

HUANPOGENGDIQINSHIHUANJINGJIDONGGLIJIZHIFENXI

缓坡耕地

侵蚀环境及动力机制分析

HUANPOGENGDI
QINSHIHUANJING
JIDONGGLIJIZHIFENXI



吴发启 赵晓光 刘秉正 著
陕西科学技术出版社

缓坡耕地侵蚀环境 及动力机制分析

● 吴发启 赵晓光 刘秉正 著

● 陕西科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

缓坡耕地侵蚀环境及动力机制分析/吴发启, 赵晓光,
刘秉正著. —西安: 陕西科学技术出版社, 2000. 11
ISBN 7-5369-3260-X

I. 缓… II. ①吴… ②赵… ③刘… III. ①山坡
地-土壤侵蚀-环境因素-研究 ②山坡地-土壤侵蚀-动力
学-研究 IV. S157.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 58010 号

陕西科学技术出版社出版发行

(西安北大街 131 号)

西北工业大学印刷厂印刷

787mm×1092mm 16 开本 16.75 印张 400 千字

2001 年 3 月第 1 版 2001 年 3 月第 1 次印刷

印数: 1—1000

定价: 35.00 元

本著作以黄土高原南部陇东、渭北地区的缓坡耕地(坡度 $3^{\circ}\sim 15^{\circ}$)为对象,采用野外调查、定位半定位动态监测、实验、室内分析及计算机模拟相结合的方法,在计算分析资料的基础上,从侵蚀环境学、侵蚀力学原理出发,揭示其土壤侵蚀及物质运移规律,寻求主要侵蚀因子指标及较为严密的数学表达式,并结合生产实际探讨宜采用的防治对策,试图直接服务于“山川秀美”环境工程建设。

自20世纪中叶以来,资源、环境、人口、粮食等问题一直是困扰世界各国发展的重大问题,而且严重地威胁着人类未来的生存和发展。水土流失是造成资源破坏、生态环境恶化、粮食减产的主要原因之一。因此,半个多世纪以来,几乎在世界范围内开展了土壤侵蚀成因、土壤侵蚀预测预报、土壤侵蚀负效应以及以土壤侵蚀规律为主要依据的水土保持的研究、调查、区划、规划设计和制图等工作。丰富了学科内容,指导了生产实践。

中国黄土高原位于大陆腹地,总土地面积 62.4万 km^2 ,约占全国总土地面积的7%,其中水土流失面积 43万 km^2 ,严重水土流失面积 38万 km^2 以上,年侵蚀模数大于 $5\,000\text{ t/km}^2$ 的水土流失最严重地区 15.6万 km^2 ,严重的水土流失制约了区域经济的发展。自20世纪50年代以来,国家针对该区域的水土流失开展了数次大规模的科学考察,特别是近30年来,众多的科学家与学者云集于水土流失严重的黄土丘陵沟壑区,进行土壤侵蚀规律与水土保持的研究,建立了各种单因子、多因子预测预报模型和水土保持开发治理模式。而黄土高原沟壑区,特别是难以引起人们注意的缓坡耕地的土壤侵蚀研究甚少,缺乏系统性,致使一些问题难以进行国际比较。为此,自“七五”(1986年)以来,结合国家区域治理项目任务,我们先后在黄土高原南部淳化县的泥河流域,建立了不同坡度、不同坡长和不同土地利用方式的径流小区12组,按水土保持技术规范要求进行试验和观测。为反映区域侵蚀特征,还收集了彬县、黄龙、永寿、耀县及西峰试验站的部分资料,时间序列从1958~1997年共40年,一并进行分析总结。为赶超国际科学前缘,我们还开展了大、中、小型各种室内、室外实验,以探求土壤侵蚀的动力机制。

前

言

在世纪相交之际，党中央奏响了“西部大开发”的号角。西部大开发是在生态环境大整治的基础上进行的，而生态环境的大整治又是以植被恢复与重建为核心。无疑，缓坡耕地水土流失的综合治理将有助于“退耕还林（草）”措施的实施。

本著作是在吴发启教授、赵晓光副教授和刘秉正教授三人的共同策划下完成的，只是在撰写时分工不同。第1章：吴发启；第2章：吴发启；第3章：吴发启、刘秉正；第4章：吴发启、赵晓光；第5章：吴发启、刘秉正；第6章：赵晓光、吴发启；第7章：赵晓光、吴发启；第8章：赵晓光；第9章：刘秉正、赵晓光；第10章：吴发启、刘秉正、赵晓光。最后由吴发启汇总定稿。

先后参与本项研究工作的同志有：陈继明、翟明柱、李光录、吕悦来、朱首军、朱德兰、王健、姚军、刘世海和吕俊杰等，以及1987～1999年历届毕业生50余人；在书的撰写过程中还得到了唐克丽研究员、周佩华研究员、江忠善研究员、蒋定生研究员、姜永清研究员、王佑民教授、沙际德教授、包忠漠教授、崔云鹏教授、李靖教授和李凯荣副教授等的指导与帮助；第10章的撰写中还借用了西峰水保站和淳化“八五”课题中农业、工程以及混农林研究组的部分成果。在此，特向他们表示衷心的感谢。

缓坡耕地土壤侵蚀成因的研究是一项很复杂的工作，特别是动力机制的研究尚属起步，再加上作者的知识与水平的限制，难免在叙述中会有不妥之处，敬请读者斧正。

著者

2000年10月于

西北农林科技大学

第 1 章 绪论

1.1 缓坡耕地的概念 (1)

1.2 研究目的与意义 (3)

1.3 侵蚀与管理研究 (4)

1.4 研究内容及方法 (9)

第 2 章 降雨、径流与侵蚀

2.1 降水的一般特征 (12)

2.2 侵蚀性降雨与产流 (14)

2.3 侵蚀性降雨与产沙 (24)

2.4 径流与侵蚀产沙 (30)

第 3 章 地形、作物植被与侵蚀

3.1 黄土高原沟壑区的地形与植被 (34)

3.2 地形与侵蚀 (35)

3.3 作物植被与侵蚀 (45)

第 4 章 耕作管理与侵蚀

4.1 耕作管理概述 (52)

4.2 耕作管理与侵蚀 (57)

4.3 侵蚀强度分级 (64)

第 5 章 土壤侵蚀能量特征研究

5.1 侵蚀性降雨的能量特征 (72)

5.2	径流能量特征	(76)
5.3	风对降雨能量的影响	(82)
5.4	降雨侵蚀力 (R) 的估算与分布	(86)

第6章 土壤侵蚀机理研究

6.1	土壤侵蚀过程概述	(95)
6.2	雨滴击溅的土粒分散起动	(99)
6.3	径流冲刷的土粒分散起动	(110)
6.4	细沟冲刷起动	(123)
6.5	土壤抗蚀力	(126)

第7章 侵蚀与泥沙输移

7.1	缓坡耕地水蚀方式概述	(132)
7.2	雨滴击溅与泥沙输移	(137)
7.3	坡面径流与泥沙输移	(143)
7.4	细沟输移	(149)
7.5	缓坡耕地侵蚀泥沙输移	(150)

第8章 土壤侵蚀数学模型

8.1	数学模型研究概述	(157)
8.2	侵蚀物理过程模型	(163)

第9章 侵蚀对坡耕地生产力的影响

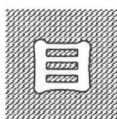
9.1	侵蚀对生产力的影响概述	(177)
9.2	水力侵蚀下土壤养分流失	(181)

目 录

9.3 水力侵蚀下土壤酶流失	(191)
9.4 水力侵蚀下土壤物理性质变化	(194)
9.5 土壤侵蚀—生产力反应及评价	(198)

第 10 章 缓坡耕地水土资源管理

10.1 工程措施管理	(206)
10.2 耕作措施管理	(218)
10.3 生物措施管理—农林复合	(230)



Chapter 1 Introduction

- 1.1 Concept of farmland on the gentle slope land (1)
- 1.2 Objective and meaning of study (2)
- 1.3 Study on erosion and management (4)
- 1.4 Contents and methods of study (9)

Chapter 2 Rainfall, runoff and erosion

- 2.1 General property of rainfall (12)
- 2.2 Rainfall to produce erosion and runoff (14)
- 2.3 Rainfall to produce erosion and sediment (24)
- 2.4 Runoff and erosive sediment (30)

Chapter 3 Landform, crop vegetation and erosion

- 3.1 Landform and vegetation in gully area of loess plateau
..... (34)
- 3.2 Landform and erosion (35)
- 3.3 Crop vegetation and erosion (45)

Chapter 4 Tillage management and erosion

- 4.1 Introduction to tillage management (52)
- 4.2 Tillage management and erosion (57)
- 4.3 Classification of erosion intensity (64)

目 录

Chapter 5 Study on characteristic of soil erosion energy

- 5.1 Characteristics of erosive rainfall energy (72)
- 5.2 Characteristics of runoff energy (76)
- 5.3 Effect of wind on rainfall energy (82)
- 5.4 Estimate and distribution of the erosive force of rainfall (86)

Chapter 6 Study on soil erosion mechanism

- 6.1 Introduction of soil erosion process (95)
- 6.2 Soil dispersion from rain-drop splash (99)
- 6.3 Soil dispersion from runoff scouring (110)
- 6.4 Rill scouring (123)
- 6.5 Erosion durability of soil (126)

Chapter 7 Erosion and sediment transportation

- 7.1 Introduction to hydraulic erosion on slope land (132)
- 7.2 Raindrop splash and sediment delivery (137)
- 7.3 Runoff on slopes and sediment delivery (143)
- 7.4 Sediment delivery from rills (149)
- 7.5 Sediment delivery on slope land (150)

Chapter 8 Mathematic model of soil erosion

- 8.1 Introduction to study of mathematic model (157)
- 8.2 Model of erosive physical process (163)

Chapter 9 Effect of erosion on productivity in slope land

- 9.1 Introduction to effect of erosion on productivity (177)
- 9.2 Soil nutrition loss from hydraulic erosion (181)
- 9.3 Soil enzyme loss from hydraulic erosion (191)
- 9.4 Change of soil physical property by hydraulic erosion
..... (194)
- 9.5 Soil erosion productivity and valuation (198)

Chapter 10 Soil and water resources management in the gently slope land

- 10.1 Project measure management (206)
- 10.2 Tillage measure management (218)
- 10.3 Biological measure management—agroforestry (230)

第 1 章

绪 论

1.1 缓坡耕地的概念

缓坡耕地是我国劳动人民对坡度不太大农用土地的通称，属于坡面的一部分。

地球表面是人类居住和从事各种社会经济活动的基本场所，地球表面又是由高低起伏、规模大小不等的各种形态所组成，对于这种特征，地貌学家常用“形态成因”的原则加以分析研究。成因是指地球的内营力，即地壳运动、岩浆活动、变质作用、地震等和外营力，如风化作用、剥蚀作用、搬运作用、沉积作用、成岩作用等长期的相互作用。形态则是地貌形成、发展、演化过程中某一阶段外型的具体表现，常用形态计量的指标加以描述，如坡度、地势起伏度、沟谷密度、沟谷深度等。这些指标中坡度最为重要，因为它不仅反映现代地貌过程，而且在一定程度上制约着人类改造自然和利用自然的方式，故对一完整坡面的划分往往是以坡度的大小为依据的。

1.1.1 国内外坡度分级概况

联合国粮农组织 (FAO)，1985 年用两种粗细不等的方案进行坡度分级^[1]。一种为五级坡度制，即：

平的到接近平的 (flat to almost flat)	0%~2%
平缓起伏 (undulating)	2%~6%
平缓起伏到起伏 (undulating to rolling)	6%~25%
陡 (steep)	25%~55%
非常陡 (very steep)	>55%

另一种是将坡度分为三大组，即 0%~2%、2%~25% 和 >25%。第一组和第二组又进一步划分为 5 级，第三组划分为 2 级，共计 12 级。

澳大利亚学者 J. G. Speight，1981 年进行土地和土壤调查时将坡度划分为 7 级，见表 1-1。

国际地理学会地貌调查与制图委员会建议使用 7 级坡度分级方案，见表 1-2。

日本从土地利用出发，并考虑到耕地、草地、林地各种土地的分级问题，将坡度分

为 9 级, 见表 1—3。

表 1—1

J. G. Speight 坡度分级表

Tab. 1—1

Classification groups of gradient from J. G. Speight

分级	符号	坡度	
		%	度
水平的 (level)	LE	0~1	0°~0°35'
非常平缓 (very gently inclined)	VG	1~3	0°35'~1°45'
平缓坡 (gently inclined)	GE	3~10	1°45'~5°45'
中等坡 (moderately inclined)	MO	10~32	5°45'~18°
陡坡 (steep)	ST	32~56	18°~30°
非常陡 (very steep)	VS	56~100	30°~45°
悬崖 (precipitous)	PR	>100	>45°

表 1—2

国际地理学会地貌调查与制图委员会坡度分级表

Tab. 1—2 Classification groups of gradient from international geography committee

命 名	分 级	命 名	分 级
平原至微倾斜平原	0°~2°	急 坡	25°~35°
缓斜坡	2°~5°	急陡坡	35°~55°
斜 坡	5°~15°	垂直坡	>55°
陡 坡	15°~25°		

表 1—3

日本坡度分级表

Tab. 1—3

Classification groups of gradient of Japan

等 级	坡 度	不同土地利用类型坡度		
		耕 地	草 地	林 地
I	<5°	<5°		
II	5°~8°	5°~8°	<8°	<8°
III	8°~13°	8°~13°	8°~13°	
IV	13°~18°	13°~18°	13°~18°	
V	18°~23°	18°~23°	18°~23°	
VI	23°~30°	>23°	23°~30°	18°~30°
VII	30°~40°		30°~40°	30°~40°
VIII	40°~50°		>40°	40°~45°
IX	>50°			>45°

我国学者朱显谟, 1956 年在研究土壤侵蚀强度分级时, 将坡度指标定为<5°、5°~

12°、12°~20°、20°~35°和>35°五级^[2]。朱震达(1958)在研究黄土丘陵沟壑区的侵蚀地貌时,认为坡度以<5°、5°~15°、15°~25°、25°~35°、35°~45°、45°~60°和>60°七级为宜^[3]。唐克丽(1983)根据沟、面蚀形成的地貌特征,将坡度划分为0°~5°、5°~12°、12°~25°和25°~35°五级^[4]。王礼先(1985)在山西进行小流域规划时,采用<3°、3°~7°、7°~15°、15°~20°、20°~25°、25°~35°、35°~45°和>45°八级坡度制^[5]。

全国农业区划委员会,1984年颁布的《土地利用现状调查技术规程》中,将耕地坡度按<2°、2°~6°、6°~15°、15°~25°、>25°进行划分^[6]。

由此可见,目前国内外对地表坡度的划分尚无统一方案可循,而且对某一段坡面的命名也各持己见。其原因有二:①地球表面地貌的多样性和复杂性需要人们从不同的角度出发,去深入研究和理解;②人们对地表特征认识的局限性,造成了“百花齐放”的结果。因此,对“缓坡耕地”的界限还需要作进一步的划分。

1.1.2 缓坡耕地的范围界限

缓坡耕地是坡面(山坡)的组成部分。那么什么是坡面(山坡)呢? Brian Finlayson 和 Ian Statham 在“Hillslope Analysis”一书中认为“山坡地是大地景观的基本单位,对任何大地景观发展说明的基本”^[7]。C. C. 沃斯克列先斯基认为“坡应当是这样的地面,在这种地面上对物质运移起决定作用的是顺坡向下作用的重力分力,当倾角为1°~2°时,使质点沿坡向下移动的重力加速度的分量还很少,因此,这样的地面不属于坡”^[8]。可见,缓坡耕地的上限应是坡的上限。

由前述坡度分级方案可以看出,2°、5°、8°、15°、25°、35°等点是坡度分级中具有代表性的分级点,而且随坡度值增加,坡面从水平变到缓、陡、直立。故我们认为将坡度3°~15°的坡面定为缓坡耕地较为合理,这一区间基本上相当于表1-2中的缓斜坡+斜坡,以及我国农业区划委员会方案中的“2°~6°”+“6°~15°”的分级区间。这样的划分同时也符合水力侵蚀类型强度分级标准^[9]。

1.2 研究目的与意义

众所周知,自20世纪中叶以来,资源、环境、人口、粮食等问题是困扰世界各国发展的重大问题,而且严重地威胁着人类未来的生存和发展。水土流失是造成资源破坏(主要指土地资源、水资源)、生态环境恶化、粮食减产的主要原因之一。

中国黄土高原位于大陆腹地,总土地面积62.4万km²,约占全国总土地面积的7%,其中水土流失面积43万km²,严重水土流失面积38万km²以上,年侵蚀模数大于5000t/km²的水土流失最严重地区15.6万km²^[10]。这里曾是林草茂密,良田成顷的广袤富地,只是由于历史时期人为活动造成的加速侵蚀才使其成为千疮百孔,生产力水平低下,人民生活贫困的地区^[11]。黄土高原有耕地1.57×10⁷hm²,其中大于3°的坡耕地占总耕地面积的43%,坡耕地的土壤侵蚀量占流域总侵蚀量的50%~60%^[12,13]。因此,坡耕地水土流失研究历来为人们所重视。

黄土高原的村落、经济林、经济作物和质量较高的农地主要分布在 15° 以下的坡面上,而这部分土地在黄土高原约有 $3.81 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占总土地面积的 61%。因此,研究缓坡耕地土壤侵蚀既具有生产现实意义,也可与世界土壤侵蚀对比。

据高原南部 28 个县市统计,总耕地面积 $14.53 \times 10^3 \text{ km}^2$, 其中缓坡耕地 $2.78 \times 10^3 \text{ km}^2$, 约占总耕地面积 20% 左右。耕地种植以夏粮为主,秋作物及复种面积不大。如渭北地区,小麦、油菜夏田面积占总播种面积的 67%,秋作物复种面积为 45%。因此,暴雨季节,多数田块表面裸露,有利于溅蚀、面蚀、细沟侵蚀的发生。一般情况下,缓坡耕地的侵蚀模数在 $1\,000 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a} \sim 4\,000 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$, 局部可达 $5\,000 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$ 以上。产流模数在 $1\,248.6 \text{ m}^3/\text{km}^3 \cdot \text{a} \sim 29\,843.5 \text{ m}^3/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 之间。其结果使耕层土壤不断粗化、钙化和贫瘠化,严重地影响了粮食生产。因此,本研究可为缓坡耕地水土保持措施配置及恢复土地生产力,提高土地产出等提供科学依据和指导。

1.3 侵蚀与管理研究

缓坡耕地是坡耕地的组成部分,其土壤侵蚀机理及物质运移特征既有联系,又有区别,鉴于以往的研究现状,这里把它们作为一个整体来叙述。

1751 年,前苏联科学家罗蒙诺索夫首次在他的论文中谈到暴雨对土壤的溅蚀作用,并在 1753 年又详细论述了土壤侵蚀对农业生产的影响。1856 年,格罗西尔—托尔斯多在土壤图上首次注明了遭受面蚀的、肥力低的土壤,定量地说明了受面蚀土壤其肥力降低的指标,以及土壤侵蚀对农业生产的影响。19 世纪中叶,俄国不仅有水土流失对农作物产量影响的调查资料,而且有对农作物质量影响的研究成果^[14]。

在俄国人致力于土壤侵蚀与土地生产力研究的同时,德国科学家 Wollny, E. 于 19 世纪后半叶 (1877~1895) 也开始了覆盖、土壤类型、土壤物理性质和坡度对径流和侵蚀影响等的调查研究^[15]。1917 年美国科学家 Miller, M. F. 开始就农作物及轮作对侵蚀和径流的影响作了小区试验研究^[16]。20 世纪 30 年代起逐渐进入到坡耕地土壤侵蚀的基础理论研究阶段。

1.3.1 降雨、径流与侵蚀

现代土壤侵蚀是气候、地质地貌、土壤、植被和人类活动等因素相互作用的结果。对水力侵蚀而言,降雨径流可认为是形成侵蚀的动力条件。因为,雨滴使土粒溅离,而径流则搬运与母体分离的泥沙并冲刷土体。

降雨侵蚀作用的大小与降雨量、降雨历时、降雨强度以及降雨自身的物理特征参数等有关。1940 年, Laws, J. O. 对自然降雨的特征进行了研究^[17], 1947 年, Ellison, W. D. 对降雨的侵蚀机制作了分析^[18], 从而改变了人们对土壤侵蚀的认识,并促进了许多学者对雨滴直径、雨滴分布、雨滴下落的终点速度以及降雨能量的研究。Wischmeier, W. H. 和 Smith, D. D. (1959) 发现,在所研究的降雨因子中,降雨动能和 30 分钟最大降雨强度的乘积 (EI_{30}) 与野外小区上测量到的土壤流失量关系密切^[19,20], 并得到了 $E = 210.2$

+89lg I 的降雨能量计算公式(式中 E 为降雨动能, $\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{cm}$; I 为雨强, cm/h)。对于 I_{30} 的认识许多学者也提出了不同的看法, 如Hudson, N. W., Elwell, H. A. 和Stoking, M. A., 以及Morgan, R. P. C. 等^[16]。

当雨滴打击土壤时, 土壤颗粒被溅起^[17], 溅蚀量的大小与降雨的物理参数、土壤可蚀性、覆盖和地面坡度等因素有关。雨滴撞击土壤的速度越高, 土壤被溅起的越多^[21]; 雨滴直径越大, 摩擦阻力的影响也越大, 而雨滴的打击面积也将增大^[22]; 降雨强度愈大, 溅蚀量也愈大^[22, 23, 24]。降雨各物理参数与击溅的关系也可用降雨动能或动量来描述^[25, 26, 27, 28]。1982年, Al-Drrah, M. M. 和Bradford, J. M. 把雨滴的动能和动量作为一个参数来研究它与溅蚀的关系^[29], 后来, Gilley, J. E. 和Finker, S. E. 提出的雨滴动能乘以雨滴周长是研究降雨与击溅关系的最好统计量^[30]。

进入20世纪80年代, 我国在此方面的研究有了长足发展。1982年, 窦保障等提出雨滴的观测方法, 为降雨特征的实验研究打下了基础^[31]。周佩华等(1981)对天然降雨能量进行了研究, 得出了雨滴动能与降雨强度之间的关系, 并进一步探讨了雨滴动能对侵蚀量的影响^[32]。王万忠等(1983)通过对黄土地区降雨特征与水土流失的关系分析得出, 黄土地区每年引起土壤流失的降雨次数平均为6次, 占年降雨次数的7%, 占汛期降雨次数的14%, 每年引起土壤流失的降雨量平均为140 mm, 占年降雨量的26.4%, 占汛期降雨量的38.6%; 造成黄土地区土壤流失的主要原因是短历时、中雨量、高强度的暴雨^[33]。江忠善(1983)研究了黄土地区天然降雨的雨滴特征, 对雨滴的降落速度提出了相应的计算方法^[34]。王万忠、刘秉正、江忠善等研究了区域降雨潜在侵蚀力 R 的特征与计算方法, 并得出黄土地区 I_{30} 与土壤侵蚀关系密切的结论^[35, 36, 37]。

在天然降雨中, 尤其降暴雨时, 常常伴有大风, 这时风对雨滴的大小和速度都会产生显著影响。Blanchard, D. C. (1950)发现, 直径小于4.6 mm的雨滴在有风的情况下十分稳定^[38]。Disrud, L. A. 证明, 直径4.3 mm的雨滴在风速小于20哩/h^①时是稳定的, 但当风速达到25哩/h时, 雨滴的破碎增加40%左右^[39]。Umbach, C. R. 等(1966)根据风洞试验得出, 直径为5.5 mm的水滴在13.6哩/h的风中, 降落4 m后未发现破碎^[40]。

Laws, J. O. 在野外测量了雨滴的终点速度。他发现, 当湍流和风产生影响时, 大部分雨滴在到达地面时, 仍可达到它们在“静态空气”中终点速度的95%。在热带降雨中, 雨滴最高速度不是出现在有风的降雨情况下^[41]。

理论上, 降雨时若有风出现, 就会产生一个侧向分速度, 其合成矢量较静态空气中的速度为大。水平风按降雨与垂直方向倾角的余弦的倒数而增大雨滴的终点速度。Lyles, L. 等(1977)提出了计算降落雨滴的倾角公式: $\theta = \text{tg}^{-1}U/V_t$ (式中 U 是一定参照高度的水平平均风速, V_t 是雨滴终点速度)^[42]。由于雨滴的能量与雨滴的垂直速度和水平速度产生的向量速度有关, 因此, 风使雨滴的动能增加。直径为2 mm的雨滴在20哩/h的风中所具有的能量, 比它在静止空气中具有的动能约大2.75倍, 在一场 D_{50} 为3.0 mm的降雨中, 若雨滴降落倾角为30°, 雨滴的终点速度会增大17%, 动能增加36%。Hans Humi

① 1哩=1.6093 km

(1991) 在埃塞俄比亚北部地区, 研究了降雨方向与侵蚀、土壤流失及径流之间的关系, 并揭示了该区不同坡向上侵蚀强弱差异^[43]。Pedersen, H. S. 和 Hasholt, B. (1995) 在野外径流小区上研究了风对天然降雨的作用, 并计算了降雨能量^[44]。

当降雨强度大于土壤的入渗能力时, 多余的降雨就会转变成地表径流。斜坡上流动的水, 在向小洼地或细沟集中的过程中, 水流发生着连续转变, 从厚度均匀的水流, 变为大部分水在不连续的洼地中移动的水流, 再转为在界限明显但仍然在一定位置上变动的水道中的水流, 直到变成在固定水道中的水流^[45]。Horton, R. E. (1943、1945) 最早从水文学角度对坡面流的特性进行了系统的定量研究^[46、47]; Emmett, W. W. (1990) 则从实验角度对坡面流的水力学特性进行了分析^[48]; Yoon, N. Y. (1971) 和 Shen, H. W. (1973) 也根据实验资料, 分析过坡面流的阻力规律^[49、50]; Rose, C. W 等 (1983) 建立了地表水流分析模型, 认为单位面积的径流, 除与降雨强度、地面入渗率有关外, 还取决于地块的长度、坡度和粗糙度以及水流本身的流态^[51、52]。Lal, R. (1991) 则通过模型简化, 给出水流能量的计算公式^[53]。周佩华等 (1981) 认为径流能量就是径流的位能, 其作用随坡度的增加而逐渐增加, 在黄土区当地面坡度比较大时, 径流位能对侵蚀量有更大的影响^[32]。赵鸿雁等 (1993) 在理论分析的基础上提出了径流势能的计算公式^[54]。

雨滴除引起土粒溅离外, 在径流产生后, 还因击溅作用扰动水流引起径流性质的变化, 同时径流对雨滴击溅力也产生影响, 从而引起侵蚀输移的变化。当地表被一薄层水膜覆盖时, 雨滴打击作用更加显著, 当地表水深大约和雨滴直径相等时, 土粒分散量最大, 水深大约超过三个雨滴直径时, 水流基本上就能防止雨滴打击土壤的作用^[16]。江忠善, 吴普特, 沙际德等对坡面薄层水流的性质进行了研究^[55、56、57、58、59、60、61、62、63、64]。

综上所述, 降雨、径流特征参数, 以及它们与土壤侵蚀关系的研究已取得了重大进展, 但以缓坡耕地为单元的系统研究有待深入, 特别是风力对降雨侵蚀影响的研究急需填补我国的空白, 并理清其相悖观点。

1.3.2 地形、土壤、作物管理与侵蚀

坡度和坡长是影响土壤侵蚀的最主要地形因子。Zingg, A. W. (1940) 应用小区的模拟降雨和野外条件证明坡度增加一倍, 土壤流失量增加 2.61~2.80 倍^[65]。刘善建 (1953) 分析了天水水保站径流小区测验资料后认为, 坡度与冲刷呈指数相关, 尤其当坡度增加到 15% 以上时, 冲刷量的增加更为剧烈, 并以农耕地上冲刷量的增加为最。同时提出农地上冲刷深度 d (mm) 与坡度 s (%) 的关系为: $d = 0.012 s^{1.4} + 0.56$ ^[66]。嗣后, 中国科学院黄河中游水土保持考察队、承继成、陈永宗、江忠善、华绍祖等分别提出不同的经验公式, 其坡度指数多在 1.022~2.000 之间^[67、68、69、70、71、72、73、74、75、76、77、78]。曹洪文等对土壤侵蚀的临界坡度也进行了讨论^[79、80、81]。坡长与土壤侵蚀的关系极为复杂, 从目前研究现状看, 大致有侵蚀量随坡长加长而增加、减少和有增有减三种观点^[82]。

土壤是雨滴打击、径流冲刷的对象, 其物理和化学特性的有机组合对侵蚀产生影响, 通常人们使用“土壤可蚀性”这一术语描述土壤对侵蚀的作用。所谓可蚀性指的是“土壤对侵蚀的易损性或敏感性, 即土壤对侵蚀的抵抗力的倒数”^[41]。对于土壤可蚀性的问题曾有许多学者作了研究, 最有代表性的是 Wischmeier, W. H. 和 Mannering, J. V.