

自然地理学中的系统理论

韦玉春 陈发虎 冯兆东编译

自1950年以来,系统论已经渗入到自然地理学的某些领域。首先是Strahler把Ludwig Von Bertalanffy的一般开放系统论用于河流系统的研究。随后,Melton通过应用变量系统理论和相关因子分析理论,对流域系统进行了深入研究;他的自控封闭回路(正负反馈)的应用也是一个突出方面。在海岸过程和海岸地貌研究中,Krumbein发展了过程—响应系统的基本概念。Melton和Krumbein的系统模式是建立在数理统计基础上的,他们都非常强调随机过程的重要性。

Strahler认为过程—形态系统应建立在开放系统和稳态理论的动力基础上,数理模型的建立,不论是经验的还是理性的,是与系统论在地学中的应用同时发展起来的。

可以预料,系统与模型间有密切的联系。模型是系统表达和描述的手段。然而,虽然系统和模型

可当做同一概念使用,但还是应该把它们区别开来,即使区分是很困难的。系统是指相互关联或联系的因素组成的集合,它存在于真实世界中,具有独特的标志。模型是试图描述、分析和简化、展开理想系统的人为产物。所有的模型都或多或少有不合适或不正确处,没有一个模型能完全代表它所表示的系统。同样,人们也不可能了解一个系统的全部真正特性。一个系统可以用几种模型如尺度模型、统计模型来描述。我们当做系统的是一个概念(理论)性模型,由以某种方式相互联系的若干部分组成,其存在常依赖于直觉。我们认为,把“系统”理解为“系统模型”要更合适一些,因为前者总暗含有所者的意思。

Strahler把量纲分析引进了地貌学研究中,这对于理解自然系统中变量的性质是相当关键的。Lepold和Langbein把熵的概念引进了开放性地貌

然而,洞积物形成的频率指示距今120000年可能为第二个温度最大值,该值与深海5e亚期的最大值相一致,这第Ⅱ个最大值得到维多利亚洞洞积物铀系法断代数据的支持。末次间冰期的间断需要大量的年代数据来证明,另一种研究方法也可得出同一认识,那就是通过对末次间冰期的石笋运用U系法进行每一生长层的连续测定获得它的生长速度。

很明显,年代超过距今13万年,其可靠的灰华和洞积物年代数据的总数不足以进行其古气候解释。

在倒数第二个间冰期(U28—238记录的第7段)期间,在气候区I的灰华频率曲线中似乎有一个平坦的极大值。下述几种原因可以说明为什么这一峰值这样平。

(1) 大于20万年,铀系法年代数据的统计误差成指数上升。

(2) 倒数第二间冰期(第7段)形成的方解石曾经相当长时间地暴露于沉积后的变化环境中,这导致铀的损失或富集。这一点在倒数第二间冰期形成的灰华与末次间冰期的灰华相对比便清楚地得以证明。较老的灰华的连续生长层中, $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ 比值的变化要比较新的灰华(年代为10万年)大得多。因此洞积物的 $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ 的年龄一般要比同龄的灰华更可靠。

(3) 少量大于13万年的年代数据不可能得出可靠的结论,事实上采集较老的洞积物样品的几率一般低于较新的样品。因为前者经常被埋在后者的沉积层或更新的现代洞积物之下。因此第7段中平坦峰值出现的原因主要与倒数第Ⅱ间冰期灰华研究的采样部位有关。

徐建辉译自《Quaternary Research》20, 1—29 (1983), 宋林华校

系统——主要是河流系统及河流纵剖面的研究上。同一年, Chorley 总结了一般系统论在地貌学中的应用。

系统论在自然地理学中的发展过程里, 接受了 Howard. T. Odum 所著的生态学著作中的主要思想。Odum 强调生态系统是一个开放的能量系统, 并设计了一个有效的表示系统中的能量流和库的图解方法。他的能量流和熵的概念在自然地理系统里用处极大, 这已为 Strahler 所论述。有关的方法论很适用于大气圈和水圈中能量流、物质流系统模型的建立。

Chorley 和 Kennedy 曾把自然地理系统划分为四个级别: 形态系统、级联系统、过程—响应系统和控制系统。Terjung 基本上赞同这种分级, 他强调系统论在气象学中的重要性, 且极力要求集中力量建造自然地理系统。本文提出的系统分类以 Chorley 和 Kennedy 的分级为本, 并综合了动态系统和量纲分析中的有关思想。

信息和系统的级别 据 Terjung 的例子, 系统中的科学信息及其组织可以分为五级, 它们由信息和分析的最简单和最低级的形式到最复杂和最高级的形式。五个级别的内容和功能如下:

- 1 级: 收集对建立功能系统有用的信息。
- 2 级: 确定和分析形态变量的数目。
- 3 级: 确定和分析系统的能量流、物质流。
- 4 级: 确定和分析过程—形态系统 (综合 2、3 级别的信息)。
- 5 级: 确定和分析反馈控制系统。

从理论上讲, 这五个级别在某种程度上可与 Chorley-Kennedy 以及 Terjung 的分级对比, 但他们所用的词语和级别的定义有明显的不同。

自然地理系统中变量的分类 在描述每个级别之前, 必须严格检查变量的数目。系统分析中应用的变量必须用标量、向量或表格方式来定量化: 量纲必须转化成质量、长度和时间, 在某些情况下, 也可包括温度 (如热量系统)。Chorley 和 Kennedy 系统分析中的主要弱点是系统变量的分类和定义缺少精确性。

自然地理学中的系统变量分为四组:

- A 组 动力变量: 表示用以作功的能量支出的机械性质, 与能量、力、应力和动量有关。
- B 组 质量—流变量: 表示物质流在系统中的流动速率。
- C 组 形态变量: 仅有长度量纲或是无量纲的比率, 用以描述大小和形态。
- D 组 物质—特性变量: 其功能仅次于主要的

过程—形态变量, 但作为物质和能量流速率及储存的调节器则是必不可少的。

B、C、D 组的变量构成了系统分析第二级中的形态变量。

A 组动力变量包括能量、应力、力和动量。请注意除动量量纲为 T 外, 其余术语中的时间量纲均以 T^{-2} 或 T^{-3} 形式出现。B 组中的时间以 T^{-1} 形式出现。在用于描述水传输 (流量、降水、蒸发、蒸腾、下渗、径流) 的变量中, 体积 L^3 代替了质量 M , 这仅仅是因为测量水流的仪器 (流速仪、雨量器) 和方法直接与水的体积、深度有关, 淡水的密度随温度和压力变化很小, 故体积可以代替质量的表达。C 组只包括长度量纲 L 或无量纲比率, 变量描述的是纯粹的形态, 如大小和形状。由于这些变量是使物质传输中产生形态的外部应力产物, 故它们也代表效应变量 (effect variables)。

D 组比前三组变化大。尽管有物质和能量的流动, 但也有不变化的环境常量。含水层的渗透系数就是一个例子, 当地下水径流速率随水力梯度改变时, 它保持不变。但应该注意到, 渗透系数起着控制阀的作用, 通过水力梯度的变化控制着地下水的流速。孔隙度是另一个环境常量, 决定了含水层的储水能力。

物质特性变量受其它组变量变化的作用而随时间改变。例如土壤表层水的下渗率会随植被覆盖度而迅速变化。由于植被覆盖度和土壤含水量的季节变化或人工诱发变化, 地表反射率也会变化。

第一级 第一级的方法论和内容与 Terjung 的分级相同, 二者都是定性的编目和分组。该级采用术语描述和图示, 但在较高的级别应用时, 信息必须是定量的, 而且其量纲必须是物理学基本量纲——质量、长度、时间及其组合。定量的信息本身不能构成系统, 但对系统很有用处。我们知道, 研究人员是依靠以前的知识来识别能够组成一个功能系统的事物构型的。同一研究方向或别的研究者早期的研究成果引导着信息的收集。信息反馈在这里起着重要作用, 因为经验越多, 分析越深, 在第一级中收集的信息用处就越大、越合适。

第二级 第二级是确定变量的形态因子, 并把它们联系起来。这些因子被认为具有系统发生和功能上的联系。系统中变量组的定义很广, 但我们最好把“系统”限制应用在 3、4、5 级中发现的复杂关系变量的处理上。

集合变量依取样位置不同, 同时随时间变化。在我们的系统变量分类中, 第二级变量包括 B、C、D 组。A 组变量与能量有关, 是为系统分类中的三、

四级准备的。

B、C、D组变量是形态变量，因为它们描述的是系统形态（构型和构成）而非动力特征。用B组变量表示的物质流是在下列意义上作为形态变量的：物质占据一定的空间，不论它是运动的还是静止的，也不论这种运动是否与系统边界有关。例如流量被认为是一个形态变量，因为，如果水不流动的话，系统本身作为一个物质实体就消失了。C组变量描述系统及其组分的形状和大小。D组变量描述的是系统内物质构型的特性或物理状态，限制着系统内部的物质流和能量流，一般可以作为系统动力的调节器。该组中包括环境常量，如重力加速度。

形态变量间的关系常用数理统计方法来研究，二元或多元相关模式就其自身性质而言是无法区分因变量和自变量的，因为两种变量中都存在有随机变化。Melton 用一个非参数的参量来测定相关，得到一个t值矩阵，矩阵中的变量两两相关。通过显著性检验，Melton 只取了那些t检验显著性可以接受的变量。这些变量作为相关组的中心，而每一个相关组代表着不同类型的形态特征。在图示中，显著性相关的独立变量或基本变量对用直线联接，尽管相关可能是正，也可能是负。连线不表示能量流和物质流，也不表示它们变化的顺序。不能只依据统计分析所得的资料在相关图上绘制方向性箭头。自调是超越形态分析范围的一种现象，对于维持开放系统的稳定相当重要，自调机制的存在以及方向常常是靠对变量关系的推测得到的。

Kennedy 和 Towler 进一步使用了形态变量多元相关模式。他们认识到不同变量对之间有不同的联结程度，从而把这些变量对分成形态的和非形态的两组。

据过程知识，通过确定因变量和自变量对，可以由观察到的事物间的联系推出因果关系。Melton 把因果关系解释为显著性相关的变量间的相互作用。相关对组合成自然反馈系统，后者用连接变量间的箭头来表示。这种解释过程超出了系统分析中的第二级别，将在第四级别中考虑。

另一个例子是海岸坚固性的因子分析。砂粒多少和含水量为自变量，渗透率为因变量。显然，我们不能认为这两组变量之间存在反比例关系。在这种情况下，回归分析只建立了变量间的联系和显著性水平。

形态变量间相互关系的分析更多地是通过正确的量纲等式和无量纲数字的方程式来实现的。选出的变量具有不同的量纲，例如形态的和动力的。一

个简单的例子是开放河流系统中的流量连续等式：

$$Q = A \cdot V$$

Q 为流量，A 为横断面面积 (L^2)，V 为平均流速 (LT^{-1})，代入量纲后，有

$$L^3 T^{-1} \stackrel{d}{=} L^2 \cdot LT^{-1}$$

$$L^3 T^{-1} \stackrel{d}{=} L^3 \cdot T^{-1}$$

其中“ $\stackrel{d}{=}$ ”读作“量纲等于”。

注意，在分类上，Q和V被归入B组中的质量流变量，但由于它们的存在是形态系统存在的关键，故应属于形态变量组。如果 $V=0$ ， $Q=0$ ，则系统简化，无法构成一个系统。

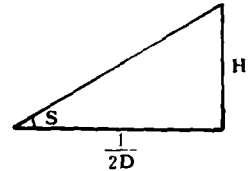
第二个例子是描述一个流域的三个形态变量可以产生无量纲变量的情形。Strahler 引入的几何数 (geometry number) 就是这样。几何数定义如下：

$$H \cdot D / S$$

其中 H 为局部地形起伏，D 为水系密度，S 为地面坡度。代入量纲后，

$$L \cdot L^{-1} / S \stackrel{d}{=} 0$$

为说明这三个变量是如何形成一个相对形态单元的，我们可以在平面上假设一个三角形：水平边表示河流密度倒数的 $1/2$ 。



随 D 值增加，分水岭到相邻河道的水平距离减小。在定义 $HD/S = 1/2$ 情形下，若 H、D 和 S 独立变化，等式右边总是常数。

Strahler 在更广泛的意义上把几何数应用到流域形态的研究中。这里，H、D、S 已不需要定义成一个三角形的两边和倾角。H 可作为海拔高度，D 可作为水平距离，S 可作为流域中倾向河口的坡度的度量（坡度或河流梯度）。当河网密度、地形起伏和坡角变化很大时，几何数趋向于 1。

介于通过显著性相关建立起来的形态变量组与通过重复观察证实的纯理论功能式之间的是那些经验性数学方程式，它们描述了形态变量组内变量间的相互关系。经典的 Chezy 公式及后来的 Manning 和 Forsheimer 公式是一个很好的例子。工程学家用这些公式来描述平均速度 V 与水力半径 R 和坡度 S 间的关系。Chezy 公式为：

$$V = C \sqrt{RS} \quad \text{或} \quad V = R^{1/2} S^{1/2}$$

方程得不到正确的量纲，除非常数 C 的量纲被定义成 $C^{1/2} T^{-1}$ ，但这显然是人为的。

Manning 公式为

$$V = \frac{1}{\eta} R^{2/3} S^{1/2}$$

参数 η 叫做 Manning 粗糙度，需要一个毫无意

义的量纲 $C^{1/3} T^{-1}$ 。这些公式的量纲虽不合理，但作为开放河道中观测到的规律而得到了人们的同意。

不论是理性的，经验的还是由回归分析得到的，与形态变量有关的数学方程式均应作为系统模型。当表示力或应力的一个动力变量（A组）与一个或多个形态变量相综合时，即使同一模型也可用来代表第四级的系统（过程—形态系统）。

变量随时间的变化有如下几类：周期性变化、随机波动、指数衰减和突变。这方面最新的例子由 Strahler 给出，他把几何数的变化与湿润气候区森林砍伐导致加速侵蚀引起的劣地发育联系起来。利用水系密度 D ，海拔高度 H 和平均坡度 S 的观测值，我们可以估计其变化（表）。变化前的数值是湿润大陆性气候区森林流域具有的典型数值。流域内的变质岩和花岗岩上发育有厚层残积风化壳。变化后的数值是由土壤加速侵蚀形成的劣地所具有的典型数值。请注意， D 值增大了 40 倍， S 增了 2 倍，但增值因 H 的大幅度减少而缓和，几何数变化很小。

表 几何数的变化

变 化	D (英尺 ⁻¹)	H (英尺)	S (%)	几何数
前	0.003	100	0.5	0.60
后	0.12	6	1.1	0.66

形态变量随时间距离同时变化的情形可以在河流水力学特征里找到很好的例子。连续方程由宽度 (w)，平均深度 (d) 和平均流速 (v) 组成： $Q = w \cdot d \cdot v$ 。这里每个自变量又表现为下列函数：

$$w = aQ^b$$

$$d = cQ^f$$

$$v = kQ^m$$

代入连续方程则有：

$$Q = ackQ^{b+f+m}$$

因此， a 、 c 、 k 必须为 1， $b + f + m$ 也必须为 1。Leopold 和 Maddock 观测到的数据可用双对数回归拟合，使参数的乘积及总和为 1。宽度、深度和平均流速的瞬间变化是在一个台站测得的，流量的波动在河流的一个特定的水文站获得。数据具有周期性波动，随距离的变化根据流量随流向的变化关系取得，可用通过河流系统的年均流量表示。

如果不能取得进展的话，形态变量的分析是没有什么大意义的。按照能量输入到这些变量所属的复杂开放系统中的原则，研究工作应当向理解形态变化的原因方向迈进。所以，形态组的分析主要是用在第四级系统（过程—形态系统中）的。正如我们

所看到的那样，过程—形态系统的研究集中在维持和控制形态变量组中那些动力变量的作用上。

第三级 第三级是物质能量流系统，由相互联结的物质能量或物质和能量的输送通道，以及所需的物质和能量库存组成。系统的边界是天然的，也可能是人为的。亚系统可按需要划分，彼此间相互嵌套或按顺序排列。

能量流系统，只存在于开放系统中，常与流动系统中各个点的能量转化有关。例如，短波电磁能转化为感热（内部能量—气体、液体或固体分子运动所产生的动能），感热在蒸腾过程中转化为潜热，或长波辐射。以辐射形式存在的能量不能储存，但感热和潜热可储存在气体、液体或固体中。能量流被定义成单位时间内通过设计流路断面的能量。储能用能量单位（如卡）表示。在稳态能量流系统中，储能是与时间无关的常量，此时输入与输出相等。

物质流系统，存在于开放系统中或存在于具有特定边界的封闭系统中。对每个物质流系统而言，肯定有相对应的开放能量流系统，因为物质的流动必须由能量的消耗来维持。物质流系统可以，而且常包括物质库。在流路内流动的物质可以用单位时间内通过流路断面的质量或体积度量，库存物质用质量或体积来度量。库存变化率的量纲与流动的量纲相同（单位时间内的质量或体积）。

物质流系统中的各个点，可能发生状态的转化，而且这些转化与相应的能量系统中各点的能量转化对应（如由感热转化为溶解热和蒸发潜热）。物质流系统中各点可能发生化学反应或分解。如果是这样，两个或多个流路将汇集或分叉，而这决定于化学反应或分解的性质及组成元素或离子。化学反应中热的吸收和释放将会在有关能量系统的相应点上表现出来。

处于稳态的开放系统中储存的物质为常量，此时的物质输入等于输出；与之对应的能量系统也处于稳态。

物质流和能量流系统经受着各种各样的扰动，流速和库存发生着变化。根据扰动性质的不同，前期稳态可以保留下来，也可能为另一稳态代替。这种变化和调节的时段叫做转变态（相）。

流动系统完全可以用正确的量纲方程来描述，辐射平衡和水平平衡就是如此。因此，流动系统可以用合理的图解表示。

Melton 曾把能量系统概念应用到河流地貌的研究中。他把谷坡及河道这样一个综合系统描述为一个能量系统，其中的输入是降水势能，输出是河口外流的动能，能量以辐射和蒸腾形式耗散到外部

环境。Melton 用下式表述能量系统中的物质平衡：

$$E_o + E_d = E_i + \Delta E$$

E_o 河口能量输出

E_d 辐射和蒸腾损耗

E_i 降水形式的能量输入

ΔE 系统能量的变化。

能量流程图详细地表明了总系统中从斜坡到河道的潜能、动能流路及转化过程。

表示能量和物质流系统中的概略流程图有许多

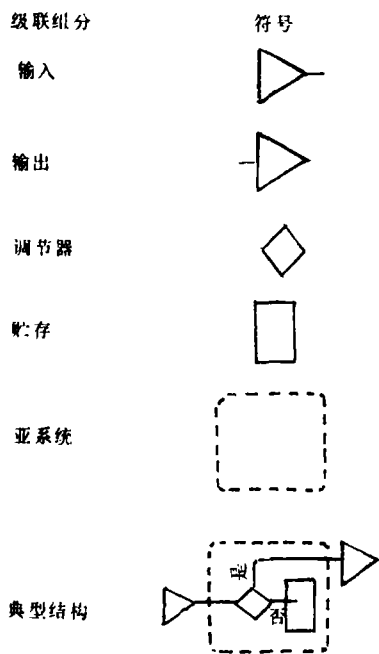


图1 Chorley 和 Kennedy 用来描述流动系统结构的符号

图示方法。Chorley 和 Kennedy 用回路图(circuit diagram)来表示他们所说的级联系统。线路由四个符号组成：输入、输出、调节阀和库(图1)。亚系统内的线路称为典型结构。符号易被认为是从计算机程序设计分析系统中借用来的，故用它们并不是好的选择。调节阀的功能限于“是”或“否”两种选择，不能为流路分叉处连续性变化的调控作好准备。

Obum 使用了另一种方式的线路图。虽然其方法开始是为生态系统中的能量流设计的，但也特别适用于各种开放、封闭系统，此图在经济和社会系

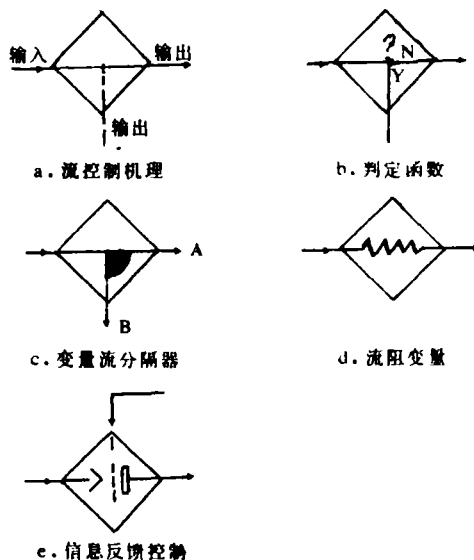


图3 能量流或物质流系统线路图中的流动——控制机理。在单通道中，该机理把流分为两个通道（分叉）或阻碍其流动。

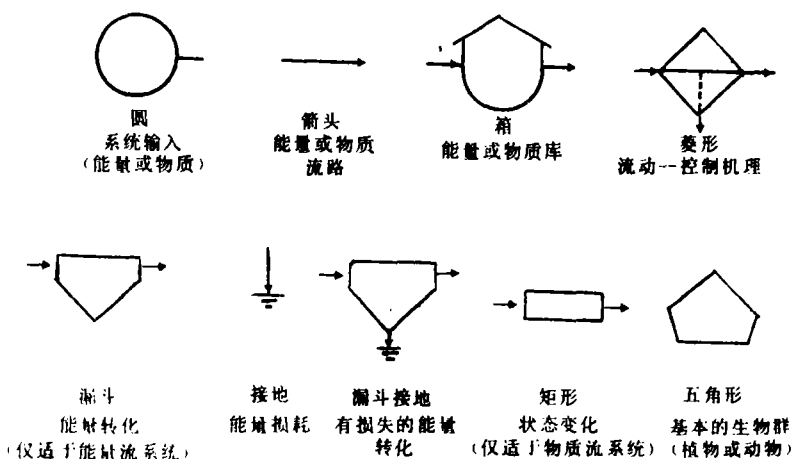


图2 能量流和物质流系统图解的基本符号

统中也得到了应用。为了表示生态系统中能量的动力学特征，Strahler 和 Obum 的图示作了修改，本文应用的就是修改后的结果，可以满足各种自然地理系统的需要。图2、3给出了部分基本符号。图4是自然地理学中能量流和物质流系统的流程图实例。

(a) 流动——控制机理的一般符号：输入和输出位于菱形的两个角上，对角线把一个或两个输出联系起来。

(b) 判定函数：用问号表示，各个流进入哪个通道

