

植被-侵蚀动力学的初步探索和应用*

王兆印^{①②} 王光谦^① 李昌志^① 王费新^①

(^①清华大学水利系, 北京 100084; ^②国际泥沙培训中心, 北京 100044)

摘要 植被侵蚀动力学是一个新的边缘学科, 研究流域植被与侵蚀在人类活动影响下的演变规律. 讨论了作用于植被的各种生态应力, 给出了定量表达式并且统一在植被-侵蚀动力学方程组中. 推导得出了动力学方程组的理论解并且用于模拟黄土高原安家沟流域和云南小江流域的植被侵蚀演变过程, 结果表明动力学方程组精确地模拟了实际演变过程. 利用动力学方程组和特征参数作出了植被侵蚀状态图, 由此可以预测在停止人类干预后的植被发展趋势, 说明了有效治理所需的治理强度和控制侵蚀对植被发育的重要性. 植被侵蚀状态图还说明在雨量较丰、气温较高的云南高原小江流域, 减少侵蚀是改善植被的重要措施, 植被改善后比较稳定. 而在比较干旱、水土流失严重的黄土高原上, 增加植被能够明显地减少侵蚀, 但控制侵蚀对于促进植被发育没有太大的作用. 即使植被已经大大改善, 仍然不稳定, 还需要不断地护理才能维持植被的良性发育.

关键词 植被发育 生态应力 侵蚀 动力学方程 黄土高原

山区和丘陵地区的植被发育依赖于当地的气候、降雨、土壤结构、母岩、地形、土壤侵蚀和土地利用类型. 土壤侵蚀影响植被发育, 其长期作用导致了地貌演变, 改变了土壤组成, 甚至在一定程度上影响了气候. 由于侵蚀, 土壤中有机碳全球每年释放进入大气层的量估计为 11.4 亿吨^[1,2], 这对改变气候加快温室效应的作用是不可忽视的. 反之, 地表植被也是减少侵蚀的重要因素. 如黄河中游砒砂岩地区利用沙棘形成柔性坝减沙, 取得良好效果^[3]; 黄土高原王家沟由于天然林木植被大量截留泥沙, 河床在 120 多年里抬高 5 m 多, 变宽变浅, 又发育出大量灌木和水草^[4]. 根据某些小流域植树种草控制侵蚀减少产沙量的调查结果, 40% 的植树种草面积比使得土壤侵蚀率减少 62%, 而 54% 的植树种草面积比使得土壤侵蚀率减少 80%^[5]. 黄河中游遭受风力侵蚀和水力侵蚀^[6], 植被覆盖是影响黄土地区土壤含水量的重要因素^[7], 因此, 在这些地区植被发育的防风固沙、蓄水保土功能效果十分明显. 研究表明, 黄土高原上侵蚀率随树林覆盖率几乎是直线减少, 当树林覆盖率大于 0.6 时, 侵蚀率降到 0^[8].

对于一个地区而言, 在气候、土壤、主要地貌类型及其分布基本不变的条件下, 植被与侵蚀经过长期的相互作用会达到一种动态平衡. 地壳运动、火山爆发、旱灾、森林火灾和人类活动如砍伐森林、开矿、改变土地利用和植树造林都会打破这种平衡. 这些自然的或人类活动引发的作用于植被的各种扰动会明显地影响和改变原有植被生态系统的发育过程, 本研究中将其称为生态应力. 通常生态应力包括侵蚀、干旱、风暴、森林火灾、病虫害、大气污

2003-03-05 收稿, 2003-05-10 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(编号: G199043604)和国家自然科学基金委员会、水利部重大项目(批准号: 59890200)联合资助

染、放牧、森林砍伐、酸雨和采矿、道路建设和人工造林等。人类活动越来越成为作用于植被的最直接、有时是最重要的生态应力。例如, Bussotti 和 Ferretti 研究了欧洲大气污染对森林的影响, 发现污染达到一定程度时使大多数森林受到伤害^[9]。

为了研究植被在各种生态应力作用下的演变, 人们提出了一些简化模型。第 1 种方法是假定温度、降雨等气候因素是全球植被分布的决定因素, 由此得出植被在全球范围内的大致分布^[10]。第 2 种方法利用概率论研究植被分布, 引入 $p(x, y, t)$ 为某一地块为森林的概率, 而 $q(x, y, t) = 1 - p$ 是这一地块为草地的概率, 假设概率分布与气候等因素有一定关系, 由此得出森林植被的分布^[11]。Maley 和 Brenac 分析了非洲 Barombi Mbo 湖的沉积物中的花粉含量随着气候变化在过去 28000 年中的演变, 指出气候是森林长期动态变化的主要因素^[12]。Thornes 提出了一种考虑植被变化速率与侵蚀关系的动力学模型, 给出了植被与侵蚀耦合的方程组, 但模型中除了野生动物, 没有考虑其他生态应力的作用^[13]。

以上模型和理论没有定量描述生态应力, 给出的植被和侵蚀的动力学变量多是概念上。本研究旨在探索植被与侵蚀在生态应力(特别是人类活动)作用下的动力学规律, 建立包括生态应力的动力学方程组并应用于实际。目前我国正开始开发西部的热潮, 其中一个重要方面是改善植被生态环境, 营造山川秀美的西部。本文建立植被侵蚀动力学模型, 初步应用来模拟和预测西部植被的演变, 从理性上初步认识和回答是否可能以及花多大努力才能达到山川秀美。

1 植被和生态应力

除了控制雨蚀和风蚀外, 植被在生态学上还具有生物栖息地和初级生产力的功能。毛乌素沙漠上发育的植被根系和落叶是沙漠表层结皮现象的主要因素, 这对于降低风力侵蚀极为有效。植被的功能强度决定于植被覆盖度和植被活力。植被覆盖度定义为“各种植物枝叶垂直投影所占地面的比例”。一般森林植被是分层的, 高大的乔木和较低的灌木以及杂草相互重叠。但是草地根系浅薄, 对于植被景观和抗侵蚀作用也有限, 而且不稳定。水保部门统计资料中常不把草地计入植被覆盖度中。森林冠层对大气边界层湍流大涡起着破碎作用, 消耗大量风能降低风速, 显著减少风力侵蚀^[14]。蔡光荣等人研究了植物根系对于侵蚀的控制作用^[15], 选择单一植物生长的坡面进行土体抗剪强度实验, 同时选择同一地区裸露坡面以同样方法实验作对照。取土块连根带土置于剪力盆进行剪断实验, 同时测量剪切面植物根系所占面积百分比。对照无根土体, 可以算出根系增强土体抗剪强度的作用。实验结果说明, 乔木的根系强壮, 10%的根系增加土体抗剪强度 $0.3 \times 9.8 \times 10^4$ Pa。大致说来, 乔木灌木对土体抗剪强度的增加量是草的 3~5 倍。因此, 植被覆盖度中忽略草地对于研究侵蚀影响不大。覆盖度的测量方法主要采用直接调查、样方框法和遥感解译。植被活力可以用当年新发枝条和树叶的密度、或者树冠透明度以及植物的健康状况来描述, 定量上可以用当年单位面积新生生物量与当地植被在不受任何生态应力作用下的一年新生生物量之比来测量。显然, 植被死亡时, 植被活力等于零。相对植被覆盖度, 植被活力波动性更强, 更不稳定。

作用于植被的生态应力分为自然应力和人为应力。自然生态应力包括侵蚀、干旱、洪水、台风、火灾、闪电、土壤盐碱化、火山爆发、地震、病虫害、滑坡、极端高温以及野生动物等。人为应力包括土地利用变化、农业开发、城市化、大气污染、排污、放牧、森林采伐、

采矿、道路建设以及植树造林等。煤和金属矿产的探测、提炼、处理和运输等, 都会深刻地影响着植被的发育, 有时采矿会导致植被完全破坏。尾矿渣的堆放又会加速侵蚀, 增加单位面积产沙量。作用于植被的生态应力除了分为自然应力和人为应力外, 还可在动力学上划分为致死应力(Mortality stress)和损伤应力(Vigor stress)。致死应力定义为直接导致植物死亡和植被覆盖度降低的应力, 如火山爆发、滑坡、森林砍伐、泥石流、森林火灾等。损伤应力则被定义为仅仅导致植被活力降低的应力, 如干旱、污染、放牧、病虫害、风灾等。如果植被受到损伤应力的作用, 植被活力将会降低。如果损伤应力连续作用于植被的时间过长, 使植被活力减小到零, 植被就会死亡。植被在植被活力减小到零之前, 生态应力消失, 植被活力可能很快恢复; 植被恢复的速度依赖于植被的结构, 称之为生态弹性^[16]。干旱地区依靠人类植树造林发育起来的植被的生态弹性很低或者接近于零, 一旦受到较大强度的生态应力的作用, 不论是损伤应力还是致死应力, 都会导致死亡, 因而称为脆弱植被。例如, 在中国西北的毛乌素沙漠, 人们用草方格固定沙丘种植草和灌木。经过几十年努力培育出沙漠植被。但这种植被是脆弱植被。任何足够强度的自然或者人为应力都能导致植被破坏, 在自然条件下不能再恢复。如前述结皮在人和牲畜践踏下极易破坏, 沙丘一旦重新流动, 沙漠植被会毁于一旦, 我们必须小心保护。

植被的功能, 包括控制雨蚀和风蚀, 生物栖息地和初级生产力等, 可以定量表示为植被覆盖率、植被活力和功能指数三者的函数, 即

$$F = V \cdot V_g^x, \quad (1)$$

式中, F 为植被功能强度, V 为植被覆盖率, V_g 则为植被活力, x 为功能指数, 对于不同的功能 x 取不同的值。植被的控制风蚀、生物栖息地和初级生产力等功能比较依赖植被活力, x 值较大; 此时损伤应力和致死应力都起着重要作用。例如, 中国北方地区 20 世纪 90 年代后期连续几年干旱, 植被活力大大降低, 防风固沙功能减退, 2001 和 2002 年春季发生了严重的沙尘暴^[17]。但植被控制流水侵蚀的功能主要依靠根系, 植被覆盖度起主要作用, 受植被活力的影响较小, x 值接近于零。此时损伤应力的作用较小, 主要考虑致死应力的作用。

以上各种生态应力或者引起植被活力降低或者导致植被死亡, 都是负应力。但是, 人们植树造林种草和林草的维护保育是正应力, 前者增加覆盖度, 后者提高植被活力。

2 植被-侵蚀动力学方程组

植被覆盖度抑制降雨侵蚀, 而侵蚀又破坏植被, 二者的相互作用遵循一定的动力学规律, 同时又受到各种生态应力的干扰。如果我们模拟降雨侵蚀和植被覆盖度的演变过程, 可以仅考虑致死应力的作用, 因为损伤应力不直接造成植被覆盖度的减少。致死应力如火山爆发、森林砍伐、森林火灾等都是发生在极短的时间内, 为了定量描述这种瞬时生态应力, 引入阶跃函数 $\Delta(t)$ 和脉冲函数 $d(t)$, 分别定义为:

$$\Delta(t_0) = \begin{cases} 0, & t \leq t_0 \\ 1, & t > t_0 \end{cases}, \quad (2)$$

$$d(t_0) = \frac{d\Delta(t_0)}{dt} = \begin{cases} 0, & t \neq t_0 \\ 1, & t = t_0 \end{cases}, \quad (3)$$

发生在时间 t_0 的应力可以用 d -函数表达:

$$f_t = K_i d(t_0), \quad (4)$$

式中 K_i 是由于 t_0 时发生的应力引起植被覆盖度的减少量. 例如, 1980 年美国 St. Helens 发生的火山爆发对附近一万多平方公里地区森林植被施加了强烈的、但又是瞬时的应力, 森林植被覆盖全部摧毁, 变成光秃秃的山脉, 历经 20 年后, 植被仍未恢复. 如果忽略其他应力, 此过程可以用下式简单描述:

$$\frac{dV}{dt} = -K_i d(t_0 = 1980), \quad (5)$$

式中: V 为植被覆盖度, t 为时间. 火山爆发前该区植被覆盖度约为 80%, 火山爆发后全部摧毁, 因此 $K_i = 0.8 \text{ a}^{-1}$. 积分后, 可得到植被演变过程为:

$$V(t) = \begin{cases} 0.8. & 1980\text{年以前} \\ 0. & 1980\text{年以后} \end{cases} \quad (6)$$

森林砍伐也可以用脉冲函数来表达. 例如, 由于 1958 年大炼钢铁进行森林砍伐, 中国云南小江流域的植被覆盖度降低了 5%, 则对植被的应力为: $f_t = K_i d(1958)$, $K_i = 0.05 \text{ a}^{-1}$. 植树造林是最有影响的人为正值生态应力. 植树造林一般是连续不断的, 可以用连续函数来表达. 假设每年植树造林面积比为 V_R , 则此应力为:

$$F_t = V_R(t). \quad (7)$$

当然, 新种植的树木不能象成年树木一样起作用, 但只要持续维持人工造林, $V_R(t)$ 中既包含新植林木, 又包含前植林木的成长, 采用 V_R 代表覆盖度的增加还是可以的.

假设这些生态应力对植被的影响是相互独立的, 可以得出植被覆盖度在各种应力作用下的动力学方程:

$$\frac{dV}{dt} = aV - cE - K_i d(t_0) + V_R, \quad (8)$$

式中, E 代表侵蚀率, 通常取为每年单位面积内泥沙侵蚀量, $K_i d(t_0)$ 是发生在 t_0 时的致死生态应力, V_R 代表人类植树造林对植被覆盖率的影响, a , c 为特征参数. 繁茂的植被涵养水分, 有助于植被的进一步发育, 植物也通过繁殖使植被扩大和茂密, 参数 a 代表着这种作用下植被的增长率, 其值依赖于当地的降雨、环境条件和植物构成, 要通过调查资料来确定. 侵蚀对植被起着破坏作用, 参数 c 代表着每年每平方公里 1 t 的侵蚀量对植被的破坏率. c 值的大小依赖于土壤条件和植被的构成. 如果土层很薄, 少量的侵蚀就会造成植被的严重破坏, c 值较大.

应该说明, 此处侵蚀率 E 是通过长期作用影响植被发育的侵蚀率值, 相当于某种滑动平均值. 例如取滑动周期为 10 a, 则第 10 年的 E 值等于第 6 到第 15 年的实测侵蚀率的平均值, 而第 11 年的 E 值等于第 7 到第 16 年的平均值, 以此类推. 因此, E 不是实测侵蚀率那样剧烈波动的随机变量. $E(t)$ 曲线是反映趋势性演变的光滑曲线. 为了方便, 本文仍称 E 为侵蚀率. 安家沟是黄土高原祖厉河支流东河右岸的一条支沟, 位于甘肃省定西县. 图 1 是安家沟流域径流量、侵蚀率和侵蚀率 10 a 滑动平均值的实测曲线. 可见侵蚀率随径流量波动的脉动变量较大, 而滑动平均值则平稳得多, 只反映侵蚀率的长期趋势性变化. 在植被-侵蚀动力学中, 植被对侵蚀率的控制作用反映在侵蚀率的长期变化上, 所以应该采用滑动平均值.

土壤侵蚀影响植被发育, 反过来又受到植被的影响. 方程(8)中侵蚀项随植被覆盖度变化而变, 因此, 必须寻找另一个方程来求解植被覆盖度和侵蚀率两个未知函数. Thornes 对于植被与侵蚀的相互作用过程提出了耦合数学方程组^[13], 我们利用其中的侵蚀率变化方程并引进人类活动对侵蚀率的影响加以改造得到:

$$\frac{dE}{dt} - dE + fV = E_R, \quad (9)$$

其中 E_R 为人类活动对侵蚀率的影响值, 包括开矿、修路、耕作等引起的侵蚀率的增加和修梯田、固坡、筑拦沙淤地坝等造成的侵蚀率的减少; d 和 f 为特征参数. 土壤侵蚀松动了土表层, 破坏了土壤中的植物根系, 会进一步促进侵蚀. 参数 d 代表了这种作用增大的侵蚀率. 植被发育稳定土层, 限制侵蚀. 参数 f 代表了植被对侵蚀率的减少率.

将(8)和(9)式联立, 得到植被-侵蚀动力学方程组:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV}{dt} - aV + cE &= -K_t d(t_0) + V_R \\ \frac{dE}{dt} - dE + fV &= E_R \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

如果知道 t_0, E_R 和 V_R , 且确定了参数 a, c, d, f 和 K_t , 则在生态应力作用下的植被演化就由方程组(10)确定. 方程中 t 的因次为 $[T]$, E 的因次为 $[M/AT]$, 参数 a 和 d 的因次为 $[1/T]$, c 的因次为 $[A/M]$, f 的因次为 $[M/AT^2]$; V_R 的因次为 $[1/T]$, E_R 的因次为 $[M/AT^2]$; 其中 T 代表时间, A 代表面积, M 代表质量. 式中参数 a, c, d, f 是气候、降雨量、土壤和地貌的函数, 应该根据实测资料并采用试算法来决定.

方程组(10)是非齐次线性微分方程组, 可以推导得出理论解:

$$V = c_1 e^{m_1 t} + c_2 e^{m_2 t} + e^{m_1 t} \int \left[e^{-m_1 t} e^{m_2 t} \int e^{-m_2 t} \left(\frac{dV_t}{dt} - dV_t - cE_t \right) dt \right] dt, \quad (11)$$

$$E = c_1 \frac{a - m_1}{c} e^{m_1 t} + c_2 \frac{a - m_2}{c} e^{m_2 t} + e^{m_1 t} \int \left[e^{-m_1 t} e^{m_2 t} \int e^{-m_2 t} \left(\frac{dE_t}{dt} - aE_t - fV_t \right) dt \right] dt, \quad (12)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} V_t &= -K_t d(t_0) + V_R \\ E_t &= E_R \end{aligned} \right\}, \quad (13)$$

并且假设为时间的连续函数. 而指数 m_1, m_2 由下式给出:

$$m_{1,2} = \frac{1}{2} \left[(a + d) \pm \sqrt{(a + d)^2 - 4(ad - cf)} \right], \quad (14)$$

c_1 和 c_2 是由边界条件和初始条件确定的积分常数.

对任一流域或地区, 如果已知生态应力, 将 V_t 和 E_t 代入理论解式(11)和(12)就可以得出植被与侵蚀的演变过程.

3 植被-侵蚀动力学模型的应用及参数的确定

植被-侵蚀动力学模型首先应用于中国西部的黄土高原和云南小江流域. 黄土高原上的安家沟流域面积 9.06 km^2 , 沟深 $30 \sim 50 \text{ m}$, 沟壑密度 3.14 km/km^2 , 海拔高 $1900 \sim 2250 \text{ m}$, 地势西

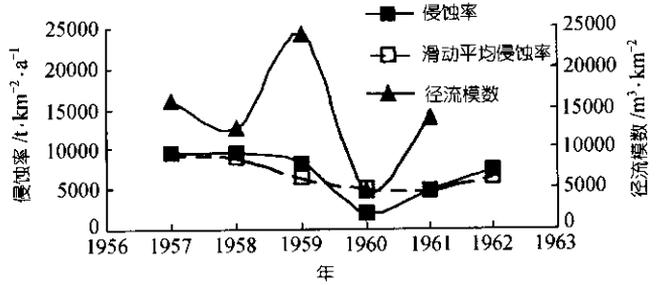


图 1 黄土高原安家沟流域实测径流量、侵蚀率、和侵蚀率 10 a 滑动平均值的变化曲线

低东高. 该地区年降雨量 427 mm, 60%集中在 7~9 三个月, 年蒸发量为 1526 mm, 年均气温只有 6.3℃. 流域内土壤发育于黄土母质上的灰钙土型轻壤土, 大部分为淡灰土及暗灰钙土, 局部地方有垆土, 沟坡及沟底为盐渍土. 治理前侵蚀率高约 1 万 $t/(km^2 \cdot a)$, 植被覆盖度仅 5.7%. 根据文献[18~20], 安家沟流域综合治理 1956~1987 年间大体可分成 3 个阶段. 第 1 阶段为 20 世纪 50 年代中期至 20 世纪 60 年代初期, 兴修梯田植树种草并在 20 世纪 50 年代末修建了 4 座淤地坝. 第 2 阶段为 20 世纪六、七十年代, 期间经历了 3 年自然灾害和文化大革命, 治理工作中断 10 多年, 林草被破坏, 这期间学大寨修了一些梯田, 但是治理没有得到全面巩固和提高. 第 3 阶段为 20 世纪 70 年代末和 80 年代, 在原来治理的基础上开展了小流域综合治理试验研究, 大量植树造林并在 20 世纪 70 年代末又兴建了 3 座淤地坝, 取得了明显的效果. 流域中, 土地利用结构变化以耕地、林地和荒地的变化最大, 而果园及其他用地变化不大并且所占比例较小. 耕地的变化主要是总面积减小及坡地改梯田, 而林地、草地的变化则是植树造林种草的结果. 利用收集到资料将每年植树造林面积除以流域总面积作为 V_t 值, 而 E_t 值包括两部分: 即坡地改梯田和拦沙淤地坝减少侵蚀 (都是负值), 坡地改梯田对侵蚀率的减少率用当年单位面积改梯田比率乘以侵蚀率得到, 而淤地坝对侵蚀率的减少率用淤地坝累积淤积过程取微商再除以总面积得到.

根据该流域 1956~1987 的土地利用和土壤侵蚀资料, 经过多次试算确定了流域植被-侵蚀动力学参数:

$$a = 0.001(1/a), c = 0.0000018(km^2/a), d = 0.01(1/a), f = 400(t/(km^2 \cdot a^2)), \quad (15)$$

由于作用于植被和侵蚀率的人为应力不是常数且不能用简单函数拟合, 不能利用理论解 (11)、(12) 式而采用方程组 (10) 式和差分法做数值解. 对以上每个参数都要进行多次试算, 与实测结果比较后再作调整, 直至计算结果与实测值最佳吻合. 由于植被盖度 V 是定义在 $[0, 1]$ 之间的变量, 而侵蚀速度 E 定义区间是 $[0, \infty]$, 如果算得 $V < 0$ 则令 $V = 0$; $V > 1$ 则令 $V = 1$; $E < 0$ 则令 $E = 0$. 图 2(a), (b) 给出了植被侵蚀动力学方程组的计算曲线与实测植被覆盖度和侵蚀率滑动平均值的变化过程之对比. 二者符合得非常好, 说明植被和侵蚀率的演变过程完全可以用动力学方程组 (10) 式来描述.

小江是金沙江的支流, 位于云南高原的东北缘, 处于亚热带, 年均气温 20℃. 小江中下游为东川市, 面积 1881 km^2 , 年降雨量 688 mm, 上游超过 1000 mm. 该区山体破碎, 泥石流发育, 在 90 km 长河段里有 107 条泥石流沟. 流域内覆盖着大量的泥石流沉积物, 厚度达到 30~100 m. 降雨造成的地表土壤侵蚀十分严重, 侵蚀率达 1.3 万 $t/(km^2 \cdot a)$, 植被发育与侵蚀密切相关. 历史上小江流域曾经发育十分繁荣的植被, 由于该区富产铜矿, 自从清朝以来因炼铜植被不断受到破坏. 50 年代植被覆盖度还有 25%, 1958 年大炼钢铁期间砍伐林木炼铜又使覆盖度减少了 5%, 由于植被减少侵蚀增加导致植被的不断减少. 自 20 世纪 70 年代后期开始大量植树造林, 治理强度增加, 植被减少的情况缓和并且在 20 世纪 90 年代有所改善. 但在同时, 由于经济发展的要求, 开发矿产和道路建设以及城镇化使得侵蚀率上升. 根据野外调查和收集的资

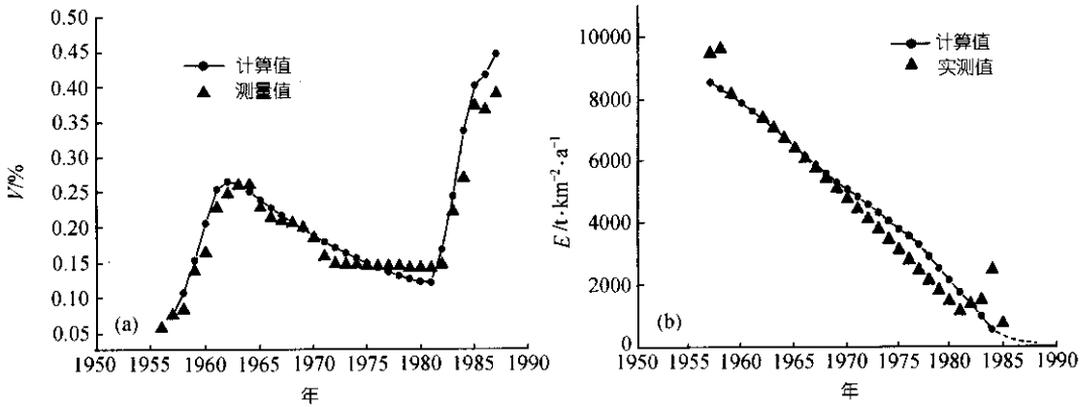


图 2 黄土高原安家沟流域植被覆盖度(a)和侵蚀率滑动平均值(b)的演变过程与植被侵蚀动力学方程组计算理论曲线的对比

料, 经过多次试算初步确定了这个地区的植被-侵蚀动力学参数:

$$a = 0.03(1/a); c = 0.000005(\text{km}^2/a); d = 0.054(1/a); f = 200(\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a}^2)), \quad (16)$$

该地区很少出现旱灾, 最主要的生态应力是人类活动. 从 20 世纪 50 年代到 20 世纪 70 年代, 除了 1958 年大量砍伐减少了 5% 的森林覆盖以外, 人类活动对植被和侵蚀的影响较小. 采用 1950~1957 年的 V 和 E 的平均值作为 1954 年的初始条件. 从 1979 年起, 人类绿化荒山, 同时以每年增加 $60 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a}^2)$ 的速度加速侵蚀, 并且强度逐年增强. 函数 $V_t(t)$ 和 $E_t(t)$ 为:

$$\left. \begin{aligned} V_t(t) &= -K_i(1958) + V_{t_0} \Delta(1979) e^{n(t-t_0)} \\ E_t(t) &= E_{t_0} \Delta(1979) e^{n(t-t_0)} \end{aligned} \right\}, \quad (17)$$

其中 $K_i = 0.05 \text{ a}^{-1}$, $V_{t_0} = 0.01 \text{ a}^{-1}$, $n = 0.1$, $E_{t_0} = 60 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a}^2)$. 将(17)式代入(11)式、(12)式, 可以得到理论解:

$$V(t) = c_1 e^{m_1 t} + c_2 e^{m_2 t} - K_{inst} \Delta(1958) + \Delta(1979) \frac{V_{t_0}(n-d) - cE_{t_0}}{(n-a)(n-d) - cf} e^{n(t-t_0)}, \quad (18)$$

$$E(t) = c_1 \frac{a-m_1}{c} e^{m_1 t} + c_2 \frac{a-m_2}{c} e^{m_2 t} + \Delta(1979) \frac{-fV_{t_0} + (n-a)E_{t_0}}{(n-a)(n-d) - cf} e^{n(t-t_0)}, \quad (19)$$

其中 t 是从 1954 年计起时间, $t - t_0$ 是从 1979 年计起的时间, m_1 和 m_2 由(14)式给出, c_1 和 c_2 由初始条件确定. 图 3 给出了理论解的曲线与实测结果的对比.

图 3 中理论解与实测结果符合得很好. 因为通过试算得到的参数值(16)式是由流域实测资料率定得到的, 适用于小江整个流域. 参数 a, c, d, f 决定于流域的气候、土壤条件和地形, 不因起始条件和人为应力的变化而不同. 因此, 这些参数应该可以应用于此流域中的子流域. 黑水河是小江支流大白河的一条支流, 长 3.9 km, 流域面积 9.94 km^2 , 平均坡度 11 度. 由于地处小江断裂带, 山体破碎, 水土流失十分严重, 经常发生滑坡泥石流. 1978 年开始重点治理, 其时覆盖度仅 7.6%, 侵蚀率高达 $7243 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$. 采用植树造林和建造一系列谷坊拦挡坝控制侵蚀双管齐下, 平均每年植树造林率高达 4%, 平均每年减少侵蚀率 $650 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$. 经过 20 年努力, 覆盖度增加到 70%, 而侵蚀率减少到 $200 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$. 采用植被-侵蚀动力学方程组的解来

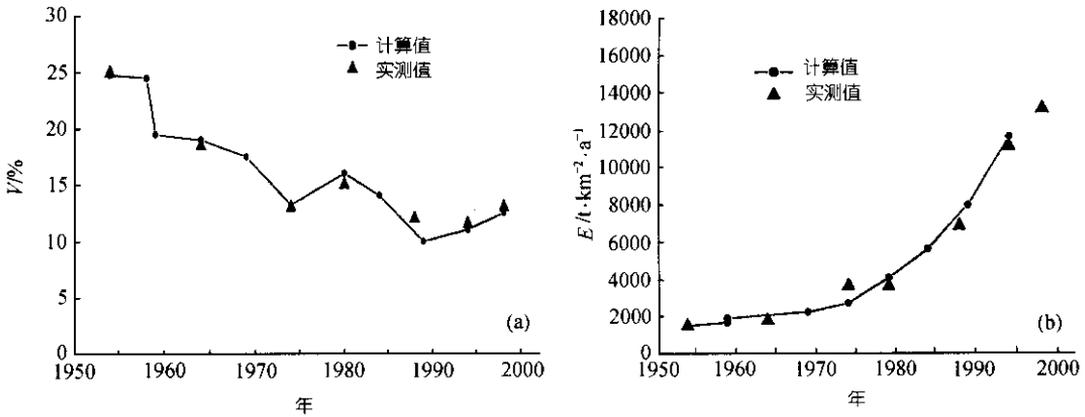


图 3 小江流域植被覆盖度(a)与侵蚀率(b)的演变过程理论解计算曲线与实测结果的对比

模拟这一过程, 由于黑水河是小江的子流域, 所有的参数都直接采用小江流域的参数值(16). 由理论解(11)、(12)式直接积分就可得出人工干扰条件下的覆盖度与侵蚀率的变化过程, 其中 $V_t = 0.04 a^{-1}$, $E_t = -650 t/(km^2 \cdot a^2)$. 一直算到 2000 年, 并将实测结果与之对比, 如图 4 所示.

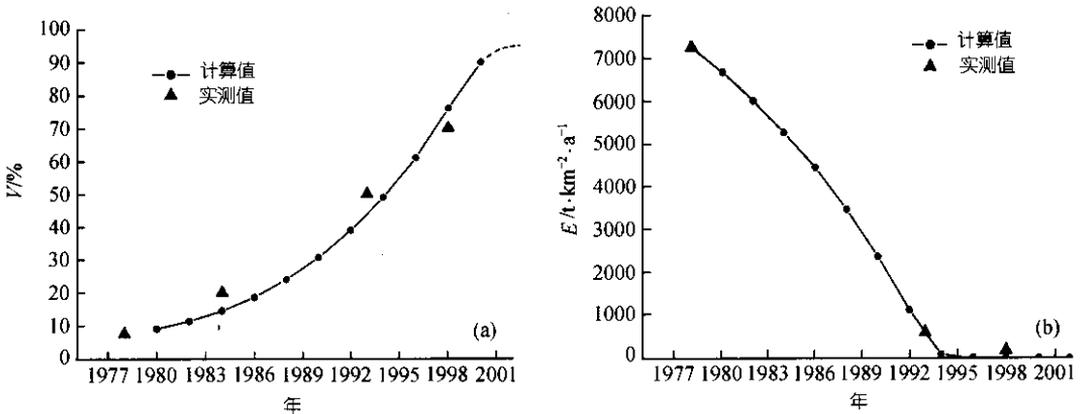


图 4 直接将小江流域植被-侵蚀动力学参数用于黑水河流域得出的植被覆盖度(a)和侵蚀率(b)演变过程理论解与实测结果的对比

4 植被-侵蚀状态图及其应用

利用植被-侵蚀动力学方程组可以作出植被-侵蚀状态图讨论植被和侵蚀在没有或停止人类干扰作用后的演变趋势. 在方程组(10)式中令生态应力项为零, 得到齐次微分方程组:

$$\left. \begin{aligned} V' &= aV - cE \\ E' &= dE - fV \end{aligned} \right\}, \tag{20}$$

其中 $V' = \frac{dV}{dt}$, $E' = \frac{dE}{dt}$ 分别为覆盖度的变化率和侵蚀率的变化率, 这个方程组将它们表示为 V 和 E 的函数. 在 $V \in [0, 1]$, $E \in [0, \infty)$ 的坐标平面上, V', E' 可以分别取正值或负值, 由此可把 V 和 E 为坐标的平面分成 3 部分, 划分边界即 $V'=0, E'=0$ 的两条直线. 在方程组(20)式中令左边为零, 得到这两条线为

$$E = \frac{a}{c}V; \quad E = \frac{f}{d}V, \quad (21)$$

如果知道参数 a, c, d, f 值, 就可以做出植被-侵蚀状态图. 如对于小江流域, 参数值由(16)式给出, 可以得出植被-侵蚀状态图(图 5). 图中 $V'=0, E'=0$ 的两条直线将 $V-E$ 坐标平面划分成 3 区:

A 区: $V' < 0, E' > 0$, 如果一个地区的植被-侵蚀状态处于该区, 在没有人类干扰条件下会向着侵蚀率增大和植被覆盖度降低方向自动发展. 显然, A 区愈大, 则流域愈不容易治理. A

区的大小依赖于 $\max\left\{\frac{a}{c}; \frac{f}{d}\right\}$ 值, 其值愈大, A 区愈小.

C 区: $V' > 0, E' < 0$, 处于该区的生态系统自动向着侵蚀率降低植被完善的方向发展. $\max\left\{\frac{a}{c}; \frac{f}{d}\right\}$ 值愈大, 良性循环的 C 区愈大. 处于此区的植被系统(如林区)在适量砍伐后仍会自动恢复.

B 区: $V' > 0, E' > 0$, 处于此区的植被-侵蚀状态不稳定, 植被和侵蚀率都增长. 如果侵蚀率增长得快或者人类活动破坏植被使系统进入 A 区, 生态系统就会自动向着侵蚀率增大、植被破坏恶性发展, 反之系统进入 C 区就会自动向着侵蚀率减小植被发育良性发展.

图 5 中标出了小江流域、黑水河流域和深沟流域目前的植被-侵蚀状态. 黑水河和深沟流域都是小江流域的子流域, 因此可以用同样的植被-侵蚀动力学参数作状态图. 黑水河和深沟流域经过 20 多年的重点治理, 植被-侵蚀状态从 A 区移到了 C 区, 且远离分界线. 如果没有较强的生态应力的破坏, 这两个流域都会自动逐渐向着植被完善的方向发展.

但是, 小江流域植被-侵蚀状态还处于 A 区, 有着向植被恶化侵蚀增大的发展趋势, 这在一定程度上抵消了人们治理改善的努力; 必须通过治理将其移到 C 区, 才能彻底改善生态环境. 图中的虚线给出了建议的治理途径. 首先要降低侵蚀, 将流域植被-侵蚀状态点下移入 B 区. 进入 B 区后系统自动增加植被, 此时加大植树造林和控制侵蚀的强度, 最终将流域植被-侵蚀状态移入 C 区.

类似地, 对于黄土高原安家沟流域, 参数值由(15)式给出, 可以得出植被-侵蚀状态图如图 6. 在此图中没有出现 B 区而有 D 区, 该区中 $V' < 0, E' < 0$, 处于此区的植被-侵蚀状态亦

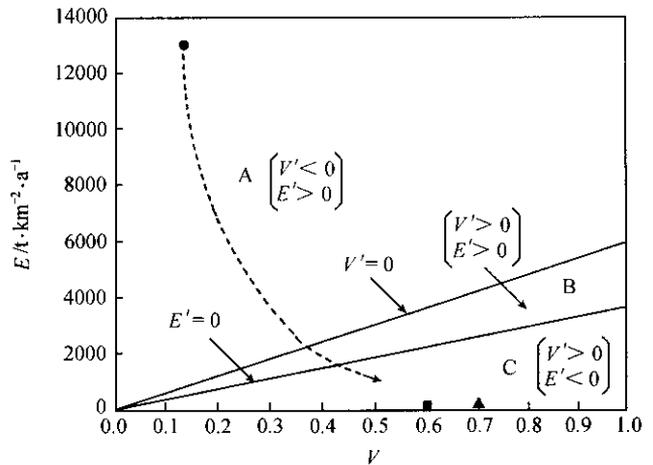


图 5 小江流域的植被-侵蚀状态图

●示小江流域目前的植被-侵蚀状态; ▲示黑水河流域治理后的植被-侵蚀状态; ■示深沟流域治理后的植被-侵蚀状态

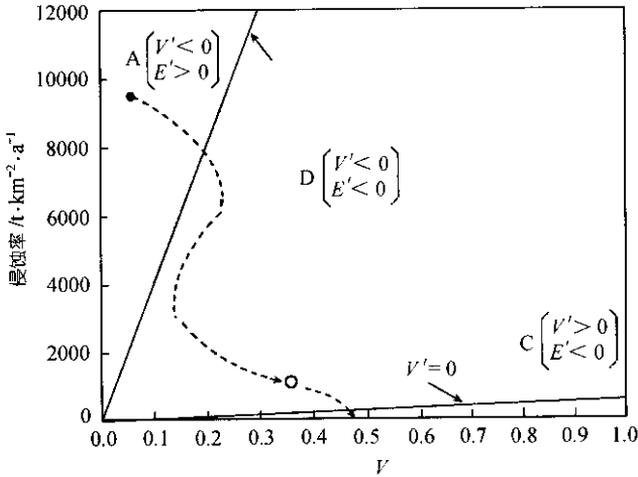


图 6 黄土高原安家沟流域的植被-侵蚀状态图

●示治理前的植被-侵蚀状态; ○示治理后的植被-侵蚀状态; →示治理与植被-侵蚀状态的演变过程

不稳定, 植被和侵蚀率都减少. 如果植被减少得快或人类活动破坏植被使系统进入 A 区就会恶性发展, 如果侵蚀率减少得快或人类植树造林使系统进入 C 区就会自动向着植被逐渐发育良性发展.

与小江流域不同, 黄土高原植被侵蚀状态图上 C 区很小. 分界线 $E' = 0$ 的斜率远高于 $V' = 0$, 说明增加植被对于减少侵蚀的作用远超过控制侵蚀对于促进植被发育的作用. 因此, 这一地区的治理应该首先植树造林增加植被, 使其进入 D 区. 安家沟流域治理前处于 A 区, 治理后进入 D 区. 此时即使停止治理、植被减少, 侵蚀率也会自动减少. 如果进一步植树造林和加速控制侵蚀可使系统最终进入 C 区, 如图中虚线和箭头方向所示. 但是由于 C 区很小, 较小的外应力作用都会使系统脱离 C 区. 即如安家沟流域, 几十年长期治理后, 植被增加了 8 倍, 侵蚀率减小了 90%, 但其生态系统仍处于不稳定的 D 区. 如果放松治理或者人为破坏仍然可能回到治理前的状态. 进一步的治理应以控制侵蚀和增加植被并重.

对比以上两图可以得出结论, 在雨量较丰气温较高的云南高原小江流域, 减少侵蚀对于促进植被发育有很好的作用, 或者说, 减少侵蚀是改善植被的重要措施. 系统进入 C 区后比较稳定, 林木长大后适量砍伐仍能保持系统处于健康发展状态. 而在比较干旱气温较低水土流失严重的黄土高原上, 增加植被能够明显的减少侵蚀, 但控制侵蚀对于促进植被发育没有太大的作用. 因此, 在这一地区, 植树种草可以作为控制侵蚀的重要方略. 但是由于 C 区很小, 即使植被已经大大改善, 仍然不稳定, 还需要不断的护理才能维持系统的良性状态.

5 结语

作用于植被的各种生态应力都可以定量表达并且可以统一在植被-侵蚀动力学方程组中. 方程组中的特征参数值 a, c, d, f 可以利用实测资料和多次试算来确定. 参数值确定后, 植被与侵蚀在各种生态应力和人类活动影响下的演变规律即可由方程组理论解定量模拟. 特征参数 a, c, d, f 依赖于流域的气候、土壤和地形地貌, 而与自然生态应力和人类活动无关. 因此流域的特征参数可以直接利用于子流域和具有同样自然条件的流域. 利用参数 a, c, d, f 和动力学方程组可以做出流域的植被-侵蚀状态图. 任一地区的植被系统都可能存在于 3 种状态, 即植被逐渐发育的自动良性循环状态(C 区)、植被退化的恶性循环状态(A 区), 和二者之间的过渡状态(B 区或 D 区). 人类干扰可将系统从一个状态改变到另一个状态, 所要施加的应力决定于离目标状态的距离和流域的植被-侵蚀动力学参数. 在雨量较丰气温较高的云南高原小江流域, 减少侵蚀是改善植被的重要措施, 植被改善后比较稳定. 而在比较干冷水土流失严重的黄土高原上, 增加植被能够明显的减少侵蚀, 但控制侵蚀对于促进植被发育没有太大的作

用。即使植被已经大大改善, 仍然不稳定, 还需要不断的护理才能维持植被的良性发育。

致谢 作者诚挚地感谢中国科学院西北水土保持研究所的郭彦彪工程师在收集论文资料中所给予的帮助。

参 考 文 献

- 1 Lal R. Global soil erosion by water and carbon dynamics. In: Lal R, Kimble J M, Levine E et al, eds. "Soils and Global Change". Boca Raton, CRC/Lewis Publishers, FL, 1995. 131~141
- 2 Lal R, Kimble J M. Soil Conservation for Mitigating the Greenhouse Effect, In: Blume H P, Eger H, Fleischhauer E, et al, eds. "Towards Sustainable Land Use". Germany, Catena Verlag GMBH, 1998. 185~192
- 3 毕慈芬, 乔旺林. 沙棘柔性坝在砒砂岩地区沟道治理中的试验. 沙棘, 2000, 13(1): 28~34
- 4 李 倬. 论林木的固沟减蚀作用. 泥沙研究, 1993, (1): 14~21
- 5 李 敏, 张 丽. 植物在黄河中游治理与开发中的作用. 见: 第三届海峡两岸水利科技交流研讨会论文集(下册). 北京: 中国水利水电科学院出版, 1997. 793~802
- 6 许炳心. 黄河中游多沙粗沙区的风水两相侵蚀产沙过程. 中国科学, D 辑, 2000, 30(5): 540~548
- 7 傅伯杰, 杨志坚, 王仰麟, 等. 黄土丘陵坡地土壤水分空间分布数学模型. 中国科学, D 辑, 2001, 31(3): 185~191
- 8 Wang Xiangdong, Wang Zhao-Yin. Effect of land use change on runoff and sediment yield. International Journal of Sediment Research, 1999, 14(4): 37~44
- 9 Bussotti F, Ferretti M. Air pollution, forest condition and forest decline in South Europe: an overview. Environmental Pollution, 1998, 101: 49~65
- 10 Monserud R A, Denissenko O V, Tchebakova N M. Comparison of Siberian paleovegetation to current and future vegetation under climate change. Clim Research, 1993, 3: 143~159
- 11 Svirzhev Y M. Simplest dynamic model of the global vegetation pattern. Ecological modelling, 1999, 124: 131~144
- 12 Maley J, Brenac P. Vegetation dynamics, palaeoenvironments and climatic changes in the forests of western Cameroon during the last 28000 years BP. Review of Palaeobotany and Palynology, 1998, 99: 157~187
- 13 Thornes J B. Environmental systems-patterns, processes and evolution, in: Gregory K J, Clark J, Eds. Horizon in Physical Geography. Macmillan, 1985. 27~46
- 14 刘树华, 刘和平. 森林冠层上下湍流谱结构和耗散率. 中国科学, D 辑, 1998, 28(10): 469~480
- 15 蔡光荣, 林金炳, 陈旺志. 植生根系力学模式应用于台湾西南部泥岩坡面冲蚀灾害之防治研究. 见: 崔鹏, 等主编. 海峡两岸山地灾害与环境保育研究. 成都, 四川科学技术出版社, 1998. 373~379
- 16 National Technical Information Service. Stream Corridor Restoration. US Department of Commerce. Springfield, 1999, VA 22161
- 17 周秀骥, 徐祥德, 颜 鹏, 等, 2000 年春季沙尘暴动力学特征. 中国科学, D 辑, 2002, 32(4): 327~334
- 18 叶振欧. 安家沟流域治理效益调查及分析. 见: 水土保持实验研究成果分析选编. 甘肃省定西地区水土保持研究所. 1986. 8~16
- 19 李斌荣. 安家沟小流域综合治理. 见: 水土保持实验研究成果分析选编. 甘肃省定西地区水土保持研究所. 1986. 20~35
- 20 张 富, 李登贵, 万庭朝. 安家沟小流域综合治理试验研究及效益分析. 见: 水土保持实验研究成果分析选编. 甘肃省定西地区水土保持研究所. 1986. 44~53