

北方土石山区 水土流失综合治理范式 及环境效应研究

和继军 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

北方土石山区 水土流失综合治理范式 及环境效应研究

和继军 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书较为系统地梳理、分析了北方土石山区水土流失治理及相应的生态响应,是集成式研究成果。主要内容包括北方土石山区所面临的关键性水土流失问题、水土流失治理及理论研究的相关进展;水土流失治理范式的概念、理论基础、结构和功能;北方土石山区典型区域水土流失综合治理范式的结构功能及生态响应等。此书目的主要体现在两方面,一是希望能对土壤侵蚀、水土保持、自然地理、国土整治、农牧、水利及生态环境等研究领域起到一点借鉴作用;二是在我国生态环境建设中,起到一个抛砖引玉的作用,引导大家关注环境,保护环境,共同维护国家的生态安全,促进自然生态和社会经济的和谐发展。同时,该书也可作为土壤侵蚀、水土保持、生态建设等领域的研究人员和高校院所相关专业的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

北方土石山区水土流失综合治理范式及环境效应研究/
和继军著. -- 北京:中国水利水电出版社, 2015. 12
ISBN 978-7-5170-2949-6

I. ①北… II. ①和… III. ①山区—水土流失—综合
治理—中国②山区—水土保持—环境效应—中国 IV.
①S157

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第033023号

书 名	北方土石山区水土流失综合治理范式及环境效应研究
作 者	和继军 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	170mm×240mm 16开本 10.75印张 205千字
版 次	2015年12月第1版 2015年12月第1次印刷
印 数	001—800册
定 价	45.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

水土流失及其引起的环境问题已经成为国际上广泛关注的焦点，它不仅造成土地肥力退化，而且是水体面源污染的重要来源，是当前全球性的环境问题之一。我国幅员辽阔，地形地貌复杂多样，气候条件空间差异巨大，此背景下发生的水土流失不仅范围广、类型多，而且强度大，是世界上土壤侵蚀最为严重的国家之一，水土流失及相关衍生问题已经严重影响到我国的生态安全和社会经济的可持续发展。北方土石山区是我国主要水土流失类型区之一，自新中国成立以来该区开展了一系列大规模的水土流失综合治理工作，但相对于其他类型区，如黄土高原区、东北黑土区、南方红壤区等侵蚀类型区，该区的水土流失问题长期未受到足够重视，特别是理论研究相对滞后，重治理轻研究现象较为突出。

在此背景下，为了彻底查清我国水土流失的现状及危险程度，2005年7月至2007年5月，水利部、中国科学院和中国工程院联合开展了“中国水土流失与生态安全综合科学考察”，对我国主要水土流失类型区进行考察，其中北方土石山区被列为我国7大主要水土流失类型之一，进行了重点考察，查明了该区的主要水土流失问题，明确了该区所面临的水土流失形势及未来需要重点解决的问题。在此基础上，本书主要针对该区的水土流失问题，对典型区域的水土流失治理及相关研究成果进行较为系统地梳理和完善，以期为该区域的水土流失治理及今后的相关研究提供参考。

本书所涉及的内容绝大部分已经以论文形式单独发表，是集成式研究成果，全书包括七章。第一章概论，讨论北方土石山区所面临的水土流失问题、水土流失治理及理论研究的相关进展；第二章

自然地理与社会经济背景，介绍该区自然环境、社会经济及水土流失背景；第三章水土流失治理范式理论，主要阐述水土流失治理范式的概念、理论基础、结构和功能等；第四章北京市水土流失综合治理范式，主要叙述该区水土流失综合治理的演化过程、治理体系及范式的结构功能和生态响应；第五章张家口市水土流失综合治理范式，主要阐述该区水土保持措施的空间适宜性、不同类型区的治理体系结构和功能以及相应的生态响应；第六章北方土石山区坡耕地水土流失综合治理范式，重点分析该区不同坡度范围内水土保持措施的适宜性，在此基础上总结不同坡度范围内水土保持措施的配置形式、结构和功能；第七章总结与展望，对研究成果进行了总结，并指出了研究中存在的不足和今后需要重点研究的方向。

该研究工作得到了国家重点基础研究发展计划（973计划）项目“中国主要水蚀区土壤侵蚀过程与调控研究”之第7课题“水土流失综合调控原理与治理范式”（2007CB407207）、“城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地”和“资源环境与GIS北京市重点实验室”等基金的资助，并得到中国水利水电出版社的大力支持，在此表示诚挚的谢意。本书中所涉及的数据得到了张家口市水土保持工作站王忠科高级工程师的大力帮助，本书在成稿过程中还得到了中国科学院地理科学与资源研究所蔡强国研究员的鼎力支持，在此一并表示衷心的感谢。由于该研究中所提出的“水土流失综合治理范式”在水土流失研究领域实属首次，因此在当时具体实施过程中研究难度大、存在争议的地方多，使得相应的研究成果在系统性、理论的深度等方面可能不尽完善，但书中提到了一些研究思想和理念，希望能对读者有所帮助。

由于该书内容所涉及的区域基础研究相对滞后、研究历时短，使得基础数据收集和积累的难度大，加之作者水平有限，该书肯定还有很多不足或不妥之处，真诚希望广大读者给予指正。

编者

2014年10月

目 录

前言

第一章 概论	1
第一节 问题的重要性	1
第二节 研究进展	4
第二章 自然地理与社会经济背景	31
第一节 北方土石山区概况	31
第二节 典型研究区概况	32
第三节 野外考察及数据来源	44
第四节 主要水土流失问题及治理目标	50
第五节 主要科学问题和研究内容	51
第三章 水土流失治理范式理论	54
第一节 土壤侵蚀治理范式与生态理论的关系	54
第二节 水土流失治理范式	62
本章小结	65
第四章 北京市水土流失综合治理范式	66
第一节 北京市水土流失综合治理过程	66
第二节 北京市小流域水土流失综合治理措施的水土保持响应	67
第三节 北京市水土流失综合治理体系研究	77
第四节 北京市水土流失综合治理范式的结构与功能	85
第五节 北京市水土流失治理的生态响应	93
本章小结	105
第五章 张家口市水土流失综合治理范式	107
第一节 张家口地区水土保持措施的空间适应性	107
第二节 张家口地区不同类型区水土流失综合治理体系	118
本章小结	124

第六章 北方土石山区坡耕地水土流失综合治理范式.....	126
第一节 研究背景	126
第二节 坡度对水土保持措施效益的影响	127
第三节 水土保持措施在不同坡度坡耕地上的配置	134
第四节 不同水蚀区坡耕地水土保持措施的空间配置	139
本章小结	141
第七章 总结与展望.....	142
参考文献	146

第一章 概 论

第一节 问题的重要性

土壤侵蚀是当今世界日益关注和重视的重大而复杂的环境问题，它破坏土地资源，造成淤积、干旱、洪涝等灾害，引起生态环境恶化，严重威胁人类的生存与发展 (Boix-Fayos, et al., 2005)。中国是世界上土壤侵蚀最为严重的国家之一，侵蚀遍及全国，而且强度高、成因复杂。根据全国土壤侵蚀强度图统计计算，全国每年土壤流失量约为 80 亿~120 亿 t (过去的数字是 50 亿 t，这是偏小了，因为长江和黄河两个流域就约有 45 亿 t——长江为 22.4 亿 t，黄河为 22.8 亿 t) (蔡强国, 1998)。据全国“第二次土壤侵蚀遥感调查”统计，全国土壤侵蚀面积达 482.53 万 km²，轻度侵蚀以上的水蚀面积为 164.88 万 km² (表 1-1)。

表 1-1 中国土壤侵蚀分类分级面积表 单位: km²

境内面积		9502714			
土壤侵蚀分类分级面积					
水蚀	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈
	830550.82	554909.55	178308.07	59939.55	25104.37
风蚀	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈
	788256.67	251199.17	247990.57	270140.19	349153.03
冻融侵蚀	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈
	604444.80	310463.55	354868.04	—	—

数据来源: 中国土壤侵蚀图册。

在中国，水蚀是分布最广、危害最严重的水土流失类型，占国土总面积的 16.8%。除上海市和香港、澳门特别行政区外，全国其余 31 个省（自治区、直辖市）都存在着水蚀问题。水蚀面积较大的前 10 个省（自治区）排序依次是内蒙古、四川、云南、新疆、甘肃、陕西、山西、黑龙江、贵州和西藏。水蚀面积占本省（自治区、直辖市）土地面积比例较大（30%以上）的前 10 位排序依次是山西、陕西、重庆、宁夏、贵州、云南、湖北、四川、辽宁和甘肃



省（自治区、直辖市）。全国风蚀总面积占国土总面积的 20.4%。风蚀主要分布在河北、山西、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆、山东、江西、海南、四川和西藏等 16 个省（自治区），风蚀面积较大的省（自治区）按侵蚀面积大小排序依次是新疆、内蒙古、青海、甘肃、西藏等，其风蚀面积占全国风蚀总面积的 96.0%，其中新疆和内蒙古的风蚀面积为占全国风蚀总面积的 78.5%。全国冻融侵蚀总面积 127.82 万 km²，占国土总面积的 13.3%。冻融侵蚀主要分布（按冻融侵蚀面积大小排序）在西藏、青海、新疆、四川、内蒙古、黑龙江和甘肃等 7 个省（自治区），其中西藏面积最大，为 90.50 万 km²，占全国冻融侵蚀总面积的 70.8%（李智广等，2008）。

除此以外，中国还是世界上人均水土资源紧缺的国家之一，有关数据显示：世界人均土地面积为 2.97hm²，而中国人均仅为 0.83hm²；世界人均耕地面积为 0.32hm²，而中国人均仅为 0.087hm²；中国耕地面积占世界耕地面积的 8.06%，却要养活世界人口的 20%。因此，中国的水土资源的保护与合理开发利用任重而道远。

新中国成立以来，我国水土流失治理工作大致经历了试验、示范、推广和提升 4 个阶段。截至 2007 年年底，全国水土流失综合治理面积达到 99.9 万 km²，其中小流域治理面积为 38.7 万 km²，累计实施生态修复面积达 70 多万 km²，建成黄土高原淤地坝 219 万座，全国水土保持网络和信息系统一期工程竣工验收并全面投入运行。根据 2005 年中国水土流失与生态安全科学考察组测算，中国现有的水土保持举措每年可以使土壤侵蚀量减少 15 亿 t 以上，增加蓄水为 250 多亿 m³，增产粮食 180 亿 kg（胡世明，2010）。

应该说，我国的水土流失治理取得了十分显著的成效，但仍然面临着诸多问题，其中基础研究相对滞后，重治理轻研究现象还比较突出。因此加强水土保持研究工作，阐明水土保持综合调控原理和总结提升治理范式，对保障农业和国民经济的持续、稳定、协调发展，对保护人类的生存和环境，都具有极其深远的历史意义和现实意义。目前对影响水土流失的单因子研究已经取得丰富的成果（蒋定生，1996；唐克丽，2004），但是从区域发展考虑社会经济综合因素组合情况下水土流失调控原理以及治理范式的研究仍然较少，目前关于这方面的研究工作多集中在小流域综合治理模式的研究上，且研究重点也主要分布在西北黄土区、南方地区及东北黑土区等区域（蒋定生等，1992，1994；杨才敏，1995；蔡强国，1998；史德明，1992；王礼先，1995；周昌涵，1998；孙传生等，2004；林超文，2007；郑子龙，2007；张晓燕，2008）。而针对北方土石山区的研究相对更少，且其中定性研究的较多，定量研究的少。目前，水土流失综合治理理念已经由单纯的水土保护



向区域生态环境与社会经济协调发展的阶段转变。由于随着经济的快速发展、人口城市规模的急剧膨胀,经济发达区域对周边山区及上游区域生态状态好坏的依赖程度日益增大,因此水土流失综合治理必须强调区域尺度上的社会经济、生态环境的综合因素。

北方土石山区是我国主要水土流失类型区之一,范围广阔,地表土石混杂、石多土少、地面极易砂砾化或石化,土层较薄,在原始地面遭到破坏后,极易发生严重的水土流失。如图 1-1 所示为北方土石山区典型区域张家口地区实地拍摄的野外资料,发现上述土壤特点和水蚀现象普遍存在,其中如图 1-1 (a) 所示为拍摄于张家口市郊区附近的一个小流域的坡脚,可明显看到土层很薄,并且土壤结构很差,土石混杂现象明显;如图 1-1 (b) 所示为张家口尚义县的一个坡面上部,图片拍摄位置的下部是植物埂梯田,可以看到由于土层薄、结构差,严重的水蚀已经使坡面上部表层土壤流失殆尽,下层基岩已完全裸露。同时北方土石山区是下游京津冀经济区和华北粮仓黄淮海平原重要的生态屏障,该区人口稠密,城市密度及规模大,对其周围的生态造成的压力巨大,目前该区的生态环境已经极度脆弱,下垫面条件差,一旦植被遭到破坏,恢复难度很大。该区生态环境的好坏不仅直接影响到当地人民群众的生活质量,而且已经严重威胁到京津冀经济区和黄淮海平原的水土资源及经济安全。因此,加强该区域的水土流失综合治理迫在眉睫,形势十分严峻。



图 1-1 张家口市土壤特征及水蚀现状
(a) 坡脚土壤垂直层理剖面; (b) 坡面水蚀严重程度

北方土石山的生态环境问题已经引起国家的高度重视。2005 年初,中华人民共和国水利部、中国科学院、中国工程院三家联合,着手开展“中国水土



流失与生态安全综合科学考察”，北方土石山区被列入 7 大重点考察片之一。2006 年，水利部以〔2006〕2 号文《关于划分国家级水土流失重点防治区的公告》，将北方土石山区的永定河重点治理区确定为 19 个国家级重点治理区之一。2007 年 5 月，由中国科学院、水利部水土保持研究所及相关研究机构、大专院校承担的国家重点基础研究发展计划（973 计划）课题《中国主要水蚀区土壤侵蚀过程与调控研究》正式启动，其目的是研究水土流失调控的区域差异，深入分析不同水土流失综合治理范式的结构及功能，为区域生态经济协调发展提供水土保持宏观战略对策。

鉴于分析，本书主要目的在于以北京市周边山区为典型研究区，在总结全国科学考察及水土流失综合治理相关成果的基础上，结合野外实地考察，对北方土石山区水土流失基本调控原理及治理模式的结构功能展开研究，旨在丰富该区水土流失及其治理方面的研究成果，为水土保持措施在空间上的合理配置提供一定的理论指导，同时，对保护山区土地的基本生产力、改善当地群众的贫困状况和保证北京市地区经济和生态安全都具有重要的意义。

第二节 研究进展

一、相关概念分析

1. 土壤侵蚀与水土流失

土壤侵蚀（Soil Erosion）术语最初于 1911 年由 McGeeg 以英文提出，并出现在 1936 年 Ayres 出版的《土壤侵蚀及其防治》一书中，以其他语言出现则在 1937 年以后（郑粉莉等，2004）。20 世纪 30 年代“土壤侵蚀”一词从欧美传入中国，水土保持科技人员开始把“水土流失”作为“土壤侵蚀”的同义词来使用。目前，在我国水土流失一词应用更为普遍，国外则相反，几乎没有用“水土流失”这一术语的（景可，1999）。土壤侵蚀是指在水力、风力、冻融、重力以及其他外营力作用下，土壤、土壤母质及岩屑、松散岩层被破坏、剥蚀、搬运和沉积全部过程（中国大百科全书，1992）；关君蔚（1995）对水土流失的定义是：在陆地表面由外营力引起的水土资源和土地生产力的损失和破坏；王礼先等（2004）认为水土流失是指在水力、重力、风力等外营力作用下，水土资源、土地资源和土地生产力遭受的破坏和损失，包括土壤表面侵蚀及水的损失，又称水土损失。宋桂琴（1997）认为水土流失中的“土”不仅仅指生长植物的土壤，而是指包括土壤在内的土壤母质、岩石风化物及其所含的各种营养元素等固体物质。水既是流失的主体，又是造成流失的动力之一。“流失”一词是相对的概念，它不是说“水”与“土”消失了，而是从某一地



(特定的区域)移动到另一地。概括起来,水土流失应定义为:地表水及固体物质(土壤、母质、岩石风化物等)在外力作用下,从特定的土地单元输移出去的过程,其内涵着重强调物质发生位移的事实。而土壤侵蚀是指在外部营力作用下土壤物理结构或化学成分发生破坏或位移的过程。

从对土壤侵蚀和水土流失的定义描述来看,两者还是有所区别的,前者强调过程,包括土壤破坏过程或输移过程,后者强调“流失”这一事实结果。根据上述土壤侵蚀及水土流失的有关定义及科学名词严格规范要求(全国科学技术名词审定委员会,1998),水土流失应该指在外营力的作用下,水和土从原地的搬运和流失,着重侵蚀的后果,主要指水土流失量。而土壤侵蚀的涵义更加广泛,着重强调的是侵蚀过程。我国很多学者倾向于将土壤侵蚀和水土流失两个概念区别开来,认为水土流失的含义及研究范畴与土壤侵蚀有所差别,土壤侵蚀在广度和深度上都要大于水土流失,后者多用于评价土壤侵蚀后水与土的损耗(史德明,1998;谢洪等,2002;唐克丽,2004)。

但是,我国有些学者则认为两者在我国目前具体使用上没有区别,是混淆使用的,中国农业百科全书(1996)对土壤侵蚀和水土流失的定义也基本类同。景可(1999)认为土壤侵蚀的实质就是水土流失。杨子生(2001)认为土壤侵蚀和水土流失在概念上虽有所不同,但实际上是一回事。

从科学研究角度考虑,对土壤侵蚀和水土流失两个术语进行区分是有必要的,因为对于科学研究来说,更注重事物的发展过程及影响因素,但是科学研究是有明确的研究目标和目的,即针对性的。而土壤侵蚀更强调侵蚀过程、侵蚀与资源环境演变的关系,水土流失更强调最终的后果,是土壤侵蚀影响的结果,因此在相关生态环境研究过程中,应当适当对土壤侵蚀与水土流失两个科学术语加以区别。同时,土壤侵蚀这一概念所包含的内容也应具有时代特征,即土壤侵蚀过程与环境之间的响应关系并不唯一,而是因地因时而变。在我国,所要解决的土壤侵蚀与环境响应之间的问题,会因不同气候带而表现出不同的特征,在湿润地区,着重强调水蚀及其引起的环境响应,在干旱区则重点注意风蚀及其引起的环境响应,而在高海拔或高纬度地区则尤其需要考虑冻融侵蚀及其引起的环境响应。同时,在我国不同区域所要解决的土壤侵蚀问题也因土壤侵蚀动力的差异性也有较大差异,诸如,风力和水力侵蚀引起的土地退化现象;在干旱、半干旱和部分半湿润地区,由于人为过度开发,所引起的土地荒漠化现象;在湿润区,由于人为过度活动所引起的土地石质化现象。同样,在国外,由于自然环境不一样,他们所面临的土壤侵蚀问题就有可能与我国有所差异,比如在日本,土壤侵蚀问题除了一般的水蚀过程外,主要是指由于降雨引发的山体滑坡、崩塌、陡坡地坍塌等重力侵蚀形式。



2. 水土保持

水土保持是相对于水土流失而言的，即防治水土流失，保护、改良与合理利用水土资源，维护和提高土地生产力，以利于充分发挥水土资源的生态效益、经济效益和社会效益，建立良好生态环境的事业，其核心是土壤的保持（或土壤流失防治）（关君蔚，1996；杨子生，2001；王礼先，2004）。我国土壤学界老前辈陈恩凤先生（1957）也指出：“吾人初谓保土学，近又改称水土保持学，在学理上无甚异处，仅为名称之改进而已”，即他认为水土保持就是保土（土壤保持）。国外多使用“土壤保持”（soil conservation）一词，有的也用“水土保持”（soil and water conservation）这一术语，其含义较明确，即指土壤侵蚀（或土壤流失、水土流失）的防治，核心是土壤的保持（即保土）。如美国水土保持创始人 H. H. Bennett 在 1947 年对什么是水土保持作了如下解说：简言之，土壤保持是指在实行保护土地不受侵蚀的农业制度下很有效地利用土地。H. Kohoke 等在 1959 年，又给土壤保持作了概念上的说明：土壤保持与土壤侵蚀防止（soil erosion control）在美国是同义语，但土壤保持的意义要广泛些。它不仅包含沟道治理、广泛利用牧草、修筑梯田和作物带状间作等，而且包括了全部诸如正确利用土地和采用有效措施的一切事宜。

《中华人民共和国水土保持法》第一条指出：为预防和治理水土流失，保护和合理利用水土资源，减轻水、旱、风沙灾害，改善生态环境，发展生产，制定本法；第二条指出：本法所称水土保持，是指对自然因素和人为活动造成水土流失所采取的预防和治理措施。由这两条具体定义性的条文可以理解为：水土保持就是“防治水土流失”，其根本目的是为“保护和合理利用水土资源，减轻水、旱、风沙灾害，改善生态环境，发展生产”服务。

从上述分析来看，水土保持的对象不只是土地资源，还包括水资源。不能把水土保持理解为土壤保持、土壤保护，更不能将其等同于土壤侵蚀控制，水土保持有其更深、更广的含义，在现在自然地理研究过程中，水土保持已经融入整个生态环境保护，是自然资源保育的主体。水和土是人类、自然环境赖以生存的基本物质基础，水和土的损失及恶化将直接影响到整个生态系统，特别是当今人类社会的高度发展对水和土地产生了重大影响，这种影响正在改变着与人类生活密切相关的生态系统。因此水土保持对改善和建设生态环境，减少水、旱、风沙等灾害，实现自然资源的可持续发展具有重要意义。

3. 范式的概念

范式的英文为 Paradigm，它源自于古希腊文为 Paradeiknunai，其原意是“共同显示”（show side by side），15 世纪转为拉丁文 Paradeigma，由此引申出范式、规范（norm）、模式（pattern）和范例（exemplar）等含义（罗珉，



2006)。

在科学研究中“范式”最早是由美国哲学家、科学史学家、麻省理工学院教授托·库恩(1959)提出的,库恩(1970)在其《科学革命的结构》一书中写道:“我采用这个术语(范式)是想说明,在科学实践活动中某些被公认的范例——包括定律、理论、应用以及仪器设备统统在内的范例——为某一科学研究传统的出现提供了模型”,随后“范式”一词开始广泛地应用于管理学、社会学等社会经济科学的研究。在自然科学研究过程中,“范式”这个科学术语较早的出现在生态学中,并对生态学的发展起到了重要的作用,邬建国和Loucks(1992)提出发展了生态学范式的结构、功能、理论,邬建国(1996)进一步阐述总结了生态学范式对生态学及其相关学科的研究重要性。

总之,范式是人们在感知、认识以及研究客观事物属性过程中形成的具有普遍性特质的认知模式或范例,并且以一定的理论体系为基础。生态环境和水土保持具有互相依赖的密切联系,生态环境的改善和建设需要合理的水土保持,而水土保持的合理实施需要遵循自然环境的演变规律,它们相辅相成,互相制约。生态学范式理论结构的出现和发展为水土流失综合治理范式的研究提供了理论基础和借鉴。因此,为了更好地解决水土流失的治理问题,推动水土流失治理的研究,深入阐述水土流失综合治理范式的概念及意义,并在一定区域内建立具有水土流失普遍性特征,并具有一定理论基础的水土流失综合治理范式成为当前研究的重点,也是本文在后续章节要重点阐述的内容。

二、水土流失防治机理研究

土壤侵蚀定量研究最早始于德国土壤学家 Ewald Wollny, 他于 19 世纪末建立了第一个木质试验小区, 该小区尺寸为 80cm (长) × 80cm (宽) × 25cm (高), 小区的一端装有出水口和用于收集径流的瓶子 (图 1-2), 用于研究径流和土壤侵蚀之间的关系 (Wollny, 1890)。在 1881 年和 1882 年 Wollny 利用该小区在野外对植被覆盖度、坡度、坡向和土壤类型之间的关系进行了研究 (Hudson, 1971; Meyer, 1984; Dotterweich, 2013), 在当时 Wollny 就指出草地可以显著降低土壤侵蚀, 而增加坡度会加速产流, 增加土壤侵蚀 (Dotterweich, 2013)。但是, 在美国土壤侵蚀研究受到社会广泛关注并迅速发展, 1912 年美国林业局的 Sampson 和 Weyl 在犹他州布设了第一个定量观测小区, 进行了土壤侵蚀量的观测实验 (Romkens, 1987)。1914 年密苏里农业实验站的 Miller 等创建了“径流小区”, 继而开始了土壤侵蚀影响因素的综合实验, 其研究表明: 土壤侵蚀在很大程度上由降雨特性决定, 耕作制度, 包括草滤的建立, 对减少坡面侵蚀有显著的作用 (柯克比, 1987)。到了 20 世纪 30 年代, 由 Bennet 领导的土壤保持局在全美发展了 46 个土壤侵蚀实验站,



分布于 26 个州，试验按照统一的要求进行观测，积累了大量的土壤侵蚀实验资料 (Lal, 1991)。

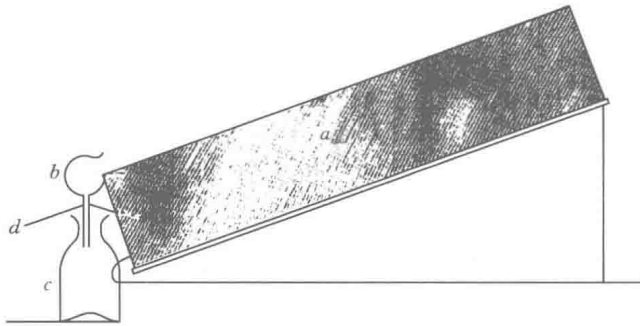


图 1-2 Wollny 建立的世界第一个土壤侵蚀试验小区

我国土壤侵蚀定量研究的工作开展较晚，始于 20 世纪 40 年代 (张光辉, 2001, 2002)。刘善建 (1953) 根据径流小区观测资料，首次提出了坡面年侵蚀量的计算公式，为我国土壤侵蚀的定量化研究揭开了序幕。20 世纪 50 年代，朱显谟先生、黄秉维先生对土壤侵蚀类型、特征、影响因素及分布区域的深入研究，为土壤侵蚀的定量研究奠定了基础。20 世纪 60 年代，朱显谟先生关于土壤抗冲性和抗蚀性的界定，促进了土壤抗蚀能力的研究。20 世纪 70 年代，在继续进行土壤抗冲性研究的同时，以小流域为单元进行水土流失研究和治理的思路初步形成，并对中、大尺度的土壤侵蚀研究也逐渐展开。

土壤侵蚀的发生往往是多个影响因素及其交互影响综合作用的结果 (Bradford and Foster, 1996; Romkens, et al., 2002)。总体来说，影响土壤侵蚀的因素可分为气候、地形、土壤、植被和人类活动五大类。阐明各种因素与土壤侵蚀之间的关系，不仅可以认清土壤侵蚀发生过程，并且能够明确如何去改变或改善某些因素，从而有效抑制土壤侵蚀发生强度。

1. 土壤对水土流失的影响

土壤是水土流失的对象，其本身的性质特征直接影响着土壤侵蚀发生的强弱，因此土壤的抗侵蚀能力主要取决于土壤的内在特性，如土壤的容重、渗透性能、机械组成、孔隙状况、有机质含量、水稳性团聚体含量等指标。如在英国研究较多的是关注土壤颗粒粒径、矿物成分、黏土含量和含水量等对土壤侵蚀的影响。据对英格兰 Shropshire 东部 Bridgnorth 地区草地和裸土土壤颗粒粒径的统计，草地的粗砂比例高于裸土；在 Moorfield 和 Herefordshire 地区的观测表明，粗粉砂最易遭受侵蚀。威尔士高地的泥炭土侵蚀比矿物土严重，黏土含量在 10%~25% 的土壤易被侵蚀，土壤的含水量增加或含钙量减少可能导致土壤的抗侵蚀性减弱。另外，土壤侵蚀也与土壤中的物理、化学及生物作



用密切相关,而这些在很大程度上决定于土壤中有机的含量。英国某些专家认为,某些地区土壤有机质含量过低将不能维持长期的农业种植,土壤结构的强度随有机质含量的减少而降低,增加了土壤的侵蚀风险(李薇等,2010)。目前,常用土壤的可蚀性指标来表达土壤对侵蚀的敏感性。已有大量研究表明,土壤可蚀性是由土壤理化性质共同作用决定的,由于土壤团聚体是土壤结构的基本单元,其粒径分布及稳定性不仅影响土壤孔隙分布,还直接关系到水分在土表及土体内的运移方式与途径,所以土壤团聚体稳定性是影响侵蚀强度最重要和最直接的因子(Le Bissonnais and Arrouays, 1997; Fox and Le Bissonnais, 1998; Bryan, 2000; Duiker, et al., 2001; 徐燕, 2005; 闫峰陵, 2007)。

国外从20世纪30年代开始研究水土流失与土壤性质的关系,我国则从50年代开始开展这方面的工作。Middleton(1930)提出土壤分散率(未分散土壤粉黏粒含量与水中分散土壤的粉黏粒含量之比)可以作为土壤可蚀性指标。Bennett(1926)、Middleton(1932)、Peel(1937)、朱显谟(1954, 1960)、田积莹和黄义瑞(1964)等通过分析土壤的硅铝铁率、分散率、侵蚀率、颗粒组成、渗透速率、悬浮率、膨胀系统、团聚体状态等性质来评价土壤的可蚀性。同时,国内外许多学者还通过抗冲槽、抗冲仪、滴水器等装置测定水滴或水流直接冲刷土壤导致的土坑深度、土壤流失量情况及土壤团聚体分散性等来表征土壤的可蚀性、抗冲性和抗蚀性(Gussak, 1946; Vilensky, 1945; Alderman, 1956; 朱显谟, 1960; 蒋定生, 1997; 史德明, 1983; 李勇, 1990)。Olson和Wischmeier(1963)用标准小区上的单位侵蚀力指标造成的土壤侵蚀量来表示土壤可蚀性的大小。关君蔚(1996)总结了影响土壤抗蚀性的因素主要包括土壤结构、土壤湿度以及土壤的机械组成等。Wischmeier和Mannering(1996)通过不同的土壤特性与土壤可蚀性进行相关分析建立关系,获得通过测定土壤特性去计算土壤可蚀性大小的方程。从以上阐述可以了解到,早期的研究主要集中在土壤本身性质对土壤侵蚀过程的响应,且偏重于室内模拟实验或小尺度范围内。由于室内模拟实验中存在的假设条件过多,有时并不能完全代替自然界的真实情况。因此,在此基础上,我国学者吴普特(1997)在天然降雨径流小区观测条件下及人工放水冲刷试验条件下,用单位面积单位径流深对应的冲刷量表示土壤的抗冲性的大小。国外学者Barthes, et al.(2000, 2002)则通过野外实验分析了从 1m^2 至整个侵蚀坡面不同尺度上的5种土壤对径流侵蚀的敏感程度,发现土壤表层 $0\sim 10\text{cm}$ 内的土壤大团聚体(大于 0.2mm)与侵蚀强度呈显著的负相关,并指出土壤团聚体稳定性可作为表征土壤可蚀性的指标。关于此方面的研究成果同样在我国得到研究验证,例如闫峰陵等(2007)对土壤团聚体稳定性与坡面侵蚀的研究表明,坡面土壤侵蚀量和径流强度与土壤团聚体稳定性存在显著负相关关系,且不同团聚



体稳定性指标与两者相关程度存在差异，其中湿筛团聚体平均重量直径和大于0.25mm水稳性团聚体含量与侵蚀量和径流强度相关程度最高，这充分说明土壤的水稳定性程度是表征土壤抗水蚀能力的重要指标。

综上所述，土壤可蚀性的研究主要集中在两个层面：其一，基于土壤内在性质的土壤可蚀性评价指标研究，主要体现在土壤矿物组成和质地等基本属性对土壤可蚀性的影响方面，如通过测定和比较土壤质地、结构、团聚体特征及有机质含量、化学组成等研究土壤可蚀性；其二，基于侵蚀动力的土壤可蚀性评价指标研究，主要通过土壤本身抵抗外营力的水平来间接表达，如利用雨滴打击下的土壤溅蚀率、径流冲刷下的侵蚀率、静水作用下的分散率等指标来研究土壤可蚀性（表1-2）。

表 1-2 土壤的可蚀性研究（王彬等，2013）

研究者	年份	土壤可蚀性指标	类型
Bennett	1926	硅铝铁	a
Middleton	1930	土壤浸湿热、侵蚀率、分散	a
Baver	1933	渗透性指数	a
Bouyoucos	1935	(砂粒%+粉粒%)/黏粒%	a
Pelle	1937	渗透率、悬浮率、分散率	a
Voznesenskil	1938	$E=dh/a$ (d 为分散率, h 为土壤亲水性, a 为在1h强度为170mm/h的水流冲刷下保留的 $\geq 0.25\text{mm}$ 团聚体量)	b
Gussak	1946	冲刷100g土壤所需的水流量	b
Ellison	1947	土壤可分离性、土壤可搬运性	b
朱显谟	1954	土壤膨胀系数、静水崩解	a
Woodburn等	1956	团聚体稳定性、分散率	a
朱显谟	1960	水冲穴深度	b
Olson等	1963	土壤可蚀性因子 K (单位降雨侵蚀力的土壤流失率)	b
蒋定生等	1963、1995	单位水量所冲走的土量、可冲刷系数	b
田积莹等	1964	团聚体总量、1~10mm团聚体量、团聚度、团聚体分散度、分散率、侵蚀率	a, b
唐克丽	1964	土壤理化性质、黏土矿物构成、微结构	a
Wischmeier等	1969	不小于1mm的砂粒含量、有机质含量、土壤结构等级、土壤渗透等级等	a
Chandra等	1978	侵蚀系数	b
史德明等	1983	团聚体分散性、水稳性指数	b
Farres等	1985	团聚体风干率	a