



北京市高等教育精品教材立项项目

Soil Erosion

土壤侵蚀

〔美〕 T.J.托伊 G.R.福斯特 K.G.雷纳 著
张洪江 程金花 李春平 王 幸 译
王海燕 校



WILEY
wiley.com



科学出版社

土壤侵蚀

Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement, and Control

〔美〕 T. J. 托伊 G. R. 福斯特 K. G. 雷纳 著

张洪江 程金花 李春平 王 幸 译

王海燕 校

科学出版社

北 京

图字：01-2012-4212

内 容 简 介

本书较为系统地介绍了土壤侵蚀类型、土壤侵蚀过程及其与环境因素之间的关系。阐述了如何使用土壤侵蚀预测技术，构建土壤侵蚀模型和进行野外与室内的土壤侵蚀研究，同时还对土壤保持规划、常用的规划工具和方法进行了叙述，并以案例形式介绍了农田、牧场、受干扰林地、建筑用地、矿山、垃圾填埋场等土地利用类型的土壤侵蚀控制措施。

本书英文原著是美国 T. J. 托伊、G. R. 福斯特和 K. G. 雷纳博士编写的 *Soil Erosion* (John Wiley & Sons, 2002)。该书无论是在编写体例、还是在编写内容等诸多方面，基本上与我国目前较多使用的普通高等教育“十一五”国家级规划教材、面向 21 世纪课程教材《土壤侵蚀原理》(中国林业出版社, 1999, 2008) 较为接近。因此，本译著非常适合环境生态类及森林资源类专业学生，作为专业基础课程的中、英文双语教学使用，本书也可作为从事水土保持与荒漠化防治、土地利用、国土整治、环境保护等学科的教学、科学研究和生产管理人员的参考用书。

Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement, and Control

Copyright © 2002 by John Wiley & Sons, Inc., New York

All Rights Reserved. This Translation published under license

图书在版编目 (CIP) 数据

土壤侵蚀 = Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement, and Control/(美) 托伊 (Toy, T. J.) 等著; 张洪江等译. —北京: 科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-034621-6

I. ①土… II. ①托…②张… III. ①土壤侵蚀 IV. ①S157

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 117598 号

责任编辑: 赵 峰 杨 红/责任校对: 桂伟利

责任印制: 闫 磊/封面设计: 迷底书装

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>

骏立印刷厂印刷

科学出版发行 各地新华书店经销

2012 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2012 年 6 月第一次印刷 印张: 12 1/2

字数: 316 000

定价: 35.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

土壤侵蚀是世界性的环境问题之一。防治土壤侵蚀,保护、改良和合理开发利用水土资源,维护和提高土地生产力,一直是土壤侵蚀科研及实践者的目的。土壤侵蚀防治科研与实践的发展,也使人们对于土壤侵蚀及其控制的基本原理有了新的认识,并在生产实践中逐步推进土壤侵蚀的防治。普通高等教育水土保持与荒漠化防治专业正是培养防治土壤侵蚀、从事生态环境建设专业人才的摇篮。

土壤侵蚀的防治除需要不断总结和发扬国内以往的经验外,同时还要引进其他国家在此领域的不同防治理念、先进技术和先进经验等, *Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement and Control* 一书的引进与正式编译出版,正是在水土保持与荒漠化防治方面洋为中用的典范之一。

该书的编译者们选择 *Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement and Control* 作为水土保持与荒漠化防治专业的配套辅助教材是较为合适的,因其内容相对浅显易懂、表达简洁。同时我也注意到该教材的英文原版在内容及其编排体例等方面,均与目前我国在教学实践中所使用的中文版教材《土壤侵蚀原理》(张洪江主编,中国林业出版社,2008)较为相近,这就更方便教师教学和学生学习。如果使用者能够借助该教材阅读其英文原版书籍,该教材就为确切地理解中英文描述同一事物的英文基本用语习惯提供了一个较好的学习参考机会。但本人也了解到,在编译者们与该书的原出版社长达两年多时间的版权商榷中,最终只获得了在我国印刷出版全书的中文译本授权,不能不说这是该编译教材出版中的一件憾事。

教材建设是一项耗时长、投入精力多、复杂细致的工作,它需要编写者和编译者具有长期的专业知识及教学经验积累,很欣慰地看到该教材编译组为此所做出的贡献。他们在长期教学实践中不断探索和总结经验,关注国内外相关教学动态,不仅其所主讲的“土壤侵蚀原理”课程于2003年和2007年被分别评为北京市级精品课程和国家级精品课程,现在又将美国 John Wiley & Sons 公司出版的、由 T. J. 托伊; G. R. 福斯特和 K. G. 雷纳编写的 *Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement and Control* 引进编译出版,他们的工作还得到了北京市高等教育精品教材立项并得到其资助。相信该教材作为水土保持与荒漠化防治专业本科生的配套辅助教材,将会在水土保持与荒漠化防治及相关专业本科生的教学中产生积极的作用。



北京林业大学教授、博导

2012年1月

编译者的话

水土保持与荒漠化防治专业（包括原水土保持专业）建立近 60 年以来，在教育部颁布的专业建设规范以及该专业的人才培养方案中，《土壤侵蚀原理》就是一门骨干性的核心专业基础课程。通过本课程学习，使学生掌握有关土壤侵蚀的基本知识、基本理论和基本防治技术与技巧。目前我国在该课程教学过程中使用的教材是普通高等教育“十一五”国家级规划教材、面向 21 世纪课程教材、高等学校水土保持与荒漠化防治专业教材《土壤侵蚀原理》（张洪江等，中国林业出版社，2008，第 2 版）。

本人从事该课程的教学 30 余年，并已进行该课程双语教学实践多年。在教学过程中，深感大学本科生的专业外语表述能力亟待提高，以适应国家和社会对大学本科毕业生的外语运用能力的需求。在双语教学实践中，深感缺乏突出学科特点、强调学科知识的科学性与准确性的双语教材，是开展本课程双语教学面临的重要制约因素之一。因此寻求一本专业性较强、术语运用上简明确切、语句上通俗易懂、结构上层次清晰的外语专业教材显得尤其必要。在教育部和北京市教学改革研究项目支持下，“《土壤侵蚀原理》中英文双语教材”于 2008 年获北京市教育委员会批准立项，并确定其为北京市精品教材进行资助。

通过多种渠道查阅相关资料，最后选择了美国 John Wiley & Sons 公司出版的、由 T. J. 托伊；G. R. 福斯特和 K. G. 雷纳编写的 *Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement and Control* 作为配套英语辅助教材。之所以选择该书是因为 *Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement and Control* 具备以上基本要求、并由国外知名学者编写。其内容相对浅显易懂、表达方式简洁清晰、适合普通高等院校大学本科相关专业高年级学生学习使用。更重要的是其英文原版书在体例上与目前我国所使用的中文版教材《土壤侵蚀原理》相近，这就更方便教师教学和学生使用时使用。

大学本科生教辅用书不同于其他书籍或论文翻译，为保证语言的地道性，在汉语表达基本通畅的前提下，语句翻译大量采用直译形式，尽管如此翻译仍显得有些繁琐，有时甚至觉得些许难于理解，但这就为本书读者提供了一种较为确切地理解原文意思及认识英文表达方法的机会。当然这并不意味着不会出现某些译文谬误、甚至翻译错误，求得阅读者的原谅与宽恕。我们也深信本书的使用者，在获得专业英语表述方法方面的知识外，同时也会在土壤侵蚀及其基础理论方面受益。

本书原意是想出版装订成中英文对照式版面，即采用每页英文、中文相互对应的方式，以方便使用者中英文对照学习。但在与英文原版出版社长达两年多时间的版权商榷过程中，虽经多层次的多次洽商，最终只获得了在我国印刷出版全书的中文译本授权，这也算是本工作的憾事。

本书是在北京市精品教材“土壤侵蚀原理中英文双语教材（2008 年）”和教育部“《土壤侵蚀原理》国家级精品课程（2008 年）”资助下完成编译并出版的。借此机会要特别感谢北京林业大学教务处的各位同事在与本书相关工作中所给予的大力支持，尤其是教务处副处长张戎女士，是她长期一如既往的鼎力相助，才使得本书的编译得以开展并有今天的收获。

还要由衷地感谢我的同事、北京林业大学水土保持学院的程金花副教授、李春平博士和王幸硕士，是他们的辛勤劳动，才使本书能够完成编译，同时还要特别感谢水土保持学院的王海燕副教授，是她花费大量时间和心血对全部译文进行认真的校阅。还要真诚地感谢王贤硕士、张焜硕士、张静雯硕士、宋楠硕士、孙龙硕士和马西军硕士对本书插图的清绘、及对很多与本书出版相关事务的工作所付出的劳动。

借此机会，还要感谢 John Wiley & Sons 出版社北京代表处的负责人宋智慧女士，由于她的不懈努力，才使得本书的编译出版成为可能。

我还必须感谢我的水土保持启蒙老师、已故中国工程院资深院士、北京林业大学教授关君蔚先生，是先生的导引才使我步入了水土保持与荒漠化防治这一科学事业的殿堂。

感谢我的恩师、北京林业大学教授王礼先先生，是他严谨的治学态度和一丝不苟的敬业精神，以及对我工作上的悉心指导与教诲，才使我能够沿着先生指引的水土保持科学方向逐步前进。同时也要特别感谢先生欣然为本书作序。

最后还要感谢我的所有老师和同仁，是他们给予的多年支持与帮助，才使我们的水土保持教学团队不断前进。

本书主要适用于环境生态类相关专业大学高年级本科生、相关学科的研究生学习使用，同时可供森林资源类和环境保护类有关专业本科生作为教学参考用书，也可作为从事水土保持与荒漠化防治、土地利用、国土整治、环境保护等方面科学研究教学人员的参考书。

张洪江

北京林业大学教授、博导

2012年4月于北京

原著者致谢

本书得到了许多同行的大力帮助，尤其是 Richard Hadley, Doug Helm, C. Huang, Keith McGregor, Don Meyer, Karl Musser, Mary Nichols, Waite Osterkamp, Matt Römkens, Roger Simanton, Ed Skidmore, Glenn Weesies, Daniel Yoder 和 Ted Zobeck。美国丹佛大学地理系主任 David Longbrake 在过去两年里一直以各种方式支持本项目。我们对他们的帮助表示衷心感谢。

另外，需要指出 Walt Wischmeier 对土壤侵蚀科学作出的贡献。他不仅有能力和激发土壤侵蚀研究，还能将那些信息转换成全世界都认为有用的形式。大家将永远记得他。

前 言

本书是一本关于土壤侵蚀过程的教科书，它适用于综合性大学或学院的学生和从事水土保持与土地复垦领域研究的工作者。从事土壤侵蚀的学生可以是来自不同学科、不同的年级和具有一定野外工作经验的学生。虽然本书的主要读者对象是具备较高水平的在校本科生、刚刚毕业的本科生和具有相当教育背景的其他人，但是这些人必须真正要理解土壤侵蚀及其侵蚀过程。

本书的结构主要分为五个部分：

第一部分（第 1 章和第 2 章）主要描述了土壤侵蚀作为全球性问题的重要性，虽然土壤侵蚀这—问题是全球性的，但有关当地问题的解决都受其所处环境系统的制约，并有适用于当地情况的具体解决方案。

第二部分（第 3 章和第 4 章）主要讨论了土壤侵蚀类型、不同土壤侵蚀类型的发展、土壤侵蚀与侵蚀过程及环境特点之间的相关关系。

第三部分（第 5 章和第 6 章）通过对侵蚀发展过程的理解，阐述如何使用土壤侵蚀预测技术构建土壤侵蚀模型和进行野外与室内的土壤侵蚀研究。

第四部分是通过认识土壤侵蚀过程、土壤侵蚀预测技术及土壤侵蚀研究，为土壤侵蚀控制概念和实践奠定基础（第 7 章）。土地保护（第 8 章）是在一定文化背景下对土壤侵蚀过程的管理。在世界范围内土壤保持机会各不相同。本章主要描述了土壤保持规划、规划工具以及选择土地利用的土壤保持项目范例。最后一章（第 9 章）总结了美国保护行动的经验教训，并展望了侵蚀问题及侵蚀控制研究的未来。总而言之，在土壤侵蚀研究、土壤保持以及土地复垦方面已积累了 100 多年的经验，因此在此问心无愧地提出我们的观点。

第五部分以附录形式提供了有关土壤和水文方面所需要的背景知识。附录中还提供了部分有关土壤侵蚀的网址，从这些网址中能够找到很多土壤侵蚀信息。

土地利用导致了土壤直接暴露在风力和水力作用下，因此加大了土壤侵蚀速率。本书着重强调了独立于土地利用的土壤侵蚀与侵蚀控制原理，基于这些原理知识，使土壤保持和土地复垦工作者能够理解在干扰土地作用下将会发生什么，并且为了控制土壤侵蚀的发生，在野外应该做些什么。尽管在本书的附录中引用了很多参考文献以反映有关土壤侵蚀的重要成就，但其主要打算还是作为教科书而不是参考书使用。

土壤侵蚀在世界很多地方都是非常严重的环境问题。尽管人们都比较清楚土壤侵蚀控制的基本原理，但当地的文化和社会经济因素经常会妨碍侵蚀控制实践的真正落实。我们期望通过此书向教师们传达一种正确的土壤侵蚀控制的紧迫感，让学生们从土壤侵蚀研究和减轻侵蚀问题过程中获得成就感和满足感。我们期望让土壤侵蚀专业的学生意识到土壤侵蚀科学不仅是一种使命，而且还是一种生活方式，土壤侵蚀科学是使世界变得更美好的一个机会。

T. J. 托伊, G. R. 福斯特, K. G. 雷纳

目 录

序

编译者的话

原著者致谢

前言

第 1 章 绪论	1
侵蚀的物理和经济意义	3
侵蚀的社会影响	8
土壤保护和侵蚀控制	10
土壤侵蚀研究	11
侵蚀术语	11
小结	14
建议读物	14
第 2 章 影响土壤侵蚀的主要因子	15
水力侵蚀	15
展望	30
小结	31
建议读物	31
第 3 章 土壤侵蚀类型	32
水力侵蚀	32
风力侵蚀	40
风力和水力侵蚀之间的联系	41
土壤的机械运动	42
小结	42
建议读物	42
第 4 章 土壤侵蚀过程	43
水力侵蚀和风力侵蚀的基本概念	43
风力侵蚀	62
小结	69
建议读物	69
第 5 章 土壤侵蚀预测技术	70
土壤侵蚀预测技术的基本原则	70
侵蚀模型数学方程式的组成要素	70
土壤侵蚀数学模型的类型	74
其他类型侵蚀模型	81

开发侵蚀模型步骤	82
灵敏度分析	88
小结	89
建议读物	89
第 6 章 侵蚀测量	90
侵蚀测量的目的	90
侵蚀测量的类型	90
侵蚀测量措施	92
测量技术选择	97
侵蚀测量的评估	110
小结	113
建议读物	113
第 7 章 侵蚀与泥沙控制	115
侵蚀和泥沙控制的原则	115
水力侵蚀控制措施案例	117
水力侵蚀控制案例汇总	124
集中径流侵蚀控制	126
风力侵蚀控制	130
小结	132
建议读物	133
第 8 章 土地保护	134
公共保护项目	135
保护规划	136
制定保护规划的技术方法	140
控制侵蚀源区的侵蚀和泥沙的土壤保护规划	143
政府部门制定的保护规划	147
美国保护运动的经验教训	150
建议读物	152
第 9 章 前景与展望	153
主要知识点	153
小结	159
附录 A 常用土壤术语	160
建议读物	163
附录 B 常用水文学术语	164
建议读物	168
附录 C 有关土壤侵蚀网站	169
参考文献	175

第1章 绪 论

想象一下，几百万年之前，除最寒冷和最干旱地区之外，陆地上发生第一场雨和第一场风时就产生了一系列的过程。这些过程在很大程度上塑造了地球表面形态。它们将陆地分成不同的汇水盆地，并塑造了高山与低谷、山坡与河道，并剥蚀陆地上经数十年、数百年甚至上千年时间才形成的肥沃的表层土壤。这些剥蚀过程可以仅仅在几年甚至几个月内摧毁土地生产力，夺取人类及其他生物的食物。对土壤和其他地球母质的破坏、剥蚀、搬运和堆积的一系列过程即为侵蚀和沉积。

因为在时间和空间上的普遍性，土壤侵蚀被认为是世界范围内一个重要的、且极有可能是最主要的环境问题之一。由于它在时间和空间上的普遍性及其巨大的影响，土壤侵蚀成为自然科学家和社会科学家的一个基础研究主题。农场主、矿主、承包者以及各级政府机构的成员们必须努力采取各种有效的侵蚀控制措施来保护土壤，尽量减少侵蚀和沉积造成的直接和间接损失。

如今，许多地区的土壤侵蚀速率已经超过了土壤形成速率，这造成了土壤资源的消耗，降低了土地潜在生产力（图 1.1）。这种土壤侵蚀速率超过土壤形成速率的情况主要是由人类活动导致的。随着全球人口的增加及其对食物、居住条件和生活水平要求的不断提高，土壤侵蚀速率正在进一步增加，土壤侵蚀范围也正继续扩大。



图 1.1 艾奥瓦州中南部农地上加速的土壤侵蚀

仅仅在美国，大约有 0.573 亿英亩^①农地，其生态极为脆弱且高度易受侵蚀，已被确认正在经历着过度侵蚀。大约 0.505 亿英亩土地虽不是高度易受侵蚀，但它们的侵蚀程度已经

^① 1 英亩≈0.4047 公顷

超过了土壤容许流失量（美国农业部自然资源保护局 USDA, NRCS, 2000）。土壤容许流失量是“容许作物在合理成本情况下，长期可持续地保持高产的最大的土壤侵蚀量”（Wischmeier and Smith, 1978）。这个概念的应用及其局限性将会在第 8 章中讨论。当然，遗憾的是，现在没有任何一项技术能够控制所有土地利用条件下的土壤侵蚀速率。

在过去的 30 年里，许多研究已经证实了土壤侵蚀问题的严重性，认为它每年带来了数十亿吨的土壤流失，或者表达为每年侵蚀和沉积危害造成的经济损失达数十亿美元（Lal, 1994a; Morgan, 1991）。但大多数研究者认为这些数据是不精确的，原因是考虑到侵蚀过程在时间和空间上的变异性、土壤侵蚀精确测量技术的缺乏、小样地尺度到大陆等大尺度的数据外推以及侵蚀和泥沙沉积速率转换到货币单位过程中造成的误差（Boardman, 1998; Crosson, 1995; Lal, 1994a; Osterkamp et al., 1998; Pimental et al., 1995; Ribauda, 1986）。然而，不管如何衡量，土壤侵蚀是一个在全世界都非常严重的问题，威胁到生态系统和人类居住环境。

任何一个大尺度区域内的土壤侵蚀平均速率并不代表土壤侵蚀问题的实际严重程度。土壤侵蚀平均速率值掩盖了土壤侵蚀速率较低和较高区域。大尺度区域内的某些地区经常存在较低速率的土壤侵蚀，这种低速率侵蚀对生态环境不会造成危害，或者可以通过一些小型和廉价的农业耕作措施调整来控制。而另外一些地区经常存在高速率侵蚀，这就需要耗费巨大的物力和财力来控制。通常，一个区域内很小部分地区产生的土壤侵蚀和泥沙沉积，可能在该区域总侵蚀量和总泥沙沉积量中占据较大比例。以大尺度区域内土壤侵蚀速率最高的某些地区为主要土壤侵蚀控制目标，能够显著降低该区域的平均土壤侵蚀速率。

用“以全球化眼光考虑问题，结合地区特点解决问题”这句格言来形容对土壤侵蚀的控制是非常恰当的。以全球化的眼光考虑问题，是因为土壤侵蚀是一个非常普遍的问题，它过去、现在、将来一直影响着全球生态系统。结合地区特点解决问题，是因为有效的土壤侵蚀控制措施要求针对山坡、田地、沟道和山地流域尺度具体实施。

大多数情况下，长期的土壤生产力和农业可持续发展都要求土壤侵蚀速率不能超过土壤形成速率。土壤生产力是土壤在其正常环境下，在一个具体的管理系统中生产某一特定作物（或生产某一系列作物）的能力（国家土壤侵蚀—土壤生产力研究规划委员会，National Soil Erosion-Soil Productivity Research Planning Committee, 1981）。通过种植高产量的作物品种、施用杀虫剂及肥料，至少可以在短期内维持甚至提高土壤生产力。但是，在某些情况下，这些措施在经济上是不可行的，它会降低农地经营者的盈利，有时还会引起其他的环境问题，比如由于施用的杀虫剂及肥料从田地运输到径流时造成的水污染。而且，这些措施在被推广到发展中国家时经常受到其经济和其他文化条件的限制。

有效控制土壤侵蚀措施的发展和对其管理都要求人们对侵蚀过程有一个彻底、完整的了解，要求人们有精确测定和评估土壤侵蚀速率的能力，具有土壤侵蚀控制技术的理论和实践知识。

这本介绍土壤侵蚀教材的目的是：①提供土壤侵蚀过程、土壤侵蚀测定、土壤侵蚀评估和土壤侵蚀控制的基础知识；②明确更多详细信息的来源；③为侵蚀研究和土壤保护事业奠定基础。

侵蚀的物理和经济意义

土壤侵蚀在各方面以不同方式直接或间接地影响土地及其居民。在这一节，将讨论土壤侵蚀造成的物理上和经济上的后果，其造成的社会影响将在本章的后述部分阐述。

土壤性质变化

土壤性质是成土（土壤形成）过程中的产物，它因受到人类活动的影响而频繁发生变化。土壤材料强度、土壤入渗能力以及植被生产力等特性（附表 A）都会因土壤侵蚀过程而改变。土壤本身具有决定其抵抗外界侵蚀应力的强度特性。这些土壤性质经常发生改变，在较长时期内，是风化、成土过程及有机质分解的结果；短时期内，是季节性气候变化条件的结果。加速的土壤侵蚀移走了土壤表层（A 层），并使底层（B 层）土壤暴露，而底层土壤具有不同的强度特性，因此，不同的土壤对重力、雨滴击溅力及地表径流冲刷力的抵抗能力也不同。

土壤的另外一个重要特性是入渗能力，定义为水分渗入土壤的最大速率。土壤入渗过程将降雨分为 3 个部分，即土壤表层水分、地下水和地表径流（附录 B）。土壤表层水分将土壤颗粒结合在一起，增加土壤团聚力，能够降低土壤风蚀速率。流入地表以下的水分会产生土壤孔隙水压力，降低土壤颗粒之间的摩擦力，使土壤颗粒更容易受到重力及其他外在侵蚀力的侵蚀。亚地表径流会在坡脚处流出，成为渗漏流，汇入地表径流。一旦降雨速率超过土壤入渗速率，径流就会汇于地表，在地表上流动，产生水力侵蚀动力，并将泥沙从山坡运移到沟道中。一般来说，A 层土壤的入渗能力远远高于 B 层土壤的入渗能力。当侵蚀将 A 层土壤移走时，便将 B 层土壤暴露，此时，一场高强度的降雨会产生更高的径流速率和更多的径流量；同时，由于土壤入渗率降低，会产生更高的土壤侵蚀速率。当然，这还依赖于 B 层土壤材料对于土壤侵蚀外营力的承受力。

土壤具有能够极大地影响植被生长的物理和化学性质。比如，过多或过少的土壤水分都会影响植被生长。排水速率较慢的土壤会水涝，使该土壤只适合于种植水生（湿地）植物类型，而且倾向于需水较多的庭院植物。排水速率较快的土壤不能保持充足的水分，只能适于栽植旱生（沙地）植被类型。一种土壤的持水能力与其颗粒组成密切相关。质地较细的土壤比质地较粗的土壤拥有更大的可供水分子吸附和储存的表面积。从经验法则来说，砂粒含量比例为 70% 或更多的土壤被认为是比较干旱的。当风力和水力侵蚀过程将土壤中的细颗粒移走时，土壤持水能力将会下降。当水分成为一个限制因素时，土壤持水能力的下降反过来会影响植被的生长。另外，土壤侵蚀减小了土壤厚度，从而降低了可用于储存水分和养分的土壤体积。

土壤肥力是土壤提供植物生长所必需的营养元素的数量和平衡各元素及化合物的能力。植物营养元素大多储存于上层土壤中，并在此循环。移去上层土壤会减少植被可利用的养分数量。不管是天然产生的、还是农场主或专家施用的植物营养剂和杀虫剂（包括昆虫剂、除草剂和杀菌剂），它们都吸附于泥沙颗粒中，随径流或侵蚀过程而被运移。图 1.2 显示了美国潜在含有杀虫剂的径流的空间变异性。

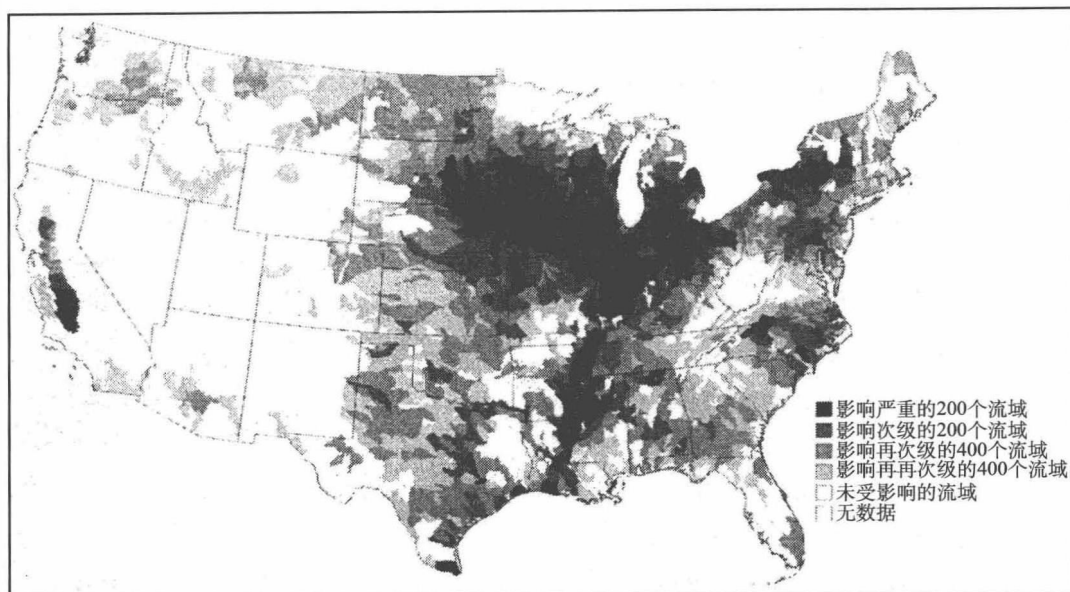


图 1.2 美国内陆潜在含有杀虫剂的径流分布图 (磅/流域, 1996, 美国农业部自然资源保护局)

侵蚀的经济后果

侵蚀的经济后果要在侵蚀源地 (不同用途场地、农地或建筑用地)、区域和国家尺度上检验。土壤物理化学特性的变化会影响作物盈利性、降低作物产量, 所以, 要维持产量就得提高管理要求。据美国农业部自然资源保护局统计 (1997a), 土壤侵蚀仍然在威胁美国将近三分之一的农地、至少五分之一牧场地的土地生产力。土壤侵蚀通过降低土壤矿物质、土壤持水力、根系深度和植物养分可利用率来减少作物产量, 同时降低土壤结构性, 改变土壤质地 (Weesiea et al., 1994)。

事实证明, 土壤侵蚀和土地生产力之间的关系, 某种程度上是很难精确描述的, 因为土壤侵蚀速率和土地生产力均受变化较大的时间和空间诸多条件的影响。例如, Olson 等 (1994) 观察到有以下因素使土壤侵蚀和土地生产力之间的关系更加复杂: ①景观位置和山坡组成; ②地表和亚地表水流; ③自然和人为侵蚀控制措施; ④土壤性质; ⑤过去及现在土地管理状况。另外, 不同年份间的气候变化也直接影响土壤侵蚀和土地生产力, 这使野外研究、数据分析及解释等变得更加复杂。

土壤侵蚀是一种隐性过程, 它首先能够剥蚀生产力最强的表层土壤, 同时会以不易觉察的速度在很长时期内降低土地生产力。然而, 这种土地生产力的降低经常被种植高产量作物以及增加肥料和杀虫剂的施用量等形式所掩盖。这一般会发生在能够得到经济支持来支撑增加肥料和杀虫剂而增加的投资的地区 (Follett and Stewart, 1985)。在广泛施用商业化肥之前, 相比于表层土壤少量流失下的农作物产量, 表层土壤严重流失的土地降低了大约 50% 或更多的农作物产量 (Weesies et al., 1994)。大量研究分析已经表明, 农作物产量的降低主要受土壤和气候特征, 以及肥料施用率的影响。无论从长期来说, 还是从短期来说, 土壤侵蚀都会影响农业经济的盈利性。

高侵蚀速率的累积效益会在国家层面和区域层面上反映出来。自 1982 年以来, 美国农

地减少了大约 1100 万英亩 (2.6%), 草地大约减少了 1200 万英亩 (9%), 牧草地减少了大约 0.11 亿英亩 (2.6%), 而林地增加了 0.036 亿英亩或 0.9% (美国农业部自然资源保护局, 1997, 2000 年修正)。美国东北部和南部的一些州将以前的农地改成了林地。密西西比河底部的许多森林和大平原草地现在都改成了农地 (美国农业部自然资源保护局, 1997a)。实际上, 导致这些土地利用变化的原因很多, 包括农业贸易经济上的变化、以往侵蚀造成的土壤损失以及土壤侵蚀控制项目的影响。另外, 由于各种土地利用类型之间的竞争, 尤其是城镇和小城镇的发展, 也会导致土地利用类型的变化。

为了努力保护易受水力侵蚀和风力侵蚀的土壤, 保护规划项目 (CRP) 于 1985 年创立。到 1997 年, 保护规划项目已经将 0.327 亿英亩土地纳入了保护规划, 不作为生产用地。据估计, 每年由于面蚀和细沟侵蚀造成的耕地的土壤流失量为 3.1 吨/(英亩·年), 而保护规划项目内的土地由于面蚀和细沟侵蚀造成的土壤流失量是 0.4 吨/(英亩·年)。据估计, 每年由于风力侵蚀造成的耕地上的土壤流失量是 2.5 吨/(英亩·年), 而保护规划项目内的土地由于风力侵蚀造成的土壤流失量是 0.3 吨/(英亩·年) (美国农业部自然资源保护局, 1997b)。

土壤保护规划项目是将易受土壤侵蚀的土地退出耕作, 这在美国是十分可行的, 因为在其他不太易受土壤侵蚀的农地上可以施用大量的肥料以及经济和技术措施使其生产力达到最大化。现在, 每英亩农地的食品和纤维等产量已经是 1935 年时每英亩产量的 3 倍 (美国农业部自然资源保护局, 1997a)。因此, 美国农业市场的需求能够以低于其他工业国家的价格得到满足。但问题是这种高水平土地生产力是否能够在将来得到持续发展。美国有 10.8 亿英亩农地的年均土壤侵蚀速率超过了土壤容许流失率 (美国农业部自然资源保护局, 1997b)。图 1.3 显示了美国农地土壤侵蚀的空间变化。

然而, 世界上其他部分地区的情况是非常不同的。调查证明, 由于严重的土壤侵蚀以及人口增长造成的土地生产力下降, 已经导致了在过去 10 年中世界人均食物供给下滑, 并且还会继续下滑 (Pimental et al., 1995)。在土地归属权没有立法规定的地区, 总可以得到其他土地 (尽管有时只是作为家庭生存的物质保障), 一旦从新土地上得到的预期回报能够超过已有的被耕作的土地, 农民便会转移到新的土地上 (Barbier and Bishop, 1995)。土地轮垦本身并没有问题, 实际上, 它在某种程度上与作物的轮作制度是一致的, 但在让土地休养之前的高强度耕作 (包括延长高强度全耕的作物生产), 以及在土地未利用时没有进行植被覆盖等, 都会导致严重的土地退化, 而这种退化需要很长时间才能恢复。

在一些国家, 政府为农民提供肥料、杀虫剂和灌溉设施的补助, 以保证实现生产目标 (至少在短期内)。这类项目主要支持土壤侵蚀过程、评估、测定及控制, 而不是分析全世界土壤侵蚀问题。其他国家的土壤侵蚀相关信息可以在 Morgan (1986)、Troeh 等 (1991) 的文章中得到, 也可以在 *Journal of Soil and Water Conservation* 或者其他期刊资源中获得。

由于采矿、居民建筑、商业开发以及高速公路建设等造成的土地干扰, 可以使土壤侵蚀速率以 2 倍或更多几何级的倍数增加, 当然这还要取决于土地被干扰前的利用状况 (Toy and Hadley, 1987)。在 5 个月期间, 3 个有开矿建设的流域分别有 0.3 吨/英亩、2.0 吨/英亩和 0.4 吨/英亩 (0.6、2.4 和 1.0 公吨/公顷) 的泥沙产生, 而在同时期内, 附近没有开矿建设的流域则没有泥沙产生 (Curtis, 1971)。即便在土地休养时, 对地面植被和底层土壤的干扰, 包括车辆碾压、骑马践踏以及行人践踏等, 都会导致细沟侵蚀和沟蚀的发生。这些干扰会降低土地的美学价值, 增加管理维护费用, 并增加流入附近沟道的泥沙量。

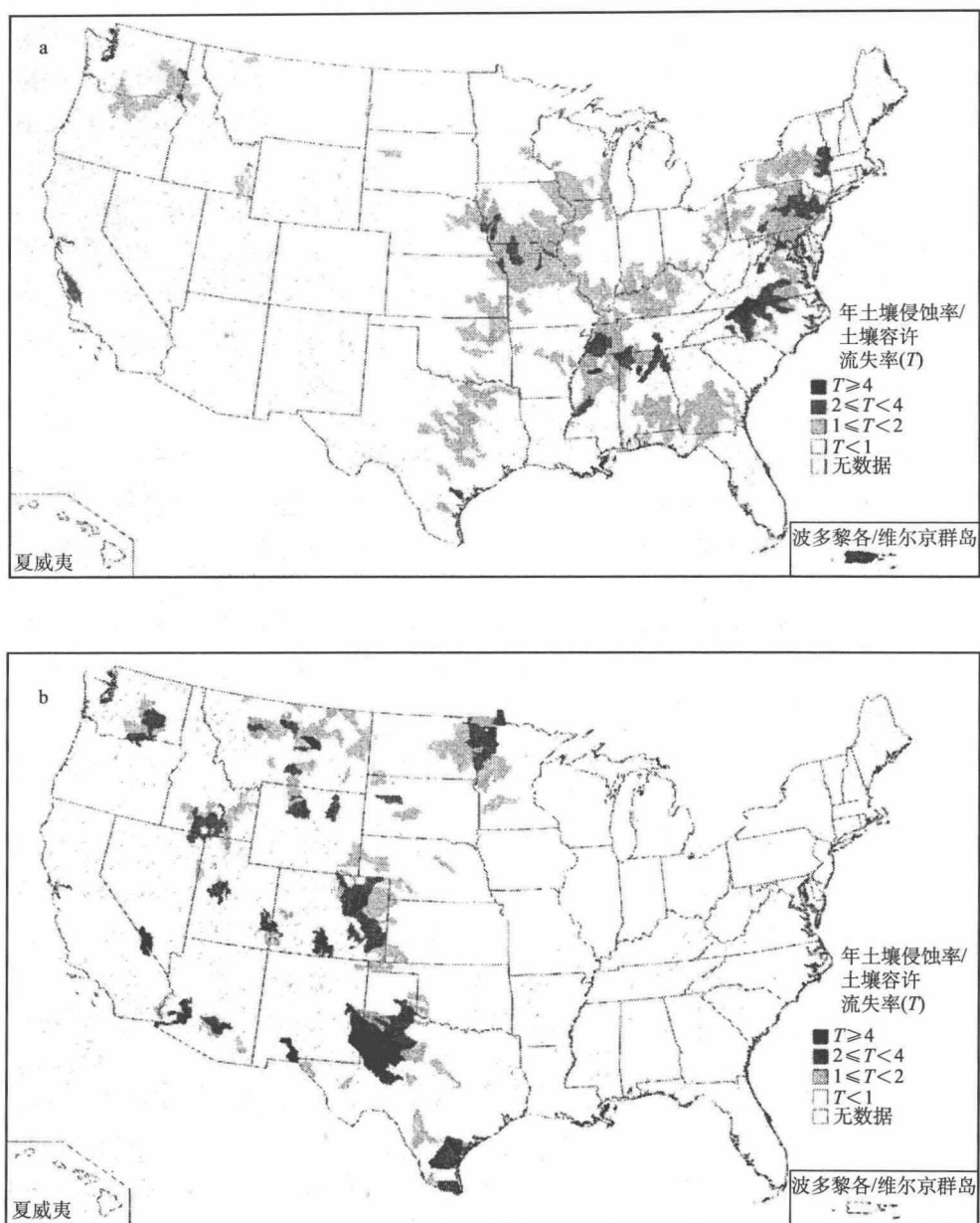


图 1.3 1997 年农耕地上年均水力侵蚀量 (a) 及年均风力侵蚀量 (b) 与土壤容许流失量的比率 (T)

土壤侵蚀控制技术给人的主要标志性印象通常是增加农地的维护费用, 增加矿场的土地复垦费用, 增加建筑用地表水和泥沙的管理费用, 这些都会降低土地的盈利性。历史上, 许多农民不愿意仅仅因为控制土壤侵蚀而改变低风险的传统农业管理措施, 除非他们做这些能获得更好的经济效益。土壤侵蚀控制措施的经济效益似乎是他们接受或不接受土壤侵蚀控制措施的主要原因 (Weesies et al., 1994)。当一个家庭面临温饱问题或银行贷款问题时, 长期的土壤侵蚀控制目标似乎与他们毫不相关。同样, 工矿开发者、建筑项目的管理者必须规划和控制项目的费用, 通常还有公司老板、监督者和投资者等都关注项目的盈利性。

在过去的 30 年中,新的经济因子已经纳入盈利计算公式中。有关环境方面的法律法规和规范已经使社会的注意力集中到土壤侵蚀和泥沙堆积的短期和长期影响。这些法律法规通过两种方式得以强化,一种是对导致土地质量和水质下降的活动进行经济惩罚,另一种是对以各种形式参与侵蚀和泥沙控制的行为采用政府补给或保险项目的形式给予经济激励。国际标准可能限制一些生产商进入国际市场,除非生产商已经建立和执行规定的环境标准(包括土壤侵蚀和泥沙堆积控制标准)。国际标准组织(ISO)是由来自 140 多个国家的国家标准组织组成的世界联盟(www.ISO.ch),它有 14000 条与环境管理有关的规范。在某些欧洲国家销售特定的产品时要求具备符合这些标准的证书。

尽管立法和规范不能提供彻底解决土地退化问题的措施,但它们能将经济发展和土壤侵蚀控制目标联系在一起,而且在许多情况下,侵蚀速率已经得到控制。有时,一些经济上的投机者因不愿意负担额外增加的环境保护费用而被拒绝参与工程项目。在地区、国家或全球尺度上,环境保护费用被认为是为了“更好的利益”而做出的可接受的牺牲。从个人和家庭角度来说,这似乎是为了在环境保护方面起到一点点作用而付出了较高的成本。

风力侵蚀

尽管人们经常讨论的是水力侵蚀过程,但风力侵蚀也需要特殊关注。风力侵蚀是不可忽视的,它是 20 世纪 30 年代美国黑风暴时期的主要问题(图 1.4)。风力侵蚀在世界上许多干旱和半干旱地区一直是个严重的问题,包括非洲北部及近东地区,亚洲东部、中部和南部,新比亚平原,澳大利亚,中国西北部,南美南部和北美洲的许多地区(风力侵蚀研究,2001)(www.weru.ksu.edu/nrca)。在美国,0.74 亿英亩土地上主要的土壤问题便是风力侵蚀。由于将细颗粒土壤吹走,风力侵蚀引起了土壤质地的变化。风力侵蚀减小了土壤厚度和肥力,降低了土地生产力,使植被、车辆和房屋被磨蚀。风力侵蚀还导致道路及其边沟内泥沙堆积,减小了道路的能见度,同时降低了水的质量。另外,研究表明,如果人暴露于高浓度的直径小于 $10\mu\text{m}$ (PM_{10}) 的悬浮颗粒中,人的呼吸系统会受到损害。基于 1985 年以来的数场测定,以及发生在农业用地上的几场明显的土壤侵蚀,1990 年美国制定了“净化



图 1.4 1930 年“黑风暴”时期,“黑风暴”携带从农地带来的土壤经过平原(美国农业部自然资源保护局)