



水 科 学 前 沿 丛 书

黄土高原土壤侵蚀评价

张科利 谢云 魏欣 等著



科学出版社

水科学前沿丛书

黄土高原土壤侵蚀评价

张科利 谢 云 魏 欣 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是作者系统总结多年来从事相关国家基金和水利部生产项目等多个研究成果,并在吸收前人研究成果的基础上编写而成。在阐述黄土高原土壤侵蚀特点和规律的同时,重点介绍土壤侵蚀评价方法及相关因子获取和计算模型,希望为黄土高原水土保持建设提供技术工具。在撰写过程中,突出了知识系统性、目标实用性、资料可靠性和方法可行性等特点,书中基本理论和方法不仅适用于黄土高原地区,对全国其他水土流失严重区也具有指导和借鉴意义。全书共分八章,第一章简述土壤侵蚀一般问题。第二章讲述黄土高原自然环境特征和河流泥沙问题。第三章论述土壤侵蚀模型及数据采集和计算流程。第四章介绍降雨侵蚀力因子计算方法及其分布特征。第五章介绍土壤可蚀性因子值及其估算方法。第六章介绍地形因子计算公式、计算流程及其变化特征。第七章介绍水土保持措施类型及其因子取值。第八章介绍和分析黄土高原最新水土流失调查和评价结果。

本书可供从事水土保持、资源管理、水利工程和地理学等领域的研究人员和高校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

黄土高原土壤侵蚀评价/张科利等著. —北京:科学出版社,2015.9

(水科学前沿丛书)

ISBN 978-7-03-045913-8

I. ①黄… II. ①张… III. ①黄土高原-土壤侵蚀-土壤评价
IV. ①S157

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 237245 号

责任编辑:杨帅英 / 责任校对:韩 杨

责任印制:肖 兴 / 封面设计:陈 敬

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

*

2015年10月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015年10月第一次印刷 印张:12

字数:285 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《水科学前沿丛书》编委会

(按姓氏汉语拼音排序)

顾	问	曹文宣	陈志恺	程国栋	傅伯杰
		韩其为	康绍忠	雷志栋	林学钰
		卯智	孟伟	王超	王浩
		王光谦	薛禹群	张建云	张勇传

主 编 刘昌明

常务副主编 徐宗学

编	委	蔡崇法	常剑波	陈求稳	陈晓宏
		陈永灿	程春田	方红卫	胡春宏
		黄国和	黄介生	纪昌明	康跃虎
		雷廷武	李怀恩	李义天	林鹏
		刘宝元	梅亚东	倪晋仁	牛翠娟
		彭世彰	任立良	沈冰	王忠静
		吴吉春	吴建华	徐宗学	许唯临
		杨金忠	郑春苗	周建中	

《水科学前沿丛书》出版说明

随着全球人口持续增加和自然环境不断恶化,实现人与自然和谐相处的压力与日俱增,水资源需求与供给之间的矛盾不断加剧。受气候变化和人类活动的双重影响,与水有关的突发性事件也日趋严重。这些问题的出现引起了国际社会对水科学研究的高度重视。

在我国,水科学研究一直是基础研究计划关注的重点。经过科学家们的不懈努力,我国在水科学研究方面取得了重大进展,并在国际上占据了相当地位。为展示相关研究成果、促进学科发展,迫切需要我们过去几十年国内外水科学不同分支领域取得的研究成果进行系统性的梳理。有鉴于此,科学出版社与北京师范大学共同发起,联合国内重点高等院校与中国科学院知名中青年水科学专家组成学术团队,策划出版《水科学前沿丛书》。

丛书将紧扣水科学前沿问题,对相关研究成果加以凝练与集成,力求汇集相关领域最新的研究成果和发展动态。丛书拟包含基础理论方面的新观点、新学说,工程应用方面的新实践、新进展和研究技术方法的新突破等。丛书将涵盖水力学、水文学、水资源、泥沙科学、地下水、水环境、水生态、土壤侵蚀、农田水利及水力发电等多个学科领域的优秀国家级科研项目或国际合作重大项目的成果,对水科学研究的基础性、战略性和前瞻性等方面的问题皆有涉及。

为保证本丛书能够体现我国水科学研究水平,经得起同行和时间检验,组织了国内多位知名专家组成丛书编委会,他们皆为国内水科学相关领域研究的领军人物,对各自的分支学科当前的发展动态和未来的发展趋势有诸多独到见解和前瞻思考。

我们相信,通过丛书编委会、编著者和科学出版社的通力合作,会有大批代表当前我国水科学相关领域最优秀科学研究成果和工程管理水平的著作面世,为广大水科学研究者洞悉学科发展规律、了解前沿领域和重点方向发挥积极作用,为推动我国水科学研究和水管理做出应有的贡献。



2012年9月

前 言

黄土高原是我国乃至世界土壤侵蚀最为严重的地区之一。严重的土壤侵蚀导致黄河多沙并在下游河床淤积,长期威胁着下游地区人民的生命财产安全。自新中国成立以来,政府投入大量人力、物力和财力进行土壤侵蚀研究和水土保持建设,取得了显著成就。从20世纪50年代开始,水利部和中国科学院先后组织多次对黄土高原土壤侵蚀和水土保持进行综合考察。在80年代,中国科学院又组织有关专家对黄土高原进行了综合考察,土壤侵蚀和水土保持是重要的考察内容之一。1999年,水利部组织各流域结构以及省、自治区、直辖市开展了全国第二次水土流失遥感调查,并在2002年发布了全国水土流失公告。同时,自50年代开始,水利部和中国科学院等先后在黄土高原设立土壤侵蚀和水土流失监测站,开展了系统的土壤侵蚀规律研究。上述调查、考察和定点观测,为认识黄土高原土壤侵蚀规律、水土流失特点和区域分布特征奠定了重要基础。

纵观黄土高原地区土壤侵蚀研究和水土流失调查成果,目前在土壤侵蚀模型及其应用方面仍比较薄弱。美国在20世纪50~60年代,就在W. H. Wischmeier和N. P. Woodruff为代表的科学家努力下,通过对土壤侵蚀影响因子的系统研究,建立了通用土壤流失方程USLE(universal soil loss equation)和风蚀方程WEQ(wind erosion equation),后来成为国家资源清查中水蚀和风蚀评估的重要工具,为水土保持规划和土地资源管理提供了强有力的技术支撑。作者基于前人已有的研究基础及十多年来对黄土高原土壤侵蚀因子的定量研究,提出了适用于黄土高原地区的土壤侵蚀评价模型及因子估算方法,并系统评价了黄土高原水土流失现状。本书是在总结作者研究成果和吸收国内外相关研究的基础上撰写而成。内容具有完整的理论体系,又具有较强的可操作性。希望为黄土高原水土保持和生态建设提供技术工具。

《黄土高原土壤侵蚀评价》一书的编写,得到了国家基金委员会多个基金项目和水利部“黄土高原土壤流失方程研究”项目成果的支持。本书具体执笔人分别是:第一章,张科利、谢云;第二章,谢云、张科利、张岩;第三章,谢云、魏欣;第四章,谢云、殷水清;第五章,张科利、刘鸿鹄;第六章,刘宝元、符素华;第七章,刘宝元、谢云、张岩、章文波;第八章,张科利。全书由张科利、谢云统稿。从构思、动笔到现在,几经搁置,历经十年,在很多专家学者的鼓励下才得以完成。在此,谨向水利部水土保持监测中心郭索彦、张长印等;中国科学院地理科学与资源研究所蔡强国;中国科学院水利部水土保持研究所江忠善、王万忠、卢宗凡、侯喜禄、刘国彬等专家学者表示衷心感谢。同时,也一并感谢曾在北京师范大学地理学院土壤侵蚀课题组学习,并为本书作出过贡献的所有研究生。最后,对培养和带领我们走上土壤侵蚀研究之路的朱显谟院士和唐克丽先生表示诚挚的感谢。

作 者

2015年于北京师范大学

目 录

《水科学前沿丛书》出版说明

前言

第一章 概论	1
一、土壤侵蚀概述	1
二、土壤侵蚀类型	4
(一) 分类目的及原则	4
(二) 主要侵蚀类型	5
(三) 几个相关问题和概念	6
三、土壤侵蚀危害	8
(一) 危害河流生态安全	8
(二) 加剧水资源短缺程度	9
(三) 降低土壤生产力,导致土地贫瘠化	9
(四) 威胁交通和通信保障	9
(五) 加剧全球环境变化程度	9
(六) 影响社会综合发展	9
四、黄土高原土壤侵蚀的特殊性	10
(一) 区位上的特殊性	10
(二) 问题上的特殊性	10
(三) 研究上的特殊性	11
参考文献	12
第二章 黄土高原土壤侵蚀环境	13
一、黄土高原的范围与面积	13
二、黄土高原自然条件	14
(一) 地质地貌	14
(二) 气候条件	19
(三) 河流水文	25
(四) 土壤资源	28
(五) 植被覆盖	42
三、黄土高原土壤侵蚀特征	45
(一) 土壤侵蚀类型多样	45
(二) 土壤侵蚀强度大	46
(三) 土壤侵蚀区域分异显著	49

四、黄土高原土壤侵蚀与黄河泥沙	51
(一) 黄土高原水土流失是黄河泥沙根源	51
(二) 黄河粗泥沙来源于黄土高原多沙区	52
参考文献	53
第三章 黄土高原土壤侵蚀定量评价方法	55
一、评价目的与意义	55
(一) 土壤侵蚀模型的发展过程	55
(二) 区域土壤侵蚀定量评价发展历程	60
二、黄土高原土壤侵蚀评价方法	64
(一) 评价方案设计与野外调查单元布局	64
(二) 数据采集方法	66
(三) 土壤侵蚀定量评价方法	66
(四) 数据库构建与计算程序	67
(五) 评价成果及其应用	68
参考文献	69
第四章 降雨因子评价	72
一、降雨侵蚀力定义与指标	72
(一) 主要降雨特性指标	72
(二) 降雨侵蚀力	74
二、侵蚀性降雨标准	77
(一) 侵蚀性降雨标准的确定方法	78
(二) 侵蚀性降雨标准的评价指标	79
(三) 黄土高原侵蚀性降雨标准的确定	79
三、降雨侵蚀力计算	81
(一) 用降雨过程资料计算	82
(二) 用次降雨资料计算	85
(三) 用日降雨资料计算	86
(四) 用月雨量资料计算	88
(五) 用年雨量资料计算	89
(六) 各种计算方法的误差分析	90
四、降雨侵蚀力季节分布	93
五、多年平均年降雨侵蚀力空间分布	102
参考文献	103
第五章 土壤因子评价	107
一、土壤因子评价指标的选择和使用问题	107
二、土壤可蚀性因子 K 的定义和计算方法	109
三、典型站点土壤可蚀性因子 K 实测值	112
(一) 资料来源及处理	113

(二) 土壤可蚀性实测值及其变化规律	113
四、土壤可蚀性因子 K 值估算问题	114
(一) 主要估算公式	115
(二) 不同估算公式的计算与应用问题	115
(三) 土壤可蚀性估算方法及具体流程	117
五、黄土高原主要土壤类型的可蚀性因子值	122
六、土壤可蚀性 K 估算值精度分析	127
(一) 资料选取及说明	127
(二) 估算结果精度分析	128
(三) 模型评价及应用	129
七、存在问题及未来发展	129
参考文献	130
第六章 地形因子评价	132
一、土壤侵蚀量与坡度的关系	132
二、土壤侵蚀量与坡长的关系	135
三、地形因子值计算公式	138
(一) 坡面尺度的 LS 计算公式	138
(二) 区域尺度的 LS 计算公式	139
(三) 区域尺度的 LS 计算流程	140
(四) 黄土高原地区地形因子计算中相关参数设置	142
四、黄土高原坡度及坡度因子分布特点	142
(一) 坡度分布	142
(二) 坡度因子分布	145
五、黄土高原坡长及坡长因子分布特点	146
(一) 坡长分布	146
(二) 坡长因子分布	146
参考文献	147
第七章 水土保持措施因子评价	150
一、水土保持措施类型	150
二、水土保持措施因子的定义	154
三、植被覆盖与生物措施因子(B)的估算方法	155
(一) 草地土壤流失比率 SLR	155
(二) 林地土壤流失比率	157
(三) 其他土地利用类型的生物措施因子	158
四、工程措施因子(E)的估计	158
五、耕作措施因子(T)的估计	159
(一) 农地耕作措施因子估算方法	159
(二) 其他耕作措施因子	161

六、存在问题和前景展望	162
参考文献	163
第八章 黄土高原土壤侵蚀空间分布特征	165
一、土壤侵蚀评价精度分析	165
(一) 资料与处理	165
(二) 模拟计算精度	166
二、土壤侵蚀强度及其空间分布	167
(一) 黄土高原现代土壤侵蚀解析	168
(二) 黄土高原土壤侵蚀强度特征	169
(三) 黄土高原土壤侵蚀空间分布特征	172
三、土壤侵蚀和水土保持未来变化趋势	175
(一) 强度减弱, 仍为严重区域	175
(二) 分布格局发生变化	175
(三) 河流泥沙威胁缓解	176
(四) 研究重点领域变化	176
(五) 政府投资思路需要转变	176
参考文献	177

第一章 概 论

由于独特的自然环境特征和社会经济条件,黄土高原水土流失问题十分突出。严重的水土流失导致地带性土壤基本流失殆尽和土地生产力降低。同时,大量入河泥沙也会引起河床淤积抬升,加剧洪涝灾害的威胁。自然环境的独特性表现为地形崎岖陡峻,土质疏松多孔,降雨集中且多暴雨。社会经济的独特性在于天然植被受破坏,陡坡普遍开垦,以及广种薄收的农业生产习惯。在自然因素和人类活动的共同影响下,不论从发生机制、发展过程及分布规律,还是危害程度、社会影响和影响范围等考虑,黄土高原的土壤侵蚀在中国土壤侵蚀研究中都具有不可替代的地位。在黄土高原发生的土壤侵蚀,犹如一本完整的土壤侵蚀教科书,研究黄土高原土壤侵蚀不仅有助于系统理解侵蚀基本原理,而且还对全国其他地区土壤侵蚀和水土流失防治研究具有示范作用。另外,相对于我国其他土壤侵蚀类型区,黄土高原土壤侵蚀研究历史悠久、过程机制清楚、资料积累丰富。因此,在黄土高原进行土壤侵蚀定量化评价,具有研究基础丰富和区域特征典型的优势。

一、土壤侵蚀概述

“侵蚀”一词源于拉丁语动词“erodere”,是剥掉、移走的意思,最早在 19 世纪末被 Penck(1894)用于描述水流的形成以及河水流动过程中对固体物质的冲刷,而地表径流和降雨的侵蚀被称为冲刷或剥蚀(ablation),来自拉丁语“ablation”的“携走”之意。“土壤侵蚀”一词直到 20 世纪初才出现,而广泛使用始于 20~30 年代,美国学者 Bennett、Fuller、Lowdermilk 和 Middleton,苏联学者 Kozmenko、Pankov、Gussak、Sobolev 和 Zaslavskii,德国学者 Kuron、Schultze、Glander 和 Flegel,法国学者 Bauling 等,先后在其文献中使用并给出了土壤侵蚀的定义,一般是指水力和风力作用下对土壤的破坏(Zacher, 1982)。

不同学者给出的具体定义会有所不同。中美联合编审委员会(1986)指出,土壤侵蚀是通过各种自然作用,其中最重要的是水的作用,塑造地壳并使之磨损的过程。该定义更侧重于地貌。《地理学词典》编制委员会(1983)指出,土壤侵蚀是土壤或土体在外营力(水力、风力、冻融或重力)作用下,发生冲刷、剥蚀和吹蚀的现象。该定义较前一个定义更为具体和有针对性,目前被我国学者普遍所接受。Bennett(1939)指出土壤侵蚀是水和风力将土壤颗粒冲起或吹起并移走。1979 年美国科学教育部农业局指出,土壤侵蚀是风和流水在地表对土壤的分离和移动。这两个定义一致,主要强调的是风和水的作用,并细化了土壤侵蚀的两个重要过程:分离和移动。Kirkby 和 Morgan(1980)给出的定义是:土壤侵蚀是雨滴和径流对土壤移动的总量,没有包括其他营力的作用。Lal(1994)与之类似指出,土壤侵蚀是土壤颗粒被溅离或被挟移。陈永宗等(1988)在其《黄土高原现代侵蚀与治

理》一书中,对土壤侵蚀含义作过系统评述与论证,认为侵蚀是指地表物质(岩石和土壤)在外营力作用下的分离、破坏和移动,外营力包括各种自然营力(如水、风、重力等)和人为作用。明确强调了人类活动在现代侵蚀中的作用。同时,他还特别将土壤侵蚀概念区分为狭义土壤侵蚀和广义土壤侵蚀。广义土壤侵蚀包括土壤和成土母质在外营力作用下的分离、破坏和移动过程,而狭义土壤侵蚀是指土壤被外营力分离、破坏和移动。我国水利部在其行业标准中没有对土壤侵蚀作特别定义,而是分别给出了不同营力形成的各种土壤侵蚀的定义,包括水蚀、风蚀、重力侵蚀、冻融侵蚀、人为侵蚀等。

综合前人上述定义或论述,我们认为侵蚀应该是指地表组成物质(包括岩石、风化物 and 土壤等)在内外营力作用下被分离、搬运和沉积的过程。外营力包括自然营力(如水、风、冻融、重力等)和人为作用,内营力主要是指新构造运动。因为从长期而言,一个地区侵蚀强度与构造运动有一定关系,在构造抬升区,总体侵蚀强度要大,相反在沉降区,总体侵蚀强度相对要弱。在侵蚀分区或强度图编制时,都要考虑新构造运动。流水侵蚀冲刷塑造了各种沟谷地貌形态,风蚀作用造就了不同的风沙地貌类型。重力侵蚀发生则导致了滑坡、塌陷等。因此,侵蚀过程也是地貌过程的一种,是地貌塑造过程中的物质破坏、搬运和沉积过程。

土壤侵蚀是指在自然因子和人类活动共同作用下,地表土壤被分离、搬运和沉积,并导致土壤性状或生产力发生改变的过程。鉴于侵蚀严重区地带性土壤已经遭受强烈破坏,切沟等沟道侵蚀均在土壤母质中发生的事实,我们认为土壤侵蚀应该是指在自然因子和人类活动共同作用下,地表土壤或成土母质被分离、搬运和沉积的过程。与陈永宗等(1988)的定义比较,强调了沉积过程。因为在土壤侵蚀发生过程中,表层土壤结构被破坏,遭受分离、搬运和沉积过程是同时存在,交替发生。土壤侵蚀含义更多体现的是土壤遭受破坏后,自然生产力逐渐降低的过程。

与土壤侵蚀密切相关的概念还有两个,土壤流失和水土流失。虽然3个概念本身有其自明性,但在实际应用中,人们的理解和使用会有所不同。从概念本身而言,土壤侵蚀是指外来作用对土壤进行的破坏并发生移动,而土壤流失是指相对于某个范围而言,土壤组成物质的损失数量,即土壤遭受侵蚀后,从某个特定空间上流失的数量,对应的英文词为 soil loss,在使用上更具有专业性和世界通用性。水土流失是指相对于某空间而言水和土的同时损失,是我国土壤侵蚀研究者和水土保持工作者鉴于我国土壤侵蚀特点所使用的词汇,对应的英文也应是 soil loss。因为水资源问题在黄土高原与土的问题同样重要,一直沿用水土流失来描述土壤侵蚀问题。尽管水土流失隐含着水的流失,但在实际使用时仍然是指土壤流失。关于水的问题,用径流一词来描述。水土流失在使用上有我国特色,在一定程度上更具有社会性。从这个意义上说,只要土壤遭受外力的作用发生分离和移动,就发生了土壤侵蚀,但如果没有从要研究的特定地块范围内流出去,就没有土壤流失或水土流失的发生。对于土壤流失而言,必须有外营力的作用,如风力和水力,否则不会流失。因此,国外多用土壤流失,不用水土流失。目前水土流失的含义,是对所有营力导致的土壤流失的统称,包括水蚀、风蚀、冻融侵蚀和重力侵蚀等引起的土壤流失量。有些学者认为水土流失仅是指水蚀过程中水分和土壤的损失,不包含风蚀;有些学者认为同时包括水蚀和风蚀造成的损失。已有学者建议不采用水土流失,但考虑到被普遍使用

多年的习惯传承,可将其看做是与土壤侵蚀相同的概念。

在土壤侵蚀和水土保持领域还有使用泥沙和产沙等词汇,泥沙和产沙多为水利界同行使用,泥沙或产沙主要是从河流着眼来探讨土壤侵蚀问题。泥沙量或产沙量与土壤流失量或水土流失量在概念内涵上有某些重叠,也有一定差别。泥沙量是对某个流域系统河流中固体物质多少的描述,具体可用含沙量、输沙量等来表示。产沙量则指某个时间段来自某个空间范围的泥沙量,如坡面产沙量、沟道产沙量和流域产沙量等。

Kirkby 和 Morgan(1980)以及 Lal(1994)给出了它们的区别。Kirkby 和 Morgan(1980)认为,土壤侵蚀量是指雨滴和径流对土壤移动的总量;土壤流失量是指土壤被移出一个具体的坡面或田块的数量;产沙量是指泥沙被输送到一个特定点(断面)的数量,一般是指进入河道的侵蚀物质多少。Lal(1994)认为,土壤侵蚀是指土壤颗粒被击溅和分离移动的量,不同于淤积或沉积,以及泥沙输移;土壤流失量是用单位面积和时间表示的量,常用于小区;产沙量是通过小区、田块、沟槽或流域集水区一定地点流出的侵蚀物质的数量。从这些表述中不难看出,3个概念是有区别的,但在很小的面积内,三者基本一致。而在一般情况下,如进行坡面、流域等的研究,侵蚀量减去沉积量即为产沙量或流失量。在实际应用中,土壤侵蚀量是一个理论值,一般不可能测量得到。更有应用意义的指标是土壤流失量和产沙量。在计算流域的总侵蚀量时,必须考虑泥沙输移比。如果用流域产沙量推算流域侵蚀量,也要通过泥沙输移比计算。泥沙输移比是指流域某一断面产沙量与该断面以上流域总侵蚀量的比值,它是0~1的无量纲变量。其值越小,表明流域侵蚀量多沉积在流域内;其值越大,表明侵蚀量多流出流域断面。例如,黄土高原丘陵区的许多河流泥沙输移比接近1(龚时旻和熊贵枢,1979;牟金泽和孟庆枚,1982)。

尽管土壤侵蚀量、流失量和产沙量在概念及其内在含义上有一定区别,但在目前土壤侵蚀研究和水土保持实践中,在没有指明的情况下三者实际含义相同,常常被混用,如对于坡面而言,坡面土壤侵蚀量就等于坡面土壤流失量,也等于坡面产沙量。在流域尺度上更是如此。不管是侵蚀量、流失量还是产沙量实际上都是侵蚀物质在运移过程中在不同面积尺度和不同输移距离上的表述,在计算流域泥沙平衡时需要加以严格区分。为了定量描述土壤侵蚀,并便于调查计算和科学评价,我们建议一般情况下,使用土壤流失量概念更具有通用性。进入河道后,用输沙量的概念则更为恰当。统一用坡面土壤流失量、小流域土壤流失量等用语取代坡面产沙量和小流域产沙量、坡面侵蚀量和小流域侵蚀量等称谓。针对中大尺度流域,用输沙量较为适宜,如延河流域输沙量、黄河流域输沙量,而不用延河流域土壤流失量和黄河流域土壤流失量。因为在大尺度下,下垫面情况变化很大,使用土壤流失量时指意不明。

侵蚀是一个自然过程。只要地表出露,必然要始终处于不断地被风化、侵蚀、搬运、堆积过程中,由此形成了各具特色的地貌。由于人类活动介入以后,改变了地表自然生态系统,毁林毁草开荒,使地表物质自然的移动过程改变,原有的自然平衡被打破,地表物质运移过程加剧,导致土壤资源破坏,形成水土流失灾害。因此,许多研究者将侵蚀分为地质(自然或常态)侵蚀和加速侵蚀。最具代表性的是 Bennett(1939)提出的自然侵蚀(normal erosion)和加速侵蚀(accelerated erosion),他认为自然侵蚀是指不受人类活动干扰时,地表在自然环境下的侵蚀过程。加速侵蚀或非自然侵蚀(abnormal erosion)是指由于人类

活动干扰,打破了土壤形成与侵蚀过程的平衡状态,从而导致土壤被移动的速度大大加快。只有在进行人类活动影响评价或长时间环境演变等方面研究时,才需要对自然侵蚀和加速侵蚀予以区分,现在所说的土壤侵蚀都是指加速侵蚀,不必再特别指明加速侵蚀。本书中对土壤侵蚀的论述和评价,统一使用土壤流失量,并主要针对坡面农耕地的土壤流失量估算问题。

二、土壤侵蚀类型

受地理位置和环境特征的决定,黄土高原土壤侵蚀不仅程度强烈,而且表现形式十分复杂。在不同侵蚀营力作用下,土壤遭受破坏及被运移的方式和过程不同,结果形成了不同的形态,同时,对流失量也有不同的贡献。因此,对土壤侵蚀进行准确的分类,一方面有助于理清土壤侵蚀发生机理,也是进行流失量准确估算的基础。关于黄土高原土壤侵蚀分类,从 20 世纪 50 年代开始,前人已经有过较为系统的研究。黄秉维(1955)、朱显谟(1956)、罗来兴(1956)、陈永宗等(1988)和唐克丽(2005)等从不同角度论述了黄土高原地区的土壤侵蚀类型划分及原则。这些成果为后来土壤侵蚀研究及相关图件的绘制奠定了重要的理论基础。但由于当时对土壤侵蚀过程机理方面研究成果和试验观测数据的匮乏,上述分类中或过分依据地貌形态,或过于关注类型区的划分,而对不同类型的发生机制及其对总体流失量的贡献考虑显得不足。为了适应土壤侵蚀预报研究,以及指导对土壤侵蚀机理深入研究,有必要对土壤侵蚀分类再作系统讨论。

(一) 分类目的及原则

进行土壤侵蚀分类是为了深入理解土壤侵蚀发生过程及控制机制,明确侵蚀泥沙来源及其产生方式,从理论和实践两方面为土壤流失量估算奠定基础。最终,针对性明确地服务于水土流失的有效防治工作。因此,不论从理论研究层面,还是生产实践层面,进行土壤侵蚀分类工作都十分必要。关于土壤侵蚀的分类原则,陈永宗等(1988)在 20 世纪 80 年代就明确指出,侵蚀分类与地貌分类一样,应以成因和形态相结合为原则。形态是指几何图形,可以用面积、长宽、高度、坡度和形状等要素进行表示。成因则是塑造形态的原因。借用地貌学分类原则,有充分的理由和可信性,但由于分类的对象是土壤侵蚀,仅考虑成因和形态还不足以从内在根本上区分土壤侵蚀。形态是侵蚀过程的结果,同样的形态可以通过不同的途径完成。同时,同一侵蚀过程在不同发展阶段,也会留下不同的形态。例如,细沟可以发展成浅沟,浅沟可以发展成切沟。细沟、浅沟和切沟在形态特征上差异很大,但其内在形成机制都是径流冲刷和重力导致边壁崩塌共同作用的结果。因此,进行土壤侵蚀分类的首要原则是以成因和过程差异为依据,兼顾形态特征。其次,要遵循层次性原则,按照营力-过程-形态等的异同点,逐层划分或归并。最后,为理论研究和生产实践服务兼顾原则。进行土壤侵蚀分类的首要目的是揭示侵蚀过程的内在规律,但必须考虑水土保持实践中的应用问题,尽可能地反映其对流失量贡献和水土保持措施要求上的差异。

(二) 主要侵蚀类型

尽管黄土高原地区侵蚀类型复杂多样,但各种侵蚀类型或方式都有清晰的成因关系。只要按照一定的逻辑关系进行梳理,就可以构建合理的土壤侵蚀分类体系。考虑黄土高原地区土壤侵蚀特点及理论研究和水土保持实践的需求,土壤侵蚀分类由 3 级系统构成(表 1-1)。

表 1-1 黄土高原土壤侵蚀类型

一级类型	二级类型	三级类型	过程特征及其对流失量的贡献作用
水力侵蚀	雨滴溅蚀	击溅分离	雨滴打击地表,将土粒分散、分离
		击溅扰动	雨滴打击扰动径流,增大径流分离搬运能力
	径流冲蚀	面蚀	薄层水流分离、搬运土壤颗粒
		细沟侵蚀	径流冲刷、分离和搬运土粒,边壁崩塌扩展
		浅沟侵蚀	径流冲刷、分离和搬运土粒,边壁崩塌扩展
		切沟侵蚀	径流冲刷、下切、搬运土粒,边壁崩塌扩展
	渗流潜蚀	洞穴侵蚀	下渗水流携带土粒移动,导致塌陷
		壤中流涌蚀	入渗水流侧向流动,携带土粒移动
风力侵蚀	吹蚀	—	大风吹扬和运移土粒
	磨蚀	—	风沙流摩擦分离土粒
	扫蚀	—	大风吹动植物扫刮地表并扬沙
重力侵蚀	滑坡	—	诸多因素诱导和在重力作用下的大块体运动
	崩塌	—	临空面或沟边壁失衡发生的块体运动
	泻溜	—	经冻融交替破坏分散的土粒滑落堆积
冻融侵蚀	冻胀挤压	—	土壤水冻结膨胀挤压,土壤紧实,入渗降低
	消融分散	—	土壤冻结消融反复,破坏结构,分散土粒
人为侵蚀	耕作侵蚀	—	耕作翻动增大土壤可蚀性、垄沟改变径流
	灌溉侵蚀	—	灌溉水冲刷搬运土壤,在地表发生再分配
	挖掘侵蚀	—	筑路、采石、开矿等弃渣弃土
生物侵蚀	根系穿崩	—	根系生长崩裂土体
	动物啃挖	—	动物洞穴扰动土体、影响入渗
复合类型	泥石流	—	重力与流水共同作用下两相体移动
	泥流	—	重力与流水共同作用下两相体移动
	泻溜	—	重力与冻融作用下土体移动

一级类型主要依据侵蚀作用营力的差异划分,包括水力侵蚀、风力侵蚀、重力侵蚀、冻融侵蚀、人为侵蚀、生物侵蚀和复合侵蚀 7 种类型。一级类型的划分,一方面可以指导土壤侵蚀机理研究。另一方面,可以为大尺度土壤侵蚀类型图的编绘奠定理论基础。一级类型的划分还不考虑其对土壤流失量的贡献问题。二级类型划分的依据主要是侵蚀营力

作用方式的差异性,在一级类型的基础上再作划分。例如,将水力侵蚀进一步分为雨滴溅蚀、径流冲蚀和渗流潜蚀。三者同是水力侵蚀,但作用方式差异显著,要求必须区别对待。雨滴打击作用主要在于分散土粒和扰动径流,实际搬运作用十分有限。而径流冲刷作用除了分离土粒外,其搬运能力大增,同时还会不同程度地改变地表形态。渗流潜蚀由于是水在土壤中移动,对土粒的运移能力与地表径流不同,作用结果也差异显著。将水力侵蚀区分为上述3种次一级类型后,可以在遵循各自机理的基础上,用不同方法来观测确定其对流失量的贡献。结果使土壤侵蚀研究理论性和针对性更强。同样是径流冲蚀,在不同地形部位和汇流条件下,侵蚀结果也会有显著不同。为此,依据侵蚀搬运强度、对土壤流失量的贡献程度,可以再将径流冲蚀分为面状侵蚀、细沟侵蚀、浅沟侵蚀和切沟侵蚀。在进行水土流失估算时,可进一步分解建模和提取不同的参数。在进行水土保持规划时,可以更有针对性地选择不同的水土保持措施。由于融雪侵蚀的实质也是径流冲刷,作用机理与降雨径流完全一致,在侵蚀分类中不必专门列出。可以知道融雪径流量,就可以计算其侵蚀量。

对水力侵蚀以外的其他类型,由于现阶段研究成果的相对薄弱和对流失量贡献程度的考虑,只包括两种类型。例如,风力侵蚀包括吹蚀、磨蚀和扫蚀3种次级类型。考虑到冻融侵蚀作用直接产沙贡献很难量定,再作进一步分类时,更多地考虑了其对土壤侵蚀过程的影响作用。冻融侵蚀再分为冻胀挤压和消融分散两种次级类型。对于生物侵蚀、人为侵蚀类型的划分,更多考虑的是土壤侵蚀分类系统的完整性。在本次土壤侵蚀分类系统中,增加了复合侵蚀类型。尽管在有些文献中也有人提及复合侵蚀,如风水复合侵蚀,但含义完全不同。复合侵蚀应该是指在两种或者以上的营力共同作用下形成的土壤侵蚀,如泥石流、泥流和泻溜。泥石流和泥流的发生首先必须具备大量的侵蚀物质基础,再被搬运沉积。在这一过程中,重力作用导致的滑坡、崩塌等提供侵蚀物质,而降雨(或融雪等)形成的径流则是搬运的动力基础。同样,泻溜的发生是由冻融作用的交替发生分散土壤,在重力作用下发生移动堆积。现有文献中提到的风水复合侵蚀实际上指的是风蚀和水蚀同时发生区,而不是侵蚀类型。关于这方面的区别和联系将在后续内容中详细论述。

关于传统土壤侵蚀分类中提到的悬沟侵蚀、冲沟侵蚀、坳沟侵蚀等不再列入土壤侵蚀类型。因为对这几种类型的划分依据主要是形态上的差异,同时,在一条冲沟内,实际上受多种营力共同影响,且多种侵蚀方式并存。悬沟侵蚀可以直接并入切沟侵蚀类型。另外一个原因是,对土壤侵蚀机理研究和土壤流失量计算而言,有无这些类型关系不大。冲沟以上的沟谷系统应该归入侵蚀地貌的研究范畴。

(三) 几个相关问题和概念

在以往研究和水土保持工作实践中,为了特定研究目的或实际操作的需要,常常也会看到某某侵蚀的描述,如坡面侵蚀、沟谷侵蚀;强度侵蚀、中度侵蚀;农地侵蚀、草地侵蚀等术语。这些术语不属于土壤侵蚀类型分类方案中的侵蚀类型,与真正的侵蚀类型之间不存在成因和过程的逻辑关系,在土壤侵蚀分类系统没有其相应的位置。

坡面侵蚀与沟谷侵蚀实质上是一个区域概念。坡面侵蚀是指发生在坡面范围的土壤侵蚀过程,沟谷侵蚀则是指发生在沟谷范围内的土壤侵蚀过程,两者都包含着多种侵蚀类

型。之所以区分坡面侵蚀和沟谷侵蚀,首先是发生在坡面和沟谷范围的侵蚀,在主导营力和对流失量的贡献对比上有明显差别。坡面侵蚀以径流冲蚀为主导,侵蚀方式也以径流分离和搬运土粒为主。沟谷侵蚀在很大程度上则以重力侵蚀为主导,侵蚀方式以下切、崩塌和高含沙水流输移为主。类似的概念还有农地侵蚀、草地侵蚀和林地侵蚀等,在此不作一一赘述。

侵蚀强度是根据土壤侵蚀剧烈程度进行区别和描述的概念。强度分级也不是土壤侵蚀分类,只反映土壤侵蚀程度,不包含机理上的逻辑关系。侵蚀强度分级可以针对某种侵蚀类型进行,如强度细沟侵蚀、中度细沟侵蚀和轻度细沟侵蚀。也可以针对每个区域侵蚀程度的差异性进行分级,如强度侵蚀区、中度侵蚀区和轻度侵蚀区。侵蚀强度分级的目的是为了刻画土壤流失量的差异性,主要服务于河流泥沙来源和水土保持规划。在进行侵蚀强度分级时,只注重侵蚀结果,可以不考虑侵蚀类型。因为同一种侵蚀类型的强度可以接近,也可以相差甚远。

侵蚀分类和分区首先是关注不同的科学问题,侵蚀分类的依据是侵蚀成因和过程机理的差异性,根据其差异性从高到低逐级划分。而侵蚀分区的依据主要是侵蚀类型的共同点,根据其共同点从低到高逐级合并。侵蚀类型可以不考虑区域和面积问题,但类型区最终要绘成具有一定面积的图斑。图斑大小受研究目的和资料详略程度决定。侵蚀分类是进行土壤侵蚀分区的基础。土壤侵蚀分区更关心高级类型和主导营力,如水力侵蚀区、风力侵蚀区、冻融侵蚀区等的划分只根据土壤侵蚀作用营力的差异。同时,在一个类型区可以是多种类型并存,如水力侵蚀区同时存在风蚀、重力侵蚀和冻融侵蚀,只是以水力侵蚀为主导。

剖面侵蚀与母质侵蚀:朱显谟先生在进行土壤侵蚀分类中提出过剖面侵蚀和母质侵蚀概念,也不能算作真正的侵蚀类型。按照朱先生的解释,坡面侵蚀是指发生在土壤剖面中的侵蚀过程,母质侵蚀是指发生在土壤母质中的侵蚀过程。剖面侵蚀和母质侵蚀只是反映了侵蚀作用的物质基础不同而已,没有任何营力、过程和程度上的依据。但是,提出剖面侵蚀和母质侵蚀对指导土壤侵蚀过程研究及模型参数确定还是很有意义。具有成土剖面的土壤和母质在结构及构型上差异明显。发生在母质中的侵蚀,不会因侵蚀过程的持续和土壤层变薄而导致流失量与土壤性质因子间的关系发生变化。而发生在剖面土壤中的侵蚀,流失量与土壤性质因子间的关系会因侵蚀过程的持续和土壤层变薄而显著变化。例如,东北地区的黑土,土壤侵蚀导致土层变化后,土壤有机质含量、质地、透水性和紧实度都会随时间变化而变,土壤可蚀性也会随之而变。对于黄土高原而言,地带性土壤黑垆土已基本侵蚀殆尽,现在分布的黄绵土是人类在黄土母质上不断耕垦的结果,基本性状与黄土母质之间没有明显差异。土壤有机质含量、质地、透水性和紧实度等参数不会随时间变化而变化,土壤可蚀性基本上为常数。因此,在黄土高原地区没有必要区剖面侵蚀与母质侵蚀。

对黄土高原地区土壤侵蚀严重程度的理解和认识,既要有历史观,但也需要把握一个尺度问题,包括空间尺度和时间尺度。黄河历来多沙,但不能简单地用华北平原的形成来佐证。因为黄河泥沙在华北平原的淤积可能与黄土高原水土流失问题不在同一个时间尺度上。即使黄土高原水土流失不严重,但只要持续发生,假以时日也能淤积出平原。如果