

# 黄河中游区重力侵蚀研究综述

薛 海<sup>1,2</sup>, 王光谦<sup>3</sup>, 李铁键<sup>3</sup>

(1. 黄河勘测规划设计有限公司博士后工作站, 河南 郑州 450003; 2 华北水利水电学院, 河南 郑州 450005;  
3. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 在对黄河中游区重力侵蚀宏观规律分析、实验观测、计算模型及新技术应用 4 个方面研究进展进行评述的基础上, 就重力侵蚀机理模型构建的难点和重点、3S 技术及非线性方法等新技术用于重力侵蚀研究的可行性和应用方式等进行了探讨。分析了重力侵蚀观测水平较低的原因及其对理论和计算模型研究的严重制约作用。提出重力侵蚀研究应在流域观测站点布设、数据自动测报和积累、计算模型合理概化及与其它类型侵蚀研究结合方面进一步开展工作。

**关键词:** 重力侵蚀; 黄河中游区; 研究综述

中图分类号: S157.1; G353.11 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2009)04-0599-08

黄河中游强烈的土壤侵蚀是造成中下游河道泥沙严重淤积及相关环境问题的重要原因。在黄土区土壤侵蚀分类体系<sup>[1]</sup>所列的主要侵蚀类型中, 坡面侵蚀研究进展较大。与此对比明显的是, 重力侵蚀作为主要侵蚀类型, 其研究一直处于滞后状态。理论研究方面, 重力侵蚀的微观及宏观力学机理尚不明晰, 计算模型的构建刚刚起步; 试验及观测方面, 至今仍未形成重力侵蚀系统观测和试验研究体系。而另一方面, 黄河中游区水土流失治理及水保工作的快速推进对土壤侵蚀研究提出了迫切要求。在此背景下, 重力侵蚀研究在统计规律、力学机理分析和局部观测等方面逐步展开, 特别是近年来利用 3S 技术及相关学科的新方法, 对重力侵蚀进行了多角度探索, 取得了一些有益的研究成果。本文基于重力侵蚀领域的相关研究成果, 对研究思路和成果创新点进行重点评述, 同时也指出研究中的不足。在此基础上, 对重力侵蚀研究的发展趋势及今后一个时期的研究重点提出了若干见解。

## 1 重力侵蚀研究进展

### 1.1 重力侵蚀的观测及实验研究

重力侵蚀的观测十分困难, 迄今为止还缺乏大范围的系统观测。现有观测主要从实验室和典型小流域观测两个方面进行了探索。

韩鹏等<sup>[2]</sup>在实验室中对细沟发育过程中的沟岸滑塌进行了实验研究。实验中提出了水力侵蚀相对稳定, 重力侵蚀引起波动的判别条件, 在一定程度上将重力侵蚀从总侵蚀中区分出来; 研究还首次提出了“重力侵蚀中值时间”的概念。通过 9 场次实验, 发现细沟发育过程中的重力侵蚀量存在由增大到减小再到波动的变化趋势。这一研究是实验室中重力侵蚀规律研究的一次尝试, 特别是重力侵蚀判别条件, 对从流域实测泥沙过程中分离重力侵蚀量具有一定的借鉴意义, 但是实验重点主要放在坡面细沟沟壁坍塌方面而非沟坡区的切沟重力坍

收稿日期: 2008 08 30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50809028); 水利部黄河泥沙重点实验室 2007 年度开放基金资助项目 (2007003); 中国博士后科学基金资助项目 (20070410253); 华北水利水电学院高层次人才科研启动项目 (200805)

作者简介: 薛 海(1974-), 男, 河南修武人, 讲师, 博士, 主要从事流域侵蚀模拟、水力学及河流动力学等方面研究。

E-mail: lxue03@mails.tsinghua.edu.cn

塌,因此其实验结果不能用来描述沟坡区的重力侵蚀现象。

重力侵蚀现场观测方面,黄河水利委员会天水水土保持科学试验站进行了一些探索。李裕厚等<sup>[3]</sup>对罗玉沟流域1987年土壤侵蚀现状进行调查并初步计算了重力侵蚀量。研究中对崩塌滑坡采用逐沟几何形态测量的方法,用坡脚堆积体体积和缺失土体体积估算重力侵蚀量。对于泻溜侵蚀量,则采用“测杆法”和“径流池法”,通过量测坡面上所钉竹杆的出露深度或坡下“径流池”中拦蓄的泥沙得到单位面积的泻溜侵蚀量。从实用角度,上述方法可在一定程度上估算重力侵蚀量。但在实际估算中,一方面缺失土体与冲刷外移的重力侵蚀量并不完全一致,而研究中采取逐沟人工观测的方法,对于流域而言工作量巨大,可行性小。此外,由于主要依据重力侵蚀发生后的几何形态反求重力侵蚀量,因而无法用于重力侵蚀的预测预报。

李绍铠<sup>[4]</sup>对重力侵蚀观测方法中的“方格网法”及“断面法”进行了对比,发现“断面法”相对于“方格法”,其适用性更强,但“断面法”仍然存在无法适应复杂地形变化并且所测体积须配合土体密实度和位移才能较好反映重力侵蚀量的缺陷。

曾伯庆等<sup>[5]</sup>对晋西三趾马红土的泻溜重力侵蚀现象进行了观测,通过在张家沟中游左岸的4个不同坡度沟坡布设测点,利用测针法量测泻溜发生过程。研究表明,泻溜类型的重力侵蚀一年四季均有发生,侵蚀高峰出现在3~4月份。其强度旱季大于湿季,峰值坡度在 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ,年泻溜侵蚀模数可达 $48604 \text{ t/km}^2$ 。这一研究的主要价值在于通过实际观测给出了泻溜侵蚀的时空分布及侵蚀量级,在一定程度上改变了由于泻溜侵蚀发生缓慢而导致的对其重要性估计不足的观念。

从上述实验及观测手段看,研究还处于起步阶段,手段相对落后,观测区域较小且孤立,成果积累还远不能满足为理论研究提供数据支撑的需要。因此,如何利用新技术新方法,对流域重力侵蚀进行大范围的系统观测,成为重力侵蚀观测实验研究领域急待解决的问题。

## 1.2 重力侵蚀宏观规律及与流域产沙的关系研究

由于黄土区重力侵蚀的复杂性,较早涉及该领域的研究是通过流域水沙资料的分析,得出重力侵蚀宏观规律及其在侵蚀总量中的比重及作用等。王兴奎等<sup>[6]</sup>分析了团山沟两个径流场的降雨及含沙量资料,发现含沙量在重力侵蚀的补给下可能猛增到 $1000 \text{ kg/m}^3$ 以上,且沙峰滞后于洪峰的频率从崩坡区的13%增加到沟坡区的41.7%。许炯心<sup>[7]</sup>则根据岔巴沟和王家沟观测资料,发现落水段含沙量均明显高于涨水段,且沙峰落后洪峰的频率随尺度的增大而增加。这两项研究虽未针对重力侵蚀现象本身,但可明显反映出重力侵蚀的存在对径流含沙量和水沙峰值相位差产生的巨大影响,在一定程度上揭示了重力侵蚀产物作为“沙源”的“缓释”作用与流域高含沙水流的形成和维持之间的重要联系。

针对重力侵蚀宏观规律的研究主要在重力侵蚀的时空分布及与下垫面的关系方面展开。朱同新等<sup>[8]</sup>系统分析了晋西王家沟小流域1985、1986年连续两年的重力侵蚀调查资料,发现在空间分布上,冲沟、干沟坡麓、河沟、切沟4种类型沟谷中的重力侵蚀发生规模依次减小。时间分布方面,丰水年以重力崩塌和滑塌为主,且滑塌量高达枯水年的18.36倍;枯水年以泻溜为主,泻溜、崩塌、滑塌量的比例大致为0.60:0.31:0.09。该研究的主要价值在于利用实测资料分析并指出了重力侵蚀频发的部位(冲沟)及时段(丰水年),使重力侵蚀控制措施的布设及计算模型构建更具针对性。张信宝等<sup>[9]</sup>则运用计量地貌学方法,从地形和岩性角度引入区域重力侵蚀地形因子( $A$ ),并将“黄土区临空面高度等值线图”与不同地质岩性区域进行叠加,得到不同岩性下的 $A$ 分布。计算结果显示,对黄土砢砂岩、软弱岩层和坚硬岩层,当 $A$ 值分别大于0.8、1.0和1.6时,重力侵蚀强度将达到剧烈程度。从成果上看,该研究在一定程度上将重力侵蚀主要影响因素( $L$ ,  $H$ , 岩性等)与重力侵蚀强度的关系进行量化并给出了相应指标,可初步用于区域重力侵蚀发生强度的判别,但是在强调地形岩性因素的同时,未考虑降雨入渗这一重要因素,使判别因子的可用性有所降低。若以相似思路将降雨强度因素包含在因子 $A$ 中,则可能得到适于大范围重力侵蚀危险性预警的判别模型。此外, Jordi<sup>[10]</sup>研究了降水与大型滑坡之间的关系,发现前期降水量对诱发大面积滑坡是十分重要的参数,并且随着前期降雨时间的增长,后期诱发滑坡所需降雨量将减少。此研究虽然并非针对黄土高原区,但其得到的降水和滑坡的关系对于重力侵蚀模型构建中降雨

及土壤含水量的处理方面, 可能起到一定的启示作用。

一些学者还从宏观视角对流域重力侵蚀分类进行了研究。朱同新<sup>[11]</sup>运用模糊聚类方法对晋西地区重力侵蚀进行区域划分, 在每个区域内研究不同类型重力侵蚀产沙方式、强度及其在总侵蚀量中所占比例, 计算得到平均比例约为 35%~46%。松永光平<sup>[12]</sup>则以重力侵蚀发生规模、频度为基本指标对重力侵蚀进行分类, 分析了地质地貌因素对塌陷、大规模滑坡、群发性崩塌和泥石流四种主要重力侵蚀类型形成与分布的影响, 提出应充分研究不同地质地貌条件与重力侵蚀类型的对应关系以进行针对性防治的建议。上述两项研究具有一个共同特点, 即将黄河中游复杂的重力侵蚀现象按不同指标进行分类分区, 而同一分类或区域的重力侵蚀具有相对一致的机理和规律性, 便于进行分析和统计工作。实际上, 这种分区分类研究方法对于构建具有广泛适用性的重力侵蚀计算模型具有很好的借鉴意义。

黄河中游北部砒砂岩区是黄土高原土壤侵蚀最为严重的区域之一, 其特殊性在于砒砂岩物理化学成分复杂, 同时受到风蚀、水蚀、冻融及重力侵蚀的相互作用而呈现出极为特殊的侵蚀方式。近年来有学者对砒砂岩的重力侵蚀问题进行了初步探索。砒砂岩微观机理方面, 叶浩等<sup>[13]</sup>以内蒙南部砒砂岩重力侵蚀作为研究对象, 探讨了砒砂岩的化学成分、矿物组成、力学性质等对岩石化学风化和强度的影响, 利用实验室测定结果构建化学蚀变指数(CIA), 并以此为基础对 MgO 等主要化学成分含量与其内聚力进行相关分析。分析表明这些化学成分含量的变化对内聚力影响明显, 显著地促进了重力侵蚀的发育。唐政洪等<sup>[14]</sup>则从砒砂岩区风蚀、水蚀和重力侵蚀的相互作用入手, 对皇甫川五分地沟等 3 个小流域 1983~1997 年的观测资料进行分析, 发现这一区域的重力侵蚀主要是在前期风化冻融作用下, 理化性质遭到破坏, 进而在重力作用下形成以泻溜为主, 伴有崩塌的重力侵蚀模式。研究还通过模型计算得出砒砂岩的产流产沙能力均高于当地黄土和风沙土的结论。此外, 韩承鼎<sup>[15]</sup>对黄丘五副区陈家沟的一种鳞片状滑移类型重力侵蚀进行了探讨。此类重力侵蚀主要发生在半干旱至荒漠过渡带, 在干、热、风等机械破坏下, 沟坡地表土体在垂向成层剥离, 在平面上呈连续片状, 最后随机地在重力作用下滑移至坡底。研究还提出防止土壤盐碱化、人造鱼鳞坑以及种植沙枣等方法来防治此类侵蚀的建议。对于砒砂岩等特殊类型重力侵蚀, 其研究难点主要在于影响因素更多, 微观机理(如化学成分)更为复杂且对宏观现象作用巨大。虽然这几项成果还主要以定性研究为主, 但研究得出的规律及相应指标可作为进一步量化研究的方向。

对重力侵蚀而言, 无论是微观物理化学性质、内在力学机理还是对流域产沙的宏观影响, 都体现了其多因素、多层次且各因素互作用的复杂性, 因此其研究手段也必须多样化。除宏观规律研究外, 很多学者通过实验观测、计算模型并运用相关学科的新技术对重力侵蚀进行了多角度的研究, 以期揭示其内在机理并满足一定的实际生产要求。

### 1.3 重力侵蚀的量化及计算模型研究

近年来, 随着黄河流域水土保持规划及工程建设的迫切需求, 能够反映重力侵蚀数量、分布及过程的定量计算方法和模型成为今后一个时期的研究重点之一。从现有研究成果看, 重力侵蚀量化及计算模型研究还未形成体系, 各种研究方法都在探索尝试中。

曹银真<sup>[16]</sup>较早对重力侵蚀进行了研究, 运用传统土力学中的滑弧法对谷坡进行简要的受力分析, 得到一个简单的土坡不稳定判别关系。模型作为对黄土区重力侵蚀的初步理论研究, 是一次有意义的尝试, 但模型主要进行定性讨论, 未涉及降雨影响及重力侵蚀随机特性, 因此模型无法进行实际流域重力侵蚀模拟。

付焯<sup>[17]</sup>基于灰色理论构建了一个黄土丘陵沟壑区重力侵蚀灰色系统预测模型。利用灰色关联度方法对重力侵蚀预测值系列和观测值系列进行关联性分析, 引入残差辨识方法将两个系列的差值再次进行关联度分析, 从而较为准确地反映系统的动态变化。从总体方法上看, 模型是基于灰色理论的, 其数学方法核心是得到预测值和测量值之间的关联度, 而未直接涉及力学机理, 因此该模型本质上还属于经验回归模型范畴。

蔡强国等<sup>[18]</sup>以羊道沟试验区观测资料为依据, 通过拟合得到重力侵蚀量与径流深之间的幂函数关系:  $S_h = 2284.7Q_h^{0.811}$  ( $S_h$  为黄土沟壁重力侵蚀量;  $Q_h$  为径流深, 是降雨能量与最大 30 min 雨强的函数)。该模型具有模

型输入参数少, 便于应用的优点。模型在突出降雨径流因素的同时, 对土体的失稳力学机理及随机性未充分考虑, 因此在除降雨外的其他影响因素分异性较大的区域, 其应用将存在一定限制。

王军等<sup>[19]</sup>扩展地理侵蚀面的概念, 利用 GIS 将性质相对单一的区域划分为“最小图斑”并进行编码, 得到黄土区重力侵蚀相对强度的估算式, 对其空间分布进行了探讨。计算中引入岩性系数  $R$ 、坡度系数  $K$  和气候系数  $L$  分别反映这 3 个方面的影响。模型将力学和动力因素均包含在 3 个系数中, 模式类似于 USLE 模型的因子概化思路, 未直接对重力侵蚀力学机制进行分析, 在构建模型资料以外区域的适用性值得商榷。

叶浩等<sup>[20]</sup>认为重力侵蚀从形态上导致了沟缘线的变化, 据此提出用 GPS 定位技术记录沟坡不同时期的动态变化, 再用几何方法推求重力侵蚀量。该方法具有参数少、小范围精度较好的优点, 但要利用 GPS 对较大区域沟坡进行长系列监测, 精度不够且工作量巨大。若能够结合遥感等新技术手段实现长时间自动连续观测, 则有望得到更高的实用价值。

郑书彦等<sup>[21]</sup>基于弹塑性力学, 利用有限元及离散元法对滑坡过程进行仿真, 得出滑坡体不同时刻的运动力学参量。这一研究在滑坡侵蚀的动力学仿真方面取得了较大进展, 能够精细模拟滑坡体破坏过程。但此方法若用于流域重力侵蚀模拟, 模型所需大量力学和几何参数在黄土区很难获得, 计算精度无法保证; 此外, 模型中的有限元等数值方法对单个滑坡的精确模拟较为有效, 而对流域众多沟坡则计算量十分巨大, 现有计算条件下无法完成。

王光谦等<sup>[22]</sup>运用土力学分析方法, 考虑降雨入渗导致的沟坡土体强度变化、坡脚水流冲刷导致的临空高度变化及沟坡后退等力学机理, 在力学分析基础上进行不确定性分析, 得到在一定程度上反映重力侵蚀机理及随机性的模型。通过在数字流域沟坡系统对岔巴沟小流域进行模拟计算, 得到较好的模拟效果。若模型基于各影响因素差异, 针对不同重力侵蚀类型及下垫面条件进行细化, 则模型将具有更强的适用性。

近期, 金鑫等<sup>[23]</sup>将重力侵蚀的影响因子进行量化, 在沟道单元按因子大小进行排序, 以反映重力侵蚀发生可能性。在将发生重力侵蚀的沟道单元, 认为重力侵蚀量将大于径流最大可挟沙量, 并以后者作为输出沟道单元的泥沙量。该模型的特点是建立了包括地形提取、水文、侵蚀及泥沙输移在内的较完整的计算模型。但在此模型中, 重力侵蚀的发生由内因(土壤含水量、沟坡坡度)与外因相加来确定, 而外因则为前一时段沟道单元径流侵蚀量的相对比重, 虽然从一定意义上重力侵蚀与该比重确有一定相关性, 但将其作为量化判别指标的一部分, 对于计算模型而言则显得较为粗略。

Miller 和 Sias<sup>[24]</sup>采用 MODFE 模型和沟坡稳定模型(Bishop), 计算了坡脚水流淘刷与沟道下切情况下的滑坡稳定因子, 计算表明模型可以较好地模拟自然状况下的滑坡过程。该方法已经抓住流域沟坡失稳的主要特征, 若其中有关参数针对黄土特性及黄土区下垫面条件进行适当改进, 则可能在黄土区重力侵蚀模拟计算方面取得一定进展。

#### 1.4 新技术在重力侵蚀研究中的应用

近年来, 随着相关学科快速发展, 一些新理念、新技术被不断引入到重力侵蚀研究中来, 不仅为现有主流研究提供新的研究思路和途径, 而且随着其自身发展及与土壤侵蚀研究的融合, 有可能在某些方面产生突破, 并逐渐成为重力侵蚀的主要研究方法。

(1) “3S”及航空测量技术在重力侵蚀研究中的应用。作为地学现象的一部分, 重力侵蚀具有分布范围广、发生不连续且与地理密切相关的特点。对其进行大范围长时段系统观测, 传统方法显然已无法胜任。遥感、航测及地理信息技术等学科的发展, 将在这些方面为重力侵蚀研究提供更为有效的研究途径。

遥感(RS)在获取流域下垫面信息方面具有特殊优势。黄河水利委员会防汛测报中心王德甫等<sup>[25]</sup>就重力侵蚀遥感影像的可分辨性、可测量性及可监测性进行了分析, 指出就当时精度(30 m), 遥感可作为一种快速获取重力侵蚀大范围分布特征的方法, 但尺度小于分辨率的情况则无法捕获。实际上, 通过野外调查可知黄土区尺度小于 30 m 的重力侵蚀占据相当大的比重, 因此当时遥感方法主要用于大范围重力侵蚀调查, 而无法用于重力侵蚀精确观测。

近年来遥感技术的发展已远远超出了预期速度, 新一代高分辨率遥感卫星相继投入运行, 为重力侵蚀观测研究带来了新的契机。如 2001 年发射的 Quick Bird 2 卫星可同时拍摄全色和多光谱图像, 全色图像分辨率最高可达 0.61 m, 并可识别多种岩土类型<sup>[26]</sup>, 而这些新功能与更高的精度使遥感技术逐步成为重力侵蚀研究的重要辅助手段。

航空测量则是通过飞机等近地飞行器对地物扫描, 得到流域高分辨率的航空影像并以此为基础得到 DTM。与遥感相比航测覆盖面积较小, 但在适当外业布点配合下精度可达到厘米级别, 这对于构建更为精细的重力侵蚀模型十分重要。黄河水利委员会 2006 年组织了“皇甫川流域数码航空摄影及其数据处理”项目, 对皇甫川全流域进行了航测并提取了高精度 DTM 数据, 这一项目的实施为在该地区进行包括重力侵蚀在内的土壤侵蚀研究提供了丰富的基础资料。

GIS 技术则是在遥感或航测基础上进行多层次多角度分析, 为重力侵蚀模型提取沟坡及河网, 使模型尽可能建立在其真实发生的几何尺度上而非平均化或集总式的<sup>[27]</sup>; 此外利用 GIS 进行空间分析, 识别重力侵蚀量值及分布, 也将成为重力侵蚀规律研究的重要手段。

(2) 非线性方法在重力侵蚀研究中的应用。重力侵蚀就其力学本质而言, 是在诸多复杂力学因素的非线性相互作用下产生的宏观边坡失稳现象。在岩土力学领域, 研究者已从非线性动力学出发进行了一些探索, 如果这些方法经过改进并移植到重力侵蚀研究领域, 则可能为重力侵蚀研究提供新的方向。

人工神经网络方法(ANN)在处理非线性问题时具有很强的自学习性、自组织性及高度容错性<sup>[28]</sup>。一些学者借助神经网络方法对岩土工程中大量边坡破坏资料中的非线性规律进行分析, 并以此为基础对边坡稳定问题进行预测, 取得了一些研究成果<sup>[29-30]</sup>。实际上, 对重力侵蚀也可采用类似方法, 建立基于神经网络的黄河中游重力侵蚀预测模型。但需指出的是, 这类模型仍属经验回归模型范畴, 当各因素发生较大改变后, 模型预测的正确性无法保证。此外模型学习训练所需大量观测资料在黄河中游区还不具备, 需长时间积累。

当沟坡中促使和阻碍重力侵蚀的力学指标十分接近时, 沟坡即处于失稳临界状态, 系统行为具有类似于 Bak 沙堆坍塌<sup>[31]</sup>时所表现出的临界自组织现象(SOC)。在此情况下, 若继续增加不稳定因素则系统可能出现各种规模崩塌, 且与发生频率满足幂率关系。李仕熊<sup>[32]</sup>等通过实验也证实了类似规律。根据上述研究, 重力侵蚀作为群发边坡失稳现象可能符合这一规律, 且尝试应用于泻溜等松散体的重力侵蚀较为适合, 而用于滑坡重力侵蚀则值得商榷。

## 2 重力侵蚀研究存在的问题

从土壤侵蚀的研究历程看, 早在 20 世纪初美国就开始对土壤侵蚀进行系统研究, 在此期间坡面侵蚀的研究进展较快, 且坡面侵蚀的研究中心地位一直没有改变。相比之下, 重力侵蚀的研究则显得相对缓慢。主要集中在以下几方面:

(1) 研究开展较早的美国等国家, 与其生产相关的侵蚀区以缓坡耕地为主, 而以美国通用土壤流失方程(USLE)为代表的土壤侵蚀研究, 其“通用”性基本满足了主要农业生产和环境规划需求, 缺乏重力侵蚀研究的紧迫性和研究动力。因此重力侵蚀研究的起步较晚, 造成基础理论研究滞后和缺乏观测及实验数据积累的现状。

(2) 重力侵蚀观测技术的总体水平低, 并严重阻碍了理论研究的发展。前已述及, 泻溜侵蚀还主要使用测针法等人工方法, 其他如滑坡等重力侵蚀还未找到大范围的系统观测方法。而观测数据奇缺的直接结果就是多数重力侵蚀研究所用数据仍为 20 世纪 60 年代资料。由于年代久远, 不仅当时设备和方法的精度已无法考证, 而且数据过于集中在有限年份也将使研究成果代表性受到影响。实际上, 重力侵蚀观测水平低主要源于 3 方面原因: ①大规模观测成本过高, 多数流域未针对重力侵蚀布设观测站点; ②重力侵蚀现象本身具有极强的随机性, 对其定点观测造成了极大障碍; ③重力侵蚀产物多数情况下都与坡面侵蚀耦合在一起, 从观测角度很难将纯粹属于重力侵蚀的部分提取出来。

(3) 现有重力侵蚀理论对黄河中游不同降雨及下垫面条件而言缺乏针对性, 特别是对砒砂岩等特殊类型重

力失稳问题, 缺乏将微观物理化学机理与宏观力学机理有机结合的理论方法。此外, 由于流域级重力侵蚀模拟的计算量巨大, 现有计算平台难以满足要求, 因此新型的流域并行计算平台还需要进一步建立和完善。

### 3 展 望

重力侵蚀是土壤侵蚀的主要组成部分, 又是黄河中游区形成和维持高含沙水流的重要来源, 因此对重力侵蚀的研究无论理论上还是应用上都具有很高的研究价值。尽管研究起步较晚, 但有关学者已从宏观规律、实验观测、计算模型及新技术的引入等方面进行了大量有益探索, 并已取得初步的成果。同时也应该看到, 重力侵蚀的研究还存在诸多问题, 且离实际应用有很大距离。要使重力侵蚀研究在理论上逐渐完善, 并为水土保持实践提供科学有效指导, 大致需要在如下几个方面展开工作:

(1) 观测数据的缺乏不仅导致对重力侵蚀规律性的认识不足, 而且使有关理论和计算模型无法得到直接数据验证, 成为严重阻碍重力侵蚀研究的瓶颈。要突破这一瓶颈则需要充分利用 3S 技术, 并加强对量测结果的解译识别研究。在典型小流域内加密并合理布设观测点, 进行长期系统观测。在次降雨观测中加强降雨、土壤含水量及沟坡变形的自动测报。

(2) 在重力侵蚀计算模型研究中, 需要在工程边坡问题(过细)和宏观统计(缺乏机理且较粗糙)之间找到合适的切入点, 对重力侵蚀的降雨入渗、土体强度变化、侧向冲刷、失稳模式及随机性等因素进行合理概化, 通过力学分析(土力学、流体力学及泥沙运动力学等), 从机理上构建能够反映重力侵蚀地域差异性的分布式模型。

(3) 重力侵蚀并非孤立发生, 而是与其他侵蚀类型相互关联相互作用的。同时重力侵蚀形成的泥沙由于数量较大而常堆积在坡脚, 还存在沟道水流二次侵蚀和冲淤输运过程。因此重力侵蚀的研究需要注重与其他侵蚀过程的研究相结合, 探讨风蚀、水蚀、冻融侵蚀以及沟道水流对重力侵蚀的影响, 以使重力侵蚀的模拟更符合在实际流域发生的真实状况。

#### 参考文献:

- [1] 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀分类[J]. 土壤学报, 1956, 4(2): 99-105. (ZHU Xiann mo. Classification system of soil erosion on the Loess Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 1956, 4(2): 99-105. (in Chinese))
- [2] 韩鹏, 倪晋仁, 王兴奎, 等. 黄土坡面细沟发育过程中的重力侵蚀实验研究[J]. 水利学报, 2003, 34(1): 51-56. (HAN Peng, NI Jir ren, WANG Xing kui, et al. Experimental study on gravitational erosion process[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(1): 51-56 (in Chinese))
- [3] 李裕厚, 康学林, 岳新发. 罗玉沟流域重力侵蚀特征研究初报[C]// 黄土丘陵沟壑第三副区水土流失原型观测及规律研究. 郑州: 黄河水利出版社, 2004: 32-37. (LI Yir hou, KANG Xue lin, YUE Xir fa. Preliminary research on characteristic of gravitational erosion in Luoyugou Basin[C]// Researches on Observation and Laws of the Third Subzone in the Loess Plateau. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2004: 32-37. (in Chinese))
- [4] 李绍铠. 重力侵蚀观测方法试验研究[C]// 黄土丘陵沟壑第三副区水土流失原型观测及规律研究. 郑州: 黄河水利出版社, 2004: 68-76. (LI Shaor kai. Research on observation method of gravitational erosion[C]// Researches on Observation and Laws of the Third Subzone in the Loess Plateau. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2004: 68-76 (in Chinese))
- [5] 曾伯庆, 马文中, 张治国, 等. 三趾马红土泻溜侵蚀规律的研究[C]// 陈永宗. 晋西黄土高原土壤侵蚀规律实验研究文集. 北京: 水利电力出版社, 1990: 109-115. (ZENG Bor qing, MA Wen zhong, ZHANG Zhi guo, et al. A study on creeping of Sanzhima Red Earth[C]// CHEN Yong zong. Symposium of Experimental Researches on the Law of Erosion in The Loess Plateau Region. Beijing: China WaterPower Press, 1990: 109-115. (in Chinese))
- [6] 王兴奎, 钱宁, 胡维德. 黄土丘陵沟壑区高含沙水流的形成及汇流过程[J]. 水利学报, 1982(7): 26-35. (WANG Xing kui, QIAN Ning, HU Wei de. The formation and process of confluence of The flow with hyperconcentration in the Gullied Hilly Loess Area of the Yellow River basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1982(7): 26-35. (in Chinese))

- [7] 许炯心. 黄土高原丘陵沟壑区坡面- 沟道系统中的高含沙水流: (I) 地貌因素与重力侵蚀的影响[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(1): 55-60. (XU Jiong xin. Sediment heavily containing flows in slope channel systems of gullied hilly area in the Loess Plateau: (I) Influences of landforms and gravitational erosion[J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13(1): 55-60 (in Chinese))
- [8] 朱同新, 蔡强国, 张勋昌. 王家沟流域重力侵蚀的时空分布规律[C]//陈永宗. 晋西黄土高原土壤侵蚀规律实验研究文集. 北京: 水利电力出版社, 1990: 116-125. (ZHU Tong xin, CAI Qiang guo, ZHANG Xun chang. Temporal and spatial variation of gravitational erosion in Wangjiagou gully[C]// CHEN Yong zong. Symposium of Experimental Researches on the Law of Erosion in the Loess Plateau Region. Beijing: China WaterPower Press, 1990: 116-125. (in Chinese))
- [9] 张信宝, 柴宗新, 汪阳春. 黄土高原重力侵蚀的地形与岩性组合因子分析[J]. 水土保持通报, 1989, 9(5): 40-44. (ZHANG Xirbao, CHAI Zong xin, WANG Yang chun. Analysis and selection of topographical indices influencing soil loss on different scales[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1989, 9(5): 40-44. (in Chinese))
- [10] JORDI C, JOSE M. Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat River basin, Eastern Pyrenees Spain[J]. Geomorphology, 1999, 30: 79-93.
- [11] 朱同新, 陈永宗. 晋西黄土地区重力侵蚀产沙分区的模糊聚类分析[J]. 水土保持通报, 1989, 9(2): 27-34. (ZHU Tong xin, CHEN Yong zong. The primary study on sediment production of gravitation erosion in western Shanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1989, 9(2): 27-34. (in Chinese))
- [12] 松永光平, 甘枝茂. 黄土高原重力侵蚀的地质地貌因素分析[J]. 水土保持通报, 2007, 27(1): 55-57. (MATSUNAGA K, GAN Zhi mao. Geological and geomorphological conditions of mass movements in the Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, 27(1): 55-57. (in Chinese))
- [13] 叶浩, 石建省, 王贵玲, 等. 砒砂岩化学成分特征对重力侵蚀的影响[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(6): 5-8. (YE Hao, SHI Jiarsheng, WANG Gui ling, et al. Effect of chemical compositions of Pisha Sandstone on the gravity erosion[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006, 33(6): 5-8. (in Chinese))
- [14] 唐政洪, 蔡强国, 李忠武, 等. 内蒙古砒砂岩地区风蚀、水蚀及重力侵蚀交互作用研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 25-29. (TANG Zheng hong, CAI Qiang guo, LI Zhong wu, et al. Study on interaction among wind erosion, hydraulic erosion and gravity erosion in sediment rock region of Inner Mongolia[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(2): 25-29. (in Chinese))
- [15] 韩承鼎. 鳞片状滑移: 黄丘五副区一种特殊的重力侵蚀[J]. 中国水土保持, 1996(5): 21-23. (HAN Cheng ding. Scaly slipping a special gravitational erosion in No.5 subregion of the gullied and rolling loess region[J]. Soil and Water Conservation in China, 1996(5): 21-23. (in Chinese))
- [16] 曹银真. 黄土地区重力侵蚀的机理及预报[J]. 水土保持通报, 1981(4): 19-22. (CAO Yin zhen. Research on mechanics and prediction of gravitational erosion in Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1981(4): 19-22. (in Chinese))
- [17] 付炜. 土壤重力侵蚀灰色系统模型研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(4): 9-17. (FU Wei. Research on grey system model for soil gravity erosion in Loess Regions[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1996, 2(4): 9-17. (in Chinese))
- [18] 蔡强国, 陆兆熊. 黄土丘陵沟壑区典型小流域侵蚀产沙过程模型[J]. 地理学报, 1996, 51(2): 108-117. (CAI Qiang guo, LU Zhao xiong. Process based soil erosion and sediment yield model in a small basin in the hilly loess region[J]. Acta Geographica Sinica, 1996, 51(2): 108-117. (in Chinese))
- [19] 王军, 杨小毛, 倪晋仁. 基于 GIS 的黄河中游河龙区间流域重力侵蚀相对强度空间分布[J]. 应用基础与工程科学学报, 2001, 9(1): 23-32. (WANG Jun, YANG Xiao mao, NI Jin ren. GIS supported study on gravitational erosion distribution case of the catchments of the middle reach of Yellow River[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2001, 9(1): 23-32. (in Chinese))
- [20] 叶浩, 石建省, 程彦培, 等. 砒砂岩重力侵蚀定量计算的 GPS、GIS 方法初探[J]. 地球学报, 2004, 25(4): 479-482. (YE Hao, SHI Jiarsheng, CHENG Yan pei, et al. A new method based on GPS and GIS for quantitative assessment of gravity erosion in Pisha Sandstone area[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2004, 25(4): 479-482. (in Chinese))
- [21] 郑书彦, 李占斌. 滑坡侵蚀研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005: 1-20. (ZHENG Shir yan, LI Zhan bin. Landslide Research [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2005: 1-20. (in Chinese))
- [22] 王光谦, 薛海, 李铁键. 黄土高原沟壑重力侵蚀的理论模型[J]. 应用基础与工程科学学报, 2005, 13(4): 335-344. (WANG Guang qian, XUE Hai, LI Tie jian. Mechanical model for gravitational erosion in gully area[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2005, 13(4): 335-344. (in Chinese))

- [ 23] 金鑫, 郝振纯, 张金良, 等. 考虑重力侵蚀影响的分布式土壤侵蚀模型[J]. 水科学进展, 2008, 19( 2): 257-263. ( JIN Xin, HAO Zhen chun, ZHANG Jin liang, et al. Distributed soil erosion model with the effect of gravitational erosion[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(2): 257-263. ( in Chinese) )
- [ 24] MILLER D J, SIAS J. Deciphering large landslides: Linking hydrological groundwater and slope stability models through GIS[J]. Hydrological Processes, 1998, 12(6): 923-941.
- [ 25] 王德甫, 赵学英, 马浩禄, 等. 黄土重力侵蚀及其遥感调查[J]. 中国水土保持, 1993( 12): 25-28 ( WANG De fu, ZHAO Xue ying, MA Hao lu, et al. Remote sensing investigation on gravitational erosion[J]. Soil and Water Conservation in China, 1993(12): 25-28. ( in Chinese) )
- [ 26] 周成虎, 骆剑承, 杨晓梅, 等. 遥感影像地学理解与分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 142-147. ( ZHOU Cheng hu, LUO Jian cheng, YANG Xiao mei, et al. Analysis on remote sensing image[M]. Beijing: Science Press, 2003: 142-147. ( in Chinese) )
- [ 27] 王光谦, 刘家宏, 李铁键. 数字流域模型原理[J]. 应用基础与工程科学学报, 2005, 13(1): 1-8 ( WANG Guang qian, LIU Jia hong, LI Tie jian. Digital watershed model of Yellow River[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2005, 13( 1): 1-8. ( in Chinese) )
- [ 28] 焦李成. 神经网络的应用与实现[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995: 20-35. ( JIAO Li cheng. Implementation and application of neural networks[M]. Xi'an: Xidian University Press, 1995: 20-35. ( in Chinese) )
- [ 29] 夏友元, 朱瑞庚, 李新平. 基于神经网络的岩质边坡稳定性评估系统研究[J]. 自然灾害学报, 1996, 5( 1): 98-104. ( XIA You yuan, ZHU Rui geng, LI Xin ping. A system of rock slope stability evaluation based on neural network[J]. Journal of Natural Disasters, 1996, 5(1): 98-104. ( in Chinese) )
- [ 30] 黄志全, 崔江利, 刘汉东. 边坡稳定性预测的混沌神经网络方法[J]. 岩土力学与工程学报, 2004, 23(22): 3808-3812. ( HUANG Zhi quan, CUI Jiang li, LIU Han dong. Chaotic neural network method for slope stability prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3808-3812. ( in Chinese) )
- [ 31] PER B, TANG Chao, KURT W. Self organized criticality: An explanation of 1/f noise[J]. Physical Review Letters, 1987, 59(4): 381-384.
- [ 32] 李仕熊, 姚令侃, 蒋良维. 松散边坡演化特征及其应用[J]. 四川大学学报, 2004, 36(2): 7-11. ( LI Shi xiong, YAO Ling kan, JIANG Liang wei. Evolution features and application of loose slope[J]. Journal of Sichuan University, 2004, 36(2): 7-11. ( in Chinese) )

## Review of gravitational erosion researches in the middle reach of Yellow River<sup>\*</sup>

XUE Hai<sup>1,2</sup>, WANG Guang-qian<sup>3</sup>, LI Tie-jian<sup>3</sup>

(1. Postdoctoral Research Institute, Yellow River Engineering Consulting Co. Ltd, Zhengzhou 450003, China;

2. North China Institute of Water Conservancy and Hydropower, Zhengzhou 450005, China;

3. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A systematic review of the research on the gravitational erosion in the Loess Plateau is conducted in this paper in respect of the macroscopic rules, the observation, the computational model and the new technical introduction. Some topics are also discussed, such as the difficulties in model construction, the 3S technologies and the nonlinear methods in the area of the gravitational erosion research. Furthermore, the reason of the low level on the field observation is analyzed, which acts as a severe obstacle to theoretical model and calculation. Based on the above results, some proposals for the future research are put forward, including the observation station layout, the construction of the automatic monitoring and data accumulating system, the reasonable model generalization and the combination of other erosion models.

**Key words:** gravitational erosion; the middle reach of Yellow River; research summary

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 50809028) and the China Postdoctoral Science Foundation (No. 20070410253).