

侵蚀地区植被生态动力学模型

王兆印^{1,2}, 王光谦¹, 高 菁³

(1. 清华大学水利系, 北京 100084; 2. 国际泥沙研究培训中心, 北京 100084; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

摘要: 研究侵蚀地区的植被在水力侵蚀和各种生态应力以及人类活动影响下的演变规律, 建立了植被生态动力学模型。将作用于植被的各种生态应力分成长期、短期和瞬时应力, 给出了它们的定量表达式, 并且统一在植被生态动力学方程中; 同时进一步得出了动力学耦合方程组的理论解。该模型应用于金沙江支流小江流域, 结果较好地描述了流域的植被生态演变过程与侵蚀过程的关系, 说明了治理强度和控制侵蚀对植被发育的重要性。

关键词: 植被发育; 生态应力; 动力学模型; 耦合方程组; 控制侵蚀

An ecological dynamics model of vegetation evolution in erosion area

WANG Zhao-Yin^{1,2}, WANG Guang-Qian¹, GAO Jing³ (1. Department of Hydraulic and Hydro-electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. International Research and Training Center on Erosion and Sedimentation, Beijing 100084, China; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(1): 98~105.

Abstract: Vegetation dynamics is a new interdisciplinary science, studying the laws of evolution of watershed vegetation under the action of various kinds of ecological stresses, especially soil erosion. Ecological stress is defined as any kind of disturbance, natural or non-natural, on the vegetation development, which may change the vegetation cover or affect the evolution process of vegetation. Soil erosion is the most important natural ecological stress and human activities are the non-natural ecological stress. In the loess plateau of northwestern China, the vegetation is hardly developing because the extremely high rate of erosion tears down the topsoil, on which the vegetation grows. In the areas with vegetation, such as the upper reaches of the Yangtze River, erosion damages and destroys the vegetation and scars the land surface.

The ecological stresses impacting the vegetation are: (1) natural stresses, such as the erosion, drought, storm, eruption of volcano, and the damages by animals, as well as pests and diseases; (2) human stresses, such as air pollution, grazing, logging, reclamation, mining, road construction, and afforestation. Afforestation is positive stress and the rests are negative stresses. In addition, indirect stress like acid rain is also caused by human activities. In many areas human activities exert much stronger

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展规划资助项目(G199043604); 国家自然科学基金资助项目(59890200)。

收稿日期: 2002-01-01; **修订日期:** 2002-11-10

作者简介: 王兆印(1951~), 男, 山东济南人, 博士, 教授。主要从事河流动力学与水土保持研究

Foundation item: The study is supported by the National 973-project of the Ministry of Science and Technology (G199043604) and the National Natural Science Foundation of China(No. 59890200)

Received date: 2002-01-01; **Accepted date:** 2002-11-10

Biography: WANG Zhao-Yin, Doctor, Professor. Main research interests are river dynamics and soil erosion control



impacts on the vegetation than natural stresses. The ecological stresses can be classified as long term stresses, such as erosion, air pollution, and grazing, short-term stresses, such as drought, pests and diseases, and acid rain, or instant stresses, such as volcano eruption, forest fire, logging and wind storms. Vigor reduction and mortality of vegetation may result from short-term stress acting on trees that have been predisposed to injury by long-term ecological stresses.

Different from other stresses, soil erosion not only impacts the vegetation but is also affected by vegetation. In the nature, the development of vegetation cover and variation of soil erosion is affected with each other following a law of dynamics. For a watershed, vegetation and erosion may reach an equilibrium state if the circumstances maintain unchanged for a long period of time. However, the equilibrium is not stable. Ecological stresses, especially human activities, may disturb the balance and initiate a new cycle of dynamical processes. In this paper, the quantitative expressions of the long-term, short-term and instant ecological stresses are introduced based on the temporal characteristics of the stresses. Erosion is qualitatively represented by the rate of sediment eroded from unit area per year, and the vegetation is presented by ratio of vegetation cover, or simply vegetation cover, which is defined as the percentage of the area covered with trees and shrubs.

Thornes proposed a model of geomorphologic process considering the rate of variation of vegetation cover with coupled differential equations. Introducing the qualitative expressions of various ecological stresses and revising the Thornes geographical model, this paper established a vegetation dynamics model and derived the theoretical solution.

Data were collected from field investigations to the Xiaojiang Watershed on the Yunnan Plateau of south China. The vegetation dynamics model is well applied to the Xiaojiang Watershed, the Heishui River watershed and the Shengou Watershed. The theoretical solution agrees well with the data. The results demonstrate that the vegetation-erosion dynamics is a powerful tool for prediction of the vegetation evolution. Usually, reforestation and erosion control improves the watershed vegetation slowly in the first 10 years but much faster in the second 10 years, implying the effort of reforestation and erosion control must be a long-term strategy. Erosion control is very important for re-vegetating the hills. Mere planting trees and shrubs does not work well for greening the exposed land. The results also show that in the arid areas although people continuously reforest the hills and control erosion the vegetation cover is hardly improved.

Key words: vegetation dynamics model; human activities; coupled differential equations; vegetation cover; rate of soil erosion

文章编号:1000-0933(2003)01-0098-08 中图分类号:Q141 文献标识码:A

根据最近公布的全国第二次遥感调查结果,我国水土流失面积 356 万 km^2 ,其中水蚀面积为 165 万 km^2 。植树造林是控制侵蚀的重要措施。林草的生长和植被生态系统的形成遵循自然规律。植被发育依赖于当地的气候、降雨、土壤结构、母岩条件、地形、土壤侵蚀和土地利用类型等。植被还会受到各种生态应力的作用,如干旱、洪水、风暴、森林火灾、放牧、病虫害等各种自然灾害,以及大气污染、酸雨、采矿、道路建设、砍伐和人工造林等人类活动的影响。人类活动已经成为作用于植被的最直接、有时是最强大的生态应力。

侵蚀是影响植被发育并受植被反作用的一种生态应力。它的长期作用改变了地貌和土壤组成并在一定程度上决定了植被的发育。反过来,地表植被也是减少侵蚀的一个重要因素。黄土高原王家沟的林木植被,大量截留泥沙,在 120 多年里河床抬高 5m 多,使河床变宽浅,在河滩地上发育出大量灌木和水草^[1]。根据某些小流域植树种草控制侵蚀减少产沙量的调查显示,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%^[1]。黄土高原上侵蚀率随林木覆盖率几乎是直线减少, 当林木覆盖率大于 60% 时, 侵蚀率降到 0^[2]。

许多学者为了研究植被在各种生态应力作用下的演变, 提出了一些简化生态模型。一种方法是假定温度、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^[3]。第二种方法试图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^[4]。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, 首次给出了植被和侵蚀耦合的微分方程组。但是在他的模型中, 除了野生动物, 没有考虑其他生态应力的作用^[5]。

在这些简化模型中, 对生态应力没有进行定量的描述, 给出的植被和侵蚀的动力学变量多是概念上的而非数学上的。在自然状态下, 植被发育和土壤侵蚀这一对矛盾相互遏制、相互适应, 具有一定的动力学规律。在气候、土壤基本不变的条件下, 植被与侵蚀经过长期的相互作用达到一种平衡。但是这种平衡在外界的扰动下, 将有可能出现失衡。如砍伐森林、开矿、土地开垦和植树造林等人类活动都会破坏平衡, 引发这对矛盾新的斗争。植被、侵蚀和人类活动三者之间的斗争和调整过程存在一定的规律。本文提出一种新的模型来模拟植被在侵蚀和在各种生态应力(包括人类活动)作用下的动力学规律并应用于实际。

1 动力学模型

1.1 植被发育和生态应力

定量描述植被的发育程度, 可以采用乔木和灌木的密度、树冠透明度和树木的活力、单位面积内的生物量以及植物的年龄等指标。通常人们采用植被覆盖度来表示植被的发育程度, 定义为“乔木和灌木植物气生垂直投影所占地面的比例”。植被是由分层的、高大的乔木和较低的灌木以及矮小的杂草相互重叠组成。草的根系浅薄, 对于植被景观和抗侵蚀作用较之乔木和灌木为小且不稳定。根据植物根系对于侵蚀的控制作用的研究发现^[6], 乔木的根系强壮, 10% 的根系增加土体抗剪强度 0.3 kg/cm^2 , 而草本植物的作用要小的多。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。在雨量丰沛的西南地区, 当地水土保持部门统计资料中通常不把草计入植被覆盖度中。本文中植被覆盖度为乔木和灌木的覆盖度。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。

生态应力定义为植被生态系统所受到的源于自然灾害或人类活动的各种扰动, 这种扰动明显地影响或改变了原有植被生态系统的发育过程。影响植被发育的生态应力可以分为两大类: 一类是侵蚀、干旱、洪水、火山爆发、森林火灾以及野生动物、病虫害等自然应力; 另一类是空气污染、放牧、森林砍伐、开荒耕种、道路和矿山建设、植树造林、绿化荒山等人类活动施加的应力。植树造林为正应力, 其余均为负应力。在许多地区, 人类活动的影响已经超过自然应力的影响。为了定量描述各种生态应力, 可将其分为长期应力(作用时间为 10a 或更长)、短期应力(数月到数年)和瞬时应力(小时至数天)。侵蚀、空气污染和放牧等为长期应力; 干旱和病虫害等为短期应力; 火山爆发、森林火灾、砍伐和风暴等为瞬时应力。

空气污染引起的长期生态应力可以用数学式表达:

$$A_r = (A - A_0)/A_0 \quad (1)$$

式中, A 为空气污染浓度, A_0 为空气污染的长期平均浓度。此处“长期”指的是植被发育的长期过程, 通常为几十年到百年以上。其它长期生态应力如过度放牧可类似定义。

短期生态应力影响时间短但强度大, 比如干旱造成的生态应力, 可设为当年降雨量与长期平均降雨量相对差的高次方:

$$P_r = ((P - P_0)/P_0)^n \quad (2)$$

式中, P 为当年降雨量, P_0 为长期平均年降雨量。对于西部大部分地区, 尤其是西北干旱半干旱地区, 降雨

1. 李敏, 张丽. 植物在黄河中游治理与开发中的作用. 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, 1997, 793~802

量的增加将促进植被发育,此应力为正值;如果降雨量减少发生旱灾,则此应力为负值。指数 r 要用实测数据来率定。

瞬时生态应力可以利用阶梯函数 $\Delta(t)$ 的导函数,即脉冲函数 $\delta(t)$ 来表示:

$$f_r = K_{\text{inst}} \delta(t) = K_{\text{inst}} \frac{d\Delta(t)}{dt} \quad (3)$$

$$\Delta(t) = \int_0^t \delta(\tau - t_0) d\tau = \begin{cases} 0, \dots, t < t_0 \\ 1, \dots, t > t_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, t 为时间, K_{inst} 是由于 t_0 时发生的瞬时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,变成光秃秃的山丘,历经 20a 后,植被仍未恢复。如果忽略其它应力,此过程可用下式简单描述:

$$\frac{dV}{dt} = -K_{\text{inst}} \delta(t_0 = 1980) \quad (5)$$

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 $K_{\text{inst}} = 0.8 \text{ a}^{-1}$ 。积分后,可得到植被演变过程为:

$$V(t) = \begin{cases} 0.8 & \text{before 1980} \\ 0 & \text{after 1980} \end{cases} \quad (6)$$

森林砍伐应力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,云南小江流域的植被覆盖度降低了 5%,则对植被的应力为: $f_r = K_{\text{inst}} \delta(1958)$, $K_{\text{inst}} = 0.05 \text{ a}^{-1}$ 。灾难性的大风造成的生态应力可以同样描述。

植树造林是最有影响的正值生态应力。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:

$$F_r = V_R(t) \quad (7)$$

当然,新种植的树木不能象成年树木一样起作用,但是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。

1.2 植被生态动力学方程

Thornes 对于植被与侵蚀的相互过程提出耦合数学方程组^[3]:

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= (a - bV)V - cE \\ \frac{dE}{dt} &= dE - fV \end{aligned} \quad (8)$$

式中, V 代表植被覆盖率, E 代表侵蚀率。 a, c, d, f 是气候、降雨量、土壤和地貌等环境因子的函数,对于某一流域或地区,可取为常数。 b 代表食草类动物的作用对参数 a 的降低,研究区域是人类活动频繁的地区,因此不考虑动物对植被生态系统的影响,设 $b=0$ 。

利用 Thornes 的耦合方程组,引入生态应力的表达项和相应的侵蚀率的变化项,考虑长期、短期和瞬时生态应力项,并考虑植树造林所产生的正值生态应力 $F_r = V_R$,同时假设这些生态应力对植被的影响是相互独立的,侵蚀率的变化项表达为 E_R ,由此得出植被生态动力学方程组:

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} - aV + cE &= K_p P_r - K_u A_r - K_{\text{inst}} \delta(t_0) + V_R \\ \frac{dE}{dt} - dE + fV &= E_R \end{aligned} \quad (9)$$

方程组中系数 $K_p, K_u, K_{\text{inst}}$ 和 V_R 要用实测资料来确定。如果知道 P_r, A_r, t_0 和 V_R ,且确定了系数 K_p, K_u 和 K_{inst} ,则在生态应力作用下的植被演化就可由方程组(9)确定。在许多情况下,只有一到两种应力对植被的影响占主导地位,可对方程组进行简化。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。

侵蚀率 E 通常取为每年单位面积内泥沙侵蚀量。此处 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 年到第 15 年的实测侵蚀率的平均值, 而第 11 年的 E 值等于第 7 年到第 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。为便于表达, 本文仍称 E 为侵蚀率。

方程组 (9) 是非齐次线性微分方程组, 可以得出理论解。相应的齐次方程组为:

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} - aV + cE = 0 \\ \frac{dE}{dt} - aE + fV = 0 \end{cases} \quad (10)$$

该微分方程组很容易求得解:

$$\begin{cases} V = c_1 e^{m_1 t} + c_2 e^{m_2 t} \\ E = c_1 \frac{a - m_1}{c} e^{m_1 t} + c_2 \frac{a - m_2}{c} e^{m_2 t} \end{cases} \quad (11)$$

其中, m_1, m_2 为:

$$m_{1,2} = \frac{1}{2} [(a + d) \mp \sqrt{(a + d)^2 - 4(ad - cf)}] \quad (12)$$

其中, c_1 和 c_2 是由边界条件和初始条件确定的常量。

式 (11) 是未受生态应力影响区域的植被生态动力学方程组的解。在绝大多数情况下, 生态应力会很大程度地改变植被的演化进程。在这种情况下, 式 (11) 加上一个非齐次微分方程组 (9) 的特解, 即植被生态动力学方程组的理论解:

$$V = c_1 e^{m_1 t} + c_2 e^{m_2 t} + e^{m_1 t} \int [e^{-m_1 t} e^{m_2 t} \left(\frac{dV}{dt} - dV - cE \right) dt] dt \quad (13)$$

$$E = c_1 \frac{a - m_1}{c} e^{m_1 t} + c_2 \frac{a - m_2}{c} e^{m_2 t} + e^{m_1 t} \int [e^{-m_1 t} e^{m_2 t} \left(\frac{dE}{dt} - aE - fV \right) dt] dt \quad (14)$$

式中,

$$\begin{cases} V_t = K_p P_t - K_d A_t - K_{m1} \delta(t_0) + V_R \\ E_t = E_R \end{cases} \quad (15)$$

对某一流域或地区, 如果已知生态应力, 将 V_t, E_t 代入理论解式 (13) 和 (14) 可得出植被与侵蚀的演变过程。

2 模型的应用

小江是金沙江的支流, 位于云南高原的东北缘, 处于亚热带, 年均气温达到 20℃。小江中下游为东川市, 面积 1881 km², 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 河长内有 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, 侵蚀率达到 13000 t/(km²·a), 植被发育与侵蚀密切相关。为了研究这个地区植被生态动力学特征, 作者连续三年夏季到小江流域观测和收集资料。表 1 给出了小江流域中下游的东川地区森林覆盖度与侵蚀率的演变资料。

根据野外调查和收集的资料, 初步确定了这个地区的植被生态动力学参数:

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

利用这些参数, 可以代入动力学方程的解中计算和预测植被和侵蚀的演变。该地区很少出现旱灾, 放牧的影响有限, 空气污染对植被的影响很小。因此, 最主要的生态应力为森林砍伐、植树造林、道路建设和采矿等人类活动。从 20 世纪 50 年代至 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,

表 1 小江流域中下游(东川地区)森林覆盖度与侵蚀率的演变

Table 1 Vegetation cover and the rate of soil erosion in the middle and lower reaches of the Xiaojiang River (Dongchuan District)

年代 Period	代表年份 Year	侵蚀率 (t/(km ² ·a)) Rate of soil erosion	森林覆盖度 (%) Vegetation cover	人类活动 Human activities
1950~1957	1954	1500	25	
1961~1966	1964	1804	18	大跃进期间砍伐森林造成 5% 覆盖度损失 ¹
1970~1979	1974	3648	13.6	
1986~1989	1988	6859	11.4	1979 开始植树造林, 覆盖度不再下降 ²
1990~1997	1994	11100	10.0	每年平均植树造林率达到 2.4% ³
1998	1998	13145	13.3	

* 以上数据是根据野外调查和从中国科学院东川泥石流观测站以及东川市提供的各种材料中整理得到 The data in the table were collected from field investigation, the Dongchuan debris flow observation station of CAS and the local government. 1. Logging in 1958 caused 5% of reduction in vegetation cover.; 2. A reforestation project for the whole watershed was launched in 1979; 3. The annual rate of reforestation maintained at 2.4%.

每年绿化 1% 的荒山, 同时, 由于道路建设、采矿和其他活动, 以每年增加 60 t/(km²·a²) 的速度加速侵蚀。这种影响是一年比一年增强。因此, 函数 $V_r(t)$ 和 $E_r(t)$ 为:

$$\left. \begin{aligned} V_r(t) &= -K_{int}\delta(1958) + V_{r_0}\Delta(1979)e^{n(t-t_0)} \\ E_r(t) &= E_{r_0}\Delta(1979)e^{n(t-t_0)} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

其中, $K_{int}=0.05 \text{ a}^{-1}$, $V_{r_0}=0.1 \text{ a}^{-1}$, $n=0.01$, $E_{r_0}=60 \text{ (t/km}^2 \cdot \text{a}^2)$ 。将式(17)代入式(13)、(14), 可以得到解为:

$$V(t) = c_1 e^{m_1 t} + c_2 e^{m_2 t} - K_{int}\Delta(1958) + \Delta(1979) \frac{V_{r_0}(n-d) - cE_{r_0}}{(n-a)(n-d) - cf} e^{n(t-t_0)} \quad (18)$$

$$E(t) = c_1 \frac{a-m_1}{c} e^{m_1 t} + c_2 \frac{a-m_2}{c} e^{m_2 t} + \Delta(1979) \frac{-fV_{r_0} + (n-a)E_{r_0}}{(n-a)(n-d) - cf} e^{n(t-t_0)} \quad (19)$$

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 由式(12)给出, c_1 和 c_2 由初始条件确定。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 $V = 0$; 如果算得 $V > 1$, 则令 $V = 1$; 如果算得 $E < 0$ 则令 $E = 0$ 。图 1 给出了理论解(18)、(19)与实测结果的对比。考虑到大规模的植树造林始于 1979 年, 因此图中设 1979 年的植被覆盖度和侵蚀率与 1974 年的相应数值相等。

图 1 中理论解与实测结果符合好并不出乎意外, 因为所有参数都是由此流域实测资料率定得到的。但是当把理论解和同样这些参数直接应用到流域中情况各不相同的小流域时, 发现理论结果与这些小流域

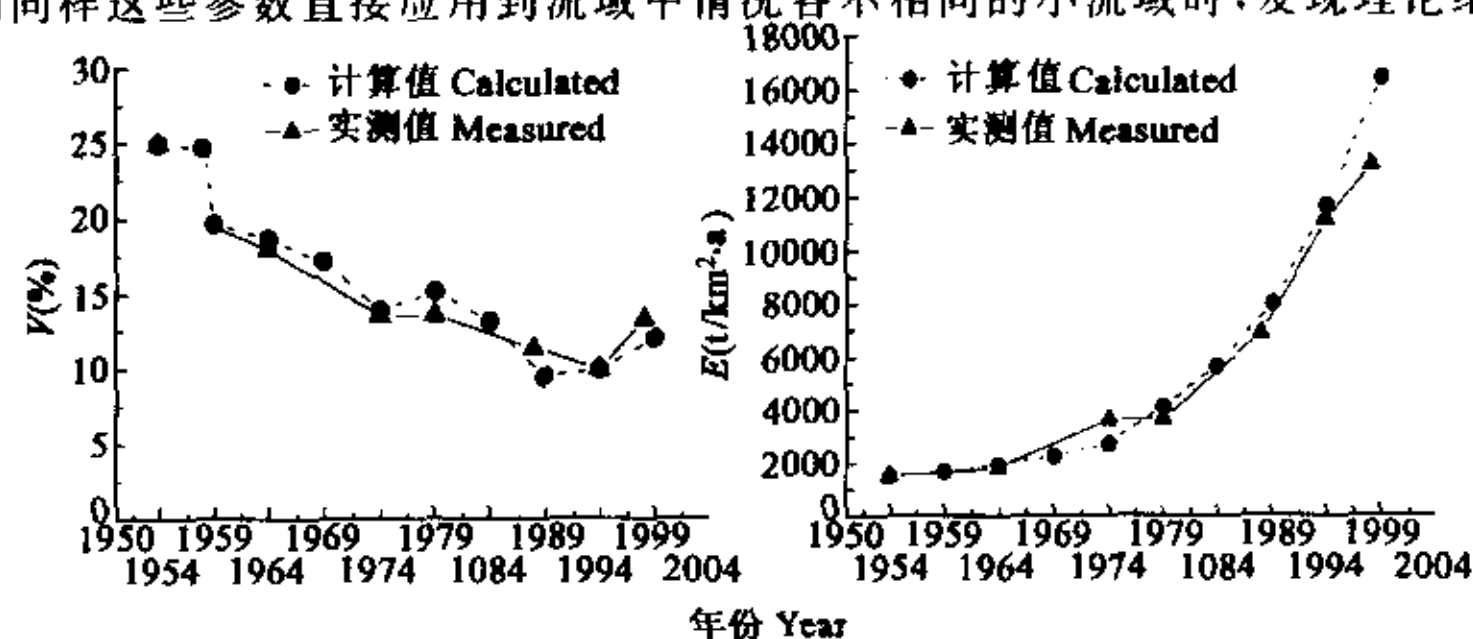


图 1 小江流域植被覆盖度与侵蚀率的演变过程理论解与实测结果的对比

Fig. 1 Comparison of the theoretical solution of the vegetation dynamics model with the measured vegetation cover and rate of soil erosion in the Xiaojiang Watershed

和支沟植被的实际发育过程吻合甚好。黑水河是小江支流大白河的一条支流,长 3.9km,流域面积 9.94km²,平均坡度 11°。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 t/(km²·a)。采用植树造林和建造一系列谷防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 t/(km²·a)。经过 20 年的努力,覆盖度增加到 70%,而侵蚀率减少到 200 t/(km²·a) 以下。采用植被生态动力学方程组的解来模拟这一过程,由于这是小江流域的一部分,气候和土壤条件都相同,所有的参数都与式(16)相同。由理论解(13)、(14)计算人工干扰条件下的覆盖度与侵蚀率的变化,其中 $V = 0.04 a^{-1}$, $E_r = -650(t/(km^2 \cdot a^2))$ 。一直算到 2002 年,并将实测结果与之对比,如图 2 所示。动力学方程计算曲线准确地模拟了覆盖度和侵蚀率的演变过程。计算结果说明,采用控制侵蚀植树造林双管齐下,开始时效果较慢,坚持几年后覆盖度增加和侵蚀率减少的变化速率愈来愈快。

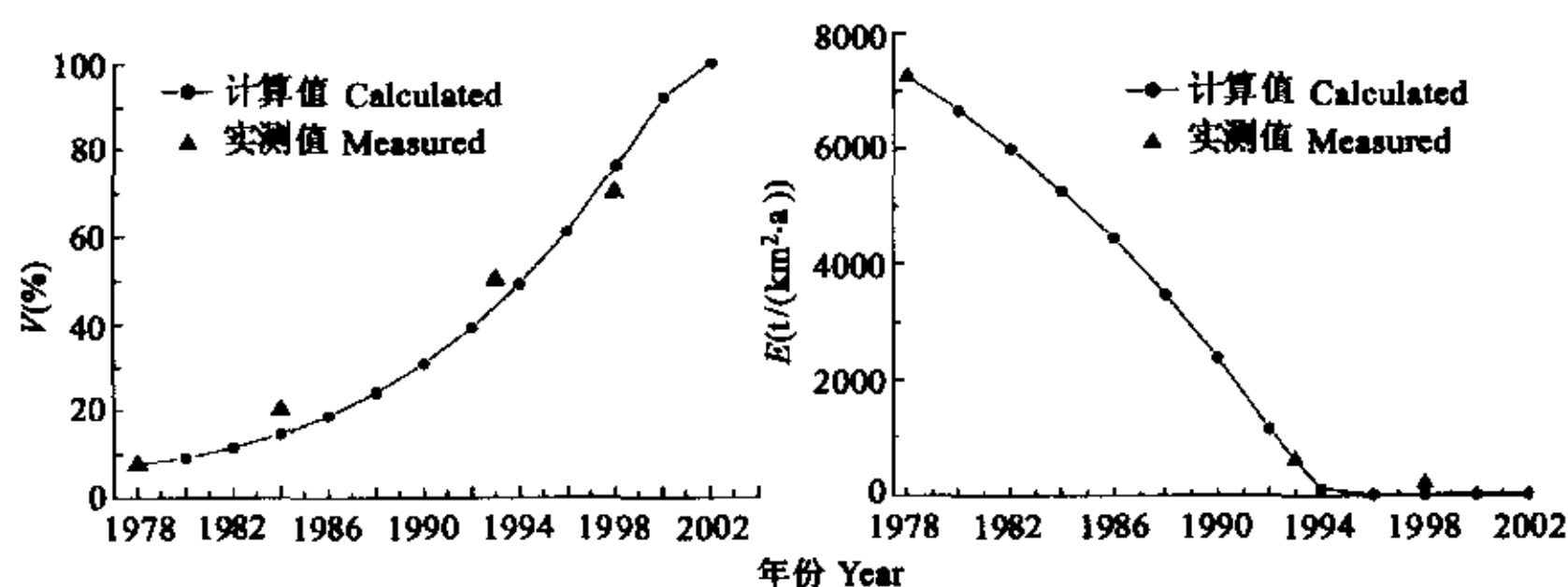


图 2 黑水河流域植被覆盖度与侵蚀率的演变过程与植被生态动力学模型计算结果的对比
(图中黑三角点为实测值,曲线为计算值)

Fig. 2 Comparison of the evolution process of vegetation and erosion of the Heishuihe Watershed with the theoretical solution (Black pyramids are the measurement, round points and the curves are theoretical solution)

类似地,图 3 给出了紧靠东川市的深沟流域的计算结果。1976 年开始重点治理之前,深沟流域植被覆盖度仅 6%,侵蚀率达 8000 t/(km²·a),曾经频繁发生泥石流,对东川市造成很大威胁。1976 年开始植树造林和建造 200 多谷防控制侵蚀双管齐下,平均每年植树造林率高达 4%,减少侵蚀率 700 t/(km²·a)。经过 20a 努力,覆盖度增加到 60%,而侵蚀率减少到 150 t/(km²·a),没再发生泥石流。采用植被生态动力学模型的解(13)(14)来计算,参数与公式(16)相同, $V_r = 0.04 a^{-1}$, $E_r = -700(t/(km^2 \cdot a^2))$,结果如图 3 所示。

人类活动对植被发育的影响在不同地区差别很大,这种差别主要反映在特征参数 a 、 c 、 d 、 f 上。小江流域气候温暖、雨量较丰,植树造林和控制侵蚀治理效果明显。但对于干旱地区,由于水源限制,可设 $a = 0$;土

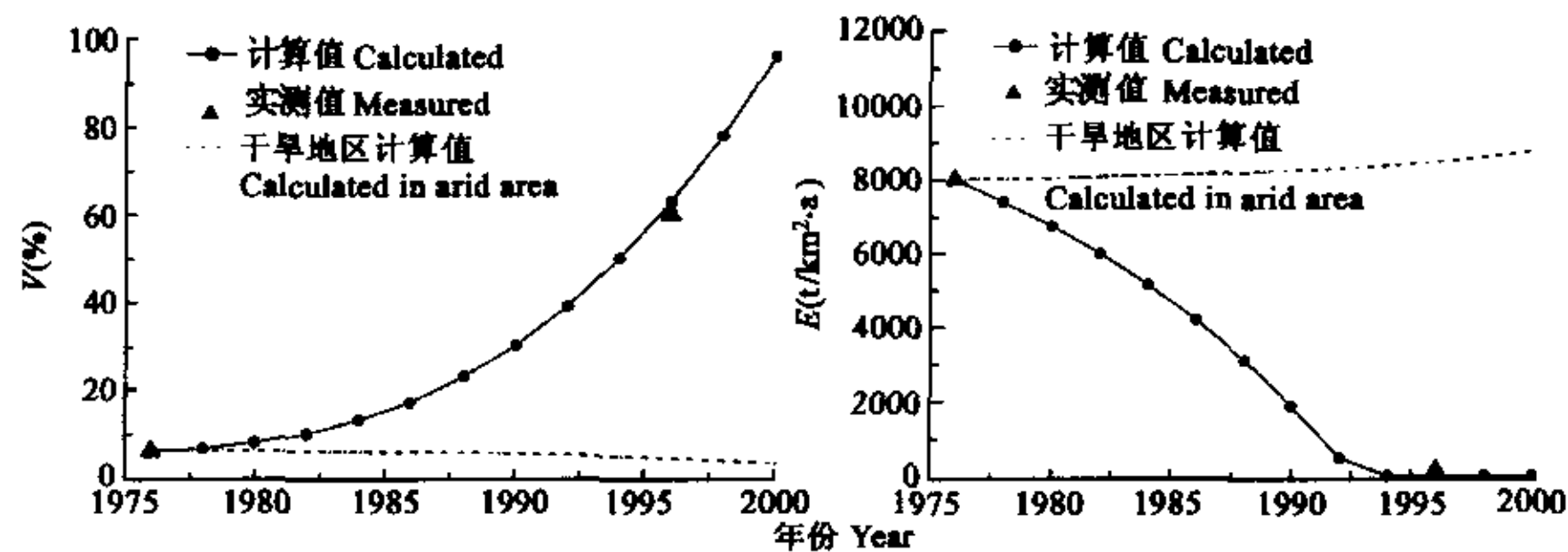


图 3 深沟流域植被覆盖度与侵蚀率的演变过程与植被生态动力学模型计算结果的对比

Fig. 3 Comparison of the evolution process of vegetation and erosion of the Shengou Watershed with the theoretical solution

表层破坏加剧侵蚀的作用较明显,设 $d=0.09$ (1/a);其它参数和治理强度不变。用公式(13)、(14)计算出结果如图3中虚线所示。尽管采用同样强度的植树造林和控制侵蚀措施,但由于自然条件恶劣,覆盖度没有改善侵蚀率也没有减少。因此,对于不同的自然条件,改善植被生态环境所需要的投入是很不同的。对自然条件较差的地区,如果治理达不到足够的强度,仍然改变不了植被生态生态系统恶化的局面。

3 结论

流域植被受到自然和非自然生态应力的作用,这些生态应力都可以定量表达并可统一在植被生态动力学模型中。通过实测资料确定植被生态动力学特征参数后,流域植被在土壤侵蚀和人类活动影响下的演变规律即可由模型定量描述,并由式(13)、(14)给出理论解。植被生态动力学模型较好地描述和预测了小江流域植被与侵蚀的演变过程,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。人类活动对植被发育的影响在不同地区差别很大,小江流域气候温暖、雨量较丰,植树造林和控制侵蚀治理效果明显。但对于干旱地区,采用同样强度的植树造林和控制侵蚀措施,难以达到改善植被覆盖度的效果。

References

- [1] Li Z. The effects of forest in controlling gully erosion. *Journal of Sediment Research*, 1993, 1: 14~21.
- [2] Wang X D, Wang Z Y. Effect of land use change on runoff and sediment yield. *International Journal of Sediment Research*, 1999, 14 (4): 37~44.
- [3] Monserud R A, Denissenko O V and Tchebakova N. M. Comparison of Siberian paleovegetation to current and future vegetation under climate change. *Climate Research*, 1993, 3: 143~159.
- [4] Svirechev, Yuri M. Simplest dynamic model of the global vegetation pattern. *Ecological Modeling*, 1999, 124: 131~144.
- [5] Thornes J B. Environmental systems-patterns, processes and evolution. In K. J. Gregory and J. Clark eds. *Horizon in Physical Geography*. Macmillan. 1985. 27~46.
- [6] Tsai K, Lin J, and Chen W. An application of root mechanical model on the mudstone slope erosion control in Southwestern Taiwan. In: Cui P, et al. eds. *Researches on Mountain Disasters and Environmental Protection Across Taiwan Strait*. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1998. 373~379.

参考文献

- [1] 李倬. 论林木的固沟减蚀作用. 泥沙研究, 1993, 1: 14~21.
- [2] 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.