

生态环境脆弱带 ECOTONE 的基础判定

牛文元

(中国科学院生态环境研究中心, 北京)

摘 要

ECOTONE为国际生态界最近重新定义的基本概念之一。本文在诠释生态环境脆弱带的定义之后, 对其实质及其空间属性作了较全面的逻辑归纳。在进一步研究的基础上, 对于生态环境脆弱带作出了独立的函数表达, 并且就生态环境脆弱带的宽度指标、重迭度指标、脆弱度指标、综合性指标, 提出了较严格的表述形式。它们吸收了生态界面理论, 并把系统生态学中的非稳定性理论, 广延为辨识“全球变化”的基本手段, 从而在生态学理论与应用两个方面, 体现了研究的意义和价值。

关键词: 生态环境脆弱带, 生态环境界面理论。

一、引 言

世界即将临近二十世纪的终结。一方面, 我们迎接了信息时代的到来, 另一方面, 人类所面对的“生态环境应力”(Stress), 也在急剧地扩大。生态环境脆弱带的空间范围和脆弱程度, 都表现出明显地增长。

人类活动从来就不是单向的和孤立的, 它总是对生态环境实施着强度越来越大的干预。这种干预有时是直接的, 更多的时候是间接的和潜在的。非理智的、不清醒的、无远见的人类活动, 尤其是在“生态环境脆弱带”上的掠夺性开发, 已成为持续发展中的大害, 因为它就象一柄双刃的剑, 可能“制造”某种眼前的利益, 同时却给后代设下了陷阱, 此类短期行为所带来的后果, 有可能最终导致人类自身的毁灭。由上述角度去考虑, 国土整治与区域管理, 自然改造与环境保护, 首先应当关注“生态环境脆弱带”。

生态环境脆弱带的研究, 早已引起了全球的普遍重视。在六十年代的国际生物学计划(IBP)、七十年代的人与生物圈计划(MAB)、八十年代开始的地圈——生物圈计划(IGBP)中, 逐步明确地把脆弱带提到了研究的日程。尤其是1988年在布达佩斯召开的第七届SCOPE大会上, 全体成员明确认定1987年1月巴黎工作组提出的ECOTONE新概念, 并通过决议, 呼吁国际生态学界开展对于ECOTONE的研究, 认为它把生态系统界面理论以及非稳定的脆弱特征结合起来, 可以作为辨识全球变化的基本指标。

在一般意义上, 曾把ECOTONE译作“生态环境脆弱带”, 并重新将其定义为: 在生态系统中, 凡处于两种或两种以上的物质体系、能量体系、结构体系、功能体系之间所形成的“界面”, 以及围绕该界面向外延伸的“过渡带”的空间域, 即称为生态环境脆弱带(ECOTONE)。生态环境脆弱带的形状、面积、结构等, 属于空间范畴的内容; 生态环境脆弱带的变化速率及过程演替, 属于时间范畴的内容; 生态环境脆弱带的脆弱程度以及发生频

度,则属于生态环境质量评价的范畴。更为普遍的认识,肯定生态环境脆弱带必然是非线性表现的典型域,它一直被视为界面理论在生态环境中的广延与发展。

二、界面的脆弱性

生态环境无一例外地均表现为广义的非均衡。其直接后果必然是梯度的产生。梯度导致了广义力与广义流,从而使得整个生态系统,处于不停的动态变化之中。

非均衡中最为直观的表现,又必然归结到“广义界面”的讨论。因为在通常的意义上理解,界面应视为相对均衡要素之间的“突发转换”或“异常空间邻接”。由不太严格的定性描述出发,界面“脆弱”的基本特征,可以表达如下:

1. 可被代替的概率大,竞争的程度高;
2. 可以恢复原状的机会小;
3. 抗干扰的能力弱,对于改变界面状态的外力,只具相对低的阻抗;
4. 界面变化速度快,空间移动能力强;
5. 非线性的集中表达区,非连续性的集中显示区,突变的产生区,生物多样性的出现区。

三、生态环境脆弱带的空间归纳

在生物圈中,从宏观的角度去认识生态环境脆弱带,可以归结为如下的空间表达:

1. 城乡交接带 从城市向农村的过渡带。由于人口数量和质量、经济形态、供需关系、物质能量交换水平、生活水准、社会心理等因素,使得这一过渡带的时空变化,表现出十分迅速和不稳定的特征。

2. 干湿交替带 从比较湿润向比较干燥变化的过渡地带。由于气候条件的差异,热量水分平衡的状况产生了不同的生态效果,与此相应的植被类型、土壤类型、地表景观、生产方式等,均具有脆弱程度较高的特点。

3. 农牧交错带 由于生产条件、生产方式以及生产目标的不同,在农业地区与牧业地区的衔接处,形成了一个过渡的交界带。在这个过渡带中,由于人类的生产活动,形成了生态环境脆弱的基本前提。

4. 水陆交界带 由于液相物质与固相物质的互相交接,出现了一个既不同于水体,也不同于土体的特殊过渡带,其受力方式及强度,以及频繁的侵蚀与堆积等,使得这一交界带呈现不稳定的特征。

5. 森林边缘带 森林边缘所承受的环境应力及社会经济应力,不同于森林内部,亦不同于非林地的自然环境,因此该边缘带的形态及演化,常常成为生态环境质量评定的指示者。

6. 沙漠边缘带 由于物质组成、外营力以及地表景观的显著差异,沙漠内部与非用的沙漠农牧区之间,同样形成了明显的生态环境脆弱带,它的移动和变换,反映了各种综合作共同结果。

7. **梯度联结带** 主要由于重力梯度 (高度)、浓度梯度、硬度梯度 (抗侵蚀能力) 等的明显存在, 产生了在侵蚀速率、污染程度、坡面形态变化等的过渡区, 它们在生态环境的系统稳定性上, 显然是脆弱的。

此外, 只要具备上述特征的空间域, 均可划归为生态环境脆弱带。但是必须明确: 生态环境脆弱带本身, 并不等同于生态环境质量最差的地区, 也不等同于自然生产力水平最低的地区, 只是在生态环境的改变速率上, 在抵抗外部干扰的能力上, 在生态系统的稳定性上, 在相应于全球变化的敏感性上, 包括在资源竞争、空间竞争的程度, 表现出可以明确表达的脆弱。

四、生态环境脆弱带的函数表达

生态系统之间完全分明的邻接界线, 在自然界几乎不存在。绝大多数交界表现为一个“过渡带”, 于是该过渡带的尺度、规模、性质及动态, 就决定着生态环境脆弱带的空间特点。

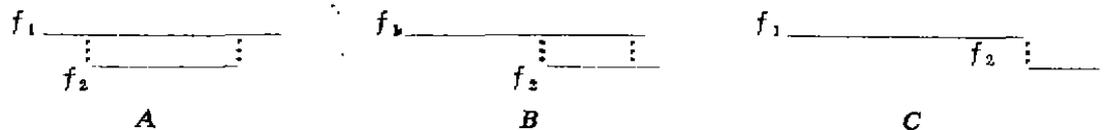
首先提出假设: 对于任何一个独立的生态系统而言, 从其典型位置 (中心) 向边缘的总体性质递推, 可以近似认为是连续的, 并能有条件地使用一类正态函数去加以描述。对于该假设, 还应作出合乎实际的注记:

1. 如总体性质递推的真实分布函数, 并不呈正态分布时, 可以通过适当的数学变换, 使它适应于正态函数的表达方式;

2. 如果无法应用数学方法把真实分布函数调整到正态函数的形式, 可以采用更加适合的分布函数, 这在本质上并不影响对于生态环境脆弱带的解析。

上述假设告诉我们: 所谓的正态函数分布形式只不过作为例子, 去说明脆弱带的解析原理, 它不排斥应用其他函数形式的同等真确性。

两个独立的生态系统, 在其界面处, 一般存在三种状况:



A 为全重迭, 表达一个生态系统 f_2 完全被另一个生态系统 f_1 所包容。如果 f_2 足够小, 则为实际状况下的“生态脆弱点”。B 为部分重迭, 表达一个生态系统与另一个相抗衡, 其重迭部分 (脆弱部分) 具有可逆变化的特征, 如农牧交错带, 其重迭部分可理解为实际状况下的“生态脆弱面”。C 为无重迭的分明界线, 例如水陆交界带, 其脆弱部分的空间范围相对狭窄, 可理解为实际状况下的“生态脆弱线”。

在承认上述假设的前提下, 生态环境脆弱带的函数解析, 主要集中于 B 所描述的状态 (A 与 C 分别为 B 的特例)。在正态函数的表述中, 可以逻辑地写出:

$$f_1 = N_1(x_1, \sigma_1) \quad (1)$$

$$f_2 = N_2(x_2, \sigma_2) \quad (2)$$

在两个函数 (f_1, f_2) 的“交点”上, 其解代表着重迭空间 (生态环境脆弱带) 的位置

及程度。如果正态函数分布范围限定为:

$$x_1 \pm 3\sigma_1$$

$$x_2 \pm 3\sigma_2$$

则 $f_1 = f_2$ 的解将会表述生态环境脆弱带的如下指标:

1. 生态环境脆弱带的宽度指标 (B):

$$B = [x_1 + 3(\sigma_1 + \sigma_2)] - x_2 \quad (3)$$

B 是事实上的重叠带宽度, 代表着空间交错带的规模。 B 随时间的变化 (自身加宽和狭缩, 或者相同宽度的空间移动), 描述了生态环境脆弱带的基本性质。

2. f_1 与 f_2 重叠度 $W(\%)$, 即生态环境脆弱带中对于两类生态特征过渡的重叠度, 占据生态系统 f_1 的空间比例:

$$W(f_1) = \frac{\int_{x_0}^{3\sigma_1} N_1(x_1, \sigma_1) dx_1 + \int_{x_0}^{-3\sigma_2} N_2(x_2, \sigma_2) dx_2}{\int_{-3\sigma_1}^{3\sigma_1} N_1(x_1, \sigma_1) dx_1} \quad (4)$$

占据生态系统 f_2 的空间比例:

$$W(f_2) = \frac{\int_{x_0}^{3\sigma_1} N_1(x_1, \sigma_1) dx_1 + \int_{x_0}^{-3\sigma_2} N_2(x_2, \sigma_2) dx_2}{\int_{-3\sigma_2}^{3\sigma_2} N_2(x_2, \sigma_2) dx_2} \quad (5)$$

占据两个生态系统之和的空间比例:

$$W(f_1, f_2) = \frac{\int_{x_0}^{3\sigma_1} N_1(x_1, \sigma_1) dx_1 + \int_{x_0}^{-3\sigma_2} N_2(x_2, \sigma_2) dx_2}{\int_{-3\sigma_1}^{3\sigma_1} N_1(x_1, \sigma_1) dx_1 + \int_{-3\sigma_2}^{3\sigma_2} N_2(x_2, \sigma_2) dx_2} \quad (6)$$

前述公式中的符号, 与规范的正态分布函数相同, 唯有 x_0 为 f_1 与 f_2 交点的横坐标投影位置。事实上, 重叠度指标 W 代表着两个生态系统互为过渡的规模及权重, 亦可理解为一个生态系统对另一个的“侵袭”程度。它与 B 一道, 从静态分析中较好地描述了生态环境脆弱带的定量特征。

如果出现了另外的情形, 即描述各个生态系统性质的函数关系, 为非正态函数的分布形态, 事实上并不妨碍上述结论的正确性。只要能寻找出确切的表达形式 (用 f_1 和 f_2 表示之), 此时只要解出 $f_1 = f_2$ 的“交点”, 依照相同的思路, 可以方便地获得生态环境脆弱带的指标 B 及指标 W 。

五 ECOTONES 的脆弱度指标 F

仅有生态环境脆弱带的宽度指标 B 与重叠度指标 W , 尚不足以深入揭示 ECOTONE 的脆

弱性。因为前者只注重描述 ECOTONE 的空间规模和权重，而后者才能认识 ECOTONE 的脆弱程度和本质，由此也才能进行有意义的时空对比。

1. 脆弱度指标 F_1

试应用集合论，去研究 ECOTONE 的脆弱度。由此所构成的脆弱度指标为 F_1 。

在 ECOTONE 的脆弱带中（即重迭部分），依照生态系统 f_1, f_2 ，拟定出具有反映脆弱状况的标准。作为例子，令这些标准分别为 A, B, C 。而后将整个脆弱带划分为具有相同面积的“象元”，形成一个空间网络。在每一个网格中，依照上述的标准 A, B, C ，分别独立地填入。总的格网象元数目为 N ，每个象元在独立的和相等的“机会”响应于 A, B, C 后，分别占据象元数为 n_a, n_b ，和 n_c 。则可以期望的概率：

$$\left. \begin{aligned} P(A) &= n_a/N \\ P(B) &= n_b/N \\ P(C) &= n_c/N \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

因为已经假定：3个标准 A, B, C 之间不具有内在的“隐含关系”，则该脆弱带内组合后的独立事件，可以由概率理论导出

$$\left. \begin{aligned} E(A) &= P(A) - \{[P(A) \cdot P(B) + P(A) \cdot P(C)] - P(A)P(B)P(C)\} \\ E(B) &= P(B) - \{[P(A) \cdot P(B) + P(B) \cdot P(C)] - P(A)P(B)P(C)\} \\ E(C) &= P(C) - \{[P(A) \cdot P(C) + P(C) \cdot P(B)] - P(A)P(B)P(C)\} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} E[AB] &= P(A) \cdot P(B) - P(A)P(B)P(C) \\ E[AC] &= P(A) \cdot P(C) - P(A)P(B)P(C) \\ E[BC] &= P(B) \cdot P(C) - P(A)P(B)P(C) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$E[ABC] = P(A)P(B)P(C) \quad (10)$$

方程 (8)，(9)，(10) 中的 $E[\cdot]$ 为事件的期望概率。由“期望概率”与实际观测后获得的“真实概率”之间的对比，可以揭示 ECOTONE 的脆弱程度，亦即生态系统 f_1 与 f_2 在交互区内的“混杂状况”、“侵袭状况”与“蜕化状况”。

在此基础上，又可以通过“标准化”或“规范化”的处理，考虑有关标准在 ECOTONE 内的“最大重迭”，作为衡量 ECOTONE 脆弱度的比率。采用集合论中有关“并集”和“交集”之间的比较，最后去获得“脆弱度” F_1 ，它是在考虑最大的

$$(A \cap B \cap C)$$

之后去完成的。由此所得到的脆弱度 F_1 表示为：

$$F_1 = \frac{R - E(R)}{\text{Max}(R) - E(R)} \quad (11)$$

在方程 (11) 中， R 代表实际观测 $A \cap B \cap C$ 的面积； $E(R)$ 为采用概率所计算的“期望面积”； $\text{Max}(R)$ 为最大可能观测到的“重迭面积”，即最大的 $A \cap B \cap C$ 。

F_1 处于 0 与 1 之间，它越接近于 1，则发生重迭的面积越大，表达为实质上的更加脆弱。 F_1 在方程 (11) 中有可能出现负值，它意味着 ECOTONE 向反脆弱的方向发展。

2. 脆弱度指标 F_2

试应用一般的“信息度量”，去表述 ECOTONE 的脆弱度，并由此构成脆弱度指标 F_2 。

依照生态系统 f_1, f_2 的典型指标“优先排序”，并假设在排序中的系统性质蜕变已被包括其中，在 ECOTONE 内随机选择出 N 个样方，每个样方具有相同的面积。对 f_1 而言，典型指标优先排序可能有 S 个类别 (E_1 分类)，其中每一类别所具有的样方数目分别为 $n_1, n_2, \dots, \dots, n_s$ ，并有

$$\sum_{i=1}^s n_i = N \quad (12)$$

由此看出，在脆弱带中的指标优先排序（从最典型的到最不典型的）为“全谱型”的。依照分类 E_2 ，可以独立地拟定 f_2 的典型指标优先排序，并假定有 t 个类别，形成分类 E_2 。在 E_2 中的每一个类别所具有的样方数目，分别为 m_1, m_2, \dots, m_t ，亦有

$$\sum_{j=1}^t m_j = N \quad (13)$$

在所列出的 $s \times t$ 矩阵中，当然亦会得出

$$\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^t a_{ij} = N \quad (14)$$

其中的 a_{ij} 为 $s \times t$ 矩阵中的元素，它们体现了两类生态系统性质的混交及迭合。进一步指出， $s \times t$ 矩阵所表达的基本意义如下：在 ECOTONE 中的样方总数目 N ，每一个内两种生态系统成分的迭合越小，或被“改造”的成分越少，那么该带的脆弱程度亦越小；反之，两种生态系统成分的迭合越大，其脆弱程度亦越大。以上的这种思考，有可能应用“信息度量”方法去加以实现。

在生态环境脆弱带中，生态系统 f_1 的分类 (E_1)，其自身信息量 $I(E_1)$ 被认为：

$$I(E_1) = N \ln N - \sum_{i=1}^s n_i \ln n_i \quad (15)$$

同理，对于 E_2 分类的自身信息量 $I(E_2)$ 为：

$$I(E_2) = N \ln N - \sum_{j=1}^t m_j \ln m_j \quad (16)$$

很显然， $I(E_1)$ 和 $I(E_2)$ 与各个分类数目的矩阵“行和”及“列和”有关。由此出发，代表两个生态系统总体特征的“联合信息量” $I(E_1, E_2)$ ，则应表示成：

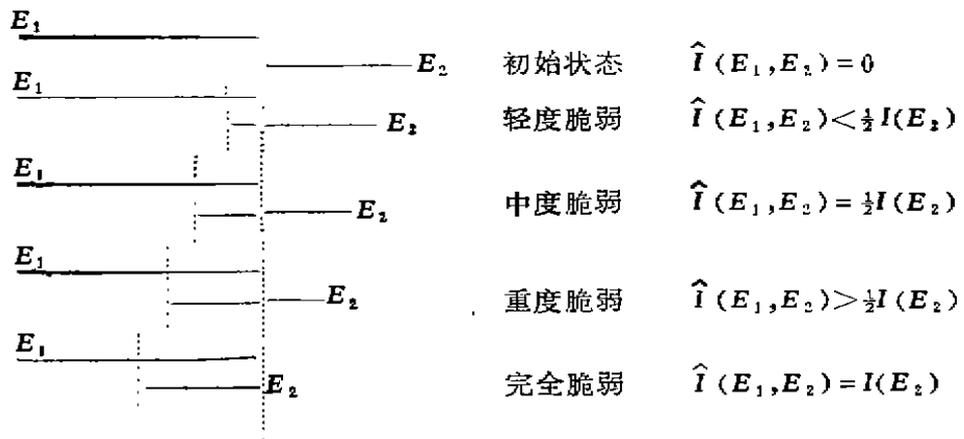
$$I(E_1, E_2) = N \ln N - \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^t a_{ij} \ln a_{ij} \quad (17)$$

它们与同时反映两类生态系统的综合因素 a_{ij} 密切相关。在此基础上，提出了“公用信

息量” $\hat{I}(E_1, E_2)$ 的概念, 按照 Orloci 的研究, 公用信息量事实上是两个生态系统“自身信息量”与其“联合信息量”之差, 并从本质上反映了两个生态系统性质的“迭合度”, 即

$$\begin{aligned} \hat{I}(E_1, E_2) &= I(E_1) + I(E_2) - I(E_1, E_2) \\ &= N \ln N + \sum_{i=1}^i \sum_{j=1}^j a_{ij} \ln a_{ij} \\ &\quad - \sum_{i=1}^i n_i \ln n_i - \sum_{j=1}^j m_j \ln m_j, \end{aligned} \quad (18)$$

似乎可以不加证明就能获得: 两个在空间上相邻接的生态系统 f_1 和 f_2 (按其分类分别为 E_1 及 E_2), 其信息量总和等值于二者联合信息量 $I(E_1, E_2)$ 与公用信息量 $\hat{I}(E_1, E_2)$ 之和, 使用一个基本的示意图, 去对 ECOTONE 脆弱程度进行衡量 (为了方便起见, 所举例子仅针对 E_2 的脆弱而言):



在该图示中, 生态系统性质 E_1 对 E_2 的侵袭, 或生态系统性质 E_2 对于 E_1 的脆弱, 比较形象地被反映出来。

在上述原则下, 我们提出了生态环境脆弱带的脆弱度指标 F_2 , 并表达为:

$$\begin{aligned} F_2 &= \frac{\hat{I}(E_1, E_2)}{I(E_1, E_2)} \\ &= \frac{N \ln N + \sum_{i=1}^i \sum_{j=1}^j a_{ij} \ln a_{ij} - \sum_{i=1}^i n_i \ln n_i - \sum_{j=1}^j m_j \ln m_j}{N \ln N - \sum_{i=1}^i \sum_{j=1}^j a_{ij} \ln a_{ij}} \end{aligned} \quad (19)$$

F_2 为介于 0 -- 1 之间的数值谱。如果 $F_2 = 0$, 则公用信息量为 0, 两个生态系统在性质之间无重叠, 二者完全独立, 处于在讨论范围中的脆弱度下限。当 $F_2 = 1$, 公用信息量完全等值于两个生态系统的联合信息量, 二者完全“亲和”, 处于在讨论范围中的脆弱度上限。

六、ECOTONE脆弱度的进一步表达

本文讨论的重点,为生态环境脆弱进程的不可逆类型。倘若两个相接生态系统之间,出现了在脆弱进程中的往复运动,仍然可以从以上的表达中,寻找出基本遵循的思路,只是应对前述结论作出必要的订正而已。

生态环境脆弱带的脆弱程度,当然首先与 $F_i (i=1,2)$ 有直接联系。但仅仅提出脆弱度指标 F_i , 似乎仍然不能把 ECOTONE 的动态变化,诸如空间占有程度,交界带边缘移动速率,交界带边界移动方向等,同时纳入到全面的考虑之中。为了克服这样的弱点,这里作出一项基本假定:在单位时间内(例如1年),ECOTONE交界带边缘的绝对移动距离为 d ,同时按照通常给定的原则:

$$\begin{aligned} (d_{i+1} - d_i)/d_{(i)} &= 0 && \text{即}(d_{i+1} = d_i) \\ (d_{i+1} - d_i)/d_{(i)} &> 0 && \text{即}(d_{i+1} > d_i) \\ (d_{i+1} - d_i)/d_{(i)} &< 0 && \text{即}(d_{i+1} < d_i) \end{aligned}$$

此时,所考虑的ECOTONE脆弱程度,除了与脆弱度指标 F_i 有关外,还应于“交界带”的动态行为耦联起来,从而作出更加深入的表达。为此,需要设计出动态的脆弱度指标 $D(F)$,并表示为:

$$D(F) = F_i \left(1 + \frac{d_{i+1}}{d_{i+1} + d_i} \right) \quad (20)$$

式中的 $F_i (i=1,2)$ 为前述的脆弱度指标。如果 $d_{i+1} = d_i$, 则 F_i 本身应再上 $F_i/2$ 的脆弱程度(非绝对度量,下同),此时的 $D(F)$ 事实上考虑了带内脆弱深化与空间移动二者的共同效应。如果 $d_{i+1} = 0$, 则 $D(F) = F_i$, 只有脆弱带内的脆弱深化过程,没有空间扩大效应。如果 $d_i = 0$, 而 $d_{i+1} > 0$, 则 $D(F) = 2F_i$, 同时考虑了脆弱深化及空间移动二者的迭加。如果出现了 $d_{i+1} < 0$, $|d_{i+1}| < |d_i|$, 则有正效应(针对脆弱深化而言)产生。

应用对生态环境脆弱带的基础判定,将可以对我国实行生态环境脆弱带的空间划分及脆弱度分级,它不仅有利于对生态学基本理论的深入认识,亦将对国土整治及自然改造提出明确的宏观决策。

参 考 文 献

- [1] 牛文元 1987 《现代应用地理》, 53—90页 科学出版社。
- [2] Niu Wen-yuan (牛文元) 1989 Improvement of Abler's Model with Regard to Searching of Geographical Space, *Chinese Science Bulletin* 34:155—157.
- [3] Putman, R.J., and S.D. Wratten 1984 *Principles of Ecology*. P.111—120, Croom Helm, London.

THE DISCRIMINATORY INDEX WITH REGARD TO THE WEAKNESS, OVERLAPNESS, AND BREADTH OF ECOTONE

Niu Wenyan

(*Research Center for Eco-environmental Sciences, Academia Sinica*)

ECOTONE, a new definition of ecological field, was approved by the plenary session of VII SCOPE in 1988 (Budapest). In order to have a better understanding attributions, connotations, and significations of the term, we have already provided a systematic description and logical induction. In this article, the author would use the ecological boundary theory and the technique of information measure to develop the Index Series which can be applied to determine the basic properties of ECOTONE. Generally, these indices would include the breadth, the overlapness, the weakness, and the synthetical index expressing dynamic characteristics of ECOTONE.

In biosphere, spatial generalization of ECOTONE could be summarized as follows: (1) Connecting zone between urban and country; (2) Mixture zone between arid and humid climate regions; (3) Intersection zone between agricultural and animal husbandry regions; (4) Join zone between land and water body; (5) The periphery of a forest; (6) The fringe of a desert; (7) Sudden change of the gradients (such as altitude, concentration, hardness; and so forth).

Key Words: ECOTONE, ecological boundary.