

文章编号: 1007-6301 (2003) 03-0251-09

# 生态系统退化的动力学解释 及其定量表达探讨

章家恩<sup>1</sup>, 徐 琪<sup>2</sup>

(1 华南农业大学热带亚热带生态研究所, 广州 510642;

2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

**摘 要:** 从生态力学角度对生态系统退化进行了初步探讨。文中认为, 生态系统是一个具有三维空间的物质实体, 它和一般物体一样, 也具有运动的特性。生态退化实际上是生态系统从高水平的稳定状态向低水平的失衡状态转化的一种运动形式。任何生态系统都具有一定的生态质量和生态惯性, 当生态系统遭受到自然和人为干扰的合力大于生态系统的内在生态阻抗力时, 生态系统势必发生运动或“位移”。文中定义了生态质量指数、自然干扰指数、人类活动强度指数和生态退化潜势指数, 以定量描述区域生态系统退化的潜势。

**关 键 词:** 生态退化; 生态力学; 生态质量; 生态阻抗; 干扰

**中图分类号:** X144

生态退化是生态系统随时间演替的一种动态过程和状态, 它代表着生态系统由较高水平的稳定状态向低水平状态发展的一种方向。那么, 生态系统退化的动力机制是什么? 生态系统在什么情况下才会出现受损呢? 如何来定量表示生态系统的退化趋势呢? 如此等等都是恢复生态学目前急需回答和解决的理论与实际问题。为此, 本文试图从生态动力学的角度做一些尝试。

## 1 生态系统的力学性质

生态系统是由生物有机体和无机环境组成的物质实体, 它具有一般物体的特征, 依靠外部的各种力或能量维持其正常运转和发展。即生态系统具有物体运动的特性, 也会发生“位移”(displacement), 不同的是生态系统的位移不是空间位置的改变, 而是系统状态或

**收稿日期:** 2003-02; **修订日期:** 2003-03

**基金项目:** 国务院三峡建设委员会项目 (1-03-03)、广东省自然科学基金项目 (980148、010274) 和中日美联合资助的“华南退化坡地绿色食品生产与生物多样性保护”项目的部分内容。

**作者简介:** 章家恩 (1968-), 男, 博士后, 副教授, 《生态科学》常务编委。2001 年 8 月到美国普渡大学做高级访问学者。主要从事生态学、土壤学、地理学、恢复生态学、生物多样性、农业与农村的可持续发展等方面的研究。主持和承担了国际合作、国家攻关、部、省、市级科研基金近 20 项科研课题。已发表学术论文近 80 篇。E-mail: jeanzh@scau.edu.cn

性质的变化<sup>[1,2]</sup>。生态系统是在不断地演替和发展的。生态退化只是生态系统运动的一种形式,是生态系统偏离正常演替或某一平衡状态的逆向运动过程<sup>[3,4]</sup>。

### 1.1 生态系统的主要受力类型

所谓力就是物体与物体之间的相互作用。生态系统作为一个整体,可抽象为一个具有三维结构的“生态实体”,它不断受到外界的各种“生态效应力”的作用。所谓“生态效应力”,与物理学中的“力”的概念有所不同,它既包括各种动力类型,也包括由于自然干扰或人为活动引起生态系统中物质循环与能量转化而表现出的一类抽象的驱动力。生态系统受到的生态效应力主要包括由于地球吸引而形成的重力以及地表对生态系统向上的支持力、热力、火力、风力、水力等外营力、地壳活动的内营力<sup>[5,6]</sup>、以及人类对生态系统的物质能量投入及干扰作用表现出来的各种效应力。生态系统的运动就是由这些生态效应力的合力的大小和作用效应方向来决定的。

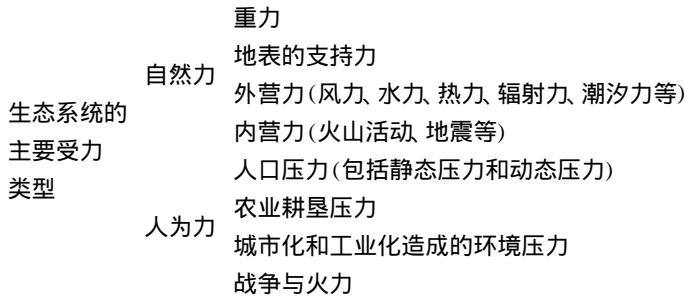


图 1 生态系统所受的主要生态效应力类型

Fig. 1 Major eco-forces applied to eco systems

施加于生态系统的各种生态效应力往往具有不同的作用效应方向。这里所谓的“作用效应方向”是指自然作用和人为干扰效应力使生态系统发生变化的方向,而不是各种作用力本身的方向,这跟物理学上的力是有所区别的。这里规定,凡是促进生态系统向进化方向运动的,该力的作用效应方向就为正方向,凡是推动生态系统向退化方向演替的,该力的作用效应方向就为负方向。一般而言,生态系统受到的重力总是垂直向下的,受到地表的支持力总是垂直于地表方向的。其中重力和支撑力是地球上任何生态系统均要受到的两个力;其它的各种力对不同的生态系统可能存在,可能不存在,而且,其作用效应方向通常也不固定,它们对生态系统作用效应方向一般会随时间和空间位置的变化而变化。例如,人类活动对生态系统即可起正的推动作用,又可起负的干扰作用。又如,在生态系统处于稳定平衡状态时,一定限度内的风力、水力对生态系统起着正向的作用,它有利于生态系统与外界进行物质和能量的迁移转化和交流,有利于生态系统的更新。然而,当生态系统处于不稳平衡或脆弱(如荒漠生态系统或荒坡地)的状态时,风力、水力等自然作用力则变为加速生态系统退化的驱动力,表现为负面的影响。

### 1.2 生态系统退化的动力学分析

上述各种自然作用力和人为干扰力的不同组合决定着生态系统的多样性和生态系统发育的进程,它们对生态系统进行着不断的“雕饰”,并控制着生态系统发育的基本方向和模

式。通常, 一些自然作用(如热力、水力和风力等)是“塑造”生态系统的基本牵引力, 它们决定着生态系统发生和演替的自然方向, 它们对生态系统的作用一般来说是长期的、缓慢的。然而, 当这些作用力发生剧烈波动或变化时, 就会切断或破坏生态过程的某一链节, 扰乱生态系统的固有“秩序”, 导致生态系统的无序化, 使之向退化方向发展。例如, 地质基础和地貌结构作为生态系统发育的载体和基底, 因此, 它的不稳定必然会导致其上生态系统的动荡和多变, 而重力作用往往是引发地貌不稳定性的重要因素之一。又如, 地表径流是显著的动能因子, 而且一旦径流量, 亦即水动力的传输过程与其它环境因子(如土壤因子的自我维持能力)不协调时, 就会形成强大的水力作用, 造成地面冲刷和水土流失, 并导致原生生态环境的消失; 当它与地貌因子不协调时, 便会改变地表形态, 造成原生环境的急剧改变等等<sup>[7, 8]</sup>, 这也是我国黄土高原和我国南方丘陵地区出现沟壑纵横、“红色砂岗”等土地退化现象的主要动力原因之一。风的动能作用, 尤其是大风, 在干旱半干旱区域, 是吹蚀表土、加强干旱、推移沙丘、加速脆弱环境逆向演化的驱动力或催生婆<sup>[9, 10]</sup>, 这也是我国西北地区土地沙化和荒漠化的主导作用因子之一。

生态退化除在自然作用的驱动外, 人为活动干扰力也往往起着重要的诱发与推动作用。人类活动的强烈干扰力往往会加速生态系统退化的进程, 它可将潜在的生态退化转化为现实的生态退化。人为活动对生态系统的影响往往是不断累加的, 它可直接和间接地破坏生态系统。人类活动对生态退化的推动是也多方面的、全方位的、深远的。与自然作用力相比, 人为干扰对生态系统作用的方向通常是不确定的, 它既可加速生态退化, 又可阻止逆向的生态演替。首先, 人口增长对生态环境不仅具有动态压力(如人口迁移、流动等), 而且也具有静态压力(人口数量增长)。因为人类的生存与发展离不开自然资源, 人口的增长与膨胀就意味着需要更多的土地、粮食、淡水、森林、矿产资源以及生存空间等。然而地球上的各种资源总量特别是对不可再生资源而言是有限的, 地球具有一定的环境容量和人口承载能力, 因此一旦人口数量超过区域和全球的生态承载能力, 势必引起人地关系的失调和人均占有资源的减少, 结果导致对土地过垦、过牧及对资源的掠夺性开发利用和环境的破坏, 出现生态危机和生态灾难。当今世界面临的人口、粮食、资源、能源、环境五大社会问题, 其核心就是人口问题<sup>[11]</sup>。第二, 人类活动直接对生态环境造成干扰作用, 如人类的工农业活动和城市化过程已直接给全球环境造成了极大的干扰、破坏和污染, 导致了众多野生动植物栖息地或原有生境的丧失。又如, 人类一把大火, 就可使数百数千年形成的大片森林毁于一旦。一场战争可使一个区域生态系统乃至全球生态系统在顷刻间“灰飞烟灭”<sup>[12, 13]</sup>。当然, 另一方面, 人类也可以通过生态建设与环境保护活动(如采取植树造林、建立自然保护区、清洁生产等行动)对生态系统起正向的推动作用。

不同的生态系统受到生态效应力的类型和性质往往是不同的, 其作用效果也各异。对于一个处于平衡状态的平地生态系统而言, 它所受的重力和地表对它的支持力一般来说是一对平衡力。生态系统的变化方向主要取决于自然和人类干扰的作用效应合力的强度和方向。一般来说, 在平原生态系统中, 重力和支持力不是生态系统运动的主导作用力。人类活动的各种效应力、地球内营力、风力、水力是决定这类生态系统发展的主导作用力。对于坡地生态系统而言, 其受力情况较为复杂。生态系统所受的重力扮演着双重角色, 一方面, 重力的一个向下的平行与坡面方向的分力, 使生态系统基底及其组分(如土壤物质、岩石、动物、植物乃至整个坡面)有下滑或向下迁移的趋势, 使生态系统处于一种不稳的状

态之中, 坡地易于发生崩塌、滑坡、泥石流、土壤侵蚀等重力灾害就归因于此。不稳定的地质地貌结构, 偶发性的或突发性的地质灾害可诱发生态退化的发生。它们可在短时间内由纯粹的一种重力地质作用转化为一种生态灾害。地质灾害的发生, 可干扰或破坏生态系统中生物群落生存所需的地貌空间、土壤肥力、水文和气候等主要生态因子, 造成水土流失、土壤退化等, 毁坏生物群落尤其是绿色植物所需的生境条件, 最终导致物种数量减少, 人类和动物迁移, 生态平衡破坏与瓦解<sup>[7, 14]</sup>。因此, 从这种意义上讲, 坡地生态系统是一个潜在脆弱的或先天性不稳定的生态系统, 它具有等待释放的重力势能。另一方面, 重力产生的另一垂直于坡面的分力刚好与坡面对生态系统的“支持力”相平衡。但由于这一分力的存在, 当生态系统组成物质产生下滑运动时, 便产生一个平行于坡面向上的“摩擦力”, 阻止地表物质的向下运动。该分力对保持生态系统的基底稳定性是有积极作用的。然而, 来自自然(如水力、风力)和人类的各种干扰作用效应力往往叠加在由于生态系统的重力产生的“下滑分力”上, 从而可加速坡地生态系统的失衡或退化(如水土流失), 对坡地生态系统起消极的影响。

### 1.3 生态系统的抗逆性与生态惯性

生态系统是由生命系统和环境系统复合而成的有机整体。任何生态系统都具有一定的抗逆能力。也就是说, 在受到外界干扰作用时, 生态系统可在一定程度上抵抗这些干扰对其产生的负向效应力的作用, 以保持生态系统的结构和功能的稳定性, 即生态系统本身具有一种内在的“生态阻抗”(ecological resistance)。“生态阻抗”表现在生态系统存在着这样一种反馈机制, 当出现来自系统外部的负向干扰时, 生态系统可以自我调节并作出积极的反应, 它可以使系统内部各生物种群之间, 生物种群与无机环境之间保持比较稳定的比例关系和生态联系。生态系统抗逆能力的强弱, 与生态系统的规模、组成、结构和发育进程(即成熟度)等因素有关。一般而言, 生态系统的规模尺度越大, 组成与结构越复杂多样, 发育越成熟, 生态系统的功能越强大, 其抗逆能力也越强。然而, 生态系统的抗逆能力是有一定限度的, 即只有当系统外部的负向干扰合力小于生态系统的内在抗逆能力时, 生态系统才能通过自我调节作用保持自身较稳定的状态, 有时这种干扰还可刺激生态系统的不断更新和发展。而当外部的干扰作用超过生态系统的抗逆能力时, 生态系统就会偏离正常的发育演替状态或发生退化。因此, 要使某一生态系统发生正向或逆向演替, 其外部各种生态作用力的合力必须超越或大于该系统状态下的生态阻抗。生态阻抗是生态系统在运动过程中的内在抵抗力, 是生态系统发生运动或变化的临界值。这个最大的抗逆能力就是生态系统发生退化的“生态阈值”。不同的生态系统, 其生态阈值是不同的。生态系统的“生态阈值”特性告诉我们, 高强度、频繁的干扰对生态系统是不利的, 往往会导致生态系统的退化。而适度或中度的干扰则往往是有利的, 而且从某种程度上讲是必需的<sup>[15]</sup>。

任何物体都具有惯性。所谓惯性就是指物体保持自身原有运动或静止状态的性质, 如行驶的机车刹车后不能马上停止前进, 静止的物体不受外力作用就不变位置, 都是由于惯性的作用。物体的惯性大小与其质量的大小有关。与一般物体类似, 生态系统也具有惯性。例如, 生态系统如果不受到外部力量的驱动, 它就不会发生运动, 就会停止或灭亡。又如, 一个遭受破坏而发生逆向运动的生态系统在撤消外部的干扰后, 它不会马上停止并开始正向演替。一般而言, 不同的生态系统往往具有不同的生态惯性(eco-inertia), 而且, 同一生态系统在其发展的不同阶段, 其生态惯性也在不断的发生变化。例如, 对于一个发育成熟

的稳定的生态系统(如森林)以及退化到极点的生态系统(如沙漠)而言,它们通常具有较大的生态惯性,也就是说,外部的干扰作用不易使生态系统发生状态上的“位移”。森林生态系统和荒漠生态系统等往往具有较高的生态惯性。例如,在相同外力作用下,草原生态系统的破坏往往要比森林生态系统容易得多。但另一方面,具有较高生态惯性的生态系统往往表现出较低的可恢复性(resilience),退化森林的恢复往往比草原、农田的恢复要困难得多。荒漠要恢复成绿洲,往往要花费相当高的物质和能量投入,用以抵销其内在的水分限制、土壤限制、生物学限制等,超越其内在的“生态阻抗”,方能实现。这其实也是生态惯性在起作用。因此,在退化生态系统的恢复过程中,一定要根据其惯性特点,因地制宜,循序渐进,有步骤分阶段进行,不可急于求成,事倍功半<sup>[16]</sup>。

## 2 生态系统退化潜势的定量表达

以上从动力学的角度对生态系统的退化原因与趋势进行了解释,那么,如何来定量表达它呢?如何来判断一个区域生态系统的退化潜势的大小呢?为此,构建了如下的一系列指数,旨在定量表达生态系统退化潜势的大小。

### 2.1 生态质量指数(Eco-Mass Index)

区域生态系统的稳定性在很大程度上取决于地理位置和自然环境背景(包括稳定的气候、地貌和水文背景)的性质和状况,即所谓的生态质量(Eco-Mass)。不同的区域往往具有不同的生态环境质量,因此,在此基础上发育的生态系统也势必具有不同程度的稳定性、抗逆能力和恢复能力。一般来说,在气温适度、降雨丰沛、气候湿润的平原和丘陵地区,其自然环境条件适宜生物的生长,生态多样性较高,并具有较高第一性生产力和系统生产力,经长期的演化,生态系统的结构和功能往往较为完善和成熟,该生态系统通常具有较强的稳定性和抗逆能力;而且,当生态系统遭受破坏后,其自我恢复能力亦较强<sup>[17]</sup>;相反,在气候寒冷、干燥、干旱、山区等地区,这种恶劣的生态条件通常不适宜生物的生长与生存,生物种类贫乏单一,生态系统结构和功能简化,因而生态系统是相当脆弱的,在外界干扰下极易发生退化,而且退化后也不容易恢复。某一区域生态质量的好坏往往决定着该区域生态系统的潜在稳定性或脆弱性。

为了描述区域生态系统的自然稳定性或脆弱性,这里,采用生态质量指数(Eco-Mass Index)来对此加以描述。一个地区的生态质量指数越大,生态系统的稳定性和抗逆能力越高。一般而言,区域的生态质量指数与该区域的地理位置(主要是纬度)、气候干旱程度(即海陆位置)以及地貌结构密切相关。因此,生态质量指数(EMI)可用大陆度(KK)、干燥指数(D)和地貌指数(H)来加以构建。生态质量指数用大陆度、干燥指数和地貌指数的几何平均数的倒数来表示。也就是说,生态质量指数与大陆度、干燥指数和地貌指数呈反相关,即大陆度、干燥指数和地貌指数越大,其生态质量指数越小。其中,大陆度的大小可说明平均最高气温与最低气温的相差范围和变化时间的长短;同时也可部分地反映生态系统平衡的稳定度<sup>[18]</sup>。干燥指数(D)反映的是降水量和蒸发量的比值。它与云量的大小、雾日的多少和日照辐射量的高低有关,对生态系统的平衡也有着密切关系。大陆度和干燥指数越大,表明生态环境条件十分恶劣,生态系统较为脆弱。地貌指数是指单位面积内绝对高程与相对高程的综合特征,用以反映区域的地貌基底稳定性和重力作用潜势的大小。地

貌指数越大, 重力灾害相对较多, 地貌基底也相对不稳定。

这里, 大陆度采用康拉德 (V. Gonrad) 公式<sup>[19]</sup>, 即  $K = [1.7 \theta \div \sin (\varphi - 10)]^{-14}$ , 它可避免赤道的  $K$  值为无限大, 式中  $\theta$  为气温年较差,  $\varphi$  为纬度; 干燥指数 ( $D$ ) 采用张宝堃公式, 即  $D = 0.16 T_{10}/R$ , 其中  $T_{10}$  为日平均气温  $10^\circ\text{C}$  期间的活动积温,  $R$  为同期降水量; 地貌指数是某一区域的平均相对高度 ( $RH$ ) 与平均绝对高度 ( $AH$ ) 的乘积与该区域的面积 ( $S$ ) 之比, 其中平均绝对高度反映的是某一区域地貌的总体状况, 主要是区别高原与低地, 而平均相对高度反映的是某一区域地形的起伏程度, 表征的是山地、丘陵与平地的区别。

$$EMI = (D \times K \times H)^{(-1/3)} \times 100\%$$

其中  $K = [1.7\theta \div \sin (\varphi - 10)]^{-14}$

$$D = 0.16 T_{10}/R$$

$$H = (RH \times AH) / S$$

式中,  $K$  为大陆度指数,  $D$  为干燥度,  $H$  为地貌指数。

## 2.2 自然干扰指数 (Natural Disturbance Index)

从自然干扰的角度来讲, 区域地质地貌 (如重力作用等)、气候 (如热力、水力、风力等) 和水文 (水力等) 等的异常变化是生态系统不稳定性 and 退化的自然成因。这里, 需要说明的是, 自然干扰因素的稳定变化一般不能视为生态退化的诱发因子, 只有当自然干扰因素发生较高强度的不稳定的波动或无规则的异常变化时, 才会打断生态系统正常的运行过程或节律, 导致生态退化的发生, 此时, 自然因素就扮演着“干扰因子”的作用<sup>[3, 4]</sup>。

因此, 可以用地质地貌、气候和水文等干扰作用的异常变化特征等来表征自然环境因素对生态系统的扰动。即自然干扰指数 ( $NDI$ ) 可用地质灾害指数 ( $Gi$ )、风力灾害指数 ( $Wi$ )、水力侵蚀指数 ( $Ei$ )、干旱灾害指数 ( $Dri$ )、洪涝灾害指数 ( $Fi$ )、低温冻害指数 ( $Tfi$ ) 等之和来表示, 即:

$$NDI = Gi + Wi + Ei + Dri + Fi + Tfi$$

其中,  $Gi$ ,  $Wi$ ,  $Ei$ ,  $Dri$ ,  $Fi$ ,  $Tfi$  分别用相应的灾害强度 ( $Ii$ ) 乘以相应的灾害发生频率 ( $fi$ ) 来表示。其通式为:  $Si = Ii \times fi$  (式中  $Si$  可相应代表  $Gi$ ,  $Wi$ ,  $Ei$ ,  $Dri$ ,  $Fi$ ,  $Tfi$  几个指数)。

一般地, 自然灾害的强度越大, 频率越高, 自然干扰指数也就越大, 表明自然因素对区域生态系统的干扰作用也越强。

## 2.3 人类活动强度指数 (Human Activity Index)

人类活动的干扰作用也是生态环境退化一个重要的外部驱动力, 实际的生态退化通常是自然环境干扰与人为活动干扰叠加作用的结果。因此在研究生态系统退化时, 还应考察人为活动对生态系统的作用。这里, 采用人类活动强度指数 ( $HAI$ ), 以此来度量人为活动对生态环境的干扰程度。即用人口密度指数 ( $Di$ )、工业与城市化发展水平 ( $Ui$ )、环境污染综合指数 ( $Pi$ )、农业土地利用强度 ( $Ai$ ) 和区域旅游活动强度 ( $Ti$ ) 五者之和来综合表示。

$$HAI = Di + Ui + Pi + Ai + Ti$$

其中,  $Di$  为某一研究区域的人口密度与该区域的适宜承载人口密度之比, 它在一定程度上

反映了区域人口对环境的静态和动态压力, 因为人口密度越大, 就意味着周围环境要提供越多的资源、粮食和生存空间, 才能满足人类的某种水平上的需要;  $U_i$  为工业化与城市化(或城镇化)指数, 由于工业化与城市(镇)化总是紧密相连的, 工业活动与城市(镇)化不仅会对其周围环境产生较大的破坏和动态压力, 而且城市本身也是一个较为脆弱的生态系统, 因此可用某一区域的城市化与工业化水平来表征人类活动强度的部分特征。  $A_i$  为农业活动强度指数, 采用农业垦殖指数 ( $C_i$ ) 和复种指数 ( $MC_i$ ) 二者之和加以度量, 它表明人类对土地的利用强度。  $T_i$  为旅游活动强度指数, 它可用实际的年旅游人数与该区域的旅游容量来加以度量。

上述有关指数的计算公式如下:

$D_i =$  某一区域的人口密度/所在区域的适宜人口承载密度

$U_i =$  某一区域的城市化水平  $P_i = 1/n (I W_i), W_i = [B_i / (C_{si} B_i)] / [B_i / (C_{si} B_i)]^{[20]}$

(式中  $I_i$  为某污染物的分指数,  $W_i$  为某污染物相应的权重,  $B_i$  为某污染物在环境中的背景值,  $C_{si}$  为某污染物的评价标准)

$$A_i = C_i + MC_i$$

(式中  $C_i =$  耕地面积/区域土地总面积  $\times 100\%$ ,  $MC_i =$  全年农作物总播种面积/耕地面积<sup>[19]</sup>)

$T_i =$  年均旅游人数/该区域适宜的旅游容量

## 2.4 生态系统退化潜势指数 (Ecological Degradation Potential Index)

在构建了区域生态质量指数、自然干扰指数和人类活动强度指数这三个指数的基础上, 可以进一步探讨在生态环境背景与人类活动强度的不同组合作用条件下生态系统的响应状况。为此, 提出生态退化潜势指数 ( $EDPI$ ), 用以说明生态系统退化的潜在趋势的大小。与物理学中的加速度公式  $a = F/M$  类似, 生态退化潜势指数可用下式加以描述, 即:

$$EDPI = (HAI + NDI) / EM I$$

式中  $HAI$  为人类活动强度指数,  $NDI$  为自然干扰指数,  $EM I$  为生态质量指数

## 2.5 生态系统退化潜势大小的讨论

根据生态退化潜势指数的计算公式  $EDPI = (HAI + NDI) / EM I$ , 可得如下几个推论:

(1) 人类活动强度指数 ( $HAI$ ) 和自然干扰指数 ( $NDI$ ) 越大或其之和越大, 对生态系统的干扰也就越大, 就越易导致生态系统退化, 在这种情景下, 生态系统具有较高的退化潜势与退化加速度, 此时,  $EDPI$  就越大。

(2) 当受到外界干扰力一定时, 生态质量指数 ( $EM I$ ) 越大时,  $EDPI$  就越小。也就是说, 生态系统具有较强的稳定性、抗逆能力以及生态惯性, 阻止着生态系统的逆向演替或退化, 此时生态系统具有较小的退化潜势和加速度。

(3) 在相同的生态背景条件即生态质量下, 生态退化的方向和潜势取决于人类活动强度和自然干扰强度的大小。一般而言, 人类活动的强烈干扰往往会加速生态退化的进程, 它可将潜在的生态退化转化为现实的生态退化, 特别是在当今社会里, 人类活动对生态退化起着主要的作用。

(4) 在相同的人类活动强度条件下, 生态质量指数小的生态系统越易发生退化。生态

质量指数大的生态系统不易发生“位移”或退化，它们通常具有较强的生态阻抗及生态惯性，因而在一定限度内可以抵消人类活动和自然因素异常变化的干扰。

## 参考文献

- [1] 马世骏主编. 现代生态学透视. 北京: 科学出版社, 1990, 43~ 127, 261~ 316.
- [2] 章家恩, 徐琪. 恢复生态学研究的一些基本问题探讨. 应用生态学报, 1999, 10(2): 109~ 113.
- [3] 章家恩, 徐琪. 生态退化的形成原因探讨. 生态科学, 1999, 27~ 32.
- [4] 章家恩, 徐琪. 生态退化研究的基本内容与框架. 水土保持通报, 1997, 17(6): 46~ 53.
- [5] 赵桂久, 刘燕华, 赵名茶等主编. 生态环境综合整治与恢复技术研究. 北京: 北京科学技术出版社, 第一集 1993, 1~ 190.
- [6] 赵桂久, 刘燕华, 赵名茶等主编. 生态环境综合整治与恢复技术研究. 北京: 北京科学技术出版社. 第二集, 1995, 1~ 256.
- [7] 潘树荣主编. 自然地理学. 北京: 高等教育出版社. 1985, 30~ 266.
- [8] 周淑贞主编. 气象学与气候学. 北京: 高等教育出版社, 1984, 30~ 257.
- [9] 赵聚宝等主编. 干旱与农业. 北京: 中国农业出版社 1995, 74~ 78.
- [10] 朱震达等著. 中国的沙漠化及其治理. 北京: 科学出版社, 1989, 18~ 57.
- [11] 胡焕庸, 严正元. 人口发展和生存环境. 上海: 华东师范大学出版社, 1992, 8~ 21.
- [12] C.J.Barrow, Land Degradation. 1991, London: Cambridge University Press, 1~ 285.
- [13] 凌红, 吴仁涛, 施小华. 现代战争对生态环境的影响. 生态科学, 1999, 18(3): 33~ 39.
- [14] 纪万斌主编. 塌陷与生态. 北京: 地震出版社. 1996, 55~ 224.
- [15] 李博主编. 生态学. 北京: 高等教育出版社. 2000, 141~ 143.
- [16] 孙波, 赵其国. 红壤退化中的土壤质量评价指标及评价方法. 地理科学进展, 1999, 18(2): 118~ 128.
- [17] 尚玉昌. 生态学及人类未来. 北京: 中国青年出版社. 1989, 68~ 123.
- [18] 王翊亭等主编. 工业环境管理. 北京: 石油工业出版社. 1987, 196~ 229.
- [19] 左大康主编. 现代地理学词典. 北京: 商务印书馆. 1990, 127, 581.
- [20] 陈维新主编. 农业环境保护. 北京: 农业出版社. 1993, 233~ 236.

## Eco-mechanics Analysis and Quantitative Expression for Degradation of Ecosystems

ZHANG Jia'en, XU Qi

(Institute of Tropical and Subtropical Ecology, South China Agricultural University, Guangzhou 510642;  
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

**Abstract:** The degradation of ecosystems was discussed from a view of eco-mechanics in this paper. It was suggested that any ecosystem could be regarded as a kind of the substance integration with three-dimension spatial structure, and that it also had a property of “movement” which referred to the displacement of the state, but not the



change of the place of ecosystem. Actually, the degradation of ecosystem was a process of ecological movement from a high level or stable state to an imbalance state. Any ecosystem had a certain eco-mass and eco-inertia. When the resultant of eco-forces produced by human and natural disturbance exceeded their inherent ecological resistance force, ecosystems would take movement or displacement. This paper also presented a quantitative expression for calculating the potential of ecosystem degradation with four indices, including the eco-mass index (EMI), the natural disturbance index (NDI), the human activity intensity (HAI) and the eco-degradation potential index (EDPI).

**Key words:** ecological degradation; eco-mechanics; eco-mass; eco-resistance; disturbance