

工程项目生态系统概念与原理研究

周红, 成虎, 徐鹏富

(东南大学土木工程学院项目管理研究所, 南京 210018)

[摘要] 依据生态学和应用生态学的基本概念和原理, 结合工程项目系统的特征, 提出了工程项目生态系统的概念。采用对比分析法对工程项目生态系统的层次结构、原则、组成进行了具体的分析。工程项目生态系统的演化、平衡和生命系统一样, 是个非线性的耗散结构, 其演化和平衡满足逻辑斯蒂模型。

[关键词] 工程项目; 生态系统; 概念; 原理

[中图分类号] C931; Q149 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)10-0094-05

1 生态学研究工程项目管理的意义

“生态”是目前使用最频繁的词汇之一, 例如生态住区、生态建筑、生态城市。生态学的研究表明, 社会系统和生命系统有类似的规律。按照人类对生态系统的影响程度可分为自然生态系统、半自然生态系统和人工生态系统。城市生态系统是最典型的人工生态系统^[1], 工程项目构成了城市的垂直和水平空间。大型工程项目的建设在城市/区域的社会、经济、环境的可持续发展息息相关。因此工程项目的建设不只是一个个简单的、孤立的工程问题, 还是一个城市/区域的可持续发展的大系统问题。另一方面, 从发达国家的建设工程发展规律来看, 基础设施的“持续能力”(capacity of continuance)建设和“可持续的运营、维护基础设施”(sustainable operation & maintenance)已经成为城市化后期的国家所面临的共同问题^[2,3]。生态学为工程项目可持续发展问题和工程项目管理的研究提供了新的思路。

2 工程项目生态系统

2.1 概念

工程项目生态系统是一种类比的观念, 工程项目从生态学的视角来看就是一个大的生态系统。本文的研究对象是城市生态系统的公共工程项目系统。通过应用生态学的分支学科城市生态学的研究, 我们知道城市是个大的人工生态系统, 并能够从历史、结构、功能三方面进行生态学的描述。在以人类活动为中心的城市、区域的生态系统中, 以公共工程为主体构成了工程项目生态系统, 包括环境、经济、社会和工程项目及其他的项目组织。

按照社会经济技术的发展过程, 工程项目生态系统越来越复杂、越来越完善。由于人对能源的需求, 产生管道工程; 出行需求产生交通工程; 供水需求产生水利工程; 动力需求产生电力工程; 相互联系需求产生通信工程; 废物处理产生垃圾处理场, 污水处理设施; 娱乐需求公共设施; 对教育需求产生学校、图书馆; 对保健需求产生医院保健院等, 它们共同构成公共工程的生态系统。公共工程为主体构成的工程项目生态系统是城市功能的生命线, 同时也是城市生态系统(区域)的一个子系统。同自然生态系统一样, 工程项目生态系统有着类似的层级结构, 垂直与水平的空间分布; 物质循环、能量流动、信息传输, 并且依赖生物圈提供资

[收稿日期] 2005-10-20; **修回日期** 2006-05-30;

[作者简介] 周红(1973-), 女, 安徽寿县人, 东南大学土木工程学院博士研究生, 研究方向: 工程项目可持续发展; 成虎(1955-), 男, 东南大学土木工程学院教授, 博士生导师, 研究方向: 工程项目管理

源和服务。工程项目生态系统与生态系统的关系如图 1 所示。

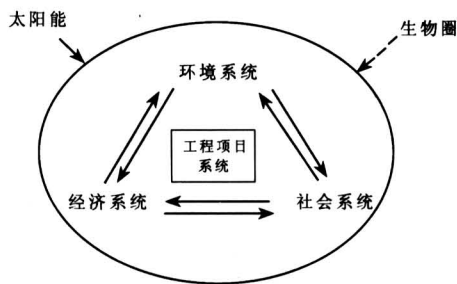


图 1 工程项目生态系统与生态系统的关系
Fig.1 Relationship between construction project ecological system and ecological system

2.2 工程项目生态系统层次

表 1 生态系统与工程项目生态系统的层次^[1]

Table 1 Ecological system and construction project ecological system hierarchy

层次	名称	定义	工程项目生态系统
1	生物体 (organism)	单个生物	单个工程
2	物种 (species)	生物类群	同类工程
3	种群 (population)	任一生物物种个体组成的群体	同类工程群体
4	群落 (community)	一定区域内物种种群的总和	不同工程总和
5	生态系统 (ecosystem)	一定区域内群落及其生存环境的总和	一定区域工程及其所在环境的总和
6	生物圈 (ecosphere)	地球上所有生态系统总和	地球上所有生态系统总和

对于工程项目生态系统来说，就是组成成分、工程之间的功能关系和各种工程之间的空间分布状态，包括垂直和水平的状态，从而构成城市和区域的错落空间。

工程项目生态系统的行为主体是工程项目的参与者和监督者（使用者），也就是这个系统中的核心动力，生物成分是工程所处环境的所有生物。工程项目之间的功能关系是项目与项目相互联系和相互作用，并构成系统的主要因素。

自然生态系统中，种群之间是通过“捕食”关系形成“食物链”、“食物网”联系起来的，所形成的相互关系就是它的营养结构。而在工程项目生态系统中，这种“捕食”关系不存在，取而代之是相互之间互利共生的功能关系。工程项目生态系统依靠功能关系联系在一起，并共同满足行为主体的需要，构成城市、区域、国家的功能体系。例如，通信工程为各种工程提供通信平台和通道；能源工程为其他工程的运营提供动力等等。

一般来说，生态系统中的物种结构主要是群落中的优势种类，在生态功能上以主要种类或类群作为研究对象。在工程项目生态系统中，大型公共工

程就是工程群落中的一个“优势种”和主要种群。相对于大型公共工程系统来说，交通工程又是其中的“主要物种”。“主要物种”和“优势种”在城市化进程的不同阶段所起的作用和结构是不同的。例如高速公路是交通工程系统中的优势种，通信工程是信息时代的“优势种”。

2.3 工程项目生态系统结构

自然生态系统的结构包括两方面的含义，一是组成成分及其营养关系；二是各种生物空间配置（分布）状态。具体来说，生态系统的结构包括物种结构、营养结构和空间结构。

对于单个工程来说，工程的实施构成了以项目为核心的项目生态链。项目生态系统由项目、项目组织、建筑企业和业主（政府）构成以项目为核心的项目生态链。在这个生态链中，有系统流的循环流动，纵向上的管理层次和每个生态链中的“生物”——项目组织、建筑企业、劳务承包商等内部有横向的管理层次，成为管理生态链，如图 2 所示。

任何一个项目都不是孤立存在的，是与周围外部世界相联系的，存在与自然、社会、经济复合生态系统的物质、能量、信息的交换。工程项目的研究与实践就是建立和实现不断优化从建筑原材料、中间产品、零构件、设备元件，再到建成品的使用、更新、废弃和再循环的全寿命期过程。其项目生态系统的范畴包括项目本身、同类项目、不同类

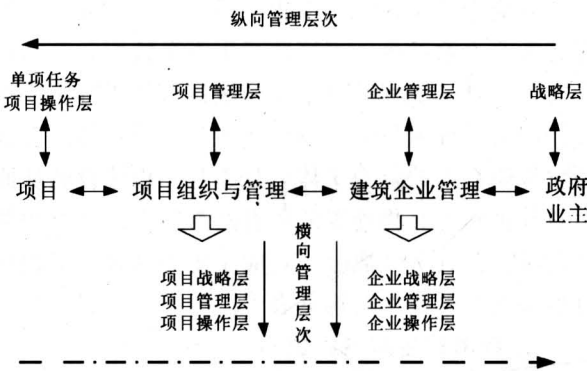


图2 工程项目生态系统生态链
Fig.2 Construction project ecological system ecological chain

别项目、项目所在区域、工程项目组织；物资循环包括原材料选择、制造、使用、处置、再循环；能量流动包括项目立项、项目实施、项目运营、项目处置全生命周期的能量消耗和流动；信息传输从业主、管理部门、承包商、供应商、项目之间信息的传递、存储、共享等。

3 工程项目生态系统原则与组成

3.1 工程项目生态系统原则

工程项目生态系统也满足生态系统的四个原则，两者对比分析见表2。

表2 生态系统和工程项目生态系统原则对比^[4]

Table 2 Basic ecosystem rules of ecosystem and construction project ecosystem^[4]

	生态系统	工程项目生态系统
循环传输 (Round put)	物质循环 能量层叠	物质循环 能量层叠
多样性 (Diversity)	生物多样性 物种、生物 相互依赖性和协作 信息	工程项目类别及其多样性 行为者多样性（行业、 部门和企业等） 相互依赖性和协作 建筑制造业输入、输出
地域性 (Locality)	利用地方资源 注重地方特性 限制性因素 地方依赖性 协作	利用地方资源（包括废物） 注重地方特性 限制性因素 地方成员协作 项目间互补共生
渐变 (Gradual Change)	利用太阳能进化 通过繁殖进化 轮回的时间周期性 和季节性 系统多样性发展缓慢	利用可再生资源持续 利用技术改造更新 本体发展的非线性（库 兹涅兹定理）、 利用废物、新能源和再 生资源 系统多样性缓慢发展

3.2 工程项目生态系统组成

自然生态系统中存在三种有行为的基本组成：生产者、消费者、分解者；按照工程项目生态系统的原则，可以对工程项目生态系统的组成进行划分。

按照生物学的观点，生态系统只能给生物之间的关系既是竞争关系，又是共生的关系。同类竞争，异类共生。在工程项目生态系统中，共生关系是整个系统存在、发展、进化的主要关系和动力。尤其是在信息共享与废物利用和处理方面。

对应于自然生态系统，工程项目生态系统的组成分析如下：

- 1) 资源开采者。包括利用基本环境要素等自然资源生产初级建筑产品的厂商，如砖厂、水泥厂等；初级产品深度加工和高一级中间产品以及建筑构件的生产者，如预制构件、钢门窗等生产者。
- 2) 制造者。包括提供工程项目咨询公司、设计院、承包商等。不进行“物质化”的生产，但是利用建筑材料和建筑构件进行工程实体的实施；
- 3) 处理者。包括建筑垃圾、建筑包装物、固体废弃物的回收、再利用的资源再生公司、废物回收公司等^[5]。

4 工程项目生态系统演化与平衡

4.1 一般规律

生态学研究表明，在自然条件下生态系统总是朝着种类多样化、结构复杂化和功能完善化的方向发展，直到使生态系统达到成熟的最稳定的状态为止。

对于工程项目生态系统，这个具有多行为主体和复杂组成成分的人工生态系统来说，它的演化和系统平衡也是一个从低度有序到高度有序、从简单到复杂、从不完善到逐渐完善的过程。通过不断的调整功能，满足人的需求，表现为工程项目系统的复杂性，工程项目本身的复杂性，以及随着外部社会经济环境的改变和工程项目本身实体和技术不断更新以适应功能的需要。从建筑工程的实体形式上看，工程已经建成，结构一般不会改变。但是在工程项目全生命周期的时间尺度上，功能和结构应当是相互依存的。工程项目功能不断的变化是动态的，结构相对稳定。由于功能不断的调整，最终引起结构的变化，表现为工程项目的更新和可持续的服务。结构破坏可以导致功能降低，功能的衰退亦

可以使系统的结构解体。

生态平衡就是生态系统内稳定 (homeostasis) 的显示。每个生态系统都在内部和外部两类因素的压力下运行。随着系统范围的不同, 内部因素的界定也不一样。自然生态系统的内部因素是生物群落自身发育和由此引起生境变化; 外部因素常与生物群落自身无关, 如气象条件、地震、洪水等。在当代社会, 对生态系统最大的压力是人口种群, 称之为人类学因素。工程项目生态系统的动力是人, 行为主体也是人。工程项目的建设是为了满足人的需求, 同时人口因素也是制约工程项目生态系统和调节该系统的根本因素。

4.2 工程项目生态系统增长与平衡模型

工程项目生态系统的增长和生态系统是相似的。生态系统中的任何种群都不是孤立存在的, 但是为了研究简化, 单种群的增长模型满足逻辑斯谛增长 (Logistic) 模型^[6]。Feller (1940) 指出, 几乎任何一个逐渐增加其水平的数据, 都将在某种程度上符合 Logistic 模型。工程项目系统是满足人们生活需要的, 主要是满足人口增长的需要, 同时又受到环境容量的限制。如果一种工程, 例如交通工程的数量大于需要的交通运输能力, 那么就会出现运力过剩; 如果运力不足, 又会出现交通拥挤。因此, 工程项目生态系统的增长可以简化成单个工程项目种群的增长方程, 并根据生态系统的 Logistic 方程和耗散结构理论来探讨。

单个种群的增长分别有指数增长 (Malthusian, J 型, 不考虑资源约束) 和逻辑斯谛增长 (S 型, 考虑资源约束) 两种形式, 前者是不受资源约束的连续增长, 是增长的理想状态; 逻辑斯谛增长是有限空间和环境条件下最简单的增长形式^[7]。依据上述原理, 对工程项目生态系统的单种群增长模型做如下的前提假设:

1) 假设环境条件允许某一工程项目种群有一个最大值, 此值称为环境容纳量或负荷量 (Carrying capacity), 常用 K 表示, 当种群大小达到 K 值时, 种群则不再增长, 即 $\frac{dk}{dt} = 0$ 。

2) 某一项目种群增长率降低的影响是最简单的, 即其影响随着密度上升而逐渐地、按比例地增加。例如该项目种群中每增加一个个体就对增长率降低产生 $1/K$ 的影响。若 $K = 100$, 每个个体则产生 $1/100$ 的抑制效应, 或者说, 每一个个体利用了 $1/K$ 的空间, 若种群有 N 个个体, 就利用了 N/K

的空间, 而可供继续增长的剩余空间就只有 $(1 - N/K)$ 了。

3) 该项目种群中密度的增加对其增长率的降低作用是立即发生的, 无时滞 (time lags) 的。

4) 该项目种群之间不考虑使用寿命的差异。

根据以上假设, 种群在有限环境下的增长将不是“J”型, 而是“S”型, 如图 3 所示。

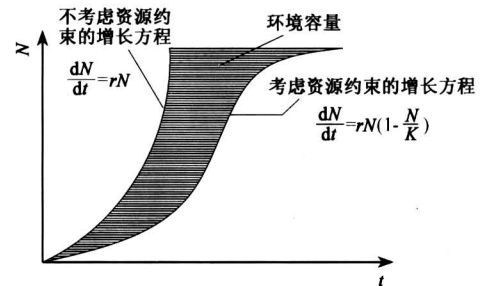


图 3 工程项目生态系统种群增长模型

Fig.3 Construction project ecological system species increasing model

该模型的数学表达式为:

$$\frac{dN}{dt} = rN \left(1 - \frac{N}{K} \right) \quad (1)$$

式中, K 为环境容量; N 为工程项目种群数量; r 为内禀增长率; t 为时间。

显然, 式 (1) 有两个平衡点: $x = 0$ 和 $x = K$ (其中生态学家更加注重第二个平衡点的研究与确定); 并且在 $x = K/2$ 处具有拐点, 是增长速度发生正负变化的分界点。

当 $x < K/2$ 时, 系统是不稳定的, 而且增长速度是增加的。由假设条件知道, 种群不可能无限增长, 工程项目的需求量和环境容量构成了工程建设的限制条件。

根据耗散结构理论, 这种条件下广义流为 $J = N$, 广义力为 $x = r \left(1 - \frac{N}{K} \right)$; 该系统为非平衡态的线性区, 系统运动过程中产生熵:

$$P = Nr \left(1 - \frac{N}{K} \right) \quad (2)$$

$$\frac{dP}{dt} = r^2 N \left(1 - \frac{N}{K} \right) \left(1 - \frac{2N}{K} \right) \quad (3)$$

显然, $P \geq 0$ 且有 $K/2 \leq N \leq K$ 时, $\frac{dP}{dt} \leq 0$; 因此,

$\frac{K}{2} \leq N \leq K$ 时, 系统局部稳定;

在非平衡的非线性区, 同样有 $J = N$, 则 $x = r\left(1 - \frac{N}{K}\right)\left(\frac{2N}{K} - 1\right)N$, 产生超熵:

$$\delta_x P = dNd\left[r\left(1 - \frac{N}{K}\right)\left(\frac{2N}{K} - 1\right)N\right] = -\frac{6r}{k^2}\left(N - \left(1 + \frac{1}{\sqrt{3}}\right)\frac{K}{2}\right)\left(N - \frac{N}{2}\left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\right)\right)(dN)^2(4)$$

1) 当 $\left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\right)\frac{K}{2} < N < \left(1 + \frac{1}{\sqrt{3}}\right)\frac{K}{2}$ 时, $\delta_x P > 0$, 系统整体稳定;

2) 当 $N = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\right)\frac{K}{2}$ 或 $N = \frac{N}{2}\left(1 + \frac{1}{\sqrt{3}}\right)$ 时, $\delta_x P = 0$, 系统处于临界状态;

3) 当 $0 \leq N < \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\right)\frac{K}{2}$ 或 $\frac{K}{2}\left(1 + \frac{1}{\sqrt{3}}\right) < N \leq K$ 时, $\delta_x P < 0$, 系统不稳定;

综上所述可知: 当 $\frac{K}{2} \leq N < \left(1 + \frac{1}{\sqrt{3}}\right)\frac{K}{2}$ 时, 系统局部且整体稳定。

系统稳定不仅要满足上述条件, 还必须深入地研究工程项目本体也就是“生物体”的内在特性, 才能保证整个生态系统的可持续发展。这里仅仅探讨单个工程种群的理想化增长模型。不同工程项目共存的环境空间的工程项目增长模型非常复杂, 甚至在数学生态学的生态系统中多种群的增长模型上不能完全解决。所以工程项目生态系统增长模型还需要长期的探索。

5 结论

经过初步的研究, 结果表明生态学的原理适合

工程项目系统的研究。工程项目从生态学的视角来看就是一个大的生态系统。从生态学的理论与实践出发研究工程项目和工程项目的管理问题, 是研究工程项目可持续发展问题的崭新视角, 能够解决工程项目可持续发展的大问题, 属于原创性的研究, 并在理论上创立了生态学在项目管理上的新的应用领域, 开辟了一个新的交叉学科; 运用新的方法研究工程项目的可持续发展问题, 丰富了可持续发展理论与实践。

参考文献

- [1] 陆雍森编著. 环境评价[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002, 37
- [2] Sohail M, Asce1 M, Cavill2 S, et al. Sustainable operation and maintenance of urban infrastructure: myth or reality? [J]. Journal of Urban Planning and Development, 2005, (39): 39 ~ 49
- [3] Nielsen S B, Elle M. Assessing the potential for change in urban infrastructure systems [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2000, 20: 403 ~ 412
- [4] Korhonen J J. Cleaner Production[M]. 2001. 253
- [5] 邓南圣, 姜峰主编. 工业生态学——理论与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002. 34
- [6] 张炳根. 生态学数学模型[M]. 青岛: 青岛海洋大学, 1990. 4 ~ 6
- [7] 程胜高, 罗泽娇, 曾克峰主编. 环境生态学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. 27

Research on the Concept and Principle of Construction Project Ecosystem

Zhou Hong, Cheng Hu, Xu Pengfu

(Research Institution of Project Management, Southeast University, Nanjing 210018, China)

[Abstract] The concept of construction project ecosystem was put forward conjoined with the characteristic of civil project system based on ecology and applied ecology. The hierarchy, principle and composition of it were specifically analyzed by contrastive method. It is a nonlinear dissipative structure, the same as life system in respect of evolvement and balance. The Logistic model meets the condition of construction project system development.

[Key words] construction project; ecosystem; concept; principle