

● “十一五”国家重点图书出版规划项目 ●

土壤侵蚀与旱地农业系列专著

WEPP模型及其在 黄土高原的应用评价

郑粉莉 张勋昌 王建勋/著



科学出版社
www.sciencep.com

“十一五”国家重点图书出版规划项目

土壤侵蚀与旱地农业系列专著

WEPP 模型及其在黄土高原的 应用评价

郑粉莉 张勋昌 王建勋 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了 WEPP 模型,并评价了 WEPP 模型在黄土高原的适用性。全书分 9 章,第 1 章介绍了国内外水蚀预报模型研究概况;第 2 章介绍了 WEPP 模型的基本原理;第 3 章介绍了 WEPP 模型在 Windows 界面使用方法,包括坡面模拟和流域模拟;第 4~6 章以翔实的资料评价了 WEPP 模型在黄土高原不同坡度、不同坡长、不同作物类型及不同草地条件下的适用性;第 7 章对 WEPP 气候模型 BPCDG 和 CLIGEN 进行了应用评价;第 8 章利用全球环流模型(GCM)和 WEPP 模型预测了未来土壤侵蚀发展趋势;第 9 章是关于我国水蚀预报模型研究的思考。

本书可供从事土壤侵蚀、水土保持、地理学、国土整治与环境保护研究的科技工作者和高等学校相关专业的师生以及水土保持和环境部门的管理者参考。

图书在版编目(CIP)数据

WEPP 模型及其在黄土高原的应用评价/郑粉莉,张勋昌,王建勋著.
—北京:科学出版社,2010

(土壤侵蚀与旱地农业系列专著)

ISBN 978-7-03-026509-8

I. ①W… II. ①郑…②张…③王… III. ①黄土高原-水土保持-评价-应用软件, WEPP IV. ①S157-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 014473 号

责任编辑:赵 峰 刘希胜/责任校对:陈玉凤

责任印制:钱玉芬/封面设计:耕者设计工作室

封面照片提供:田均良

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

*

2010 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2010 年 1 月第一次印刷 印张: 12 1/4

印数: 1—2 000 字数: 247 000

定价: 39.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

总 序

资源合理利用与生态环境保护已成为 21 世纪中国西部开发的战略核心。实施这一战略，对粮食和环境安全有着举足轻重的作用。开展土壤侵蚀和旱地农业研究是实施上述战略的关键。土壤侵蚀与旱地农业是黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室的两个基本研究方向。该系列专著针对实验室两个研究方向，以黄土高原土壤侵蚀环境调控和提高旱地农业生产力为基础，从土壤侵蚀过程及其调控、土壤侵蚀模型及预测、水土流失、土壤水分养分循环机制及其调控、土壤侵蚀与旱地农业研究的新方法和新技术等领域出发，系统反映实验室基于大量重要研究项目资助获得的研究成果。

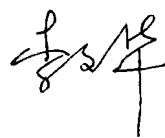
《土壤侵蚀与旱地农业系列专著》具有以下特点：一是长期和集体研究工作的结晶。作者以他们自己的研究工作累积为基础，并综合国内外有关专家、学者的研究成果，较充分反映了我国土壤侵蚀与旱地农业研究取得的成就。二是具有坚实的科学立论基础，作者以严肃、认真的科学态度，从黄土高原实际出发，理论联系实际，观点明确，论据充分，是具有较高权威性的系列专著。三是有很强的应用性，主要基于土壤侵蚀与旱地农业的相关理论，对如何控制水土流失和提升旱地农业生产力提出关键技术措施。

该系列专著各分册相对独立，但又相互补充，体系完整，资料系统，涉及地学和农业科学的诸多领域，是一套在理论上具有一定深度、实践上具有一定广度的丛书。该丛书的出版发行对推动水土保持、优化旱地农业水肥资源管理和提高农业生产力将会产生积极作用。系列专著资料丰富，数据可靠，内容翔实，图文并茂，是理论联

系实践的著作。它不仅可以作为地学、生态学、气象学、土壤学、植物营养学、农学等相关专业科技工作者的参考书，而且可作为高等院校相关专业教学的重要参考书。

我相信这套专著的出版，一定会受到学术界的欢迎，将为推动土壤侵蚀和旱地农业学科建设发挥其应有的作用。

中国工程院院士



2009. 10. 24

前 言

土壤侵蚀模型是水土保持规划和水土流失调查与侵蚀危险性评价的技术工具，是土壤侵蚀研究成果的集中体现和研究水平的重要标志。近 50 年来，土壤侵蚀预报模型研究取得了长足的进步。目前国际上研发并应用于生产实践的水蚀预报模型主要有通用土壤流失方程及其修正通用土壤流失方程（USLE 和 RUSLE）、水蚀预报（water erosion prediction project, WEPP）模型、欧洲土壤侵蚀模型（EROSEM）、荷兰土壤侵蚀预报模型（LISEM）、非点源农业污染模型（AGNPS、ANSWERS、CREAMS）和水土资源评价模型（SWAT）等。这些模型不但在生产实践中发挥了重要作用，而且也由政府决策的制定提供了重要科学依据。

WEPP 模型是基于过程的水蚀预报模型，可模拟和预测不同时间尺度（日、月、季、年及年际）和不同土地利用类型（农地、草地、林地、建筑工地及城区等）的径流量和土壤侵蚀量，同时还具备模拟和预测土壤水分的入渗、蒸发和农作物生长等功能。WEPP 模型分为 3 个版本：坡面版（hillslope）、流域版（watershed）、网格版（grid）。因为坡面广泛存在于自然界，也是径流和侵蚀产沙的来源地，因此，WEPP 模型的坡面版本备受土壤保持和自然资源保持工作者的重视。同时，严重的坡面土壤侵蚀，导致土壤肥力退化和土地生产力降低，威胁着粮食安全，进而威胁人类的生存和发展。因此，定量评价坡面水土流失影响因子及建立坡面土壤侵蚀预报模型的要求非常迫切。

目前，WEPP 模型的 3 个版本中，坡面版本的研发相对成熟，并得到了较广泛的应用。流域版是 WEPP 模型坡面版的外延，目前研发的 WEPP 模型的流域版本，仅适用最末一级的流域，其应用受到限制；而 WEPP 模型的网格版仍是空白。自 WEPP 模型坡面版颁布以来，WEPP 模型在国外应用较多，涉及研究领域较广；而在我国的应用研究相对较少，目前仅在四川盆地紫色土区域进行

过适用性的评价 (缪驰远等, 2005), 而在黄土高原地区的应用评价研究刚刚起步 (王建勋等, 2008a, 2008b; 王建勋等, 2007; 史婉丽等, 2006)。因此, 有必要评价 WEPP 模型坡面版本在黄土高原丘陵沟壑区陡坡地形区的适用性, 从而为建立适用于复杂地形的侵蚀预报模型提供思路和方法。同时, 通过 WEPP 模型在黄土高原陡坡地形适用性的评价, 可拓宽 WEPP 模型的适用范围, 辨析 WEPP 模型的优缺点, 为 WEPP 模型的提升及改进奠定理论基础。

气候是影响水文、生物和生态环境的重要因素, 气候变化关系着社会经济和人类的可持续发展。因此, 很多国家投入大量的人力和物力进行未来气候变化的研究。政府间气候变化专门委员会 (Intergovernment Panel on Climate Change, IPCC) 发布的第四次评估报告“气候变化 2007: 自然科学基础”中指出 (李明启和曲建升, 2007), 气候在人类活动的影响下总体呈增暖趋势。全球气温的上升会增加发生洪水、干旱、土壤侵蚀等相关环境问题的潜在风险, 但是对特定地区的实际破坏还存在不确定性, 需要作进一步评估。

黄土高原是我国土壤侵蚀最严重的地区之一, 特别是黄土丘陵沟壑区, 侵蚀模数达 $5000 \sim 30\,000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ (刘万铨, 1999)。每年有大量的泥沙进入黄河, 使黄河的多年平均输沙量达 16 亿 t (陕县站)。黄土高原严重的水土流失不但影响区域粮食安全和可持续发展, 也成为黄河下游洪水泥沙灾害的主要根源。因此, 预测评估未来气候变化对未来灾害预警有重要意义。

全球环流模型 (GCM) 是进行未来气候变化预估的主要工具。它是根据气候系统各部分的物理、化学和生物学性质及其相互作用和反馈过程, 通过数值表述来解释气候系统已知特征的全部或部分。GCM 将全球划分成若干个栅格, 每个栅格用中心点来代表。IPCC 根据未来经济、环境和人口等不同的发展模式假设了多个气候情景, 基于这些情景 GCM 可以预测不同区域未来的气候变化。

本书总结和归纳国内外水蚀预报模型研究概况, 系统介绍 WEPP 的基本原理和其在 Windows 下的使用方法。在此基础上, 基于黄土高原坡面径流泥沙实测资料, 评价 WEPP 模型坡面版本在黄土高原的适用性; 基于安塞站 1986~2003 年的气候观测资料以及 CLIGEN 和 GCM 预测未来 40 年以安塞为代表的黄土高原丘陵沟壑区的气候变化; 将 WEPP 模型和 GCM 预测结果相结合, 预测

未来 40 年以安塞为代表的黄土高原丘陵沟壑区的土壤侵蚀变化；基于作者 10 多年来对我国水蚀预报模型的研究和思考，提出我国水蚀预报模型研究的工作思路。鉴于研究条件有限，尤其是野外长历时径流泥沙资料收集的难度和作者认识水平的限制，本书的部分研究成果是初步的，有些研究结论尚需进一步探索和深化。

全书共分 9 章，各章编写分工是：第 1 章由郑粉莉执笔；第 2 章由郑粉莉和王建勋执笔；第 3 章由郑粉莉执笔；第 4 章由王建勋和郑粉莉执笔；第 5 章由郑粉莉、王建勋和张勋昌执笔；第 6 章由王建勋、张勋昌和郑粉莉执笔；第 7 章由王建勋、郑粉莉和张勋昌执笔；第 8 章由郑粉莉和王建勋执笔；第 9 章由郑粉莉执笔。最后由郑粉莉汇总定稿，汪晓勇和王彬参加了编辑和校对工作，书中全部插图由王彬清绘。

本书研究成果主要来自作者多年来主持的科研项目，包括国家重点基础研究发展计划“973”项目课题“不同类型区土壤侵蚀过程与机理”（2007CB407201），国家自然科学基金面上项目“黄土丘陵区发育活跃期切沟侵蚀过程研究”（40871137）和重点项目“黄土高原小流域分布式水蚀预报模型研究”（40335050）与中国科学西部行动计划（二期）项目课题“水文过程响应及其模拟（KZCX2-XB2-05-03）”，中国科学院知识创新工程重要方向项目“水蚀预报模型研究”（KZCX3-SW-422），西北农林科技大学创新团队计划（01140202）和拔尖人才支持计划（01140102），黄河水利委员会项目“黄土丘陵沟壑区小流域分布式产沙机理模型研发”（黄水保 200651-09），农业部“948”项目“土壤侵蚀及其环境效应评价模型（2003-Z57）”，以及黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室自主方向项目“黄土高原近万年来土壤侵蚀发生演变与趋势预测”（105-Z05）。

作者在土壤侵蚀与水土保持的理论学习与研究过程中，得到许多老前辈的指教、领导的支持及同事们的大力帮助。首先感谢中国科学院资源环境科学与技术局、水利部水土保持司和水土保持监测中心及国家自然科学基金委员会地学部有关领导的大力支持，感谢西北农林科技大学、水土保持研究所及黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室历届领导的热情关怀，感谢安塞水土保持科学试验

站的积极支持和大力协助，感谢朱显谟、唐克丽、周佩华、承继成、李佩成、陈永宗、王幼民、刘秉正、景可、田均良、李靖、李锐、王万忠和蔡强国等老师的热情指教，特别感谢江忠善老师将自己毕生收集的野外径流和侵蚀泥沙资料无私提供给作者。感谢美国农业部农业研究局国家土壤侵蚀研究实验室（USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory）及其实验主任 Chi-hua Huang 博士和 Dennis Flanagan 博士给予的重要帮助。正因为有他们的无私帮助和鼎力支持，我们才从美国引进了 WEPP 模型，从而为 WEPP 模型在我国的应用提供了技术支持，也为这部书的顺利出版奠定基础。作者在此非常感谢农业部 948 项目（2003-Z57）的支持，正是该项目的支持，我们才从美国农业部农业研究局引进了 WEPP 模型。最后，作者要特别感谢美国农业部农业研究局技术转让办公室和国家土壤侵蚀研究实验室同意在我国用中文出版 WEPP 模型的原理及操作手册。

由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请同仁赐教。

郑粉莉

2009 年 8 月于杨凌

目 录

总序

前言

第 1 章 国内外水蚀预报模型研究概况	1
1.1 国外水蚀预报模型研究概况	2
1.1.1 经验模型	2
1.1.2 物理过程模型	12
1.1.3 基于地理信息系统的水蚀预报模型	17
1.1.4 其他水文和侵蚀模型	19
1.1.5 国外土壤侵蚀研究的主要成功经验	22
1.1.6 国外水蚀预报模型研究述评	23
1.2 国内水蚀预报模型研究概况	24
1.2.1 经验模型	24
1.2.2 物理过程模型	29
1.2.3 基于 GIS 的水蚀预报模型	31
1.2.4 小流域分布式水蚀预报模型	31
1.2.5 土壤侵蚀机理模型研究	31
1.2.6 我国水蚀预报模型研究的主要成就	33
第 2 章 WEPP 模型基本原理与模型结构	34
2.1 WEPP 模型基本原理	34
2.1.1 WEPP 模型坡面版	34
2.1.2 WEPP 模型流域版	35
2.2 WEPP 模型结构	36
2.2.1 WEPP 模型输入与输出	36
2.2.2 WEPP 模型的功能模块	39
2.3 WEPP 模型在我国的应用研究概况	40
2.3.1 有关 WEPP 模型参数研究	40
2.3.2 WEPP 模型在我国应用概况	42
2.3.3 WEPP 模型的局限性与应用前景	42

第 3 章 WEPP 模型 Windows 界面使用方法	44
3.1 WEPP 软件安装与坡面版本屏幕的显示	44
3.1.1 WEPP 软件安装	44
3.1.2 通用工具栏	50
3.1.3 界面菜单项	53
3.1.4 鼠标右键的功能	54
3.1.5 在线帮助	54
3.2 WEPP 模型坡面模拟	55
3.2.1 启动界面和运行默认项目	55
3.2.2 查看模拟输出结果	55
3.2.3 改变运行选项和运行当前项目	59
3.2.4 重现期分析	60
3.2.5 土壤和管理层的分段	62
3.2.6 导入信息	63
3.2.7 坡面项目集	64
3.3 编辑项目输入信息	65
3.3.1 坡度输入	65
3.3.2 土壤输入	68
3.3.3 气候输入	70
3.3.4 轮作管理信息输入	71
3.4 WEPP 模型流域模拟	80
3.4.1 流域项目屏幕显示	80
3.4.2 查看流域信息	84
3.4.3 运行模拟与查看模拟结果	88
3.4.4 添加流域项	92
3.4.5 修改与新建流域	97
第 4 章 WEPP 模型在黄土高原应用评价的数据库建立	104
4.1 研究区域概况与资料收集	104
4.1.1 研究区域概况	104
4.1.2 资料收集	104
4.1.3 坡度坡长数据库的建立	105
4.2 气候数据库的建立	107
4.2.1 气候参数敏感性分析	107
4.2.2 气候参数数据库的建立	109
4.3 土壤数据库的建立	109

4.3.1 土壤参数敏感性分析	110
4.3.2 土壤参数的标定	111
4.3.3 土壤参数标定结果的检验	112
4.3.4 土壤参数数据库的建立	113
4.4 作物管理数据库的建立	114
4.5 小结	116
第 5 章 WEPP 模型坡面版在黄土高原不同坡度和坡长条件下的适用性评价	117
5.1 模型适用性评价方法	117
5.2 不同坡度条件下 WEPP 模型的适用性评价	118
5.2.1 模拟结果	118
5.2.2 模拟结果评价	123
5.3 不同坡长条件下的适用性评价	124
5.3.1 模拟结果	124
5.3.2 模拟结果评价	126
5.4 小结	128
第 6 章 WEPP 模型坡面版在黄土高原不同作物地和草地的适用性评价 ...	130
6.1 不同作物和草地条件下径流和侵蚀模拟与评价	130
6.1.1 作物与草地小区的布设及模拟结果评价方法	130
6.1.2 不同作物条件下模拟结果分析与评价	131
6.1.3 红豆草草地条件下模拟结果分析与评价	134
6.2 作物生物量的模拟与评价	135
6.2.1 生物量和产量的模拟与评价	136
6.2.2 土壤水分胁迫的模拟与评价	137
6.3 小结	142
第 7 章 WEPP 气候模型 BPCDG 和 CLIGEN 的应用评价	144
7.1 CLIGEN 4.3 和 CLIGEN 5.22563 生成降雨的比较分析	144
7.1.1 CLIGEN 生成降雨参数的原理	144
7.1.2 研究方法	146
7.1.3 CLIGEN 4.3 和 CLIGEN 5.22563 对比评价	147
7.2 BPCDG 和 CLIGEN 模型的应用评价	152
7.2.1 BPCDG 和 CLIGEN 模型的差异	153
7.2.2 气候文件及其他文件的建立	153
7.2.3 结果分析与评价	154
7.3 小结	158

第 8 章 基于 WEPP 和 GCM 模型预测未来土壤侵蚀发展趋势	159
8.1 数据采集与处理	159
8.1.1 气候预测模型	159
8.1.2 气候数据的转换	160
8.1.3 数据库的建立	165
8.2 基于 WEPP 预测未来 40 年黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀发展趋势	165
8.2.1 气候模型转化数据评价	165
8.2.2 未来 40 年黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀预测	168
8.3 小结	169
第 9 章 关于我国水蚀预报模型研究的思考	171
9.1 我国水蚀预报模型研究面临的挑战	171
9.2 需要深化研究的科学问题	172
9.2.1 沟蚀量化研究	172
9.2.2 侵蚀产沙沿程变化研究	172
9.2.3 地形分析的不确定性问题	172
9.2.4 下垫面参数的空间变异性	173
9.2.5 GIS 和侵蚀预报模型的紧密集成	173
9.3 我国水蚀预报模型研究的工作思路	174
参考文献	176

第1章 国内外水蚀预报模型研究概况

土壤侵蚀是限制当今人类生存与发展的主要环境灾害之一。全球水土流失面积约 $16.43 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，占地表总面积的 10.95%（郑粉莉等，2004a）。土壤侵蚀不仅给当地的生态、环境、人们的生存条件和社会经济发展等带来了严重影响，而且也给相邻地区带来严重危害。因此，防治土壤侵蚀，改善生态与环境，实现人与自然协调发展和资源-环境-社会经济可持续发展，已成为全世界普遍关注的重大环境问题，也是人类生存与发展所面临的重大课题。

土壤侵蚀预报模型是土壤侵蚀科学研究的前沿领域之一，是土壤侵蚀量化研究成果的重要体现。土壤侵蚀预报的研究将为评价土壤侵蚀强度、分析土壤侵蚀状况、制定科学的水土保持方案及指导合理的土地资源利用等提供强有力的科学依据，也是进行水土保持规划的支撑工具。最早的土壤侵蚀定量研究始于 19 世纪末期的德国，通过布设径流小区研究影响土壤侵蚀的各种因子（Baver, 1938）。第一个土壤侵蚀模型属于坡面经验模型，由美国学者 Zingg（1940）研制。至今土壤侵蚀模型研究已有 60 多年的历史，经历了从经验模型走向机理模型、从坡面模型走向流域或区域模型及从研究走向应用的发展历程。近 50 年来，土壤侵蚀预报模型的研究取得了一批重要研究成果，建立了一批具有实用价值的土壤侵蚀预报模型，主要有通用土壤流失方程（Wischmeier and Smith, 1965, 1978）、修正通用土壤流失方程（Meyer, 1984; Renard et al., 1997; Yoder and Lown, 1995）、水蚀预报模型（Foster and Lane, 1987; Nearing et al., 1989, 1990; Laflen et al., 1991）、农业非点源污染模型（USDA-ARS National Sedimentation Laboratory）、农田管理系统化合物、径流和侵蚀模拟模型（Knisel, 1980）、欧洲土壤侵蚀模型（Morgan et al., 1998）、荷兰土壤侵蚀预报模型（De Roo et al., 1994, 1996a, 1996b）、土壤侵蚀和生产力影响估算模型^①和水土资源评价模型（SWAT Model）（Blackland Research Center, 2005; Neitsch et al., 2002）等。这些模型不但在生产实践中发挥了重要作用，而且也 为政府决策的制定提供了重要科学依据。

① Sharply A N, Williams J R and USDA-ARS. 1990. EPIC, Erosiona/Productivity Impact Calculator. Washington D C

1.1 国外水蚀预报模型研究概况

国外水蚀预报模型的研究大体经过了四个阶段（郑粉莉等，2004b）：第一，进行试验得到观测数据，从而建立土壤侵蚀基础数据库，结合统计分析和对土壤侵蚀影响因子的概化，建立估算土壤流失统计模型；第二，基于水蚀过程的研究成果，结合泥沙连续方程和数理方法，开发物理模型；第三，基于物理模型的成果与地理信息系统结合，研发分布式水蚀预报模型；第四，基于坡面和小流域水蚀预报模型的研究成果及遥感和地理信息系统的应用，开发区域土壤侵蚀模型。

1.1.1 经验模型

1.1.1.1 通用土壤流失方程

1917 年，美国学者 M. F. Miller 及其同事在密苏里农业实验站布设小区开展农作物及轮作对侵蚀和径流的影响的研究。20 世纪 20 年代，美国农业部土壤调查专家 Bennett 等建立土壤侵蚀实验站，并将 Miller 的径流和侵蚀研究方法进行推广应用。基于大量的实验观测资料，Bennett 在 1939 年出版了经典名著《土壤侵蚀》。1949 年 Zingg 应用小区的模拟降雨和野外实验证实：坡度增加 1 倍，土壤流失量增加 2.61~2.80 倍；斜坡水平长度增加 1 倍，土壤流失量增加 3.03 倍。于是他提出了最早的预报方程：

$$A = CS^m L^{n-1} \quad (1-1)$$

式中：A 为来自单位面积上的平均土壤流失量；C 为变量常数；S 为坡度；L 为山坡的水平长度；m、n 分别为坡度指数和山坡水平长度指数。

1946 年美国全国土壤保持委员会在 Musgrave 主持下召开了一次工作会议，会议对美国全部资料进行了审查，对若干变量采取了新的数值，并对溅蚀有重要意义的成果进行了整理，提出了马斯格雷夫方程。该方程也被称为坡度-措施方程，其表达式为

$$E = TSLPMR \quad (1-2)$$

式中：T、S、L、P、M 和 R 分别为土壤类型、坡度、坡长、农业措施、工程措施和降雨因子。

此方程在美国使用十余年后被通用土壤流失方程所代替。20 世纪 50 年代在土壤侵蚀过程的认识和大量的观测数据的基础上，Wischmeier 和 Smith（1960，1965）以及 Wischmeier（1976）组织并领导全美相关的部门和科研、教学及生

产单位联合攻关,在1965年建立了著名的通用土壤流失方程(universal soil loss equation, USLE),并以美国农业部282号(Wischmeier and Smith, 1965)和537号(Wischmeier and Smith, 1978)手册进行颁布,作为坡面水土保持规划的工具。USLE的基本形式为

$$A = RKLSCP \quad (1-3)$$

式中: A 为单位面积上的土壤流失量; R 为降雨侵蚀因子; K 为土壤可蚀性因子; L 为坡长因子; S 为坡度因子; C 为作物覆盖和管理因子; P 为水土保持措施因子。

USLE的主要优点有:①规定坡度为9%,坡长22.13m,保持连续轻耕裸露休闲状态且实行顺坡种植的小区为标准小区,为不同条件下土壤流失量的比较提供了可能;②充分考虑了影响土壤流失的主要因子;③各评价因子完全相互独立,并且可以进行实际测试;④降雨侵蚀力指数为各地提供了更准确的降雨侵蚀能力;⑤土壤可蚀性指数直接用土壤性状进行评价,并且对大部分土壤提供了计算土壤可蚀性的方法;⑥将作物覆盖与田间管理综合考虑,更符合实际情况(郑粉莉等,2004b)。

USLE作为美国水土保持规划的主要工具,用来预测农耕地土壤流失量,确定土地利用方案,引导农民做出土地利用方式或水保措施的布设或选择,使土壤流失量达到允许土壤流失量或农民的期望值。它的设计思路、因子确定原则和模型结果简单明了,对世界范围内土壤侵蚀预报模型的开发产生了很大影响。很多国家和地区以USLE为蓝本,结合本国本地区的实际情况,研发适合本国本地区的土壤侵蚀预报模型。同样,USLE对我国土壤侵蚀预报模型的研究也起到了重要的推动作用。但应当指出:USLE计算的是年均土壤侵蚀量,很难反映次降雨过程土壤流失状况;在理论上,方程对某些因子的相互作用重复计算,如 R 与 C 和 L 与 P ,而忽略了因子之间的相互作用,如 R 与 S ;且该方程建立在缓坡条件下,对于较陡坡面和复杂地形区,其应用受到限制。

值得指出的是,USLE使用时应注意以下几个问题:①此模型能预报农耕地年均土壤流失量,也能预报草地年均土壤流失量;②此模型数据库主要来自于缓坡地,因此不适用于陡坡耕地;③模型适用的坡长有明确的范围;④此模型仅适用于地块尺度,不能用于小流域;⑤必须正确使用单位转换,即国际单位系统与英制单位系统的转换。

1.1.1.2 修正通用土壤流失方程

USLE发布以后,土壤侵蚀研究者开展了大量的工作,使得该模型在美国和其他国家的侵蚀预报和水土保持规划方面得到了广泛的应用。因USLE公式结构简单、参数代表性强、应用范围广,因而与USLE结合的各种实用化软件开

发也发展迅速，产生了巨大的经济效益。但是该模型所使用的数据主要来源于美国落基山脉以东地区，仅适用于缓坡地，不大适用于垄作和等高耕作以及那些使泥沙就地沉积的带状耕作措施等，其推广应用受到了一定限制。此外，从理论上来说，该模型是一个经验模型，不能描述土壤侵蚀的物理过程，缺乏对侵蚀过程及其机理的深入认识。

随着数据资料的积累和对土壤侵蚀机理认识的不断深入，为了克服 USLE 的缺陷，提高模型的适用性，美国农业部（USDA）于 1993 年发布了修正通用土壤方程（revised universal soil loss equation, RUSLE）（Meyer, 1984, Renard et al., 1997; Yoder and Lown, 1995）。此后根据不同的操作系统相继研发了不同的版本。在 DOS 界面下操作的版本有：RUSLE 1.05 模型，用于农地和草地年土壤流失量的预报；RUSLE 1.06 除了具有 1.05 的功能外，还可以预报矿区、建筑工地和开垦地的土壤流失量。在 Windows 界面下操作的版本有 RUSLE 2.0，是对早期版本的修正和完善，并不断进行改进。该版本可以预报不同农田生态系统、矿区、建筑工地和林地的土壤流失量。

RUSLE 比 USLE 在内部算法的细化和预测精度上都有所提高。它采用计算机模拟，数据源更加广泛，并且方程中各因子的测算方法也有了改进（表 1-1）。

表 1-1 RUSLE 与 USLE 各因子对比表

因子名称	USLE	RUSLE
R	降雨动能与最大 30min 降雨强度的乘积，用长时段降雨资料计算	东部地区同 USLE；西部则利用更多气象数据订正，同时考虑了缓坡积水地对雨滴击溅的缓冲作用以及多年冻土和部分消融土壤产生的影响
K	用土壤质地、有机质含量、可渗透性及其他内在土壤性质计算，以年为基本时间尺度，其值无年内变化	算法同 USLE，但考虑了冻融作用，土壤水分和土壤固结等，同时计算年内季节变化
LS	用地块坡长和坡度计算，未考虑土地利用	增加了细沟/细沟间侵蚀率，可以处理复杂坡型，扩展了原来的小于 9° 的使用范围
C	考虑作物季相、表层覆盖和糙度在一年 6 个生长季节的变化，根据作物和耕作表得到	用前期土地利用、盖度、表面覆盖、糙度和土壤水分等计算，每 15 天为一个计算步长；可以反映侵蚀年变化，特别是地表和近地表与气候和生物分解作用相关的变化
P	根据已布设削弱径流和阻滞土壤移动的水保措施，随坡度微起伏而变	由水文、土壤类型、坡度、冬播程度、垄高和 10 年一遇侵蚀指数值等确定，加入了等高耕作和带状耕作对泥沙输移的影响