

生态恢复工程系统集成原理的一些理论分析

胡 聃¹, 奚增均²

(1. 中国科学院生态环境研究中心系统生态开放实验室, 北京 100085; 2. 安徽省芜湖市繁昌县林业局, 繁昌 241200)

摘要:生态恢复是不同层次上退化生态系统的选择性再生与再发展过程, 它包括人类主导作用下的生态系统恢复和自然主导下的生态恢复, 它具有自然性、经济性、人文性和选择性。以生态经济原理为基础, 首先提出了生态系统退化度与恢复度理论上存在的反-S 型关系, 讨论了在统一矢量价值标尺下恢复演进过程的数学描述与恢复的判定准则。作者进一步讨论了生态恢复工程的一些系统集成原理, 包括系统集成的技术流程、基本原则的关联组合体系、恢复技术的组装与集成体系、生态恢复模式的分类系统及其在生态集成管理体系下以成本约束、效益约束、尺度约束为核心的模式集成系统、生态恢复系统目标-模式(速度与路径)-成本/效益/效率的价值耦合链的建立。

关键词:生态恢复工程; 系统集成原理; 理论分析

A Theoretical Approach to Integration Principles of Ecological Restoration Engineering

HU Dan¹, XI Zeng-Jun² (1. *The Key Laboratory of Systems Ecology of Chinese Academy of Sciences, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Beijing 100085, China*; 2. *The Bureau of Forestry of Fanchang County, Anhui Province 241200, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(6): 866~877.

Abstract: Ecological restoration is a process of selective regeneration and redevelopment of degraded ecosystems at multiple scales (degraded natural ecosystems and/or human ecosystems), which has two essential types; human-dominated vs natural-dominated ecosystems restoration.

Based on the principles of ecological economics, the authors in this paper discuss the following issues on the principles of integration for ecological restoration engineering:

Firstly, the authors present an inverse-S type relations between degree of ecosystems degradation and degree of ecosystems restoration, which shows that to the more extent the ecosystems degrade, and the less the degraded ecosystems can restore.

To effectively describe quantitatively an overall process of ecological restoration, a scale of vector value to gauge the progress of degraded ecosystems restoration is presented and a mathematical expression of an ecological restoration progress with such an identical scale of vector value is established. From this mathematical formula, the restoration progress of degraded ecosystems depends upon its initial position or state to start its restoration, the speed or period of restoration, the constraints of costs, benefits, efficiencies and scales from physical, biological, chemical and human dimensions. The overall vector value of ecosystems restoration consists of three components: the value of restored ecosystems composition, that of restored ecosystems' structures and that of restored ecosystems' functions. The final endpoints where the process of restoration can arrive at may be identified as 4 types: (1) the level of homogeneity: degraded ecosystems may get to the position where it has the same/similar compositions, structure and functions as before its degradation; (2) the level of homotype: degraded ecosystems may get to the

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30070145); 中日国际合作资助项目

收稿日期: 2001-12-10; 修订日期: 2002-11-20

作者简介: 胡聃, 男, 湖北人, 博士, 副研究员。主要从事城市生态、生态经济以及人类主导介入下生态恢复工程的集成化理论与技术方法研究。

position where it has the same/similar structure and functions but the different compositions from before its degradation; (3) the level of iso-functionality: degraded ecosystems may get to the position where it has the same/similar ecological functions but the different compositions and structures from before its degradation; (4) the level of heterogeneity: degraded ecosystems may get to the position where it has different compositions, structures and functions from before its degradation. Based on the quantitative formula of the progress of ecosystems' restoration, a set of determinant criterions for the success of ecosystems' restoration are also discussed, which include a 4 components as restored ecosystems' capacities of self-maintenance, ecological integrity, self-regulation and self-organization. The former 3 components may be integrated as the capacity of restored ecosystems' health, and the last one as the capacity of self-developments.

Ecological restoration is a kind of ecological integrated engineering, its procedure includes: investigations and diagnosis of degraded ecosystems, multiple ecological feasibility analyses of degraded ecosystems restoration, integrated planning and design of restoration engineering, integrated implementation of restoration engineering, post-restoration evaluation and ecological integration management system; one emphasized point is that the ecological integration management system should be essential to the overall process of restoration engineering.

Ecological restoration should be rooted in some essential principles, for definite objectives of ecological restoration, these principles should be grouped, and be further integrated or combined. From this point of view, a grouping system of these principles are presented as follows:

- (1) Temporal related group: eco-niche principle, mesial effect principle, hierarchy principle, successional series principle, social equity principle etc. ;
- (2) Spatial related group: edge effect principle, eco-niche principle, mesial effect principle, hierarchy principle, successional series principle, etc. ;
- (3) Structural related group: key ecological factors (there are some ecological factors that dominate the ecological restoration process), eco-niche principle, edge effect principle, mesial effect principle, successional series principle, hierarchy principle, etc. ;
- (4) Functional related group: restriction & tolerance principle, mesial effect principle, eco-niche principle, population density dependent and interspecies interaction principle, multi-uses and recycling & regeneration principle, ecological security principle, ecological flow chains & ecological networks principle, cost-benefit principle, ecological cultural principle, human health principle, ecological aesthetical principle, social equity principle etc. ;

The above groups of principles can be further combined into an integrated principle system. In addition, special attention should be paid to the principle of mesial affect. This effect indicates the multiplicity or uncertainty of temporal ,spatial and quantitative midpoints(or mesial parts) of components, structures and functions within ecosystems, which always have much greater variability, adaptation and creativity than the other points or parts to ecosystems' derelopment.

Based on current development of restoration technologies, the authors discuss the integrated technology system for ecological restoration. This system consists of 5 parts: (1) integrated technologies for detecting, diagnosing, reporting, forecasting of ecosystems changes (degradation or restoration); (2) integrated technologies for the re-organization or assembly of degraded ecosystems at different scales; (3) integrated technologies for the ecological economic values restoration of degraded ecosystems; (4) integrated technologies for the ecological information network re-organization of degraded ecosystems; (5) integrated technologies for the management system of degraded ecosystems restoration. These

technologies are interlocked and together form a nature-human integrated technology system for ecological restoration.

From the anthropogenic principle, ecological restoration can be divided into 4 categories of model: natural restoration, low human-assisted restoration, medium human-assisted restoration and high human-assisted restoration. Different models usually affect or determine the extent to which degraded ecosystems may finally restore, pathways, speed and overall costs, benefits and efficiencies of restoration. In addition, human-involved the temporal and spatial sequences of different species's colonization into the successional process of restoration are the key to the validity of restoration models. In the implementation of ecological restoration engineering, the use of single model often have little validity, and integrated uses of multiple models are more effective for achieving the objectives of restoration. So the integration of different models with the support of ecological integration management system focusing on the constraints of cost, benefits and scales time, space and quantity to achieve the definite restoration objectives is greatly significant for ecological restoration engineering.

Overall, there is a mutual coupling of value among the objectives, models and costs/benefits/efficiencies of restoration, which forms an endpoint-model-costs/benefits/efficiencies coupling chain of value. The integrated endpoints of restoration affect the models of restoration that depend on the pathways and speeds of restoration, and the latter determines the costs, benefits and efficiencies of restoration. If the endpoints are different, the costs, benefits and efficiencies of restoration appear quite differently. For 4 types of endpoints of restoration, their costs of restoration are respectively: the level of homogeneity is the most, the level of homotype is the less, and the level of iso-functionality is much less, and the level of heterogeneity depends on its concrete process of restoration but less than the level of homogeneity. An important point is that the ratio of the natural vs artificial costs/benefits/efficiencies is significant for restoration, so, for a fixed endpoint of restoration, to effectively regulate or optimize this ratio by an efficient way of transformations between natural and artificial costs/benefits/efficiencies under ecological integration management system is necessary for improving restoration implementation.

Key words: ecological restoration engineering; principles of integration; theoretical approaches

文章编号:1000-0933(2002)06-0866-12 中图分类号:Q147, X171.4 文献标识码:A

生态恢复是现代生态研究的热点问题,它可被定义为研究不同方式的内源和外源作用格局下特定生态系统(如自然生态系统、人类生态系统)受损或退化的机理,探究生态系统选择性恢复或再建的规律,及其方法和技术的学科。它不仅仅包含对自然的生物多样性、生态结构和生态功能的选择性恢复,也包括对一定地域和时间尺度上人类的心理生态、社会生态、文化生态、经济生态的组成多样性、结构与功能过程的选择性恢复与重建。而且,生态恢复无论对自然还是人类生态系统常常要考虑其等级层次性,它包含了从分子、细胞、组织、器官、生物个体、种群、生态系统、景观、区域,乃至全球等不同尺度上的选择性恢复^[1~5]。目前,生态恢复正逐渐成为人类扼制各种自然或人为生态破坏,保护我们地球家园的重要方法和技术手段^[1~8]。

人类面临的退化生态系统类型有二,一类是人类活动主导作用下形成的,另一类是自然因素主导作用下产生的。因此,对退化生态系统的恢复也包含两层基本含义,一是人类主导下的恢复演替,二是自然主导下的次生演替恢复。完全可以回复到退化生态系统原始状态的过程,通常称为复原(Restoration)^[7~10];恢复到与原初状态有差异、并具有一定结构和生态功能的过程,通常称为修复(Rehabilitation)^[2,4,7,8];而以人类生存和发展需求为目标的恢复过程,则称为复垦(Reclamation)^[1,3~7,9,11~15]。至今,国内外在该领域已作了大量的实际研究和理论探索^[1,3~7,9,11~17],但就生态恢复系统集成的一些重要问题,尚没有展开系统而广泛的探讨,本文正是基于此,从理论上就其中的部分论题进行讨论。

1 生态退化度与生态恢复度

复原(Restoration)在当今科学技术水平下常常是难以实现的,因此,生态恢复实际上是一种选择性恢复或有限恢复,选择性恢复意味着在一定的自然条件和人类活动条件下,不同层次的退化生态系统可回复到原初参照状况的实际水平;在此意义上看,退化生态系统存在一个可恢复度的问题。可恢复度是理论上可恢复到的状态(包括组成、结构和功能)与实际状态之间差异的定性或定量表述,即将生态系统理论上可以恢复到的原始状况或水平作为上限基准,则实际恢复所达到的系统组成、结构和功能状况与上限基准的比较称之为可恢复度,在存在统一的度量标尺的前提下,它经标准化处理后可以是模数在0~1之间的标量或矢量。同样,人们可以把未破坏或未退化的生态系统状况作为参考标准或上限基准,生态系统组成、结构和功能的实际退化量值与退化前的参考状况值的比较称之为退化度,退化度与可恢复度概念在描述生态恢复状况方面是互为补充的。一般而言,如果退化度越大(退化度可以用物种、养分等物质、能量或信息的损失率,或者是生态系统组成、结构、功能价值的减少率等来表示),则可恢复度就可能越小或可恢复难度越大。各种人类、生物、理化因素通过影响或改变生态恢复过程中的物质、能量和信息的流通方式、数量和流通速度来影响恢复的方式、路径、强度、速度以及成本效益和效率,从而影响生态系统的可恢复度。

从经验来看,可恢复度与退化度之间似乎呈现一种反-S 曲线关系,图1表述了这种理论上的假定关系。

2 生态恢复演进过程的描述与判定体系

生态恢复是一种动态的、异质化的过程,它具有不确定性。恢复的最终状态除依赖于其初始状况(最终退化状况)外,还取决于恢复过程中人类、生物和非生物因素的约束。一般来讲,对恢复过程演进的描述至少需要如下几个参数:恢复时间或速度、恢复初始位置或状态(因退化或损失达到的生态系统状态)、恢复过程中物理、化学、生物和人类约束条件(如天文、气候、水文、土壤、地质、生物、人类活动等)的变化。理论上,可以从生态系统恢复过程3方面的变化来表述:生物组成和非生物组分的多样性与丰富性、生态系统结构、生态系统功能,这里的生态系统概念中通常含人类组分。如果将生态系统恢复进程所达到的当前状态用生态系统价值矢量 V_R 来定义,它分别由 V_D (组分多样性与丰富性价值矢量)、 V_S (结构价值矢量)和 V_F (功能价值矢量)所组成,而生态恢复过程中各种约束的总成本表示为价值矢量 V_C (自然约束成本 V_{CN} 和人类社会、经济、文化和意识等的约束成本 V_{CR}),则不同时空层次上的生态恢复演进表达式为:

$$V_R = \alpha \beta \int_{k=k_0}^K \int_{t=t_0}^T (V_D(k,t) + V_S(k,t) + V_F(k,t) - V_C(k,t))dkdt$$

约束于 $V_C(k,t) \leq \phi$, ϕ 的各分量值 $\in (\infty, 0)$, $V_C(k,t) = V_{CR}(k,t) + V_{CN}(k,t)$ 其中, α 是恢复过程中由组成、结构、功能及外部约束的相互耦合产生的不确定性因素对 V_R 价值矢量的作用系数, T 是恢复的时期周期; β 是价值矢量的归一化因子; t_0 是恢复初始状态的时间点; K 是恢复可达的三维地域空间, k_0 是恢复初始状态的空间位置。对特定的生态恢复模式而言, ϕ 是一个常矢量,当 ϕ 的全部分量值等于 ∞ 或 0, 恢复是完全理想化的,现实上是不可达的;而当 ϕ 的部分分量值等于 ∞ 或 0 时,恢复的最终状态是月开数据;而当 ϕ 的各分量值都介于 $(\infty, 0)$ 之间时,恢复所期望的最终状态是现实可达的; ϕ 的各分量值越小,生态系统的可恢复度就越高,反之,越低。

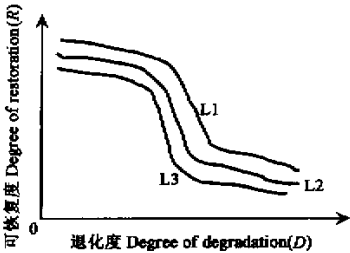


图1 理论上假定的可恢复度与退化度之间的负相关关系

Fig. 1 Theoretically assumed negative relations between the degree of restoration and the degree of degradation

图中, L_1, L_2, L_3 等表示一定受损或退化程度的不同生态系统类型或者是处于不同退化水平上的同一生态系统类型的 $R-D$ 关系, L_1, L_2, L_3 indicate that there are different $R-D$ relations among varied ecosystems with different degree of degradation or when the same type of ecosystems goes back from different levels of degradation

上式中 V_R 对时间 t 的微分可以描述生态恢复的速度,而对空间 k 的微分可以描述生态恢复路径或恢复方式。

对退化生态系统恢复好坏的判定常常是复杂的,它通常依赖于恢复过程的自然条件和人类的价值目标;人们难以找到一套唯一的恢复标准或指标去衡量不同类型退化生态系统的恢复状况。基于上面恢复演进的表达式,需要对生态系统价值矢量 V_R 确立一个价值目标期望值,这一目标期望值即是在满足当前自然生态和人类生态的约束条件下所期望达到的恢复水平,该水平即是我们对恢复成败作出判定的准则或依据。从理论上讲,判定准则体系由生态系统的组成多样性(生物和非生物组成)、生态结构和生态功能以及这三者在不同时空尺度上的耦合来体现。可以转化为 4 个方面的生态系统能力^[18]来表示:

(1)自维持能力 系统存在和发展的理化基质条件的稳定性;物质、能量与信息的基础代谢水平及养分储留的稳定性;组成、结构和功能(如种内、种间相互作用)及其相互耦合机制的稳定性;人类心理、个体、社会、文化、经济等的继承性及其与系统中其它生物、非生物要素之间联通性的稳定;对系统内外源不确定性的转移(化)与利用能力。

(2)生态整合能力 大气、地质、辐射、土壤、水文等理化因子的多样性及其关联性;乡土与外来生物物种的丰富度和合理比例;生物、非生物、人类在物质、能量、信息意义上的网络结构与功能过程在不同时空尺度上的融通性(如食物网,物质、能量的多层次利用、循环与再生,信息的多样性、合成、反馈、环路传导与转换,对不确定性的捕获、处理与利用);生物生态与人类心理、生理、文化、社会、经济生态之间相互作用的多样性与联通性。

(3)自调节能力 系统组分大小(生物量)、密度和生态流过程的正负变化的均衡性;对人类污染等胁迫的缓冲、消解与转换(化)能力;对环境压力或内外源灾害(如生物病虫害)的耐受、抵抗、正向转化能力。

(4)自组织能力 结构和功能的自我完善、成熟与创新;初级和次级生产力;受内源或外源性负向作用后的回复能力;自然生态系统对人类的生态服务功能增长以及人类对自然生态的保护、培育与管理;人类生态系统社会、经济、文化、心理等的自发展能力。

上述前 3 个方面都关联到生态恢复演进的一个重要方向,即生态系统健康的恢复与维持能力,第 4 方面关系到生态系统内在的发展能力。一个退化的自然或人类生态系统,如果在恢复过程中具备了这几种基本能力,那么,它就是一种好的或成功的生态恢复,而不仅仅在于它是否与退化前的状态一样。上面这 4 个方面为评价一个退化生态系统恢复状况的好坏提供了参考准则,对不同退化性质的生态系统、恢复的初始与过程条件和恢复的期望目标,可以确定相应标准体系对恢复作出明确或准确判定。

从恢复的最终目标来看,它们常常表现为 4 种形式:①同质状态,即生态系统的组成要素(非生物组分和生物物种类型、数量)、结构和功能可以恢复到与退化前原初状态相同或相似的水平;②同型状态,即生态系统的结构和功能恢复到与退化前原初状态相同或相似的水平,而组成可以与原初状态不同;③同功状态,即生态系统功能恢复到与退化前原初状态相同或相似的水平,而其组成、结构可以发生变化;④异质状态,即生态系统的组成、结构和功能在其恢复过程中都发生变化,最终所达到的状态与退化前的原初状态本质上不同。

以上 4 个方面涵盖了在引言中提到的修复、复垦、复原等目标状态,但较后者更为清晰和明确,其中,同质状态类似或等同于复原,尽管它理论上成立,但在可操作性上存在巨大困难,而复垦是形式①中的一种。以上 4 种恢复的最终状态从形式①到形式④,其可恢复度可能逐渐升高或增大,但恢复后的生态系统在其组成价值、结构价值和功效(能)价值方面一般存在很大差异。

3 生态恢复工程的系统集成原理

3.1 生态恢复工程系统集成的技术流程

生态恢复工程是应用生态学、景观生态学与生态工程原理,结合其它自然、社会学科的知识与现代生物、信息技术手段,对多时空尺度上具有特定自然或人类效益的生态因子与生物因子多样性、结构和功能过程进行整合与集成性工程实施,以最大限度地再建特定的自然生态系统、人工生态系统和人类生态系统。规划设计的核心内容包括了:①生物物理因子、结构与功能(通常含人类因素及其社会、经济、

文化结构和功能)之间的联络性和融通性;②生态组织与功能的不确定性利用;③生态系统构造与功能运行的经济性和人文性。恢复对象则包括了自然和人文方面从分子、个体、种群、群落、局域的生态系统(含景观)、生态区域乃至全球等不同空间尺度。工程实质是:①生态系统(通常含人类组分)构成的分异性与结构、功能完整性的有机协调;②生态系统不确定性的诊断、转移、转换与利用;③生态系统恢复的自然-人类集成化管理。

生态恢复工程系统集成技术流程包括退化生态系统状况调查与诊断、生态恢复系统可行性分析、生态恢复集成规划与设计、生态恢复工程的集成实施、生态恢复工程后评估、生态集成管理体系等(如图 2)。

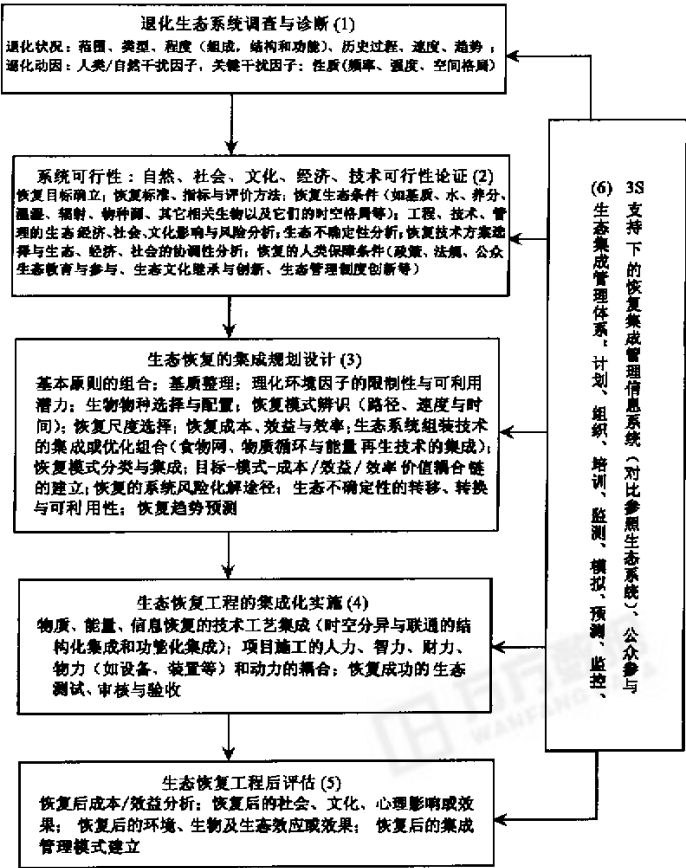


图 2 生态恢复工程系统集成技术流程图

Fig. 2 The integrated procedure of ecological restoration engineering

(1) Integrated surveys and diagnoses for degraded ecosystems The dynamics of degraded ecosystems; the extent, category, degree (components, structure and functions), process, speed and tendency of degradation; Driving forces: human/natural factors of disturbances, the key disturbing factors for degradation, properties of the factors (the frequency, intensity and spatial pattern of disturbing factors).

(2) Multiple ecological feasibility analyses for the restoration of degraded ecosystems Objectives of restoration; Establishment of indicators and evaluation methods of restoration; Ecological requirements of restoration such as matrix, water, nutrients, climate, solar and other radiation, sources of species, other related biota and their temporal &

spatial pattern; Ecological economic, social, cultural impacts & risk analysis of engineering, technology, management; Ecological uncertainty analysis; Determination of technological alternatives and ecological-economic-social compatibility analysis; Human guarantees for restoration such as policy, public ecological education & participation, laws & regulations, cultural inheritance & innovation, managerial institutional innovation, etc.

(3) Integrated planning and design for degraded ecosystems restoration Combinations of fundamental principles; Matrix preparation; Limitations and availability of physical-chemical factors; Selection and manipulation of species; Identification of restoration model (paths, speed and time of restoration); Determination of scales of restoration; Efficiencies, costs and benefits of restoration; Technological integration & optimization for ecosystems assembly (food webs, mass recycling & energy regeneration); Classification and integration of models of restoration; Objective-model-cost/benefit/efficiencies coupling chains of value; System risks reduction and transformations; transference, conversion and availability of ecological uncertainty; Prediction of trends of restoration.

(4) The integrated implementation of ecosystems restoration engineering Technological procedural integration for ecosystems' mass, energy and information restoration (procedural structural and functional configuration for temporal and spatial heterogeneity and connections of restored ecosystems' mass, energy and information); Integration of manpower, intelligence, finance and mass input (raw materials, equipments, etc.); Ecological testing, checking and examining for restoration success.

(5) Post-evaluation of ecosystems restoration engineering implementation Cost/benefit analysis after restoration; Social, cultural, psychological impacts after restoration; Environmental, biotic and ecological impacts or effects after restoration; Establishment of integrated management model after restoration.

(6) The ecosystems restoration integrated management system Plans, organizing, training, monitoring, simulating, predicting, supervising and public participation supported by 3S-aided eco-restoration integrated management information systems (compared with control or standard ecosystems).

3.2 生态恢复工程基本原则的关联组合体系

生态恢复工程的实施包含众多的基本原则^[1,4,5,7~10,13]。其中常用的如关键因子原则、生态位原则、限制性与耐受性原则、种群密度制约与种间关系原则、边缘效应原则、生态演替的阶段性原则、等级层次性等景观生态原则、生态流链与生态网络原则、多级与循环再生利用原则、生态安全原则、人类经济性(成本-效益-效率)原则、社会公平原则、生态伦理等生态文化原则、心理美学原则、人类健康原则等等。从理论上讲,这些原则的总数难以计数,其作用或各有不同或有一定程度的交叉,不同的退化生态系统类型、不同的恢复时空尺度范围和不同的恢复目标,其所需要的原则集合也各不相同,各原则之间的相对独立性和关联性也不一样,因此,需要对它们进行合理的归组和综合,即:消除原则之间的重叠性,保持它们之间的相对分立性,挖掘原则之间固有的关联性,将基本原则的分立性与关联性结合起来,形成一个从单一原则到关联原则组到原则体系的集成系统,这样有利于恢复工程的运作与管理。

从生态系统原理出发,可以从这些基本原则的 4 个关联特征对它们进行关联分组:

(1) 时间关联组 该组原则为生态系统恢复的时序性提供指导,常用的原则如生态位原则、等级层次性原则、中权效应原则、生态演替(阶段性)原则等。

(2) 空间关联组 该组原则为生态系统恢复的空间关系提供指导,常用的原则如生态位原则、中权效应原则、等级层次性原则、生态演替(阶段性)原则、边缘效应原则等。

(3) 构造关联组 该组原则为生态系统恢复的构成、结构的形成和维持提供指导,常用原则如关键因子原则、生态位原则、中权效应原则、边缘效应原则、生态演替阶段性原则、等级层次性等景观生态原则。

(4) 功效(性质)关联组 该组原则为生态系统恢复的功效目标的实现提供指导,常用的原则如生态位原则、限制性与耐受性原则、中权效应原则、种群密度制约与种间关系原则、多级与循环再生利用原则、边缘效应原则、生态安全原则、生态流链与生态网络原则、人类经济性(成本-效益-效率)原则、生态文化原则、社会公平原则、人类健康原则等。

在以上 4 类原则关联组的基础上,可以进一步将它们综合成针对特定退化生态系统对象和生态恢复

目标的原则集成体系。值得注意的是,在基本原则中,有一项原则应受到重视,其被称为中权效应(或称中缘效应)原则。此原则提出的依据是:对一定时空条件下的生态系统,其在组分、结构和功能上都具有层次结构关系(如一定的营养级水平),居中水平的组分、结构或功能过程必然同它所处水平之上和之下水平的组分、结构或功能过程发生作用(垂直作用);同样,它也同其前后左右邻近组分、结构或功能过程发生作用(水平作用),并常常趋于比生态系统的其它部分更多样、更敏感或具有更大的变化弹性;另一方面,在一定条件下它又可以有更大的适应性和创造性而倾向于影响或作用于该生态系统的其它组分、结构或功能过程,从而使它在该生态系统中具有更大的二重性或不确定性。这种中位组分、结构或功能过程的作用效应即被称为中权效应,这一效应对生态恢复工程具有特殊的生态意义。具有中权效应的生态系统组分、结构或功能过程与具有边缘效应的组分、结构或功能过程是不同的,前者对生态系统内而言;而后者虽也具有不确定性,但相对生态系统边界区域同外部其它生态系统或系统边界之间的相互作用而言。一般地讲,生态系统中权区域与边缘区域都具有相对于其它部分更强的自组织潜力或变化敏感性。它们所产生的效应是生态系统所具有的互为补充的 2 种基本效应。

4 生态恢复的技术集成体系

技术是生态恢复的基础,而且,不同的技术是在不同层次(非生物因子、生物物种个体、种群、群落、生态系统、景观、区域乃至全球生态系统)起作用。一般地,人们将恢复技术分为物理技术、化学技术、生物技术和生态技术等等,针对的是恢复过程中特定的物理问题(如辐射、风、水文、土壤团粒结构、温、湿、基质、地形、地质、节水、灌溉等)、化学问题(如污染物或废弃物处理及利用、土壤化学结构与过程、富养化、土壤肥力、酸化、盐渍化、盐碱化等极端环境改良等)、生物问题(如采种、选种、育种育苗、种质改良等)、生态技术(从不同层次上看,如种群调节或群落配置、生态行为控制、生态系统结构与功能组装、生态系统演替调节、景观斑块-廊道-格局-过程构建与优化、生态区域建设、地球生态系统建设等);从恢复实施途径来看,可以分为勘查与诊断技术(结合卫星定位、遥感和地理信息系统的 3S 技术)、规划与设计技术、生态管理技术(恢复过程及恢复前后管理;恢复评价技术、基于 3S 技术的监测、监控、模拟、预测-预报-预警等);从恢复的人类利益原则来看,则包括了保护技术(如生境、生物多样性保护)、废弃物处理及资源化技术、各类资源利用技术等等,总之,恢复技术可以从不同角度来划分、开发和使用,其主要取决于退化生态系统的背景状况和拟要恢复的目标与时空范围。从以上讨论可以看到,国内外生态恢复技术的发展日趋多样化,并有效地提高了生态恢复的工程效率和效益,但目前仍然面临许多问题,主要表现在:①对不同空间尺度上的生态系统(含景观)、区域的退化风险的探测、跟踪和指示技术发展不够;②多项恢复技术的系统耦合与集成(如现代高新技术与传统生态技术的整合)技术发展仍然还很薄弱;③生态恢复的系统管理技术发展不足;④退化生态系统信息网络的恢复技术发展不够。因此,从更全面和系统集成的层面上来重新理解生态恢复技术,得到一个新的生态恢复技术体系的框架,这一框架可以分为五大技术集成体系:①生态系统变化(退化、稳定和恢复)的实时探测、诊断、发布与预测集成技术,这类技术通过遥感、传感、(人的)知感的三感融合技术,结合信号传输网(如因特网)、视频-语音网和计算机网的三网技术、卫星定位和地理信息系统技术来探测、诊断、报告和预警不同层次上生态系统变化和退化态势及其风险大小;②不同层次的退化生态系统重构或重组集成技术,它包括了基于一定恢复目标的生态系统组分(生物因子和非生物因子)的引入或培育技术,生态系统结构的构建与优化技术,生态系统功能的创建、耦联与转换技术以及生态系统的时空配置技术等四大技术所组合形成的集成技术,其中,生态系统时空配置是该集成技术有效性的关键;③退化生态系统生态-经济价值恢复的集成技术,它包括了由生态系统价值测度与评价、生态系统恢复的成本减(少)化(转),生态系统恢复的效益增质与增值三大类技术整合形成的生态价值集成技术,生态系统恢复过程中和恢复后的生态资本存量价值和生态服务功能价值的(类型)增加和(数量)增长是该集成技术有效性的重要体现;④退化生态系统信息网络重构与延展的集成技术,它是在人、生物和非生物之间构造生态信息联络与反馈调节平衡通道,促进生态系统整体自我调节与控制能力、自组织能力形成的综合技术,这是生态恢复技术发展中最为缓慢的一部分,也是技术性最强,操作性最难的一部分,它常常包含有文化生态信息、个体及群体行为生态信息、人及生物的心理生态信息、人及生物的社会生态信息等的传

输、叠加、转换、耦联形成的生态信息网络;⑤退化生态系统恢复管理的系统集成技术,它包括了由生态系统恢复过程中和恢复后不确定性(风险和机会)的缓冲、化解、化转和利用技术;生态系统恢复的组成、结构、功能的监测、监控、模拟、预测、预警技术;生态系统恢复的人的心理、行为、文化、健康的监管、调理与保育技术;生态恢复的价值构造与价值的累积、转换、调转、耦联技术等整合形成的生态管理集成技术。总之,生态系统恢复的整合技术体系是一个生物、非生物和人类的技术因素交互耦联起来的人类-自然集成技术系统,这一技术系统虽具有它的不确定性、复杂性和动态性,但也具有其可理解性、可控制性和可操作性,是生态恢复必不可少的支持系统。

5 生态恢复模式的分类及其集成体系

在不同时空尺度上,生态恢复应采取不同的技术模式(包括对恢复过程的管理),而不同模式所能达到的恢复目标、效率和效益是不同的^[12,14]。从人类原则来考虑,生态恢复一般可划分为如下几种模式:①自然恢复(也称之为非人工干预恢复),在没有任何人为的抚育恢复或其他活动的影响,让退化生态系统自我恢复。②低人工干预恢复,通过人工建立一定的理化环境条件,或人工辅助引进一些关键物种源,适“机”地促进生态系统结构和功能的形成,在一定程度上诱导、增强退化生态系统恢复潜力,从而使其主要依赖于其固有演替潜力完成生态系统恢复。③适度人工干预恢复,依据生态系统演替状况和一定的人类价值目标,以一定频率、强度和不同方式的正向干预来调节、修复、补偿、重建其原有的演替能力,生态系统可以沿原有或其他演替路径演化,能够形成一定的生态系统结构或(和)功能。④高度人工干预恢复,依据人类自身的价值目标需要,在频率、强度和方式上,强烈干预和控制其演替,最终形成人类所期望的生态系统结构和功能,并具有一定人类效益。

以上关于恢复模式的分类是基于人类对恢复过程介入的方式、强度等方面来考虑的,在恢复实践中,常常面临的不是对上述单一模式的使用,而是需要根据恢复的特定自然或(和)人类目标,对不同模式进行系统性复合和集成性实施,这正好体现了生态恢复工程的实质所在。采用系统目标复成法则来考虑不同模式的整合,所谓生态恢复的系统目标复成法则就是根据恢复的系统目标(常常不是单一的或多个目标的并行分立实现,而是多个分异目标的有机化和整合化,目标的分异化和有机化是该系统目标不可缺少的组成部分),通过以成本约束、效益约束、尺度约束等3方面为核心的生态集成管理体系对不同恢复模式进行复合,并进行集成性实施,最终达到恢复的系统目标,即本文第2节中提出的4种最终目标形式的耦合,或人类-自然双重目标的耦合。

3个约束的生态含义是:①成本约束,通过不同恢复模式的联合或耦合,形成自然成本与人类成本的优化分配结构,使自然的边际成本与人类边际成本平衡,最终约束到恢复总成本最小化方向上来。②效益约束,通过不同恢复模式的结合与整合,建立自然效益与人类效益的优化分配结构,使自然的边际效益与人类边际效益平衡,最终约束到恢复总效益最大化和总效率最适化的方向上来。③尺度约束,通过不同恢复模式的耦联和组装,建立自然的恢复时间成本(通过自然过程恢复自然-人类总体生态价值的总时间投入量)与人类的恢复时间成本(通过人类的相关过程恢复自然-人类总体生态价值的总时间投入)的优化配比结构,使二者达到平衡,最终约束到恢复的总时间成本(生态价值恢复的总时间投入)最小化的方向上来。

通过以上生态集成管理体系下的模式复合与集成实施,可以为生态恢复目标的实现提供机制和组织保障。值得注意的是,在不同的恢复模式中,生物物种进入和人的介入的时空顺序(进入时间和空间分布)是非常重要的,它常常影响着恢复所能达到的最终生态系统结构和功能状态,尤其影响恢复的路径、恢复速度和恢复成本。生物物种的进入方式很多,一些常见的方式如:按自然演替顺序进入(完全依照自然生态演替过程,从低等生物物种到高等生物物种的顺序进入);中后期种先入(通过人工的介入,使生态系统的中期种或顶级物种优先进入,然后主要通过自然演替顺序来促进其它中低等生物物种的进入和多样性的形成);单种/少种先锋种先入(根据退化区域的自然生态条件,引入适当的耐贫、耐旱等适应性强的先锋种,形成一定的单种或少种生态系统);当然,还有其它的进入方式。由于生态系统恢复的时空开放性,物种的进入常常不是单种或少种进入的过程,而是多种进入过程,因此,在一定时空条件下进入的物种组合方式及其与人的介入的协调就成为影响生态恢复模式形成的重要因素,同一时空域上进入的物种组合有利于形成

生态结构和功能流过程的基本环节或链,不同时空域上进入的物种组合有利于形成生态系统的基本生态结构网络,进一步促进一定的生态系统功能网络的发育。

6 生态恢复的系统目标-模式-成本/效益/效率的价值耦合链

一定的恢复目标决定着生态恢复的模式,而恢复模式又取决于恢复的路径和速度,进一步决定着恢复的投入成本、效率和所获得的不同效益。因此,对特定的退化生态系统恢复,其目标(可以划分为第2节中所讨论的4类最终状态)、模式、成本、效率或生态、文化、社会、经济效益和效率之间存在着必然的耦联关系,最终导致了生态恢复的价值耦合链的形成。

表1给出从特征指标、可恢复度、恢复成本/效益等方面对不同模式进行了比较。可以看到,对一定恢复目标的退化生态系统而言,采用不同模式,即不同恢复速度、路径,最终导致的可恢复度也差别很大,其中,人工干预与否和干预程度、方式是影响恢复目标的重要因素。

从一定恢复目标(仍然以最终要达到的4类系统组成、结构和功能状态来描述)下的恢复总成本/总效益关系来看(图3),同质状态恢复的总成本相对最大,同型状态恢复的总成本相对较小,而同功状态恢复的总成本相对更小;异质状态恢复的总成本依赖于具体的恢复背景,它们或介于同质状态与同功状态之间,或比同功状态的恢复总成本更低。对含人类目标的不同恢复模式而言,人类、生物、理化因素或其中一部分因素的联合作用会使物质、能量和信息的流通在人类过程与自然过程之间呈现特定的分配(异)格局,这一分配格局在恢复总成本-总效益结构中体现为自然投入成本(或自然效益)和人类投入成本(或人类效益)的配比方式和数量,不同的配比方式和数量,反映了不同模式或模式复合的价值链构成与结构特征,它决定着生态恢复的生态效率(表1)。

在生态恢复工程中,很关键的问题就是在一定的系统恢复目标下,如何根据具体的生物物理和人类活动条件来调节和优化恢复价值耦合链中自然-人类投入成本(或效益)比例或自然的成本-效益比与人类的成本-效益比的平衡结构,以找到相对优化(最优常常是不可达的)的恢复模式或模式复合类型(表1),实现最适生态效率。一般地,尽可能降低人类成本,提高人类效益;或者,将人类成本(或自然效益)按一定比率(依赖于恢复所要达到的人类目标和自然目标的复合结构)转换为自然成本(或人类效益)是恢复效率规划设计所应考虑的重要内容。一般地,一个可持续的系统恢复目标不是使人类效益达到最大(或人类成本达到最小)而自然效益达到最小(或自然成本达到最大),而是通过建立一定组成、结构和功能的生态系统来使自然的成本-效益配比结构与人类的成本-效益配比结构达到生态系统恢复规律所自然要求的合理水平,这即是最适生态效率。仅仅企图寻求人类效益的最优(或人类成本最小)而弱化自然效益(或增加自然成本)的恢复过程常常是不可持续的,也难以最终成功。

7 结语

生态恢复是解决当前全球自然生态、经济生态和人文生态退化的基本手段。目前,对自然生态恢复的研究与应用已取得巨大进展,已形成了较为完整的方法和技术体系。然而,生态恢复的研究相对缓慢,而且,自然生态恢复的成功实践对理论、原则、模式

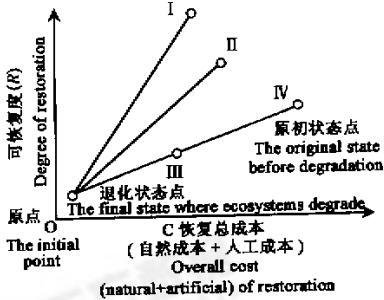


图3 不同生态恢复目标的总成本差异的简化对比
Fig. 3 A simplified descriptions on disparity of costs for different ecological restoration endpoints

I. 异质恢复 Restoring to the state of heterogeneity (Reclamation); degraded ecosystems may get to the position where it has different compositions, structures and functions from before its degradation, in the meantime, human cultural, social and economic positive effects are emphasized; II. 同功恢复 Restoring to the state of iso-functionality; degraded ecosystems may get to the position where it has the same or similar ecological functions but the different compositions and structures from before its degradation; III. 同型恢复 Restoring to the state of homotype; degraded ecosystems may get to the position where it has the same or similar structure and functions but the different compositions from before its degradation; IV. 同质恢复 Restoring to the state of homogeneity (Restoration); degraded ecosystems may get to the position where it has the same or similar compositions, structure and functions as before its degradation

和技术的系统化、集成化有着紧迫的需求,并孕育着巨大的研究和应用前景,尤其是在不同系统恢复目标下的模式集成、信息集成、技术集成以及生态集成管理体系将成为未来生态恢复研究的重要方向。本研究正是围绕生态恢复的概念综合、退化与恢复的耦联关系、恢复演进过程的描述与判定、恢复原则、模式、技术的分类与集成、恢复的系统目标-模式-成本/效益/效率价值耦合链等生态恢复工程中系统集成的前沿问题作了理论上的初步探讨。

表 1 特定系统恢复目标下不同生态恢复模式的比较⁽¹⁾

Table 1 A comparison of different ecological restoration models under specific integrated objectives				
	自然恢复 Natural restoration	低干预恢复 Restoration with low human intervention	适度干预恢复 Restoration with moderate human intervention	高度干预恢复 Restoration with high human intervention
I. 恢复模式的特征指标				
1.1 恢复时间(速度)	很长(100~1000a) Very long	长久(50~100a) Long	较短(20~50a) Short	短(5~20a) Very short
1.2 恢复路径				
物种组合阵列(含人类)	多样而复杂 Diversified & complicated	方式多样 Diversified	或多样或简单 Diversified or simple	相对较简约 Relatively simple
结构连结	多等级层次链网 Hierarchical chains or webs	多等级层次链网 Hierarchical chains or webs	简单或多级链网 Simple or Hierarchical chains or nebs	相对简单链网 Relatively simple chains or nebs
信息积累-复合与功能耦联-整合	连续与离散的交互协同耦合与转换 Continuous & discrete interactively synergizing, coupling and conversion	连续与离散的交互协同耦合与转换 Continuous & discrete interactively synergizing, coupling and conversion	离散主导的交互协同耦合与转换 Discrete-dominated interactively synergizing, coupling and conversion	或连续或离散的耦合与转换 Continuous or discrete interactively synergizing, coupling and conversion
II. 经济成本				
自然-人类比	高或很高 High or very High/低或无 low or zero	中等或较高 Moderate or higher/高或较高 Higher or much higher	高或较高 High or much higher/低或较高 low or higher	高或很高 High or very high/低或无 low or zero
成本-效益比 ⁽²⁾	低或较高 Low or higher	低或较低 Low or much lower	较低或较高 Lower or higher	低或高 Low or high
III. 可恢复度				
IV. 恢复效益/效率	不确定 Uncertain	中等 Moderate	较高 Higher	较高 Higher
4.1 自然效益(效率)	高或很高 High or very high	高或较高 High or higher	一般或较低 Moderate or lower	相对低或很低 Lower or much lower
4.2 人类效益(效率)				
生态服务功能	低或高 Low or high	一般或较高 Moderate or higher	较高或很高 Higher or much higher	低或高 Low or high
经济产出	低或高 Low or high	一般或较高 Moderate or higher	高或较高 High or higher	较高或很高 Higher or much higher
人文功效(文化、社会与心理效果)	多样的效果 Diversified effectiveness	多样的效果 Diversified effectiveness	或多或少的效果 Less or more diversified effectiveness	特化的效果 Specific effectiveness

* (1)本表以同一退化生态系统、景观或生态区域为基准来做比较。(2)这里,成本指自然成本与人类成本的总和,而效益也是指自然效益与人类效益的总和。I. Key indicators of restoration models: 1.1 Time(speed) of recovery; 1.2 Pathways of recovery; Human-involved temporal & spatial combinations of biotic species; Structural configuration; Integration & coupling of ecological functions and accumulation & emergence of ecological information. II. Economic cost (Natural to human ratio) Region of cost-benefits; III. Degree of recovery. IV. Benefits and efficiencies of recovery; 4.1 Natural benefits(efficiencies); 4.2 Human benefits(efficiencies); Ecological services; Economic output; Cultural efficacy.

生态恢复工程不仅具有自然性,它更具经济性、人文性和选择性,恢复在系统意义上是一种“天人互用”的生态自设计与自组织过程,这是其概念的综合性内涵。选择性是退化生态系统完全回复到原初状态的不可能性或有限性在工程实施中的体现。对生态恢复过程的描述和成败判定是一个复杂的问题,本文提出了按矢量生态价值的统一尺度来描述恢复进程的方案,采用矢量价值是基于生态系统恢复的不同类价值不具有简单的数量可加性。用自维持能力、生态整合能力、自调节能力和自组织能力等 4 个生态系统能力及其耦合来作为恢复成败的判定标准,生态恢复的最终目标是实现自然价值与人类价值的总体(非线性总和)最大化和生态效率的最适化。

生态恢复工程的核心问题是系统集成与整合,它的含义是在一定系统恢复目标下通过生态集成管理体系对分立的基本原理、模式、信息、技术进行系统复合和集成化工程实施,以实现恢复成本、效益和尺度的优化和效率的适化;其中,生态集成管理体系是保障生态恢复目标实现的机制性条件。

参考文献

- [1] Bradshaw A D. The reconstruction of ecosystems. *J. of Applied Ecology*, 1983, **20**:1~17.
- [2] Cairns J Jr ed. *Rehabilitating damaged ecosystems*. C.R.C. Press, Florida, 1988.
- [3] Dobson A P, *et al.* Hopes for the Future: Restoration Ecology and Conservation Biology. *Science*, 1997, **277**:515~522.
- [4] Jordan J Jr. *The Recovery Process in Damaged Ecosystems*. Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Michigan, 1980.
- [5] Miles J, Walton D W H. *Primary Succession on Land*. Blackwell: Oxford University Press, 1993.
- [6] Bradshaw A D and Chadwick M J. *The restoration of land*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1980.
- [7] Bradshaw A D. Restoration of mined lands——using natural processes. *Ecological Engineering*, 1997, **8**:255~269.
- [8] Jordan J Jr, William R, *et al.* Eds. *Restoration ecology: a synthetic approach to ecological research*. Cambridge University Press, Cambridge USA. 1987.
- [9] Lan C Y(蓝崇钰), Shu W S(束文圣), Sun Q Y(孙庆业). Reclamation in mining lands. In: Cheng C D(陈昌笃) ed. *Sustainable development and ecology*(in Chinese). Beijing: China Science & Technology Press, 1990. 132~138.
- [10] Gemaul R P, Ni P N(倪彭年) translated. *Colonization of plants in industrial wasteland* (in Chinese). Beijing: China Science Press, 1987. 132~138.
- [11] Zhao J K(赵景逵). *Land reclamation technologies and management in mining areas* (in Chinese). Beijing: China Agricultural Press, 1993.
- [12] Shu J M(舒俭民, 等), *et al.* Ecological restoration of wasteland in mining areas. *Chinese Population, Resources and Environment*(中国人口, 资源与环境), 1998, **8**(3): 72~75.
- [13] Yu Z Y(余作岳), Peng S L(彭少麟) ed. *Ecological researches on vegetation restoration in ecosystems of tropical and sub-tropical regions*. Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press, 1996.
- [14] Zhou S L(周树理). *Reclamation and greening in wasteland of mines*. Beijing: China Forestry Press, 1995.
- [15] Li S Z(李树志). *Biological reclamation technologies*. Beijing: China Forestry Press, 1995.
- [16] Gao L(高林). Ecological restoration engineering in Mines. In: Wang R S(王如松) ed. *A guide to advanced and applicable technologies for medium and small cities in China* (in Chinese). Beijing: China Science & Technology Press, 1998. 338~344.
- [17] Li Y C(李玉臣, 等), *et al.* Ecological restoration researches in wasteland in mines. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese)(生态学报), 1995, **15**(3): 339~343.
- [18] Hu D(胡聃). A measuring framework for ecosystems sustainability. *China J. App. Ecol.* (in Chinese)(应用生态学报), 1997, **8**(2): 213~217.