

第3节 自然地理学的系统方法

一、系统的概念

二、系统的性质

三、系统反馈

四、系统模型

五、地球表层系统



一、一般系统论 (*general system theory*)

1. 一般系统论的基本观点

- (1) 真实的世界就是整体
- (2) 世界的部分具有可以理解的秩序
- (3) 世界作为整体也具有可以理解的秩序

2. 一般系统论的目的

- (1) 将所有知识综合成为一个统一体
 - (2) 揭示各种知识原理的同形性
- 

二、系统的概念

(一) 系统的定义

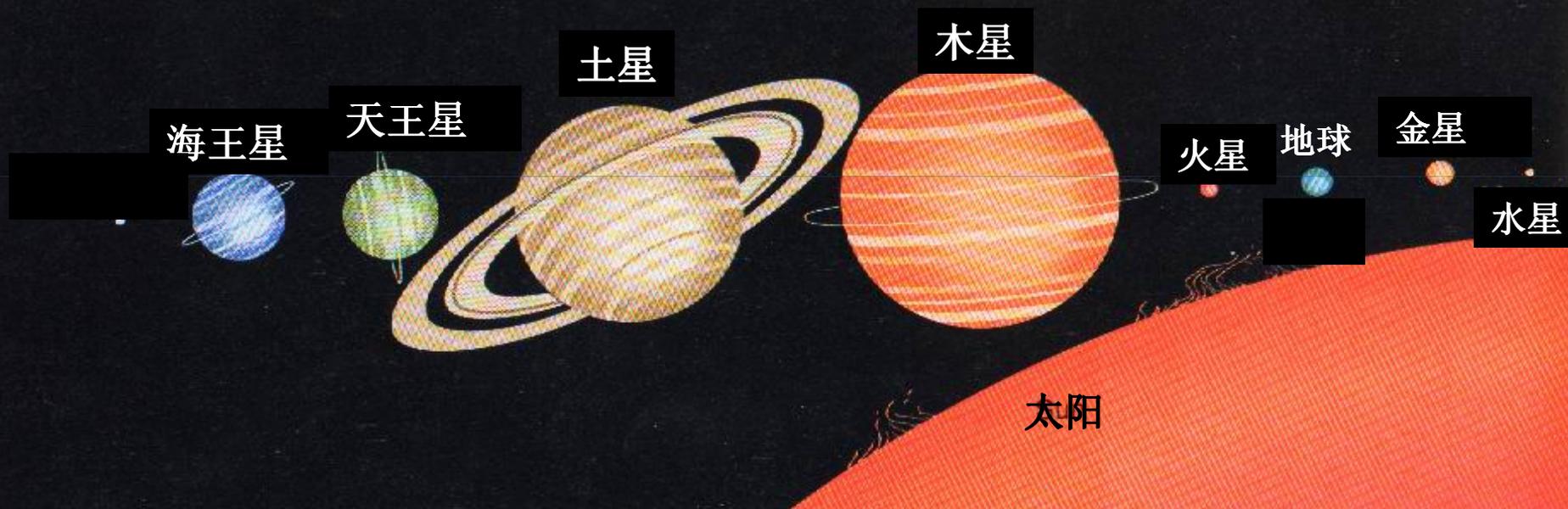
1. 系统与环境

(1) 系统: 由相互关联和相互制约的若干组成部分结合而成的、具有特定结构和功能的有机整体, 它具有模糊的或确切的边界, 从而与其周围的环境区分开来。

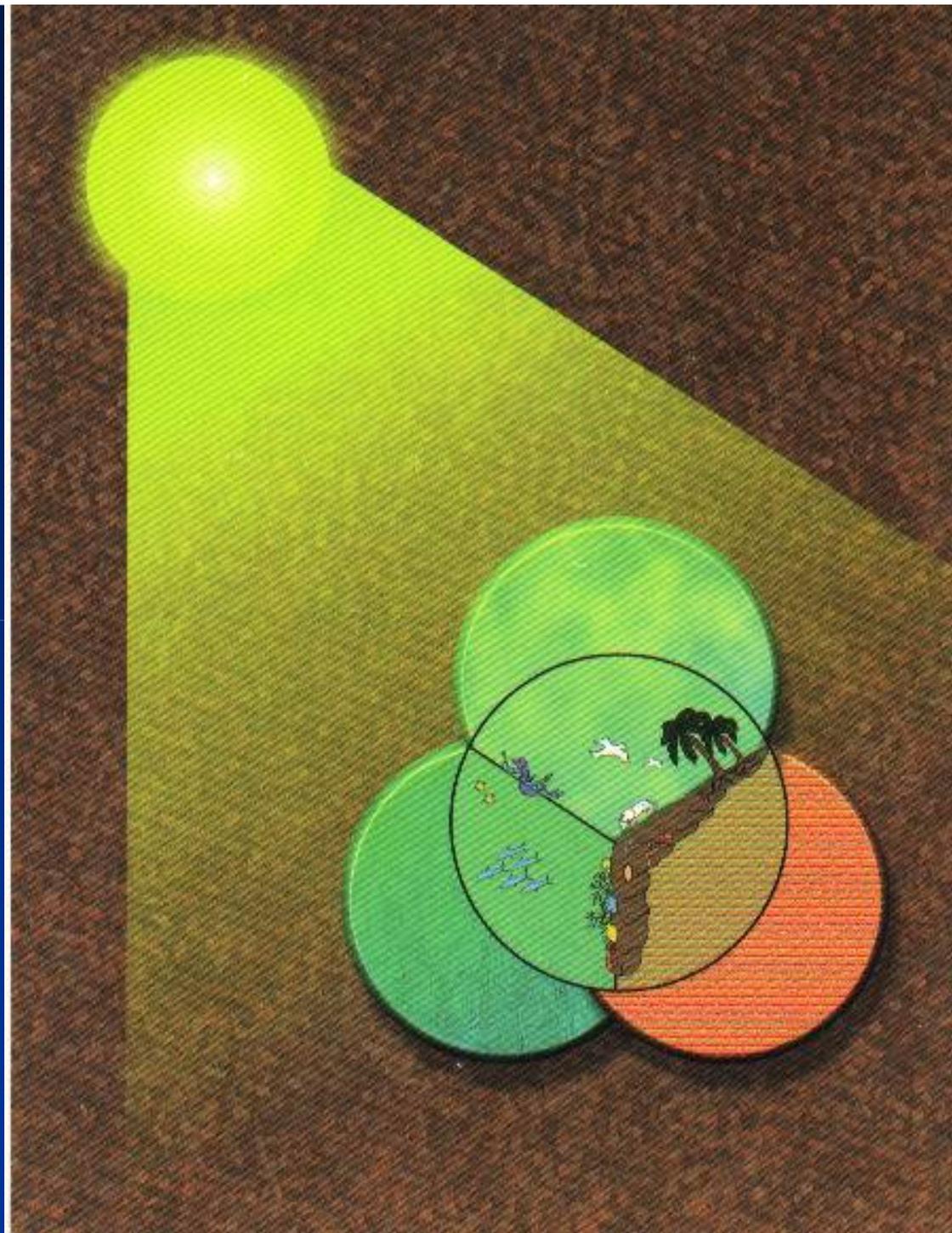
(2) 环境: 系统边界以外的部分。

(3) 二者的联系: 物质、能量和信息的交换。

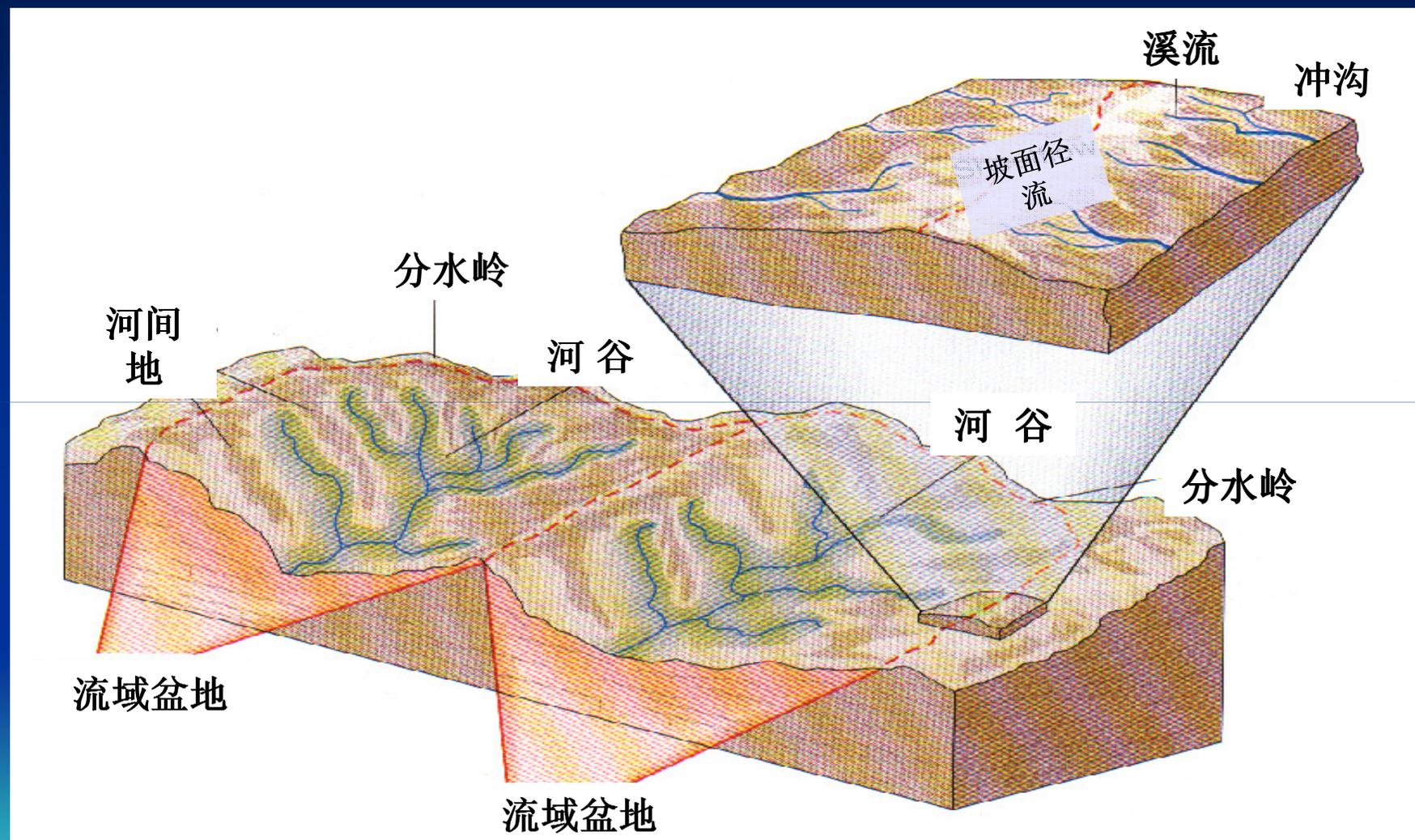
太阳系



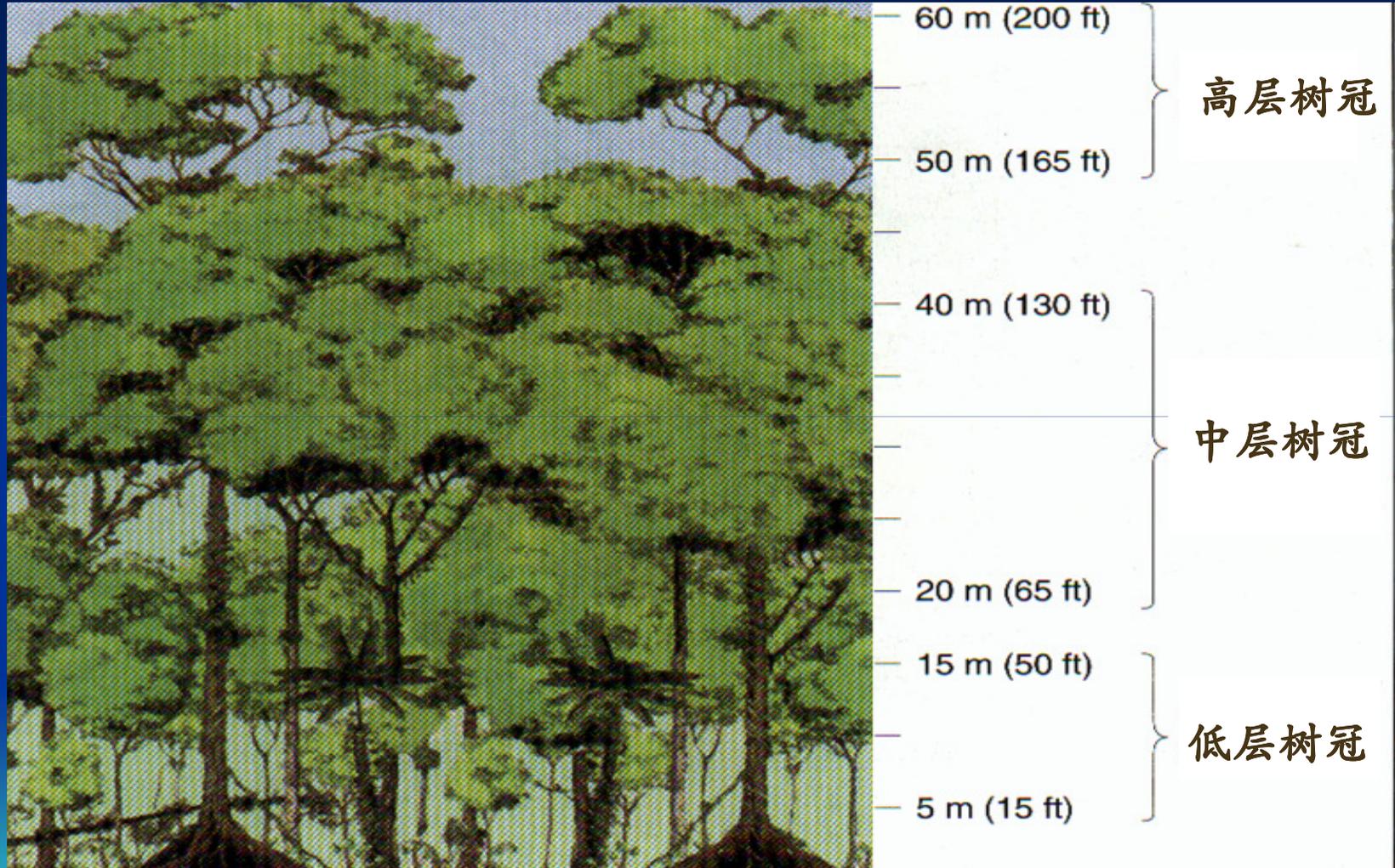
地球



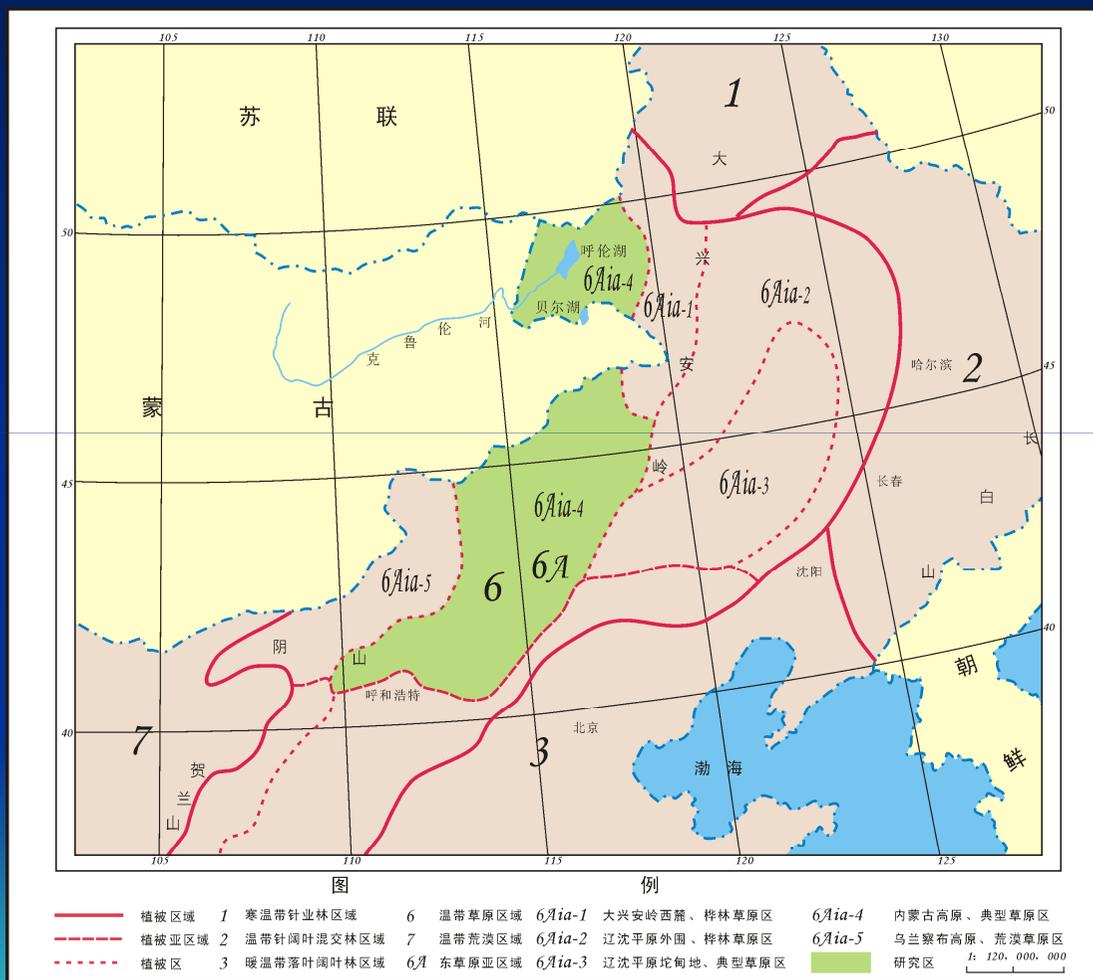
河流



植物群落



内蒙古典型草原系统的空间边界与环境



2. 结构与功能

(1) 结构：系统内部各个组成部分之间相对稳定的关联方式。

(2) 功能：系统与环境相互作用中表现出来的性质、能力和功效。

(3) 二者的关系

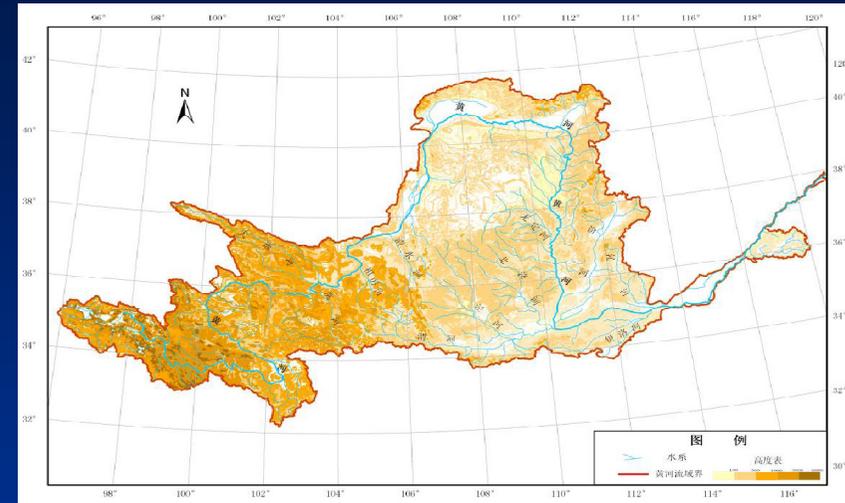
➤系统的结构具有相对稳定性，而系统的功能则易于随着环境状态的改变而变化。

➤系统的结构制约着系统的功能，而功能可反作用于系统的结构，促进结构的改变。

3. 组分、属性和关系

(1) 组分：组成系统的部分，如黄河由上游、中游、下游及众多的支流组成。

(2) 属性：组分可以被感知的性质，如黄河中游的长度、面积、流量、含沙量、水质等。

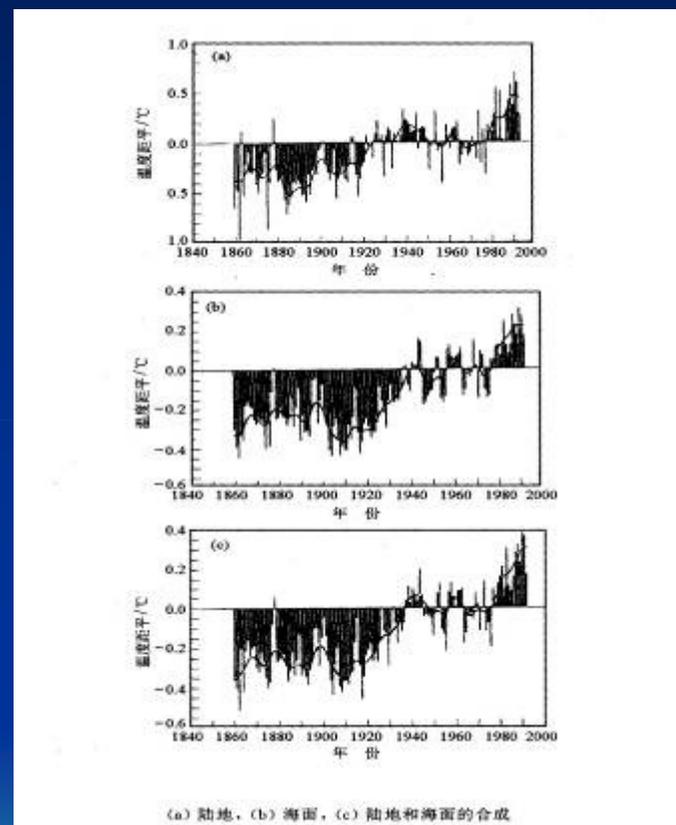


河段	区间	面积 (km ²)	长度 (km)	支流数目 (条)	天然径流量 (亿m ³)
上游	河源~河口镇	428,235	3,471.6	43	331.7
中游	河口镇~桃花峪	343,751	1,206.4	30	201.1
下游	桃花峪~入海口	22,726	785.6	3	2.0
全河	河源~入海口	794,712	5,463.6	76	534.8

(3) 关系：两个以上组分之间和属性之间的作用，如中游水土流失与下游泥沙沉积的关系。

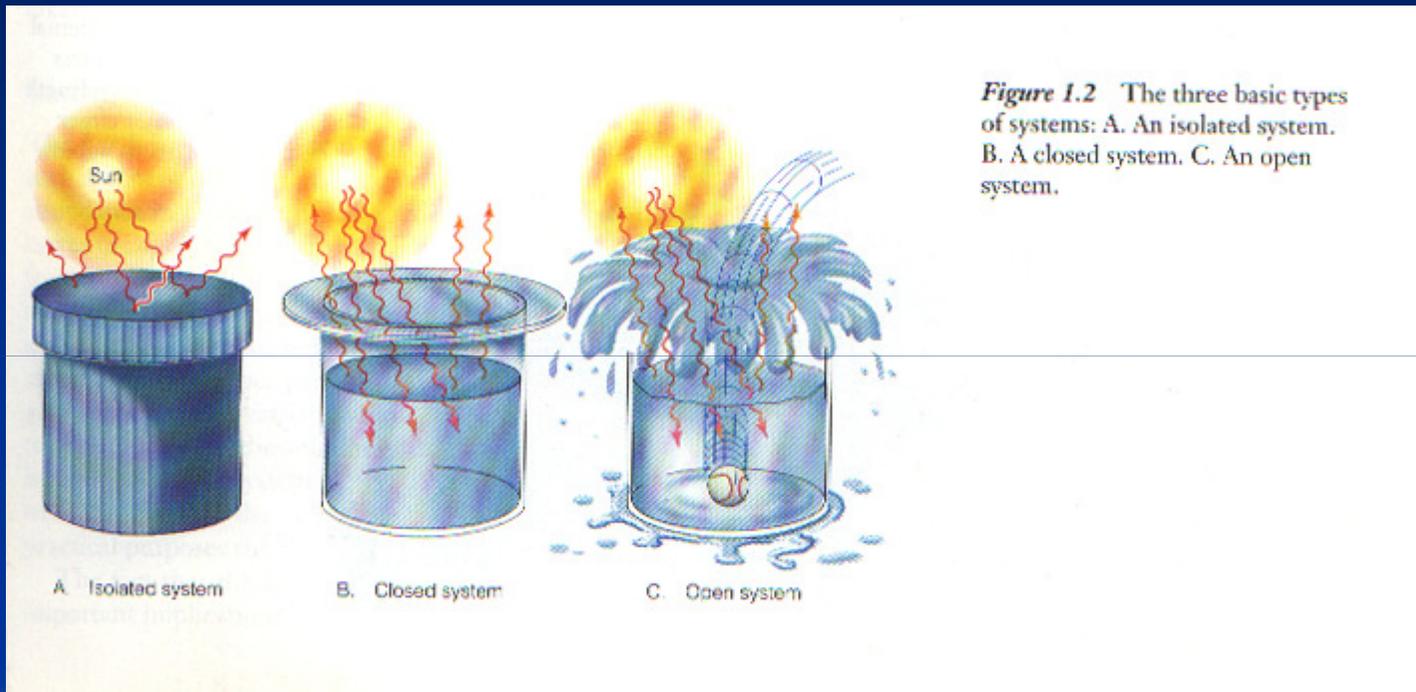
(4) 状态：组分、属性及其关系所具有的确定量值。

(5) 过程：系统状态变化的历程。

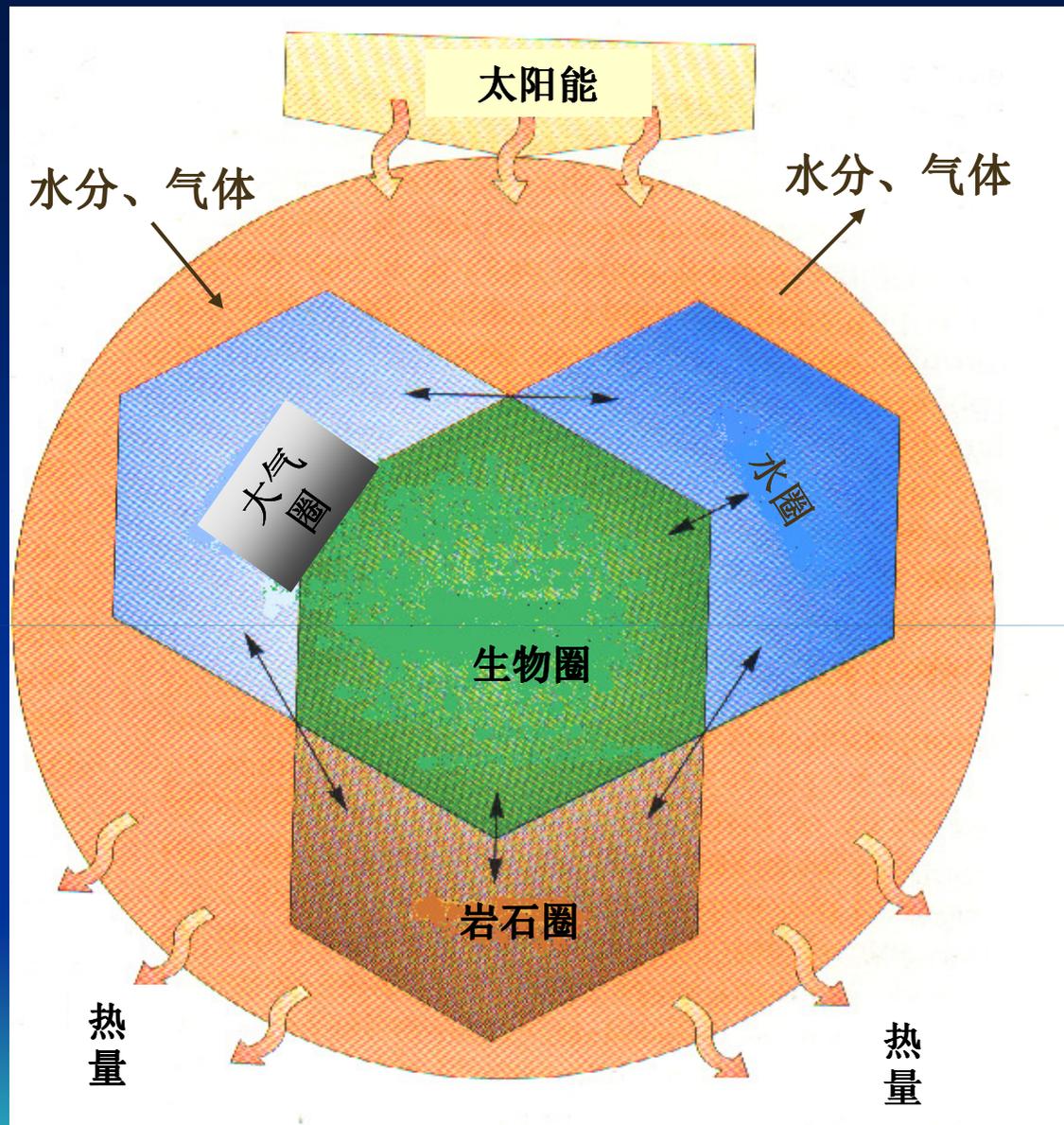


(二) 系统的类型

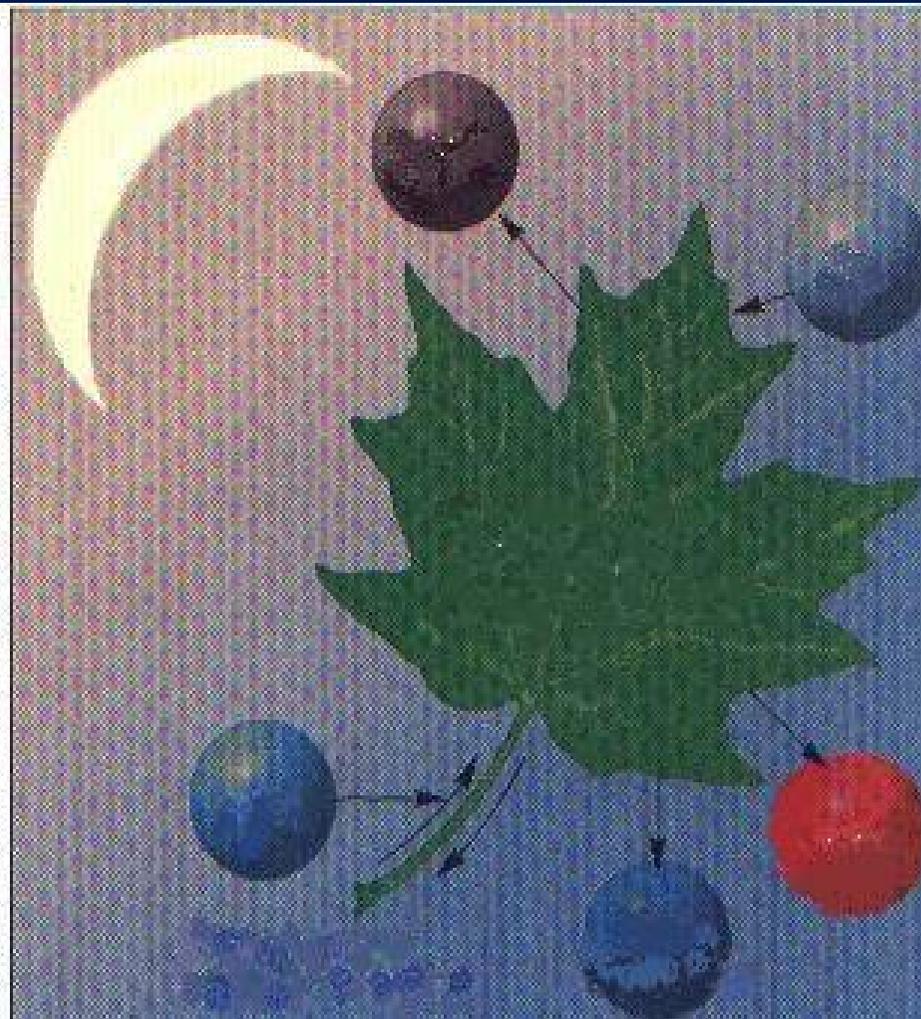
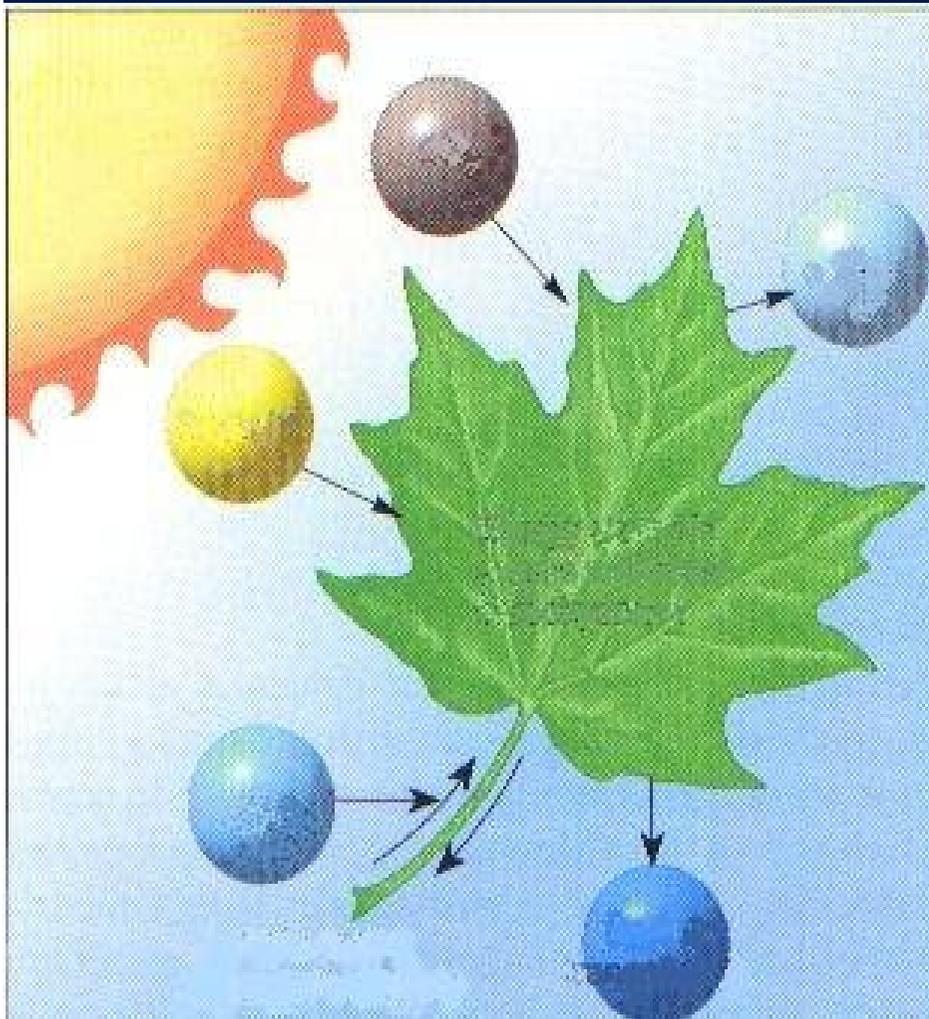
1. 孤立系统：系统与环境之间既没有物质的交换又没有能量的交换，如宇宙。
2. 封闭系统：系统边界在物质交换方面是封闭的，但在能量交换方面是开放的，如地球。
3. 开放系统：系统边界在物质和能量交换方面都是开放的，如地球表层、树木的叶片、人体等。



地球表层 开放系统



植物叶片开放系统



(三) 系统的热力学性质

1. 热力学第一定律：外界传给系统的热量 (Q)，一部分用于改变系统的内能 ($U_2 - U_1$)，另一部分用于系统对外做功 (W)。即能量既不能产生，也不能消灭。

$$Q = (U_2 - U_1) + W$$

2. 热力学第二定律：所有物理过程都是能量可获得性变小的过程。即从低熵（高可获得能）到高熵（低可获得能）、从非平衡态（更为有序）到平衡态（更为无序）的过程。

- 可获得性：储存的功转化为可用的功的难易程度
- 热力学熵：系统能量不可获得性的量度。
- 热力学平衡态：系统的宏观性质如温度、压力等各处均一，不随时间变化的状态。

能质和熵

能量类型	熵值 (J/K)
宏观物体的动能	0
引力势能	0
电势能	0
核反应热能	10^{-11}
太阳光能	10^{-5}
化学反应热能	10^{-4}
沸水的热能	2.7×10^{-3}
海水的热能	3.6×10^{-3}
宇宙背景辐射的热能	3×10^{-1}

3. 宏观熵

(1) 宏观熵的数学表述

对于无限小过程，有：

$$dS \geq \frac{dQ}{T}$$

含义：系统从热源吸收的热量除以热源的绝对温度。可逆过程的熵变等于该过程的热温比（守恒），不可逆过程的熵变大于该过程的热温比（增量）。一切宏观过程都是不可逆过程。

(2) 孤立系统：克劳修斯不等式

$$dQ = 0, dS \geq 0$$

含义：在孤立系统中进行的一切不可逆过程向着熵增加的方向演化，直到熵函数达到最大为止，是一种熵增过程，平衡态对应着最大熵。如冰溶于水。

如果要使这些过程反向进行，回到过程的起点，外界必须供给能量。

(3) 开放系统：普里高津扩展熵函数

$$dS = dS_i + dS_e$$

如果系统充分开放，从外界引入了足够的负熵流，使得 $dS_e < 0$ ，且 $|dS_e| > dS_i$ ，则有 $dS < 0$ ，于是系统的总熵降低，能量可获得性提高，系统可以自发地组织起来，形成有序结构，称为耗散结构。

4. 微观熵

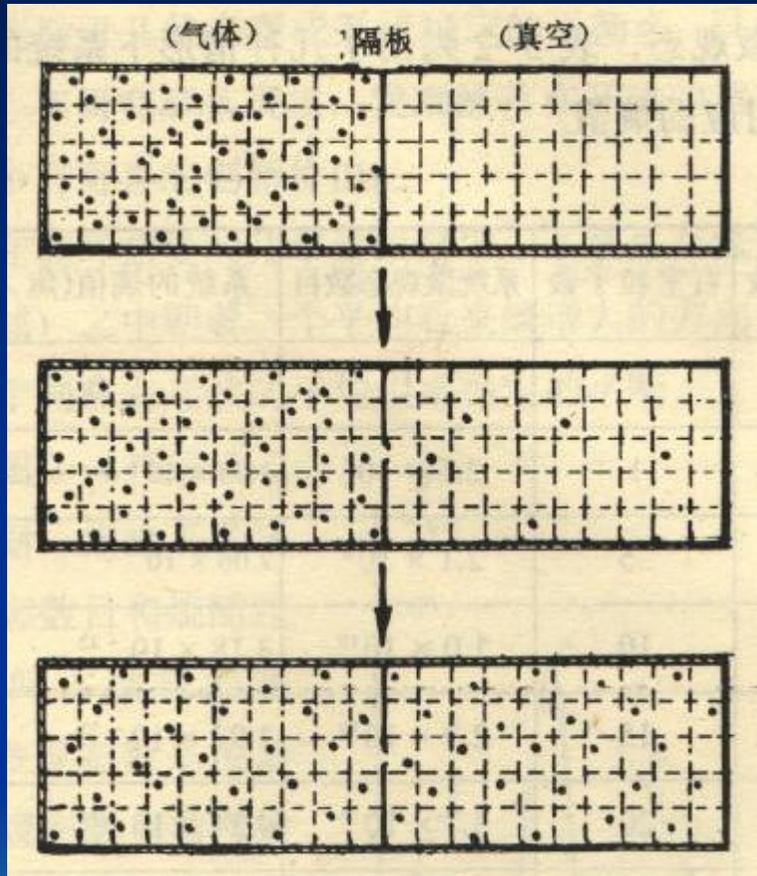
(1) 微观熵的数学表达

$$S = k \ln \Omega$$

式中： S 为微观熵， k 为玻耳兹曼常数， Ω 为系统内微观态（微观粒子排列组合方式）的数目，称为该宏观状态的热力学概率。

含义：微观熵是系统有序性的量度。对于系统某一宏观状态来讲，其微观态(Ω)越多，熵值(S)越高，越无序；否则，微观态越少，熵值越低，越有序；若仅包含一种微观态，熵值为零，则系统状态整齐划一。

系统微观态的数目与熵值



左室粒子数	右室粒子数	系统微观态数目	系统的熵值(焦 / 开)
50	0	1	0
49	1	2.5×10^3	1.08×10^{-22}
45	5	2.1×10^6	2.06×10^{-22}
40	10	1.0×10^{10}	3.18×10^{-22}
35	15	2.3×10^{12}	3.93×10^{-22}
30	20	4.7×10^{13}	4.34×10^{-22}
25	25	1.3×10^{14}	4.48×10^{-22}
20	30	4.7×10^{13}	4.34×10^{-22}
15	35	2.3×10^{12}	3.93×10^{-22}

左边 45 个粒子，右边 5 个粒子，则
 整个系统的微观态数 = $C_{50}^{45} \cdot C_{50}^5$

(2) 孤立系统

自发倾向总是向着微观态数增加的方向演化，即从宏观热力学概率小的状态向概率大的状态演化，意味着系统内部趋于混乱和无序，热力学平衡态和微观粒子的均匀分布是宏观热力学概率最大的状态，对应着最大熵。如密闭容器中一滴墨水溶于水的过程。



(3) 开放系统

由于负熵流的输入，使系统远离平衡态，向着微观态数减少的方向演化，即从宏观热力学概率大的状态向概率小的状态演化，意味着系统内部趋于整齐和有序。

但是，某一系统的趋于有序往往是以其环境的趋于无序为代价的。



二、系统的性质

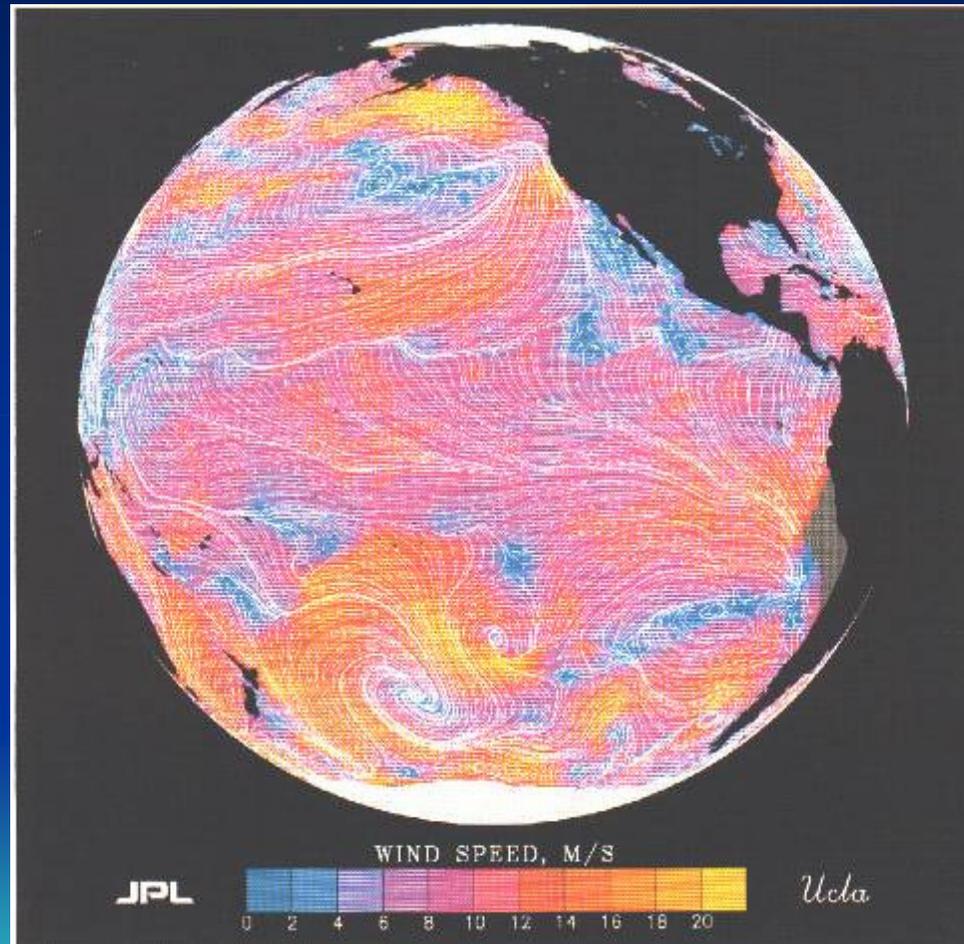
(一) 整体性

系统是由若干个部分组成的，部分间存在着紧密的网络联系和协同作用，使系统成为无法分割的、具有特定结构和功能的有机整体。

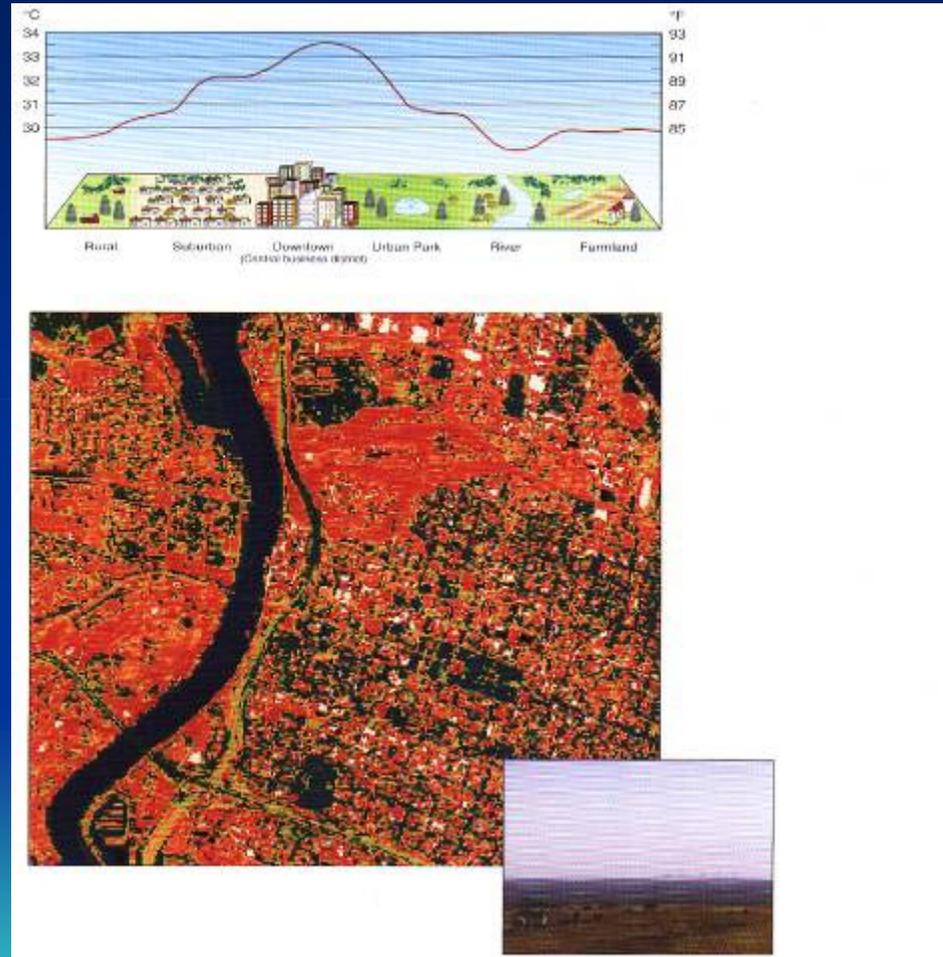
若干部分按照某种方式整合成为一个系统，就会产生出整体具有而部分或部分总和所没有的特性，称为整体涌现性。



整体涌现性——全球风场



整体涌现性——城市热岛

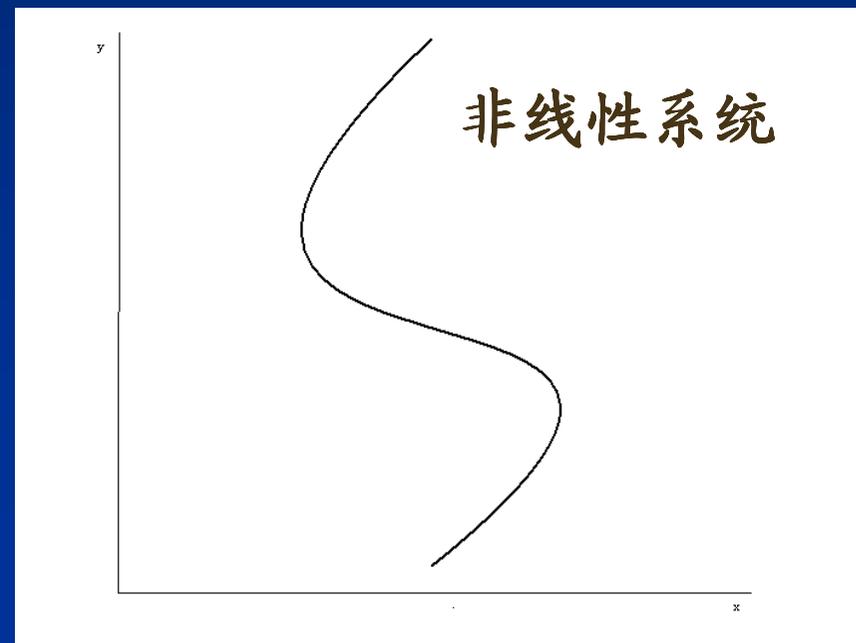
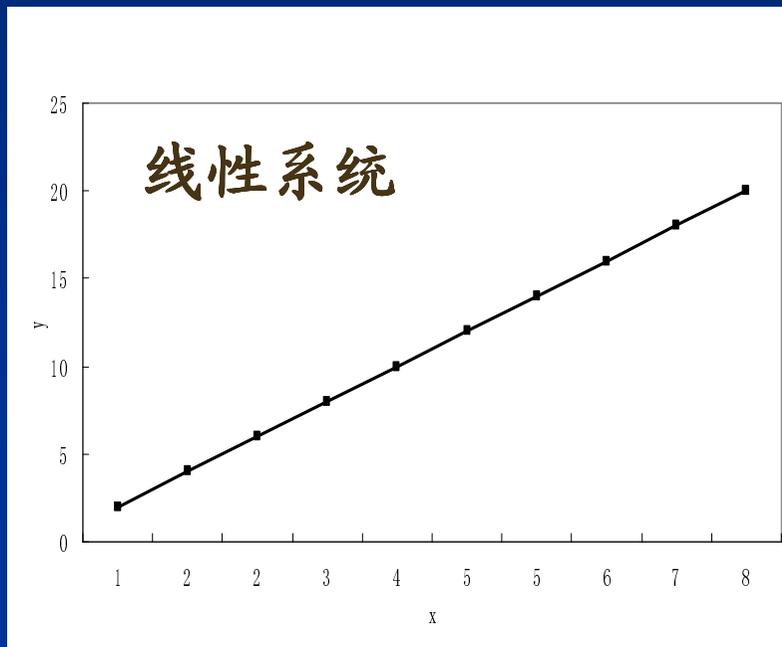


(1) 非还原或非加和：整体不等于部分之和

- 导弹的电子系统可靠性为0.9999，大于其部件的可靠性0.9；
- 沙袋可以筑堤防洪，而散沙则不具此功能；
- 土壤的水、肥、气、热组合决定其肥力，而单一条件好的土壤，肥力不一定高；
- 植物根、茎、叶的协同作用决定其生长发育和产量，而单一器官不具有上述功能。

(2) 非线性

- 一种原因可以导致若干个不同的结果（全球变暖），不同原因也可产生相似的结果（黄河断流）；
- 输出的结果并不与输入的扰动呈比例。



(二) 层次性

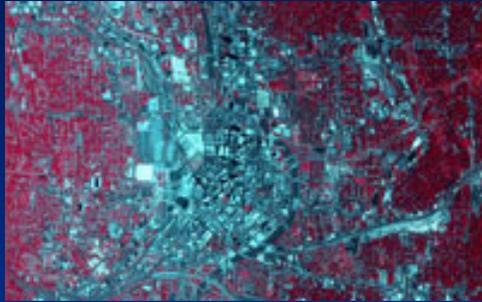
系统有大有小，形成一种层次结构。大的系统通常由小的子系统有机地结合而成，子系统又由更小的二级子系统构成，依此类推。

- 层次的相对性：低层次系统隶属和支撑高层次系统，高层次系统包含和支配低层次系统。高层次具有低层次没有的涌现性。
- 层次的性质：较高层次系统之间的结合强度较弱，但具有比低层次系统更为丰富的性质和功能，如水滴和海洋。

地貌的层次



城市景观的层次



(三) 自稳定性

系统的结构、功能、状态、行为的恒定性，即系统具有一定的自我调节或抗干扰的能力。

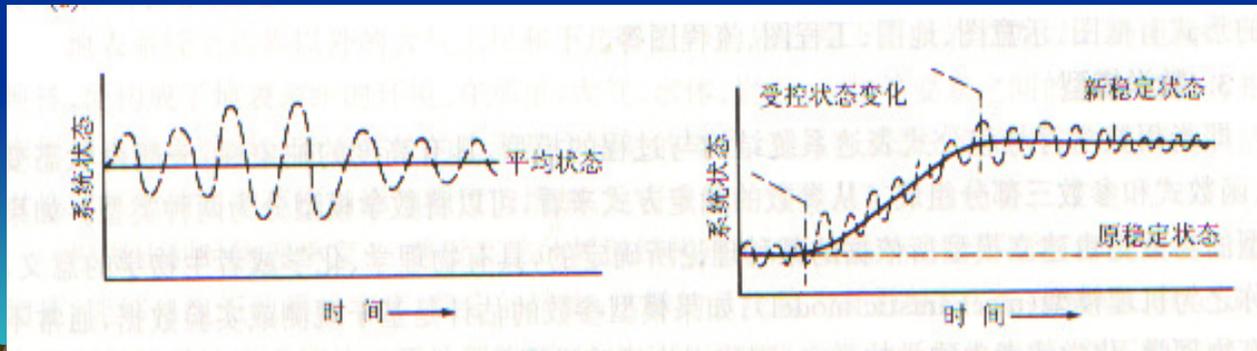
- 开放的稳定：只有在与环境之间不断进行物质、能量、信息交换的过程中才能保持；
- 动态的稳定：稳定不是静止，而是围绕一个稳定状态的上下波动。



(四) 自组织性

系统从一种稳定状态自发地变成为另一种稳定状态的过程，如生物演化，气候变化、土地荒漠化。

- 演化阶段：原有稳定状态 → 涨落放大 → 系统自我调节能力遭到破坏 → 重新组织 → 新的稳定状态。



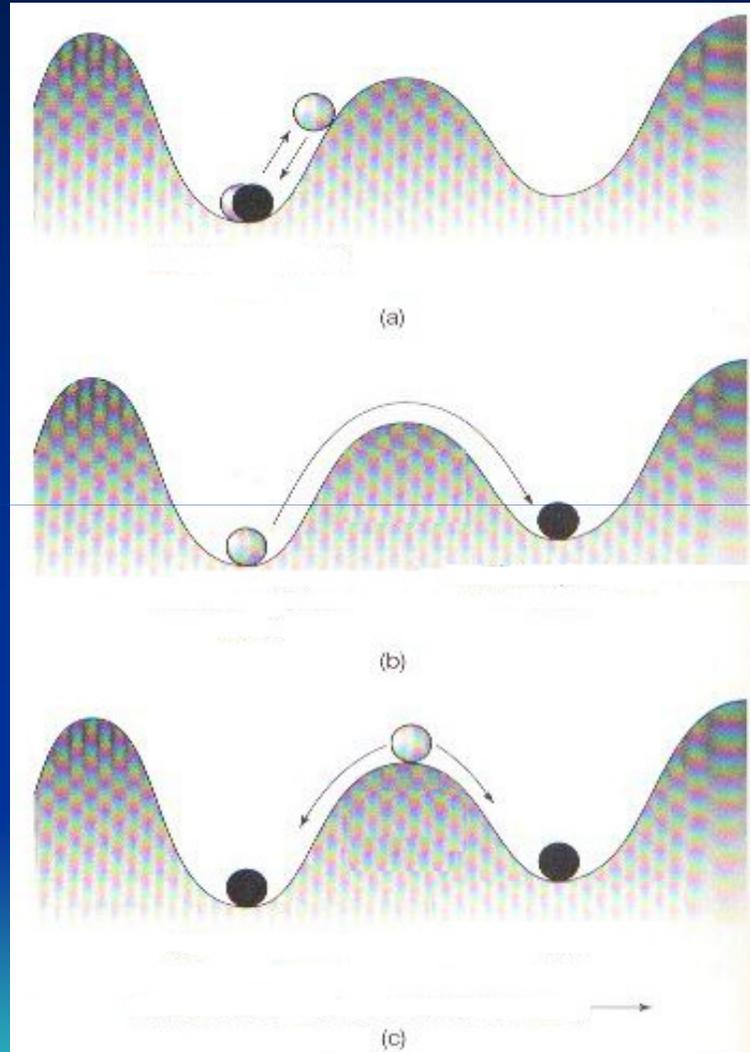
- 演化方向:

- 正向涨落 ($dS_e < 0$, $|dS_e| > dS_i$, $dS < 0$) 导致系统从较无序向较有序方向进化;

- 负向涨落 ($dS > 0$) 导致系统从较有序向较无序方向退化。



系统的状态



三、系统反馈

(一) 反馈的概念

一个系统的输出反过来作用于输入，从而对系统再输入和系统过程产生影响的机制。

(二) 正反馈

回返信息使系统输入或过程原因在原来变化方向上得到促进或放大，进一步偏离初始状态。例如：湖泊污染 - 鱼类死亡 - 湖泊污染加剧；越垦越穷 - 越穷越垦（熵增加剧）。

- 正反馈过程一般是一种趋势性的变化，具有方向性，它使系统趋于不稳定，产生偏离平均状态的涨落，是导致系统自组织演化的原因。



(三) 负反馈

回返信息使系统输入或过程原因在原来变化方向上得到抑制或缩小，趋向回到初始状态。例如：野兔-狐狸种群变化过程，草原产草量-放牧量的变化过程。

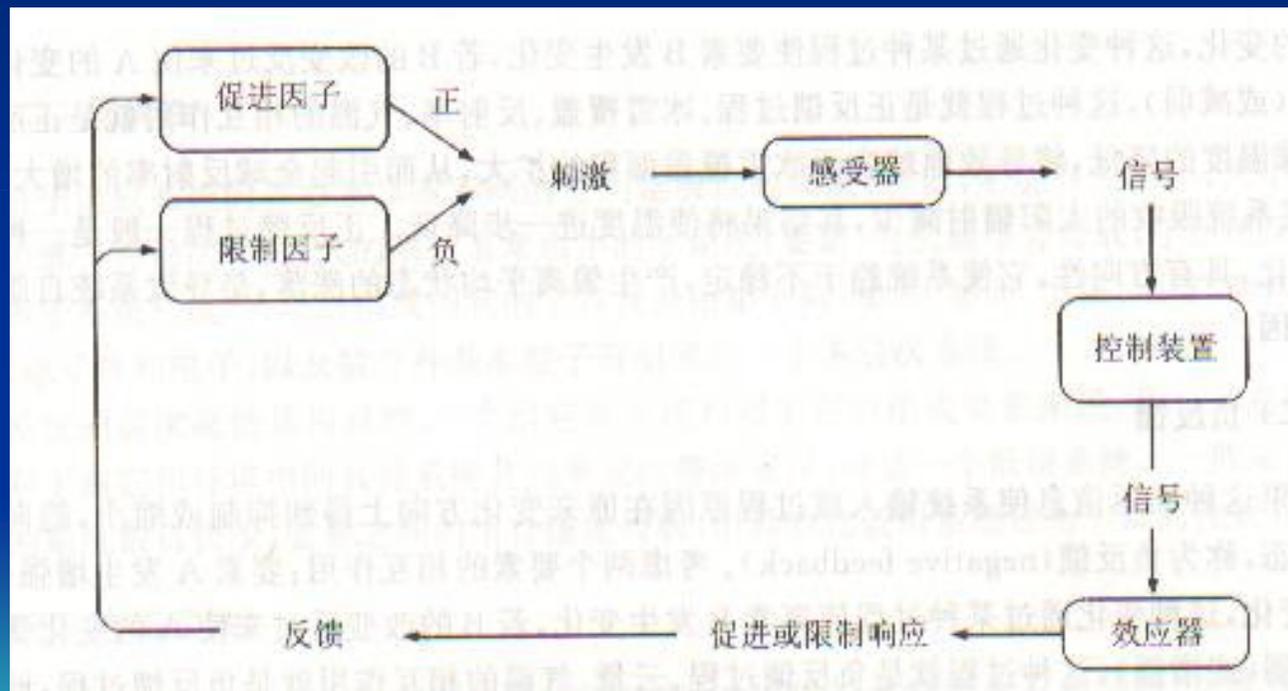
负反馈过程通常是一种自我调节的变化，具有循环性，它使系统趋于稳定或动态平衡，是产生系统动态自稳定的原因。



(四) 正、负反馈的关系

- 相辅相成：正反馈过程中包含和孕育着负反馈过程，负反馈过程中也包含和孕育着正反馈过程。如：冰雪覆盖-反射率-气温过程，气温-云量-地面接收太阳辐射过程。
- 相互转化：稳态 - 动态稳定 - 突变 - 新稳态；如：冰期 - 间冰期的交替，坡地形态变化，河流洪水泛滥等。

- 系统的反馈-响应机制：系统的状态往往是在若干种正反馈和负反馈支配下变化 and 发展的，其变化形式取决于哪种反馈占优势。



四、系统模型

(一) 模型的定义

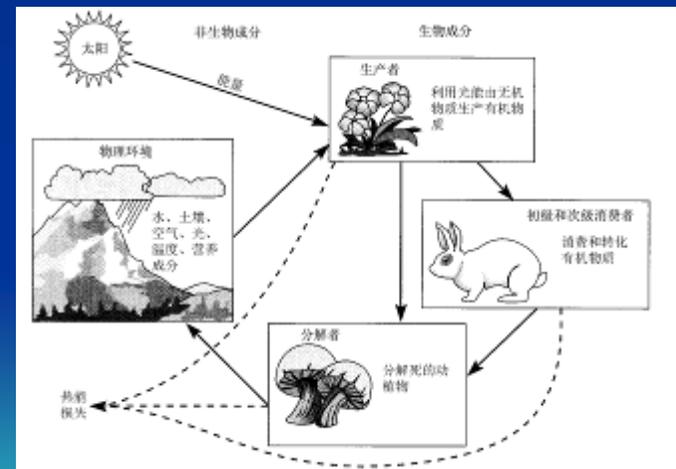
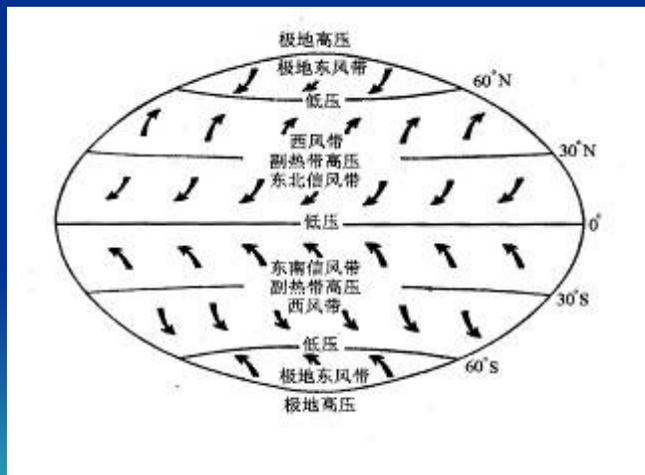
对现实世界的一种抽象的或理想化的描述。系统的概念本身就是一种模型。

(二) 模型的种类

- 实物模型：分为原样模型和相似模型两种，如：地形模型、城市规划模型。



- 图解模型：即概念模型，具体的形式有框图、示意图、地图、流程图等。如：大气环流模型，水循环模型，土壤剖面模型，生态系统能量流动模型，计算机虚拟地理环境模型等。



- **数学模型**: 描述元素之间、子系统之间、层次之间以及系统与环境之间相互作用的数学表达式, 一般由状态变量、函数式和参数三部分组成。

机理模型: 模型的参数是由建立模型所依据的某种理论所确定的, 具有物理学、化学或者生物学的意义。如描述黑体辐射的斯蒂芬-玻尔兹曼定律 ($\sigma=5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$):

$$E = \sigma T^4$$

经验模型：模型参数的估计是基于观测或实验数据，通常不具有物理学、化学或者生物学的意义。如早期的全球陆地初级生产力模型， y 为初级生产力（ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ）， x 为年平均气温（ $^{\circ}\text{C}$ ）

$$y = \frac{3000}{1 + e^{1.315 - 0.119 x}}$$

(三) 数学模型的建立过程

- 概念模型的提出
- 模拟：适当简化
- 预测：外推应用
- 误差评估：可接受性



五、地球表层系统

(一) 定义

地球表层是由大气、水体、岩石、土壤、生物、人类相互联系、相互制约所形成的开放系统。

- 是地球上最有序的部分；
- 是人类活动影响最为剧烈的部分。



(二) 边界

- 上边界：大气对流层的顶部，距地球固体表面的距离在极地上空约8km，赤道上空约18km，平均在10km左右。
- 下边界：岩石圈上部沉积岩层达到的深度，距地球固体表面的距离约4-5km。



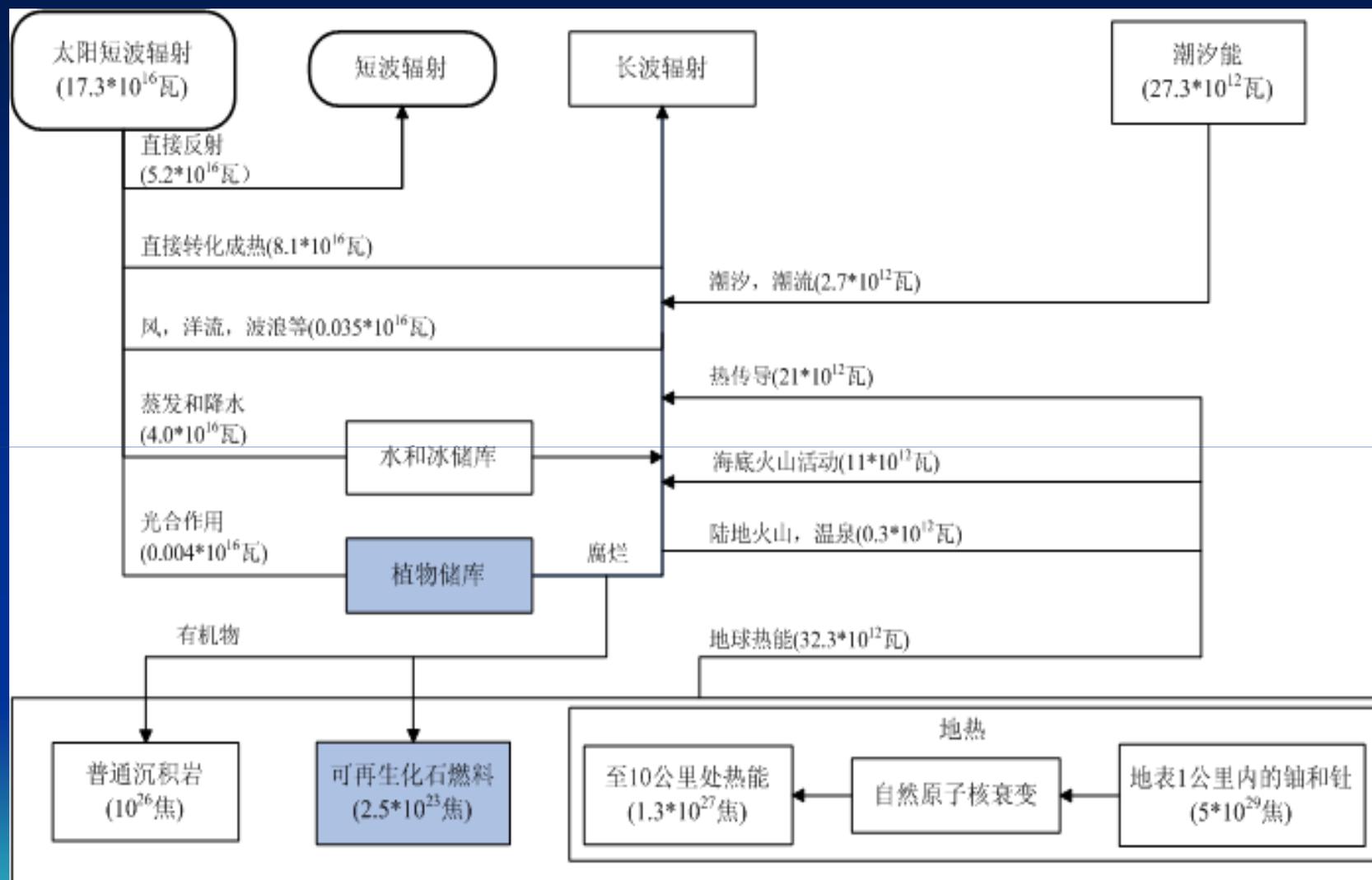
- 环境：上边界以外的大气上层和下边界以外的岩石圈下层及岩石圈以下的地幔部分和地核。
- 地球表层系统的边界具有逐渐过渡的性质，随着人类活动对地球表层的影响范围与影响强度的增大，系统边界呈扩张的趋势。



(三) 性质

1. 能量交换方面的充分开放系统

- 太阳光能是地球表层的主要能源，太阳辐射能占地球能量收入总量的99.98%，地球内部的热能占0.018%，潮汐能占0.002%。



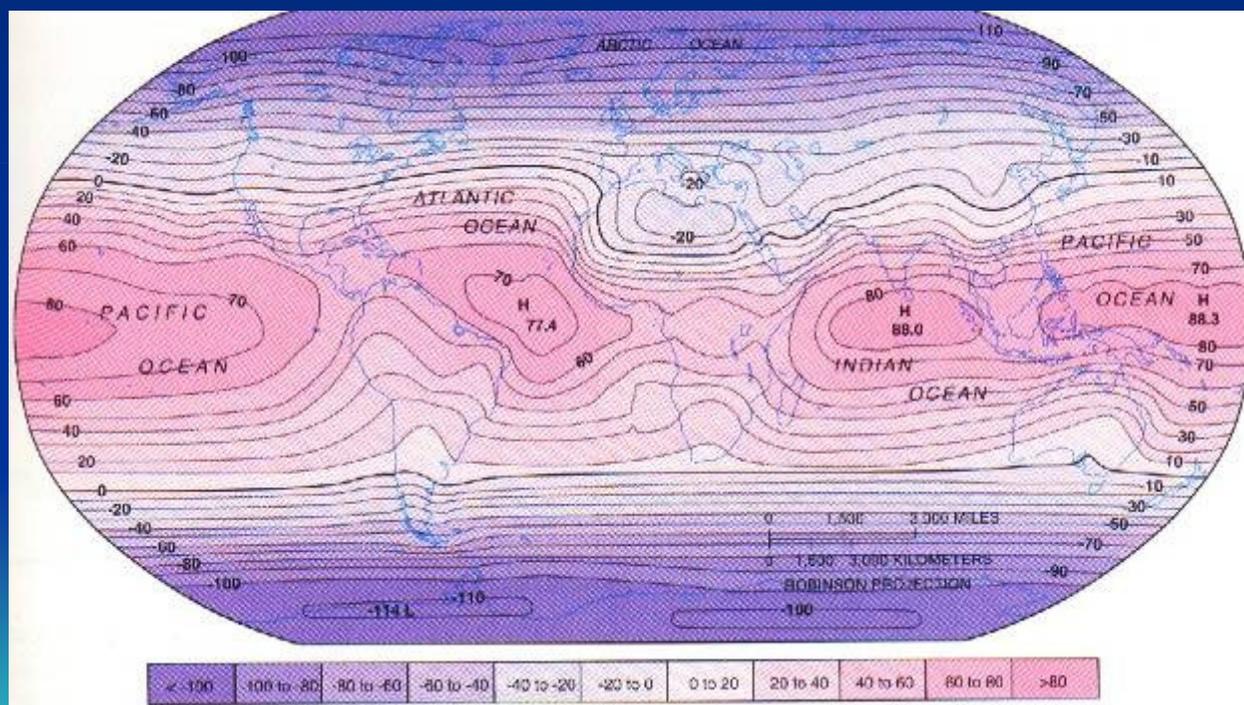
地球表层系统的能量转换与平衡



- 地球表层系统能量收支研究

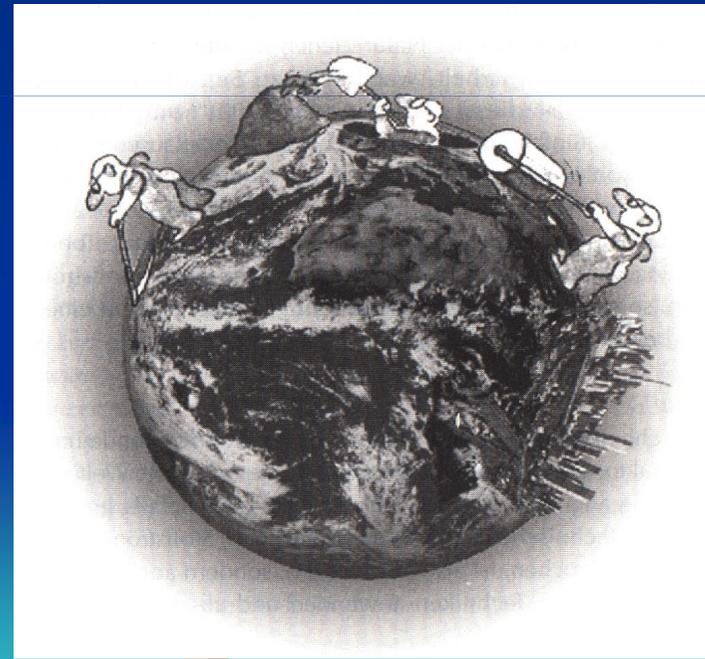
地球观测系统 (EOS)

大气圈顶部日净辐射分布 (W/m^2)



2. 物质交换方面的微弱开放系统

- 地球表层系统与环境之间物质交换的数量与系统内的物质总量相比是很少的。
- 地球表层的物质资源是有限的。
- 无论人类如何利用强大的技术力量搬运、改造和重组地球表层的物质，系统的物质基础是相对稳定少变的。



■ 可持续发展的研究

实现“满足当前的需要，而不危及下一代满足其需要的能力”的发展。

要求人类社会：

更节约（尽可能地减少单位社会服务或单位产品的资源投入量）、

更有效（尽可能地延长原生资源和物质从摇篮到坟墓的利用时间）、

循环（尽可能地提高废物的重复利用率）
利用各种自然资源；发展“阳光经济”。