

DOI: 10.5846/stxb201303190454

张晓明,曹文洪,周利军.泥沙输移比及其尺度依存研究进展.生态学报,2014,34(24):7475-7485.

Zhang X M, Cao W H, Zhou L J. Progress review and discussion on sediment delivery ratio and its dependence on scale. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34 (24): 7475-7485.

泥沙输移比及其尺度依存研究进展

张晓明¹, 曹文洪^{1,*}, 周利军²

(1. 中国水利水电科学研究院, 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048; 2. 长江流域水土保持监测中心站, 武汉 430010)

摘要:泥沙输移比是反映流域侵蚀产沙及输移能力的指标,对评价水土保持减沙效益有重要意义。基于对国内外泥沙输移比研究的系统梳理,①阐述了泥沙输移比的内涵,并对泥沙输移比基本定义中不同学科常用的表征变量作了清晰的界定,流域产沙量所涵尺度较流域输沙量小,且泥沙输移比与归槽率无论在内涵及定量描述上均不可等同;②归纳提出泥沙输移比现存的测算方法,包括 4 种形式的类比计算法和 3 种形式的建模计算法,并分别评述了其优缺点;③揭示了泥沙输移比的影响因素随时空尺度变化表现出分异性;④基于对泥沙输移比内涵与测算中的“尺度问题”以及泥沙输移比是否存在尺度效应等问题剖析,明确了泥沙输移比客观存在着尺度依存性及其尺度域。

关键词:泥沙输移比;土壤侵蚀量;输沙量;尺度;单元流域

Progress review and discussion on sediment delivery ratio and its dependence on scale

ZHANG Xiaoming¹, CAO Wenhong^{1,*}, ZHOU Lijun²

1 State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China

2 The Yangtze River Basin of Soil and Water Conservation Monitoring Central Station, Wuhan 430010, China

Abstract: Sediment delivery ratio (SDR) is an indicator to demonstrate the capacity of sediment erosion and delivery of a certain basin. Hence, SDR is usually recognized as a helpful factor when evaluating sediment reduction effects by soil and water conservation management and making policy-decision on ecological construction. Studies on SDR at home and abroad during the last 50 years have been systematically reviewed. Firstly, the essential characteristics of SDR have been stated and discussed. In the expression formula of SDR ($S_{DR} = Y/E$), Y is the amount of sedimentation delivery which is equal to the amount of sediment yield or soil loss in a certain watershed. The concepts of Y are different under different circumstances. For example, Y (sediment yield) from the soil erosion perspective is the amount of sediment from the observation cross-section after sedimentation equilibrium at the gully erosion level. But, Y (sediment delivery) from the river engineering perspective is including the erosion-siltation process. Moreover, it is important to note that both definition and quantitative amount between SDR and the rate that sediment from watershed slope returning to channel are totally different, which is because the two mass of sediment are different and could not be used as the same. Secondly, calculation methods regarding to SDR have been summarized and discussed on their advantages and disadvantages, including four types of analogy calculation methods and three forms of modeling methods. Two commonly used soil erosion calculation methods are unit-watershed analogy calculation method and the physical-process modeling method based on the total watershed erosion.

基金项目:国家自然科学基金项目(51009154, 51379008); 国家自然科学基金创新研究群体基金项目(50721006); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究课题(ZY1304)

收稿日期:2013-03-19; 网络出版日期:2014-03-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: erosion@iwhr.cn

Calculation methods discussed in this paper should be used carefully with considering their disadvantages. For instance, disadvantages of the unit-watershed analogy calculation method were observation data only from the unit-watershed, the inadequate representation of larger watersheds and the vague expression of identifying a unit-watershed with the watershed area less than 1 km². The disadvantage of the physical-process modeling method based on the total watershed erosion was not considering siltation and exchange processes in the slope and channels, such the USLE model. Thirdly, this paper pointed out that the dependence of SDR on scale with its suitable scale domain. On the one hand, the nature of SDR relied on its scale has been discussed and analyzed deeply through the essential characteristics of SDR and scale characteristics of SDR according to many published papers at home and abroad. It was been identified that the scale characteristics embedded in the SDR definition. On the other hand, influential factors of SDR varied and differentiated along with changing of scale domains. These two reasons could explain the calculation method of SDR based on the influential factors for a watershed is hardly to apply on another watershed. Finally, the study on SDR in the future was generally discussed. For instance, it is interesting to revise and set up the calculation methods of SDR to fit different soil and water erosion conditions in China. It also interests to study the dependence of SDR on scale and the scaling methods, which requires long-term temporal and spatial observed data from many different watershed scales around the world. The scaling methods of SDR might be helpful to provide new ways for the research on hydrological process scaling.

Key Words: sediment delivery ratio (SDR); soil erosion; sedimentation delivery; scale; typical watershed

从土壤侵蚀量到输沙量,要经过冲刷、输移、沉积、再搬运等复杂过程,泥沙无论在数量上还是物理特性上都发生了很大变化,二者之间存在转换系数,即泥沙输移比(sediment delivery ratio, SDR)^[1]。泥沙输移比是 Brown 在 1950 年估计美国入海泥沙数量时提出的^[2],其反映了流域水流输移侵蚀泥沙能力的指标,是衡量流域泥沙变化的尺度,同时也是流域产沙过程中的一个基本理论问题。半个多世纪以来,中外学者就泥沙输移比概念^[3-4]、测算方法^[5-6]、影响因素^[7-8]和区域分异规律^[9-10]等开展了广泛探讨,但因泥沙输移比时空变异性大、影响因素复杂且其值无直接的获取方法,使泥沙输移比研究虽多却仍不成熟,且在许多认识问题上存在分歧,如关于泥沙输移比基本定义的科学界定、定量表达式中变量的解译,测算模型的普适性以及尺度依存性等科学问题,仍需作科学讨论。本研究基于对国内外泥沙输移比研究的系统梳理,试着围绕以上科学问题展开分析与讨论,为泥沙输移比更进一步研究提供参考。

在随后的 20 世纪 60、70 年代,美国和欧洲重点关注了如流域面积、沟道比降、沟壑密度等自然地理环境因素的影响及泥沙沉积和再侵蚀搬运研究^[8]。进入 80 年代后,国内外研究者越来越重视对泥沙输移机理及泥沙输移比分异规律的研究。如张胜利

等^[11]认为对于特定流域,多年平均的泥沙输移比是一个比较稳定的值,但系列较短时其值则不稳定。进入 20 世纪后,由于“尺度”在地学领域研究的兴起,且客观存在水土流失时空分异特征和土壤侵蚀过程尺度依存特征,使泥沙输移比的尺度性研究成为新的关注点。刘纪根等^[9]以岔巴沟嵌套的各级流域为例分析了泥沙输移比的时空分异特征;李秀霞^[10]认为黄河流域泥沙输移比对流域尺度具有依存性;而景可等^[12-13]则以长江流域的涪江和赣江流域为例重点论述了流域面积只是一个度量单位,与泥沙输移比不存在任何相关性。显然,泥沙输移比的尺度效应研究尚未形成一致的学术认知。

本研究试系统分析泥沙输移比的内涵、测算及驱动因素,并探讨其尺度依存性及尺度域,为泥沙输移比更进一步研究提供参考。

1 泥沙输移比的内涵

美国泥沙工程手册^[3]首次对 SDR 进行了定义:泥沙从侵蚀点向下游任何指定位置移动过程中侵蚀泥沙因沿途沉积而减小的程度。显然,该定义只是对一种自然现象程度的描述,随后我国学者对这种现象程度进行了不同的定量表达,其中有针对次侵蚀产沙^[6]或一定时段的平均侵蚀产沙^[14]的,也有针对某一沟道断面以上区域^[4]或一个完整的流域^[15]

的,这些描述虽各有差异,但内涵是一致的,是在时间和空间范围界定下的侵蚀量和产沙量(或输沙量)之间关系的表述。目前,引用频次较高的是《泥沙手册》给出的定义:流域某一断面的输沙量与断面以上流域总侵蚀量之比^[2]。

$$S_{DR} = Y/E \tag{1}$$

式中, S_{DR} 为流域泥沙输移比(无量纲); Y 为流域出口断面实测输沙量(t 或 $t\ km^{-2}\ a^{-1}$); E 为流域控制断面以上土壤侵蚀量(t 或 $t\ km^{-2}\ a^{-1}$);

式(1)是 S_{DR} 求算所依据的基本公式,但对式中的变量,学者又有不同的理解,如“ Y ”有学者定义为“流域产沙量”,而“ E ”因学者有不同的解译,提出了 S_{DR} 计算的修正公式^[16]:

$$S_{DR} = Y/(M + UG) \tag{2}$$

$$M = T \cdot \eta \tag{3}$$

式中, M 为水土流失量(t 或 $t\ km^{-2}\ a^{-1}$), T 为流域控制断面以上土壤侵蚀量(t 或 $t\ km^{-2}\ a^{-1}$); η 为归槽率(无量纲),即某区域受侵蚀的土壤颗粒在水力作用下进入沟道的那部分与该区域总的土壤侵蚀量的比值; UG 为沟道、沟壑侵蚀量中输送到流域出口断面的泥沙量(t 或 $t\ km^{-2}\ a^{-1}$)。

鉴于以上对 SDR 计算式及其中变量的不同引申和理解,需对侵蚀泥沙的运动过程作一解译和界定(图1)。在流域这一空间概念上,泥沙输移包括沟间泥沙输移和沟道泥沙输移^[17],但由于学科背景与习惯用法的差异,土壤侵蚀学中的“流域产沙量”只是沟间侵蚀并在冲淤平衡后被移出观测断面的泥沙量,“土壤流失量”也仅指流域的面蚀量;而河流工程学常用概念“流域输沙量”所涵的时空尺度较大,包含了沟(河)道侵蚀中的冲淤过程。当然,这种沟间与沟道侵蚀的划分只是相对的,一条支沟的侵蚀产沙可以是该支沟流域的沟道侵蚀,也可作为在更大尺度入汇的主沟流域的沟间侵蚀。侵蚀的泥沙由于地面或沟道拦截而沉积,流域产沙量通常在不同程度上小于流域输沙量、土壤侵蚀量和土壤流失量;只有当面积很小或在特殊的地质、地貌及泥沙输移与沉积特性下,上述四者才有可能相等。式(2)中的水土流失量“ M ”也是土壤侵蚀学惯用的概念,其对应于土壤侵蚀量“ E ”,前者的驱动力仅指水力,而后者包括了风力、水力、冻融侵蚀力等各种外营力,且此时的“ M ”仅被理解为图1中的地面侵蚀量“ E' ”。

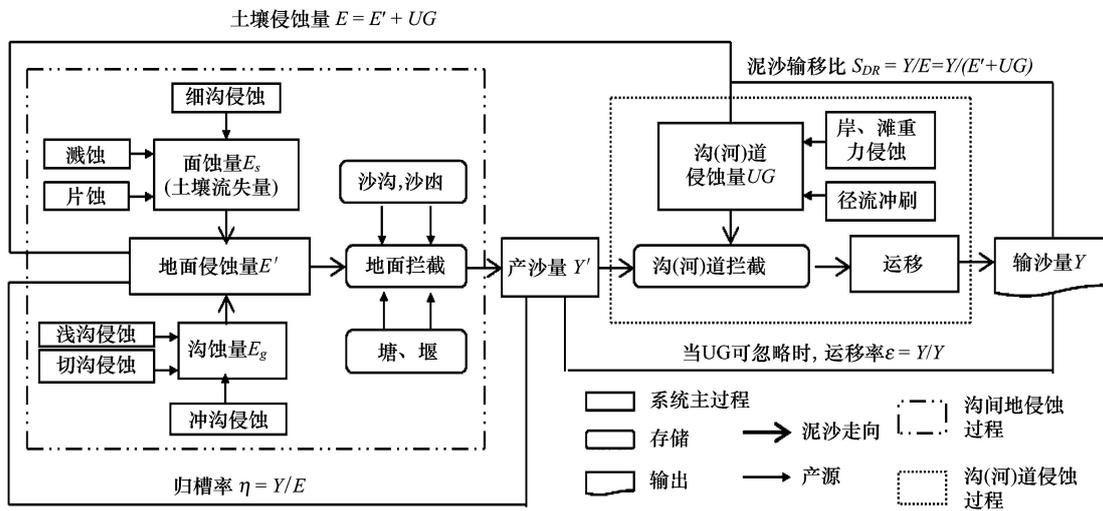


图1 地面侵蚀与沟道输沙系统结构框图

Fig.1 Structure diagram of soil erosion and sediment discharge for slope and gully system of watershed

SDR 的值一般在 1 左右波动,大多数流域泥沙输移比小于 1,即在一次泥沙输移过程中存在泥沙沉积;大于 1 的情况出现较少,即在一次泥沙输移过程中,以往泥沙输移过程中沉积滞留的泥沙被重新侵蚀搬运;0 值,即无侵蚀发生或发生的侵蚀量等于沉

积量^[18]。黄河流域的 SDR 值,整体较接近 1^[9,17],局部有变动,说明黄河流域侵蚀的泥沙在输移过程中沉积较少,侵蚀较为剧烈。长江流域大部分 SDR 值不高,整体范围在 0.20—0.60 之间变动^[12-13],整体明显小于黄河流域,由此说明长江流域较黄河流域泥沙沉积较多,侵蚀程度较低。

2 泥沙输移比的测算方法

美国学者在 1950 年泥沙输移比概念提出之时,并没有给出其求算方式,只至 1972 年才由美国农业部发布的关于泥沙输移比与流域面积的关系手册^[19],以此来查算流域的 SDR 值。我国学者一直以来为反推区域土壤侵蚀量而开展了大量的 SDR 测算方法研究,但目前仍没有能普遍适用于各种条件下的估算方法。根据 SDR 的定义,其测算需确定一定流域尺度下某时间段内断面以上流域的侵蚀泥沙量和通过断面的输移泥沙量,其中输沙量是水文观测的基本测量项目,可通过有目的地布设测站来准确获取,而侵蚀量(这里以水力侵蚀为例)是整个流域内降雨和径流导致移动的土壤表层及母质量,这个量是未知的、也无法科学准确地量测,主要通过类比计算、建模计算或者基于泥沙侵蚀和输移过程的沿程分段计算求和。SDR 的测算本质是泥沙侵蚀量的测算,下面针对目前国内外关于土壤侵蚀量的测算方法分别作一评述。

2.1 类比计算

类比计算,即通过在某一空间域上获得较为准确的土壤侵蚀量,然后根据相似的气象特征、地形地貌类型和土壤侵蚀特点,推测较大空间域的土壤侵蚀量,依此来计算该尺度域的泥沙输移比。类比计算包括径流小区法、单元流域法、遥测法和定性估算法。

2.1.1 径流小区法

通过坡面径流小区或小集水区实地调查研究区不同降雨条件和土地利用现状下各侵蚀类型的土壤侵蚀量,径流小区可根据土地利用类型选择布设在耕地、草地、林地、荒地或道路中,根据自然侵蚀性降雨或人工模拟降雨测算小区侵蚀量,由此类比推算流域内的土壤侵蚀量,或者采用流域总侵蚀量等于坡面侵蚀、沟壑侵蚀和沟道侵蚀之和进行计算。特别对于冲刷沟遍布的流域,因悬沟陷穴和崩塌剥蚀四处可见,沟谷的重力侵蚀又很严重,应通过径流小区、小集水区等计算崩坡侵蚀、沟坡侵蚀和沟道侵蚀来推求全流域总侵蚀量。小集水区、全坡面的观测结果可较准确地代表典型小流域产沙量。由径流小区类比计算流域土壤侵蚀量实质是土壤侵蚀的尺度上推,鉴于目前仍没有较为成熟的土壤侵蚀尺度转

换方法,其结果可能失真,且随着上推尺度增大则结果失真也将增大。

2.1.2 单元流域法

单元流域的概念是由牟金泽等在 1982 年研究流域产沙量计算中的 SDR 时提出,单元流域是指与研究地区具有相类似的土壤侵蚀类型区,流域面积小于 1.0 km^2 ,并包含有坡面、沟坡和沟道三部分地貌单元组成的完整小流域^[4]。单元小流域是一相对完整的自然地貌单元和集水区,是地理环境与生态系统的基本单元,它既是地表径流泥沙汇集输移的基本单元,又是侵蚀环境生态系统的基本单元,其侵蚀方式和形态类型具有一定规律性和代表性^[20]。因此,单元流域在土壤侵蚀环境研究中被广泛应用,由单元流域出口径流泥沙的实测资料推测相似侵蚀类型区的土壤侵蚀状况。单元流域的选择是基于其侵蚀产、输沙特点的可代表性与其流域出口水沙数据的易测控性,由此将其应用引申,又有典型坝、库控单元流域法。

一般意义的单元流域法即采用单元流域作为泥沙的产源地,将同侵蚀类型区的中、小流域输沙模数与单元流域实测的侵蚀模数相比得到该中、小流域的 SDR。如陈浩等在计算黄土丘陵沟壑区各级尺度流域 SDR 时,以岔巴沟流域内的团员沟 (0.18 km^2) 作为单元流域来推算该流域内各级嵌套子流域的 SDR^[21]。

典型坝、库控单元流域法,即选择典型的单坝、库(塘)控制的单元流域,基于核素示踪通过测量流域内坡面土壤剖面 and 坝、库淤积层土壤剖面中的核素浓度,推测、分析和计算坝、库淤积的泥沙来源以及流域的侵蚀量。黄河中游地区分布有广泛的闷葫芦淤地坝,而长江上游地区又存在较多的库(塘坝),因此,许多学者利用典型坝、库控单元流域来分析流域的侵蚀产沙量及泥沙输移比^[22]。

2.1.3 遥测法

遥测法即应用 RS 和 GIS 等技术方法,根据某区域土壤侵蚀强度分级指标,将地形数据信息、土地利用信息和植被覆盖信息等空间叠加,判断和计算侵蚀强度等级,编制流域土壤侵蚀强度等级图^[23],然后通过量算不同等级土壤侵蚀强度的面积,由不同级别侵蚀模数推求年平均侵蚀量,计算泥沙输移比^[24]。水利部第二、三次全国土壤侵蚀遥感调查

中,均编制了不同时段土壤侵蚀强度图,但鉴于遥感解译及人工判读等地理信息处理技术的科学水平,遥感调查结果的精度和可信度均存在争议,因此推算的泥沙输移比值只是一个相对值。

2.1.4 定性估算法

定性估算法是针对特定尺度范围和特定区域的,龚时旻^[25]曾提出黄河中游黄土丘陵沟壑区无论大中流域还是小流域,泥沙输移比均为 1.0 左右。张信宝^[26]等认为黄河中游黄土粒度组成细,其河流的自然泥沙输移比接近于 1,流域输沙模数可以表征侵蚀模数。实际国内外绝大部分河流的泥沙输移比小于 1,即使黄河中游某流域多年平均泥沙输移比接近于 1,但也会出现其场暴雨的泥沙输移比大于或小于 1 的情况,而且该流域其嵌套的子流域、单元流域的泥沙输移比也不一定为 1。陈浩等^[21]在计算大理河流域泥沙输移比时得出,岔巴沟曹坪站多年平均泥沙输移比约为 1,但 1964 年的丰水年泥沙输移比为 0.79,1965 年的枯水年泥沙输移比却为 9.8。因此,定性估算法是一种简单的概念性认识上的近似,只能做参考性比对,对于要获得较为准确的泥沙输移比值不具有任何意义。

2.2 建模计算

获得泥沙输移比值最基本方式是依据式(1)来计算,而估算流域出口控制断面以上流域总侵蚀量“ T ”除 2.1 介绍的几种方法外,通过构建经验模型(如 RUSLS 模型)和物理过程模型(如 WEPP、LISEM 等模型)来推求。随着对泥沙输移比研究的深入,各学者根据泥沙输移比的影响因素,构建了适应不同区域和降雨条件下的基于影响因子的流域泥沙比经验模型。

2.2.1 基于流域总侵蚀量计算的物理过程模型

通用土壤流失方程(USLE)是欧美最早也是运用最广的用来估算以面蚀和细沟侵蚀为主的地块土壤侵蚀量,是预报坡地多年平均年土壤流失量的经验方程,比较容易使用且推算效率高,但该模型忽略了泥沙的沉积。MUSLE(Modified USLE)是 USLE 的更新版本,被广泛用来估算次降水径流过程的产沙量。随着计算机技术的发展和土壤侵蚀理论认识的深入,学者们修正了 USLE 中的因子并建立了计算机模型,修正后的通用流失方程(RUSLE)可更加精确地估算土壤侵蚀量,成为土地资源管理和保护

的一个实用且相对准确的技术工具而被广泛应用^[27]。我国学者刘宝元等通过调整部分因子的测算公式及估算方法,形成适用于我国黄土高原、华北土石山区等大多数区域的 CSLE(Chines Soil Loss Equation)模型^[28],且第一次全国水利普查的水土保持专项普查中,CSLE 模型成为全国水力侵蚀成果普查的基本模型。但归根到底,通用土壤流失方程终究是个经验方程,难以表达土壤侵蚀的机理过程,它只对平均状态下的土壤流失量预报较好,而由于方程是大量统计的结果,难以描述大量试验数据的变化,且方程没有包含反映径流影响的因子,因此其影响了预报的精度,而土壤侵蚀过程模型可避免上述缺陷。

2.1.2 基于流域总侵蚀量计算的物理过程模型

自 20 世纪 70 年代开始,伴随着非点源污染模型的发展,土壤侵蚀过程的物理模型研究得到推动,其中美国农业部等各局开发了水蚀预报模型 WEPP 来代替 RUSLE,从 1995 年的第一版至目前最新的 2010 版,WEPP 模型有了长足发展。90 年代初荷兰学者以荷兰南部黄土区为研究区开发了能描述土壤侵蚀主要过程的 LISEM 模型^[29]。这类模型基本上可以模拟泥沙的侵蚀与堆积量,进而求算泥沙输移比,如王建勋^[30]系统评价了 WEPP 模型坡面版在黄土高原丘陵沟壑区的适用性;张晓明针对 WEPP 模型的流域版开展了基于黄土丘陵沟壑区气候、土壤、流域管理等参数库构建及其模拟应用,并通过模拟计算了流域的泥沙输移比^[31]等。但该过程模型一般需输入较多的参数,在国内使用仍存在诸多不适。因此,国内学者也陆续开发了可反映土壤侵蚀物理过程的分布式模型,如包卫民等人建立了中大流域水沙耦合模拟的物理概念模型^[32];曹文洪等构建了可以反映降雨击溅侵蚀、径流侵蚀产沙和输沙过程的分布式模型,该模型可以计算小流域任意断面处的土壤侵蚀量和输沙量^[33]。虽然这些模型在区域通用上有较大限制,但对于估算本区域泥沙输移比还是发挥了重要作用。

2.1.3 基于泥沙输移比影响因子的经验模型

通过已知某流域的泥沙输移比值和与其响应最密切的一个或多个因子间的相关性分析,建立某区域泥沙输移比与主要影响因子的经验模型,来推求其它流域的泥沙输移比。由于影响泥沙输移比的因

素众多,包括降雨-径流、地形地貌、土地利用/土地覆被、泥沙来源及其粒径以及流域面积等因素,各学者分别根据区域侵蚀特点和已有资料建立相应的泥沙输移比模型,如泥沙输移比与降雨量、径流系数、最大含沙量、无量纲雨型因子间的回归关系^[34],与峰值径流和降雨入渗间的幂函数^[35],与沟道平均比降或流域面积的指数函数^[36],与流域地形(流域分水岭的平均高程与流域出口高程之差)、流域最大长度(平行于主河道的流域分水岭与流域出口两点间的距离)的对数关系^[37],与植被覆盖度、平均坡度、平均坡长、土壤侵蚀因子,土壤下渗率的回归关系^[38],与粘土含量的回归关系^[39]等等。

上述泥沙输移比计算模型大多是泥沙输移比与直接可测的某一或某几个影响因子间的关系,这种关系对于特定区域或许可用,但实际中影响泥沙输移比的因素复杂繁多,且因子之间又相互作用,人们又追求能最大限度地纳入各种影响因子且模型具有更广泛的应用范围,因此,学者们基于机理分析构建可包含各主控因子信息的间接指标来建立关系,或通过因次分析来构建可考虑各种影响因子的模型。如陈浩等认为影响暴雨洪水次降雨泥沙输移比变化的因素主要是降雨径流特性与沟道系统的汇流能力及相应的含沙水流的侵蚀、搬运与沉积的能量变化,以及泥沙特性对水流挟沙能力的变化等^[21]。王协康等^[5]通过分别构建流域坡面系统和沟道系统的泥沙输移比来推求流域的泥沙输移比,其在泥沙输移比的公式虽引入了包含降雨、地形地貌、植被覆盖、泥沙粒径及时段因子等方方面面的影响因素,表明不同区域泥沙输移比的影响因素不同,丰富了泥沙输移比影响因子的综合考虑,但公式运用起来仍然比较复杂且待定系数多,其实用范围和计算精度也需进一步的数据检验。

3 泥沙输移比的影响因素

影响泥沙输移比的因素很多,包括水文要素、集水区面积、地质地形和地貌、土地利用以及泥沙粒径等在内的各种指标。初期的研究多数学者认为流域形态特征是影响泥沙输移比的主要因素,如 Roehl^[7]认为泥沙输移比只是某一具体流域特征值的函数,与水流情况的变化无关;Williams 等^[36]指出泥沙输移比可作为沟道平均比降或流域面积的指数函数,

且沟道平均比降更重要。景可^[12]在计算侵蚀类型区侵蚀量时,先根据地貌形态类型和植被覆盖度来划分侵蚀形态类型区,显然这里土地利用和地貌形态对泥沙输移比的影响同等重要。关于流域面积对泥沙输移比影响现阶段争论较多,Owens 等^[40]对世界地区的产沙模数与流域面积关系研究中发现产沙模数与流域面积呈显著的线性关系;而景可等^[41]在对长江流域、黄河流域输沙模数与流域面积的研究中认为流域面积只是一个集水区的度量单位,与输沙模数没有直接关系。其实,在比较流域输沙模数或泥沙输移比时,脱离不了流域的空间尺度和研究的时间尺度,每一尺度表征其特征指标不同,用小尺度适用的影响因子用来分析大尺度范围内其与泥沙输移比的相关性,很可能出现偏差,如随着空间尺度增大,流域内布设水利工程的可能性增加,其对泥沙的淤积具有显著影响,不能简单地用水文站的信息反映沟道自然状况。因此泥沙输移比与流域面积的关系不是简单意义上的相关与无关,它不仅具有严格的尺度依存性,而且与大规模的人类活动密切相关。

影响泥沙输移比的因素其种类及其权重与区域的空间尺度和研究的时间尺度直接相关。在分析流域次降雨或年际间泥沙输移比时,水文要素是最主要影响因子^[42];而在一次降雨能覆盖的不同流域间的泥沙输移比主要受地貌形态如流域面积影响^[43];在不同侵蚀类型区流域的泥沙输移比又取决于所在区域的地质构造单元性质、地貌及土地利用等。

因此,在探讨和分析泥沙输移比的影响因素时,仍不能脱离尺度域的限制,不同的是空尺度其主控因子并不相同。泥沙输移比时间域上的标定有如:次降雨尺度、年尺度和多年平均尺度,每一时间域的标定对应空间域的范围限定。如,黄土高原地区 100 km²的小流域被一次暴雨全部笼盖的机率大^[12],那么次降雨的泥沙输移比只有在 100 km²的空间域下讨论才具有意义;Robinson^[44]曾研究认为,小流域集雨面积>500 km²时,降雨空间分布均匀的假设不成立,因此只有在 500 km²的区域内比较流域年尺度泥沙输移比才更具科学性;而对于黄河中游河流的自然泥沙输移比接近于 1^[15]、长江上游的泥沙输移比在 0.7—0.8 以上^[11]等研究结论,只能针对多年平均泥沙输移比才能成立。泥沙输移比空间域的界定,

在于不同空间尺度影响泥沙输移比的主控因子不同,如大尺度的地质地貌类型区,影响泥沙输移的主要因素在于区域的整体地质构造及多年平均降水条件;中尺度的侵蚀类型区在于地形要素与多年平均降水,而小尺度流域土壤特性、土地覆被、地形因子等则是主要影响因素。

4 泥沙输移比的尺度依存性

4.1 泥沙输移比内涵对尺度的标定

无论泥沙输移比如何定义,其首先蕴含了空间概念,如某断面区域或流域。同时,许多客观现象的存在也使泥沙输移比深深烙印了“尺度”特征:如时间域上,年度和次降雨泥沙输移比存在侵蚀与产沙的暂时的不平衡,沟道存在短期的泥沙滞留与再侵蚀搬运的现象;空间域上,从坡面、单元侵蚀沟、小流域到中大尺度流域等观测尺度的扩展,坡面侵蚀和河道输移或沉积过程显著不同,且各级尺度的泥沙粒径需作明确界定,因通常细沙相对于粗砂的泥沙输移比要高,面蚀和细沟侵蚀产生的泥沙比河道侵蚀产生的泥沙更容易沉积。因此,泥沙输移比脱离“尺度”的限定就失去讨论的意义,对此,景可等^[14]提出了包含泥沙粒径、时间系列和空间系列界定的泥沙输移比更加完整、科学的定义,蔡强国等^[45]也认为,只有在界定参与确定泥沙输移比的泥沙粒级的上限、研究区的面积和定义研究的时间尺度,泥沙输移比的概念才会有意义。

4.2 泥沙输移比测算中的尺度问题

泥沙输移比的求算难点在于准确获得流域土壤侵蚀量,目前除径流小区和单元流域通过长期监测来获得外,只能建立模型来模拟预测,或在一些地区某尺度范围近似输沙量为土壤侵蚀量。类比计算中的径流小区法和单元流域法存在数据源单一、相对较大尺度其代表性不够等问题,单个径流小区表征的流域地形地貌、土地利用等下垫面状况有限,若全面反映流域地形、部位、土地覆被等条件下土壤侵蚀量,必然需建立多种类型的野外径流小区,基于目前土壤侵蚀研究现状,投入很大人力和财力还不现实。而单元流域法也存在类似问题,且单元流域定义的空间尺度比较模糊($<1 \text{ km}^2$),以大理河流域为例,自1982年牟金泽^[4]开始,刘纪根^[9]、陈浩^[15]等许多学者均以该流域毛沟—团山沟(0.18 km^2)作为

单元流域计算其它中小尺度流域泥沙输移比,但大理河流域仍有水旺沟(0.17 km^2)、黑帆沟(0.14 km^2)等毛沟流域可以作为单元流域,因为流域地形地貌和土地覆被的差异,水旺沟的输沙模数分别是团山沟、黑帆沟的4倍和8倍,可见,单元流域的选择标准还有待于细化,不仅在尺度上有限定,且在地质地貌、流域地形、土地覆被、坡沟百分比等方面具有足够代表性。遥测法可以直接获得较大区域尺度上的平均泥沙输移比,但鉴于当前土壤侵蚀研究现状,土壤侵蚀等级划分的科学性和遥感调查的精度均将导致结果误差很大。

构建测算模型是求算泥沙输移比的主要手段,但目前基于影响因子的经验模型适用范围存在很大局限性,其出路在于根据不同侵蚀类型区和时空尺度范围,科学筛选影响泥沙输移比的主控因子,分别建立适合该侵蚀类型区和该尺度的经验模型。构建物理过程模型仍然是流域土壤侵蚀研究的未来发展趋势,因为其可引用不同时空尺度数据源,能充分考虑影响因子的作用。目前的USLE、RUSLE、WEPP等模型,基本都不考虑坡面及沟道泥沙沉积及其交换过程,我国学者也只是对上述模型部分计算原理或公式作修正,因此在我国、特别黄土高原地区这些模型的应用还受到很大限制。

4.3 泥沙输移比的尺度依存及尺度域

流域的产、输沙是时空尺度各种水文、地质地形、土地覆被等因素交互影响综合作用的结果^[46],因此泥沙输移比也相应与时间和空间密切相关。流域泥沙输移比响应于研究的时间尺度是显而易见的,次降雨某流域既可是以侵蚀搬运为主也可以沉积为主,且因水土保持措施布置或水利工程建设,流域不同时间段的年平均泥沙输移比可能相差很大。流域泥沙输移比受空间尺度影响也是客观的,流域面积是一个综合地表多个环境要素黑箱变量^[47],中小流域内环境因素相似性比较大,但大流域环境要素差异较大,且流域越大其环境条件越复杂,产沙模数必然强烈地受流域面积的影响。另外,水文要素是流域侵蚀产沙的源动力,小流域被一次暴雨全部笼罩的机率远比大流域大,因此泥沙输移比必然存在空间尺度依存性。

Owens等^[40]曾对世界上地区的产沙模数与流域面积点绘了关系图(图2),其显示流域产沙模数与

流域面积呈显著的线性关系,展示了良好的“尺度依存性”。景可等^[41]在探讨流域输沙模数与流域面积关系时,通过分别点绘黄河流域和长江流域各水文站点的输沙模数和流域面积关系时发现,二者之间没有任何趋势性关系,并认为流域面积仅仅是反映一个集水区的规模,没有其他含义。笔者点绘了黄河和长江流域不同支流的嵌套流域水文站点输沙模数和其面积关系图(图3),发现各支流嵌套流域的输沙模数和其面积表现出很好的线性相关关系,黄

河流域的泾、洛、渭河各嵌套流域均显示单调递减趋势,长江流域的嘉陵江、金沙江和岷江各嵌套流域显示了单调递增趋势。同样的数据源,当忽略区域环境要素差异而点绘在同一坐标下时,显然不会有任何趋势可言;而当根据侵蚀类型或地质地貌类型划分不同区域分别点绘同类型下输沙与面积关系时,显然展示了某种趋势。因此,流域泥沙输移比与流域面积不是简单意义上的相关与无关。

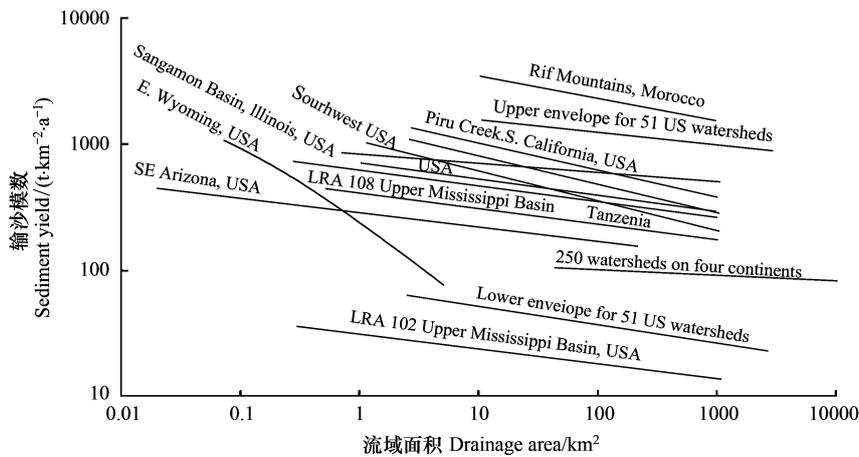


图2 世界地区产沙模数与流域面积关系图^[40]

Fig.2 The relationship between sediment yield modulus and watershed area from different basin in the world^[40]

Rif Mountains, Morocco: 摩洛哥里夫山地区; Upper envelope for 51 US watersheds; 美国 51 个流域的上游区; Lower envelope for 51 US watersheds; 美国 51 个流域的下游区; Piru Creek, S. California, USA; 美国加利福尼亚皮鲁河流域; Southwest USA; 美国西南地区; Sangamon Basin, Illinois, USA; 美国伊利诺斯州桑加蒙流域; E. Wyoming, USA; 美国怀俄明州东部地区; SE Arizona, USA; 美国亚利桑那州东南部地区; LRA 108 Upper Mississippi Basin; 密西西比河流域上游的 LRA 108; LRA 102 Upper Mississippi Basin, USA; 美国密西西比河流域上游的 LRA 102; Tanzania; 坦桑尼亚; USA 美国; 250 watersheds on four continents: 四大洲的 250 个流域

许迺心^[48]曾参照黄河流域干支流 249 个站点的输沙模数与流域面积关系进行了分析,未发现明显的尺度效应,笔者认为黄河中游自然条件复杂,区域地形地貌、土地利用及降雨的空间均匀性差异较大,流域泥沙输移比与面积关系也只有在“尺度域”的界定下才能有科学认识。图 4 为不同侵蚀类型区各级尺度嵌套流域泥沙输移比与流域面积关系,由图显示,约 100 km²的紫色土区李子溪嵌套流域和黄土区的罗玉沟流域,泥沙输移比与流域面积展示了极好的对数关系,决定系数 R^2 在 0.92 以上;接近 1000 km²黄土区大理河流域,泥沙输移比与流域面积也具有较好指数关系,但决定系数降低到 0.50;再随着空间尺度增大至 10000 km²的涪江和赣江嵌套流域,二者的相关性趋势仍然存在,但决定系数仅在 0.15 以下。这指示我们在探讨流域泥沙输移比时,

不仅不能割裂时空尺度而就事论事,且在构建相关模型时需考虑适用的尺度范围。

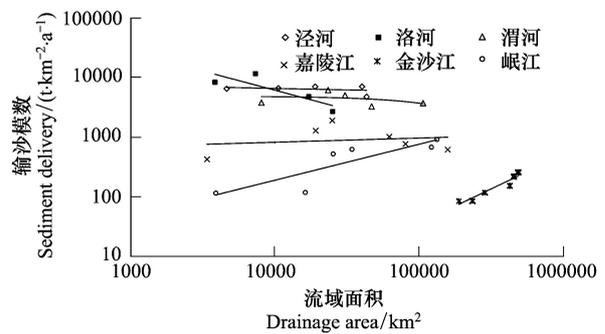


图3 黄河流域和长江流域不同支流嵌套流域水文站输沙模数与流域面积关系

Fig.3 The relationship between sediment discharge modulus and watershed area in nested basins from the Yellow river and Yangtze river

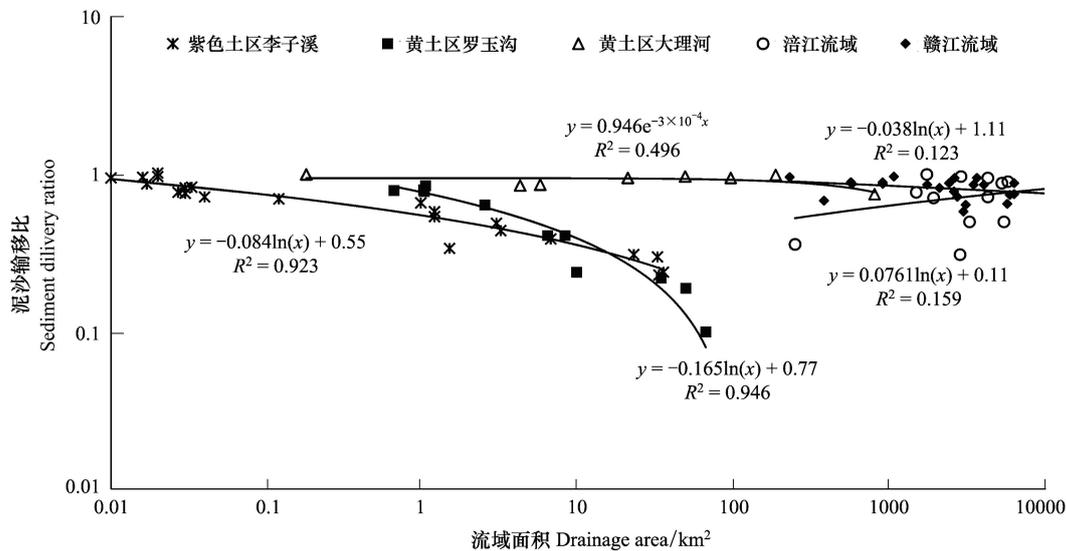


图4 黄河流域和长江流域不同支流嵌套流域水文站输沙模数与流域面积关系

Fig.4 The relationship between sediment discharge modulus and watershed area in different nested watersheds from the Yellow river and Yangtze river

5 结论

本研究基于对现有研究成果的系统梳理和讨论,形成以下结论:

(1) 土壤侵蚀学概念的“产沙量”仅指沟间侵蚀中在冲淤平衡后被移出观测断面的泥沙量,而河流工程学常用概念“输沙量”所涵的时空尺度较大,包含了沟(河)道侵蚀中的冲淤过程;且“归槽率”与泥沙输移比在内涵及定量描述上均不可等同,因二者涉及的泥沙“物质量”不同,前者是流域沟间输移出的物质量,后者是沟间和沟道输移出的物质量。

(2) 现有的泥沙输移比测算方法各存优缺点,在使用中均应考虑其限制因素,其中单元流域的类比计算、基于总侵蚀量计算的物理过程模型是我国最常用的估算方法。但单元流域法不仅存在数据源单一、相对较大尺度应用其代表性不够等问题,且其定义的空间范围比较模糊($<1 \text{ km}^2$),选择标准待于细化明确;基于总侵蚀量计算的物理过程模型存在不考虑坡面及沟道泥沙沉积及其交换过程的先天缺陷,使其在运用范围的适宜性上存在很大不足。

(3) 泥沙输移比存在尺度依存性和有较为严格的尺度域,这从泥沙输移比定义对尺度的标定、泥沙输移比测算对尺度的限定和国内外不同地区一定尺度嵌套流域泥沙输移比和流域面积关系的研究结果等方面展现出来。由此也客观反映了不同时空尺度

下影响泥沙输移比的主控因子存在变异性,使目前针对不同流域建立的基于影响因子的测算模型虽种类繁多,但不具推广性。

基于本研究结果,作者认为对泥沙输移比的研究,未来需关注以下三点:

第一,泥沙输移比的测算模型。一方面是对现有且运用较广的测算泥沙输移比的经验与物理过程模型针对中国土壤侵蚀现状的修正研究,如以刘宝元、雷霆武等为首的各科研团队针对 USLE、WEPP 等模型中的各种参数、计算方程的修正和该进,使其在我国具有较广的适宜性。另一方面是建立真正适合我国不同侵蚀类型区的物理过程模型,国内学者开展了很多细致、详尽且又有重复的水、沙、沉积物运移过程微观与宏观研究,但一直缺乏可集成且具有代表性、实用范围较广的物理模型,这将需要科学界形成共识,通过顶层的框架设计,各部门、科研院所联合攻关,分别负责不同的“点”、“块”研究,然后通过耦合集成来构建适合我国国情的物理过程模型,这必将产生深远意义。

第二,泥沙输移比的尺度依存及其尺度域。这是个系统性的研究课题,不同地质构造区、不同的侵蚀类型区、不同的土壤特性及地表覆被,影响泥沙输移比的主控因子不同,这种空间异质性如何随时空尺度改变,以及多大空间尺度下可以忽略降雨均匀性的影响等,都需大量的统计及机理分析做支撑。

基于对该问题的系统研究,可以构建不同尺度域内基于影响因子的泥沙输移比测算模型,这可突破目前该类模型存在的推广性不足的局限。

第三,泥沙输移比的尺度转换研究。水文过程的尺度转换是目前水文生态的研究热点,既然泥沙输移比存在尺度依存性,那么在某尺度域内肯定存在尺度转换的可能,这不仅可为泥沙输移比测算方法研究提供新的方向,也可为其它水文过程尺度转换研究提供新的思路。

References:

- [1] Li L Y, Jiao J Y and Chen Y. Research methods and results analysis of sediment delivery ratio. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009,7(6): 113-122.
- [2] Sediment Committee of Chinese Hydraulic Engineering Society (Sediment Committee of CHES). *Sediment Handbook*. CESP Press, 1992, Beijing.
- [3] Vanoni V A. *Sedimentation Engineering*. New York: The Society, 1975; 437-493.
- [4] Mou J Z and Meng Q M. Sediment delivery ratio from the calculation of sediment yield in watershed. *Journal of Sediment Research*, 1982(2): 60-65.
- [5] Wang X K, Ao R Z, Yu G L. Study on sediment delivery ratio. *Sichuan Water Power*, 1999,18(2): 16-20.
- [6] Zhang J S, Cui P. Discussion on concept and calculation method of sediment delivery ratio (SDR) of debris flows. *Journal of Sediment Research*, 2012, 3:35-40.
- [7] Roehl J E. Sediment source areas, delivery ratios and influencing morphological factors. *Publication International Association of Hydrological Sciences*, Wallingford, England, 1962; 202-213.
- [8] Wolman M G. Changing needs and opportunities in sediment field. *Water Resources Research*, 1977,117: 50-54.
- [9] Liu J G, Cai Q G, Zhang P C. Temporal and spatial variations of sediment delivery ratio and its influencing factors in Chabagou watershed. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(5): 6-10.
- [10] Li X X, L T H. Study of relationship between sediment delivery ratio and watershed scale of Yellow River basin. *Journal of Sediment Research*. 2011, 2: 33-37.
- [11] Zhang S L, Yu Y M, Yao W Y. *The calculation method for effects of soil and water conservation measures on runoff and sediment reduction*. China Environmental Science Press, Beijing, 1994: 40-43.
- [12] Jing K, Jiao J Y, Li L Y. Soil erosion amount and sediment delivery ratio in the hilly purple soil region in the upper reaches of Yangtze River; A case study in the Fujiang River Basin. *Science of Soil and Water Conservation*, 2010, 8(5): 1-7.
- [13] Jing K, Jiao J Y, Li L Y, Zhang S J. The scale relationship of sediment discharge, erosion amount and sediment delivery ratio in drainage basin; A case study in the Ganjiang River Basin. *Geographical Research*, 2010, 29(7): 1163-1170.
- [14] Jing K. Sediment delivery ratio in the upper Yangtze River. *Journal of Sediment Research*, 2002, 1: 54-59.
- [15] Chen H. Relationship between erosion and sediment yield in drainage basins of loess hilly-gullied areas. *Acta Geographica Sinica*, 2000,55(3): 354-362.
- [16] Zhang G X, Lei X Z, Yu P. Study on sediment transportation ratio about small watershed of rolling region in middle part of Sichuan province. *Sichuan Water Resource*, 2009, (3): 27-41.
- [17] Jin K. Regular pattern of sediment delivery in Jinhe river and Beiluohu river drainage area. *Yellow River*, 1999, 21(12): 18-19.
- [18] Xie W C, Li T H. Research comment on watershed sediment delivery ratio. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2012, 48(4): 685-694.
- [19] USDA. *Sediment sources, yields, and delivery ratios*. National Engineering Handbook, Section 3 Sedimentation. 1972.
- [20] Lei A L, Tang K L. Choosing prototypes in simulated test of soil erosion. *Journal of soil and water conservation*, 1995, 9(3): 60-65.
- [21] Chen H, Cai Q G, Chen J R, Jin D S. Influence of human activities on erosion, delivery and deposit of basin system in hilly-gully loessic area. *Geographical Research*, 2001,20(1): 68-74.
- [22] Zhang L, Shi C X, Du J, Zhang H. Research for sediment storage release of small watershed in loess hilly gully area. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, (4): 39-44.
- [23] Tan B X, Li Z Y, Wang Y H, Yu P T, Liu L B. Estimation of vegetation coverage and analysis of soil erosion using remote sensing data for Guishuihe drainage basin. *Remote Sensing Technology and Application*, 2005, 2: 215-220.
- [24] Liu Y, Zhang P. Surface erosion in upper Yangtze region and river sediment transport. *Journal of Yangtze River Research Institute*, 1995, 12(1): 40-44.
- [25] Gong S S, Xiong G S. Source and transport of erosion in Yellow River// *Proceedings of International Symposium on river erosion*. Guanghua Press, Beijing, 1981: 43-52.
- [26] Zhang X B, He X B, Wen A B, Qi Y Q. Soil erosion rates under different land scale conditions. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2006, 26,(2): 69-71.
- [27] Meyer L D. Evolution of the universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1984, 39: 99-104.
- [28] Liu B Y, Zhang K, Xie Y. An empirical soil loss equation. 12th ISCO Conference. May 26-31, 2002. Beijing, China. Volume II: 21-25.
- [29] De Roo A P J. The LISEM project: an introduction hydrological processes. 1996,10:1021-1026.
- [30] Wang J X. Evaluation on the applicability of the WEPP model (Hillslope Version) used in hilly-gullied Loess Plateau [D]. Northwest A&F University, Shanxi, 2007.
- [31] Zhang X M, Cao W H, Yu X X. Evaluation on the applicability of the GeoWEPP model used in the Loess area. *Journal of Sediment Research*, 2011, 6: 50-54.
- [32] Bao W M, Chen J T. The model based on physic and concept for simulating the coupling of water and sediment in large and medium-sized basin. *Advances in Water Science*, 1994, 5(4): 287-292.
- [33] Cao W H, Qi W, Guo Q C, Lu Q. Distributed model for simulating runoff yield in small watershed. *Journal of hydraulic engineering*, 2003,9:48-54.
- [34] Cai Q G. Sediment delivery ratio of Yangdaogou watershed in individual precipitation in the hilly-gullied Loess Plateau// Zuo D K. *Corpus of the evolution of environment and regularities of water and sediment movement in the Yellow River basin*. Geological Publishing House, Beijing, 1991: 105-113.
- [35] Arnold J G, Williams J R, Srinivasan R. The soil and water

- assessment tool (SWAT) user's manual [R]. Temple, TX. 1996.
- [36] Williams J R, Berndt H D. Sediment yield computed with universal equation. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 1972, 98(HY12): 2087-2098.
- [37] Maner S B. Factors influencing sediment delivery ratios in the Blackland Prairie land resource area. Fort Worth, Tex: U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1962: 10-12.
- [38] Ebisemiju F S. Sediment delivery ratio prediction equations for short catchment slopes in a humid tropical environment. *Journal of Hydrology*, 1990, 114: 191-208.
- [39] Walling D E. The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology*, 1983, 65: 209-237.
- [40] Owens P, Slaymaker O. Late Holocene sediment yields in small alpine and subalpine drainage basins//British Columbia. International Association of Hydrological Sciences Special Publication, 1992, 209: 147-154.
- [41] Jing K, Shi C X. Study on the relationship between sediment yield and drainage area. *Journal of Sediment Research*, 2007, 1: 17-23.
- [42] Wang L L, Yao W Y, Wang Z Y, Yang J S. Modeling sediment delivery ration of single rainfall events in hilly-gullied Loess Plateau based on hydrological elements. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31 (5): 28-31.
- [43] Yu X X, Zhang X M, Li J L. Processes and Mechanisms. Science Press, Beijing, 2009.
- [44] Robinson A R. Sediment yield as a function of upstream erosion. SSSA Special Publication, 8, 1979.
- [45] Cai Q G, Fan H M. On the factors and prediction models of SDR. *Progress in Geography*, 2004, 23(5): 1-9.
- [46] Renschler C S, Harbor J. Soil erosion assessment tools from point to regional scales: The role of geomorphologists in land management research and implementation. *Geomorphology*, 2002, 47: 189-209.
- [47] Walling D E. Suspended sediment and solute response characteristics of river Exe, Devon, England// In *Research in Fluvial Systems*, Davidson-Arnott R, Nickling W (ed.). Geoabstracts, Norwich, 1978: 167-197.
- [48] Xu J X. Relationship between sediment yield modulus and watershed area and its geomorphology significance in reaches of Yellow River, *Geomorphological environment Exhibition*. CESP Press, Beijing, 1999.
- [10] 李秀霞, 李天宏. 黄河流域泥沙输移比与流域尺度的关系研究. *泥沙研究*, 2011, 2: 33-37.
- [11] 张胜利, 于一鸣, 姚文艺. 水土保持减水减沙效应计算方法. 北京: 中国环境科学出版社, 1994: 40-43.
- [12] 景可, 焦菊英, 李林育. 长江上游紫色丘陵区土壤侵蚀与泥沙输移比研究—以涪江流域为例. *中国水土保持科学*, 2010, 8(5): 1-7.
- [13] 景可, 焦菊英, 李林育. 输沙量、侵蚀量与泥沙输移比的流域尺度关系—以赣江流域为例. *地理研究*, 2010, 29(7): 1163-1170.
- [14] 景可. 长江上游泥沙输移比初探. *泥沙研究*, 2002, 1: 54-59.
- [15] 陈浩. 黄土丘陵沟壑区流域系统侵蚀与产沙关系. *地理学报*, 2000, 55(3): 354-362.
- [16] 张广兴, 雷孝章, 于朋. 川中丘陵区小流域泥沙输移比研究. *四川水利*, 2009, (3): 27-41.
- [17] 景可. 泾河、北洛河泥沙输移规律. *人民黄河*, 1999, 21(12): 18-19.
- [18] 谢旺成, 李天宏. 流域泥沙输移比研究进展. *北京大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(4): 685-694.
- [20] 雷阿林, 唐克丽. 土壤侵蚀模型试验的原型选定问题. *水土保持学报*, 1995, 9(3): 60-65.
- [21] 陈浩, 蔡强国, 陈金荣, 金德生. 黄土丘陵沟壑区人类活动对流域系统侵蚀、输移和沉积的影响. *地理研究*, 2001, 20(1): 68-74.
- [22] 张鸾, 师长兴, 杜俊, 张灏. 黄土丘陵沟壑区沟道小流域泥沙存贮释放初探. *水土保持研究*, 2009, 4: 39-44.
- [23] 谭炳香, 李增元, 王彦辉, 于澎涛, 柳立兵. 基于遥感数据的流域土壤侵蚀强度快速估测方法. *遥感技术与应用*. 2005, 2: 215-220.
- [24] 刘毅, 张平. 长江上游流域地表侵蚀与河流泥沙输移. *长江科学院院报*, 1995, 12(1): 40-44.
- [25] 龚时扬, 熊贵枢. 黄河泥沙来源和输移// *河流泥沙国际学术论文集*. 北京: 光华出版社, 1981: 43-52.
- [26] 张信宝, 贺秀斌, 文安邦, 齐永青. 不同尺度流域的侵蚀模数. *水土保持通报*, 2006, 26, (2): 69-71.
- [30] 王建勋. WEPP 模型(坡面版)在黄土高原丘陵沟壑区的适用性评价[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2007.
- [31] 张晓明, 曹文洪, 余新晓. GeoWEPP 在黄土高原地区的适用性评价. *泥沙研究*, 2011, 6: 50-54.
- [32] 包卫民, 陈姐庭. 中大流域水沙耦合模拟物理概念模型. *水科学进展*, 1994, 5(4): 287-292.
- [33] 曹文洪, 祁伟, 郭庆超, 等. 小流域产汇流分布式模型. *水利学报*, 2003, 9: 48-54.
- [34] 蔡强国. 黄土丘陵沟壑区羊道沟小流域次降雨泥沙输移比研究// 左大康. *黄河流域环境演变与水沙运行规律研究文集*. 地质出版社, 1991: 105-113.
- [41] 王玲玲, 姚文艺, 王昭艳. 基于水文要素的黄土丘陵区次降雨泥沙输移比模型. *水土保持通报*, 2011, 31(5): 28-31.
- [42] 余新晓, 张晓明. 土壤侵蚀过程与机制. 北京: 中国科学出版社, 2009: 305-310.
- [43] 陈浩. 黄土丘陵沟壑区流域系统侵蚀与产沙关系. *地理学报*, 2000, 55(3): 354-362.
- [45] 蔡强国, 范昊明. 泥沙输移比影响因子及其关系模型研究现状与评述. *地理科学进展*, 2004, 23(5): 1-9.
- [48] 许炯心. 黄河流域产沙模数与流域面积的关系及其地貌学意义. *地貌环境展*. 北京: 中国环境科学出版社, 1999.

参考文献:

- [1] 李林育, 焦菊英, 陈杨. 泥沙输移比的研究方法及成果分析. *中国水土保持科学*, 2009, 7(6): 113-122.
- [2] 水利学会泥沙专业委员会. *泥沙手册*. 北京: 中国环境科学出版社, 1989: 27-28.
- [4] 牟金泽, 孟庆枚. 论流域产沙量计算中的泥沙输移比. *泥沙研究*, 1982, 2: 60-65.
- [5] 王协康, 敖汝庄, 喻国良. 泥沙输移比问题的分析研究. *四川水力发电*, 1999, 18(2): 16-20.
- [6] 张金山, 崔鹏. 泥石流泥沙输移比的概念与计算方法探讨. *泥沙研究*, 2012, 3: 35-40.
- [9] 刘纪根, 蔡强国, 张平仓. 岔巴沟流域泥沙输移比时空分异特征及影响因素. *水土保持通报*, 2007, 27(5): 6-10.