

黄土高原现代地貌侵蚀演化研究进展

梁广林, 陈 浩, 蔡强国, 胡文生  
(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要: 地貌学是研究整个地表形态或某一个地区地表起伏形态特征、成因、发育规律、分布和改造利用的科学。根据前人研究成果, 概述了国内外地貌演化, 尤其是黄土高原现代地貌侵蚀演化的主要研究进展, 并评述了研究中存在的主要问题和目前需要开展的研究内容。  
关键词: 现代地貌侵蚀演化; 研究进展; 黄土高原  
中图分类号: S 157 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409( 2004) 04-0131-07

Research Progress of Modern Topographic Evolvment  
and Landform Erosion in Loess Plateau

LIANG Guang-lin, CHEN Hao, CAI Qiang-guo, HU Wen-sheng  
(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Geomorphology is a science which aims at the characteristic, the cause, the evolution law, the distributing and utilization for the whole or part of earth surface. We summarize the main achievements about the topographic evolvement in China and abroad, especially about the modern topographic evolvement and landform erosion in Loess Plateau. Based on this, the main problems in the study of topographic evolvement and landform erosion in Loess Plateau are put forward. And further study should be carried out.  
**Key words:** modern topographic evolvement and landform erosion; research progress; Loess Plateau

黄土高原的土壤侵蚀问题举世瞩目, 它不仅使本区生态环境受到严重威胁, 而且来自黄河中游的粗泥沙一直威胁着下游广大平原地区的安全, 一直是中华民族的心腹之患。早在上个世纪 50 年代以来, 我国就开展了黄土高原、特别是多沙粗沙区水土流失规律研究和水土保持的综合治理, 不论是在国家或区域的层面上都取得了很大成绩。

地貌侵蚀演化是地表剥蚀过程研究的组成部分。由于研究方法和手段的限制, 以往土壤侵蚀产沙过程及降雨径流的侵蚀作用研究较多, 地貌侵蚀演化、尤其是在人类活动影响下的现代地貌侵蚀演化及地貌特征交互作用的反馈机制研究较少, 目前已成为地表剥蚀过程研究的热点和难点。研究的不断进展对于深入认识自然环境的演变规律和人类活动的影响, 提高抵御自然灾害的能力, 减轻人类活动的负面效应, 以适应社会与经济的可持续发展具有重要的理论和实际意义。

1 地貌发育理论研究

美国地貌学家 W. M. Davis 提出的侵蚀循环(地貌循环)学说, 即坡面发育的均匀剥蚀理论, 开创了地貌发育理论

研究<sup>[1]</sup>。德国地貌学家 W. Penck 对于地貌演化也进行过系统的研究, 提出了山前梯地学说, 并提出山坡演化遵循平行后退的理论<sup>[2]</sup>。这两种学说成为早期理论地貌学的两大科学遗产。稍后, 前苏联地貌学家 K. K 马尔科夫在肯定戴维斯和彭克理论的同时, 提出了他自己的四级地貌水准面学说<sup>[3]</sup>。莱斯特·金(L. King) 根据对南非的庞大悬崖的研究, 提出了坡面的平行后退发育模式<sup>[4]</sup>。这些地貌演化理论的建立, 为地貌演化的研究工作提供了理论框架。

自 Davis 和 Penck 的地貌演化理论发表以来, 对地貌演化的研究产生了巨大的影响, 引起广泛的讨论并存在着较大的分歧。史同广等通过研究认为<sup>[5]</sup>, 两者在研究中均存在着不足之处, 他们分歧的主因是二者研究范围不同造成的; W. Penck 的山前梯地理论建立在一个穹窿加速上升的演化模式上, 自然研究的对象比较具体, 并且注意了坡面在不同条件下演化的形态, 而戴维斯的理论是建立在一个广阔区域整体抬升后的演化模式上, 他所注意的是宏观上的线状水流的侵蚀演化, 从而忽视了坡面水流的侵蚀演化问题; W. Penck 的观点狭窄而深刻, Davis 的观点广泛而较肤浅, 只有两者之

① 收稿日期: 2004-07-10  
基金项目: 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); 香港特区政府研究资助局支持项目(HKU 7017/01E); 国家基金委和黄河水利委员会重点基金项目(50239080)  
作者简介: 梁广林(1979-), 女, 中国科学院地理科学与资源研究所硕士生。

间的结合才能拥有更加广泛的基础。罗来兴<sup>[6]</sup>、景才瑞<sup>[7]</sup>等都通过研究指出,地貌演化研究受到许多因素(如地域条件、地表组成物质、气候条件、内外营力作用以及人类活动影响的不同等)的影响,并不能简单的像戴维斯那样把地貌演化划分为少年、中年、老年三个阶段。随着地貌发育的不同阶段,内外营力(包括人类活动的影响)相互作用、矛盾斗争,在每一个大的即上一级的地貌发育的相关阶段之内,还有比较小的即次一级的地貌发育的相关阶段的互相更替,又形成次一级的比较小的地貌的互相叠加,甚至还会有更小的相关阶段,从而形成了地表千姿百态的地表发育形态。Davis 的侵蚀循环理论难以说明如此复杂的过程。地貌发育的过程远比 Davis 侵蚀循环理论更为复杂。同时 S. A. Schumm<sup>[8]</sup>、尹国康<sup>[9]</sup>、涂汉明<sup>[10]</sup>等指出地貌发育过程中存在着开关变量(即地貌阈值),并且通过它的存在,来反应地貌过程的突变性和阶段性,说明地貌过程的复杂性。在此基础上景才瑞<sup>[11]</sup>等提出用地貌波的概念来研究地貌的发育,他认为地貌波是指地球表面隆起的高地和凹陷的低地相间排列,总体上构成波状起伏的地貌形态。而地貌形成与发展的动力就是地球的内力作用与外力作用,也即地貌是地球的内力作用与外力作用相互矛盾斗争统一的产物。这两种作用力虽然贯彻始终,只是在不同的地貌发展阶段占据不同的地位。地貌过程就是在这两种作用力下的一个螺旋式上升、前进的循环过程。

上个世纪 40 年代以来, R. E. Horton 等人开创了地貌侵蚀演化的定量研究。其间,以 R. E. Horton 的沟道发育及河系结构形态量计定量研究工作最为突出<sup>[12]</sup>,他提出的揭示水系发育过程的定量关系“Horton 水系形态定律”更是引起了世人的广泛关注, A. N. Strahler 提出了新的水系分级方法,该分级方法被广泛应用。其后, A. N. Strahler 的地貌演化的高程积分方法<sup>[13]</sup>、S. A. Schumm 地貌临界理论<sup>[8]</sup>的研究等,使地貌演化理论更加成熟。20 世纪 70 年代以来, Carson 等人以 Davis 的陆地隆起与剥蚀相继发生的系统,作为坡面形态研究的参照系,依据侵蚀力学的观点和物理学定理,研究与应用过程-响应模型阐述了地貌形态的演化规律。人们更加注重降雨径流侵蚀动力机制的研究<sup>[14]</sup>。Schmidt 等人开展了小流域三维空间降雨径流与土壤侵蚀模型研究,采用计算机地理信息系统分析软件,开展同步反应侵蚀产沙与降雨、入渗、径流过程的小流域三维空间侵蚀模型研究,进行流域内侵蚀与沉积空间状态预报。不断重视降水与径流、地貌演化和侵蚀产沙机理综合分析研究,重视小流域或坡面地貌(或微地貌)演化和侵蚀产沙过程与降雨径流的水动力机制及泥沙输移过程的侵蚀临界特征的关联研究<sup>[15]</sup>。

非线性科学的兴起及在地质学中的应用,为流域地貌演化过程的研究工作提供了一种新的思路,尤其是创建于 70 年代的分形理论、耗散结构、协同学、突变论、混沌理论的发展,使人们从一个崭新的角度来对地貌演化进行研究。近十几年来,随着计算机技术的发展, O'callaghan<sup>[16]</sup>等人进行了流域地貌三维数值模拟及地貌形态之间关系的研究, Rinaldo<sup>[17]</sup>等人 and Rodriguez<sup>[18]</sup>等人分别根据最小能耗原理和自组织

临界概念开展了流域地貌演化动力学研究。此外,还有艾南山等提出的侵蚀流域的地貌熵<sup>[19,20]</sup>等。朱晓华等分形布朗运动进行了流域水系的模拟工作,他根据在 80 年代提出的分形理论中重要的分形迭代函数系统,在庞大地理信息的压缩存贮,以及古地形的分形重建等方面也作出了有益的探索<sup>[21]</sup>。许世远等以四维时空数据库为基础数据,建立分形模拟模型,用 OOP(Object-oriented program)方法编程实现了地貌分形过程的形态模拟<sup>[22]</sup>。这些研究的开展,可以涵盖小流域下垫面的原型地貌类型,补充了土壤侵蚀研究中坡面径流小区、实验流域侵蚀产沙的空间局限性,为地貌演化研究工作的开展开拓了广阔的研究前景。

## 2 黄土高原现代地貌侵蚀演化研究

黄土丘陵沟壑区的每一个小流域都是一个完整、独立的自然侵蚀-输移-产沙系统,沟道小流域是黄土地区侵蚀地貌的基本单元<sup>[23]</sup>。以小流域为单元并对小流域进行综合治理与开发,是我国流域治理的成功模式,也是当前黄土高原地貌演化研究的切入点和突破口。在国内外地貌演化理论的基础上,我国研究人员以小流域为基本单元,进行了大量有针对性的研究工作。

### 2.1 小流域地貌侵蚀演化的垂直分带性研究

黄土坡地侵蚀方式(面蚀、细沟、浅沟、切沟)和类型(水力侵蚀、重力侵蚀)是黄土高原现代地貌侵蚀演化研究的重要内容。在黄土高原的任何一条沟道小流域、或小流域内的任一从分水岭至沟谷底部的纵向斜坡剖面上,各种有序的垂直排列侵蚀带所发生的土壤侵蚀现象都有相似的规律可循(雷阿林等)<sup>[24]</sup>。罗来兴<sup>[25]</sup>、承继成<sup>[26]</sup>、陈永宗<sup>[27]</sup>、蔡强国<sup>[23]</sup>等人等研究了黄土坡地的发育模式及径流作用、侵蚀形态与方式的垂直分带性,及径流对坡形的改造和发生细沟、浅沟、切沟的临界距离,分析了均匀坡面由于径流衰减发生侵蚀率变化的临界坡长,以及降雨、坡度、坡长在侵蚀过程中的作用<sup>[28]</sup>。江忠善<sup>[29]</sup>、张信宝<sup>[30]</sup>分别利用野外观测和<sup>137</sup>Cs 方法研究了坡度增加时侵蚀速率与坡长的关系。所有这些研究成果,大大深化了人们对于黄土高原现代地貌演化特征的认识,揭示了土壤侵蚀方式和侵蚀形态空间垂直分异的基本格局,为从土壤侵蚀动力学角度研究黄土坡地侵蚀地貌现代演化规律奠定了重要基础。

### 2.2 沟谷的发育规律研究

黄土高原丘陵沟壑区和塬区沟道流域内的梁峁地貌都呈层状结构。从最高的分水岭至谷缘线有三级地形面,当地的老百姓形象的称之为“头道梁”、“二道梁”、“三道梁”。层状地形地成与风积黄土和沟谷开始发育是同时进行的。河沟开始生成于中更新世中期,构成头道梁的雏形,在离石黄土上部地层堆积以后,开始发育坳沟并形成二道梁;晚更新世马兰期黄土堆积以后,老冲沟发育,形成三道梁。晚更新世末至全新世初期,梁峁地貌结构已与今天相近,只是沟谷面积不如今天大,梁峁坡面没有如此众多的切沟和新冲沟<sup>[27]</sup>。

朱显谟、罗来兴、陈永宗、甘枝茂等人根据沟谷不同发育阶段与形态对沟谷类型进行了划分。朱显谟<sup>[31]</sup>认为细沟、浅

沟及切沟多发育在梁峁坡或者沟坡上, 它们是现代地貌演化的产物; 在斜坡以下从冲沟开始, 就进入了地表径流的自然沟道系统, 一般包括支、毛、干沟甚至江、河、大川的水陆网络系统, 它们都是古代地貌演化的产物, 但是现代地貌演化对它们尤其对冲沟也具有明显而强烈的影响, 主要表现为沟尾的溯源侵蚀、沟壁的扩张和沟床底部掏蚀冲刷等; 罗来兴<sup>[32]</sup>把侵蚀沟谷粗略的划分为现代侵蚀沟和古代侵蚀沟, 他所谓的现代和古代的时间尺度是模糊的, 只具有相对的时间意义; 而陈永宗<sup>[27]</sup>根据地质剖面将黄土的堆积与各级沟谷的发育年代联系在一起, 按照沟谷发育过程以及各级沟谷在这个过程中所处的阶段, 充分考虑沟谷形态的相似性和差异性, 把侵蚀沟谷划分为浅沟、切沟(或者悬沟)、冲沟(包括新老冲沟)、坳沟和河沟五类, 认为其中前两者为现代侵蚀沟, 后二者为古代侵蚀沟, 他认为切沟和浅沟形成时间是人类历史近期, 进一步明确指出了古代与现代沟谷发育的界线。

这些研究不仅揭示了黄土高原沟道形成的年代, 也为后人利用空代时的地貌分析方法, 定量研究地址时期以来沟谷侵蚀发育阶段、及自然侵蚀速率和人类活动加速侵蚀, 提供了研究基础。

2.3 流域形态特征与水系结构研究

自 R. E. Horton 揭示的水系发育过程及“Horton 形态量定律”以后, 承继成等人采用 A. N. Strahler 水系分级方法, 首先在黄土丘陵沟壑区进行了水系形态、结构的量计分析, 认为 Horton 形态量定律具有普遍意义<sup>[36]</sup>。帅启富在黄土丘陵沟壑第二副区延河支流杏子河流域进行了验证<sup>[33]</sup>。陈浩将研究区扩大到黄土高原沟壑区, 在水系形态量计分析的基础上, 研究了地表切割程度指标(沟谷密度)与沟道流域形态特征之间的关系<sup>[34]</sup>。

近十几年来, 随着非线性科学在地学中的应用, 孔凡臣等通过山西及邻区水系与黄土冲沟的分形特征研究, 认为水系的分维值反映了该区构造活动性的强弱<sup>[35]</sup>; 李后强、艾南山研究了 Horton 比率与流域地貌发育阶段的关系<sup>[36]</sup>, 并导出了划分流域发育阶段的新参数, 认为分枝比越大, 流域越趋于侵蚀晚期。何隆华提出运用多维分形理论研究黄土地貌演化对于流域的侵蚀发育阶段具有更强的代表性<sup>[37]</sup>; 雷会珠等根据沟网 Horton 定律推导出沟网的分维计算式, 据此可进行纸坊沟流域沟网的分维计算, 判断流域沟网的发育程度, 认为黄土高原沟网具有分形性。并且通过统计分析发现流域边界周长、长轴、短轴、长短轴比、汇合角等地貌指标随流域面积的变化, 从而认为黄土高原流域的自相似性<sup>[38]</sup>。非线性理论对于黄土高原各流域现代地貌演化是否普遍适用以及黄土地貌分形演化机制问题, 仍需要进一步深入研究。

2.4 自然侵蚀和加速侵蚀研究

关于地质时期和历史时期以来地表剥蚀速率和人类活动的影响一直是人们讨论的热点问题之一。主要存在三种观点: 一是认为黄河巨量泥沙起源于地质历史时期, 发展于人类历史时期, 人为活动加剧促使侵蚀产沙增加。陆中臣、袁宝印<sup>[39]</sup>、张勋昌<sup>[40]</sup>等人采用地质剖面法探讨了自然侵蚀速率和历史时期以来人类活动加速侵蚀问题, 认为自然侵蚀速率

占 70%, 人类加速侵蚀占 30%。景可<sup>[41]</sup>等人采用相关分析法研究认为 1919 年至 1949 年自然侵蚀占 81.6%, 人类侵蚀占 18.4%。近 30 年来, 黄土高原侵蚀进入了更加强烈的发展时期, 人类加速侵蚀达到 25%, 自然侵蚀占 75%。陈永宗和赵业安<sup>[42]</sup>等人认为黄河中游的产沙量 30 年来增加 38.5%。史培军等人根据地貌演化特征推算了皇甫川流域 30 年来自然侵蚀速率和人类加速侵蚀的变化, 认为人为加速侵蚀占 45.09%, 自然侵蚀占 54.91%, 并分析了 80 年代自然和人为减沙的作用, 认为因治理仅占流域总面积的 45.44%, 因而仍然表现为“局部改善, 整体恶化”的趋势, 人类加速侵蚀要大于人类控制侵蚀的速率<sup>[43]</sup>。二是认为黄河巨量泥沙开始于人类历史时期, 随着人类活动的加强及森林和草原植被的破坏而引起侵蚀产沙增加<sup>[44]</sup>。三是认为黄河巨量泥沙来源完全归咎于地质环境, 与人类活动无关<sup>[45]</sup>。由此可见, 研究方法及降雨和流域下垫面、治理程度不同致使人们的认识存在着差异。

利用地貌传统的空代时的研究方法, 根据沟谷的形态特征研究沟谷的不同发育阶段, 从沟谷侵蚀演化速率探讨自然侵蚀与人类活动加速侵蚀、尤其是 60 年代以来自然侵蚀、人类活动加速侵蚀及水土保持减蚀的关系及作用仍是需要进一步不断深入探讨的问题。

2.5 坡沟侵蚀演化关系研究

黄土地貌从总体上看可划分为(由沟缘线)沟间地与沟谷地两大系统。在水力侵蚀与重力侵蚀作用下, 坡面侵蚀沟的形成与发展、沟间地面积不断缩小和坡面形态演化与侵蚀物质的迁移, 是黄土地区现代侵蚀地貌发育和演化的总趋势。在水平投影上沟间地(坡面)与沟谷地的分界线(沟缘线)向坡顶侵蚀演进的位置变化, 就是坡面面积缩小的显著标志, 实际上在一定时间尺度变化内所能看到的沟缘线位置变化是一个在水力和重力侵蚀影响下包括现代沟道(切沟、悬沟)下切演进在内的不规则立体带。此带是小流域系统中现代地貌侵蚀演化和产沙最为活跃的部位之一。沟缘线的存在, 沟间地、沟谷地的侵蚀关系研究, 其实就是涉及在古代沟谷坡上现代沟谷(浅沟、切沟、悬沟)侵蚀演化速率, 以及坡面来水来沙对古代沟谷扩展、下切的影响。

一般以沟(谷)缘线(多为梁峁边线)为界, 其上为由各种梁峁顶面和斜坡, 以及塬面、台塬面等所构成的沟间地; 其下为由沟坡及切沟、冲沟、干沟、河沟等沟道所构成的河谷地。

坡、沟侵蚀演化关系的研究起源于小流域的泥沙来源与综合治理研究。小流域泥沙的来源问题直接关系到水土保持治理方针的决策与措施配置, 因此备受世人所关注, 主要存在两种不同的观点: 蒋德麒等人按地貌部位确定泥沙来源, 认为泥沙主要来源于沟壑, 他们未考虑坡面水下沟在沟壑中所增加泥沙的确定成分<sup>[46]</sup>; 西峰水保站和曾伯庆等人认为来自沟谷地的泥沙可占 80%, 但坡面水下沟所增加的泥沙总量占小流域泥沙总量的 76% 以上, 当坡面水被隔绝时, 沟坡的径流和产沙能力可分别减小 58.7% 和 77.8%, 强调了坡面来水对沟壑增蚀的作用<sup>[28、47]</sup>。并引发了坡、沟关系问题的讨论, 目前仍是讨论的热点问题之一。焦菊英和郑粉莉等

人定量分析了坡面水下沟在沟坡上的侵蚀产沙量,认为来自沟坡的泥沙中有近 50% 是坡面水下沟造成的<sup>[48]</sup>。陈浩提出坡面水下沟“净产沙增量”的概念,定量研究了坡面来水来沙在沟坡上的净产沙量和搬运量及含沙水流的侵蚀特性,认为坡面来水来沙在小流域产沙中起决定性作用,利用成因分析法确定不同地貌类型区典型小流域的泥沙来源,丘陵沟壑区羊道河流域产沙量中来自坡面作用的泥沙占 55.98%,王茂沟占 69%;塬区南小河沟塬面的作用竟高达 85.23%,沟坡坡度越大坡面水下沟的侵蚀能量越大<sup>[49~52]</sup>。蔡强国等人分析了暴雨特性变化对坡沟水沙关系的影响,认为如果阻止坡面水下沟,在大暴雨条件下径流和产沙量可分别减小 61% 和 84%<sup>[23]</sup>。雷阿林等人开展了坡沟系统土壤侵蚀与水流动力学机制的试验研究<sup>[53]</sup>。

目前在土壤侵蚀研究中引起广泛讨论的坡沟关系问题,实际上仅限于水沙关系的变化,由于地貌演化的时间尺度较长,所以对于现代土壤侵蚀而言,一般把沟缘线视为静态。事实上沟缘线从地质时期以来就是随沟谷系统的发育而发生变化 的一个动态的过程,只不过除切沟等现代坡地侵蚀沟或在重力侵蚀作用下致使沟坡或沟头的演进距离有时较明显外,在短时段内一般不易被人们所察觉而已,这一情况在坡面汇水面积较小的黄土丘陵沟壑区更为明显。由于选定的具有区域代表性的典型野外观测流域不可能涵盖所有地貌类型和坡沟空间各种不同的组合方式,此外,观测流域或观测场还受到流域闭合性与边界条件的影响。

坡、沟侵蚀关系的研究,鉴于黄土高原坡沟地貌空间组合的复杂性,坡、沟关系的研究还将深入的开展。

### 3 黄土高原现代地貌特征对侵蚀演化的影响

黄土高原现代地貌演化受到许多因素影响,如内营力和外营力作用,以及作为第三营力的人类活动都对黄土地貌的演化起着非常重要的作用。就黄土丘陵沟壑区而言,自沟道流域内出现了沟间地和沟谷地以后,沟间地坡地的形态发育,由于受到谷(沟)缘线所起的临时控制作用,在一定时期内,直接受地壳活动强弱的影响已经不大。在这一段时间内,决定坡地侵蚀演化速率的主要因素,为坡地的降雨径流状况、地表的抗蚀力、原始地貌特征等因素。而对一个小流域而言(小于 10 km<sup>2</sup>),降雨的空间分布基本上可以看作是相同的,同时下垫面的地表物质组成、植被、土地利用方式等在较小的范围内也可以看作是一致的,此时决定地貌现代侵蚀演化的因子主要为地貌形态因子,即地貌特征对降雨径流侵蚀作用的反馈机制。地貌的形态特征可以视为各种形状和坡度斜面在空间的组合,也可以把它解析为各种长度、坡度、坡向几何图形的不同组合<sup>[27]</sup>。

(1) 坡度。坡度是影响坡地土壤侵蚀的重要因素之一,它是决定地表物质与能量再分配的关键地形因子。关于坡度在侵蚀中的作用,早在上个世纪初开始就引起有些学者的重视,并进行了一系列分析与探讨。坡度与坡面侵蚀的关系比较复杂,许多研究表明,水流剪切力与坡度呈正比,故坡度增加侵蚀量增大<sup>[54]</sup>。但也有的学者认为坡面侵蚀量并不是一

味的随坡度的增加而增大,而是存在影响侵蚀强度变化的临界坡度<sup>[55,56,12]</sup>。其它条件相同,土质不同时,充分反映了坡度对坡面侵蚀影响的复杂性<sup>[57]</sup>。

关于黄土高原地区坡度与坡面土壤侵蚀的关系国内已作了大量研究,如 50 年代刘善建指出,当坡度增加到 15 以上时,侵蚀量增加更为剧烈,并通过对天水水保站径流小区资料的分析。得出坡度与冲刷呈指数相关<sup>[58]</sup>,即:

$$d=0.012S^{1.4}+0.56$$

式中,*d*——农地上冲刷深度(mm),*S*——坡度(%)。

黄委会西峰水保站<sup>[59]</sup>和朱显谟<sup>[60]</sup>等一致认为,黄土梁峁坡地上的侵蚀量与坡度的幂相关,但各自求得的数值差别极大。陈永宗<sup>[61]</sup>、江忠善<sup>[29]</sup>等根据各自掌握的资料,分别得到不同的经验公式(见表 1)。

表 1 坡度与侵蚀强度的经验关系

研究者	公式	资料来源
承继成 <sup>[26]</sup>	$H=3.47\times10^{-3}I^{2.16}+0.57$	据天水径流小区 1945~1953 年资料
	$H=3.98\times10^{-4}I^{2.44}+0.2$	据天水径流小区 1945~1953 年资料
	$H=3.16\times10^{-2}I^{5.36}+10.5$	据绥德站 1956 年资料
	$H=3.02\times10^{-4}I^{3.18}+0.05$	据山西离石水保所 1958 年资料
陈永宗 <sup>[27]</sup>	$W=0.404S^{1.496}+0.271(I>15)^{\circ}$	据山西离石水保所 1957~1958 年资料
	$W=0.0043S^{2.908}+2.5946$	(15°< <i>S</i> <30°)
江忠善 <sup>[29]</sup>	$M_s=3.27\times10^{-5}EI^{1.5720}S^{1.06}$	据西峰站资料
	$M_s=2.0266S^{1.308}(r=0.995^{**})$	据安塞站径流小区资料
	$H=38.33IS^{1.11}(r=0.936^{**})$	据安塞站径流小区资料
华绍祖 <sup>[74]</sup>	$M_s=2.485\times10^{-3}EI^{1.4430}S^{1.30}$	据绥德丰沙年径流小区资料
	$M_s=1.6S^{1.02}$	据天水站 1945~1956 年资料
	$M_s=0.464S^{1.496}$	据绥德站 1958~1960 年资料
	$M_s=1.3IS^{1.098}$	据天水、绥德站 1945~1956,1958~1962 年资料
	$M_s=3.15+0.7335S+0.0018S^2$	据天水、绥德站 1945~1956,1958~1962 年资料
德丰沙年径流小区资料		

注: *H*——冲刷深度(mm); *I* 或 *S*——坡度(°; *W* 或 *M<sub>s</sub>*——侵蚀量(t/km<sup>2</sup>)

这些经验公式表明侵蚀量有随坡度增加而增加的特点。但是,有许多的研究表明,存在影响坡面侵蚀量变化的临界坡度。即当坡度超过一定界限时,随着坡度的增大,土壤侵蚀量不继续增大反而会减少,不同的研究人员在各自的研究条件下得到的临界坡度是不同的(见表 2)。

不同的研究地区具有不同的临界坡度值,是由于随着降雨条件、下垫面等因素的不同而相应的发生变化。如靳长兴运用坡面流的能量理论得到临界坡度理论上应在 24~29 之间,其具体数值与坡面水深和大于等于 84% 的土壤颗粒粒径之比有关<sup>[67]</sup>。陈浩等人试验研究表明,在降雨特性和土质等下垫面一定条件下,存在影响坡面侵蚀量变化的临界坡角,临界坡角随着不同坡度时,侵蚀方式的变化速率的不同而存在差异。也就是说,随坡度的变化及坡面侵蚀过程的变化,存在影响坡面侵蚀变化的一系列临界阈值<sup>[62]</sup>。江忠善等也认为,临界坡度不是一个固定值,它将随着降雨条件及下垫面条件的不同而发生变化<sup>[29]</sup>。蔡强国分析指出,当 *I*<sub>30</sub> > 7 mm/h 时,侵蚀量随坡度增大而减少<sup>[23]</sup>。此外,曹文洪通过分析天水、西峰和绥德等大量径流小区的资料,并结合理论知

识,指出土壤侵蚀坡度界限不是一个常数,是与坡面径流深、泥沙粒径以及植被等因素存在一定函数关系,认为坡度界限应大于 40<sup>[63]</sup>。黎四龙、蔡强国等研究了野外试验小区不同坡度条件下,次降雨情况下坡度与侵蚀量的关系,认为次降雨侵蚀量与坡度的单因子回归方程结果不显著。当坡度与径流量、雨强等因素结合时,用来计算次降雨侵蚀量,效果就会变好<sup>[64、65]</sup>。

表 2 坡面侵蚀的临界坡度

研究者	临界 坡度	资料来源
郭维志 <sup>[66]</sup>	35°	天水水土 保持站
陈永宗 <sup>[67]</sup>	25 或 28°	绥德、离石径 流小区的 资料(1976 年)
范荣生 <sup>[68]</sup>	27.4 °34.9 °40 °(I= 2.4 mm/min 时)	室内人工降雨模拟试验(黄土 1993 年)
石新生 <sup>[69]</sup>	23.4 ~ 27.3°	陕西省安 塞纸坊沟 实验区(黄绵土 1996 年)
靳长兴 <sup>[70]</sup>	24 ~ 29 °(流量一定)	据能 量理论 的理论推导值(1995 年)
赵晓光 <sup>[71]</sup>	21.4 ~ 45°	黄土 高原南部 淳化县泥 河河流域(1999 年)
	28°	安塞 水土保持 试验站径 流场(黄绵土)

(2) 坡长。坡长是决定坡面水流能量沿程变化、影响坡面径流和水流侵蚀产沙过程的重要地貌因素之一。有关坡长对侵蚀的影响方面,目前有 3 种不同的观点:一种观点是认为随着坡长的增加,水体中的含沙量增加,水流能量多消耗于挟运泥沙,结果侵蚀反而减弱;另一种观点是,随着从上坡到下坡水深的逐渐增加,侵蚀相应也增加;第三种观点认为侵蚀与坡长无关,其理由是由于向下坡水量增加,侵蚀加强,水体含沙量也增加,水体能量主要为泥沙负荷所消耗,侵蚀减弱,二者相互消长的结果,使得侵蚀量从上坡到下坡基本保持不变<sup>[27]</sup>。

我国研究学者就黄土高原坡长与侵蚀的关系进行了大量的研究,研究结果与不同研究区的土壤特性及降雨条件等有着很大的关系。原黄河工程局据径流小区资料分析,认为坡长与侵蚀有的成正比,有的成反比,其变化视降雨状况而异<sup>[72]</sup>。罗来兴根据甘肃华亭粮食沟坡面细沟侵蚀量的野外雨后调查资料认为,沿坡长的侵蚀特点是强弱交替变化<sup>[73]</sup>。华绍祖利用天水、绥德等地的径流小区资料求得,侵蚀与坡长的 0.15 ~ 0.5 次方成正比<sup>[74]</sup>。张信宝利用<sup>137</sup>Cs 法研究认为,0 ~ 50 m 坡长范围内侵蚀速率随坡长的增加而增加,坡长大于 50 m 时,侵蚀速率随坡长的增加变化不大,65 m 以后,随坡长的增加还略有减少<sup>[75]</sup>。蔡强国等也认为侵蚀量沿坡长先是增加,超过一定坡长后逐渐减少<sup>[23]</sup>。黎四龙<sup>[71]</sup>等利用张家口坡长小区 5 年的观测资料,研究了降雨强度对坡长与径流量、侵蚀量关系的影响,结果表明:小雨强降雨时,径流量与坡长不是直线关系,侵蚀量随坡长增加较慢;大雨强降雨时,径流量可用坡长与径流的乘积代替,侵蚀量方程中坡长指数比小雨强时大。孙亚平等进行了实验室模拟不同降雨强度时,坡长对坡面侵蚀输沙能力影响的模拟试验研究<sup>[76]</sup>。研究表明了随着降雨条件的不同,坡长对侵蚀的影响也是不同的。

(3) 坡向。坡向是影响水土流失和地貌发育的重要因素之一,它对于局部小气候的影响十分显著。黄土高原阴阳坡的水分、暴雨过程中风对不同坡向侵蚀强度的影响、不同坡向的地面组成物质以及黄土的分布及厚度、遭受侵蚀的程度均具明显的坡向差别。同时还存在着人为开垦作用的影响,

人类耕垦坡地首先是在阳坡,随着人口的增多,阴坡也随之被开垦,同时这也导致了阴阳坡的地面组成物质的不同<sup>[21]</sup>。

研究也表明了同一流域不同坡向的地貌侵蚀演化存在着相当大的差异。据林超等在陕北绥德等地的调查,一场降雨中,阳坡的径流通常比阴坡大,而且水流中所含的泥沙也较阴坡多;阳坡不仅面蚀比阴坡严重,而且沟蚀也多,由此造成阳坡陡短,阴坡相对来说坡面较长和坡度平缓的不对称现象<sup>[77]</sup>。李孝地根据天水水保站观测的林地、草地、农地流失的年径流量及土壤流失量比值,得出施家沟流域阳坡流失量占流失总量的 80% 左右的结论,并经过调查进一步证明了阳坡侵蚀强度和侵蚀速度远高于阴坡<sup>[78]</sup>。

4 近期的研究方向

综上所述,有关黄土高原地表剥蚀过程研究已取得丰硕的成果,但鉴于自然条件的复杂性及人类活动对自然环境的不断干预,仍有许多问题需要人们进行不断地深入的探讨。根据黄土高原地表剥蚀过程的研究进展和存在的问题,在小流域系统地貌侵蚀演化研究方向,近期应开展以下研究:

(1) 沟谷地现代侵蚀演化速率及气候变化与人类活动的影响。目前,气候变化与人类活动影响是近年来国内外研究的热点问题,研究目的就是要确定在流域侵蚀产沙过程中气候变化与人类活动所起的作用。以往根据沟谷侵蚀速率的变化来探讨自然侵蚀与人类活动的加速侵蚀研究,存在三个问题,一是时间尺度。过去的研究,存在着不是时间系列太长(整个地貌侵蚀演化过程),就是时间系列太短(几年甚至一场或几场降雨),没有将古代侵蚀与现代侵蚀、尤其是近几十年来侵蚀演化速率的动态过程联系起来。二是以往由于研究手段的限制,没有将近几十年来,地貌的形态变化与土壤侵蚀产沙过程及气候、人类活动的影响联系起来。三是以往小流域沟谷侵蚀演化速率缺乏空间分异的定量研究。因此,开展本项内容的研究,对于揭示自然与人类活动在地表剥蚀过程中的作用具有重要的意义。

(2) 坡度、坡长对地表切割程度的影响与交互作用。根据以往国内外的研究,坡度、坡长与侵蚀的关系比较复杂,有的存在影响坡面侵蚀产沙的临界坡度、临界坡长(包括细沟、浅沟、切沟等临界),不同的是在临界坡度、临界坡长的判别上有着较大的分歧。同时也有研究认为不存在影响坡面侵蚀产沙的临界坡角和临界坡长,或临界坡长只在特定的降雨条件下存在<sup>[31]</sup>。上述出现的认识不统一,其重要原因就是以往研究的坡度、坡长只有在特定条件下才有意义。也就是说,在有其它因子的作用时(如岩性、不同自然带、人类活动等),坡度、坡长的作用就会发生改变。此外,除了水平面和绝对不透水层或一定坡度下的坡长外,坡长对于侵蚀产沙的影响,往往伴随着坡度的交互作用。鉴于坡度、坡长的特殊性,当下垫面其它因素改变时,坡度、坡长就较难单独作用于侵蚀模型中。美国著名的土壤侵蚀通用方程中的地貌因子就是坡度与坡长的组合作用。这种组合作用可在模型中应用,但很难确定在不同的下垫面条件下那一个起主要作用。因此,在区域空间,研究坡度、坡长对地表切割程度及侵蚀产沙的影响

和两者的交互作用,将有助于揭示在地表侵蚀演化中的作用和一定条件下二者侵蚀作用的转换机制。

(3) 不同坡向在地貌侵蚀演化中的作用与空间分异。以往的研究表明,黄土高原沟道流域坡地存在侵蚀方式、类型的垂直分带性特征。但由于不同坡向水分、植被生长条件不同,阴阳坡在侵蚀过程中存在的差异。在地貌侵蚀演化过程中的坡向差异,也就形成了坡地侵蚀方式、类型及侵蚀强度

的坡向分异,流域的地貌特征在不同坡向存在明显的不对称性。以往虽然开展了不同坡向径流小区侵蚀过程的研究,但由于径流小区的布设不可能覆盖全部流域空间,对于坡向在小流域系统地貌侵蚀演化中作用和侵蚀速率的变化及空间分异缺乏系统的研究,开展本项研究,对于揭示坡向在地貌侵蚀演化中的作用和侵蚀速率的影响,以及黄土坡地地貌发育理论具有重要意义。

参考文献:

- [1] Davis W M, The geographical cycle[J]. Geogr. J., 1899, 14, 481– 501.
- [2] 景才瑞.漫话彭克父子[J]. 地理知识, 1984, (1): 24– 25.
- [3] 景才瑞, 绕扬誉. 地貌学史还要[J]. 华中师范大学学报, 1995, 29(3): 382– 386.
- [4] L C King, the Uniformitarian Nature of Hillslopes, Trans, and Edina[J]. Geol. Soc. 1957, 17: 81– 102.
- [5] 史同广, 景才瑞. 戴维斯学说与现代地貌学. 华中师范大学学报(自然科学版), 1990, 24(3): 391– 395.
- [6] 罗来兴. 划分晋西、陕北、陇东黄土区域沟间地与沟谷的地貌类型[J]. 地理学报, 1956, 22(3): 201– 221.
- [7] 景才瑞. 论地貌发育的相关阶段. 华中师范大学学报(自然科学版), 1991, 25(1): 110– 114.
- [8] Schumm S A. Geograrhic threshole and complex response of drainage system [A]. In Morisawa M (ed). Fluvial Geomordhology[M]. London: Geoge Allen and Unwion, 1973. 199– 310.
- [9] 尹国康. 地貌发育的趋向与变异[J]. 地理学报, 1986, 41(3): 241– 251.
- [10] 涂汉明, 张伟, 陈晓玲, 等. 地貌系统演化模式初探[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 1992, 14(2): 183– 187.
- [11] 景才瑞. 论地貌波[J]. 华中师范大学学报, 1999, 33(3): 435– 429.
- [12] R E Horton. Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins: Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology[J]. Bull Geol Soc Am, 1945, 56: 275– 370.
- [13] A N Strahler. Hyosometric (area– altitude) analysis of erosional topography[J]. Bull. Geol. Soc. Amer. 1952, 63.
- [14] 卡森 M A, 柯克拜, M J. 坡面形态与形成过程[M]. 窦葆璋译. 北京: 科学出版社, 1984.
- [15] Murray, D. Erosion thresholds and suspended sediment yields, Waipaoa River Basin, New Zealand[J]. Water Resources Res., 2000, 4: 1129– 1142.
- [16] J O'Callaghan, D M Mark. The extraction of drainage networks from digital elevation data, Comput. Vision Graphics Image process. 1984, 28: 323– 344.
- [17] A Rinaldo, I Rodriguez– Iturbe, R Rigon. et al, Minmum energy and fractal structures of drainage networks, Water Resource. Res., 1992, 28: 2183– 2195.
- [18] Ignacio Rodriguez– Iturbe, Marco Marni, Self-organize river basin landscapes: fractal and multifractal characteristics [J]. Water Resource. Res., 1994, 12: 3531– 3539.
- [19] 艾南山. 侵蚀流域系统的信息熵[J]. 水土保持学报, 1987, 1(2): 1– 8.
- [20] 艾南山, 岳天祥. 再论流域系统的信息熵[J]. 水土保持学报, 1988, 2(4): 1– 9.
- [21] 朱晓华, 王建. 分形理论在地理学中的应用现状和前景展望[J]. 大自然探索, 1999, 18(69): 42– 46.
- [22] 许世远, 孙以义. 地貌形态模拟[J]. 地理学报, 2000, 55(3): 266– 273.
- [23] 蔡强国, 等. 黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟[J]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [24] 雷阿林, 唐克丽. 坡沟系统土壤侵蚀研究回顾与展望[J]. 水土保持通报, 1997, 17(3): 37– 43.
- [25] 罗来兴. 甘肃华亭粮食沟坡面细沟侵蚀量的野外测定及其初步分析结果[J]. 地理学资料, 1958, 2: 111– 118.
- [26] 承继成, 江美球. 流域地貌数学模型[J]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [27] 陈永宗. 景可, 蔡强国. 黄土高原现代侵蚀与治理[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [28] 曾伯庆. 晋西黄土丘陵沟壑区水土流失规律与治理效益[J]. 人民黄河, 1980, (2): 34– 39.
- [29] 江忠善, 刘志. 地形因素与坡地水土流失关系的研究[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1996, 第 12 集: 1– 8.
- [30] 张信宝, 汪阳春, 李少龙, 等. 蒋家沟流域土壤侵蚀及泥石流细粒物质来源的<sup>137</sup>Cs 法初步研究[J]. 中国水土保持, 1992, (2): 28– 31.
- [31] 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素[J]. 水土保持通报, 1981, 1(3, 4): 1– 9.
- [32] 罗来兴. 中国自然地理、地貌[A], 黄土地貌[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [33] 帅启富. 陕北县南沟小流域的沟道形态量计分析[J]. 水土保持通报, 1981, 1(3): 23– 28.
- [34] 陈浩. 陕北黄土高原沟道小流域形态特征分析[J]. 地理研究, 1986, (1): 82– 92.
- [35] 孔凡臣, 丁国瑜. 山西及邻区水系与黄土冲沟的分形几何学分析结果及其与构造活动的关系[J]. 地震地质, 1991, 13(3): 221– 229.

[ 36] 李后强, 艾南山. 分形地貌学及地貌发育的分形模型[ J]. 自然杂志, 1991, 15( 7): 16– 519.

[ 37] 何隆华, 赵宏. 水系的分形维数及其含义[ J]. 地理科学, 1996, 16( 2): 124– 128.

[ 38] 雷会珠, 武春龙. 黄土高原分形河网研究[ J]. 山地学报, 2001, 19( 5): 474– 477.

[ 39] 陆中臣, 等. 安塞县的侵蚀与地貌演化趋势预测[ A]. 黄土高原遥感调查试验研究[ M]. 北京: 科学出版社, 1988. 202– 201.

[ 40] 张勋昌. 陕北洛川地区沟道侵蚀与发育[ A]. 黄河粗泥沙来源及侵蚀产沙机理研究文集[ C]. 北京: 气象出版社, 1988. 83– 99.

[ 41] 景可. 黄土高原泥沙输移比的研究[ A]. 黄河粗泥沙来源及侵蚀产沙机理研究文集[ C]. 北京: 气象出版社, 1989. 14– 26.

[ 42] 陈永宗. 黄土高原水土流失及其治理[ J]. 水土保持通报, 1981, 1( 1): 20– 27.

[ 43] 金争平, 史培军, 等. 黄河皇甫川流域土壤侵蚀系统模型和治理模式[ M]. 北京: 海洋出版社, 1992. 98– 114.

[ 44] 史念海. 黄土高原及其农林分布地区的变迁[ J]. 历史地理, 1981. 创刊号: 1– 10.

[ 45] 洪业汤. 黄河泥沙的环境地质特征[ J]. 中国科学( B 辑), 1990, ( 11): 1175– 1184.

[ 46] 蒋德麒, 等. 黄河中游小流域泥沙来源初步分析[ J]. 地理学报, 1966: ( 1): 20– 35.

[ 47] 黄河水利委员会西峰水土保持科学试验站. 从南小河沟的治理成果探讨黄土高原沟壑区的治理途径[ J]. 人民黄河, 1979, ( 3): 19– 21.

[ 48] 焦菊英, 等. 小流域沟间与沟谷地径流与泥沙来量的探讨[ J]. 水土保持学报, 1992, ( 2): 36– 42.

[ 49] 陈浩, 等. 流域坡面与沟道的侵蚀产沙研究[ M]. 北京: 气象出版社, 1993. 104– 108.

[ 50] 陈浩. 降雨特征和上坡来水对产沙的综合影响[ J]. 水土保持学报, 1992, ( 2): 17– 23.

[ 51] 陈浩. 黄河中游小流域坡沟侵蚀关系研究[ J]. 地理研究, 1999, ( 2): 362– 363.

[ 52] 陈浩. 黄河中游小流域泥沙来源研究[ J]. 水土保持与土壤侵蚀学报, 1999, ( 1): 19– 26.

[ 53] 雷阿林, 唐克丽. 坡沟系统土壤侵蚀回顾与展望[ J]. 水土保持通报, 1997, 17( 3): 37– 43.

[ 54] M J 柯克比, R P C 摩根. 土壤侵蚀[ M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.

[ 55] Hudson, N W. Soil Conservation[ M]. London: Batsford., 1917. 320.

[ 56] Renner, F. Conditions influencing erosion on the Boise River Watershed[ M]. Washington, D. C: U. S. Dept. Agric., Tech. Bull. 1932.

[ 57] Bryan, R B, et al. Laboratory experiment on the influence of slope length on runoff, percolation and Rill development [ J]. Earth Surface Processes and Landform, 1989, 14: 211– 231.

[ 58] 刘善建. 天水水土流失测验的初步分析[ J]. 科学通报, 1953, 12: 59– 65.

[ 59] 黄河水利委员会西峰水土保持科学试验站. 从南小河沟的治理成果探讨黄土高原沟壑区的治理途径[ J]. 人民黄河, 1979, 3: 19– 21.

[ 60] 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素[ J]. 水土保持通报, 1981, 1( 3, 4): 1– 9.

[ 61] 陈永宗. 黄河中游梯田的调查研究[ M]. 北京: 科学出版社, 1958.

[ 62] 陈浩, 等. 坡地影响坡面流、产沙过程的试验研究[ A]. 黄河粗沙区来源及侵蚀产沙机理研究文集[ C]. 北京: 气象出版社, 1989.

[ 63] 曹文洪. 土壤侵蚀的坡度界限研究[ J]. 水土保持通报, 1993, 13( 4): 1– 5.

[ 64] 黎四龙, 蔡强国, 吴淑安, 等. 坡长对径流及侵蚀的影响[ J]. 干旱区资源与环境, 1998, 12( 1): 29– 35.

[ 65] 黎四龙, 蔡强国, 吴淑安. 次降雨侵蚀量的计算[ J]. 泥沙研究, 1999, 1: 49– 55.

[ 66] 郭继志. 关于坡度与径流量和冲刷量关系问题的探讨[ J]. 黄河建设, 1958, ( 3): 16– 19.

[ 67] 陈永宗. 黄河中游黄土丘陵区坡地的侵蚀发育[ A]. 中国科学院地理研究所地理集刊( 10)[ M]. 北京: 科学出版社, 1976.

[ 68] 范荣生, 等. 陡坡侵蚀产沙特点及含沙量过程计算模型研究[ J]. 水土保持通报, 1993, 13( 4): 6– 14.

[ 69] 石生新. 高强度人工降雨条件下地面坡度、植被对坡面产沙过程的影响[ J]. 山西水利科技, 1996, 112( 3): 77– 80.

[ 70] 靳长兴. 论坡面侵蚀的临界坡度[ J]. 地理学报, 1995, 50( 3): 234– 239.

[ 71] 赵晓光, 吴发启, 刘秉正, 等. 再论土壤侵蚀的坡度界限[ J]. 水土保持研究, 1999, 6( 2): 42– 46.

[ 72] 西北黄河工程局. 西北黄土区坡地固体径流和液体径流形成过程的初步研究[ J]. 黄河建设, 1957, ( 12): 17– 21.

[ 73] 罗来兴. 甘肃华亭粮食沟坡面细沟侵蚀量的野外测定及其初步分析结果[ J]. 地理学资料, 1958, ( 2): 111– 118.

[ 74] 华绍祖. 黄河中游实验小流域的土壤侵蚀及水土保持效益[ J]. 水土保持通报, 1982, 13( 4): 6– 14.

[ 75] 张信宝, 汪阳春, 李少龙, 等. 蒋家沟流域土壤侵蚀及泥石流细粒物质来源的<sup>137</sup>Cs 法初步研究[ J]. 中国水土保持, 1992, ( 2): 28– 31.

[ 76] 孙亚平, 张科利. 黄土坡面侵蚀产沙沿程变化的模拟实验研究[ J]. 泥沙研究, 2003, ( 1): 33– 38.

[ 77] 林超, 李昌文. 阴阳坡在山地地理研究中的意义[ J]. 地理学报, 1985, 40( 1): 20– 28.

[ 78] 李孝地. 黄土高原不同坡向土壤侵蚀分析[ J]. 中国水土保持, 1988, ( 8): 52– 54.