作用的剖析;③不同土壤类型的分离、搬运过程的对比解析。

(2) 模型应用研究。①中国土壤侵蚀估算模型修订及因子估算;②土壤侵蚀各因子数字产品及其网络化服务平台建设。③适应中国条件的土壤侵蚀物理模型研究与开发。

(3) 技术与方法研究。①全球、全国、区域土壤侵蚀动态等评价方法与制图技术;②土壤侵蚀监测新技术的自动化、数字化、智能化;③乡村振兴和生态文明导向式水土保持模式开发。④不同监测评价技术之间的可比性。

(4) 响应评价研究。①极端天气下土壤侵蚀特征及侵蚀量估算;②土壤侵蚀与面源污染监测与评价

问题;③土壤侵蚀/水土保持对“双碳”目标的作用和评价;④不同情景下侵蚀严重区未来变化趋势;⑤全球变化背景下土壤侵蚀发展变化趋势。

(5) 瓶颈问题研究。①冻融作用机理及其侵蚀贡献评价;②喀斯特地下漏失过程解析及其监测评价;③沟谷侵蚀过程监测及其侵蚀量估算技术;④崩岗机理及其侵蚀量估算技术。

## 6 结论

经过近百年的发展,中国土壤侵蚀与水土保持研究取得了重要成果和进展,在中国水土流失防治中发挥了重要的理论指导作用。但在此过程中也走过一些弯路,在一些重大问题上出现过偏颇。在20世纪80年代之前,中国土壤侵蚀研究与世界交流不多,但能结合中国的具体实践来解决实际问题。2000年以后土壤侵蚀研究受国外有关研究的影响较大,研究议题过于发散,追踪国外研究的内容偏多,但是其中许多都是有始无终。历史事实和实践经验告诉我们,对于国外的研究我们只汲取对我们有用的部分,并根据中国的具体情况有选择地进行研究和应用,不能完全照搬。比如从20世纪80年代就影响广泛的WEPP(water erosion prediction project)模型,不少国家的学者一致认为其代表着土壤侵蚀研究的最新方向。如今再反思有关研究历程,此类跟踪研究对中国的土壤侵蚀估算和水土流失防治到底做出了多少贡献?其答案确实值得商榷。因此,一味追随国外研究模式而脱离中国实际的研究很容易走弯路。总结和分析中国土壤侵蚀研究的历程可以得出一个明确的结论,即只有立足于中国土壤侵蚀具体情况及其对中国社会发展的实际影响开展针对性的研究才能取得重大成果,并能更有效地服务于中国的生态建设与绿色高质量发展目标。

**致谢:**在本文的修改过程中,余新晓、郑粉莉、张平仓、李智广等专家提出了宝贵建议,谨此一并致谢!

### [参 考 文 献]

- [1] 中华人民共和国水利部.中国水土流失公报(2020年)[EB/OL](2021-12-30)[2022-5-24]. [http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202109/t20210930\\_1545971.html](http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202109/t20210930_1545971.html).
- [2] Baver L D. Ewald Wollny: A pioneer in soil and water conservation research [J]. Soil Science Society of American Proceeding, 1938,3:330-333.
- [3] Wollny M E. Untersuchungen über das Verhalten der atmosphärischen Niederschläge zur Pflanze und zum Boden [J]. Forschungen Geb. Agric.-Physica, 1890,13: 316-356.
- [4] Miller M F. Early measurements of runoff and erosion [J]. U.S. Department of Agriculture Soil Conservation, 1946, 39(2):99-104.
- [5] Forsling C L. A study of the influence of herbaceous plant cover on surface run-off and soil erosion in relation to grazing on the Wasatch Plateau in Utah. Technical Bulletin No. 230 [R]. Washington, DC: 1931.
- [6] Duley F L, Miller M F. Erosion and surface runoff under different soil conditions [M]. Columbia, Missouri: University of Missouri, College of Agriculture, Agricultural Experiment Station, Research Bulletin 63, 1923.
- [7] 黄秉维.编制黄河中游流域土壤侵蚀分区图的经验教训[J].科学通报,1955(12):15-21.
- [8] 朱显谟.黄土区土壤侵蚀的分类[J].土壤学报,1956,4(2):99-115.
- [9] 罗来兴.划分晋西、陕北、陇东黄土区域沟间地与沟谷的地貌类型[J].地理学报,1956(3):201-222.
- [10] 张宗祜.中国黄土高原地貌类型图[M].北京:地质出版社,1986.
- [11] 张宗祜.中国黄土高原地貌类型图的编制原则[J].水文地质工程地质,1983(2):29-33.
- [12] 钱宁,张仁,赵业安,等.从黄河下游的河床演变规律来看河道治理中的调水调沙问题[J].地理学报,1978(1):13-24.
- [13] 龚时旸,熊贵枢.黄河泥沙来源和地区分布[J].人民黄河,1979(1):7-18.
- [14] 牟金泽,孟庆枚.论流域产沙量计算中的泥沙输移比[J].泥沙研究,1982(2):62-67.
- [15] 龚时旸,蒋德麒.黄河中游黄土丘陵沟壑区沟道小流域的水土流失及治理[J].中国科学(A辑),1978,21(6):671-678.
- [16] 承继成.流域地貌数学模型[M].北京:科学出版社,1986.
- [17] 陈永宗,景可,蔡强国.黄土高原现代侵蚀与治理[M].北京:科学出版社,1988.
- [18] 陈永宗.黄河中游黄土丘陵区的沟谷类型[J].地理科学,1984,4(4):321-327.
- [19] 唐克丽.黄河泥沙与黄土高原水土流失综合治理问题[J].中国水土保持,1985(12):10-12.
- [20] 蔡强国.坡面细沟发生临界条件研究[J].泥沙研究,1998(1):52-59.
- [21] 郑粉莉,唐克丽,周佩华.坡耕地细沟侵蚀的发生、发展和防治途径的探讨[J].水土保持学报,1987,1(1):36-48.
- [22] 张科利,唐克丽,王斌科.黄土高原坡面浅沟侵蚀特征值的研究[J].水土保持学报,1991,5(2):8-13.
- [23] 唐克丽,张科利,雷阿林.黄土丘陵区退耕上限坡度的研究论证[J].科学通报,1998,43(2):200-203.
- [24] 中华人民共和国水利部.2002年全国水土流失公告

- [EB/OL] (2003-07-25) [2022-5-25]. <http://hhsbjc.com/show.action?c=31&n=874>.
- [25] 中华人民共和国水利部. 全国水土保持区划(试行) [EB/OL] (2012-11-20) [2022-5-25]. [http://www.mwr.gov.cn/zwgk/gknr/201212/t20121214\\_1442828.html](http://www.mwr.gov.cn/zwgk/gknr/201212/t20121214_1442828.html).
- [26] 全国水土保持规划编制工作小组办公室, 水利部水利水电规划设计总院. 中国水土保持区划[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
- [27] 中华人民共和国水利部. SL190-2007 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [28] 朱显谟. 黄土高原的形成与整治对策[J]. 水土保持通报, 1991, 11(1): 1-8, 17.
- [29] 孟庆枚. 黄土高原水土保持[M]. 河南 郑州: 黄河水利出版社, 1996.
- [30] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [R]. USDA, Agriculture Handbook No. 537. Washington, DC: US Govt. Printing Office, 1978.
- [31] 江忠善, 李秀英. 黄土高原土壤流失预报方程中降雨侵蚀力和地形因子的研究[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1988(1): 40-45.
- [32] 江忠善, 宋文经, 李秀英. 黄土地区天然降雨雨滴特性研究[J]. 中国水土保持, 1983(3): 34-38.
- [33] 卢宗凡, 苏敏, 李够霞, 等. 黄土丘陵区水土保持生物和耕作措施的研究[J]. 水土保持学报, 1988(1): 37-48.
- [34] 张宪奎, 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): 1-9, 18.
- [35] 史学正, 于东升, 邢廷炎, 等. 用田间实测法研究中国亚热带土壤的可蚀性  $K$  值[J]. 土壤学报, 1997, 34(4): 399-405.
- [36] 陈法扬, 王志明. 通用土壤流失方程在小良水土保持试验站的应用[J]. 水土保持通报, 1992, 12(1): 23-41.
- [37] 黄炎和, 卢程隆, 郑添发, 等. 闽东南降雨侵蚀力指标  $R$  值的研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(4): 1-5.
- [38] 王万中, 焦菊英, 郝小品, 等. 中国降雨侵蚀力  $R$  值的计算与分布(I)[J]. 水土保持学报, 1995, 9(4): 5-18.
- [39] Liu Baoyuan, Zhang Keli, Xie Yun. An empirical soil loss equation [C] // Bouman B A M, Xiaoguang Y, Huaqui W, et al. Proceedings of the 12th International Soil Conservation Organization Conference. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 21-25.
- [40] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 7-13.
- [41] 谢云, 章文波, 刘宝元. 用日雨量和雨强计算降雨侵蚀力[J]. 水土保持通报, 2001, 21(6): 53-56.
- [42] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查公报 [EB/OL] (2013-03-21) [2022-5-25]. [http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/dycqgslpcgb/201701/t20170122\\_790650.html](http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/dycqgslpcgb/201701/t20170122_790650.html).
- [43] 李智广. 《全国水土流失动态监测规划(2018—2022年)》的编制原则与目标任务[J]. 中国水土保持, 2018(5): 20-23, 68.
- [44] 刘志刚. 广西都安县石灰岩地区土壤侵蚀的特点和水土保持工作的意见[J]. 林业科学, 1963, 8(4): 354-360.
- [45] 张信宝, 王世杰, 贺秀斌, 等. 碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失[J]. 地球与环境, 2007, 35(3): 202-206.
- [46] 张信宝, 王世杰. 浅议喀斯特流域土壤地下漏失的界定[J]. 中国岩溶, 2016, 35(5): 602-603.
- [47] 蒋忠诚, 罗为群, 邓艳, 等. 岩溶峰丛洼地水土漏失及防治研究[J]. 地球学报, 2014, 35(5): 535-542.
- [48] 张兴义, 祁志, 张晟旻, 等. 东北黑土区农田侵蚀沟填埋复垦工程技术[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(5): 128-135.
- [49] 张兴义, 刘晓冰, 赵军. 黑土利用与保护[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [50] Mishra S K, Singh V P. Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology [M]. Springer Science & Business Media, 2003.
- [51] Meyer L D, Mccune D L. Rainfall simulator for runoff plots [J]. Agricultural Engineering, 1958, 39(10): 644-648.
- [52] 周佩华, 豆葆璋, 孙清芳, 等. 降雨能量的试验研究初报[J]. 水土保持通报, 1981(1): 51-61.
- [53] 陈文亮. 组合侧喷式野外人工模拟降雨装置[J]. 水土保持通报, 1984(5): 43-47.
- [54] 郑粉莉, 赵军. 人工模拟降雨大厅及模拟降雨设备简介[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 177-178.
- [55] Renard K G. Rainfall simulators and USDA erosion research: History, perspective, and future [C] // Lane L J. Proceedings of the Rainfall Simulator Workshop. Tucson, Arizona: U. S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 1985: 3-6.
- [56] Meyer L D. Simulation of rainfall for soil erosion research [J]. Transactions of the ASAE, 1965, 8: 63-65.
- [57] Young R A, Burwell R E. Prediction of runoff and erosion from natural rainfall using a rainfall simulator [J]. Soil Science Society of America Journal, 1972, 36(5): 827-830.
- [58] Barnett A P, Dooley A E. Erosion potential of natural and simulated rainfall compared [J]. Transactions of the ASAE, 1972, 15(6): 1112-1114.
- [59] 柯奇画, 张科利. 人工降雨模拟试验的相似性和应用性探究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 16-20.
- [60] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics (I): velocity relationships [J]. Transactions of the ASAE, 1984, 27(3): 790-796.
- [61] 张科利, 钟德钰. 黄土坡面沟蚀发生机理的水动力学试验研究[J]. 泥沙研究, 1998(3): 76-82.