

黄土高原土壤侵蚀模型及其应用

吴礼福

(水利部水利信息中心·北京市·100053)

摘要 该文综合考虑了气候、水文、地貌、土壤、植被及土地利用等因素,以DTM上的最小沟谷单元为侵蚀的基本单元,并把坡面侵蚀和沟谷侵蚀分别处理,提出了一种新的定量模型来计算黄土高原地区的土壤侵蚀。然后以陕西省府谷县为例,利用地理信息系统技术,对该模型参数的获取进行了探讨和验证。

关键词 土壤侵蚀 定量模型 地理信息系统

Soil Erosion model and Its Application in Loess Plateau

Wu Lifu

(Water Information Center, Ministry of Water Resources, 100053, Beijing Municipality)

Abstract Considering the factors of climate, hydrology, landforms, soil, vegetation and land utilization synthetically, handing the erosion of slope surface and ravine separately, a new quantitative model is put out to calculate soil erosion in loess plateau by taking the minimum gully unit of DEM as the basic unit of soil erosion. Then taking the practice at Fugu county, Shaanxi province for example, the acquisition of model parameters is studied and tested with geographic information system (GIS) technology.

Keywords soil erosion; quantitative model; GIS

土壤侵蚀是一个世界性的普遍问题,中国黄土高原尤其严重。土壤侵蚀研究中的一个根本性问题是定量研究,也就是能对某一地区的侵蚀量(如年侵蚀量,一场降雨引起的侵蚀量,汛期侵蚀量等)的评估与预测。本文首先建立定量模型,然后以地理信息系统技术对黄土高原土壤侵蚀定量问题进行探讨,最后对陕西府谷县进行计算并与实际情况对照,效果良好。

1 国内外研究概况

土壤侵蚀定量研究美苏进行的比较早,早在土壤侵蚀通用方程 USLE 提出前即有 Zingg A. W.(1940年),Musgrave G. W. (1947年),Smith D. D 和 Whitt D. W. (1947年)等都提出了各自的适用于不同地区的定量模型,如 Musgrave G. W. 1947年提出如下模型^[1]:

$$E = (0.00527) * I * R * S * L * P_{30}$$

式中: E —— 土壤流失量(mm/a); I —— 在坡长22m,坡度10%的坡面上,内在的土壤可蚀

性(mm/a); R ——植被覆盖因子; S ——坡度的百分数表示; L ——坡长(m); P_{30} ——最大30min降雨量(mm)。

但这些都是局部性研究的经验模型,对某一特定地区比较有效,很难移到其它地方。USLE的提出标志定量模型进入新的阶段,它把侵蚀影响因子系统地分为降雨侵蚀因子、土壤可蚀性因子、坡长因子和坡度因子、作物管理因子和防治措施因子,且统一侵蚀模型,分区求出参数模型。基于各侵蚀子区的研究结果进行随机统计来解决不同地区的侵蚀问题。

USLE提出以后人们对不同地区做了各种试验性研究,并提出了许多修正式,如美国农业部建立的土壤侵蚀与土壤生产力关系计算模式^[2](Erosion-Productivity Impact Calculators,简称EPIC模式)中,水力侵蚀模型采用的即是 Onstand 和 Foster(1975年)所提出的 USLE 修正式:

$$Y = (0.0646EI + 0.45(Q)(qp)^{0.333})(K)(CE)(PE)(LS)$$

式中: Y ——为产沙量(t/hm^2); EI ——降雨能量因子,以 m 制为单位; qp ——最大径流速率(mm/h); k ——土壤可蚀性因子; CE ——作物管理因子; PE ——控制侵蚀的措施因子; LS ——坡长和坡度因子; Q ——径流量(mm)。

可以看出,此式与 USLE 相比在能量因子上除降雨外增加了一个径流因子。

80年代初,美国水力侵蚀预报工程 WEPP(Water Erosion Prediction Project)突破 USLE 的基本思想,从侵蚀过程的模拟这一概念出发提出了下列坡面侵蚀成因模型:

细沟间侵蚀:

$$D_i = K_i I$$

式中: D_i ——由雨滴引起的土壤剥离和输移; K_i ——土壤可蚀性; I ——降雨强度。

细沟侵蚀:

$$D_r = K(T - T_c)$$

式中: D_r ——细沟侵蚀; T ——水力剪力; T_c ——临界剪力。

国内定量模型研究80年代以后有了很大进展,北大遥感所马蔼乃教授提出了黄土高原小流域土壤侵蚀无量纲统计模型^[4]

$$\frac{E}{\rho d} = a_0 \left[\frac{c \rho V l^2}{r d} \right]^{a_1} \left[\frac{h}{d} \right]^{a_2} \left[\frac{L}{d} \right]^{a_3} * m^{a_4} * V^{a_5} \left[\frac{HI}{\sin(\alpha) F} \right]^{a_6}$$

式中: E ——多年平均侵蚀强度; P ——水的密度; d ——颗粒粒径; C ——粉沙粒%+沙粒%+粘粒%; $V = (ghj) * 0.5$; $r = g(\rho_s - \rho)$; ρ_s ——沙的密度; h ——径流深; L ——坡长; m ——径流系数; $m = h/R$ (R 为降雨深); V ——植被覆盖率; H ——沟谷切割深度; α ——沟坡坡度; I ——沟道长度; F ——小流域面积; $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ ——系数。

2 建模

土壤侵蚀是发生在地表的一个相当复杂的过程,伴随着的是能量和物质的转移。如果从系统论的观点看,它实际上是系统内各因子相互作用、相互影响导致系统总功能(侵蚀)的体现。因此,要做侵蚀定量模型,首先必须找到一个最基本的闭合的系统边界,这实际上是一个模型基于什么样的单元设计的问题。从地理景观学的角度出发,地面是由许多相对比较统一的景观单元组成的,马蔼乃教授基于这一思想为适应 GIS 而提出了地学编码思想^[3],不同的地学因子,根据其内部机制都有其相对比较统一、独立的单元,即最小图斑。存在三个层次的最小图斑:(1)简单因子的最小图斑,如降雨,地表降雨相对比较均匀的一个小区,即是降雨的最小单

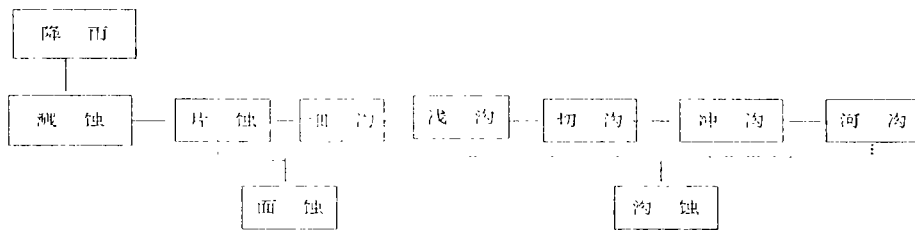
元。(2)复杂因子的最小图斑,如土壤侵蚀,具有独立边界的均匀侵蚀的最小单元。(3)综合最小图斑,即最小景观单元,不同简单因子最小图斑的地学组合形成复杂因子的最小图斑,各复杂因子最小图斑的地学组合即形成综合最小图斑。

从遥感图像上根据各种监督分类可以得出景观层次的最小图斑,根据其不同分类原则也可以得出一些简单因子的最小图斑,对于象土壤侵蚀这类综合因子的最小图斑,很难从遥感图像上得出,故本文拟从DTM上得出。

对土壤侵蚀的最小封闭单元应该是最小的封闭沟谷系统,两个边坡,一条沟谷,四周具有封闭的峭线,故先从DTM上提取所能分辨的最小沟谷单元,并把它作为土壤侵蚀的最小单元,以此单元为单位来计算土壤侵蚀量,本文的模型构造即是基于DTM所能分辨的最小沟谷单元的。

找出系统边界后,我们就可以来具体分析系统内部各因子的相互作用过程了。

黄土高原的水力侵蚀过程可用示意图描述:(见下图)降雨以后,首先雨滴对地面击打产生溅蚀,据陈永宗^[4],黄土地区雨强达 $0.2\text{mm}/\text{min}$,即发生溅蚀;当降雨强度超过渗透率,即对地面进行径流冲刷,雨强达到 $0.2\text{mm}/\text{min}$,持续 5min 以上即发生径流冲刷,产生的径流在坡面上成片状,对坡面进行片蚀,当片流相对比较集中成水流作线状冲刷时,形成宽V形,深约 $0.5\sim 1.0\text{m}$ 无明显沟边的细沟(也叫线沟),即细沟侵蚀。片蚀和细沟侵蚀都称为面蚀。当径流继续产生,坡面细沟随着水流的汇集和流水深切作用不断加强时便形成切沟侵蚀。当切沟在水流更加集中的作用下,下切加强,沟壁扩展,长度延伸的过程即是冲沟侵蚀。当水流沿各冲沟汇集到古代沟谷(黄土堆积在古代沟谷形成的浅洼地)进行切割,且两岸谷坡在重力作用下崩塌、滑坡,伴随泥沙的输移,即为河沟侵蚀,河沟往往是现代河流的一级支沟。在冲沟、河沟侵蚀中,由于黄土的垂直节理及湿陷性,往往在重力作用下形成崩落、滑坡等重力侵蚀。



从上述过程分析看出,总侵蚀可分为溅蚀、面蚀、沟蚀和重力侵蚀,如果把溅蚀也认为是一种面蚀,那么就可以把侵蚀分为面蚀和沟蚀及重力侵蚀三种形态了。这三种形态的机制以及对总侵蚀的贡献都有很大区别,据陆中臣^[5],沟壑区沟道产沙占总产沙量的 86% ,故建模时应该分开考虑。

2.1 面蚀

对面蚀分别从气候、水文、地形、植被、土地利用、土壤和水保措施等方面去考虑。

2.1.1 气候因素 影响最大的是雨强,雨强大,溅蚀明显加大,超渗产流越大。片蚀,细沟侵蚀极剧增加。据周佩华等^[6], 30min 雨量超过 8.25mm 为暴雨标准,并与其它各种标准作了比较,效果较好。本文即采用周佩华的暴雨标准,用多年平均 30min 最大降雨量与 30min 暴雨标准的比值来作为反映气候因子的指标。对各个不同地区,如果有当地暴雨标准,不筛选用当

地的暴雨标准。

2.1.2 水文因素 降雨到达地面后,由于下垫面的复杂多样,形成不同大小的径流,而径流是冲刷地表的直接动力因子。坡面径流深直接影响片蚀和细沟侵蚀,尤其是细沟侵蚀,故用坡面径流深作为水文因子。

2.1.3 地形 在地形因素中,反映土壤坡面侵蚀的坡长和坡度是两个主要因子。

(1)坡长。坡长增加,坡面来水面积增大,向坡下方流动的径流量、流速、水力半径也随着增大,侵蚀量也随之增大。王贵平等^[7]的研究也对此作了证实。

(2)地面坡度是决定径流冲刷能力的基本因素之一,径流所具有的能量是径流的质量和流速的函数,而流速的大小主要决定于径流深度和地面坡度。

坡度与侵蚀量的关系,国内很多人在黄土高原作过试验。都肯定在一定范围内,坡度越大,流失量也越大,但存在一临界坡度,在临界坡度以外,侵蚀量随坡度增加而减小,陈永宗^[8]认为,26°~28°为临界坡度,曹银真^[9]认为26°时坡面冲刷达到最大值,将其转化为正弦函数,应该用 $\sin(2\alpha)$,故用 $\sin(2\alpha)$ 作为坡度指标。

当然,坡面形态也有影响,国内对此也有人作过实验,如曹银真、王贵平等,但由于目前很难方便地提出坡面形态因子,故此,只用坡长和坡度2倍的正弦来代表地形因素。模型经多元统计回归分析以后,坡面形态的影响实质上也溶进了其中。

2.1.4 植被 植被具有拦截雨滴,调节地面径流,改良土壤结构(增加腐殖质),根系对土壤的固结等作用,是延缓或阻止土壤侵蚀的重要因素。植被覆盖度是植被因素的表征因子。这里只选取林草地的植被覆盖度,庄稼地另作考虑。据研究,侵蚀量与植被覆盖度 P 有负指数关系,故用 $e(-p)$ 作为植被指标。

2.1.5 土地利用 对土地利用因素来说,与侵蚀量相关性最大的莫过于坡耕地面积的多少,据府谷县试验,把13.3hm²坡耕地改为梯田后,拦沙效益提高95%,故用坡耕地面积 S_0 占研究区域的面积 S 的比例作为反映土地利用的因子。

$$F_S = \begin{cases} \frac{S_0}{S} & S_0 \neq 0 \\ 1 & S_0 = 0 \end{cases}$$

2.1.6 土壤 土壤是侵蚀的直接对象,在其它条件相同的情况下,不同类型的土壤侵蚀强度相差甚大。它对侵蚀的影响主要决定于其透水性、抗蚀性、抗冲性。

(1)透水。其它条件相同时,径流量的大小主要取决于土壤的透水性,它们具有正比关系,但由于已考虑了径流量因子,故此不再考虑土壤透水性了。

(2)抗蚀性、抗冲性。抗蚀性是指土壤抵抗雨点击打而分散以及抵抗径流悬浮的能力。抗冲性是土壤对抗流水和风等侵蚀营力的机械破坏作用的能力。对黄土高原,刘东生等将北部黄土称为沙黄土,沙黄土的抗蚀性、抗冲性小于黄土,而黄土又小于粘黄土。故用土壤粒径作为反映土壤的因子。

2.1.7 水保措施 水保措施无外乎治坡、治沟等工程措施,增加林草面积的生物措施,改坡耕地为梯田的耕作措施,这些实际上都可以通过以上的各因子得到反映。如治坡、治沟由坡度、坡长得到反映,种林草由植被覆盖度得到了反映,耕作措施也由坡耕地面积得到了反映,故此不必单独再用水保措施因子。

由以上分析,坡面侵蚀可用下列因子来反映:

R_{30}/R 暴雨(多年平均最大30min 降雨量与当地标准暴雨30min 雨量之比);坡面径流量 H_s ;坡度 α ;坡长 L_s ;林草地的植被覆盖度 P ;粒径 d ;坡耕地因素 F_s 。

$$E_s = a_0 * H_s^{a_1} * (R_{30}/R \text{ 暴雨})^{a_2} * (L_s/d)^{a_3} * \exp(-a_4 P * (\sin(2\alpha))^{a_5}) * F_s$$

2.2 沟谷侵蚀

沟谷侵蚀主要影响因素是水文因素、地貌因素、沟谷条件和水保措施。

至关重要的水文因素是沟谷中的径流深,为沟谷中泥沙冲刷、搬运的动力,故用沟谷径流深 H_v 作为因子。地形因素中,据陆中臣^[6]。

$$\text{丘陵沟壑区: } W_s = 3334.27 * D_s^{0.09452 * a}, \text{ 其中 } a = (D_s/3)^{0.03}$$

$$\text{高原沟壑区: } W_s = 59.32 * D_s^{1.929 * a}, \text{ 其中 } a = (2/D_s)^{0.1}$$

D_s ——沟谷密度; W_s ——侵蚀模数。

可见沟谷密度影响很大,故用沟谷密度作地形因子。沟谷条件主要包括沟长和沟谷形态。

沟谷形态影响很大,V型谷与U型谷的重力侵蚀完全不一样,U型谷的崩塌、滑坡比V型谷严重得多,但直接用沟谷形态作因子十分不便,难以信息系统技术提取,故用与其有密切关系的沟谷长度来代表。在沟谷发育的过程中,沟长很小时,往往是沟谷的幼年期,主要呈V型,沟长增大的过程也是由V型渐近到U型的过程。

故用沟谷长度 L_v 作为沟谷因子。至于水保措施同样也已反映在上述因子中,故此列出沟谷侵蚀的方程:

$$E_v = b_0 * H_v^{b_1} * (L_v * D_s)^{b_2}$$

式中: E_v ——沟谷侵蚀模数; H_v ——沟谷径流深; L_v ——沟谷长度; D_s ——沟谷密度; b_0, b_1, b_2 ——待定系数。

3 模型率定

据上文所述,模型如下:

$$E = E_s + E_v = a_0 + H_s^{a_1} * (R_{30}/R \text{ 暴雨})^{a_2} * (L_s/d)^{a_3} * e^{-a_4 P} * F_s * (\sin(2\alpha))^{a_5} + b_0 * H_v^{b_1} * (L_v * D_s)^{b_2} + e$$

式中: e ——误差; $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, b_0, b_1, b_2$ 等9个参数需要回归来确定。

如果分别有坡面侵蚀和沟谷侵蚀量的观测数据,则可以分别进行多元线性回归(取对数后),对于不同时具有坡面侵蚀和沟谷侵蚀资料,只有进行非线性回归了。

对 $y = f(x) + e$ 非线性回归的常用方法是基于 $\sum (y_i - f(X_i))$ 最小而进行迭代,基于非线性回归总是近似线性回归的思想,用一种简化的迭代方法。

本文选取黄土高原北部的府谷县中部和黄河沿岸的水力侵蚀区作试验,率定模型如下。

$$E_s = 21.0 * H_s^{1.25} * (R_{30}/R \text{ 暴雨})^{0.42} * (L_s/d)^{0.31} * e^{-0.02P} * (\sin(2\alpha))^{0.51}$$

$$E_v = 34.46 * H_v^{1.28} * (L_v * D_s)^{0.43}$$

4 侵蚀图的求出

首先求出各因子的格网数据即形成格网数据面。

4.1 R_{30} 数据面

根据已有的全县30min 最大降雨统计值的8个雨量站的多年平均资料,用趋势面分析的办

法求出全县的 R_{30} 栅格数据图,然后切除北部风沙区,除以暴雨标准的30min 降雨量8.25mm,即得到 R_{30} 暴雨数据面。

4.2 H_r 数据面

将府谷县已有12个雨量站的多年平均降雨量进行趋势面分析,即得多年平均降雨量数据面。然后根据已有3个水文站的多年平均径流量与相应流域的多年平均降雨量相比,即得到该流域的多年平均产流系数,最后将已有多年平均降雨量乘以相应产流系数即得多年平均坡面径流数据面。

4.3 坡度数据面

基于已有的 DEM 数据求出各格网的坡度即得坡度数据面。

4.4 沟谷密度数据面

在 DEM 上根据一定算法提取所有的沟谷线,然后以基本单元为单位对其长度进行统计,密度为长度总和与单元面积之比。

4.5 沟谷径流 H_v

每一最小图斑内的沟谷径流深,可用下式计算:

$$H_{v_i} = (S_i/S) * H_v$$

式中: H_{v_i} ——第 i 个最小图斑的沟谷径流; S_i —— i 个最小图斑面积; H_v —— i 所在流域控制站的多年平均径流深; S ——控制站的控制面积。

4.6 坡耕地数据面

从土地利用图上抽出农用地专题图,数字化后转成栅格数据,然后与坡度数据进行迭加,即得出坡耕地数据面。

4.7 粒径数据面

由于资料来源不足,且府谷县土壤粒径比较均一,故根据实际情况,把粒径看为常数。

4.8 植被覆盖度

从植被专题图结合野外考察得出植被覆盖度分布图。

4.9 最小计算单元(即最小图斑图)界线数据面的形成

从 DEM 上提取所能分辨的最小封闭流域界线,其基本思想是先提取沟谷脊线,在此基础上进行平滑和连通,平滑的方法是,给一 $N * N$ 模板,如果脊线点或脊线点簇在此模板内是孤立的则删除这些点,然后结合 DEM 图像和坡度影像设计一图形编辑器,人工加以编辑。

形成各因子格网数据面后,将每个数据面与 DEM 进行配准,然后以最小单元图为准,计算每一单元内各因子的平均值,再按已有侵蚀量模型即可算出每一单元的侵蚀量,根据等级划分即可形成一张府谷县侵蚀等级图。

5 结果分析

从土壤侵蚀图的结果可以看出府谷县的土壤侵蚀从西北到东南逐渐加剧,以黄河沿岸最为剧烈,最大量级为 $40\ 000\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,与府谷县实际调查情况相符,说明用此模型对府谷地区是合适的。如果资料更丰富、更详细,可望得出更好的结果。故此,只要对黄土高原的不同地区进行模型率定分别得出其参数,可望得出较好的结果。

以信息系统技术来提取侵蚀各影响因素,尤其从 DEM 上提取沟谷密度,变成栅格数据面,最后在栅格基础上进行计算,得出土壤侵蚀分级图,具有自动化程度高,速度快等优越性。

从 DEM 上提取最小沟谷单元,只要 DEM 数据精度较好也是可行的。

本文是在北京大学遥感所马霭乃老师的指导下完成的。谨此致谢。

参 考 文 献

- 1 [英]M. J. 柯刻比, R P C. 摩根著, 陈琢先等译, 土壤侵蚀, 水利电力出版社
- 2 李忠魁译, 国外评价土壤侵蚀和土壤生产力关系模式. 地理研究, 1989(4)
- 3 马霭乃. 水土保持学中的软科学. 水土保持时代趋势, 黄委会水保处, 1989
- 4 陈永宗. 黄河泥沙来源及侵蚀产沙的时间变化. 中国水土保持, 1988(1)
- 5 陆中臣. 流域侵蚀产沙和物质转移. 地理研究, 1989(2)
- 6 周佩华等. 黄土高原土壤侵蚀暴雨标准. 水土保持通报, 1987(1)
- 7 王贵平等. 细沟发育侵蚀特征初步研究. 中国水土保持, 1988(8)
- 8 陈永宗. 黄土高原沟道流域产沙过程的初步分析. 地理研究, 1983(2)
- 9 曹银真. 黄土地区梁坡的坡地特征与土壤侵蚀. 地理研究, 1983(2)

科技信息

小径深穴造林法

小径深穴造林法适应春季干旱缺雨地区荒山造林,优点是能较好的保持土壤水分,减少地表蒸发,有利于苗木成活与生长。据我们1995年应用于宜君县荒坡油松造林,成活率提高35%,高生长提高9.7%。方法是:植树穴上口口径较一般 $0.4\text{m} \times 0.4\text{m}$ 或 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ 为小,系 $0.3\text{m} \times 0.3\text{m}$,下底径却较一般 $0.25\text{m} \times 0.25\text{m}$ 或 $0.3\text{m} \times 0.3\text{m}$ 为大,系 $0.35\text{m} \times 0.35\text{m}$,深 0.45m ,植树穴呈方口瓶形。待到8月中旬或雨季,结合除草扩穴一次,以利植树穴充分吸收和保持降水。该方法得到中国科学院、水利部水土保持研究所专家邹厚远研究员的赞赏,并正在进行大面积推广。

(宜君县国营太安林场 卿厚明供稿)