

# 中国水土流失和水土保持定量研究进展\*

杨勤科 李 锐

(中国科学院  
水利部水土保持研究所·陕西杨陵·712100)

**摘要** 近代中国土壤流失定量评价始于本世纪 50 年代, 80 年代初开始土壤评价统计模型的研究开发, 80 年代末开展了土壤侵蚀预报物理模型的探索, 同时还在较大区域(如黄土高原)乃至全国尺度上进行了土壤侵蚀和水土保持的评价研究。中国土壤流失与水土保持定量评价研究可概括为 3 个层次: 地块—小流域—区域(或国家), 2 种类型: 统计模型; 物理模型。进一步的研究应致力于国外模型的引进, 解决模型的统一和通用性问题, 加强遥感与 GIS 技术的应用, 并建立完整的中国水土流失评价模型系统。  
中图分类号: S157.1

**关键词:** 水土流失 土壤侵蚀 定量评价 侵蚀预报

## Review of Quantitative Assessment on Soil Erosion in China

Yang Qinke Li Rui

(Institute of Soil and Water Conservation, the Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling District, Shaanxi Province, 712100, PRC)

**Abstract** The quantitative evaluation of soil erosion in China began in 1950s. Some empirical models for soil erosion evaluation were developed in the early 1980s. And physically-based models has been developed since the late 1980s. Meanwhile, the larger regional and even national evaluations of soil erosion and conservation were made. The quantitative assessment on soil loss and conservation in China can be divided into three scales, i. e. hillslope-small catchment-region or whole nation, and two types, i. e. empirical and physically-based models. Further researches should be focused on introducing overseas models, making models to be unification and generalization, intensifying the applications of remote sensing and GIS, and developing a complete erosion model system of China.

**Keywords:** soil and water loss; soil erosion; quantitative evaluation; erosion prediction

近代中国土壤流失定量分析始于 40 年代<sup>[1]</sup>。80 年代初开始利用统计方法进行侵蚀量的评价分析<sup>[2]</sup>。80 年代末开展了土壤侵蚀预报物理模型的探索<sup>[9-11]</sup>。在坡面和小流域定量研究的同时, 还在较大区域乃至全国尺度上进行了土壤侵蚀和水土保持的评价研究<sup>[12, 13]</sup>。中国土壤流失与水土保持定量评价研究可概括为(1) 3 个层次: 地块—小流域—区域(或国家)。(2) 2 种类型: 统计模型; 物理模型。(3) 2 个方面: 土壤流失评价和水土保持效益评价。

### 1 关于坡面(地块)土壤流失模型的研究

坡面土壤流失模型是将一个小流域看成由若干个坡面单元(或称地块)组成, 然后根据小区观测或室内模拟实验资料, 建立统计的或物理的模型, 以单个坡面为单元计算土壤流失量。

并对土地利用和水保规划方案的合理性予以论证或模拟分析。

### 1.1 坡面模型基本信息元——地块的确定与划分方法

模型开发,常用理想坡面为单元(如 USLE 的标准小区)。而事实上,坡面模型的基本单元(地块)是据一定的标准划分的。已有的研究采用了两类方法。(1)简单地块法。根据模型计算的需要,用地貌单元<sup>[12]</sup>、径流网络<sup>[14]</sup>或土地利用特征之一种划分地块单元。最简单的划分是将流域划分为一些规则的小方格<sup>[15]</sup>,作为计算分析的单元。研究报告对此通常不作说明<sup>[16]</sup>,实际上指的是一种理想坡面,即矩形、坡度、土壤和土地利用等相对均一的地理空间单元。(2)综合地块法。大量的研究采用了综合方法划分空间单元,即根据地貌、土地利用、土壤等影响流失的环境因子划分地块<sup>[17]</sup>,以此为基础采集和管理参数数据并计算土壤流失量。要想将模型用于土壤保持与土地利用规划,必须采用这种方式确定地块。

### 1.2 统计模型的开发

中国开展统计模型的探索始于 50 年代<sup>[1]</sup>。当时正值美国着手建立国家水土流失数据中心,总结已有资料建立 USLE 的前期<sup>[18]</sup>,但是该研究是否受到 USLE 的影响在作者的报告中没有提及。系统的模型研究始于 80 年代。参考或直接利用 USLE 的基本形式,据中国的观测资料,计算各因子值,然后计算坡面和流域土壤流失量<sup>[2~8]</sup>,并研究流域土壤流失的空间变异<sup>[15]</sup>。关于各侵蚀因子的定量研究,目前比较成熟的是降雨径流因子<sup>[19~23]</sup>、地形(坡度、坡长)因子的研究<sup>[19,23,24]</sup>,植被和水保措施因子研究<sup>[25]</sup>较弱。关于土壤因子,一种方法是  $K$  因子测量或推算<sup>[26~28]</sup>。另一种是关于土壤抗冲抗蚀性的研究<sup>[29~31]</sup>,但由于概念上的差异和本身研究方法、指标等方面的不尽统一和不尽成熟<sup>[30]</sup>,所以还难以运用于模型之中。

比较系统全面、富有中国特色的工作是在黄土高原进行的<sup>[2~4,14~16,19,23]</sup>。这里地表被侵蚀作用分割成梁峁坡面正地形和沟谷负地形两部分,各个单元的土壤侵蚀特点各不相同。所以有些研究者对黄土高原的坡面、沟谷分别建立模型<sup>[15]</sup>。

关于统计模型的开发,虽然有一定的进展,但是还存在一系列的问题,主要有:(1)现有的研究多是地方性的,不能用于较大的区域,也不能用于全国;(2)作物与水保因子尚无系统全面的研究与观测资料,影响了模型的实用性;(3)大多数模型尚不能用于流域土地利用和水土保持规划;(4)对 USLE 的应用,还存在一些不尽合理的地方,包括:将 USLE 用于较大区域(1:25 万比例尺)<sup>[20]</sup>;以网格为计算单元地形因子,坡长  $L$  为常数<sup>[15]</sup>;  $K$  值由侵蚀强度推算,  $C > 1$ <sup>[13]</sup>;除个别研究<sup>[12]</sup>外,多未考虑标准小区。总之,在统计模型方面,目前还没有形成象 USLE 那样严密且具有实用性的模型。

### 1.3 物理模型的开发

中国已有的物理模型主要是计算坡面径流量、径流侵蚀力、溅蚀和沟蚀分散量、输沙能力等。在黄土高原通常根据黄土侵蚀地貌的类型分为 3 个单元——梁峁坡、沟坡、沟道,分别建立模型<sup>[9~11]</sup>。在这些研究中,沟坡模型基本上还是统计模型,认为沟坡侵蚀产沙量与沟坡径流和上部沙量等有关。沟道模型则主要是用泥沙输移比来研究沟道冲淤变化规律。所以严格地说还是半物理性质的。

## 2 小流域模型

小流域治理被认为是中国水土保持的基本方式之一。每一个流域在地质形态、侵蚀方式、产沙输沙过程等方面具有近似性。以小流域为单元建立模型是必要的,也是可能的。

## 2.1 小流域土壤流失过程的整体性认识

小流域土壤流失过程是水文、气象因子、下垫面因子的函数。水文气象因子包括降雨量、径流量等。下垫面因子包括流域几何特征、地貌特征、土壤特征、植被与土地利用、水土保持措施等。因为小流域由若干坡面组成,所以小流域的上述指标只能是某种统计特征值(均值、比例),如平均坡度、农地比例、沟谷密度等<sup>[32-37]</sup>。因此,小流域模型较多的依赖于统计分析。

## 2.2 小流域模型的评价因子

已有的研究基本上是根据侵蚀动力(降雨、径流)因子和下垫面因子(地形、岩面、植被、土地利用)<sup>[32-36]</sup>,运用统计分析方法分析各因子与侵蚀量关系,并根据因子贡献率大小,选择评价因子(表1)。

表1 小流域模型的评价因子

研究者	金争平 <sup>[36]</sup>	孙立达 <sup>[33]</sup>
动力	降雨侵蚀力	降雨侵蚀,降雨复合参数
地形	沟壑密度( $x_1$ ), 切割裂度( $x_2$ ), 平均坡度( $x_3$ ), 陡坡面积比( $x_{14}$ ), 陡坡平均坡度( $x_5$ ), 地势比( $x_{14}$ )	平均坡度, 平均坡长, 流域面积, 长度, 形状参数
土壤	披砂土面积比( $x_8$ ), 风沙土面积比( $x_7$ ) 基质土面积比( $x_8$ ), 土壤面积比( $x_9$ )	土壤类型
植被	植被盖度( $x_{10}$ ), 沟坡植被盖度( $x_{11}$ ), 坡面植被盖度( $x_{12}$ )	林草面积比
土地利用	耕地面积比( $x_{13}$ ), 产沙面积( $x_{15}$ )	水平梯田、台田面积 林草面积, 侵蚀面积

## 2.3 小流域评价模型举例

(1) 模型 I<sup>[35]</sup>:  $M_s/M_w = 16.6188R_h^{0.548} \cdot R_e^{-0.0486} \cdot D_h^{-0.719} \cdot R_p^{-0.809} \cdot R_s^{-4.509}$

式中:  $M_s$ ——产沙模数  $m^3/(km^2 \cdot a)$ ;  $M_w$ ——径流模数;  $R_h$ ——峡岖度;  $R_e$ ——峡长度;  $D_p$ ——治理度(%);  $R_s$ ——岩土抗蚀性指数。

(2) 模型 II<sup>[36]</sup>:  $Y = (9.9 + 0.74x_1^{1.5} + 8.87x_6^{0.5} + 1291x_{10}^{-1.2})^2$

目前的主要问题是土壤流失及其影响因子定性、定量研究不够深入,致使各人所选具体指标差异较大,也未能形成相对统一的一个基本模型形式。

## 3 区域评价模型

指将区域作为一个或若干个单元进行评价的方法。在一个较大的区域,由于水土保持、江河治理的需要,进行土壤侵蚀与水土保持的综合、宏观定量评价是十分必要的。

### 3.1 黄土高原水土流失遥感评价<sup>[12]</sup>

在1:50万TM卫星影像上,将综合影像地貌组合结构、植被覆盖等级、地面组成物质等特征相近的区域划分为一个单元。用降雨( $R$ )、植被盖度( $G$ )、沟壑密度( $Y$ )、相对高差( $L$ )等作为评价因子。通过卫片判读,大比例尺(1:25万)地形图、航片抽象方式取得参数,给每一因子以权重和分值,利用变权模糊数学模型进行半定性评判,求得总分值,然后,据总分值查表求得侵蚀强度。

$$P = (a + b + c + d)/(a/R + b/G + c/Y + d/L)$$

式中:  $P$ ——总值;  $a, b, c, d$ ——分别为  $R, G, Y, L$  的权重。

### 3.2 中国土壤流失趋势预测

中国地域辽阔,区域差异极大,所以要进行全国范围的水土流失和水土保持评价必须分区进行。周佩华<sup>[13]</sup>将中国划分为东北漫岗丘陵区、黄土高原区、北方山地丘陵区、江南丘陵、四川盆地、华南丘陵、青藏高原几个区。选用了年径流量( $Q$ )、一日最大洪水量( $M$ )作为气候指标,选用“水土保持治理面积与水土流失面积之比”( $P$ )为反映人为活动的指标,分别对各区建立模型,预测了水土流失的趋势。采用模型的基本形式为: $y = a_1M^{a_2}Q^{a_3}P^{a_4}$

较之小流域模型,区域模型更加宏观,将主要用于区域性 or 国家水土保持宏观决策。目前存在的主要问题是:对影响区域流失的因子缺乏系统深入分析;对评价单元的划分,特别是客观定位缺乏必要的研究;缺少系列化统计数据,特别是缺乏水土流失治理和土地利用数据的支持;遥感与 GIS 等先进技术方法尚未引入。

## 4 有关问题

### 4.1 国外模型的引进

半个多世纪以来,国外对土壤侵蚀预报模型进行了大量的研究,开发了 USLE, CREAMS, RUSLE, WEPP, ANSWERS<sup>[38]</sup>, LISEM<sup>[39~41]</sup>等模型,应加强引进和介绍,以便吸取他们的经验教训,促进我国水土流失预报模型的研究和开发。

### 4.2 模型的统一和通用问题

中国是世界上水土流失最严重的国家之一,水土保持受到国家、地方和农民的普遍重视。这要求定量模型为农户、区域以至于国家提供决策和规划的支持。为此必须及时开展以下方面的研究:(1) 建立国家水土保持基础数据库。收集水土流失环境背景数据(如气候、土壤、地形、土地利用等),水土流失观测数据,国家和地方水土流失调查和统计数据,建成空间型数据库为多种模型的开发提供数据支持。(2) 对土壤流失过程及影响因子的认识。通过对已有观测数据的总结,已有模型的敏感性分析,补充必要的降雨试验,对土壤流失过程及其主要影响因子进行分析研究。(3) 水土流失空间特征认识。在过程(时间)研究基础上,分析研究较大区域(如黄土高原)乃至国家土壤流失的空间分异特征,以便在各种空间尺度上研究建立比例尺转换的技术方法。

### 4.3 遥感与 GIS 技术的应用

GIS 将为土壤侵蚀的研究提供强有力的支持<sup>[41]</sup>。由于以下原因,在中国的土壤侵蚀模型开发中,更加要求遥感与 GIS 技术的支持:(1) 农村土地经营以农户为基本单元,处于自然经济向市场经济转变阶段,所以即使一个较小的区域,土壤侵蚀因子(特别是土地利用)也是比较复杂的、空间上是多变的,必须利用 GIS 基础进行侵蚀环境和侵蚀过程的空间分析。(2) 中国人地矛盾更加突出,所以土地合理利用的要求更迫切。土壤流失的评价,主要应该着眼于土地合理利用和水土保持规划的要求,必须借助于 GIS 才能完成规划的空间定位与布设。(3) 中国水土流失面积大,类型复杂,只有在遥感技术支持下,才可能在有限的人力和经费支持下,比较快速的完成水土流失的调查和分析。

### 4.4 建立中国土壤侵蚀模型系统的设想

根据国内外土壤侵蚀定量评价研究的经验,立足于中国土壤侵蚀环境的基本特征和研究资料基础,这里提出中国土壤侵蚀定量评价模型系统的初步设想。(1) 多层次模型。在坡面、小流域、区域和全国等空间层次上分别研究和总结,建立适用于中国的土壤侵蚀定量评价模型体系。同时建立模型之间的尺度转换关系,使之构成一个完整的系统。(2) 多用途模型。根据其

用途和目的,需要开发至少两种类型,即土壤流失评价模型和土壤保持效益评价模型,前者主要用于土壤流失的评价和预报,后者用于水土保持治理效益的综合评价。

### 参 考 文 献

- 1 刘建善. 天水水土保持测验的初步分析. 科学通报, 1953(12): 59—65
- 2 牟金泽, 孟庆枚. 降雨侵蚀土壤流失预报方法的初步研究. 中国水土保持, 1983(6): 23—27
- 3 崔伟宏, 黄秀华, 王蓓, 等. 在信息系统支持下黄土地区 PSL 核型的试验研究. 见: 中国科学院国家计委综合会 黄土高原遥感调查试验研究 北京: 科学出版社, 1989. 290—299
- 4 孙保平, 赵廷宁, 齐实. USLE 在西吉在黄土丘陵区的应用. 中国科学院水利部水土保持研究所集刊, 1990 年第 12 集, 50—58
- 5 张宪奎, 许靖华, 卢秀琴, 等. 黑龙江省土壤流失方程的研究. 水土保持通报, 1992, 12(4): 1—3
- 6 陈法扬, 王志明. 通用土壤流失方程式在土壤水保站的应用. 水土保持通报, 1992, 12(1): 23—41
- 7 周伏建, 陈明画, 林福兴, 等. 福建省土壤流失预报研究. 水土保持学报, 1995, 9(1): 25—36
- 8 刘刚才, 罗治平, 张先婉. 川中丘陵区土壤侵蚀及其 P 值的确定. 水土保持学报, 1992, 7(2): 41—44
- 9 蔡强国. 坡面侵蚀产沙模型的研究. 地理研究, 1989(1): 94—102
- 10 蔡强国, 陆兆熊, 王贵平. 黄土丘陵沟壑区典型小流域侵蚀产沙过程模型. 地理学报, 1996, 51(2): 108—117
- 11 陆兆熊, 蔡强国, 王贵平, 等. 晋西黄土丘陵沟壑区小流域侵蚀产沙过程模型. 山西水土保持研究所等, 晋西黄土高原土壤侵蚀管理与地理信息系统应用研究, 北京: 科学出版社, 1992: 221—232
- 12 卢金发, 等. 1/50 万黄土高原地区资源与环境遥感系列图编委会, 黄土高原地区资源与环境遥感调查和系列制图研究. 北京: 地震出版社, 1991. 71—113
- 13 周佩华. 2000 年中国水土流失趋势预测与防治对策. 中国科学院水土保持研究所集刊, 1988 年第 7 集, 57—71
- 14 王玉宽. 小流域土壤侵蚀分布的定量研究[学位论文]. 陕西杨陵: 中国科学院水利部水土保持研究所, 1990
- 15 江忠善, 王志强, 刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1): 1—10
- 16 刘黎明, 林培. 黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀定量方法与模型的研究. 水土保持学报, 1993, 7(3): 73—79
- 17 杨勤科, 李锐. 论矢量地理信息系统的基本信息元. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 4(1): 66—70
- 18 L. D. Meyer. Evolution of the Universal Soil Loss Equation. J. Soil and Water Cons. 32(2): 99—104
- 19 江忠善, 李秀英. 黄土高原土壤侵蚀流失预报方程中降雨侵蚀力和地形因子的研究. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1988 年第 7 集, 40—45
- 20 马志尊. 应用卫星影像估算通用土壤流失方程各因子值方法的探讨. 中国水土保持, 1989(3): 24—27
- 21 王万忠, 焦菊英, 郝小品, 等. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布(I). 水土保持学报, 1995, 9(4): 5—18
- 22 王万忠, 焦菊英, 郝小品, 等. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布(II). 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1): 29—39
- 23 江忠善, 刘志, 贾志伟. 降雨因素与坡地水土流失关系的研究. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊, 1990 年第 12 集, 1—8
- 24 陈明华. 坡度和坡长对土壤侵蚀的影响. 水土保持学报, 1995, 9(1): 31—36
- 25 卜兆宏, 赵宏夫, 刘绍清, 等. 关于土壤流失量遥感监测的植被因子算式的初步研究. 遥感技术与应用, 1993, 8(4): 16—22
- 26 陈明华. 土壤可蚀性因子研究. 水土保持学报, 1995, 9(1): 19—24
- 27 吕喜盛. 土壤可蚀性 K 值的初步研究. 水土保持学报, 1992, 6(1): 63—70
- 28 阮伏水. 关于土壤可蚀性指标的讨论. 水土保持通报, 1996, 16(6): 68—72
- 29 田积莹. 子午岭连家砭地区土壤物理性质与土壤抗侵蚀性能指标的初步研究. 土壤学报, 1964, 12(3): 286—296
- 30 高维森, 王佑民. 土壤抗冲性研究综述. 水土保持通报, 1992, 12(5): 59—63

- 31 朱显谟. 强化黄土高原土壤渗透性和抗冲性的研究. 水土保持学报, 1993, 7(3): 1—10
- 32 孙立达, 洪惜英, 韩熙春, 等. 小流域土壤流失预报方程. 北京林学院学报, 1982(4): 33—40
- 33 孙立达, 孙保平, 陈禹, 等. 西吉县黄土丘陵沟壑区小流域土壤流失预报方程. 自然资源学报, 1989, 3(2): 141—153
- 34 付炜, 等. 黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀预报模型建立方法的研究. 水土保持学报, 1992, 6(3): 6—13
- 35 尹国康, 陈钦恋, 黄土高原小流域特性指标与产沙统计模型. 地理学报, 1989, 44(1): 32—44
- 36 金争平, 赵焕勋, 和泰, 等. 皇甫川小流域土壤侵蚀量预报方程研究. 水土保持学报, 1991, 5(1): 8—18
- 37 范瑞渝. 黄河中游地区小流域土壤流失量计算方程的研究. 中国水土保持, 1985, 85(2): 31—38
- 38 Lane L J, Renard K G, foster G R, Laflen J M. Development and Application of Modern soil Erosion Prediction Technology—The USDA Experience Aust. J. Soil Res. 1992, 30: 893—912
- 39 De Roo A P J, Wesseling C G, Ritsema C J. LISEM: A single—event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins I: Theory, input and output. Hydro. Processes, 1996, 10: 1107—1117
- 40 De Roo A P J, Offermans R J E, Cremers N H D T. LISEM: A single—event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins II: Sensitivity analysis, validation and application. Hydro. Processes, 1996, 10: 1107—1117, 1996, 10: 1119—1126
- 41 杨勤科, 李锐. LISEM —— 一个基于 GIS 的土壤侵蚀预报模型. 水土保持通报, 1998, 18(3): 82—89

## 遥感图像处理软件 ERDAS

ERDAS IMAGINE 是美国 ERDAS 公司开发的遥感图型处理系统, 它以先进的图像处理技术, 友好、灵活的用户界面和操作方式, 面向广阔应用领域的产品模块, 服务于不同层次用户的模型开发工具以及高度的 RS/GIS 集成功能, 为遥感及相关领域的用户提供了内容丰富而功能强大的图像处理工具, 代表了遥感图像处理系统未来的发展趋势。ERDAS IMAGINE 系统支持所有的 UNIX 系统和 WINDOWS 95/NT。通过与 ESRI 系统的合作, 开发了面向桌面制图和数据显示的软件工具 MapSheets 和基于 ARCVIEW 的图像分析模块 Image Analyst, 向用户提供一体化的 GIS/RS 解决方案。ERDAS IMAGINE 以模块化方式提供给不同层次的用户, 对于系统的扩展功能采用开放的体系结构以 IMAGINE Essentials, IMAGINE Advantage, IMAGINE Professional 的形式为用户提供了初、中、高三档产品构架, 使产品模块的组合具有极大的灵活性。IMAGINE Essentials: 包括制图和可视化核心功能的影像工具。其基本模块具有二维和三维显示、数据输入、排序与管理、地图配准、制图输出以及简单的分析。可以集成利用多种数据类型。扩充模块包括雷达图像处理(Radar)、矢量数据处理模块(Vector)、虚拟 GIS (Virtual GIS) 和开发工具(Developer's Toolkit) 等。其中 Vector 模块可以直接利用 ARC/INFO 的数据结构, 建立、显示和查询 ARC/INFO 的矢量图型数据, 完成矢量和栅格数据的双向转换。IMAGINE Advantage 是一个完整的图像地理信息系统(Imaging GIS)。其核心模块建立在 IMAGINE Advantage 基础之上, 增加了更加灵活的栅格 GIS 和单片航片矫正、地形编辑、影像镶嵌工具等强大功能。扩充模块包括数字航测(OrthoMAX), 雷达图像分析(Ortho Radar) 和大气矫正(ACOR2) 等。IMAGINE Professional: 面向从事复杂分析的专业用户, 是一个功能完整丰富的地理图像系统。在 IMAGINE Advantage 的基础上, 提供具有简单图型化界面的空间建模工具、高级的监督和监督分类器、分类优化和精度评定以及雷达分析工具等。除了 IMAGINE Essentials 和 IMAGINE Advantage 的可扩充模块以外, 还具有另外两个扩充模块: 亚图像分类器(Subpixel Classifier) 和专家分类器(Expert Classifier)。

(中国科学院水利部水土保持研究所遥感信息工程部)