

# 山地稳定性研究的动态数值模型

郑国璋 张爱国 张淑莉 马志正

(山西师范大学地理系 山西临汾 041004)

**提 要** 把山地稳定性与外界干扰作为一对基本矛盾,通过基本假定和参量选择,建立了山地稳定性强度与外界干扰强度相关变化的动态数量模型;在稳定性分析和演化方向分析的基础上,通过模拟计算,初步总结出有关山地稳定性演化和稳定性维护的五条结论。

**关键词** 稳定性强度 过程的非同步性 序参量 敏感生态因子

**分类号** 《中图法》P931.2 **文献标识码** A

## 1 建立模型

根据耗散结构的概念及其形成条件(“非平衡有序性”、“开放性”、非线性”<sup>[1]</sup>),我们把山地生态系统视为一种耗散结构系统。具体地说,山地生态系统都是由非平衡相变形成的有序结构,这为其形成耗散结构提供了可能性;现实的山地生态系统都是开放系统,这是形成耗散结构的必要条件;山地生态系统与外界之间存在着复杂的非线性作用机制,这是其形成和作为耗散结构系统的充分条件。根据耗散结构理论的基本思想,具有耗散结构的山地生态系统,其演化过程尤其是其稳定状态与外界干扰之间的相关变化过程,必然遵从一般性耗散结构系统的演化规律。

为了列出具体的演化方程,我们需要两项工作:1. 假设条件。现实的山地系统大多数是一种自然与人为生态系统,为了模型分析的方便,我们把其抽象为一种自然生态系统,而把山系统中的人为因素连同影响特定山系统的所有区外自然因素视为“外界干扰因素”,这样处理的目的是便于进行山地自然生态系统内部稳定性与外部干扰之间的矛盾分析;2. 选择参量。选择参量的基础是定性分析,对于山地稳定性<sup>1)</sup>的定性分析,我们的基本思路是:一、根据山地稳定性的定义,用稳定性强度(以上简称为“稳定度”)表示山地自然生态系统自身所具有的抗外界干扰能力(和恢复能力)的强弱,用外界干扰强度(以下简称“干扰度”)表示来自山地自然生态系统以外的所有外界因素的干扰力度;二、用山地稳定度的变化来描述山地稳定性的演化的动态过程,而前者又取决于外界干扰力度与内部抗干扰力度的对比关系;三、外界干扰来自区内外的人类干扰和区外自然条件干扰,为了突出政策法规的约束效应,特以人为约束参量反映之。根据影响山地稳定度变化的四大要素(系统内部的结构参量、功能参量和生态因子参量,外界干扰系统参量),以及影响外界干扰度的三大要素(外界自然干扰因子、人为正比例干扰因子和人为约束参量),可以建立动态数量模型的参量体系。

基于以上工作,我们采用如下模型反映山地稳定度( $y$ )与干扰度( $x$ )相关变化的动态过程

1) 山地稳定性是指山地生态系统受到外界干扰影响没超过系统本身的阈值时,系统可以通过其本身功能自动调节并消除干扰,最终恢复到初状态的能力。本模型借鉴了著名的 Smith 生态模型形式,并根据山地生态系统演化过程中具有的独特参量体系,对 Smith 模型进行了修正。



$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = ry + iy - ay^2 - cx \\ \frac{dx}{dt} = bx + dx - ex^2 \end{cases}$$

式中  $r$ , 生物群落的结构参量(可用植物群落的种类结构对于山地稳定度变化的贡献值来标度);  $i$ , 生物群落的功能参量(可用常态下通过系统单位现存量的能量通量均值对于山地稳定度变化的贡献的值来标度);  $a$ , 生态因子参量(用各种生态因子对于外界干扰的敏感程度来标度);  $c$ , 外界干扰系统参量(可用外界干扰度对于山地稳定度变化的贡献的值来标度);  $b$ , 外界自然干扰因子参量(可用一定时段内特定的山地系统与区外自然界的物质输入—输出系数对于干扰度变化的贡献值来标度);  $d$ , 人为正比例干扰因子参量(可用山区自然资源平均利用率来标度);  $e$ , 人为约束参量(可用限制性政策法规在干扰度变化过程中的影响权重来标度)。

上述参量除  $e$  之外, 均可用统计方法直接获得原始数据, 再经过数据同一处理, 最终成为无量纲的、 $\Delta > 0$  的相对指数。对于人为约束参量  $e$ , 可由以下计算方法结合有关数据的统计工作间接获得

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = bx + dx - ex^2 = 0 \\ x(\Delta t) = x_0 \quad b = b_0 \quad d = d_0 \text{ (初始条件),} \end{cases}$$

即当外界干扰度外于稳定状态时,  $\Delta t$  时段内的  $dx/dt = 0$ , 所以有  $e = (b_0 + d_0)/x_0$ 。

统计方法是, 在特定时段内, 在研究样方中人工控制外界干扰度, 使其保持稳态值  $x_0$ , 统计出该时段内的外界自然干扰项权重均值  $b_0$  和人为正比例干扰项权重均值  $d_0$ , 最后依  $e = b_0 + d_0/x_0$  计算出  $e$  值。

上述模型的物理意义是: 1. 山地稳定度  $y$  的动态演变方向(即  $dy/dt$ ) 取决于两种互为相反的力量对比, 一是系统内部的抗干扰力( $ry + iy - ay^2$ ), 一是外界干扰力( $cx$ ); 系统内部的抗干扰力由生物群落的结构参量  $r$  和功能参量  $i$ 、生态因子参量  $a$  所决定; 2. 干扰度  $x$  的动态变化( $dx/dt$ ) 受两个性质相反的力量影响, 即与  $dx/dt$  成正相关的“强化”干扰项( $(b + d)x$ ) 和与  $dx/dt$  成负相关的“弱化”干扰项  $ex^2$  有关。

## 2 分析模型

### 2.1 稳定性分析

建立上述模型的目的之一是, 知道在什么样的参量组合条件下, 山地稳定性和干扰度可能暂时处于不随时间变化的相对稳态, 这就需要对模型方程进行稳定性分析。稳定性分析包括两个步骤, 先是求出方程的平衡点, 然后进行稳定性判断。令  $dy/dt = 0, dx/dt = 0$  则有

$$\begin{cases} ry + iy - ay^2 - cx = 0 \\ (b + d)x - ex^2 = 0 \end{cases},$$

解得五个模型平衡点:  $(0, 0)$ ,  $(\frac{b+d}{e}, 0)$ ,  $(0, \frac{r+i}{a})$ ,  $(\frac{b+d}{e}, \frac{r+i}{2a} - \frac{\sqrt{\Delta}}{2a})$ ,  $(\frac{b+d}{e}, \frac{r+i}{2a} + \frac{\sqrt{\Delta}}{2a})$ 。其中  $\Delta = (r+i)^2 - 4ac\frac{b+d}{e}$ 。这几个平衡点表示山地稳定度和干扰度同时可能处于不随时间变化的瞬间状况, 然后进行平衡点上的稳定性判定, 尽管上述 5 组解均为模型的平衡点, 但  $(0, 0)$ ;  $(\frac{b+d}{e}, 0)$ ;  $(0, \frac{r+i}{a})$  这三个平衡点对于本文研究没有意义, 而其它两个平衡点的  $x$  和  $y$  值都大于零, 所以具有研究价值, 依据耗散结构稳定性判断方法<sup>[1]</sup>, 得出如下判断(详细计算过程从略)。



( $\frac{b+d}{e}, \frac{r+i}{2a}-\frac{\sqrt{\Delta}}{2a}$ ) 为稳定的平衡点( $v$  点, 参图 1)。表明山地生态系统达到稳定状态时, 外界于扰度为  $\frac{b+d}{e}$ , 对应的山地稳定度为  $\frac{r+i}{2a}-\frac{\sqrt{\Delta}}{2a}$ ; ( $\frac{b+d}{e}, \frac{r+i}{2a}+\frac{\sqrt{\Delta}}{2a}$ ) 为不稳定的鞍点( $u$  点)。

2.2 演化方向分析

建立数学模型的目的之二是, 知道在什么样的稳定度和干扰度对比关系下, 山地稳定性加强或减弱。上述不稳定鞍点的存在, 首先表明地稳定性变化的动态特征, 对于非平衡点而言, 山地稳定性的演化方向及其条件分析如下: 稳定性

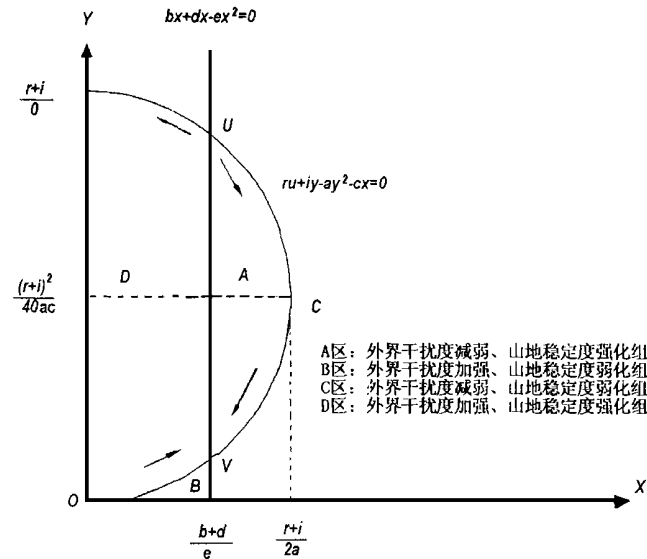


图 1 外界干扰度—山地稳定度相关变化的相平面分区图

Fig. 1 The areas of the mutual change between the outside interfering intensity and the stability intensity in mountainous region

加强的条件是:  $\frac{r+i}{2a}-\frac{\sqrt{(r+i)^2-4acx}}{2a}$ ; 稳定性减弱的条件是:  $y < \frac{r+i}{2a}-\frac{\sqrt{(r+i)^2-4acx}}{2a}$  或  $y > \frac{r+i}{2a}+\frac{\sqrt{(r+i)^2-4acx}}{2a}$ 。

如果再把干扰度加强 (即  $\frac{dx}{dt} > 0$ , 当  $0 < x < \frac{b+d}{e}$  时) 干扰度减弱 (即  $\frac{dx}{dt} < 0$ , 当  $x > \frac{b+d}{e}$  时) 两种趋势考虑进来, 我们就可以作出相平面上外界干扰与山地稳定度之间相关变化的演化方向组合分区图 (图 1)。

3 主要结论

在上述模分析的基础上, 再进行模拟计算。模拟过程主要是对同一类参量进行不同参量标志的变换 (例如, 在同一“生态因子参量”类型中, 分别用温度、降水、土壤水分等“参量标志”进行变换), 对同一参量标志分别取值, 甚至同时变换几类参量、几项标志和几组取值, 以全面反映参是严型、参量标志和参量取值的不同条件组合下, 它们对山地稳定度和干扰度变化的影响程度。

通过模型分析和模计算, 我们获得以下结论。

3.1 山地稳定性变化过程和外界干扰过程的非同步性

表现在两个方面:

1 演化方向上的或然性, 外界干扰度加强, 可能对应着山地稳定度的不变、强化、弱化三种发展方向; 外界干扰度不变或减弱, 也都对应着山地稳定度变化上的三种可能性, 这与以前人们获得的“要使山地稳定性加强, 必须减少包括人类活动在外的外界干扰”之类的结论明显不同。山地稳定度演化方向上的或然性表明, 对于山地生态稳定性的维护, 我们面临着多种可行性选择, 包括在人类干扰强度不变甚至加强的情况下对山地稳定性强化方向的追求, 维护山地生态稳定性的关键, 并不在于人类干扰“度”的变化上, 而在于人类干扰过程的正负效应上。

2 演化时序上的滞后性, 外界干扰度—山地稳定度相关变化的相位分析表明, 山地稳定度变化相对于特定的外界于扰度变化而言, 表现出一定的时间差, 即山地稳定度是一种慢变量, 这与山地生态系



统的自调恢复速率有关。山地稳定度变化相对于外界干扰变化的滞后性说明,破坏容易恢复难,实施容易效难,维护山地生态稳定性需要从长计议,没有立竿见影的妙方。

3.2 山地稳定度和外界干扰度的变化均具有弹性与刚性的双重特征

长期以来,人们十分强调山地生态系统的脆弱性(即弹性)<sup>[2]</sup>。为了验证这一结论的普适性,我们选择了几个具有代表的土类型(川地、建筑、丘陵、沙地、山地),通过统计数据(个别项目有缺)的同一化处理,用上述模型进行模拟对比(我们认为只要适当变换参量,上述模型对于各种土地类型的稳定性分析基本适用),发现山地相对于丘陵、沙地等,其稳定度的弹性值较小(这主要与山地生态系统具有森林、草地、农田诸子系统,即生物群落结构的复杂性和垂直方向上的成层性分布等有关);而且,处于不同自然—社会经济条件下的山地系统,其稳定性类型有别(刚性型、阻尼型、循环型弹性型)<sup>[2]</sup>,即山地稳定度的弹性特征不具有普遍意义。

从山地稳定度与外界干扰度的动态变化关系上看,山地生态系统能在特定下外界干扰条件下自发地趋于生态平衡时的稳定状况,如果不排除某一特定时段内外界于扰度为零的特例,这时山地稳定度趋于最大值( $\frac{r+i}{a}$ ),但这种状况是不稳定的,随着干扰度的非零化,山地生态系统就自发地趋于稳定度为  $\frac{r+i}{2a} + \frac{\sqrt{(r+i)^2 - 4acx}}{2a}$ 。外界干扰度也具有一定的刚性,这可以从相图上(参图 1)加以分析,相图上抛物线顶点坐点  $\frac{r+i}{2a}, \frac{(r+i)^2}{4ac}$ ,表明外界于扰度可能取最大值  $\frac{r+i}{2a}$ (这时的山地稳定度为  $\frac{(r+i)^2}{4ac}$ ),但这种状况是不稳定的,外界干扰度仍然要趋减到均衡状态( $x_0 = \frac{b+d}{e}$ )上。

3.3 植物群落的结构特征是制约山地稳定性演变的主导因素

在参量体系中,各参量( $r, i, a, c$ )对山地稳定度变化的贡献值有较大的差异,按贡献值的大小排序,依次为:植物群结构参量、植物群落功能参量、外界干扰参量、动物群落的结构和功能参量、生态因子参量。其中植物群落的结构参量,不但高值,而且量值的时间变幅很小,我们对山西境内六个处于不同的域的山地进行植物群落的结构数值分析均具有这种特征。可以初步确定,植物群落的结构状况是制约山地稳定性的演变的主导因素。用宏观协同学的观点看,植物群落结构参量是支配山地稳定性演化秩序的“序参量”,而其它参量(包括人类干扰)只能起到“伺服作用”,植物群落结构的序参量分析表明,山地稳定性的维持首先应当从有效保护植物落结构这个要害问题上着手实施。

3.4 影响山地稳定度的诸多生态因子,其敏感性强弱不同

山地系统的生态因子,一方面影响着山地的稳定度,同时也对山稳定度和外界干扰度的变化具有不同的程度的反应,随着外界干扰度和山地稳定性的变化,容易改变其状态特征的是敏感因子,如山地系统中的土壤和地表水,其它一些生态因子如光照、降水、潜水条件等,是不敏感因子。因子山地生态的敏感因子对于山地稳定性变化具有标型或指示作用,所以在山稳定性的现状分析和动态预测上具有一定实践意义。

3.5 先求稳态,次求强化应当作为维护山地生态稳定性的战略步骤

鉴于山地稳定度相对于干扰度而言具有变幅小,历时长等刚性演变特征,对于山地生态稳定性的维护,也许我们选择“先求稳态、次求强化”的两步走战略更为合理。

在我们所构造的相对简单的模型中,就存在着一个稳定衡点,对于复杂的、现实的山地生态系统来说,可以证明存在着更多的稳定点,这种山地稳定性不同强度状态下诸多稳定点的存在,为我们维护山地生态稳定进行的各种努获得成功带来了希望。



参 考 文 献

[1] 姜振寰. 软科学方法. 哈尔滨: 黑龙江教育出版社, 1994. 503, 507  
[2] 傅伯杰. 山地生态系统的稳定性研究初探. 见中国自然资源研究会青年协会编辑. 自然资源评价与决策研究. 北京: 科学出版, 1990. 158, 161.

第一作者简介 郑国璋(1965—), 男, 副教授, 主要从事自然地理和经济地理研究。

A DYNAMIC NUMERICAL MODEL ABOUT  
THE STABILITY OF MOUNTANOUS REGION

ZHENG Gou-zhang ZHANG Ai guo ZHANG Shu li MA Zhi-zheng  
(Geogrphy Department of Shanxi Teacher's University, Linfen 041004)

**Abstract** Through basic hypotheses and parameter determining, this article builds up a dynamic numerical model of the interrelating change between the stability intensity in mountainous region (abbreviated to  $S$  in the following) and outside interfering intensity (abbreviated to  $I$ ). After the analysis of stability and change directions, five pieces of conclusion are drawn up as follows:

1. Non synchronous characteristic of two dynamic courses of  $S$  and  $I$ ;
2. Both changes of  $S$  and  $I$  have double characteristics of flexibility and hardness;
3. The structural characteristic of plant community is the leading factor in restricting change directions of  $S$ ;
4. Ecological factors have different sensitive degrees to the change of  $S$  or  $I$ ;
5. The maintenance of ecological stability of mountainous region should be first strategic step, then strengthening of that.

**Key Words** stability intensity, non synchronous characteristic of the courses, order parameter, sensitive ecological factors