

羊道沟流域侵蚀产沙模型原型选定问题

刘前进^{1,2}, 蔡强国², 吕国安¹, 刘纪根²

(1. 华中农业大学, 湖北 武汉 430070; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 侵蚀的空间尺度不同, 在建立土壤侵蚀模型时, 要考虑由于空间变化所引起的侵蚀因子对侵蚀产沙响应的不同。土壤侵蚀模型在空间尺度上可以划分为坡面、小流域和区域三个不同层次。在坡面尺度上, 主要考虑坡面侵蚀的垂直分带性及其相互影响; 小流域尺度上, 不但考虑坡面侵蚀的特点, 还要考虑坡面来水来沙对沟道侵蚀产沙的影响、重力侵蚀及泥沙输移情况; 在区域尺度上则主要考虑小流域各自的侵蚀产沙特点及其相互影响。通过分析国内外常用的不同尺度上的侵蚀产沙模型及其最新发展情况, 并借鉴羊道沟流域研究的丰富经验, 提出了羊道沟流域作为王家沟流域—侵蚀产沙单元的侵蚀产沙概念模型, 为流域侵蚀产沙模型尺度之间转换提供借鉴。

关键词: 空间尺度; 侵蚀产沙; 侵蚀模型

中图分类号: S 157.1 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2004) 04-0069-05

Choice of Prototype in Modeling the Soil Erosion in Yangdaogou Watershed

LIU Qian-jin^{1,2}, CAI Qiang-guo², LU Guo-an¹, LIU Ji-gen²

(1. Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China)

Abstract: In different scale, the influence of the main factors on runoff, sediment yield and the composition of the main factors is not the same. According to the spatial scale, almost all of the soil erosion models can be classified as field-scale models, catchment-scale models and region-scale models. Each type of erosion models has its distinctive characteristics. As to the field scale, the analysis of the clear vertical zones and the interaction between them is very important. In addition to the analysis of soil erosion on hill slopes, effects of runoff and sediment from hill slope on erosion and sediment at the followed gully zone and the erosion caused by gravitation are complex and pivotal in the catchment scale. In this scale, the sediment delivery has a significant importance to the erosion modeling. Establishing region scale erosion model, the relationship and the interaction of the subordinate drainages together with the style of the runoff yield and runoff concentration should be taken into account. Commenting on the fitness and the existing problems of the popular erosion models home and abroad in these three scales, studying the experience of model building in the Yangdaogou watershed, a conceptual erosion model, as a intergradation model to the larger scale erosion model, is to be bring forward.

Key words: spatial scale; sediment yield; erosion model

1 概述

土壤侵蚀研究及其水土保持评价按照研究空间尺度的不同可以划分三个层次: 坡面、小流域和区域研究^[1]。每个层次上侵蚀产沙机理, 影响因子及其模拟的方法有很大的区别, 国内外在这三个不同尺度上建立了众多的模型, 以适应对不同尺度流域水土保持规划的需要。综合介绍不同尺度上土壤侵蚀机理特征、影响因子和建模思路, 对比分析国内外不同尺度上的侵蚀产沙模型, 可以为模型的建立和应用提供借鉴。在此基础上可以进一步研究土壤侵蚀因子如气候、地形地貌、植被、土壤母质、土地利用等因子在不同尺度上的响

应过程, 特别是在区域尺度上对水土流失的响应过程。

1.1 坡面侵蚀模拟及其研究现状

坡面土壤流失模型是将一个小流域看成由若干个坡面单元(或称地块)组成, 然后根据小区观测或室内模拟实验资料, 建立统计两类方法。(1) 简单地块法。根据统计的或物理的模型, 以单个坡面为单元计算土壤流失量。坡面模型基本信息元常用理想坡面为单元(如 USLE 的标准小区)。已有的研究采用型计算的需要, 用地貌单元、径流网络或土地利用特征之一划分地块单元。最简单的划分是栅格法^[2], 每个栅格作为计算分析的单元, 每一个栅格可以看作坡度、土壤和土地利用等相对均一的地理空间单元。(2) 综合地块法。

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); 国家自然科学基金资助项目(40271075); 香港特区政府研究资助局支持项目(HKU 7017/01E)
作者简介: 刘前进(1979-), 男, 汉, 山东安丘人, 硕士研究生, 主要从事流域侵蚀产沙和地理信息系统应用等方面研究。

根据地貌、土地利用、土壤等影响流失的环境因子划分地块, 以此为基础采集和管理参数数据并计算土壤流失量。要想将模型用于土壤保持与土地利用规划, 必须采用这种方式确定地块^[1]。基于其研究方法, 坡面模型考虑因子有: 降雨量、降雨强度、降雨能量、地形、土壤、植被覆盖、土地利用、前期土壤含水量, 表土结皮、微地形、上部来水来沙因子。

我国系统的模型研究始于 20 世纪 80 年代, 主要是统计模型的研究。参考或直接利用 USLE 的基本形式, 据中国的观测资料, 计算各因子值, 然后计算坡面和流域土壤流失量, 并研究流域土壤流失的空间变异。关于各侵蚀因子的定量研究, 目前比较成熟的是降雨径流因子、地形(坡度、坡长)因子的研究, 植被覆盖因子和在土地利用和水土保持中非常重要, 但是研究较弱。经营管理因子在我国还没有统一的标准^[3]。关于土壤因子, 一种方法是 K 因子测量或推算。另一种是关于土壤抗冲抗蚀性的研究, 但由于概念上的差异和本身研究方法、指标等方面的不尽统一和不尽成熟, 所以还难以运用于模型之中^[4]。在国外 Trana 等^[5]应用了两种方法: multi-objective fuzzy regression(MOFR) 和 fuzzy rule-based modeling(FRBM)。MFOR 主要是揭示 RUSLE 各个因子与土壤侵蚀的单因子关系。然后这些关系式与 FRBM 结合进行主成分分析, 提高了模拟精度。

常用的坡面侵蚀模型有 CREAMS(Kinisel, 1985)、CSEP(Kirkby and Cox, 1995)、EPIC(Williams, 1985)、EUROSEN(Morgan et al, 1998; Quinton, 1994)、GLEAMS(Kinisel, 1991)、WEPP(Flanagan and Nearing, 1995) 其中 EPIC(Williams, 1985)保留了 USLE(Wischmeier and Smith, 1978)的很多特点, 它不涉及空间尺度的变化, 应用面积较小, 坡度均一地块, 主要考虑入渗率、作物生长、覆盖度、土壤湿度和 USLE 的 P 因子。CREAMS 和其演化模型 GLEAMS, 考虑到了沟间侵蚀和沟道侵蚀因子, 其他主要因子有入渗率、作物覆盖、水压等。现在应用广泛的 WEPP 和 EUROSEM 则主要是基于比较简单侵蚀因子的基础上的侵蚀模型。CSEP 考虑到了流域降雨和侵蚀度。在这些模型中, 除 EUROSEM 模型, 都是连续性的模型。GLEAMS、EPIC、CSEP 模型随时间的缩短(每年到每天), 其模拟的精度降低, 而 WEPP 在短时间的模拟效果比较好。

1.2 小流域侵蚀模拟及其研究现状

小流域治理被认为是中国水土保持的基本方式之一。每一个流域在地质形态、侵蚀方式、产沙输沙过程等方面具有相似性。以小流域为单元建立模型是必要的, 也是可能的。因为小流域由若干坡面组成, 所以在建立模型中要考虑到坡面侵蚀整体的规律性, 在坡面尺度规律上进一步概括从而体现整体的规律性特别是侵蚀的分带规律, 正确处理水沙汇流关系。在坡面侵蚀的基础上, 考虑沟坡和沟道侵蚀及其泥沙在沟道的输移过程。传统的流域汇流网络计算, 多以格网体系为基础, 已形成了较多的计算方法和表达方式。但这些方法在表示一个坡面或一个单一地理区域的特征时, 存在缺陷。刘高焕^[6]初步探讨了地块单元方法, 以地块为基本单元, 组成流域地貌结构, 构建流域形态, 模拟物质在坡面及在流

域内的运移, 不仅为实现整个流域内侵蚀量的自动沿程计算提供了基础。

小流域土壤流失过程的整体性认识小流域土壤流失过程是水文、气象因子、下垫面因子的函数。水文气象因子包括降雨量、径流量等。下垫面因子包括流域几何特征、地貌特征、土壤特征、植被与土地利用、水土保持措施等。因为小流域由若干坡面组成, 所以小流域的上述指标只能是某种统计特征值(均值、比例), 如平均坡度、农地比例、沟谷密度等^[7]。就侵蚀的物理过程来说, 坡面模型和流域模型并没有本质的区别, 随着空间尺度的增大, 增加或者改变引入的空间因子, 考虑不同的侧重点。例如, 在坡面侵蚀中主要考虑是面蚀, 在小流域中细沟其实和沟道侵蚀则比面蚀重要。

国内已有的物理模型主要是计算坡面径流量、径流侵蚀力、溅蚀和沟蚀分散量、输沙能力等。国外 Baffaut 等将能很好的预测日侵蚀的分布状况的 WEPP 模型与 CLIGEN 模型结合能模拟长期日均侵蚀分布状况^[8]。ANSRERS 模型最大的缺点在于其经验性并且只能模拟泥沙输移总量, 随着模型的改进特别是与 GIS 结合后(Rewerts and Engel, 1991), 实用性不断加强。现在 ANSERS-2000 版将地下水因子引入其中, 可以模拟地块和田间在不同植被覆盖下的蒸发和作物根区排水(Bouraoui et al., 1997)。分布式流域模型在计算机和 GIS 的支持下, 能够模拟预测下垫面因素复杂流域的径流和侵蚀的动态状况, 能够比较准确的确定泥沙的来源和汇流, 及其土壤中的养分运移情况。但是大部分的流域模型不是连续性的, 他们没有考虑到气候因子及其导致的作物生长因子、水分蒸发和地下水运动因子, 或者熔雪作用因子作用的变化情况。但是随着空间因子的引入, 空间数据中的各种误差会影响模拟的精度。

常用的小流域模型有 ACRU(Schulze, 1989; New and Schulze, 1996)、AGNPS(Young et al, 1989)、EROSION3D(Von Werner and Schmidt, 1997)、EUROSEM(Morgan et al, 1998; Quinton, 1994)、KINEROS2(Smith et al, 1995)、LISEM(De Roo et al, 1996a, b)、MEDRUSH(Kirkby, 1998), 其中 ACRU、AGNPS、MEDRUSH 是连续性模型, 步长为 $1\text{ h} \sim 1\text{ d}$, MEDRUSH 模拟的步长是 1 h , 对低强度和多降雨峰值的降雨模拟效果较差。KINEROS2、EUROSEM、LISE(因为应用了 Green 和 Ampt 入渗计算方法, 所以对初始湿度很敏感)是次降雨模型, LISEM、EROSION3D、AGNPS、MEDRUSH 是基于栅格的模型, ACRU、EUROSEM、KINEROS2 是基于多边形的侵蚀模型。

1.3 区域侵蚀模拟及其研究现状

区域土壤侵蚀是不同小流域侵蚀综合作用的结果, 存在多种侵蚀类型的组合, 存在侵蚀、输移和产沙的复杂关系。侵蚀过程的空间分异明显, 存在侵蚀-输移-产沙的复杂组合。其侵蚀因子具有宏观性, 即研究一个区域的水土流失状况与研究一个坡面、小流域的情况不同, 它要求所选用的指标能够宏观地反映区域内某一空间单元的水土流失特征。所以这种指标常常是某一种统计特征值。例如, 把坡度或坡长等坡面的微观指标用于宏观评价区域的水土流失情况, 显然

是不可行的, 而应用平均坡度、沟壑密度等指标则是可以的; 因子指标本身必须具有明确的数量化概念并且资料容易获取^[9]。通常的思路是将区域划分为若干个基本评价单元(或网格化的方法), 然后在分析侵蚀量与各水土流失因子关系的基础上, 分单元进行评价。为了便于研究流域产沙, 几乎所有的模拟结构都假设研究范围内下垫面条件相对均匀, 这在小流域内不会有大的误差, 但在一个大流域, 出入较大。为了减小大流域各种因素空间变化带来的误差, 可以采用分单元模拟的方法, 使得划分后的每个单元的各种因素和坡面坡度、土壤质地、植被、沟壑密度、沟道比降、水利工程措施和气候等相对均匀, 从而可以把小流域的产沙计算公式应用于所划分的每个单元中, 单元结果之和即为大流域产沙^[10], 当然系统规律并不是单元间的简单累加或外延, 因为随着尺度的变化, 各个因子相应有很大的差异。

最初周佩华在 80 年代较早地应用区域宏观分区的方法, 对中国的水土流失问题进行了趋势预测研究, 建立了各子区的水土流失预测模型(周佩华, 1988); 杨艳生等根据 USLE 的评价思想, 通过将 USLE 中的坡面指标引申为区域指标, 对长江三峡地区的水土流失进行了宏观的研究, 建立了该区的水土流失预测方程^[11]。包为民^[10]提出大流域水沙耦合模拟物理概念模型, 分产流、汇流、产沙和汇沙四部分。模型检验选用皇甫川河口—龙门间两流域均在黄河中游的黄土高原第一副区, 模拟的结果较好。胡良军(2001)将黄土高原其中的 40 万 km², 划分为 3 380 个水土流失的评价单元, 各单元的面积大致为 80~150 km², 选取气候—汛期降雨量, 土壤—大于 0.25 mm 风干土水稳性团粒含量, 地形—沟壑密度, 植被—植被盖度, 人为影响—坡耕地面积比因子, 建立了黄土高原地区侵蚀产沙的区域性预测模型。史培军等把皇甫川流域(流域面积 3 240 km²)全流域划分为 510 个更小的流域, 并定义此为单元小流域, 最小面积 0.75 km², 最大为 7 536 km², 平均为 6 636 km²。据此, 依据各单元小流域的水系特征, 建立了单元小流域面积、各级流域级别与沟道条数与平均长度之间的关系, 并利用大量野外观测资料, 得出以流域为单元的土壤流失量预报模型, 其预报精度可达到 70%。

Brazier 等将 wepp 的 MIR 版(MIRSED)应用于区域尺度坡地侵蚀上^[12]。把坡地划分成单元格, 在 1 km² 单元格上分析地形、土壤、土地利用和气候因子的作用。MIRSED 矩阵分析多尺度的空间参数, 其结果可以通过子集查询。在 Great Ouse catchment, Cambridgeshire 两地应用, 这两个地区是陡坡地, 土壤抗蚀性差并且土地利用不合理, 土壤流失严重。得到的结果与在不同尺度下观测到的结果能较好吻合。S. M. de Jong 等^[20]应用 SEMMED 模型来估算法国的 Simeto 流域(面积 4 200 km²)年均侵蚀产沙情况。

2 研究区域概况

羊道沟小流域是王家沟上游左侧一条支沟, 完全未经治理。地形、地貌与土地利用均保持着自然的状态。据 1956~1970 年的资料平均, 年侵蚀模数为 20 811.0 t/km²。年平均

浑水径流深 36.7 mm。流域面积 0.206 km², 流域平均坡度 31°; 主沟长 753.5 m, 平均比降 12.7%, 沟道下游较平坦, 比降 2.3%, 中上游窄狭坡陡, 比降 28.5%, 是侵蚀最为严重的地带, 在流域侵蚀类型中, 坡面侵蚀以细沟和浅沟侵蚀为主; 在黄土质沟坡以冲沟、陷穴、滑塌、崩塌为主, 红土沟坡除水力冲蚀外, 尚有风化泻溜侵蚀。

3 研究的意义及研究工作的基础

黄土高原是我国土壤侵蚀最强烈的地区, 量化地研究侵蚀产沙规律, 在黄土丘陵沟壑区建立侵蚀产沙模型, 并在其他区域进行修正应用研究, 对于预报小流域侵蚀产沙, 制定流域水土保持规划, 评价水土保持效益, 计算水库、淤泥坝的淤积率有着重要的作用。自 1985 年起, 加拿大多伦多大学、中科院地理所、山西省水利厅、华中农业大学等单位在山西离石开展了合作研究, 执行“中国北方土壤侵蚀管理地理信息系统(SEMGIS)”项目, 目前已取得大量研究成果。蔡强国(1996)在晋西羊道沟小流域建立了“黄土丘陵区典型小流域侵蚀产沙过程模型”, 根据黄土丘陵沟壑区侵蚀产沙的垂直分带性, 采用坡面、沟坡和沟道的模型结构, 从小流域侵蚀产沙过程进行建模, 从理论上定量描述了坡面侵蚀产沙过程, 模型在理论上分析了黄土丘陵区的侵蚀产沙规律, 在细沟侵蚀、表土结表的抗蚀性研究、重力侵蚀等方面深化了黄土高原的侵蚀过程研究, 在理论上具有重要意义^[13], 但是此模型参数较多, 特别是在坡面模型中, 较多的参数限制了其较好的推广应用。唐政洪^[14]等对黄土丘陵沟壑区侵蚀产沙过程模型进一步简化, 建立了简明、实用、易于推广的小流域侵蚀产沙模型。模型采用原有的建模结构, 即分别建立坡面、沟坡和沟道子模型, 主要是对过程模型中的坡面子模型进行简化, 从侵蚀产沙因子的角度建立简化的坡面子模型, 并且在地理信息系统(GIS)的支持下建立了基于地块、次降雨、水沙运移的小流域侵蚀产沙模型。此模型在晋西汾河上游及其他区域进行推广应用, 取得了较好的模拟效果。以上所述两个模型所对应的尺度范围主要是在小尺度上, 所适应的流域面积较小。

黄土丘陵沟壑区, 由于相近的地质背景和古地貌环境, 相似的地表组成物质, 以及差异不大的气候与植被特征, 必然孕育了大致相近的侵蚀现象与过程。通过对黄土丘陵沟壑区不同小流域地貌河坡沟形态的定性定量对比分析, 可揭示其相似与差异的状况, 为模型实验的原形分类提供参考依据^[15]。黄土丘陵沟壑区沟道流域的侵蚀地貌形态是以古代沟与的沟缘线分界, 把流域系统划分为两个区域, 既沟间地(坡面)和沟谷地(沟道), 经研究表明, 坡面和沟道汇水面积与流域地表的切割程度、沟谷密度具有密切关系。坡面与沟道在流域暴雨汇流和产沙过程中是不可分割的整体。坡面土壤侵蚀主要是以水蚀为主, 且具有明显的垂直分带性, 从梁峁坡顶部到沟缘线分为溅蚀片蚀带、细沟侵蚀带、浅沟侵蚀带^[16, 17], 不同侵蚀带不但侵蚀产沙量相异, 而且其侵蚀产沙不同的侵蚀带具有各自的侵蚀产沙特点, 并且彼此相互影响。由于坡面和沟道与沟道流域坡、沟地貌演化机制和侵蚀

产沙具有密切的关系,且沟缘线在黄土丘陵沟壑区非常直观,在 DEM 上直接提取或在航片数字化简单易行,且精确度高,所以基于坡面和沟坡两大地貌类型,以坡面来水来沙预测小流域次降雨侵蚀产沙量是可行的,并且可以通过黄土丘陵沟壑区地貌形态的相似性预测较大流域的侵蚀产沙。

4 羊道沟流域侵蚀产沙概念模型模型

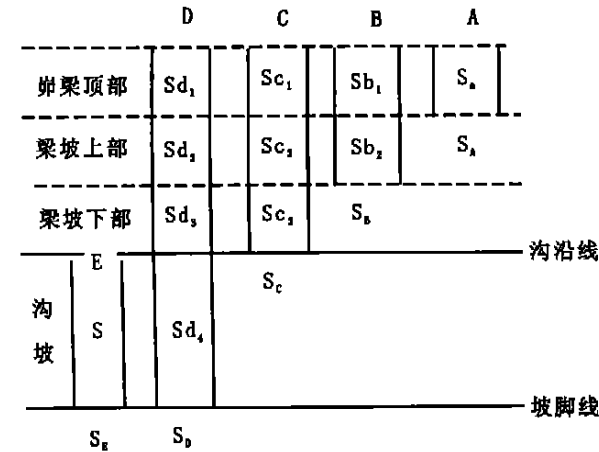


图 1 综合测区布设示意

习惯上我们将沟沿线以上的部分峁梁顶部、梁坡上部和梁坡下部合称为坡面,沟沿线只坡脚线称为沟坡为研究小流域水沙来源和水沙平衡,根据小流域的侵蚀产沙的分带性,所设综合径流场包括五个测区(图 1)。A 区为峁顶区(包括一种地类),B 区为半山坡区(包括两种地类),C 区为全山坡区(包括三种地类),D 区为全沟坡区(包括四种地类),E 区为半沟坡区(包括一种地类)。基于此地貌特征及其水沙在这三个地貌部位的连续性和很好的相关性,所建立的模型可以分为坡面侵蚀子模型、沟坡侵蚀子模型和沟道子模型三个在空间上连续模型。

4.1 坡面侵蚀模型

$$Q_C = f_1(P\eta\tau\mu\zeta) \quad S_C = f(Q_C)$$

公式中: Q_C ——坡面清水径流深; S_C ——坡面土壤侵蚀模数; P ——降雨因子; η ——植被覆盖度修正系数; τ ——耕作措施修正系数; μ ——地形因子; ζ ——土壤因子。

4.2 沟坡侵蚀产沙模型

$$Q_E = f_2(P\eta\tau\mu\zeta) \quad S_E = f(Q_E)$$

式中: Q_E ——坡面清水径流深; S_E ——坡面土壤侵蚀模数。

4.3 流域径流和侵蚀模数

坡面和沟坡是单元小流域的主要泥沙来源,坡面与沟坡分别清水径流深和土壤侵蚀模数分别占不同的比例。由于沟道在一定的时期内,在流域下垫面变化不大的情况下,流域

参考文献:

[1] 杨勤科,李锐.中国水土流失和水土保持定量研究进展[J].水土保持通报,1998,12(5):13-18.
[2] 江忠善,王志强,刘志.黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(1):1-10.
[3] Y Zhang, J Yuan, B Liu. Advance in researches on vegetation cover and management factor in the soil erosion prediction model[J].应用生态学报,2002,13(8):1033-1036.
[4] 胡良军,李锐,杨勤科,等.基于GIS的区域水土流失评价模型[J].应用基础与工程科学学报,2000,8(1):1-8.
[5] L T Trana, M A Ridgleyb, L Ducksteinc, et al. Application of fuzzy logic-based modeling to improve the performance of

侵蚀产沙只与降雨因子有关。综合考虑到坡面和沟坡面积因子,流域径流 Q 和流域土壤侵蚀模数 S 可以表示为公式(7)(8):

$$Q = \alpha_C Q_C + \alpha_E Q_E \quad S = \alpha_C S_C + \alpha_E S_E$$

式中: α_C ——坡面面积比例系数; α_E ——沟坡面积比例系数。

4.4 沟道泥沙输移

对于小流域而言,侵蚀产沙过程主要发生在坡面的沟坡部分。通过羊道沟不同地类径流泥沙比例数据可以看出在 1963~1968 年间较大的 22 次降雨中(不包括大型滑坡和滑塌情况),仅有 1963 年 7 月 6 日的降雨沟道发生侵蚀,1963 年 5 月 23 日和 1964 年 9 月 6 日发生泥沙沉积,从而可以看出沟道主要是泥沙输移的通道。由于影响泥沙输移的因素错综复杂,加之晋西黄土沟壑区次降雨、年降雨变异大的特点,要确定某一特定流域的次降雨泥沙输移规律相当困难;目前主要采用泥沙输移比可以用以表示坡面和沟坡侵蚀到沟底的泥沙输移到沟口的能力。我们主要采用泥沙输移比与汇流网络相结合的方法,推算出每次侵蚀性降雨后输移到沟口的泥沙量。蔡强国^[18]等将泥沙输移比(SDR)定义为:在羊道沟出口测到的产沙量(Y)与流域内坡面、沟坡、沟头等总的侵蚀量之和(S)的比值即:

$$SDR = Y / S$$

5 小 结

由于坡面、沟坡、沟道三个地貌部位在流域侵蚀产沙中规律性强,涉及参数少,因此易于模拟和推广。模型将小流域划分三个部分,考虑的基本单元是坡面、沟坡和沟道,这三个地貌部位在黄土丘陵沟壑区易于提取,并且其地形因子如:小流域、坡面沟坡和沟道各自的面积、平均坡度,流域的沟壑密度,纵比降等可以在 DEM 上用 Arcview 中的水文分析模块获得。通过研究其上一级流域王家沟各支沟的地貌特征,结合黄土丘陵沟壑区地貌相似性特征分析和植被、耕作因子、土壤类型有规律的分带性特征分析,可以将羊道沟建立的侵蚀产沙模型应用到较大尺度流域中去,并且可以进一步分析较大尺度流域侵蚀产沙的空间分布特征和泥沙输移比的变化特征。

流域侵蚀产沙在空间尺度上变异的影响因子很多,并且其交互作用明显,如何完成现有小流域侵蚀产沙模型向较大尺度流域侵蚀产沙模型的转变是一个迫切解决的问题。本文试图总结不同空间尺度流域侵蚀产沙研究的基础上,将羊道沟侵蚀产沙规律进一步提高,从而建立其上级流域即王家沟流域侵蚀产沙模型。

the Revised Universal Soil Loss Equation [J] · R. Sutherlandb, Catena , 2002, 47: 203– 226.

[6] 刘高焕, 刘俊卫, 朱会义. 基于 GIS 的小流域地块单元划分与汇流网络计算[J]. 地理科学进展, 2001, 21(2): 139– 145.

[7] 金争平, 赵焕勋, 和泰, 等. 皇甫川小流域土壤侵蚀量预报方程研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(1) : 8– 18.

[8] Baffaut, C, Nearing, M A, Govers G. Statistical distributions of soil loss from runoff plots and WEPP model simulations [J]. Soil Sci Soc Am J, 1998, 62: 756– 763.

[9] Baffaut, C, Nearing, M A, Govers G. Statistical distributions of soil loss from runoff plots and WEPP model simulations [J]. Soil Sci Soc Am J, 1998, 62: 756– 763.

[10] 包为民, 陈耀艇. 流域水耦合模拟物理概念模型[J]. 水科学进展, 1994, 5(4) : 287– 192.

[11] 杨艳生. 区域性土壤流失预测方程的初步研究[J]. 土壤学报, 1990, 27(1) : 73– 78.

[12] R E Braziera, J S Rowan, S G. Anthony “MIRSED ” towards an MIR approach to modeling hillslope soil erosion at the national scale[J]. Catena, 2001, 42(1) : 59– 79.

[13] 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.

[14] 唐政洪, 蔡强国, 张光远, 等. 黄土丘陵沟壑区小流域侵蚀产沙的地貌分带研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4) : 34– 37.

[15] 雷阿林, 唐克丽. 土壤侵蚀模型实验的原形选定问题[J]. 水土保持学报, 1995, 9(3) : 60– 65.

[16] 承继成. 坡地流水作用的分带性[A]. 中国地理学会 1963 年年会论文集[C]. 北京: 科学出版社, 1965. 99– 104.

[17] 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.

[18] 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. 3– 225.

(上接第 12 页)

叶面的蒸腾作用, 消耗的水分大于降雨量, 植物靠根系吸收土壤水分补充, 形成了 1~ 8 m 的土壤干层. 由于土壤干层的存在, 隔断了大气降水与地下水的循环通道, 不能形成地表水补给地下水的运移机制, 因而也就无地下水补充地表径流的过程。

由上述可见, 黄土高原林草面积的增加只有利于拦蓄径流, 而无增雨作用或通过入渗量增加地下水补给的功能. 林草面积增加以后地表水资源总的趋势是减少. 根据多方面的对比观测, 林草地拦蓄径流量都在 40% 以上, 考虑到黄土高原的陡坡地多, 超渗产流多, 保守的估计拦蓄径流量平均为 10%, 即每公顷拦蓄径流 75 m³; 林草面积总共是 197. 67 万 hm², 年总减少径流量 22. 23 亿 m³。

2.2 水平梯田和坝地对水资源的影响

大量的观测资料证明水平梯田拦蓄的径流量都在 90% 以上, 考虑到部分梯田的质量不高, 或者某些地区的降雨强度太大等原因, 拦蓄径流量不大可能都在 90% 以上, 但保守估算梯田拦蓄径流量至少有 50%, 即每公顷拦蓄径流量 300 m³; 到 2050 年完成全部治理任务时, 基本农田总量是 1 125 万 hm²; 也就是说每年拦蓄径流总量是 37. 4 亿 m³。此外还有 20 万 hm² 的坝地, 也以每公顷拦蓄 300 m³ 计算, 总共拦蓄 6 000 万 m³, 两项合计就是 38. 0 亿 m³。

2.3 治理流域减水量的分析

为了进一步论述各项水土保持的减水作用和上述减水量估算的可靠性, 下面用流域综合治理减水效益作进一步的论证(表 1)。由表 1 可见黄土高原各地区小流域综合治理的减水效益是非常明显, 所有流域减少径流量都在 60% 以上。

参考文献:

[1] 李玉山. 黄土高原治理开发与黄河断流的关系[J]. 水土保持通报, 1997, 17(6) : 41– 45.

[2] 黄河中游治理局. 黄河水土保持志[M]. 郑州: 河南人民出版社, 1993.

[3] 景可, 等. 黄土高原水土保持对未来地表水资源影响研究[J]. 中国水土保持, 2002, (1) : 12– 14.

因而有理由认为前面林草措施和基本农田的减水估算量中, 即林草措施拦蓄径流量 10%, 梯田拦蓄径流量 50% 是留有余地的保守数。

综上所述, 到 2050 年黄土高原完成了各项水土保持治理任务完成后, 不仅完全控制了水土流失, 也使天然降水的利用率提高, 提高了作物单位面积产量. 在流域环境 and 经济效益都获双赢的同时, 给下游水沙带来了各自不同的变化: 减少入黄泥沙 7~ 8 亿 t/a 的同时, 也减少入黄径流量, 保守估算每年至少要减少径流量 60 亿 m³ 以上(表 2)。

表 1 不同治理流域减水状况^[3]

流域名称	减水概况
绥德韭园沟	1979~ 1990 年 12 年内洪水泥沙都未出沟
延安上砭沟	试验观测期的减水效益达到 62. 3%
青海湟中阿滩	80 年代与 50 年代相比流量减少 70%
定西官兴岔	减少径流量 61. 4%
宁夏海原关庄沟	1982~ 1987 年洪水泥沙不出沟
南小河沟	80 年代比 50 年代减少 67. 6%
陕县火烧阳沟	1987~ 1982 年对比观测减少地表径流 73. 5%
西吉黄家二岔	1983~ 1990 年径流量平均减少 83. 9%
山西河曲砖窑沟	1987~ 1989 年平均消减洪峰流量 52%

表 2 黄河流域各项治理任务完成后的减水量^[2]

措 施	数 量	单位减水量		说 明
		/(m ³ · hm ^{- 2})		
基本农田	1245 万 hm ²	300	37.4 亿 m ³	以最低效益计算
林 草	2965 万 hm ²	75	22.2 亿 m ³	以最低效益计算
骨干工程	2 万座淤地坝 20 万 hm ²	300	6000 万 m ³	以最低效益计算
合 计	-	-	60.20 亿 m ³	-