

国外土壤风蚀预报的研究历史与动向

廖超英<sup>1,2</sup>, 李靖<sup>1</sup>, 郑粉莉<sup>2</sup>, 刘国彬<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学, 陕西 杨陵 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘 要: 根据国外土壤风蚀研究成果, 将土壤风蚀预报研究历史分为 4 个阶段: 即定性描述阶段、定量研究阶段、风蚀方程的建立与完善阶段及风蚀预报系统的建立与完善阶段。简要介绍了风蚀方程、帕萨克模型、波查罗夫模型、德克萨斯侵蚀分析模型、风蚀评价模型、修正风蚀方程和风蚀预报系统等代表性的风蚀预报模型。

关键词: 土壤风蚀; 风蚀预报; 研究历史

中图分类号: S 157 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409( 2004) 04-0050-04

Research History and Trend of Wind Erosion Prediction Abroad

LIAO Chao-ying<sup>1,2</sup>, LI Jing<sup>1</sup>, ZHENG Fen-li<sup>2</sup>, LIU Guo-bin<sup>2</sup>

(1. Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** According to achievements of soil wind erosion research abroad, the research of wind erosion prediction was divided into four stages: the first was qualitative description stage characterized by wind erosion phenomenon description; the second was quantitative research stage; the third stage was the establishment and improvement of WEQ and the fourth was the establishment and perfection of WEPS. Typical wind erosion prediction models were introduced.

**Key words:** wind erosion; wind erosion prediction; research history

土壤风蚀是干旱、半干旱以及部分半湿润地区土地沙漠化与沙尘暴灾害的首要环节, 也是世界上许多国家和地区的主要环境问题之一。目前, 全球有 9 亿多人口、100 多个国家和地区受其危害; 受风蚀沙化威胁的土地面积占全球陆地面积的 1/4, 每年因风蚀沙漠化造成的经济损失达 400 多亿美元<sup>[1]</sup>。我国受土壤风蚀及土地沙漠化影响的面积占国土总面积的 1/2 以上<sup>[2]</sup>, 并且许多地区处于中度和强度风蚀的影响下。土壤风蚀严重影响了这些地区的资源开发和社会经济的持续发展, 土壤风蚀问题愈来愈受到国际社会的广泛关注。

土壤风蚀预报技术是为维护风蚀土地的可持续利用而发展起来的。它以风蚀动力过程及风蚀因子的影响作用研究为基础, 用定量模型来估算风蚀强度, 广泛应用于指导风蚀防治实践, 代表着土壤风蚀科学的研究水平, 是土壤风蚀研究的核心<sup>[3]</sup>。

1 风蚀预报研究历史与动向

国外土壤风蚀研究已有百余年历史, 而土壤风蚀预报研究则相对较晚。风蚀预报研究大体上可分为四个阶段, 即定性描述阶段、定量研究阶段、风蚀方程的建立与完善阶段、风蚀预报系统的建立与完善阶段。

1.1 定性描述阶段

20 世纪 30 年代以前, 对于土壤风蚀的研究处于定性描述阶段。定量研究上的困难使土壤风蚀预报在当时基本上不可能实现。但作为科学积累, 土壤风蚀的科学研究可追溯到 19 世纪或更早。当时, 地质学家们主要是从地质学的角度来认识风蚀<sup>[3]</sup>。20 世纪初期, 美国西部的风蚀问题引起了人们的关注, 科学界对风蚀的兴趣开始增强。以 Free 为代表的科学家主要研究了风与土壤的相互作用、风蚀物质的损失与搬运等, 并且通过增加土壤湿度、有机质含量、改良土壤结构及保护地表等途径减轻土壤风蚀<sup>[4]</sup>。

1.2 定量研究阶段

直到上个世纪 30 年代, 风蚀研究有了较大进展, 实现了定性描述到定量研究的飞跃<sup>[5]</sup>。土壤风蚀预报必须以风蚀机制的定量化研究为基础, 上个世纪 30 年代流体力学的创立使风蚀的定量化研究成为可能。Bagnold 开辟了风沙研究的新纪元, 以丰富的野外观测和风洞模拟实验资料创立了风沙物理学, 从而使风蚀的研究进入动力学研究阶段。其代表作《风沙和荒漠沙丘物理学》标志着土壤风蚀定量研究的开始<sup>[6]</sup>。

20 世纪 30 年代至 40 年代, 美国中西部地区严重的土壤风蚀和沙尘暴吸引了众多科学家的注意力。自上个世纪

① 收稿日期: 2004-07-10  
基金项目: 农业部 948 项目( 2003- Z57)  
作者简介: 廖超英( 1959- ), 男, 安徽宿州人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事生态环境、水土保持与荒漠化防治的教学与科研。

40 年代初开始, 以 Chepik Milne 为代表的美国农业部科学家们开始系统地研究土壤风蚀。Chepil 等的研究工作包括风蚀物理机制, 如土壤颗粒在风力作用下的运动性质、颗粒起动、气流输沙能力、风沙流的磨蚀作用, 经过某一地块时风沙流的累积强度和风力作用下土壤物质的分选等。Chepil 等在土壤风蚀因子的研究方面做了大量的工作, 1941 年研究了土粒水稳性、干土块结构与风蚀的关系<sup>[7]</sup>; 50 年代做了一系列实验, 研究影响风蚀的土壤特性, 如地表粗糙度、表面结构稳定性、土壤水分、土壤机械组成、土壤结构、容重、碳酸钙、有机质和表土密度等因子对风蚀强度的影响。Hagen 研究了作物残茬对风蚀的影响。与此同时, 较全面地研究了土壤风蚀防止问题, 在实验室和野外对一系列防风蚀措施进行了试验<sup>[5, 8]</sup>。

前苏联雅库波夫等通过野外观测和风洞试验, 对土壤风蚀与微地形、土壤、植被等环境条件的关系, 以及防止土壤风蚀的综合农业措施作了系统研究<sup>[9]</sup>。

此外, 加拿大、澳大利亚等遭受严重风蚀的国家针对其具体的风蚀问题与特点, 相继开展了土壤风蚀研究。上个世纪 30 年代至 60 年代是土壤风蚀研究的大发展阶段, 初步建立了风蚀研究的理论体系。

1.3 风蚀方程的建立与完善阶段

从上个世纪 60 年代中期开始, 在已有研究成果的基础上, 研究重点转向土壤风蚀防止实践。Chepil 和 Woodruff 总结了 20 多年在美国大平原地区的研究成果, 在此基础上 Woodruff 和 Siddoway 于 1965 年提出了第一个用于估算田间年风蚀量的模型——风蚀方程(WEQ)<sup>[10]</sup>。目的在于确定各种风蚀因子在土壤风蚀中的作用、进而提出风蚀防治措施。在风蚀预报系统(WEPS)问世前, WEQ 是使用最广的风蚀预报模型。成为美国官方用于预报土壤风蚀的正规模式, 被编入《农业手册》和《中西部地区水蚀和风蚀量的计算(蓝皮书)》<sup>[11]</sup>。

WEQ 是建立在大量野外观测基础上的风蚀预报模型, 首次引入了综合性思想来预报风蚀, 为后来的风蚀预报提供了思路。在 WEQ 之后, 相继出现了一些风蚀预报模型, 但其影响远不如 WEQ。WEQ 在使用过程中被不断地修正与完善。如: Skidmore 认为, WEQ 中的气候因子不能应用于高降雨量和低降雨量地区, 所以提出了新的气候因子; Skidmore 等于 1970 年提出了用计算机求解 WEQ, 不仅可以预测年平均风蚀量, 而且可以计算出将潜在风蚀量控制于可容忍程度之下所必须的条件与防治措施组合; WEQ 预报的时间尺度为 1 年, 不能用于更短的时段, 所以 Woodruff 和 Armburst 于 1968 年对 WEQ 中的气候因子进行修正, 试图使其可用于更短的时间尺度, 但问题并未得到满意地解决<sup>[3]</sup>。

从上个世纪 60 年代后期开始, 围绕风蚀方程的应用, 数理分析方法、计算机技术等被引入土壤风蚀研究。其它学科, 如数学、物理学、系统科学等的深入渗透使土壤风蚀研究在纯理论领域有了长足的发展。

1.4 风蚀预报系统的建立与完善阶段

上个世纪 60 年代开发 WEQ 时, 由于当时可用计算工

具的限制, 将 WEQ 设计成简单的数学表达式是必要的。从 WEQ 问世以来, 虽然做了大量的工作来完善 WEQ, 努力提高其预测精度、降低其使用难度、扩大其使用范围, 但是, WEQ 的结构使它无法适应许多问题。随着资料的积累和新技术的引入, WEQ 的局限性也愈来愈多。于是, 从 20 世纪 80 年代开始, 美国农业部组织多学科科学家综合风蚀科学、数据库及计算机技术等来推进土壤风蚀预报, 经过修正风蚀方程(RWEQ)的过渡, 于 20 世纪 90 年代推出了风蚀预报系统(WEPS)<sup>[12]</sup>, 以取代曾广泛使用的 WEQ。

与以往的风蚀预报模型不同, WEPS 是一个连续的以过程为基础的模拟每日天气、田间条件及风蚀状况的计算机模拟系统。WEPS 具有模拟田间条件和土壤蚀时空变异的能力, 不仅能模拟复杂地块形状、复杂地形及地块内有障碍物的风蚀情况, 而且还可分别给出跃移、蠕移和悬浮土壤流失量, 这对于评价风蚀对其它地区的影响是非常有用的。WEPS 还增加了一些诸如植物伤害评价等新功能。WEPS 的设计不仅使它适用于美国的条件, 而且容易使它适用于世界上其他地区。

WEPS 模块化的设计有利于人们不断为它增添新的功能。目前, 正在研究将 WEPS 用于评估土地管理措施、土地生产力、河湖沙尘沉积、机场与公路附近能见度以及风蚀造成的经济损失。20 世纪 90 年代以来, 土壤风蚀预报开始与全球变化预测结合起来。土壤风蚀与环境变化之间的密切关系使与土壤风蚀有关的环境问题, 如土地沙漠化、沙尘暴等倍受关注。从风蚀的环境效应出发, 将风蚀与全球环境变化联系起来开展全球性研究已势在必行。

2 主要风蚀预报模型(系统)

经过几十年的不懈努力, 有关学者提出了不同形式的土壤风蚀预报模型(系统), 用于估算风蚀量与评价各种防风蚀措施。主要风蚀预报模型(系统)有:

2.1 风蚀方程(WEQ)

Woodruff 和 Siddoway 于 1965 年提出了第一个风蚀预报模型——WEQ<sup>[10]</sup>。WEQ 是美国农业部多年土壤风蚀机理研究的产物, 曾经被广泛使用和不断地修订完善。WEQ 是一个用于估算田间年风蚀量( $E$ )的模型, 包含土壤可蚀性因子( $I$ )、土壤表面粗糙度因子( $K$ )、气候因子( $C$ )、地块长度因子( $L$ )以及植被覆盖因子( $V$ ) 5 组 11 个变量。其表达式为:  $E = f(I, K, C, L, V)$ 。

WEQ 考虑了主要风蚀因子对风蚀量的影响。由于 WEQ 中的各个因子是相互关联的, 因此在方程的求解过程中, 不是求出各因子值后连乘, 而是需要利用各因子之间的相关关系式和编绘的大量图表分步计算, 计算工作量很大。于是 Skidmore 等于 1970 年提出了用计算机求解 WEQ<sup>[13]</sup>, 随后又制作了滑动计算尺以便于野外应用。

随着资料的积累和新技术的引入, WEQ 的局限性愈来愈明显。WEQ 仅能预报某一区域的年平均风蚀状况, 但事实上, 风蚀因子和风蚀量都具有明显的时空变异特征, 由此得出的平均风蚀状况不能精确地反映单个的风蚀事件, 在指

导防止土壤风蚀实践方面存在一定的不足。WEQ 是一个经验模型,注重宏观上应用的方便,与微观的风蚀机制研究脱节,得不到风蚀基础理论的支持。此外,WEQ 是建立在堪萨斯加尔登城(Garden City)气候条件基础上的经验模型,当应用于气候条件差异较大的地区时,误差较大<sup>[14]</sup>。

## 2.2 帕萨克(Pasak)模型

Pasak 于 1973 年提出的风蚀预报模型旨在预测单一风蚀事件<sup>[15]</sup>。该模型只包括风速、土壤含水量和不可蚀颗粒所占比例 3 个变量,以简单的函数关系来预测风蚀量,应用起来方便,但缺少其它一些必要的变量,如作物残留物及土壤表面粗糙度等因子,因而在实际应用中具有很大的局限性。此外,即使在某单一风蚀事件中,风速和土壤含水量亦非恒量。该模型也是一个经验模型,存在类似 WEQ 的不足<sup>[3]</sup>。

## 2.3 波查罗夫(Bocharov)模型

前苏联科学家 Bocharov 认为,风蚀取决于众多的因素,包括地表土壤物理性质和若干气流特征参数。他于 20 世纪 80 年代初期提出 Bocharov 模型<sup>[16]</sup>,模型包括 4 大组(风况、表土特征、气象要素特征、人类对土壤表面的干扰程度) 25 个影响土壤风蚀的因子。这些因子具有一个共同的特点,即在其余因子保持不变的情况下,其中任一因子的变化都可以引起风蚀量的变化。但各风蚀因子的作用并不是等效的,它们相互影响,具有复杂的内在关系。Bocharov 模型从系统论思想出发,全面归纳了各种风蚀因子,所归纳出的 4 组变量具有明显的层次性,同时充分考虑到各因子之间的相互作用,较 WEQ 的思想前进了一步,将人类活动这一在现代风蚀过程中极其活跃的因素纳入预报模型中,给风蚀预报提供了又一新思路。但是该模型并没有给出具体的定量关系,这些关系仍依赖于实验与野外观测研究,该预报模型只是一个抽象的概念模型,不能直接应用。

## 2.4 德克萨斯侵蚀分析模型(TEAM)

Gregory 于 1988 年提出了德克萨斯侵蚀分析模型(TEAM)<sup>[17]</sup>,以期利用计算机程序来模拟风速廓线发育以及各种长度田块上的土壤运动。该模型从理论分析出发,结合实地观测资料确定了其中若干系数,开辟了理论模型与经验模型相结合的思路,但考虑的因子仍然十分有限,是一个十分简化的过程模型,不能够全面地反映风蚀过程,因而不能应用于复杂的实际情况,预测结果仍有待于检验。

## 2.5 风蚀评价模型(WEAM)

澳大利亚学者邵亚平等在综合有关风沙流及大气尘输移的实验与理论研究成果基础上,于 1996 年提出了 WEAM,用以估算农田风沙流及大气尘输移量<sup>[18]</sup>。该模型包含摩阻流速、土壤粒度分布特征、土壤含水量以及土壤表面覆盖因子 4 个变量。

WEAM 模型注意到在土壤风蚀预报中宏观研究与微观研究脱节的研究现状,试图通过微观与宏观研究理论的集成来建立基于物理过程基础的风蚀预报模型。模型引进了先进的地理信息系统管理技术,在土壤风蚀预报研究与其它环境科学研究的接轨方面作了探索。但是模型中仅有 4 个变量,远远未能涵盖影响风蚀过程的主要因素,而且这些变量的

作用并非独立,而是相互作用的,模型未能充分考虑多因子间的相互作用。

## 2.6 修正风蚀方程(RWEQ)

WEQ 不适用于预测高降雨量地区和低降雨量地区的土壤风蚀。随着新技术的使用和风蚀观测仪器的发展,WEQ 的局限性愈加明显,土壤风蚀预报迫切需要充分利用已有的新技术、新设备来提高预测精度。为了及时利用新技术,美国农业部农业研究局的科学家们对 WEQ 进行了修正,提出了 RWEQ。RWEQ 应用简单的模型变量输入方式来计算农田风蚀量,充分考虑了气象、土壤、植被、田块、耕作以及灌溉等因子<sup>[19]</sup>。

RWEQ 借助计算机求解,用户界面友好,可以实现人机对话,便于操作。在一些地区的预测结果表明,只要有理想的气象、土壤、作物和农田管理输入数据,使用 RWEQ 可以取得比较精确的风蚀预报结果。但是,RWEQ 并未摆脱 WEQ 的思想束缚,各变量的综合作用效果仍用乘积的形式表达。与 WEQ 一样,RWEQ 也是根据美国,主要是大平原地区的实际条件建立起来的模型,缺乏理论和物理过程基础。许多参数是经验型的,其普遍适用性仍有待于进一步验证和修正<sup>[3]</sup>。

## 2.7 风蚀预报系统(WEPS)

针对 WEQ、RWEQ 的局限性,美国农业部组织了一个多学科的科学队伍来推进土壤风蚀预报技术,于 20 世纪 90 年代推出了 WEPS<sup>[12]</sup>。

WEPS 是一个连续的以过程为基础以日为时间尺度的模型,可以模拟每日的天气、田间条件及风蚀状况。具有模拟田间条件和土壤蚀积时空变异的能力,它不仅模拟基本的风蚀过程,而且模拟改变土壤风蚀易感性的过程。WEPS 还具有植物风蚀伤害评价、悬浮土壤流失量计算等功能。是目前最完整、手段最先进的风蚀预报模型,成为风蚀定量评价、指导风蚀防治实践及环境规划与评价的重要技术工具。

WEPS 为模块化结构,主要由 1 个用户界面、1 个主程序、7 个子模型和 4 个数据库组成。7 个子模型分别为:天气、水文、土壤、作物、分解、管理及侵蚀子模型。

WEPS 中大多数子模型以每日天气作为改变田间条件物理过程的自然驱动力。天气子模型产生驱动水文、土壤、作物、分解及侵蚀子模型所必需的变量,包括降雨强度、降雨量、降雨持续时间、最高和最低气温、太阳辐射、露点、风速、风向等<sup>[20]</sup>;水文子模型说明土壤温度和水分状况的变化,根据每日融雪、径流、渗透、土壤蒸发和植物蒸腾计算土壤水分平衡<sup>[21]</sup>;土壤子模型模拟土壤特性(包括决定土壤可蚀性的暂时性土壤性质和固有土壤性质)随各种天气过程及时间的变化<sup>[22]</sup>;作物子模型模拟植物生长过程<sup>[23]</sup>;分解子模型以温度和湿度作为驱动变量模拟作物残余物的分解过程<sup>[24]</sup>;管理子模型评价耕作措施对土壤特性、地表形态及生物量状况的影响,进而评价其对水文、土壤、作物及分解子模型的影响<sup>[25]</sup>;侵蚀子模型用来计算土壤流失量或沉积量<sup>[26]</sup>。

## 3 结 语

土壤风蚀是目前全球性土地退化的主要过程之一,土壤

风蚀预报可以指导与检验各种土壤风蚀防治措施,是有效解决土壤风蚀问题的必要技术。为了精确地预测风蚀,国外科学家们作了不懈努力,取得了显著的成就。我国土壤风蚀及风蚀预报研究起步晚,基础薄弱,缺乏系统性。由于缺乏长期的系统的观测和实验数据,到目前为止,还没有建立起适合

我国国情的风蚀预报系统。然而,我国目前土壤风蚀及沙漠化问题十分严重,不仅侵蚀强度大,涉及范围广,而且形势日趋恶化。由此可见,学习和引进国外成熟的风蚀预报技术,加强我国风蚀预报研究,建立适合我国的土壤风蚀预报系统意义重大,形势迫切。

参考文献:

[1] UNEP. Managing fragile ecosystem: combating desertification and drought[J]. Agenda 21, Chapter 12. Desertification Control Bulletin, 1993, 2: 122.

[2] 陈渭南,董光荣,董治宝. 中国北方风蚀问题研究的进展与趋势[J]. 地球科学进展, 1994, 9(5): 6- 11.

[3] 董治宝,等. 土壤风蚀预报研究述评[J]. 中国沙漠, 1999, 19(4): 312- 317.

[4] Free E E. The movement of soil by wind[J]. USDA BUL, 1991, 68: 271.

[5] 董治宝,李振山,严平. 国外土壤风蚀的研究历史与特点[J]. 中国沙漠, 1995, 15( 1): 100- 104.

[6] 拜格诺 R A. 风沙和荒漠沙丘物理学[M]. 北京: 科学出版社, 1959. 28- 52.

[7] Chepil W S. Relation of wind erosion to waterstable and dry clod structure of soil[J]. Soil Sci., 1942, 55: 275- 287.

[8] 李小雁,等. 土壤风蚀中有关土壤性质因子的研究历史与动向[J]. 中国沙漠, 1998, 18(1): 91- 95.

[9] 雅库波夫 Т Ф. 土壤风蚀及其防止[M]. 梁式弘译. 北京: 农业出版社, 1956. 182.

[10] Woodruff N P, Siddoway F H. A wind erosion equation[J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1965, 29( 5): 602- 608.

[11] 刘贤万. 实验风沙物理与风沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 1995. 1- 3.

[12] Hagen I J. A wind erosion prediction system to meet the users need [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 46(2): 107- 111.

[13] Skidmore E L, Flsher P S, Woodruff N P. Wind erosion equation: Computer solution and application[J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1970, 34: 931- 935.

[14] Foster G R. Advances in wind and water erosion prediction[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 46( 2): 27- 29.

[15] Pasak V. Wind Erosion on Soil[J]. VUM Zbraslaav Scientific Monographs, 1973, ( 3): 78- 89.

[16] Bocharov A P. A Description of Devices Used in the Study of Wind Erosion of Soils [M]. New Delhi: Oxonian Press, Pvt. Ltd, 1984.

[17] Gregory J M, Borrelli J, Fedler C B. TEAM: Texas erosion analysis model[A]. Proceedings of 1988 Wind Erosion Conference[C]. Lubbock, Texas: Texas Tech. University, 1988. 88- 103.

[18] Shao Y, Raupach M R, Leys J F. A model for predicting aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region[J]. Australian Journal of Soil Research, 1996, 34: 309- 342.

[19] Fryrear D W, Saleh A, Bilbro J D. et al. Field tested wind erosion model[A]. B Buerkert, B E Allison, M von Oppen (eds.). Proc. of International Symposium 'Wind Erosion in West Africa: The Problem and Its Control [C]. Weikersheim: Margraft Verlag, 1993, 13( 3): 343- 355.

[20] Tatarko J, Skidmore E L, Wagner L E. Technical documentation[P]. weather submodel. SWCS WEPP/WEPS Symposium, Ankeny, IA. 1995.

[21] Durar A A, Skidmore E L. WEPS technical documentation [P]. hydrology submodel. SWCS WEPP/WEPS Symposium, Ankeny, IA. 1995.

[22] Hagen L J, Zobeck T M, Skidmore E L, Elminyaw I. WEPS technical documentation[P]. soil submodel. SWCS WEPP/WEPS Symposium, Ankeny, IA. 1995.

[23] Retta A, Armbrust D V. WEPS technical documentation[P]. crop submodel. SWCS WEPP/WEPS Symposium, Ankeny, IA. 1995.

[24] Steiner J L, Schomberg H H, Unger P W. WEPS technical documentation[P]. residue decomposition submodel. SWCS WEPP/WEPS Symposium, Ankeny, IA. 1995.

[25] Wagner L E, Ding D. WEPS technical documentation[P]. management submodel. SWCS WEPP/WEPS Symposium, Ankeny, IA. 1995.

[26] Hagen L J. WEPS technical documentation[P]. erosion submodel. SWCS WEPP/WEPS Symposium, Ankeny, IA. 1995.