

# 土壤水蚀过程研究回顾

史志华<sup>1</sup>, 宋长青<sup>2</sup>

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 北京师范大学, 北京 100875)

**摘要:** 在学科发展和社会需求的双重驱动下, 土壤水蚀过程一直是土壤侵蚀研究领域关注的焦点和热点。文章对土壤水蚀过程研究进行系统的回顾总结, 介绍了土壤水蚀过程的概念和研究方法; 重点从坡面土壤分离—搬运—沉积过程、流域土壤侵蚀—输移—堆积过程和水蚀预报模型 3 个方面, 阐述了土壤水蚀过程研究的核心内容及取得的主要成就, 并对国内外土壤水蚀过程研究进行了对比分析。在此基础上, 将土壤水蚀过程研究尚需解决的难点问题归纳为土壤水蚀过程与机理、水土流失尺度特征和水土保持措施防治机理 3 个方面。

**关键词:** 土壤水蚀过程; 坡面; 流域; 侵蚀模型

**中图分类号:** S157.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2016)05-0001-10

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.05.001

## Water Erosion Processes: a Historical Review

SHI Zhihua<sup>1</sup>, SONG Changqing<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070;

2. Beijing Normal University, Beijing 100875)

**Abstract:** Water erosion processes are the focus of soil erosion research driven by disciplinary development and social demands. By summarizing and analyzing the studies of water erosion, this paper discussed: (1) The concept and study methods of water erosion; (2) The main content and achievements of water erosion processes studies, mainly including detachment-transport-deposition on hillslope, erosion-transport-accumulation in watersheds, and water erosion models. Finally, research challenges and future directions were also provided, including water erosion mechanisms, multi-scale features of water erosion, and the mechanisms of soil and water conservation practices.

**Keywords:** water erosion processes; hillslope; watershed; water erosion model

土壤侵蚀是土壤及其母质在外营力作用下, 被剥蚀、破坏、分离、搬运和沉积的过程<sup>[1]</sup>。土壤侵蚀将导致严重的后果: 一是肥沃表土的流失, 破坏土地资源, 降低土地生产力, 影响粮食和生态安全; 二是随侵蚀过程迁移的泥沙淤积阻塞江河湖泊、加剧旱涝灾害, 迁移的污染物引起河流、湖泊、水库的富营养化等, 从而对下游地区的生态环境和社会经济带来严重影响; 三是侵蚀搬运使土壤碳氮磷的含量与组分发生变化, 进而影响全球生源要素循环乃至成为重要的全球气候变化驱动要素<sup>[2]</sup>。

土壤侵蚀按外营力可分为水力侵蚀、风力侵蚀、重力侵蚀、冻融侵蚀等类型。水力侵蚀简称水蚀, 约占全球侵蚀区域的 50%, 主要发生在 N50°—S40°的湿润、半湿润与半干旱地区<sup>[3]</sup>, 这些区域也是人类活动最为活跃与集中、社会发展程度较高的地区。如我国土壤水蚀主要分布在“胡焕庸线”东南侧, 该区域集聚了全

国 94% 的人口和 96% 的 GDP, 人口压力和社会经济发展导致植被破坏、坡耕地垦殖、过度放牧等不合理的土地利用, 造成土壤水蚀面积达 129 万 km<sup>2</sup><sup>[4]</sup>。土壤水蚀过程发生在地表各圈层相互作用最为强烈的地区, 受到自然和社会经济因素的综合影响。因此, 在学科发展和社会需求的双重驱动下, 土壤水蚀一直是各种土壤侵蚀类型中的关注焦点和研究热点。

## 1 土壤水蚀过程概念

土壤水蚀(water erosion)是土壤及其母质在降雨、径流等水力作用下被破坏、分离、搬运和沉积的过程<sup>[5]</sup>。降雨和径流为土壤水蚀过程提供了能量和载体, 是其发生发展的必要条件。Ellison<sup>[6]</sup>将水蚀过程分为雨滴侵蚀过程、径流侵蚀过程、雨滴搬运过程、径流搬运过程等子过程。Rose 等<sup>[7]</sup>进一步将坡面侵蚀过程分为降雨分离、径流分离与搬运和泥沙沉积 3 个

收稿日期: 2016-05-26

资助项目: 国家自然科学基金项目(41525003)

第一作者: 史志华(1970—), 湖北竹溪人, 男, 教授, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: pengshi@mail.hzau.edu.cn

通信作者: 宋长青(1961—), 黑龙江人, 男, 研究员, 主要从事地球科学基金项目管理。E-mail: songcq@nsfc.gov.cn

过程,并认为坡面侵蚀和沉积过程以不同的速率同时同地连续发生,当侵蚀速率大于沉积速率时,坡面以侵蚀过程为主;相反,则以沉积过程为主。可见,土壤水蚀过程研究的核心是以降雨击溅、径流冲刷对土壤的分离、搬运和沉积过程为对象,揭示子过程间相互转化、相互影响的机理,及其与环境因子的关系(图 1)。影响水蚀的环境因子包括气候、土壤、地形和土地利用等,每个因子不仅单独影响水蚀过程,且因子之间也相互作用。加之降雨过程的随机性、环境因子的空间变异及其格局的复杂性,决定了水蚀过程是一个典型的非线性复杂系统。

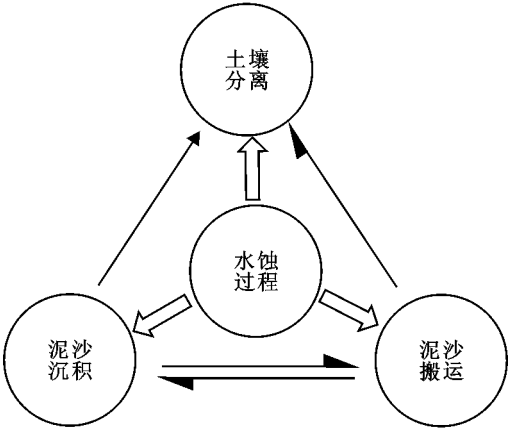


图 1 土壤水蚀子过程间的耦合关系

影响水蚀过程的因子虽复杂多变,但从力学角度都可归结为水的侵蚀力和土壤的抗侵蚀力之间相互作用,其它影响因子都可通过这两种作用力表现出来<sup>[5]</sup>。因此,土壤水蚀研究注重“水—土”界面的动力过程与机制,逐步形成以侵蚀—搬运—沉积过程的定量描述为核心,建立关键过程模型为目标的科学体系。研究内容从对水蚀现象描述和影响因子试验研

究到对水蚀过程机理、水蚀预报模型和水土流失防治技术的研究;从土壤水蚀对土壤质量的影响到对面源污染、碳循环与全球变化的响应。研究尺度从传统的田块向陆地表层系统扩展,通过水蚀过程对物质搬运和沉积影响的研究,为理解陆地表层系统变化过程与机理提供基础信息。总之,土壤水蚀研究主要通过关键要素和过程的识别,揭示侵蚀产沙机理并建立预报模型,为土壤侵蚀评价、水土保持措施配置及其效益评估提供科学依据。

2 土壤水蚀过程的研究方法

土壤水蚀研究方法经历了从定性到半定量与定量,由单一手段到多途径、多学科协同研究的道路(表 1)。(1)野外调查法,即在野外通过地表状况和土壤剖面的观察,并结合周围自然环境和土地利用情况的综合分析来掌握土壤侵蚀状况。这是研究土壤侵蚀的基本和传统方法,该方法简单但易受主观影响,并只了解结果而不涉及侵蚀过程。(2)19 世纪末出现的径流小区是土壤水蚀研究的最经典方法,为后来 USLE、RUSLE 等土壤侵蚀研究奠定了基础<sup>[1]</sup>。径流小区的观测样地较小,不可能模拟一个区域或流域的景观要素变异和水文过程,以小区数据为基础进行外推获得大尺度的信息并不可靠。(3)水文资料法则利用长期的水文观测资料推算流域土壤侵蚀量,利于验证流域尺度的侵蚀产沙模型和评估水资源污染风险。但该方法只能获取流域出口数据,流域内部当作“黑箱”处理,因而无法掌握流域内土壤侵蚀的过程信息<sup>[8]</sup>。(4)沉积法通过测量水库等的拦淤量及分析泥沙沉积旋迴信息来反演泥沙来源,有利于研究长时间尺度流域侵蚀产沙特征,但沉积旋迴划分难度大因而对技术要求较高。

表 1 土壤水蚀研究方法比较

| 研究方法   | 方法简介                                                                             | 优缺点                                                                     |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 野外调查法  | 环境要素调查基础上的主观评价,可整体把握土壤侵蚀强度。                                                      | 易于操作,方法成熟;但易受主观影响,精度有限。                                                 |
| 径流小区法  | 1877 年首次用于研究不同因素对侵蚀过程的影响,可获得径流、土壤入渗和侵蚀泥沙等数据,依此建立通用土壤流失方程(USLE)。                  | 方法成熟,与人工模拟降雨器结合易获得大量数据;但难消除小区边界效应,只用于坡面尺度,数据外推精度低。                      |
| 水文资料法  | 利用长期水文观测资料,通过对断面控制范围测量,获得径流量、悬移质泥沙含量及流域土壤侵蚀量等数据以研究土壤侵蚀现状。                        | 研究范围广,效率高,尤其利于验证流域尺度的侵蚀产沙模型和评估水资源污染风险;但需有丰富的水文资料,结果受泥沙输移比影响,无法明确侵蚀过程。   |
| 沉积法    | 测量水库等的拦淤量及分析泥沙沉积旋迴信息从而获得集水区泥沙沉积速率及输沙率。                                           | 含长时间尺度信息,利于研究长时间尺度流域侵蚀产沙特征,可反演泥沙来源;但沉积旋迴划分难,技术要求高。                      |
| 示踪法    | 示踪物质包括 Pb-210 和 Cs-137 等放射性核素、土壤颗粒矿物组成、形态、磁性等指标,稀土元素,生物标志物等,而复合指纹识别技术综合了上述方法的优点。 | 对探明土壤水蚀过程中泥沙分布、扩散运移过程、沉积规律及来源意义重大;但核素示踪对参考剖面要求高,稀土元素示踪成本高而颗粒矿物分析指标多难推广。 |
| 现代信息技术 | GIS、RS 等技术与侵蚀模型结合用于研究流域和区域尺度的长时间序列土壤侵蚀情况。                                        | 效率高,范围广,利于拓宽研究的时空尺度,区域土壤水蚀评估、测量和调控的有效方法,实现土壤侵蚀动态监测;但技术要求高,精度有限。         |

随着科学技术的不断发展,示踪法在近几十年被广泛用于土壤水蚀过程的研究。20 世纪 60 年代兴起的 Cs-137、Pb-210 等放射性核素示踪可定量研究土壤平均侵蚀率和泥沙来源<sup>[9]</sup>;土壤颗粒矿物组

成、形态、磁性等指标,稀土元素,生物标志物等也被应用于泥沙来源的研究,但对流域次降雨的侵蚀产沙分析仍有待深入<sup>[10]</sup>。20 世纪 90 年代兴起复合指纹识别技术综合了以上方法优点,成为探明土壤水蚀过

程中运移分布、沉积规律及泥沙来源的重要手段<sup>[11]</sup>。GIS、RS 等现代信息技术与土壤水蚀模型结合,应用于土壤水蚀评价和土壤水蚀动态研究,在时间和空间上增加了土壤水蚀过程研究的精度,但该方法依赖于其他方法的成果和对侵蚀过程的理解。总之,各种研究方法都存在其局限性,但借助系统科学新思维和物质科学新技术,仍极大提高了对土壤水蚀过程的认知水平和分析能力。

### 3 土壤水蚀过程核心内容

源于地球表层自然界的等级组织、空间异质性和复杂性,土壤水蚀过程有其发生的特征尺度和研究尺度。坡面是侵蚀发生的基本单元,流域则是侵蚀产沙相对独立的系统,因此,坡面和流域是揭示水蚀本质与侵蚀防治的两个重要研究尺度。两个尺度上分离、搬运和沉积过程的表现形式与发生发展的机制不同,但它们相伴而生、相互作用。因此,揭示坡面和流域尺度上水蚀过程的发生发展规律及其环境要素影响机制,并建立预报模型是土壤水蚀过程研究的核心内容。

#### 3.1 坡面土壤分离—搬运—沉积过程

坡面水蚀过程可分为降雨分离与搬运、径流分离与搬运、泥沙沉积等,是降雨与土体的相互作用过程,其实质上是能量的相互转化和传递过程,因此具有一定的连续性(图 2)。

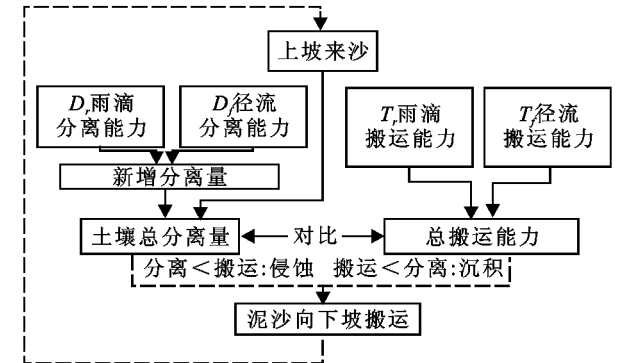


图 2 坡面土壤分离—搬运—沉积过程<sup>[1]</sup>

土壤分离是指降雨击溅或径流冲刷作用下,土壤颗粒脱离土体的过程。土壤分离主要受控于侵蚀外营力和土壤可蚀性(表 2),侵蚀外营力可分为雨滴溅蚀和径流剥蚀。溅蚀是指雨滴直接打击地表,破坏土壤结构、剥离分散土壤颗粒使其产生位移的现象。溅蚀不但可使土体颗粒破碎、分散和飞溅,破坏土壤表面结构,而且可击实表层土壤,导致土壤空隙堵塞而形成地表结皮,进而阻碍降雨入渗,促使地表径流形成和流动,引起面蚀的发生。相对而言,雨滴溅蚀本身的搬运能力较差,但可为径流提供可搬运的物质。雨滴击溅可增大径流的紊动性和动能,增强径流分散和挟沙能力。按照降雨历时的不同时期,溅蚀可分为干土溅散、湿土溅散、泥浆溅散和地表板结 4 个阶段。

当地表积水或漫流时,雨滴溅蚀量取决于水深,当地表水深超过某一临界水深时,雨滴能量消耗于地表水中,可屏蔽雨滴的撞击作用<sup>[12]</sup>。

表 2 坡面土壤分离过程的影响因素

| 影响要素  | 指标     | 影响方向 | 参考文献    |
|-------|--------|------|---------|
| 侵蚀动力  | 雨滴直径   | +    | [13]    |
|       | 降雨强度   | +    | [13]    |
|       | 雨滴动能   | +    | [14]    |
|       | 水流剪切力  | +    | [15—16] |
|       | 水流功率   | +    | [17]    |
|       | 单位水流功率 | +    | [18]    |
|       | 水流挟沙力  | +    | [19]    |
| 土壤可蚀性 | 径流输沙率  | —    | [19]    |
|       | 容重     | —    | [20]    |
|       | 团聚体    | —    | [21]    |
|       | 有机质    | —    | [22]    |
|       | 砂粒含量   | —    | [22]    |
|       | 粉粒含量   | +    | [20]    |
|       | 黏粒含量   | —    | [20]    |
| 土壤性质  | 粘结力    | —    | [18]    |

注:“+”为正相关;“—”为负相关。

影响雨滴溅蚀的因素可概括为气象因素、土壤因素、地形因素和植被因素。气象因素主要包括降雨特性和风力风向。降雨特性中降雨强度、雨滴级配、雨型、雨滴终速对溅蚀的影响最为明显。降雨动能( $R$ ,  $W/m^2$ )是量化降雨特性的重要指标,其计算公式为<sup>[1]</sup>:

$$R = \frac{\rho I v^2 (1 - C_v) \cos \theta}{2} \tag{1}$$

式中: $\rho$  为水的密度( $1\,000\text{ kg/m}^3$ ); $I$  为降雨强度( $m/s$ ); $v$  为雨滴速度( $m/s$ ); $C_v$  为地表植被盖度(%); $\theta$  为地面坡度( $^\circ$ )。

溅蚀作用受风的影响强烈,风的推动作用会增加雨滴的打击能力,风向则可改变雨滴的打击角度。土壤因素对溅蚀的影响主要体现为其抵抗溅蚀的能力,可以用土壤颗粒组成、水稳性团聚体含量、前期含水量、孔隙度等来表征。细砂与粗砂易被击溅,更细的土壤颗粒因具有粘结力则不易被击溅<sup>[6]</sup>;水稳性团聚体越多,溅蚀量越少。在地形因素中,坡度和坡向决定着被溅起土粒的移动方向,坡长则通过影响汇流而影响径流深度,进而作用于溅蚀过程。溅蚀量随坡度的增大多呈现先增大后减小趋势,存在临界坡度,但是在大雨强下临界坡度消失<sup>[23]</sup>。植被和枯枝落叶层可拦截雨滴,消减降雨动能,阻止土粒分离,并能防止土壤板结,利于入渗,从而减小溅蚀。

径流剥蚀是指当地表径流作用于土壤的力大于土壤阻力时,土壤颗粒脱离土体的过程。从定义中可以看出,径流剥离土壤的能力与径流特性和土壤性质有关。其中径流特性多以切应力(如 WEPP 模型)、水流功率(如 GUEST 模型)和单位水流功率(如 EU-

ROSEM 和 LISEM 模型)来描述。土壤性质则以土壤可蚀性和土壤临界剪切力(如 WEPP 模型)予以量化,两者是定量计算土壤流失的重要指标。径流分离土壤的过程包括冲刷、沟头下切、侧蚀和剥蚀等子过程,但由于在不同的土壤类型中侵蚀子过程具有差异性,Elliot 和 Laflen<sup>[24]</sup>将这些过程进行集总处理,建立了土壤分离能力( $D_c$ )的表达式:

$$D_c = K_r(\tau_f - \tau_c) \quad (2)$$

式中: $K_r$ 为细沟可蚀性; $\tau_f$ 为水流剪切力; $\tau_c$ 为土壤临界剪切力。

进一步研究发现,在土壤分离过程模拟中,用能量平衡替换传统力平衡更具优势,即用表征能量的水流功率替换表征力的水流剪切力,可显著提高土壤分离能力的预测精度<sup>[25]</sup>。径流功率( $\Omega$ ,  $W/m^2$ )表达式:

$$\Omega = \frac{\rho g S Q}{W} \quad (3)$$

式中: $\rho$ 为水的密度( $1\,000\text{ kg/m}^3$ ); $g$ 为重力加速度( $9.8\text{ m/s}^2$ ); $S$ 为坡度的正弦值; $Q$ 为水流速率( $m^3/s$ ); $W$ 为细沟宽度或坡面宽度( $m$ )。

土壤可蚀性是指土壤是否易受侵蚀破坏的性能,也就是土壤对侵蚀营力剥蚀和输沙的敏感性,与土壤粘结力、土壤类型、容重、质地、有机质、土壤含水量、团聚体等土壤性质密切相关。土壤临界抗剪切力是表征土壤力学性质的一个重要指标,其值大小反应土体抵抗外力作用而发生剪切变形破坏的能力,与土壤凝聚力和内摩擦角有关<sup>[26]</sup>。侵蚀泥沙源于土壤结构破坏而脱离土体的土壤颗粒,因此土壤结构被认为是影响侵蚀过程最主要和直接的因子<sup>[27]</sup>。团聚体作为土壤结构的基本单元,其破碎机制与过程都会对土壤分离造成影响。Le Bissonais<sup>[28]</sup>提出土壤水蚀过程中团聚体破碎机制包括:消散、机械破碎、矿物膨胀裂解等。基于此,Shi 等<sup>[29]</sup>在充分考虑侵蚀外力对侵蚀过程作用机理的前提下,利用不同孔径纱网覆盖控制雨滴打击动能,采用不同的土壤湿润速率量化消散作用,阐明了雨滴动能、水流功率、土壤湿润速率与泥沙颗粒间的耦合关系;提出了土壤团聚体非稳定性参数( $K_a$ )的计算公式:

$$K_a = (MWD_{SW} - MWD_{FM}) \times \frac{(MWD_{SW} - MWD_{WS})^2}{(MWD_{SW})} \quad (4)$$

式中: $MWD$ 为团聚体平均重量直径; $FM$ 、 $WS$ 和 $SW$ 分别表示团聚体破碎机制中的快速湿润、预湿振荡和缓慢湿润。在此基础上,耦合降雨外在因素与土壤内在因素的作用机理,综合土壤团聚体参数( $K_a$ )、坡度( $\theta$ )、降雨( $I$ )与侵蚀量( $D_i$ )的关系,构建了陡坡侵蚀机理方程<sup>[29]</sup>:

$$D_i = 0.24 K_a I^2 (1.05 - 0.85 e^{-4 \sin \theta}) \quad (5)$$

泥沙搬运是指分离的土壤颗粒被径流挟带输移的过程;泥沙沉积则是径流搬运的泥沙颗粒重新返回地表或由运动状态变为静止状态的过程。泥沙根据其搬运形式可分为接触质、层移质、跃移质和悬移质 4 种。泥沙运动形式和输移距离取决于泥沙自身的性质和坡面径流水动力学特性。侵蚀泥沙主要通过悬移一跃移和接触质的运动方式被输出坡面,而坡面不具备层移质发生的水动力条件<sup>[23]</sup>。悬移运动是指依靠水流的紊动所形成的涡体将泥沙颗粒悬浮在水中,使其沿水流方向运动,且其在水流方向上的运动速度与水流本身的速度基本一致的泥沙颗粒运动方式。如果紊动极不稳定,涡体的紊动能变化较大,则会出现泥沙颗粒一会悬浮在水中,而一会又沉落在底部,这种跳跃式的运动方式称为跃移运动。接触质的运动方式则指当水流产生的拖拽力大于泥沙颗粒与坡面之间的摩擦力时,土粒在坡面上发生滑动或滚动而输出坡面的运动方式<sup>[20]</sup>。由于不同粒径泥沙的搬运方式不同,致使坡面侵蚀泥沙呈现大颗粒和小颗粒都容易被搬运,而呈双峰分布。在陡坡条件下,细颗粒以悬移/跃移方式搬运,粗颗粒以滚动方式搬运<sup>[30]</sup>。利用泥沙和土壤颗粒的累积分布曲线,划分出陡坡条件下悬移/跃移和滚动搬运的粒径分界约  $0.5\text{ mm}$ <sup>[31]</sup>。

水流挟沙力是土壤分离与泥沙输移的关键参数,长期以来是土壤水蚀过程研究重点。坡面水流挟沙力是特定水动力条件下坡面水流可输移泥沙的上限,是界定坡面流处于分离还是沉积状态的临界值。研究表明,在较大坡度范围内,适用于估算缓坡的坡面挟沙力的 Govers 模型和 Yalin 公式存在高估现象,而 ANSWERS 和 WEPP 模型的挟沙力方程则存在低估现象,表示为:

$$T_c = K_t \tau_f^{3/2} \quad (6)$$

式中: $K_t$ 为传输系数; $\tau_f$ 为水流剪切力。 $K_t$ 随着  $\tau_f$  的增大而呈幂函数增大。为确保传输系数的稳定性,并将其适用范围拓展到陡坡条件,Zhang 等<sup>[32]</sup>将方程(6)修订为:

$$T_c = K_t \tau_f^{4/2} \quad (7)$$

土壤分离、泥沙搬运和沉积是相互影响,相互制约的复杂过程。一般认为,径流剥离土壤的速率与输沙率呈反比,随着径流输沙率的增大,用于输沙的能量增加,导致水流紊动性下降,流速减小,阻力增大,侵蚀动力下降,相应地用于剥离土壤的能量减小。Foster 和 Meyer<sup>[33]</sup>提出了土壤分离速率( $D_r$ )与土壤分离能力( $D_c$ )、坡面流输沙率( $q_s$ )、坡面流挟沙力( $T_c$ )间的线性藕合关系:

$$D_r=D_c\left(1-\frac{q_s}{T_c}\right)$$

(8)

根据上述公式,当径流输沙率小于挟沙力,且径流剪切力大于临界剪切力时,分离—搬运—沉积过程同时发生;当径流输沙率等于挟沙力,且下垫面的水动力状况不发生改变时,则处于平衡状态;当径流输沙率大于挟沙力时,泥沙发生沉积。Zhang 等<sup>[34]</sup>从水动力学机理上解释了该耦合关系的科学性,初步探明了侵蚀外力对土壤分离、泥沙搬运和沉积过程的影响机制。

3.2 流域土壤侵蚀—输移—堆积过程

微观尺度上的土壤侵蚀问题与物理学研究的对象几乎一致,基于连续介质的力学原理,但当空间尺度扩大到一定程度时,原来的“机理”就模糊到一种几乎无法辨认的程度,因此,坡面与流域尺度的土壤水蚀过程有显著差别(表 3)。流域的地形、植被、土壤等空间变异及其不同条件组合的随机性,决定了它是一种典型的非线性分布参数系统。随空间尺度的加大,这种分布参数特征愈强。由于流域非线性的分布参数特征以及侵蚀、搬运、堆积过程中泥沙输移的非连续性,建立一个物理机制清楚的流域水蚀过程的确定性方程几乎不可能。一般在流域出口通过测定径流和泥沙可获得土壤流失的总量,是流域综合环境要素对泥沙的影响,且从坡面到流域出口,还存在多重尺度的沟道体系。如果只是把整个流域作为黑箱处理,就很难解释流域内多重尺度上土壤水蚀过程与机制。因此,国内外研究者一直在寻找合适的方法来解决基于分布参数系统为特征的流域土壤水蚀过程与环境要素耦合的机制。

表 3 坡面和流域的土壤水蚀过程研究异同<sup>[35]</sup>

| 尺度   | 坡面        | 流域        |
|------|-----------|-----------|
| 影响因素 | 植被、土壤斑块组合 | 植被、土壤格局   |
|      | 地形        | 土地利用方式    |
|      | 气象因子      | 气候        |
|      | 干扰        | 干扰        |
| 研究重点 | 影响因素与侵蚀过程 | 景观格局与侵蚀产沙 |
|      | 反馈机制解析    | 过程耦合      |

传统研究多采用统计方法,如相关分析与回归预测法、多变量分析与复合变量预测法,研究地形、土壤、植被等环境因子对流域土壤侵蚀—输移—堆积过程的影响。地形对流域侵蚀产沙的影响在于其决定地表径流的汇流路径,影响地表径流速度、汇水来源<sup>[36]</sup>。流域尺度上,土壤类型具有差异性,即使同一种土壤,随着气候、植被等条件的变化,土壤性质也会发生变化,由此导致土壤可蚀性具有差异性,进而影响流域侵蚀产沙过程。植被能够影响地表反射率、地表温度、下垫面的粗糙度和土壤—植被—大气连续体间的水分交换,在多个层次上影响降雨、蒸发和径流,

因此揭示降雨、植被与侵蚀产沙过程三者之间的关系,成为流域侵蚀产沙过程研究的重要科学问题。

近年来,随着对流域土壤侵蚀—输移—堆积过程整体性、系统性认识的深入,研究的重点由解析影响因素与侵蚀产沙过程关系转变为揭示格局与侵蚀产沙过程的耦合机理<sup>[35]</sup>。针对侵蚀环境因子间存在共线性的问题,而传统主成分分析、因子分析等方法研究流域环境因子与径流泥沙关系时会夸大或掩盖某些因子的作用。因此,Yan 等<sup>[37]</sup>利用偏最小二乘回归(PLSR)识别出土地利用结构与格局是流域侵蚀产沙的主导因子,可解释 65% 的泥沙变异;地形、土壤等自然因子可解释 18% 的变异。相对于流域地形、土壤等环境因子,土地利用具有易变性,Shi 等<sup>[38]</sup>对农地、林地、草地等构成的景观格局对流域侵蚀产沙的贡献进行了量化,发现景观多样性指数、聚集度、联结度、斑块密度等是影响土壤侵蚀和流域产沙的关键格局指数。但景观格局对流域侵蚀产沙的作用不是简单叠加,而是具有高度的非线性特征<sup>[39]</sup>,因此需借助非线性的理论与方法进行更深入的研究。

基于“格局—过程—尺度”发展的“源汇”景观理论为探讨景观格局与土壤流失的关系提供了直接的研究思路<sup>[40]</sup>。该理论认为,流域一些景观是“侵蚀源”,而一些景观起到“沉积汇”的作用。例如,导致土壤侵蚀增加的坡耕地可看作“源”景观;有助于土壤侵蚀减少的林地、草地等可看作“汇”景观,降雨的时空变化可使景观单元的“源汇”功能发生转化<sup>[41]</sup>。侵蚀泥沙能否从坡面被搬运至流域出口取决于不同尺度上及尺度间的“源汇”景观连通度。较高的径流、泥沙源区的连通性和有效的坡面与沟道系统连接利于景观单元间的泥沙搬运。泥沙“源”距离出口越近,泥沙越容易被搬运;泥沙“源”之间连通性越强,或与出口直接连通的“源”单元数量越多,坡面泥沙输出量越大<sup>[42]</sup>。“汇”单元在空间的相互连通及其控制区域与坡底沟道的连通,制约着坡面泥沙向沟道的输送,有助于泥沙的沉积。景观连通度主要通过景观连通度指数和具有模拟泥沙传输功能的土壤侵蚀模型进行表达<sup>[43]</sup>。如分布式侵蚀模型 WATEM/SEDEM 通过侵蚀量和传输能力的对比来确定泥沙沿水流路径的传输和沉积;当侵蚀量与上游来沙量之和大于传输能力,则泥沙输出量等于传输能力,净沉积发生;反之则泥沙全部输出,净侵蚀发生<sup>[44]</sup>。

模型是研究流域水蚀过程及其形成机制的有效手段,一般可以分为经验模型和物理模型。经验模型不能预报土壤侵蚀的时空分布及其动态过程,对于深入理解土壤侵蚀的过程与机理有一定困难。国际上流域模型大多是在坡面模型基础上,将流域划分为地

块和沟道分别开展模拟,再进行集成<sup>[39]</sup>。但流域非线性的分布参数特征决定了很难用简单“坡面+沟道”来描述流域的水蚀过程,而且“坡面+沟道”的物理模型多强调土壤水蚀的物理过程,往往忽视了空间和尺度变异,模型输入参数的空间和尺度变异性,会显著增大模型输出的不确定性。实际上,流域尺度上侵蚀呈现区化现象,即侵蚀区、输移通道、堆积区是可较清楚划分,并与地貌、沟道、植被覆盖、气候因素等宏观景观特征相契合。由此结合“源汇”景观理论与坡面土壤分离—搬运—沉积过程,将地形、植被、土壤、水保措施等景观要素的空间异质性涵盖在内,量化景观位置之间、景观单元间的泥沙传输量;在明确景观格局与土壤水蚀过程相互关系的基础上,构建多因子景观格局与土壤水过程耦合框架;通过景观格局动态模型与土壤水蚀过程模型的集成,揭示流域内较高层次土壤侵蚀—输移—堆积过程。

3.3 水蚀预报模型

水蚀预报模型是研究侵蚀过程的有效手段,能克服观测实验在数据获取性、重复性、连续性等方面的

缺陷,有效揭示内在机制,发现研究薄弱环节,带动和促进机理的研究,并可作为土壤侵蚀防治与治理效益评价的科学依据。自 20 世纪 60 年代以来,国内外土壤侵蚀预报模型已取得丰富的研究成果。根据不同时空尺度上的建模手段和方法,土壤侵蚀模型可分为物理模型、经验模型、概念模型和半定量模型(图 3 和表 4)。在坡面尺度上,次降雨条件下土壤侵蚀模拟以物理模型为主,但其关注的侵蚀子过程有限,且所需参数多,对数据要求较高;而年均土壤流失量的模拟则以经验模型为主,概化了各侵蚀子过程,对数据要求较低,但其应用受到建立条件的限制。概念模型介于物理模型和经验模型之间,是将流域概化为一系列的储存库(internal storage),描述存储库间的产流汇流和泥沙输移机制,但并不详细刻画侵蚀过程细节,因此所需参数较物理模型少,且较经验模型更具有物理意义。半定量模型主要通过对影响因子进行赋分后构建评价指数,以评价指数对产沙量进行拟合估算。因此,相对于概念模型和半定量模型,物理模型和经验模型受到的关注程度更高。

表 4 代表性土壤侵蚀模型类型及参数

| 模型类型 | 模型          | 尺度<br>(空间/时间) | 模型参数                                                                                                                             | 参考文献    |
|------|-------------|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 经验模型 | USLE/ RUSLE | 坡面/年          | R:降雨侵蚀力因子;K:土壤可蚀性;L:坡长;S:坡度;C:作物覆盖和管理;P:水保措施                                                                                     | [45—46] |
|      | CSLE        | 坡面/年          | R:降雨侵蚀力因子;K:土壤可蚀性;L:坡长;S:坡度;B:水土保持生物措施;E:水土保持工程措施;T:水土保持耕作措施                                                                     | [47]    |
| 概念模型 | AGNPS       | 流域/次降雨        | 径流:径流曲线法(SCS);土壤流失量;USLE 模型的因子;泥沙沉积:剪切力、流速、泥沙粒径分布                                                                                | [48]    |
|      | SWAT        | 流域/连续         | 径流:径流曲线法(SCS);土壤流失量;MUSLE 模型的因子;泥沙沉积:剪切力、流速、泥沙粒径分布                                                                               | [49]    |
|      | MMF         | 流域/年          | 土壤分离:降雨强度、USLE 模型中 K 因子、径流量、坡度、土壤粘结力;泥沙搬运:径流、坡度、USLE 模型中 C、P 因子                                                                  | [50]    |
| 物理模型 | CREAMS      | 流域/次降雨        | 径流:径流曲线法(SCS)或 Green-Ampt 模型;土壤分离:USLE 模型中 R、K、C 因子;泥沙搬运:剪切速度、剪应力、摩擦坡度、土粒比重、泥沙粒径                                                 | [51]    |
|      | EUROSEM     | 流域/次降雨        | 径流:水量平衡、土壤入渗率;土壤分离:降雨动能、单位水流功率、径流输沙率、抗剪强度、泥沙沉降速度                                                                                 | [18]    |
|      | WEPP        | 坡面、流域/连续      | 径流:径流曲线法(SCS)或 Green-Ampt 模型;土壤分离与搬运:利用坡度、植被、剪应力、抗剪强度、粗糙度、有机质、根生物量                                                               | [52]    |
|      | ANSWERS     | 流域/次降雨        | 径流:Green-Ampt 模型;土壤分离:USLE 模型中 K、C 因子,雨强、单宽流量、坡度、土壤可蚀性、径流前切力、土壤临界剪切力;泥沙输移:Yalin 公式、坡度、单宽流量                                       | [53]    |
|      | LISEM       | 流域/次降雨        | 径流:植被截留(Hoyningen-Huene 方程)、水分运移(Richards 方程)与填注(Onstad-Linden 方程);分离:降雨动能、团聚体稳定性、水流宽度、起沙速度、含沙量、临界剪切速度、饱和土壤粘结力;输沙:坡度、平均流速、土壤中值粒径 | [54]    |

经验统计模型是通过试验观测资料和数理统计技术,确定影响土壤侵蚀的相关因素,得出计算土壤流失量的方程式<sup>[55]</sup>。基于大量试验观测资料,将降雨侵蚀力、土壤可蚀性、坡度坡长、作物覆盖与管理以及水土保持措施作为影响土壤侵蚀的五大因子,美国建立了著名的通用土壤流失方程(USLE—Universal Soil Loss Equation)<sup>[45]</sup>。该方程所依据的资料丰富,结构简单明

了,具有较强的实用性。但是,以年侵蚀资料为基础建立起来的 USLE,无法进行次降雨土壤侵蚀的预报,且仅适用于缓坡,因而其推广应用受到限制。随着对土壤侵蚀过程认识的不断深入以及科学技术手段的不断发展,美国土壤保持局对 USLE 进行了修正,建立了修正版通用土壤流失方程(RUSLE—Revised Universal Soil Loss Equation)<sup>[46]</sup>。RUSLE 与 USLE 的结构相

同,但对各因子的含义与算法做了必要修改,并引入了侵蚀过程的概念,例如,考虑了土壤分离过程等。Liu 等<sup>[47]</sup>以 USLE 为基础,考虑我国陡坡土壤侵蚀特征以及长期形成的系统化防治措施,将 USLE 中的作物和水土保持措施两大因子修改为水土保持生物、工程和耕作措施 3 大因子,建立了中国土壤流失预报方程(CSLE—Chinese Soil Loss Equation)。

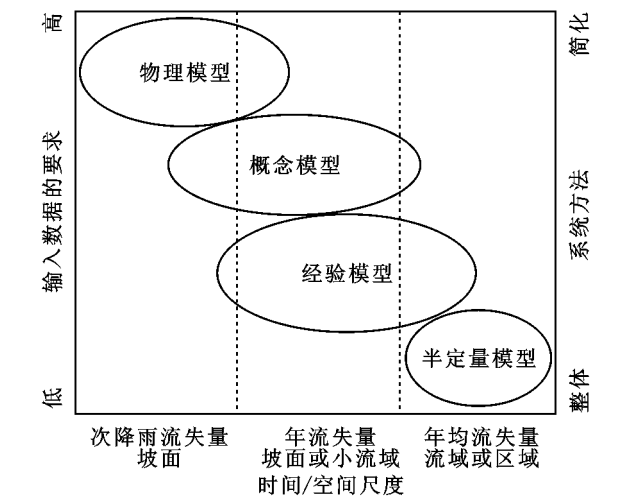


图 3 土壤水蚀模型构建的时空尺度特征

物理模型以土壤侵蚀物理过程为基础,根据降雨、径流条件来描述土壤侵蚀产沙过程,从而预报给定时段内土壤侵蚀量<sup>[1]</sup>。美国的 WEPP 模型是基于侵蚀过程的计算机模型,是目前国际上最为完整与复杂的土壤侵蚀预报模型。WEPP 模型以 Ellison<sup>[6]</sup>划分的 4 个侵蚀子过程为基础,即雨滴侵蚀、径流侵蚀、雨滴搬运和径流搬运过程,其基本理论是:细沟间侵蚀以降雨侵蚀为主,而细沟侵蚀以径流侵蚀为主;输沙量受产沙量和输沙能力的制约。WEPP 模型几乎涉及到与土壤侵蚀相关的所有过程,包括天气变化、降雨、截留、入渗、蒸发、灌溉、地表径流、地下径流、土壤分离、泥沙输移、植物生长、根系发育、根冠生物量比、植物残茬分解等。欧洲土壤侵蚀模型(EROSEM—European Soil Erosion Model)是根据欧洲平原地区的侵蚀特点所建立,充分考虑到了壤中流在侵蚀过程中的重要作用<sup>[18]</sup>。荷兰土壤侵蚀模型 LISEM(the Limburg Soil Erosion Model)则是基于荷兰南部黄土区实验观测资料,考虑了土壤侵蚀产沙

的各个环节,可模拟土壤侵蚀发生的过程。LISEM 模型实现了土壤侵蚀模型与 GIS 技术的有效结合,使研究结果更具直观性。

概念模型作为物理模型和经验模型的中和,其基本思想是将流域分解为一系列主要的“储存库”模块,用较为简单的经验关系分别描述各个“库”的内部动态和“库”之间的相互联系。如代表性概念模型 SWAT(Soil and Water Assessment Tool),能够对不同土壤种类、用地类型和土地管理措施下多尺度流域内一系列复杂的水文过程进行模拟和预测。SWAT 模型对流域水文过程的模拟主要包括 2 部分,即坡面产流与汇流陆面部分水文循环,河道汇流部分。前者模拟通过地表进入河道的水、沙、营养物质运输过程,后者模拟从河道入口到出口过程中物质的变化情况。SWAT 引入水文响应单元(HRU, Hydrological Response Unit)来反映植被覆盖和土壤类型的变化对径流与侵蚀的影响。在每个 HRU 内单独计算产流和泥沙量,再进行坡面汇流,进入子流域主河道,最后通过河网汇流演算得到流域总径流和产沙量。SWAT 采用修改 MUSLE 模型来模拟每个 HRU 的侵蚀量。这种模型既能基本体现产流、产沙和输沙等主要的流域过程,同时对数据的要求相对于物理模型又较低,对很多流域地区的应用而言是较好的选择。

3.4 国内外土壤水蚀过程研究对比分析

以问题为导向的土壤水蚀研究核心是通过揭示过程与机理,回答“侵蚀发生在哪,侵蚀量多大,泥沙去哪”,并据此提出防治对策。不同国家侵蚀环境差异巨大,各国针对自身侵蚀环境特点,研究重点差异明显(表 5)。美国农耕地以<10°缓坡为主,因此,以细沟和细沟间侵蚀为基础的缓坡地土壤水蚀过程的理论推导及数学表达,描述土壤水蚀物理过程的 WEPP 新一代水蚀预报模型取得重要进展<sup>[1]</sup>。开展了土壤侵蚀环境效应评价研究,建立评价模型,如土壤侵蚀与土壤生产力关系反应模型(EPIC)、水土资源评价模型(SWAT)、农业面源污染模型(AGNPS、ANSWER、CREAMS)等。研究了少耕、免耕、残茬覆盖等水土保持措施的作用机理,建立以免耕等水土保持耕作法为代表的耕地土壤侵蚀防治技术体系。

表 5 国内外土壤水蚀过程研究对比

| 国家 | 侵蚀环境        | 研究特色                                                                       |
|----|-------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 美国 | 缓坡农耕地(<10°) | 缓坡水蚀过程和机理,USLE、WEPP、EPIC、SWAT 等模型构建;以少耕、免耕、覆盖等水土保持耕作法为代表的耕地土壤侵蚀防治技术的研发和推广。 |
| 欧洲 | 景观相对完整      | 流域泥沙存储、输移和淤积的侵蚀产沙平衡,及泥沙来源问题研究;EUROSEM、LISEM 等模型构建;植被恢复与水蚀和生态系统服务功能关系研究。    |
| 中国 | 陡坡开垦,景观破碎   | 陡坡侵蚀泥沙分选搬运机理,高含沙水流水力学特性,异质景观流域侵蚀产沙过程;水土保持措施多样性与小流域综合治理技术。                  |

欧洲土壤水蚀研究强调流域的生态平衡,有效保护水资源,主要以流域为研究单元,重点开展流域侵蚀产

沙平衡研究,探讨侵蚀过程中泥沙来源以及泥沙存储、输移和淤积等问题<sup>[39]</sup>,并在区域土壤侵蚀评价上处于领

先地位。在模型研究方面,注重泥沙运移过程的模拟,建立了如 EUROSEM、LISEM 等经典模型。水土保持措施以生态恢复为主导,重视植被重建和河道整治,形成了完善的流域管理体制。在技术层面,注重泥沙测量仪器的研发,实现河道泥沙输移与淤积的连续监测,并发展了放射性示踪砂在泥沙研究中的应用。

我国坡耕地占耕地面积的  $1/5$ ,其中坡度大于  $15^\circ$  的占  $46\%$ ;陡坡地大量开垦以及高强度人类活动,把流域变成了由不同斑块镶嵌的破碎景观。因此,在坡面尺度上重点开展陡坡侵蚀过程机理研究,探讨泥沙分选搬运机制,高含沙量水流的水动力学特性,以及特殊的浅沟侵蚀机理等问题;在流域尺度上重点研究了异质景观流域侵蚀产沙对环境因子的响应,以及景观单元间水沙汇集与输移过程规律<sup>[35]</sup>。在丰富的理论研究基础上,构建陡坡侵蚀机理方程和适用于复杂景观流域的泥沙输移比模型。同时,我国复杂侵蚀环境决定了水土保持措施的多样性,因此,在耕作、生物、工程等措施的防蚀机理和适宜性研究基础上,总结出了东北黑土区、西北黄土区、西南紫色土区等水蚀区的水土流失综合调控与治理范式,小流域水土流失综合治理方面的研究已经达到世界先进水平。

## 4 土壤水蚀过程研究的难点问题

土壤水蚀的发生几乎受到气象、水文、生物、地形地貌、土壤等所有自然因素的作用,加之人类活动的干扰,使土壤水蚀在时空过程与分布上极其复杂。我国幅员辽阔,气候类型多样,地形条件复杂,人文背景差异大,导致侵蚀过程各异,增加了认识土壤水蚀机理和构建侵蚀模型的难度。因此,土壤水蚀过程的研究尚有很多难点问题需要解决,具体归纳为以下 3 个方面。

### 4.1 水蚀过程与机理

土壤分离、泥沙的搬运和沉积作为土壤水蚀 3 个相对独立而又相互影响的子过程,是研究土壤水蚀过程与机理、构建土壤水蚀模型的基础和关键。目前,国内外学者建立了相关的方程对这 3 个过程进行描述,但是这些方程多借鉴河流泥沙动力学和明渠水力学等邻近学科的理论与方法,未能形成完善的理论体系。径流分离土壤的过程实际上包括冲刷、沟头下切和侧蚀等分离过程,但在不同的土壤类型中这些过程的作用机制具有差异性,常用的土壤分离公式在描述不同土壤类型的水蚀过程仍存在很大局限性;水蚀泥沙的搬运与沉积不仅与水流挟沙力和输沙率有关,而且受到泥沙颗粒大小的影响,但现有模型中未涉及泥沙颗粒的作用机制;坡面流作为三维、非均匀非恒定沿程变化流,流动的形态千变万化,但以往研究关于水动力学特性的结论都是整个坡面的平均情况,对于这些参数在土壤水蚀过程中的时空差异研究较少,制约了坡面水蚀机理模型的建立。因此,作为水—土界

面相互作用的复杂生态过程,土壤水蚀的研究需从系统的角度,采用非线性方法,结合地表形态和环境要素的作用,分析水蚀驱动力与土壤自身特性及相互作用机制,是今后研究的重点与难点。

### 4.2 水土流失尺度特征

土壤水蚀具有尺度效应,不同尺度上水蚀过程的影响因子与作用机理不同。在微观尺度上的土壤水蚀与物理学研究的对象几乎一致,即土壤颗粒脱离土体在水流中运移和沉积的过程,因此基于连续介质的力学原理可较合理的解析土壤水蚀过程。但是,当空间尺度扩大到一定程度时,景观格局则对流域乃至区域的侵蚀产沙起到决定的作用,从而导致不同尺度的土壤水蚀研究结果具有差异性,坡面小区观测结果很难扩展到较大尺度上。因此,基于观测数据所建立的土壤水蚀经验模型和基于过程所建立的物理模型在实际应用中均受限于所建立的尺度。就目前的土壤水蚀研究而言,大空间尺度的研究可能会提出一些问题,但解决这些问题时仍会在小尺度上完成。因此,进行土壤水蚀空间尺度效应和空间尺度转换的研究是必须和迫切的。今后土壤水蚀过程尺度与尺度转换的研究应在明确不同尺度景观格局与水土流失因子相互关系的基础上,利用小尺度上实用的土壤水蚀评价模型和观测数据对区域水土流失进行定量预测与评价,构建多尺度、多因子景观格局与水蚀过程耦合模型。通过模型模拟,分析时空尺度变化下景观格局对水土流失过程的关键影响因子和尺度效应,完善尺度转换的方法,以期建立完备的土壤水蚀的尺度与尺度转换的方法和模型。

### 4.3 水土保持措施防蚀机理

土壤水蚀作为问题为导向的土壤关键过程,基础理论与方法的发展普遍滞后于水土保持实践,以往水蚀治理模式局限于较小尺度,治理效益缺乏稳定性和可持续性,治理成果的可推广性差,难以满足指导生态环境整治的需求。水土保持措施主要包括生物、工程和耕作措施,植被是最常用的水土保持生物措施,植被既能拦截降雨减少降雨侵蚀力,也能改善土壤结构增强土壤抗蚀性。但以往研究多关注于植被的地上部分,植被地下部分作为控制土壤水蚀的重要因素,由于具有隐蔽性,其作用机理仍不明确;植被重建过程中物种的选择和配置,及其分布格局是影响防蚀效果的关键,但该方面一直是研究的难点。同时,水保措施防蚀效果还具有时空差异性,但这方面都缺乏系统的研究,如梯田、谷坊和拦砂坝等的防蚀效果随降雨强度、立地条件以及时间的变化规律仍不清楚。深入研究上述问题是进行各种水土保持措施设计和实施的理论基础。其研究难点问题主要包括:不同水蚀环境下水土保持措施防蚀效果的时空差异;不同植被类型、空间格局、立地条件等引起的植被地下部分的防蚀差异及机理;

与景观格局结合的水蚀过程多尺度和跨尺度研究。

## 5 结 语

土壤水蚀研究从最初的单因子发展到多要素,由不同要素集成上升到不同尺度侵蚀产沙过程集成,乃至全球的多维复杂系统集成。分离、搬运和沉积过程,及其与环境要素的关系一直是土壤水蚀过程研究核心,但其外延已从传统的田块向陆地表层系统扩展,通过侵蚀过程与物质搬运及其沉积的研究,为理解陆地表层系统变化过程与机理提供基础信息,并融入地球系统科学。国际上在影响因子试验研究的规范化与定量化,缓坡地侵蚀过程的理论推导与数学表达,WEPP、EUROSEM、GUEST 等侵蚀预报模型的研发与应用,侵蚀环境效应评价及其模型建立(如EPIC、SWAT、AGNPS)等方面取得了重要进展。

中国的土壤侵蚀过程研究已从早期的跟踪国际热点发展到与国际发展趋势并行阶段。尽管在土壤水蚀概念与物理模型方面还相对薄弱,但在陡坡侵蚀机理、复杂景观中的侵蚀产沙过程、小流域综合治理等方面初步形成了自己的特色。未来需要更加注重以水蚀过程为主的现代地表过程研究,预测未来变化趋势;多学科交叉基础上与社会经济学的融合,注重土壤水蚀环境效应,水土保持生态服务价值与人居环境关系的研究;注重大范围和长历时数据的积累和基础理论与技术的创新,发展适用于复杂环境的多尺度预报模型。

致谢:感谢华中农业大学谭文峰教授、中科院城环所姚槐应研究员、中科院南京土壤所贾仲君研究员的宝贵建议;感谢临沂大学刘前进博士、中科院水保所王玲和张含玉在文献资料整理过程中的辛勤劳动。

### 参考文献:

- [1] Morgan R P C. Soil erosion & conservation[M]. 3rd edn. Oxford:Blackwell Publishing,2005.
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304(5677):1623-1627.
- [3] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [4] 水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公告[R]. 北京:水利部,2013.
- [5] Toy T J, Foster G R, Renard K. Soil Erosion: prediction, measurement, and control[M]. New York: John Wiley and Sons,2002.
- [6] Ellison W D. Soil erosion studies-Part I[J]. Agricultural Engineering,1947,28:145-146.
- [7] Rose C W, Williams J R, Sander G C, et al. A mathematical model of soil erosion and deposition processes: I. Theory for a plane land element[J]. Soil Science Society of America Journal,1983,47(5):991-995.
- [8] 余新晓,张学霞,李建牢,等. 黄土地区小流域植被覆盖和降水对侵蚀产沙过程的影响[J]. 生态学报,2006,26(1):1-8.
- [9] Benmansour M, Mabit L, Nouira A, et al. Assessment of soil erosion and deposition rates in a Moroccan agricultural field using fallout Cs-137 and Pb-210 (ex)[J]. Journal of Environmental Radioactivity,2013,115:97-106.
- [10] Taylor A, Blake W, Smith H, et al. Assumptions and challenges in the use of fallout beryllium-7 as a soil and sediment tracer in river basins[J]. Earth-Science Reviews,2013,126:85-95.
- [11] Chen F X, Fang N F, Shi Z H. Using biomarkers as fingerprint properties to identify sediment sources in a small catchment[J]. Science of the Total Environment, 2016,557:123-133.
- [12] 雷廷武,李法虎. 水土保持学[M]. 北京:中国农业大学出版社,2012.
- [13] Ellison W. Studies of raindrop erosion[J]. Agricultural Engineering,1944,25(4):131-136.
- [14] Sharma P, Gupta S. Sand detachment by single raindrops of varying kinetic energy and momentum[J]. Soil Science Society of America Journal,1989,53(4):1005-1010.
- [15] Foster G R. Modeling the erosion process[C]// Haan C T, Johnson H P, Brakensiek D L. Hydrologic modeling of small watersheds. St. Joseph: ASAE,1982:297-380.
- [16] Nearing M, Foster G, Lane L, et al. A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology [J]. Transactions of the ASAE, 1989,32(5):1587-1593.
- [17] Hairsine P, Rose C. Modeling water erosion due to overland flow using physical principles; 2. Rill flow[J]. Water Resources Research,1992,28:245-250.
- [18] Morgan R, Quinton J, Smith R, et al. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments[J]. Earth Surface Processes and Landforms,1998,23(6):527-544.
- [19] Foster G, Meyer L. Transport of soil particles by shallow flow[J]. Transactions of the ASAE,1972,15(1):99-102.
- [20] Allen P M, Arnold J, Jakubowski E. Prediction of stream channel erosion potential[J]. Environmental & Engineering Geoscience,1999,3:339-351.
- [21] Barthes B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels[J]. Catena,2002,47(2):33-149.
- [22] Gilley J E, Elliot W, Laflen J, et al. Critical shear stress and critical flow rates for initiation of rilling[J]. Journal of Hydrology,1993,142(1/4):251-271.
- [23] 吴普特,周佩华. 雨滴击溅在薄层水流侵蚀中的作用[J]. 水土保持学报,1992,6(4):19-26,47.
- [24] Elliot W J, Laflen J M. A process-based rill erosion model [J]. Transactions of the ASAE,1993,36(1):65-72.
- [25] Zhang G H, Liu B Y, Nearing M A, et al. Soil detachment by shallow flow[J]. Transactions of the ASAE, 2002,45(2):351-357.

- [26] 范兴科,蒋定生,赵合理. 黄土高原浅层原状土抗剪切力强度浅析[J]. 水土保持学报,1997,11(4):69-75.
- [27] Bryan R B. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslopes[J]. *Geomorphology*, 2000, 32(3): 385-415.
- [28] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(4):425-437.
- [29] Shi Z H, Yan F L, Li L, et al. Interrill erosion from disturbed and undisturbed samples in relation to topsoil aggregate stability in red soils from subtropical China [J]. *Catena*, 2010, 81(3):240-248.
- [30] Wang L, Shi Z H, Wang J, et al. Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: a case study of clay loam soil from the loess plateau, china[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 512:168-176.
- [31] Shi Z H, Fang N F, Wu F Z, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 454:123-130.
- [32] Zhang G H, Liu B Y, Zhang X C. Applicability of wepp sediment transport equation to steep slopes[J]. *Transactions of the ASABE*, 2008, 51(5):1675-1681.
- [33] Foster G R, Meyer L D. Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics[M]// *Sediment-Yield Workshop. Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources*. New Orleans, U S; Dept. of Agriculture, Agricultural Research Service, 1975:190-207.
- [34] Zhang G H, Liu Y M, Han Y F. Sediment transport and soil detachment on steep slopes: II. sediment feedback relationship[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(4):1298-1304.
- [35] 傅伯杰,徐延达,吕一河. 景观格局与水土流失的尺度特征与耦合方法[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(7):673-681.
- [36] Bracken L, Wainwright J, Ali G, et al. Concepts of hydrological connectivity: Research approaches, pathways and future agendas [J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 119:17-34.
- [37] Yan B, Fang N F, Zhang P C, et al. Impacts of land use change on watershed streamflow and sediment yield: an assessment using hydrologic modelling and partial least squares regression [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 484:26-37.
- [38] Shi Z H, Huang X D, Ai L, et al. Quantitative analysis of factors controlling sediment yield in mountainous watersheds[J]. *Geomorphology*, 2014, 226:193 - 201.
- [39] De Vente J, Poesen J, Verstraeten G, et al. Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: where do we stand? [J]. *Earth Science Reviews*, 2013, 127:16-29.
- [40] 陈利顶,傅伯杰,赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学意义[J]. *生态学报*, 2006, 26(5):1444-1449.
- [41] Imeson A, Prinsen H. Vegetation patterns as biological indicators for identifying runoff and sediment source and sink areas for semi-arid landscapes in Spain[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2004, 104(2):333-342.
- [42] 傅伯杰,赵文武,陈利顶,等. 多尺度土壤侵蚀评价指数[J]. *科学通报*, 2006, 51(16):1936-1943.
- [43] Bracken L J, Turnbull L, Wainwright J, et al. Sediment connectivity: a framework for understanding sediment transfer at multiple scales[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 40(2):177-188.
- [44] Van Oost K, Govers G, Desmet P J J. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage[J]. *Landscape Ecology*, 2000, 15(6):579-591.
- [45] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains[M]. Washington, D C: US Government Print Office, 1965.
- [46] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)[M]. Washington, D C: US Department of Agriculture, 1997.
- [47] Liu B Y, Zhang K L, Xie Y. An empirical soil loss equation[C]//12th International Soil Conservation Organization Conference. Beijing: Tsinghua University Press, 2002:121-25.
- [48] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, et al. AGNPS: a nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1989, 44(2):168-173.
- [49] Arnold J G, Williams J R, Griggs R H, et al. SWRRB—A basin scale simulation model for soil and waterresources management[M]. Texas: A & M Press, 1990.
- [50] Morgan R P C, Quinton J N. Erosion modelling[M]. New York: Kluwer Academic, 2001:117-142.
- [51] Knisel W G. CREAMS: A field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems[R]. United States. Dept. of Agriculture, Conservation Research Report, 1980.
- [52] Flanagan D C, Ascough II J C, Nearing M A, et al. The water erosion prediction project (WEPP) model[M]. New York: Kluwer Academic, 2001:145-199.
- [53] Beasley D B, Huggins L F, Monke E J. ANSWERS: a model for watershed planning[J]. *Transactions of the ASAE*, 1980, 23(4):938-944.
- [54] 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 [J]. *Hydrological Processes*, 1996, 10(8):1107-1117.
- [55] 符素华,刘宝元. 土壤侵蚀量预报模型研究进展[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(1):78-84.