

# 黄土高原土壤侵蚀规律研究方向与途径

姚文艺,肖培青

(黄河水利科学研究院,河南 郑州 450003)

**摘要** :从黄土高原水土保持生态建设和黄河治理开发重大实践的需求出发,回顾了我国关于黄土高原土壤侵蚀规律研究的主要进展,分析了存在的问题,论述了深化黄土高原土壤侵蚀规律研究的重大需求,就黄土高原土壤侵蚀规律的研究方法与途径、研究方向与内容提出建议,认为应加强以下几方面的研究:重力侵蚀规律、不同治理措施配置下坡面-沟道系统侵蚀产沙耦合关系及泥沙输移规律、植被措施作用下的水文效应和产流机制、土壤侵蚀产沙发生发展过程尺度转换、黄土高原水土流失模拟理论与技术等,研究途径包括建设黄土高原土壤侵蚀试验观测体系、运用土壤侵蚀模型模拟与反演技术等。

**关键词** :土壤侵蚀;水土保持;黄土高原;研究进展

**中图分类号** :S157      **文献标识码** :A      **文章编号** :1006-7647(2012)02-0073-06

**Research direction of the study of soil erosion in the Loess Plateau//YAO Wen-yi, XIAO Pei-qing** (*Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China*)

**Abstract** :Based on the requirements of soil and water ecological construction in the Loess Plateau and the practices of the Yellow River harnessing, research progress on the study of soil erosion in the Loess Plateau in China is reviewed, and some current issues are also listed. Then some suggestion on research direction and content, method and way of soil erosion in the Loess Plateau is addressed. The further research direction of soil erosion in the Loess Plateau is pointed out, including gravitational erosion law, coupling relationship between erosion and sediment of the hillslope-gullyslope system under different soil and water conservation measures, hydrology effects and runoff mechanisms under different vegetation cover, scale conversion in the process of soil erosion, simulation theory and technology about the soil loss in the Loess Plateau, etc. Approaches to the study of soil erosion are put forward, such as construction of observation system for soil erosion tests, application of inversion technology in soil erosion model.

**Key words** :soil erosion; water and soil conservancy; Loess Plateau; research progress

我国黄土高原是世界上水土流失最严重、土壤侵蚀规律最复杂的地区之一。长期以来,水土保持、泥沙、生态、地质、地理、地貌、水文等不同领域对黄土高原土壤侵蚀规律开展了大量的研究工作<sup>[1]</sup>,为该地区水土流失治理提供了重要的科技支撑。然而,目前对黄土高原土壤侵蚀规律的研究仍相对薄弱,远不能满足新时期黄河治理开发与黄土高原水土保持生态建设的科技需求,迫切需要进一步加强土壤侵蚀规律研究。

## 1 黄土高原土壤侵蚀规律研究进展与存在的问题

### 1.1 研究进展

以 1942 年天水水土保持科学试验站的创建为

标志,我国开始了黄土高原水土流失规律的试验观测工作。自 20 世纪 50 年代,黄河水利委员会又先后建立了西峰、绥德水土保持科学试验站。同时,中国科学院水利部水土保持研究所、中国科学院地理科学与环境研究所、山西省水土保持科学研究所等单位,以及内蒙古、河南等省(区)也先后在黄土高原建立了土壤侵蚀试验站,进行水土流失规律和水土保持措施作用等方面的观测研究。

1953 年刘善建<sup>[2]</sup>根据天水水土保持科学试验站的径流小区观测资料,首次提出了用于计算坡耕地年侵蚀量的经验方程。同期,席承藩等<sup>[3]</sup>依据下切黄土沟的体积和罗来兴等<sup>[4]</sup>依据“聚湫”淤积量推算出了无定河和清涧河流域侵蚀量。1955—1958 年,中国科学院组织了黄河中游水土保持考察,取得

了一批宝贵的基础资料、图件和成果。同期,黄秉继<sup>5]</sup>采用3级分区方案编制了黄河中游土壤侵蚀分区图,对黄土高原水土保持工作起到了重要的指导作用。20世纪60年代,关于黄土高原侵蚀产沙来源的研究取得了突破性进展。钱宁组织黄河水利科学研究院等有关单位的专家在研究黄河下游河床演变时发现,下游河道的淤积物主要是粒径大于0.05 mm的粗颗粒泥沙,由此提出了粗泥沙来源问题<sup>6]</sup>。在此基础上,黄河水利委员会近年进一步研究确定了1.88万 km<sup>2</sup>的粗泥沙集中来源区<sup>7]</sup>。蒋德麒等<sup>8]</sup>对侵蚀产沙部位和产沙量进行研究,认为黄土丘陵沟壑区第一副区沟谷地产沙量占流域总产沙量的2.9%~69.8%,第三副区占77.0%,黄土高原沟壑区占93.2%。之后,龚时等<sup>9]</sup>对黄河中游黄土丘陵沟壑区沟道小流域的泥沙来源做了进一步研究。20世纪五六十年代我国土壤、地理、地貌等领域的一些专家依据天水、绥德、西峰等水土保持科学试验站的小区资料,对土壤侵蚀与降雨、地形地貌因子的关系及侵蚀规律做过系统研究。承继成<sup>10]</sup>在综合多家观点的基础上认为坡地流水作用是一个十分复杂的问题,坡面侵蚀产沙存在着垂直分异规律。

20世纪70年代以来,随着美国通用土壤流失方程(USLE)的引入,黄土高原土壤侵蚀研究有了更大的进展,一些学者对模型参数指标开展了大量且有成效的研究,对降雨侵蚀力指标、土壤抗蚀性指标、地形指标及标准径流小区选定等进行了修正<sup>11-15]</sup>,建立了黄土高原降雨侵蚀力指标体系,提出了适合本地区的侵蚀性暴雨标准,先后在黄土高原地区建立了若干土壤流失预报方程。刘宝元<sup>16]</sup>以USLE为蓝本,利用黄土丘陵沟壑区径流小区实测资料,建立了中国土壤流失预报方程,探索了我国土壤流失“通用预报模型”研究的途径。同时,我国还开展了USLE在环境评价中的应用研究<sup>17-18]</sup>。在20世纪70年代发现黄土高原北部长城沿线一带存在着水蚀风蚀交错分布的特殊地区,并认识到其土壤侵蚀强度高于水蚀和风蚀地区,其后对水蚀风蚀交错区水土流失规律及治理开展了不少研究<sup>19-21]</sup>。

自20世纪80年代以后,人工模拟降雨技术、元素示踪法与中子活化分析技术在土壤侵蚀过程与机理、土壤侵蚀定量评价和土壤侵蚀动力过程研究中发挥了重要的作用,包括提出了适合黄土高原雨滴终速计算公式<sup>22-24]</sup>;系统研究了坡面细沟侵蚀、浅沟侵蚀的发生发展过程<sup>25-35]</sup>,提出了淤地坝相对稳定的概念,探讨了淤地坝的拦泥减蚀机理<sup>36-41]</sup>。在研究手段方面,一些学者基于土壤侵蚀过程的认识,对土壤侵蚀实体模型模拟理论进行了尝试探

讨<sup>42-43]</sup>。

自20世纪90年代以来,各类的侵蚀产沙数学模型得到了较快发展<sup>44-56]</sup>,而且诸如WEPP等国外模型在黄土高原的应用研究也取得不少成果<sup>57]</sup>,同时GIS与RS技术在土壤侵蚀模型中得到广泛应用。值得提及的是,分布式侵蚀产沙模型已成为当前土壤侵蚀预报研究的主要方向之一。近年来,对土壤侵蚀机理的研究不断深入,在土壤侵蚀动力学机制、坡面径流水动力学特性、侵蚀对气候下垫面的响应、黄土高原地区不同空间尺度侵蚀产沙规律、土地利用覆盖变化对侵蚀过程调控机制、黄土高原土壤侵蚀过程与调控、坡面与沟道侵蚀产沙过程非线性的叠加效应等方面进行了较为系统的研究<sup>58-74]</sup>。对于黄土高原水土流失综合治理关键支撑技术等方面也取得了丰富的研究成果<sup>75-76]</sup>。

## 1.2 存在的问题

虽然我国在黄土高原土壤侵蚀规律研究方面取得了不少进展,但总体来说,还有很多规律并没有认识,诸如重力侵蚀动力学机制、被覆对产流机制的胁迫作用、侵蚀尺度转换、侵蚀对多元环境因子耦合的响应机制、坡面-沟道侵蚀地貌单元的侵蚀输沙动力学关系等基本规律都是迫切需要研究的。在侵蚀产沙模拟方面,实体模拟的相似理论基本上停留在概念的探讨层面上,在数学模拟研究中,国内自主研发的机理模型少,大多是直接移用或照搬国外的模型。对国外模型改进的内容多是方程参数的确定,而对方程结构及方程参数确定方法的研究还不够。同时,由于试验观测资料的限制,方程参数的确定也大多是结合应用范围内局部地域的有限资料进行的,对黄土高原重力侵蚀严重、暴雨产沙时空分布特别集中的特征并未在计算方法改进中得到足够反映。由于对国外模型控制方程的结构及其计算方法未进行实质性的移植修改,因而,修改后的方程难以推广应用于黄土高原暴雨产沙过程的预报。

## 2 研究需求

### 2.1 优化黄土高原水土流失治理方案

由于黄土高原地形地貌等侵蚀边界条件具有较强的空间分异性,加之降雨时空分布极不均匀,因而黄土高原土壤侵蚀规律的空间差异性很大。另外,不同类型水土保持措施对产流产沙影响的机理是不同的,不同类型措施的组合具有不同的减水减沙作用,即使同一类型的措施其布设区位不同,减水减沙效益也往往有较大差别。因此,为达到有效治理水土流失的目的,就必须对水土保持措施空间布设及其组合方案进行优化。为了优化方案,就需要了解

水土保持措施作用机理及不同类型措施的组合效应,以及研究坡面-沟道系统(简称坡沟系统)的泥沙输移关系。目前,关于裸地坡沟系统产沙耦合关系的试验研究取得了一些成果,但是还缺乏对不同水土保持措施配置下坡沟系统泥沙输移关系及其规律的研究。另外,为科学布设沟道坝系工程布局,必须了解沟道重力侵蚀规律,而目前却极其缺乏这方面的试验观测研究,难以为沟道坝系设计提供科学的工程技术指标。

## 2.2 科学评估和预测水土保持效益

随着江河治理、流域管理和生态保护等生产实践发展的需要,国内外关于水土流失与水土保持效益评价预测数学模型的研究正逐步得到相关科技人员和管理者的重视。然而,就国内外水土流失数学模型的总体发展水平来说,仍有不少关键技术问题需要进一步研究解决。国外研发的诸如 USLE 等经验模型和 WEPP 等机理模型基本上只适用于缓坡地的侵蚀环境,不适用于黄土高原陡坡地的情况。目前,我国已建的经验模型大多是以坡面水土流失模型和小流域产沙模型为主,而适用于大空间尺度的流域侵蚀产沙模型较少,加之受建模资料所限,验证区域和时域不够,这些模型推广应用的局限性较大,通用性较差。我国对侵蚀产沙机理模型的研究起步较晚,基本上处于探索阶段。另外,非常缺乏小流域泥沙输移过程、沟道水沙动力学过程、土壤侵蚀时空分布、坡沟系统泥沙输移沉积过程的关联性等方面的试验观测,导致侵蚀产沙模型的研发受到众多基本规律认知瓶颈问题的制约。因此,需要尽快研究科学评估水土保持效益的基础理论和关键技术。

## 2.3 为制定黄河水沙调控运行方案提供洪水泥沙指标体系

水少沙多、水沙关系不协调是造成黄河下游河道严重淤积的主要原因。2002 年以来,黄河水利委员会利用小浪底水库进行了多次调水调沙,营造协调的水沙关系,取得了减少下游河道淤积、处理库区泥沙的明显效果。为制定科学合理的水沙调控运行方案,就需要解决调水调沙期间洪水泥沙预测预报的问题,需要提供水库上游主要入黄支流的洪水流量过程、含沙量过程,以及洪水泥沙总量和洪水演进等关键参数。然而,当前对入黄支流洪水泥沙的预报还有一定的困难,其主要原因就在于对黄土高原坡沟系统侵蚀产沙耦合关系、沟道泥沙输移规律及植被作用机理了解不够,难以建立起机理清晰的次暴雨洪水泥沙预报模型。因此,通过对流域产水产沙规律和小流域泥沙输移规律进行试验研究,就可以为洪水泥沙过程参数的模拟预报提供理论支撑,

从而实现估算和预报不同区间入黄洪水泥沙量及其过程,为制定黄河水沙调控运行方案提供洪水泥沙指标体系。

## 3 未来的研究方向

根据黄土高原水土保持生态建设和黄河治理开发的重大实践需求,针对我国关于黄土高原土壤侵蚀研究的不足,建议今后在研究手段上应当从非比尺实体模型试验逐步转向具有严格比尺意义的实体模型试验,在研究方法上,应注重与流体动力学、泥沙运动力学等力学学科方法的结合,在研究对象上,应从坡面扩展至坡沟系统,在研究内容上,应加强以坡沟系统或小流域为侵蚀产沙地貌单元的泥沙输移规律及水沙关系的研究。

建议对黄土高原土壤侵蚀规律的研究应关注以下几个方向:

a. 重力侵蚀规律。根据研究,黄土高原不少地区小流域重力侵蚀是流域泥沙的主要来源。由于重力侵蚀类型多且影响因素复杂,加之重力侵蚀发生的随机性较大,重力侵蚀研究一直是土壤侵蚀研究的薄弱环节。应通过野外调查、观测和室内模拟试验,阐明黄土高原重力侵蚀空间分布特征与分异规律,分析重力侵蚀发生的动力因素,辨识重力侵蚀的控制参量、状态参量、诱发参量与时间因子,揭示重力侵蚀发生的动力学机制和重力侵蚀发生的动力临界,研究重力侵蚀的动力作用与随机过程的关联机制,建立重力侵蚀发生的特征方程与产沙量估算模式,推进流域侵蚀产沙机理模型和经验模型的研发与应用。

b. 不同治理措施配置下坡沟系统侵蚀产沙耦合关系及泥沙输移规律。坡沟系统复杂的耦合侵蚀产沙关系是黄土高原土壤侵蚀的重要特征。目前,对不同措施配置下坡沟系统侵蚀产沙过程试验观测研究的缺乏,极大地制约了具有物理成因的侵蚀产沙机理模型的进展和水土保持治理措施布设方案优化等生产实践的发展。应通过分阶段研究,阐明坡沟系统在不同水土保持措施配置下的侵蚀产沙耦合作用关系,揭示不同措施配置对侵蚀产沙的影响程度,揭示不同治理措施下坡沟系统泥沙输移过程与规律,建立定量表述其规律的数学模式,为建立具有物理成因的侵蚀产沙机理模型提供所需参数,从而科学评估黄土高原坡沟系统在不同措施组合及空间布设方案下的治理效益,提高规划设计的合理性和科学性,达到优化配置,实现水土保持治理投资的效益最大化。

c. 植被措施作用下的水文效应和产流机制。

近年来,植被措施的水文效应及对产流机制的影响作用逐渐引起人们的关注,这既是认识当前黄河水沙变化成因的重要科学命题,也是评价水土保持生态建设效果、预测黄河水沙变化趋势的重要瓶颈问题,为此,迫切需要通过有、无植被情况下的对比模拟试验,阐明不同被覆度、不同类型的植被对黄土高原土壤入渗、地表地下产流过程的影响,研究降雨-产流对被覆的响应关系,揭示植被对产流机制变化的胁迫作用及侵蚀产沙随被覆率变化的临界阈。

d. 土壤侵蚀产沙发生发展过程尺度转换。土壤侵蚀的发生发展过程、时空分布、耦合关系等特性都是尺度依存的,具有时间、空间抑或时空尺度特征。因而,只有在连续尺度序列上对土壤侵蚀过程进行观测和研究,才能准确把握其内在规律。而目前对土壤侵蚀的观测手段多为坡面微型小区和标准小区,仅在离散和单一尺度上进行,其观测结果不能反映以坡沟系统为地貌单元组成的流域尺度上的土壤侵蚀规律,尤其对于黄土高原地区,由于其侵蚀产沙过程具有强烈的时空分异性,解决其尺度转换问题更为重要。为此,需要通过设置不同尺度的观测样区,结合数学模拟手段,采用尺度上推的途径,对试验小区尺度的观测结果进行聚集或解聚,实现对单元流域尺度范围内侵蚀过程的整体把握。应重点研究土壤侵蚀分异性、侵蚀速率随尺度的变化规律,不同尺度上的主导侵蚀过程与类型、侵蚀过程特性,土壤侵蚀影响因素作用的尺度效应,以及土壤侵蚀可预测性随尺度变化的效应等。

e. 黄土高原主要产沙流域水沙剧减成因。近年来,黄土高原不少支流的水沙出现剧减的现象,产流产沙规律发生变化,对于黄河治理开发的重大决策带来极大影响。因此,迫切需要分析水沙系列变化过程特征并辨识其突变点;分析降雨与下垫面变化特征,开发建设项目等人类活动对侵蚀发生的激发机制和作用,水土保持措施对洪水的控制作用及对产流机制的胁迫作用,以及降雨-洪水-泥沙关系变化规律,从而揭示水沙变化对降雨、下垫面、人类活动多元因子耦合作用的响应关系,辨识多因子对水沙变化的贡献率,搞清流域水沙剧减的成因,并预测其变化趋势。

f. 黄土高原水土流失模拟理论与技术。土壤侵蚀模拟包括实体模型模拟和数学模型模拟。在实体模型模拟方面,目前的试验模拟对象多为雨滴特性、坡面径流侵蚀等,将溅蚀、坡面侵蚀及沟道侵蚀作为一个整体过程的模拟试验研究还比较少,而产沙量预报的困难也正在于对从土壤侵蚀到泥沙沉积或产沙过程的整体了解。同时,国内外所开展的土

壤侵蚀实体模型试验基本上均是非严格比尺的。因而,要实现坡沟系统和流域尺度上完整侵蚀过程的定量模拟,迫切需要研究土壤侵蚀的相似性问题,或者说具有严格比尺意义的侵蚀试验理论、方法与技术已成为亟待解决的问题,急需研究坡面、坡沟系统和小流域比尺模型几何相似条件或相似律,以及相似比尺体系。

在数学模拟方面,需要建立起复杂侵蚀环境下的水土流失评价预测模型,包括建设基于卫星遥感、DEM等信息源的解译、提取和存储系统;建立评价预测模型系统,包括年产沙经验模型、次暴雨洪水泥沙分布式机理模型、次暴雨降水-产洪-输沙预报耦合模型和次暴雨洪水泥沙作业预报预警系统;研究模型系统与GIS双向紧密耦合技术,提高模型评价效率和精度。同时,还需要逐步开展土壤侵蚀-面源污染过程耦合模型、土壤侵蚀-生态-经济多元耦合模型的研究。

## 4 研究方法途径

a. 建设黄土高原土壤侵蚀试验观测体系。目前,黄土高原土壤侵蚀发生发展过程的试验观测方法、手段和内容还很不完善,在沟道重力侵蚀、全坡面侵蚀、坡沟系统侵蚀、流域泥沙输移过程及侵蚀产沙水动力学参数等方面均缺乏试验观测,使土壤侵蚀研究者只能望“原”兴叹,苦于无奈。为此,应从国家层面统一规划、统一建设,构建能够满足建立黄土高原侵蚀产沙数学模型系统和评价水土保持措施效益需求的黄土高原土壤侵蚀试验观测体系,解决黄土高原土壤侵蚀规律研究在现象揭示、过程认知和信息采集等方面的制约性问题。依托黄土高原土壤侵蚀试验观测体系,开展黄土高原全坡面侵蚀、沟道侵蚀及坡沟系统侵蚀过程的原型观测和人工模拟试验研究,观测侵蚀产沙的空间传递过程、规律以及水动力学参数,揭示其侵蚀产沙作用机理。为此,应该在黄土高原不同类型区选择有代表性的小流域、陡坡坡面、沟道、坡沟系统等布设水文、气象和水土保持观测设施,在室内建设坡面、沟道、小流域等侵蚀产沙实体模型,采集水土流失和水土保持相关数据,开展侵蚀产沙过程的精细观测,探索不同水土流失区的水土流失规律,并积累足够的观测资料,为构建相关侵蚀产沙数学模型提供基础数据和验证条件。

b. 运用土壤侵蚀模型模拟与反演技术。土壤侵蚀机理模型可以对侵蚀过程及其时空分布、尺度关系进行模拟、预测和反演,是认识和揭示土壤侵蚀过程发生发展规律的有效手段之一。通过建立机理模型,赋予不同的下垫面、地形地貌等边界条件和设

计降水等初始条件,对不同空间尺度的土壤侵蚀过程进行预测分析,从而了解植被、降水、水土保持工程和地形地貌等因素对土壤侵蚀的作用,进而揭示在一定边界条件下土壤侵蚀产沙对干扰因素的响应关系,以及不同尺度下的主导侵蚀过程、侵蚀速率和侵蚀特性的变化规律,认识土壤侵蚀的空间分异性。

c. 加强学科交叉与融合。由于黄土高原自然地理环境极为复杂,多种侵蚀类型交互耦合,要深化认识黄土高原土壤侵蚀规律、完善水土保持减水减沙效益评价试验预测方法,决非仅靠单一学科或相关专业人员就可实现的,必须打破行业壁垒,遵循科研规律,开展多学科交叉和多专业联合攻关,充分吸收国内外专家和学者的理论和经验,使黄土高原土壤侵蚀规律研究和侵蚀产沙数学模型建设得到更为广泛的技术力量支持,进一步提升黄土高原水土流失治理的科技水平。

d. 实现信息共享。以遥感(RS)、地理信息系统(GIS)、全球定位系统(GPS)、无线通讯系统以及计算机网络等高新技术为技术支撑,从国家层面上建立黄土高原水土保持生态立体监测、试验观测和信息共享网络。针对建立黄土高原侵蚀产沙数学模型的数据要求,从地面、航空、航天3个层次,从流域坡面、沟道、流域系统三类地貌单元开展黄土高原水土流失相关参数的立体、全方位的试验观测,包括地形、地貌、下垫面、土壤、径流泥沙、降雨、土壤可蚀性和抗蚀性等参数,将室内外的、不同区域的试验研究站点形成数据和信息共享的网络系统,实现土壤侵蚀与信息共享,为土壤侵蚀规律研究提供必不可少的、至关重要的基础数据与信息。

参考文献:

[ 1 ] 唐克丽. 中国水土保持 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2004.

[ 2 ] 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.

[ 3 ] 席承藩, 程云生, 黄直立. 陕北绥德韭园沟土壤侵蚀情况及水土保持办法 [ J ]. 土壤学报, 1953, 2( 3 ): 148-166.

[ 4 ] 罗来兴, 祈延年. 陕北无定河、清涧河黄土区域的侵蚀地形与侵蚀量 [ J ]. 地理学报, 1955, 2( 1 ): 35-44.

[ 5 ] 黄秉维. 编制黄河中游流域土壤侵蚀分区图的经验教训 [ J ]. 科学通报, 1953( 12 ): 15-21.

[ 6 ] 钱宁, 王可钦, 阎林德, 等. 黄河中游粗泥沙来源区对黄河下游冲淤的影响 [ C ] / 钱宁论文集编辑委员会. 钱宁论文集. 北京: 清华大学出版社, 1990: 615-621.

[ 7 ] 徐建华, 林银平, 吴成基, 等. 黄河中游粗泥沙集中来源区界定研究 [ M ]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.

[ 8 ] 蒋德麒, 赵诚信, 陈章霖. 黄河中游小流域径流泥沙来源初步分析 [ G ] / 黄河水利委员会. 黄河流域水土保持科学研究工作会议汇编. 郑州 [ 出版者不详 ], 1964: 393

[ 9 ] 龚时, 蒋德麒. 黄河中游黄土丘陵沟壑区沟道小流域的水土流失及治理 [ J ]. 中国科学: A 辑, 1978( 6 ): 671-678.

[ 10 ] 承继成. 地表侵蚀的基本原理及其所造成的地貌现象 [ R ]. 郑州: 水利电力部黄河水利委员会, 1963: 49-54.

[ 11 ] 余新晓, 陈丽华. 黄土高原沟壑区土壤抗蚀性的初步研究 [ J ]. 北京林业大学学报, 1988, 10( 1 ): 28-34.

[ 12 ] 贾志军, 玉卜平, 李俊义, 等. 晋西黄土高原降雨侵蚀力研究 [ J ]. 中国水土保持, 1991( 1 ): 43-46.

[ 13 ] 贾志军, 玉卜平, 李俊义, 等. 晋西黄土高原降雨侵蚀力研究 ( 续 ) [ J ]. 中国水土保持, 1991( 2 ): 19-22.

[ 14 ] 王万忠, 焦菊英. 黄土高原降雨侵蚀产沙与黄河输沙 [ M ]. 北京: 科学出版社, 1996.

[ 15 ] 刘宝元, 张科利, 焦菊英. 土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用 [ J ]. 自然资源学报, 1994, 14( 4 ): 345-350.

[ 16 ] 刘宝元. 西北黄土高原区土壤侵蚀预报模型开发项目研究成果报告 [ R ]. 北京: 水利部水土保持监测中心, 2006.

[ 17 ] 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 等. 海南岛生态系统土壤保护空间分布特征及生态经济价值评估 [ J ]. 生态学报, 2000, 20( 4 ): 553-558.

[ 18 ] 王建云. 利用通用流失方程计算星云湖流域污染负荷 [ J ]. 环境工程, 2001, 19( 4 ): 54-55 A.

[ 19 ] 唐克丽. 黄土高原水蚀风蚀交错区治理的重要性与紧迫性 [ J ]. 中国水土保持, 2000( 11 ): 11-12.

[ 20 ] 张平仓. 水蚀风蚀交错带水风两相侵蚀时空特征研究: 以神木六道沟小流域为例 [ J ]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 3( 5 ): 93-94.

[ 21 ] 查轩, 唐克丽. 水蚀风蚀交错带小流域生态环境综合治理模式研究 [ J ]. 自然资源学报, 2000, 15( 1 ): 97-100.

[ 22 ] 窦葆璋, 周佩华. 雨滴的观测和计算方法 [ J ]. 水土保持通报, 1982, 2( 1 ): 42-47.

[ 23 ] 牟金泽. 雨滴速度计算公式 [ J ]. 中国水土保持, 1983( 3 ): 40-41.

[ 24 ] 姚文艺, 陈国祥. 雨滴降落速度及终速公式 [ J ]. 河海大学学报: 自然科学版, 1993, 21( 3 ): 21-27.

[ 25 ] 郑粉莉, 唐克丽, 周佩华. 坡耕地细沟侵蚀的发生、发展和防治途径的探讨 [ J ]. 水土保持学报, 1987, 1( 1 ): 36-48.

[ 26 ] 杨郁挺. 坡面土壤细沟侵蚀自组织分析 [ J ]. 中国水土保持, 1995( 12 ): 7-10, 30.

[ 27 ] 吴普特, 周佩华, 武春龙, 等. 坡面细沟侵蚀垂直分布特征研究 [ J ]. 水土保持研究, 1997, 4( 2 ): 47-56.

[ 28 ] 蔡强国. 坡面细沟发生临界条件研究 [ J ]. 泥沙研究, 1998( 1 ): 52-59.

[ 29 ] 雷阿林, 唐克丽. 黄土坡面细沟侵蚀的动力条件 [ J ]. 水土保持学报, 1998, 4( 3 ): 39-43, 72.

[ 30 ] 雷廷武, NEARING M A. 侵蚀细沟水力学特性及细沟侵蚀与形态特征的试验研究 [ J ]. 水利学报, 2000, 31( 11 ): 49-54.

[ 31 ] 雷廷武, 张晴雯, 赵军, 等. 细沟侵蚀动力过程输沙能力试验研究 [ J ]. 土壤学报, 2002, 35( 4 ): 476-481.

- [32] 李占斌, 秦百顺, 亢伟, 等. 陡坡面发育的细沟水动力学特性室内试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 64-68.
- [33] 王文龙, 雷阿林, 李占斌, 等. 土壤侵蚀链内细沟浅沟沟流动力机制研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(4): 471-475.
- [34] 张科利, 唐克丽, 王斌科. 黄土高原坡面浅沟侵蚀特征值的研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(2): 8-13.
- [35] 刘元保, 朱显谟, 周佩华, 等. 黄土高原坡面沟蚀的类型及其发生发展规律[C]//中国科学院西北水土保持研究所集刊. 西安: 陕西科学技术出版社, 1988: 9-18.
- [36] 曾茂林, 方学敏, 康玲玲, 等. 沟道坝系发展相对稳定是完全可能的[J]. 人民黄河, 1995(4): 18-21.
- [37] 方学敏. 坝系相对稳定的标准和条件[J]. 中国水土保持, 1995(11): 29-32.
- [38] 曹文洪, 胡海华, 吉祖稳. 黄土高原地区淤地坝系相对稳定研究[J]. 水利学报, 2007, 38(5): 606-610.
- [39] 曾茂林, 朱小勇, 康玲玲, 等. 水土流失区淤地坝的拦泥减蚀作用及发展前景[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2): 126-133.
- [40] 李靖, 郑新民. 淤地坝拦泥减蚀机理和减沙效益分析[J]. 水土保持通报, 1995, 15(2): 33-37.
- [41] 李勉, 姚文艺, 史学建. 淤地坝拦沙减蚀作用与泥沙沉积特征研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12(5): 107-111.
- [42] 沈冰, 江彩萍, 李怀恩. 坡面漫流动力相似准则[M]//邵明安. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业. 西安: 陕西科学技术出版社, 1999: 72-76.
- [43] 姚文艺, 李勉. 关于建立黄土高原小流域侵蚀实体补充模型的理论思考[C]//黄河水利委员会黄河上中游管理局. 模型黄土高原建设方略纵论. 郑州: 黄河水利出版社, 2005: 240-244.
- [44] 姚文艺. 黄土丘陵区小流域产沙随机线性模型初探[J]. 黄河科研, 1993(2): 28-32.
- [45] 秦毅, 曹如轩, 樊尔兰. 用线性系统预报小流域输沙过程的初探[J]. 人民黄河, 1990, 12(5): 54-58.
- [46] 江忠善, 王志强, 刘志. 应用地理信息系统评价黄土丘陵区小流域土壤侵蚀的研究[C]//全国泥沙基本理论研究学术讨论会编委会. 第二届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集. 北京: 中国建材工业出版社, 1995.
- [47] 尹国康, 陈钦彦. 黄土高原小流域特性指标与产沙统计模式[J]. 地理学报, 1989, 44(1): 32-46.
- [48] 金争平, 赵焕勋, 和泰, 等. 皇甫川小流域土壤蚀量预报方程研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(1): 8-18.
- [49] 王星宇. 黄土地区流域产沙的数学模型[J]. 泥沙研究, 1987(3): 55-60.
- [50] 汤立群, 陈国祥. 小流域产流产沙动力学模型[J]. 水动力学研究与进展: A辑, 1997, 12(2): 164-174.
- [51] 谢树楠. 皇甫川降雨产流产沙模型及水沙变化原因分析[R]. 北京: 清华大学, 1995.
- [52] 贾媛媛, 郑粉莉, 杨勤科. 黄土高原小流域分布式水蚀预报模型[J]. 水利学报, 2005, 36(3): 328-332.
- [53] 蔡强国, 王贵平, 陈永宗. 黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [54] 侯建才, 李占斌, 李勉, 等. 流域次降雨侵蚀产沙的BP神经网络模拟[J]. 水土保持通报, 2007, 27(3): 79-83.
- [55] 姚文艺, 陈界仁, 秦奋. 黄河多沙粗沙区分布式土壤流失模型研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4): 22-26.
- [56] 姚文艺, 高航, 王玲玲, 等. 复杂侵蚀环境下分布式土壤流失水动力学模型: 以黄河多沙粗沙区为研究实例[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(12): 1-5.
- [57] 郑粉莉, 张勋昌, 王建勋. WEPP模型及其在黄土高原的应用评价[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [58] 余新晓, 张晓明, 李建芳. 土壤侵蚀过程与机制[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [59] 郑粉莉, 肖培青. 黄土高原沟蚀演变过程与侵蚀产沙[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [60] 姚文艺, 汤立群. 水力侵蚀产沙过程及模拟[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2001.
- [61] 姚文艺. 坡面流阻力规律试验研究[J]. 泥沙研究, 1996(1): 74-82.
- [62] 吴普特. 动力水蚀实验研究[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.
- [63] 刘青泉, 李家春, 陈力, 等. 坡面流及土壤侵蚀动力学(I) 坡面流[J]. 力学进展, 2004, 34(3): 360-372.
- [64] 刘青泉, 李家春, 陈力, 等. 坡面流及土壤侵蚀动力学(II) 土壤侵蚀[J]. 力学进展, 2004, 34(4): 493-506.
- [65] 李勉, 姚文艺, 陈江南, 等. 草被覆盖下坡沟系统坡面流能量变化特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 15-17.
- [66] 张科利. 黄土坡面细沟侵蚀中的水流阻力规律研究[J]. 人民黄河, 1998, 20(8): 13-15.
- [67] 王文龙, 雷阿林, 李占斌, 等. 黄土丘陵区坡面薄层水流侵蚀动力机制实验研究[J]. 水利学报, 2003, 34(9): 66-70.
- [68] 许炯心, 姚文艺, 韩鹏. 基于气候地貌植被耦合的黄土高原中游侵蚀过程[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [69] 姚文艺, 李占斌, 康玲玲. 黄土高原土壤侵蚀治理的生态环境效应[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [70] 李鹏. 黄土区草地植被水土保持作用机理试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2003.
- [71] 郑明国, 蔡强国, 王彩峰, 等. 黄土丘陵沟壑区坡面水土保持措施及植被对流域尺度水沙关系的影响[J]. 水利学报, 2007, 38(1): 21-25.
- [72] 陈浩. 流域坡面与沟道的侵蚀产沙关系研究[M]. 北京: 气象出版社, 1993: 139-172.
- [73] 郑粉莉, 康绍忠. 黄土坡面不同侵蚀带侵蚀产沙关系及其机理[J]. 地理学报, 1998, 53(5): 422-427.
- [74] 肖培青, 郑粉莉, 姚文艺. 坡沟系统侵蚀产沙及其耦合关系研究[J]. 泥沙研究, 2007(2): 30-35.
- [75] 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: 170-181.
- [76] 郭廷辅, 段巧甫. 径流调控理论是水土保持的精髓: 四论水土保持的特殊性[J]. 中国水土保持, 2001(11): 1-5.

(收稿日期: 2011-08-15 编辑: 周红梅)