

地貌发育阶段的定量研究

励 强 陆中臣

(中国科学院 地理研究所, 北京)
(国家计委)

袁 宝 印

(中国科学院地质研究所, 北京)

提要 文章提出用临界侵蚀积分值作为划分流域发育阶段的定量指标, 是对经典理论的发展, 主要表现在: 1) 将地貌发育阶段纳入开放系统的概念之中; 2) 避免高程积分法在划分发育阶段上的不确定性; 3) 建立地貌发育阶段与流域物质迁移之间的定量关系; 4) 区分自然侵蚀和加速侵蚀。用文中的临界侵蚀方程对黄土高原丘陵沟壑区分析计算, 得到临界侵蚀积分值为 0.30 和 0.70, 即当侵蚀积分值小于 0.30 时, 流域处于侵蚀早期; 当侵蚀积分值大于 0.30, 小于 0.70 时, 流域处于侵蚀中期; 当侵蚀积分值大于 0.70 时, 流域处于侵蚀晚期。对于纯自然侵蚀过程, 与临界侵蚀积分值相对应的年代及侵蚀模数为 7 万年前, $7008\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 和距今 7.2 万年以后, $7008\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 。目前黄土高原丘陵沟壑区加速侵蚀所占比例为 30%。

关键词 侵蚀积分值 临界侵蚀积分值 加速侵蚀

地貌的发育、演化一直是地貌学者研究的课题之一。1899 年台维斯提出地形发育阶段的模式, 即地形是构造、营力和时间的函数, 并把地貌演化序列纳入旋回概念之中, 它的侵蚀旋回理论强调地貌形态的成因和演化, 将地貌发育分为幼年、壮年和老年三个阶段, 为地貌研究奠定理论基础。50 年代, 美国理论地貌学家 Strahler 提出高程积分法, 将台维斯的地形发育阶段模式量化^[1-2]。60 年代以来, 许多地貌学家利用热力学熵的概念研究地貌发育, 并引入开放系统、信息论的思想, 用地貌熵和信息熵把地貌发育量化^[3]。但他们共同的不足之处是没有考虑流域物质迁移过程与地貌发育阶段之间的定量关系以及存在划分阶段上的不确定性, 这导致本文提出侵蚀积分值的概念。

一、侵蚀积分值

侵蚀积分值是流域被侵蚀掉物质占全流域物质的百分比。利用侵蚀积分值研究地貌发育阶段意味着从流域被侵蚀掉物质出发来描述地貌塑造过程。地貌发育是内外营力相互作用和时间的函数, 在时间的尺度里详细地刻画每一时刻的内外营力相互作用对比关系是困难的, 甚至是不可能的, 然而现存地貌形态却真实地记录了以往内外营力相互作用的水平和结果, 在同时发育条件不同的不同流域里, 内外营力相互作用对比关系的不同导

来稿日期: 1988 年 10 月。

致地貌形态不同, 因而现存地貌形态的定量指标集中和唯一地反映以往内外营力相互作用对比关系的总和。

对现存地貌形态定量化有两种途径: 一是从流域残留物质角度; 二是从被侵蚀掉物质角度。由于侵蚀过程塑造地貌形态, 所以从被侵蚀掉物质角度出发对地貌形态定量化能准确地反映地貌发育过程的实质。

侵蚀积分值的求法是, 在流域的等高线图上量出每一条等高线以上的面积(设为 a), 再量出每条等高线与流域最低点的高差(设为 h), 又设全流域面积为 A , 流域最高点与最低点的高差为 H , 设 $X = a/A$, $Y = h/H$, 显然 X, Y 均在 $[0, 1]$ 内取值, 根据一系列 (a_i, h_i) 值, 在 X, Y 坐标系中绘出曲线^[4], 图 1 是黄土高原安寨县四个流域的高程积分曲线。

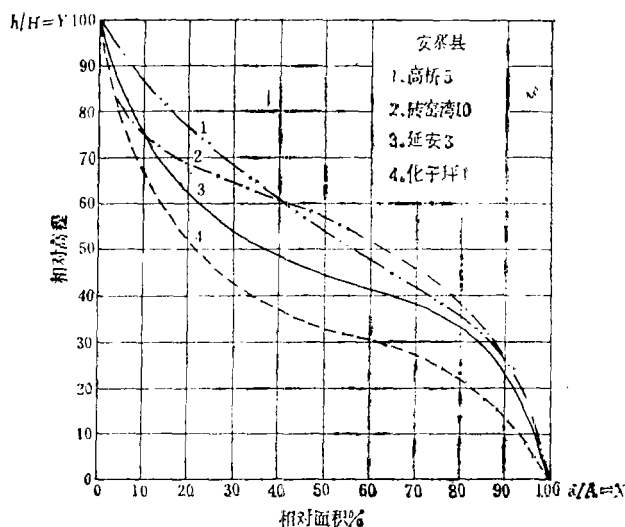


图 1 安寨县高程积分曲线

Fig. 1 The Curve of Area-Altitude In AnZai County

从高程积分曲线求解侵蚀积分值时涉及流域原始地面的问题, 对黄土高原原始地面可分为两种模式: 第一种, 对于黄土高原塬区, 原始地面可以看成平面, 则流域被侵蚀掉物质的体积 (V) 为

$$V = HA - \int_0^H adh \quad (1)$$

同除 HA 后得到侵蚀积分值 (E_i) 为

$$E_i = V/HA = 1 - \int_0^H (a/A)d(h/H) \quad (2)$$

$$E_i = 1 - \int_0^1 XdY \quad (3)$$

第二种对于黄土高原梁峁区, 原始地面是起伏不平的, 如图 2 中的 b 线, 设 c 线是 b 线的平均情况, 则有流域物质体积 (V_0) 等于 AH , 这时(3)式同样适用, 如果 c 线不是 b 线的平均情况, 则设 $\Delta V = V_0 - AH$, 这时流域侵蚀积分值为

$$E_i = 1 - \frac{1}{V_0} \int_0^H adh \tag{4}$$

$$E_i = 1 - AH/V_0 \int_0^H (a/A)d(h/H)$$

$$E_i = 1 - AH/(AH + \Delta V) \int_0^1 XdY \tag{5}$$

从(5)式可以看出,有意识地选择梁峁之间的平面,使得 ΔV 尽量地小,与 AH 值相比可以忽略,则(5)式变换为(3)式^[3]。

根据以上方法,计算黄土高原丘陵沟壑区小流域侵蚀积分值,见表 1。

从表 1 可以看出属于同样地貌类型,在相似受控条件作用下的 14 个大小不同的小流域,侵蚀积分值大致相当,说明处在相同的地貌发育阶段。但是侵蚀积分值有微小变化,这种差别与人类活动引起的加速侵蚀大小有关,同时也受相同级别不同流域面积等因素的影响,这将有待进一步研究。一般地讲,在人类活动频繁的流域,侵蚀积分值偏大,反之亦然。

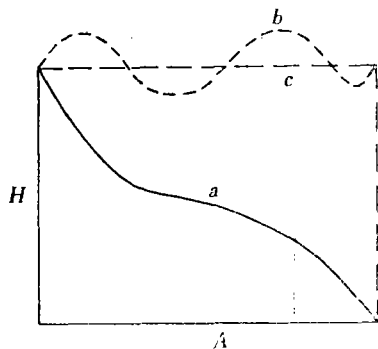


图 2 黄土高原梁峁区原始地形

Fig. 2 Original landforms in the area of Lian and Mao on the Loess Plateau

为了得到不同时期的侵蚀积分值,首先需对典型流域详细勘察,确定不同时期的水文网和所在地貌部位,并在地形图上确定判别标志^[6],然后通过室内判读,将不同时期的水文网落到图上,即可绘制不同时期水系图,再通过计算机处理,获得不同时期的河网密度(d_r),用河网密度和侵蚀模数(W_r)和侵蚀积分值的关系,经过理论分析和数量计算,得到侵蚀积分值的变化过程线。

表 1 小流域侵蚀积分值

Tab. 1 The Integral Value of Erosion In Different Drainage Basins of Rolling Gully Area

| 编 号 | 小流域图幅名称 | 地貌类型 | 侵蚀积分值 | 河网密度 km/km ² | 侵蚀模数 t/km ² ·a |
|-----|----------|-------|-------|----------------------------|------------------------------|
| 1 | 王家湾(1) | 丘陵沟壑区 | 0.511 | 4.30 | 13431.6 |
| 2 | 寺湾(7) | 丘陵沟壑区 | 0.437 | 5.01 | 15653.1 |
| 3 | 延安(2) | 丘陵沟壑区 | 0.488 | 4.51 | 14086.6 |
| 4 | 高桥(2) | 丘陵沟壑区 | 0.478 | 4.49 | 14024.1 |
| 5 | 永宁公社(2) | 丘陵沟壑区 | 0.455 | 4.52 | 14117.8 |
| 6 | 王家湾公社(2) | 丘陵沟壑区 | 0.464 | 4.58 | 14305.3 |
| 7 | 安寨县(3) | 丘陵沟壑区 | 0.499 | 5.17 | 16156.6 |
| 8 | 砖窑湾公社(5) | 丘陵沟壑区 | 0.525 | 4.86 | 15182.1 |
| 9 | 化子坪(3) | 丘陵沟壑区 | 0.556 | 4.62 | 14430.3 |
| 10 | 化子坪(2) | 丘陵沟壑区 | 0.570 | 5.31 | 16597.9 |
| 11 | 王家湾(4) | 丘陵沟壑区 | 0.524 | 4.14 | 12933.8 |
| 12 | 安寨县(7) | 丘陵沟壑区 | 0.447 | 4.32 | 14149.0 |
| 13 | 化子坪(11) | 丘陵沟壑区 | 0.622 | 4.53 | 14149.0 |
| 14 | 延安(3) | 丘陵沟壑区 | 0.530 | 4.23 | 13213.7 |

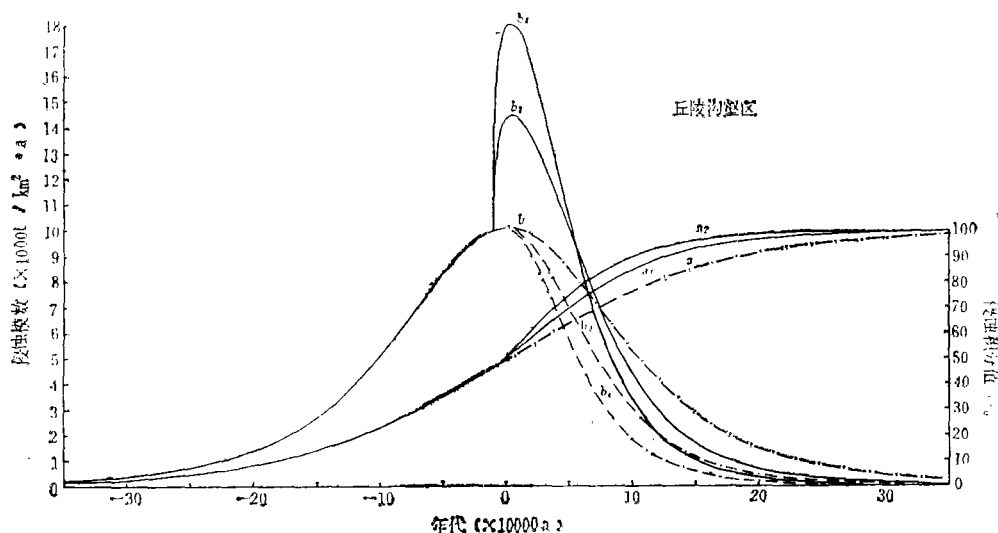


图3 黄土高原丘陵沟壑区侵蚀积分值与产沙过程线

[Fig. 3 The Process of Integral Value of Erosion and Erosion In Rolling Gully Area On Loess Plateau]

侵蚀积分值 (E_i) 与河网密度的关系为

$$E_i = ad_i^b \quad (6)$$

把不同时期河网密度代入(6)式,得到侵蚀积分值过程线,又根据侵蚀积分值值域[0,1]的特性,选定用

$$f(T) = 1/(1 + ae^{-bT}) \quad (7)$$

的型式来拟合侵蚀积分值过程线,式中 a 、 b 均为正数。

根据上述方法,对黄土高原丘陵沟壑区侵蚀积分值作了计算,计算结果见图 3a 线。

首先要说明的是具体资料的处理方法。沟谷侵蚀是黄土地貌发育过程中必经的阶段。形态复杂的冲沟对黄土沟谷发育历史记录得最为完整。黄土塬区黄土-古土壤序列发育典型,经过地层学及年代学研究后确定各层黄土和土壤的年龄,是计算黄土区沟谷年龄的基础。黄土塬发育巨大的典型冲沟中可以观察到 4 级冲沟阶地,这在地形图和影像上也清晰可见。根据冲沟阶地的结构、组成和分布,可以确定其时代以及冲沟发育的长度,它们是沟谷侵蚀模式分析的基础资料。据此,可对黄土区沟谷侵蚀分期和判别^[6]。通过对黄土丘陵沟壑区和高原沟壑区 30 个小流域不同时期水文网的恢复后,则得到相应时期流域的河网密度,于是便可建立河网密度与侵蚀积分值的关系(图 4)。通过拟合得到

$$E_i = 0.194d_i^{0.697} \quad (8)$$

相关系数 0.90。

黄土高原丘陵沟壑区侵蚀积分值过程线的拟合公式为

$$E_i = 1/(1 + 1.0235e^{-0.118T}) \quad (9)$$

式中 T 为时期(万年)。对于黄土高原只能恢复四个时期的水文网,虽然如此,侵蚀积分值随着时间的推移逐渐增加与地貌发育阶段的物理图形是一致的。随着对黄土高原年代学

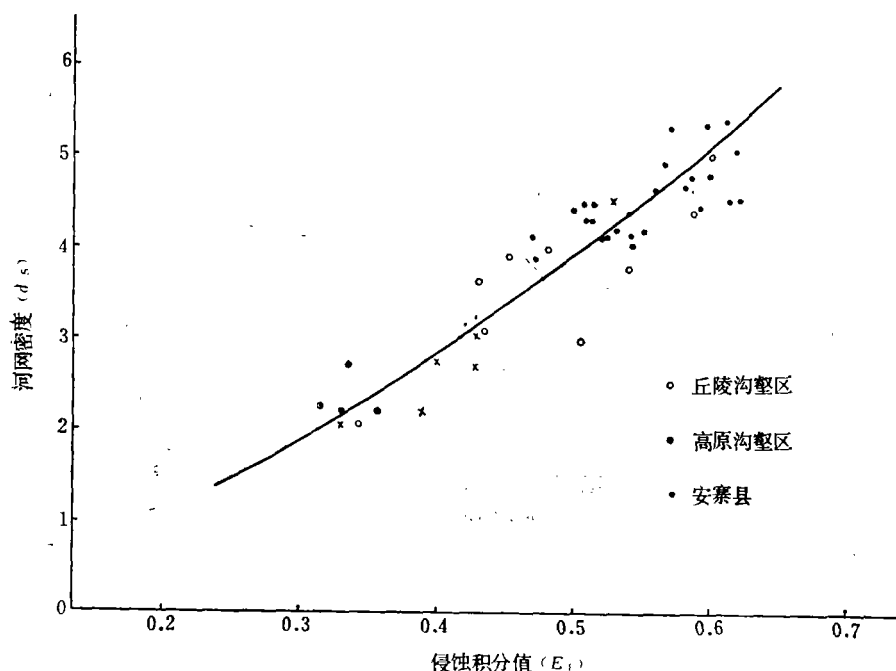


图 4 黄土高原河网密度与侵蚀积分值的关系

Fig. 4 The Relationship Between The River Density and Integral Value of Erosion On Loess Plateau

研究的不断深入,侵蚀积分值变化过程曲线会更准确。

二、流域侵蚀过程

侵蚀是引起地表物质迁移的外因,也是塑造地形的主要因素。侵蚀造就流域系统的产沙、输沙和滞沙过程。从“侵蚀”的意义上讲分自然侵蚀和加速侵蚀。

1. 自然侵蚀

自然侵蚀是没有人类活动参与的地质过程。研究自然侵蚀的大小和过程有助于了解流域的发育阶段,认识流域的产沙特性,区分人类活动造成的加速侵蚀,从而有目的治理流域。

由侵蚀积分值的概念可知,侵蚀模数与侵蚀积分值存在关系

$$W_i = d/dT(AHE_i)/A \quad (10)$$

式中 A 、 H 为流域面积和高差,由于 A 、 H 随时间变化,是堆积和侵蚀作用相互抵消的结果,描述 A 、 H 的过程是困难的,所以将(10)式简化为

$$W_i = F(d/dT(E_i)) \quad (11)$$

而

$$\frac{dE_i}{dT} = \frac{abe^{-bT}}{(1 + ae^{-bT})^2} = bE_i(1 - E_i) \quad (12)$$

确定侵蚀模数与侵蚀积分值变化率的函数关系主要依据以下 3 点: ①将不同时期河网密度代入侵蚀模数与河网密度的关系式中, 得到不同时期的侵蚀模数, 同时由(12)式求出相应时期的侵蚀积分值变化率, 把不同时期侵蚀模数和侵蚀积分值变化率点绘在半对数坐标中, 发现两者成线性关系, 也就是说侵蚀模数与侵蚀积分值变化率成对数关系; ②流域侵蚀模数变化过程是从递增到递减; ③侵蚀模数的变化过程为 $\lim_{T \rightarrow -\infty} W_t = \lim_{T \rightarrow +\infty} W_t = 0$; 这样确定函数形式为

$$W_t = A(e^{\frac{B d E_i}{dT}} - 1) \quad (13)$$

式中 A 、 B 为系数, 均大于零, 将(12)式代入有

$$W_t = A(e^{\frac{B a b e^{-bT}}{(1+ae^{-bT})^2}} - 1) \quad (14)$$

$$W_t = A(e^{B b E_i (1-E_i)} - 1) \quad (15)$$

黄土高原丘陵沟壑区侵蚀模数与河网密度的关系为

$$W_t = 3334.27 d_i^{0.945\alpha} \quad (16)$$

$$\alpha = (d_i/3)^{0.03} \quad \gamma = 0.95$$

式中河网密度 (d_i) 的单位 km/km^2 , 侵蚀模数 (W_t) 的单位 $\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 。将黄土高原丘陵沟壑区不同时期河网密度代入(16)式, 用统计迭代技术确定(14)式中的系数 A 、 B , 如下:

$$W_t = 1753.73 [e^{\frac{7.14 e^{-0.118T}}{(1+1.0235e^{-0.118T})^2}} - 1] \quad (17)$$

这就是黄土高原丘陵沟壑区自然侵蚀过程线, 见图 3 中 b 线。

图 3 表明在流域发育的不同时期, 自然侵蚀量不同。在侵蚀早期, 侵蚀模数较小, 并持续递增; 在侵蚀中期, 侵蚀模数较大, 其变化从递增到递减; 在侵蚀晚期, 侵蚀模数较小, 并持续递减, 最后侵蚀消失。流域发育阶段与流域产沙特性密切相关, 流域产沙特性本质上的突变会导致流域发育阶段的变化。

2. 加速侵蚀

由于人类活动削弱地面抗蚀力, 从而使侵蚀超过正常侵蚀^[7]。在现代侵蚀中, 忽略加速侵蚀是脱离实际的, 但问题是如何区分加速侵蚀? 解决问题的关键是搞清自然侵蚀。从自然侵蚀过程线和流域物质守恒可以区分加速侵蚀, 设总侵蚀量为 W'_t , 加速侵蚀量为 W''_t , 自然侵蚀量为 W_t , 则有

$$W''_t = W'_t - W_t \quad (18)$$

加速侵蚀占总侵蚀百分比

$$W''_t/W'_t = 1 - W_t/W'_t \quad (19)$$

对黄土高原丘陵沟壑区计算结果见图 5。其中 a 线是一万年以来至今的总的产沙线, b 线是相应的自然产沙线, 则 c 线为一万年以来至今的加速侵蚀所占百分比¹⁾。

图 5 表明目前黄土高原丘陵沟壑区加速侵蚀所占百分比为 30%。这是平均情况, 在人类活动频繁的流域, 加速侵蚀会大一些, 反之在无人类破坏的自然流域, 加速侵蚀会很

1) 陆中臣等, 黄土高原治理前景, 地理所, 1989。

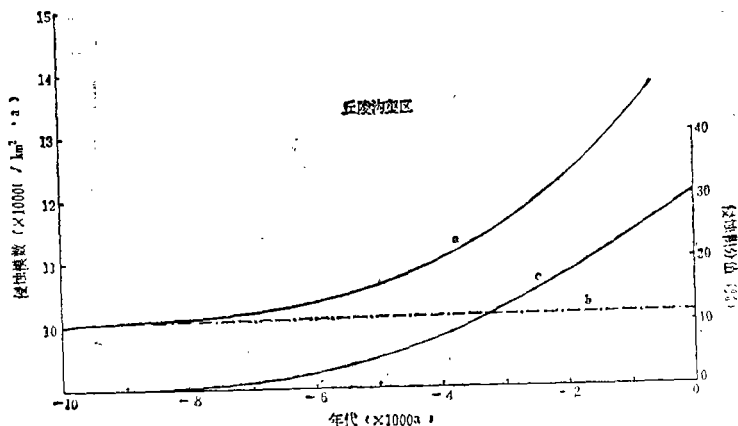


图5 丘陵沟壑区加速侵蚀所占百分比

Fig. 5 The Percentage of Accelerating Erosion In Rolling Gully Area

小,甚至为零。事实上,加速侵蚀随着人口数量和治理措施的动力变化导致将来的产沙过程线具有随机性,描述这个过程是困难的,因为人为的影响难以估计。如果把加速侵蚀作为有特征意义的常数来预测将来的产沙过程线,将有助于了解流域的发育和产沙特性。图3中的**b**线是纯自然的产沙过程线,以此为基础,对两种情况进行预测:1)以目前加速侵蚀所占百分比为30%为依据,得到图3中的**b₁**产沙过程线和相应的自然产沙过程线**b₂**;2)我国人口到2030年达到饱和极限状况¹⁾,根据人口与产沙量关系²⁾算出2030年加速侵蚀所占比例为44%,通过计算得到图3中的**b₂**产沙过程线及相应的自然产沙过程线**b₃**。与纯自然产沙过程线相比(图3中**a**线),上述两条过程线有两个特点:①产沙过程线峰值明显增大,峰值的增大与加速侵蚀所占百分比成正比,但峰值持续时间减少;②流域发育阶段演化周期缩短。这些都是由于加速侵蚀的作用而造成的结果,并随着加速侵蚀的变化而变化。

三、划分流域发育阶段的定量指标

流域发育具有阶段性是由流域发育的规律决定的。流域在不同的发育阶段具有不同的产沙特性及地貌形态,产沙性质的质变必将导致流域从一个阶段进入另一个阶段,同时在地貌形态上有所表现。

从图3**b**线可以看出自然产沙过程线存在拐点,产沙性质在拐点处发生质变。拐点就是流域发生阶段性变化的临界点,按导数定义,自然产沙过程对时间的两阶导数等于零,与之对应的反映地貌形态的侵蚀积分值就是临界侵蚀积分值,也就是划分流域发育阶段的定量指标。设侵蚀模数为 W_i ,则对(15)式求两阶导数,首先将(15)变换为如下形式

$$\ln \left(\frac{W_i + A}{A} \right) = BbE_i(1 - E_i)$$

1) 生态中心,人口预测报告,中国科学院,1988。

2) 叶青超等,黄河下游河道演变和黄土高原侵蚀的关系,地理所,1982。

对时间求导有

$$\frac{1}{W_i + A} \cdot \frac{dW_i}{dT} = Bb \frac{dE_i}{dT} (1 - E_i) \quad (20)$$

将(12)式代入有

$$\frac{dW_i}{dT} = Bb^2 E_i (1 - 3E_i + 2E_i^2) (W_i + A) \quad (21)$$

对(21)式求导有

$$\begin{aligned} \frac{d^2 W_i}{dT^2} &= B^2 b^4 E_i^2 (1 - E_i)^2 (1 - 2E_i)^2 (W_i + A) \\ &+ Bb^2 (W_i + A) \frac{dE_i}{dT} (1 - 6E_i + 6E_i^2) \end{aligned} \quad (22)$$

将(12)(15)式代入(22)式中,整理后有

$$\begin{aligned} \frac{d^2 W_i}{dT^2} &= B^2 b^4 E_i^2 (1 - E_i)^2 (1 - 2E_i)^2 A e^{BbE_i(1-E_i)} \\ &+ Bb^3 A e^{BbE_i(1-E_i)} E_i (1 - E_i) (1 - 6E_i + 6E_i^2) \end{aligned} \quad (23)$$

令 $\frac{d^2 W_i}{dT^2} = 0$, 则有

$$\begin{aligned} BbE_i(1 - E_i)(1 - 2E_i)^2 + (1 - 6E_i + 6E_i^2) &= 0 \\ E_i(1 - E_i)[6 - Bb(1 - 2E_i)^2] - 1 &= 0 \end{aligned} \quad (24)$$

令 $\alpha = Bb$ 。称为临界侵蚀系数,则临界侵蚀方程为

$$E_i(1 - E_i)[6 - \alpha(1 - 2E_i)^2] - 1 = 0 \quad (25)$$

由于侵蚀积分值域在[0,1]范围内,所以对(25)式求解时可以在[0,1]内得到有效的临界侵蚀积分值。

令

$$f(E_i) = E_i(1 - E_i)[6 - \alpha(1 - 2E_i)^2] - 1 \quad (26)$$

在[0,1]内如果 E_1 满足 $f(E_1) = 0$, 则令 $E_2 = 1 - E_1$, 代入(26), 可以发现 $f(E_2) = f(E_1) = 0$, 所以在[0,1]范围内,临界侵蚀积分值有两个,且两值满足关系式

$$E_1 + E_2 = 1 \quad (27)$$

不同的流域有不同的临界侵蚀系数,因而反映流域发育阶段的定量指标临界侵蚀积分值也不同。临界侵蚀积分值与临界侵蚀系数的关系见图 6, 令

$$f(\alpha) = E_i(1 - E_i)[6 - \alpha(1 - 2E_i)^2] - 1 \quad (28)$$

对每一个临界侵蚀系数,都对应一组(两个)临界侵蚀积分值,点绘成图 6。

由于临界侵蚀系数 $\alpha = Bb$, 而系数 B 、 b 均大于零, 所以 $\alpha > 0$, 这就意味着对任何一个流域,从侵蚀早期过渡到侵蚀中期的临界侵蚀积分值在 21.4%—50% 之间变化,从侵蚀中期进入侵蚀晚期的临界侵蚀积分值在 50%—78.6% 之间变化。

对黄土高原丘陵沟壑区系数 $B = 64.92$, $b = 0.118$, 则临界侵蚀系数 $\alpha = 7.66$, 代入(25)式求解有 $E_1 = 0.30$, $E_2 = 0.70$, 所以黄土高原丘陵沟壑区流域发育阶段为:

$$0 \leq E_i < 30\% \quad \text{侵蚀早期}$$

$$30\% \leq E_i < 70\%$$

侵蚀中期

$$70\% \leq E_i < 100\%$$

侵蚀晚期

与临界侵蚀积分值 30%、70% 对应的年代和侵蚀模数为 7 万年前、 $7008\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 和距今 7.2 万年以后， $7008\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 。当然如果考虑加速侵蚀的影响，反映流域发育阶段的临界侵蚀积分值不变，但流域所处年代及相应的侵蚀模数却发生很大变化。

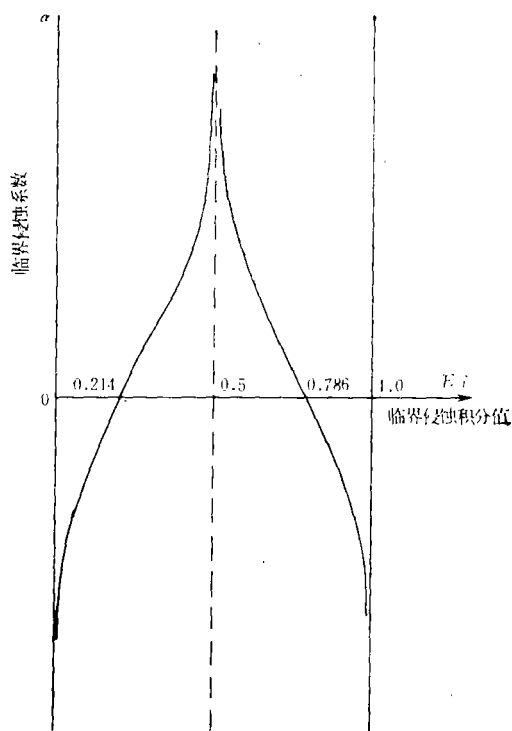


图 6 临界侵蚀积分值与临界侵蚀系数的关系

Fig 6. The Relationship Between Integral Value of Erosion of Threshold and Erosional Coefficient of Threshold

用临界侵蚀积分值作为划分流域发育阶段的定量指标是确定的，它避免了高程积分法在划分阶段上的不确定性，以及导致不同阶段相互混淆的可能。它包括空间和时间两方面内容：一方面从流域空间形式可以判定流域所处阶段；另一方面也可以确定流域相应阶段的年代。

四、总结和讨论

回顾对地貌发育阶段研究的进展，便可了解侵蚀积分值在地貌发育研究中所处的地位^{[2][8]}。见表 2。

从表 2 可以看出，用侵蚀积分值划分地貌发育阶段的思想是对经典理论的发展，这可以从本文中的两基本点加以表述：1) 地貌发育阶段是内外营力相

互作用和时间的函数；2) 侵蚀过程塑造地貌形态。这点的核心是研究地貌发育阶段应从侵蚀过程入手，流域在不同的发育阶段有不同的产沙特性。本文把以上两点有机地结合在一起，并作为研究地貌发育阶段的基础，从而产生侵蚀积分值的概念。

通过侵蚀积分值变化过程可得到自然产沙变化过程，自然产沙过程线上的拐点就是划分流域发育阶段的临界点，与之对应的侵蚀积分值就是临界侵蚀积分值。临界侵蚀积分值反映在不同发育阶段流域所显现的产沙特性本质上的不同，这本身就避免以往划分阶段上的不确定性，同时建立流域阶段性与产沙特性的定量关系。

不同流域具有不同的产沙特性，即临界侵蚀系数不同，因而临界侵蚀积分值也不同，求解临界侵蚀积分值可用临界侵蚀方程，

$$E_i(1 - E_i)[6 - a(1 - 2E_i)^2] - 1 = 0$$

1) 艾南山等，地貌系统信息熵与地貌演化问题，地貌会议论文集，1987。

2) 希金斯，景观地形发育理论透视，地貌会议译文，1987。

表 2 地貌发育阶段研究进展

Tab. 2. The Studying Record of The Stage of Geomorphological Evolution

| 年 代 | 作 者 | 理 论 | 流域系统 | 流域发育阶段 定量方法 | 产沙特征 |
|--------|---|---------------------|---------|----------------|-----------|
| 1899以前 | | | 定性描述 | | |
| 1899 | Davis, W. M | 旋回理论 | 解释性描述 | | |
| 1950 | A. N. Strahler | 旋回理论 | 封闭的地貌系统 | 高程积分法 | |
| 1960 | A. E. Scheidegger L. B. Leopold W. B. Lambein | 地貌发育与热力学相似原理 | 封闭的地貌系统 | 地貌熵 | |
| 1985 | M. G. Hart | 地貌发育是内外营力相互作用的产物 | 开放的地貌系统 | 信息熵 | |
| 1988 | 本 文 | 地貌发育是内外营力相互作用及时间的函数 | 开放的地貌系统 | 侵蚀积分值 | 流域自然产沙过程线 |

式中 E_i 侵蚀积分值, α 临界侵蚀系数 $\alpha > 0$ 。在侵蚀积分值 $[0, 1]$ 值域内, 有两个临界侵蚀积分值, 且两者之和等于 1。两个临界侵蚀积分值的范围分别为 $21.4\% < E_1 < 50\%$, $50\% < E_2 < 78.6\%$ 。对于黄土高原丘陵沟壑区临界侵蚀积分值为 30%、70%, 对应的年代为 7 万年前和距今 7.2 万年以后, 侵蚀模数为 $7008 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$, 如果考虑加速侵蚀影响, 年代和侵蚀模数要发生较大变化。

利用侵蚀积分值可以区分自然侵蚀和加速侵蚀, 预测流域发展状况, 为治理提供依据。目前黄土高原丘陵沟壑区加速侵蚀所占比例为 30%。

侵蚀积分值的研究和应用, 不仅理论上有价值, 而且实践上有意义。

参 考 文 献

- [1] Leopold, L. B., Wolman M. G., J. P. Miller, Fluvial Process In Geomorphology, 1964.
- [2] Schumm, S. A., The Fluvial System, John Wiley & Sons, New York, 1977.
- [3] Scheidegger, A. E., Theoretical Geomorphology, Springer-Verlag, 1961.
- [4] Strahler, A. N., Hypsometric (area-altitude) Analysis of Erosional Topography, *Bull. Geol. Soc. Am.*, 63, 1952.
- [5] 刘东生等, 黄土与环境, 科学出版社, 1985。
- [6] 陆中臣等, 安寨县侵蚀与地貌演化趋势预测, 黄土高原遥感调查试验研究, 科学出版社, 1988。
- [7] 陈永宗等, 黄土高原现代侵蚀与治理, 科学出版社, 1988。
- [8] 钱小蓉等, 小流域侵蚀地貌过程与耗散结构, 水土保持通报, 6(6), 1986。
- [9] 钱宁等, 河床演变学, 科学出版社, 1987。

QUANTITATIVE STUDY OF THE STAGE OF GEOMORPHOLOGICAL EVOLUTION

Li Qiang Lu Zhongchen

(Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences, Beijing)

Yuan Baoyin

(Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Beijing)

Key words Integral Value of Erosion Integral Value of Erosion of Threshold Accelerating Erosion

Abstract

This paper puts forward the integral value of erosion of threshold as a quantitative standard to divide the stages of geomorphological evolution which inherits and develops the classical theories in geomorphology. The advantages by using the integral value of erosion are as follows: (1) putting the stage of geomorphological evolution into the concept of open system; (2) avoiding the uncertainty caused by Strahler's Area-Altitude analysis to divide the stages of geomorphological evolution; (3) setting up the quantitative relation between the stages of geomorphological evolution and matter movement of drainage basins; and (4) distinguishing the natural and accelerating erosion of drainage basin.

By analysing and calculating the drainage basins which belong to rolling gully area on Loess Plateau, the conclusions are reached that the drainage basin enters maturity from youth, when the integral value of erosion equals 0.30, in which the evolutionary time was 70 thousand years ago and erosional modulus was $7008 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$; the drainage basin will enter old age from maturity when the integral value of erosion equals 0.70, in which the evolutionary time will be 72 thousand years later from now on and erosional modulus will be $7008 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$ only for natural process. The percentage of accelerating erosion in rolling gully area on Loess Plateau is 30% now.