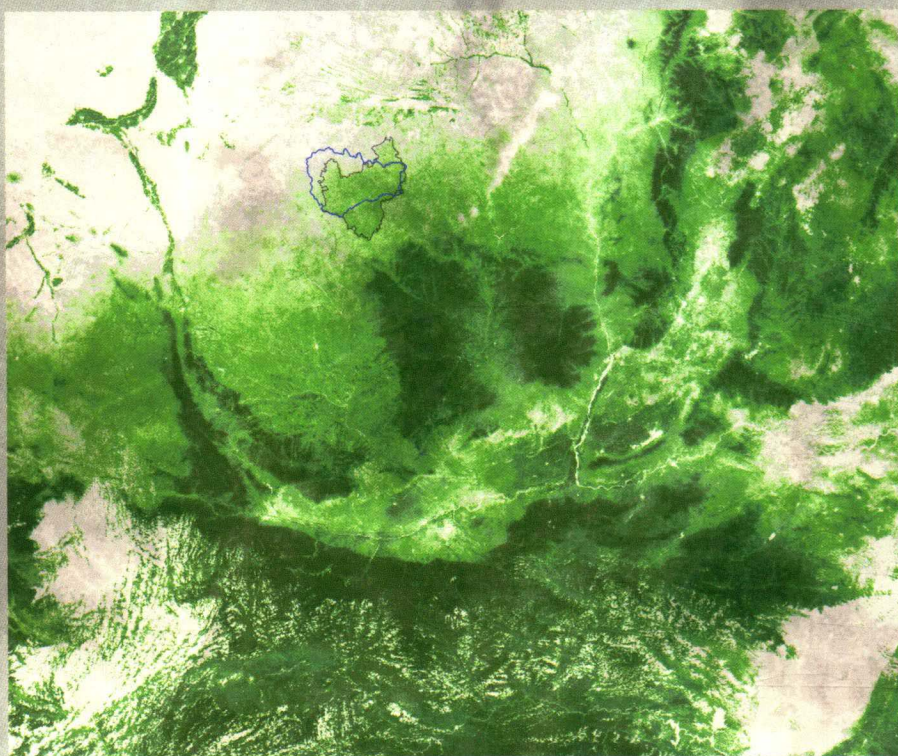




黄土高原流域 侵蚀产沙及其植被重建响应

朱清科 秦 伟 张 岩/著

Soil Erosion and Sediment Yield and Its Response to
Vegetation Restoration in the Watershed



科学出版社

黄土高原流域侵蚀产沙及其植被重建响应

朱清科 秦 伟 张 岩 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

全书在梳理、总结黄土高原侵蚀产沙影响因素、监测预报及其植被重建变化响应相关理论与方法的基础上,以陕北黄土区北洛河上游流域为研究区,综合运用遥感、地信、地统计学、模型模拟等方法,多尺度系统揭示了降雨空间分异、地形地貌特征、植被覆盖变化、水沙变化驱动、浅沟和道路等主要侵蚀类型发生规律,构建了考虑沟间地、沟谷地侵蚀分异和泥沙输移比率的大中流域侵蚀产沙模型,分析了植被水沙调控效应及其导致的流域侵蚀产沙重点策源地变化特征,阐明了流域侵蚀产沙的植被变化响应机制。

本书可供土壤侵蚀、水土保持、林业生态、生态水文、自然地理和遥感地信等专业方向的科研和教学人员参考,亦可作为科研院所和高等院校相关专业的教学参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

黄土高原流域侵蚀产沙及其植被重建响应 / 朱清科, 秦伟, 张岩著.
—北京: 科学出版社, 2016. 2

ISBN 978-7-03-047253-3

I. ①黄… II. ①朱…②秦…③张… III. ①黄土高原-土壤侵蚀-研究
②黄土高原-植被-重建-研究 IV. ①S157.1②Q948.15

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 020076 号

责任编辑: 李 敏 吕彩霞 杨逢渤 / 责任校对: 钟 洋

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 1 月第一次印刷 印张: 20 3/4

字数: 500 000

定价: 158.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

土壤侵蚀是导致土地退化的重要原因。尤其水力侵蚀不仅使水土资源流失、土地生产力下降,还造成河湖塘库泥沙淤积,促发洪涝、干旱等灾害,严重制约了人类社会的可持续发展。当前,全球水力侵蚀面积为1094万 km^2 ,占侵蚀总面积的近70%,是危害最大、影响最广的世界环境问题。我国是世界上水土流失最为严重的国家之一,根据第二次全国遥感普查结果,全国共有355.55万 km^2 的区域存在不同等级和形式的水土流失,约占国土总面积的37%。全国每年因土壤侵蚀流失土壤80亿~120亿t,分别占全球总侵蚀量(600亿t)和陆地入海泥沙总量(240亿t)的13%~20%和33%~50%。虽然近10余年,通过实施一系列的大规模水土保持生态治理工程,水土流失面积大幅减少,生态环境明显改善,但仍未能从根本上改变水土流失面广量大的严峻形势。据第一次全国水利普查水土保持情况公报显示,截至普查标准时点2011年12月31日,全国共有水力和风力导致的土壤侵蚀面积为294.94万 km^2 ,约占国土总面积近1/3,其中水力侵蚀面积为129.32万 km^2 ,年均土壤侵蚀总量为45.2亿t,超过允许土壤流失量5~10倍,局部地区达20倍以上,相当于每年损失耕地约100万亩^①,而形成1cm厚的土壤需要数百年以上。剧烈水土流失直接导致土地退化和耕地损毁,严重威胁我国18亿亩耕地红线,同时还加剧江湖库淤积、森林退化、水体污染、滑坡山洪、扬尘雾霾和二氧化碳排放等其他生态与环境灾害。据不完全统计,自20世纪50年代初期以来,全国水库塘坝因泥沙淤积而损失的库容累计超过200亿 m^3 ,相当于损失1亿 m^3 的大型水库200余座;另据亚洲开发银行研究显示,水土流失引发的直接和间接灾害对我国造成的经济损失相当于GDP总量的3.5%。总体上,水土流失已成为国家生态安全、粮食安全、水安全和人居安全的根本性威胁。

黄土高原是中华民族繁衍生息的发祥地,是孕育华夏文明的摇篮。然而,由于气候变化、水资源短缺以及对自然资源的不合理利用,该区的森林植被遭到严重破坏,土地超载,生态环境变得极端脆弱,已成为我国乃至世界上水土流失最为严重的地区之一。区内45.4万 km^2 的土地存在水土流失,占黄土高原总面积的73%。大部分地区的土壤侵蚀强度都在0.5万 $\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 以上,有些地方甚至超过2万 $\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。其中,仅皇甫川至秃尾河各支流的中下游地区和无定河中上游及白于山河源区,即黄土高原多沙粗沙区,每年因土壤侵蚀而输入黄河的泥沙就高达10亿t,占黄河多年平均输沙量的64%,给下游的水利工程与河道安全造成严重威胁。同时,土壤侵蚀还使土壤养分物质大量流失、土地严重退化。据不完全统计,黄土高原每年因水土流失而损失的氮、磷、钾养分就高达0.44亿t,几乎相当于全国的年化肥生产总量。黄土高原地区严重的土壤侵蚀使森林植被生长

^① 1亩 $\approx 666.7\text{m}^2$ 。

更加困难,土地生产能力急剧下降,从而导致生态环境持续恶化,严重制约了区域经济发展和社会进步。

植被重建是恢复退化生态系统、改善土地利用格局、增加地表覆盖的有力途径。通过植被重建可重新分配降雨、避免土壤遭受降雨击溅、改善土壤结构、减少地表降雨产流、缩短坡面径流路径,从而有效减少坡面侵蚀和流域输沙。20世纪50年代以来,我国在黄土高原地区相继开展了一系列大规模的水土保持工程和林业生态工程。大规模植被重建对该区流域侵蚀、产沙产生了重要影响,在控制水土流失、改善生态环境方面取得了显著成效,最直观的表现是区域植被覆盖明显增加,尤其黄河粗泥沙集中来源区已有一半区域由“黄”变“绿”,淮河以北江河水沙明显减少,其中黄河潼关断面的沙量和水量分别由60年代以前的年均15.9亿t和426亿m³锐减至近10余年的2.8亿t和231亿m³,减幅达82%和46%。在此背景下,植被重建在黄河流域水沙变化中的具体贡献比例、植被变化流域生态水文响应等问题成为各界关注的热点。虽然国内外就植被重建与流域侵蚀产沙的关系已进行了大量研究,但仍存在诸多问题尚未解决,集中表现在两个方面:首先,在研究尺度上,现有研究多针对坡面和小流域尺度的植被水沙调控能力与机制,针对大中流域还多是单纯针对植被变化在年均尺度减水减沙效益的分析评价,有关大中流域植被变化水沙调控规律的研究少见报道;其次,在研究方法上,侵蚀产沙模型是研究植被重建与流域侵蚀、产沙关系的重要手段,虽然已有大量统计或物理模型见诸报道,但受制于有限的基础数据和海量的运算过程,还未建立起既高效又准确的黄土区大中尺度流域侵蚀、产沙预报模型。这些问题严重制约了黄土高原生态环境的改善和水土资源的可持续利用。

针对黄土高原大中流域侵蚀产沙对植被重建变化响应研究的迫切性,以及现有研究中存在的主要问题和不足,作者依托“十一五”国家科技支撑计划课题“困难立地工程造林关键技术研究(2006BAD03A03)”、“十二五”国家科技支撑计划课题“黄土及华北石质山地水土保持林体系构建技术与示范(2011BAD38B06)”、林业公益性行业科研专项经费课题“黄土丘陵严重侵蚀区植被恢复和重建技术研究(201104002-2)”国家自然科学基金项目“考虑植被和地形对下坡侵蚀耦合影响的坡长因子研究(31200535)”,以地处黄土高原腹地北洛河上游流域为典型试验基地,开展了长期研究,形成了黄土高原流域侵蚀产沙及其植被重建响应研究成果。

研究中采用了数字高程模型、多时相遥感影像、长时序水文气象资料等多源基础数据,综合运用了GIS、RS、地统计学、数理统计、数字模拟等技术方法,融合了土壤侵蚀、水土保持、景观生态、生态水文等多学科理论,注重多时空尺度结合和多视角对比,重点从降雨时空变异、地形地貌特征、植被覆盖演变、水沙变化驱动、土壤侵蚀规律、侵蚀产沙模拟等方面,全面刻画了黄土高原地区的降雨和植被时空分异,系统揭示了北洛河上游流域内坡面、小流域和大中流域尺度侵蚀产沙的植被变化响应规律。研究取得一些创新技术成果。

在技术方法方面主要包括:

1) 建立了基于高分辨率遥感影像和高精度数字高程模型的黄土区坡面浅沟及其地形要素识别方法,据此分析确定出黄土高原坡面浅沟侵蚀的上限、下限临界坡度和临界

坡长。

2) 提出了黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀地表过程响应单元快速划分及其地形特征高效提取技术, 据此建立了面向地形地貌特征的流域侵蚀风险评估方法, 并通过引入谐波和周期分析方法, 确定了黄土高原流域沟谷分布规律。

3) 基于现有上坡单宽汇流面积的坡长因子算法, 通过增加不同地类汇流面积贡献率, 新建了考虑植被和地形对下坡侵蚀耦合影响的坡长因子算法。

4) 利用基于 Hc-DEM 的黄土高原沟缘线自动提取技术, 划分了流域沟间地和沟谷地侵蚀地貌单元, 提出了沟间地运用土壤流失方程为模型框架评估面蚀为主的坡地侵蚀, 沟谷地运用改造沟坡侵蚀模型评估冲蚀为主的沟谷侵蚀, 并与泥沙输移比分布模型集成, 构建了考虑沟-坡分异的黄土区大中流域侵蚀产沙模型体系。

在规律认识方面主要包括如下:

1) 确定了黄土高原年、月、日降雨的空间变异幅度, 提出了进行对应时间尺度降雨空间插值应选用的最小相关距离; 分析了黄土高原侵蚀性降雨年发生频率、单场侵蚀性降雨量、侵蚀力分布频率和主要雨型, 统计了单峰、双峰和 3 峰降雨在该区总降雨场次的比例。

2) 发现近 10 余年黄土高原地区 NDVI 植被指数均值从东南向西北逐渐递减, 明显呈 3 条带状分布, 并大致对应于中国农业气候分区的干旱中温带、中温带、南温带 3 个气候区; 10 余年来, 全区 88% 的区域年均 NDVI 增加, 90% 的区域夏季 NDVI 增加, 表明植被覆盖显著改善, 且夏季增加较年均尺度的改善更为明显; 不同区域和坡段间, 中温带地区内 $15^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 坡段区域的植被覆盖改善最为明显, 反映出坡耕地退耕还林(草)工程作为近 10 余年植被覆盖改善主要驱动的特点。

3) 黄土高原小流域内林地分布格局对土壤侵蚀强度具有显著影响, 林地面积比例、林地斑块密度、林地形状指数和林地植被覆盖度等反映林地分布格局的指标增加将导致土壤侵蚀减少, 而林地坡位指数增加则会增加土壤侵蚀强度, 总体上相同面积的林地, 其分布越靠坡面上部, 其防治土壤侵蚀的功能越弱。

4) 明确了黄土高原大中流域植被重建的水沙调控能力及其年际、年内调控特征和效应阈值; 确定了大规模植被重建后, 流域侵蚀产沙在坡-沟侵蚀地貌单元、不同土地利用类型单元的分布变化及其空间分异影响因素与贡献比例的变化响应, 揭示了植被重建调控流域侵蚀的作用机制。

本书共包括 14 章, 除第 1 章“绪论”、第 2 章“研究区域概况”外, 其余 12 章分为上、下两篇, 其中, 第 3 章“降雨空间分异与侵蚀性降雨特征”、第 4 章“流域地貌特征及其潜在侵蚀风险评估”、第 5 章“植被恢复空间分异与土地利用/覆被变化”、第 6 章“流域径流输沙变化与驱动因素”、第 7 章“流域坡面浅沟侵蚀发育地形特征”、第 8 章“黄土区土质道路土壤侵蚀特征”组成上篇, 以“降雨与植被时空变化及流域侵蚀产沙特征”为主题, 揭示黄土高原和北洛河上游流域降雨空间分异、植被覆盖变化、水沙变化驱动, 以及坡面浅沟和土质道路的土壤侵蚀特征; 第 9 章“黄土高原县域土壤侵蚀强度评估”、第 10 章“黄土高原大中流域 SWAT 模型适用性评价”、第 11 章“黄土高原大中

流域侵蚀产沙分布式统计模型”、第 12 章“黄土高原坡面侵蚀产沙对植被覆盖变化的响应”、第 13 章“黄土高原小流域土壤侵蚀对林地空间分布变化响应”、第 14 章“黄土高原大中流域侵蚀产沙对植被重建变化响应”组成下篇，以“侵蚀产沙预报及其植被重建变化响应”为主题，从坡面、县区、小流域、大中流域研究侵蚀产沙特征规律、预报方法及其对植被重建变化响应。各章的主要内容分别为：第 1 章结合全书相关内容，分别从侵蚀产沙影响因素、侵蚀产沙监测预报方法、侵蚀产沙对植被重建变化响应 3 个方面，梳理总结了黄土高原地区的现有研究成果，最后明确了现有研究的不足和未来研究的方向；第 2 章介绍了全书涉及的黄土高原、北洛河上游流域的基本概况；第 3 章针对黄土高原地区，分析了年、月、日多时间尺度的降雨空间分异特征以及侵蚀性降雨频率、雨量、历时等统计特征，并针对典型研究区——北洛河上游流域，比选了适宜的降雨空间插值方法，分析了流域降雨时空分布特征；第 4 章基于数字地形分析和沟缘线编程提取，研究了北洛河上游流域的沟谷分布、坡-沟组成、坡度分级等地形特征，通过侵蚀地貌单元划分及其地形特征提取，评估了基于地形地貌特征的流域潜在侵蚀风险；第 5 章采用 RS 和 GIS 技术，针对黄土高原地区，基于 NDVI 植被指数变化解析，揭示了近 10 余年该区植被恢复的空间分异特征，针对典型研究区——北洛河上游流域，揭示了近 20 年大规模植被重建驱动下的流域土地利用/覆被与景观格局时空演变特征；第 6 章基于径流输沙资料统计分析，揭示了北洛河上游流域水沙波动与变化特征，确定了流域 30 年水沙变化时段及驱动因素；第 7 章以高分辨率遥感影像和大比例尺数字高程模型为数据源，基于 RS 和 GIS 技术快速提取大量浅沟及其地形参数，分析了北洛河上游流域坡面浅沟侵蚀发育的地形特征；第 8 章在野外调查的基础上，通过概化与分区，统计分析了北洛河上游土质道路不同部位的土壤侵蚀特征；第 9 章在野外小流域均匀抽样详查的基础上，对比了基于 CSLE 模型结合抽样调查、基于遥感影像解译结合土壤侵蚀分级两种土壤侵蚀强度评估方法在县域尺度的应用效果与精度；第 10 章针对黄土高原大中流域，基于参数敏感性分析、参数校准与检验，评价了 SWAT 模型在黄土高原大中流域的适用性；第 11 章针对黄土高原沟缘线上、下侵蚀产沙分异显著的特点，综合采用 GIS、RS 和编程技术，尝试在坡-沟地貌单元划分的基础上，建立了沟间地运用通用土壤流失方程模型结构，评估面蚀为主的坡地侵蚀，沟谷地运用改造沟坡侵蚀统计模型，评估冲蚀为主的沟谷侵蚀，并与 SEDD 模型集成确定流域侵蚀、产沙分布的黄土高原大中流域侵蚀产沙模型体系，同时，以北洛河上游流域为典型区，评价了针对逐年和不同水沙变化时段的流域侵蚀产沙模拟效果；第 12 章基于不同植被覆盖坡面小区原位观测资料，分析了容重、含水量、孔隙度、入渗率和抗冲性等土壤物理性状对植被覆盖的变化响应，确定了不同植被覆盖条件下，产流产沙特征及其影响因素与贡献，从坡面尺度揭示了侵蚀产沙的植被重建变化响应规律；第 13 章选择北洛河上游流域的独立小流域，分别采用 CSLE 模型和植被详查确定了小流域的土壤侵蚀强度和林地分布格局指数，并综合分析了两者的相互关系，从小流域尺度揭示了侵蚀产沙对林地植被分布的变化响应规律；第 14 章针对黄土高原大中流域，分别采用水文统计方法、SWAT 模型模拟方法、分布式统计模型模拟方法，研究了植被重建在多年、年际和年内等多时间尺度对流域水沙的调控效应，植被重建前、后流域不同地貌单元、不同土地利用类型侵蚀

产沙分布变化,以及流域侵蚀空间分异及其影响因素变化,从大中流域尺度揭示了侵蚀产沙对植被重建的变化响应规律。

全书撰写中,第1章由朱清科、秦伟、赵维军执笔;第2章由朱清科、秦伟、焦醒执笔;第3章由张岩、朱清科、秦伟执笔;第4章由秦伟、燕楠、安彦川执笔;第5章由秦伟、张岩、李扬、何远梅执笔;第6章由秦伟、朱清科、郭乾坤执笔;第7章由秦伟、朱清科、焦醒执笔;第8章由朱清科、秦伟、赵磊磊、罗在燃执笔;第9章由张岩、燕楠执笔;第10章由张岩、姚文俊执笔;第11章由秦伟、朱清科、殷哲执笔;第12章由朱清科、秦伟、艾宁执笔;第13章由张岩、姚文俊、郭乾坤执笔;第14章由秦伟、朱清科、李柏执笔。全书由朱清科、秦伟统稿并定稿。

本书出版得到了“十二五”国家科技支撑计划课题“黄土及华北石质山地水土保持林体系构建技术与示范(2011BAD38B06)”子课题“陕北黄土丘陵沟壑区保水固土水土保持植被研究与示范(2011BAD38B0601)”、林业公益性行业科研专项经费课题“黄土丘陵严重侵蚀区植被恢复和重建技术研究(201104002-2)”的资助。

由于流域侵蚀产沙过程复杂,针对大中流域空间尺度的预报模拟等相关技术仍是学界的难点,加之作者水平和时间所限,书中不免会有欠妥之处,敬请读者不吝赐教、批评指正!

作 者
2015年12月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 黄土高原侵蚀产沙影响因素	1
1.2 黄土高原侵蚀产沙监测预报方法	10
1.3 黄土高原侵蚀产沙对植被重建变化响应	15
1.4 小结	18
参考文献	19
第2章 研究区域概况	26
2.1 黄土高原	26
2.2 北洛河上游流域	29
参考文献	32

上篇 降雨与植被时空变化及流域侵蚀产沙特征

第3章 降雨空间分异与侵蚀性降雨特征	37
3.1 降雨空间分异与侵蚀性降雨特征研究方法	38
3.2 黄土高原多尺度降雨空间分异	41
3.3 黄土高原侵蚀性降雨特征	60
3.4 北洛河上游降雨时空特征	65
3.5 小结	78
参考文献	79
第4章 流域地貌特征及其潜在侵蚀风险评估	81
4.1 流域地形数据处理与沟缘线提取	81
4.2 流域坡度与坡向特征	92
4.3 基于谐波分析的沟谷分布规律	94
4.4 基于地形地貌特征的潜在侵蚀风险	103
4.5 小结	108
参考文献	109
第5章 植被恢复空间分异与土地利用/覆被变化	111
5.1 黄土高原植被恢复空间分异	111
5.2 植被重建驱动下的流域土地利用/覆被变化	119
5.3 小结	135

参考文献	136
第 6 章 流域径流输沙变化与驱动因素	139
6.1 流域径流输沙波动与变化特征	140
6.2 流域径流输沙变化时段及驱动因素分析	143
6.3 小结	149
参考文献	149
第 7 章 流域坡面浅沟侵蚀发育地形特征	151
7.1 浅沟及其地形特征监测方法	152
7.2 浅沟及其地形参数分析	159
7.3 小结	166
参考文献	167
第 8 章 黄土区土质道路土壤侵蚀特征	169
8.1 机修土质道路概化分区与抽样调查	170
8.2 机修土质道路侵蚀特征	177
8.3 小结	185
参考文献	187

下篇 侵蚀产沙预报及其植被重建变化响应

第 9 章 黄土高原县域土壤侵蚀强度评估	191
9.1 县域土壤侵蚀评估数据与方法	192
9.2 县域土壤侵蚀强度评估分析	195
9.3 小结	200
参考文献	200
第 10 章 黄土高原大中流域 SWAT 模型适用性评价	202
10.1 基础数据处理与数据库构建	202
10.2 水文响应单元确定	206
10.3 参数敏感性分析	208
10.4 参数率定与模拟评价	211
10.5 小结	219
参考文献	220
第 11 章 黄土高原大中流域侵蚀产沙分布式统计模型	221
11.1 建模思路	222
11.2 模型结构	223
11.3 模型应用与检验	242
11.4 小结	259
参考文献	260

第 12 章 黄土高原坡面侵蚀产沙对植被覆盖变化的响应	267
12.1 坡面径流小区布设与试验方法	267
12.2 不同植被覆盖的土壤物理性质差异	269
12.3 坡面产流产沙影响因素及其贡献	273
12.4 不同植被覆盖下的坡面侵蚀规律	277
12.5 小结	284
参考文献	285
第 13 章 黄土高原小流域土壤侵蚀对林地空间分布变化响应	286
13.1 小流域土壤侵蚀强度与林地分布特征确定	287
13.2 基于林地分布特征的小流域分类与林地格局解析	288
13.3 不同林地分布格局小流域的土壤侵蚀强度变化	290
13.4 小结	294
参考文献	294
第 14 章 黄土高原大中流域侵蚀产沙对植被重建变化响应	296
14.1 基于水文统计的植被重建水沙调控效应	296
14.2 基于 SWAT 模型模拟的植被重建水沙调控效应	303
14.3 基于分布式统计模型模拟的植被重建水沙调控效应	305
14.4 小结	316
参考文献	318

| 第 1 章 | 绪 论

1.1 黄土高原侵蚀产沙影响因素

土壤侵蚀是指陆地表面在水力、风力、冻融和重力等外营力作用下，土壤、土壤母质及其他地面组成物质被破坏、剥蚀、转运和沉积的全过程。当外营力以降雨击溅及其汇集形成的地表径流冲刷为主时，即为水力侵蚀。当前，全球水力侵蚀面积约 1094 万 km^2 ，占土壤侵蚀总面积的近 70%，是危害最大、影响最广的世界环境问题（Lal, 2003）。土壤侵蚀是典型的地表过程，发生在由地形、土壤和地表覆盖组成的下垫面单元内，通常称为地表过程响应单元。在地表过程响应单元内，所有外营力驱动下的土壤运动都可视为侵蚀，而当以某一断面为界线，侵蚀运动后被输移出该断面的侵蚀物质则被称为产沙。在实际中，这一断面往往是一个完整坡面、天然集水区、小流域或大中流域的汇流出口。侵蚀产沙过程不仅直接破坏土壤结构、减少土壤养分，使土地生产力下降，而且造成河湖库塘泥沙淤积，加剧洪涝、干旱等灾害发生，成为危及人类生存与发展的重要环境问题。按照侵蚀产沙发生的动力过程，当外营力的作用大于土体抵抗力的作用时，即导致侵蚀产沙，因此，所有决定外营力、土体抵抗力及泥沙运移过程的要素及其相互作用便成为侵蚀产沙的影响因素。一般主要包括以降雨为主的气候因素，以及地形地貌、土壤性状和以林草植被为主的下垫面因素。当然，由于人类活动能够明显改变地形、土壤和植被等下垫面因素，从而也对侵蚀产沙具有重要影响。

1.1.1 降雨与侵蚀产沙

降雨是侵蚀产沙原动力的主要来源。降雨以雨滴击溅、汇流冲刷等过程对侵蚀产沙产生重要影响。其中，雨滴击溅使土壤颗粒发生分离、跃迁，成为坡面侵蚀产沙过程的开始。同时，雨滴的击溅作用还使土壤颗粒堵塞土壤孔隙，从而阻滞降雨入渗，增加地面径流及其剥蚀破坏。当降雨发生一段时间后，地表形成径流，此时径流的冲刷作用成为侵蚀产沙的直接动力。因此，出现了大量针对坡面降雨侵蚀能力量化的研究（Morgan, 1995; Morgan et al., 1998; Nearing et al., 1999），多数认为降雨侵蚀力是描述降雨侵蚀能力及其与侵蚀产沙关系的有效因子指标。

国内有关降雨与侵蚀产沙关系的研究始于 20 世纪 80 年代。针对黄土高原地区的侵蚀产沙，研究认为引起该区侵蚀产沙的主要降雨类型为短历时（1~4 h）、中雨量（20~50 mm）和高强度（平均强度为 5~20 mm/h 和最大 5min 降雨大于 7.0 mm）的暴雨（王万忠，

1984)。为确定不同降雨条件下的侵蚀产沙量，许多研究尝试建立不同空间尺度范围、不同降雨特征指标与侵蚀产沙量的统计关系，如郑粉莉（1988）建立了坡耕地内，降雨动能等指标与细沟侵蚀量的统计关系；周佩华等（1981）、江忠善等（1989）提出了降雨动能与土壤溅蚀量的指数统计关系。随着研究的深入，在引入和应用美国通用土壤流失方程或建立区域性土壤侵蚀统计模型的过程中，反映降雨对侵蚀产沙综合影响的降雨侵蚀力因子得到较广泛的报道，主要围绕不同地区降雨侵蚀力因子的算法或参数取值（表 1-1）。

表 1-1 我国不同地区的降雨侵蚀力因子算式研究成果

Table 1-1 Study results of rainfall erosivity factor formula in different regions of China

水土流失类型区	观测地点	土壤类型	因子算法	资料来源
东北黑土区	黑龙江宾县 黑龙江克山	黑土	$R_t = E_{60} \cdot I_{30}$	张宪奎等（1992）
	辽宁西丰	黑土	$R_t = I_{30} \cdot \sum E_j \cdot P_j$	林素兰等（1997）
西北黄土高原区	陕西子洲 陕西绥德	黄绵土	$R_t = E_{60} \cdot I_{10}$	王万忠和焦菊英（1995）
			$R_y = 1.67 \left(P_{ye} \cdot I_{y60} / 100 \right)^{0.93}$	
			$R_y = 0.272 \left(P_y \cdot I_{y60} / 100 \right)^{1.205}$	
	甘肃西峰 陕西安塞		$R_t = P_t \cdot I_{30}$	江忠善等（1989）
	宁夏西吉		$R_y = 1.77 P_y - 133.03$	孙立达等（1988）
	甘肃西峰 陕西淳化		$R_y = \sum P_{te} \cdot I_{30}$	刘秉正（1993）
			$R_y = 105.44 P_{yx}^{1.2} / P_y - 140.96$	
北方土石山区	海河流域 太行山区	黄土 红壤 褐土	$R_y = 1.2157 \sum_{i=1}^{12} 10^{(1.51 \lg P_{mi}^2 / P_y - 0.8188)}$	马志尊（1989）
南方红壤区	江西德安	红壤	$R_y = 0.265 P_y^{1.435}$	秦伟等（2013）
	安徽岳西		$R_t = \sum E \cdot I_{60}$	吴素业（1992；1994）
			$R_t = 2.455 E_{60} \cdot I_{60}$	
			$R_y = \sum_{i=1}^{12} 0.0125 P_{mi}^{1.6295}$	
	福建安溪		$R_y = \sum_{i=1}^{12} 0.0199 P_{mdi}^{1.5682}$	黄炎和等（1993）
西南岩溶区	云南昭通 云南东川	黄壤	$R_t = E_{60} \cdot I_{30}$	杨子生（1999a）
全国	全国 66 个气象 站点	—	$R_{ya} = 0.0668 P_{ya}^{1.6266}$ $R_y = 0.3589 \left[\left(\sum_{i=1}^{12} P_{mi}^2 \right) / P_y \right]^{1.9462}$ $R_y = 0.0534 P_y^{1.6548}$	章文波和付金生（2003）

注：水土流失类型区采用 2012 年水利部确定的全国水土保持一级类型区； R_t 为次降雨侵蚀力； R_y 为年降雨侵蚀力； R_{ya} 为多年平均年降雨侵蚀力； P_t 为次降雨量； P_y 为年降雨量； P_{ya} 为多年平均年降雨量； P_{ye} 为年内大于 10 mm 的降雨量； P_{te} 为次侵蚀性降雨量； P_{yx} 为年内汛期（6~9 月）降雨量； P_{mi} 为第 i 月降雨量； P_{mdi} 为第 i 月内大于 20 mm 的降雨量； P_j 为次降雨中第 j 时段雨量； I_{10} 、 I_{30} 和 I_{60} 分别为次降雨最大 10min、最大 30min、最大 60 min 雨强； I_{y60} 为年内最大 60min 雨强； E_{60} 为次降雨中 60 min 降雨产生的动能； E 为次降雨总动力； E_j 为次降雨中第 j 时段降雨动能。

1.1.2 土壤与侵蚀产沙

国际上有关土壤性质与侵蚀产沙关系的研究始于 20 世纪 30 年代，通过分析测定土壤质地、结构、有机质和化学组成发现，土壤侵蚀与土壤不同组分的含量显著相关，并依据土壤硅铁铝含量与土壤侵蚀的关系建立了相应的侵蚀强度分级标准（Bennet，1926）。此后，土壤黏粒率、渗透性、团聚体表面率以及团聚体稳定性和分散率等指标陆续被作为刻画土壤性质与侵蚀产沙关系的指示性指标。上述指标虽然从不同角度，且在一定程度上反映出土壤性质与侵蚀产沙的定量关系，但由于缺乏统一标准，难以直接作为侵蚀产沙强度预报评估的基本参数。60 年代，Olson 和 Wischmeier（1963）最早提出土壤可蚀性（soil erodibility）指标，定义为标准小区上单位降雨侵蚀力所引起的土壤流失量。该指标综合反映了土壤质地、粒径组成和有机质含量等对土壤侵蚀的影响，边界条件具体，便于比较，因此被作为许多侵蚀产沙预报模型的基本参数。此后，有关土壤性质和侵蚀产沙关系的研究多集中于土壤可蚀性指标的测算，相继出现了很多基于不同土壤理化资料的土壤可蚀性因子算法（Wischmeier and Mannering，1969；Young and Mutchler，1977；Römkens et al.，1977）（表 1-2）。除此以外，年内干湿季节变化（Calvin and Cade，1983）、土壤水分（Rejman et al.，1998）及性质的季节性变化（Wall et al.，1988）等其他土壤理化性状对土壤可蚀性的影响研究也多有报道。

我国针对土壤性质与侵蚀产沙关系的研究始于 20 世纪 50 年代。早期对土壤性质与侵蚀产沙关系的研究多针对土壤抗蚀或抗冲单方面（朱显谟，1982），重点建立土壤抗蚀性或抗冲性与不同指标的统计关系，进而量化土壤抗蚀性或抗冲性（蒋定生，1979；吴普特和周佩华，1993），并将黄土区土壤抗冲性划分为 5 个等级（周佩华和武春龙，1993）、土壤抗蚀性划分为 6 个等级（王佑民等，1994）。除此以外，不同土地利用类型、枯落物厚度及其植物根系对土壤抗冲性的影响多有报道（刘秉正等，1984；李勇，1990；汪有科等，1993）。之后，伴随美国通用土壤流失方程的应用研究，出现了大量有关不同地区、不同土壤类型土壤可蚀性因子测算及国外算法修订的研究（表 1-3）。同时，针对不同研究中标准小区和边界条件不统一而导致土壤可蚀性因子测算结果无法相互比较和外推应用的问题，张科利等（2007）总结、分析已有研究的背景条件及其观测资料，通过统一标准换算，重新测算了我国主要土壤类型区的土壤可蚀性因子值，为不同地区的土壤侵蚀预报提供了良好基础。

表 1-2 基于不同资料的土壤可蚀性因子算式研究成果

Table 1-2 Study results of soil erodibility factor formula based on different data information

算式	备注	资料来源
$K=[2.1(M_1-M_2)^{1.14} \cdot (12-OM)/10\,000+3.25(b-2)+2.5(c-3)]/100$	诺谟图法	Wischmeier 和 Smith（1978）

续表

算式	备注	资料来源
$K=[2.1(M_1-M_2)^{1.14} \cdot (12-OM)/10\,000+3.25(2-b)+2.5(c-3)]/100$	RUSLE 法	Renard 等 (1997)
$K=\{0.2+0.3\exp[-0.0256S_a(1-S_i/100)]\} \cdot \left(\frac{S_i}{C_i+S_i}\right)^{0.3} \cdot \left[1-\frac{0.25C}{C+\exp(3.72-2.95C)}\right] \cdot \left[\frac{1-0.7S_{n1}}{S_{n1}+\exp(-5.51+22.9S_{n1})}\right]$	EPIC 法	Sharply 和 Williams (1990)
$K=7.594\left\{0.0034+0.0405\exp\left[-\left(\frac{\log D_g+1.659}{0.7101}\right)^2/2\right]\right\}$ $D_g=\exp(0.01\sum f_i \cdot \ln m_i)$	几何粒径法	Renard 等 (1997)
$K=0.0293(0.65-D_k+0.24D_k^2) \cdot \exp\{-0.0021 \cdot OM/f_c-0.00037 \cdot (OM/f_c)^2-4.02f_c+1.72f_c^2\}$ $D_k=-3.5 \cdot f_c-2.0 \cdot f_s-0.5 \cdot f_d$	Torri 法	Torri 等 (1997)

注： M_1 、 M_2 为土壤质地参数，其中， M_1 为粉砂粒（0.002~0.05mm）与极细砂粒（0.05~0.1mm）百分含量， M_2 为除黏粒（<0.002mm）外的土壤颗粒百分含量；OM为有机质百分含量； b 为土壤结构编号； c 为土壤剖面渗透等级； S_a 为砂粒（0.05~2.0mm）百分含量； S_i 为粉砂（0.002~0.05mm）百分含量； C_i 为黏粒（<0.002mm）百分含量； C 为有机碳百分含量； $S_{n1}=1-S_a/100$ ； D_g 为几何平均粒径； f_i 为第 i 个粒径等级百分含量； m_i 为第 i 个粒径等级两端数值算术平均值； f_c 为土壤黏粒（<0.002mm）含量（小数表示）； f_s 为土壤粉砂粒（0.002~0.05mm）含量（小数表示）； f_d 为土壤砂粒（0.05~2.0mm）含量（小数表示）； D_k 为土壤质地几何平均粒度因子。

表 1-3 我国不同地区土壤可蚀性因子取值研究成果

Table 1-3 Study results of soil erodibility factor value in different regions of China

水土流失类型区	观测地点	土壤类型	平均 K 值	资料来源
东北黑土区	黑龙江鹤山	黑土	0.0381	张科利等 (2007)
	黑龙江宾县	白浆土	0.0210	
	辽宁西丰	棕壤	0.0097	唐克丽 (2004)
	辽宁北部	黄土状棕壤	0.0211	
	黑龙江牡丹江	暗棕壤	0.0369	张宪奎等 (1992)

续表

水土流失类型区	观测地点	土壤类型	平均 K 值	资料来源
西北黄土高原区	陕西安塞	黄绵土	0.0092	张科利等（2007）
	陕西绥德		0.0234	
	陕西子洲		0.0186	
	山西离石		0.0156	
	内蒙古皇甫川		0.0166	
	甘肃天水	中壤土	0.0324	唐克丽（2004）
		轻黏土	0.0168	
	内蒙古皇甫川	砒砂岩	0.03	
		砂质黄土	0.015	
		风砂土	0.008	
北方土石山区	北京密云	粗骨褐土	0.0018	张科利等（2007）
	北京怀柔	褐土	0.0195	刘宝元等（2010）
	北京延庆		0.0200	
	北京门头沟		0.0108	
南方红壤区	福建安溪	红壤	0.0073	张科利等（2007）
	安徽岳西	砖红壤	0.0018	
	湖南绥宁	紫色土	0.0191	
	江西德安	红壤	0.0017	秦伟等（2013）
西南岩溶区	云南昭通	黄壤	0.3010	杨子生（1999b）
		紫色土	0.4100	
	云南东川	红壤	0.3600	

注：水土流失类型区采用 2012 年水利部确定的全国水土保持一区分区，所有土壤可蚀性因子取值均通过径流小区多年野外降雨侵蚀观测资料计算获得。

1.1.3 地形与侵蚀产沙

地形是侵蚀产沙发生发展的载体。坡面尺度内，任意地形单元的径流水蚀动力主要取决于单宽流量和坡度，而单宽流量又取决于降雨强度、产流系数及坡段所在位置到分水线的距离。因此，一定降雨条件下，坡度和坡长是决定侵蚀产沙的主要地形指标。随着空间尺度的扩展，地形对产输沙过程的影响加大，除描述具体坡面单元的坡度、坡长等地形指标外，还需考虑流域或区域整体地貌形态在侵蚀产沙变化中的作用（秦伟等，2015）。

坡面尺度内，坡度与侵蚀产沙间通常存在指数或二次多项式关系，即随坡度增加侵蚀产沙强度先增后减或趋于平稳，二者关系存在临界转折。不考虑重力侵蚀时，对坡面侵蚀产沙总量而言，临界坡度通常在 $24^{\circ} \sim 29^{\circ}$ （靳长兴，1993）；若细分侵蚀形态，则面蚀为主时临界坡度在 $22^{\circ} \sim 26^{\circ}$ 、沟蚀为主时临界坡度会超过 30° 、重力侵蚀为主时临界坡度更大（胡世

雄和靳长兴, 1999) (表 1-4)。对于坡长与侵蚀产沙关系, 多数研究认为, 由于坡面径流深随坡长增加, 从而导致侵蚀产沙强度随坡长同步增加 (Zingg, 1940); 也有个别研究提出, 随坡长增大, 径流挟沙增多, 达到最大挟沙能力时, 侵蚀产沙强度达到峰值, 此后不再随坡长延长继续增加, 甚至有所减弱 (King, 1957) (表 1-5)。总体上, 在一定坡长范围内, 以指数形式反映的侵蚀产沙随坡长同步增大的关系, 即坡长因子被广泛认可与应用。

表 1-4 现有主要坡度因子算法

Table 1-4 Main study results of slope steepness factor formula

算式	备注	资料来源
$S = (0.43 + 0.3\theta + 0.043\theta^2) / 6.613$	USLE 算式	Wischmeier 和 Smith (1965)
$S = 65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta - 0.065$	USLE 算式	Wischmeier 和 Smith (1978)
坡度 < 时, $S = 10.8 \sin \theta + 0.03$ 坡度 ≥ 时, $S = 16.8 \sin \theta - 0.05$	RUSLE 法	Renard 等 (1997)
$S = -1.5 + 17 / (1 + e^{2.3 - 6.1 \sin \theta})$	适用陡坡	Nearing (1997)

注: S 为坡度因子; θ 为坡度。

表 1-5 现有主要坡长因子算法

Table 1-5 Main study results of slope length factor formula

适用尺度	算式	备注	资料来源
针对小区/坡面 尺度	$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m$		
	坡度 ≤ 0.5° 时, m 取 0.2; 0.5° < 坡度 ≤ 1.5° 时, m 取 0.3; 1.5° < 坡度 ≤ 2.5° 时, m 取 0.4; 坡度 > 2.5° 时, m 取 0.5	USLE 算式	Wischmeier 和 Smith (1978)
	$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m$ $m = \frac{\beta}{\beta + 1}$ $L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m$ $m = \frac{\beta}{\beta + 1}$	RUSLE 法	Foster 和 Meyer (1975)
	细沟侵蚀等于细沟间侵蚀量; $\beta = (\sin \theta / 0.0896) / (3 \sin^{0.8} \theta + 0.56)$ 细沟侵蚀大于细沟间侵蚀; $\beta = 2 (\sin \theta / 0.0896) / (3 \sin^{0.8} \theta + 0.56)$ 细沟侵蚀小于细沟间侵蚀; $\beta = 0.5 (\sin \theta / 0.0896) / (3 \sin^{0.8} \theta + 0.56)$ $L_i = \frac{\lambda_i^{m+1} - \lambda_{i-1}^{m+1}}{(\lambda_i - \lambda_{i-1}) (22.13)^m}$	RUSLE 法	McCool 等 (1989)
	$L_i = \frac{\lambda_i^{m+1} - \lambda_{i-1}^{m+1}}{(\lambda_i - \lambda_{i-1}) (22.13)^m}$	RUSLE 法	Foster 和 Wischmeier (1974)