

草木人间：植物与人类文明的生态对话
讲师：郑艾雨
2025 年唯理中国暑期课程讲义

Aiyu Zheng 2025

前言

草木不仅是植物的代名词，更承载着时间的厚度与文化的温度。因此，才有“一草一木总关情”的表达，映照人与自然的共生。然而，草木不仅关乎情感，也关乎生命的演化与生态的运行。植物的存在塑造了人类文明，而没有人类，植物的演化是否仍会走向我们熟悉的森林与草原、农田与花园？

植物的祖先源自海洋，在漫长的演化中适应陆地，形成了森林、草原、湿地等多样的生态系统。这些植被类型不仅影响了人类的食物来源与栖居方式，也深刻塑造了社会组织与文明进程。个体层面，植物进化出复杂的生态策略，以优化生存与繁衍——它们如何决定何时开花结果，如何竞争、共生、抵御捕食与灾害。这些适应性也影响了农业发展，甚至文化象征的形成。植物群落塑造了不同地区的文化审美，寒带针叶林、热带雨林、草原荒漠，不仅孕育了生态系统，也影响了建筑风格、艺术表达与信仰体系。人类在植物塑造的世界中成长，反过来又用文化赋予植物独特的意义。

在当今环境危机中，植物的角色愈发关键。它们影响碳循环、维持生物多样性，并决定着能源与粮食安全。森林和湿地如何作为碳库？能源作物能否成为可持续发展的解法？理解植物生态学，不仅让我们看见植物如何塑造文明，更促使我们思考，在气候变化加剧的今天，人类应如何与草木共生。草木既是人间的景观与资源，更是人类时间的见证者与塑造者。在这门课程中，我们将以跨学科的视角，探讨植物生态学中的核心概念，理解人与植物交织的生态对话。

讲师介绍： 郑艾雨，科罗拉多学院环境科学学士，普林斯顿大学生态与进化生物学博士，目前于纽约大学环境研究系从事博士后研究。她的森林生态研究融合理论建模、野外调查与数据分析，聚焦竹子等“草木”植物——这些既非典型草本、亦非传统木本的生命形式。她试图从“草木”独特的生活史策略出发，突破以“树”为核心的森林定义范式，重新思考森林结构与功能的多样性。她同时关注那些与森林紧密相连的复杂适应系统，包括自然环境中的“草木”演化，也包括人类城市中“草木”的文化生态。

欢迎通过 <https://aiyuzheng.com/> 了解更多，或联系她进行进一步交流！

章节目录

第一章 解读植物与人类对话的语言

第二章 植物生命的基础：生理活动

第三章 植物的进化史：植物生命的延续

第四章 植物塑造人，人又塑造植物

第五章 植物在时间上的变化规律

第六章 植物在空间上的变化规律

第七章 植物和人类共同成就的复杂系统

第八章 我们所体验的植物世界与未来

Aiyu Zheng 2025

第一章 解读植物与人类对话的语言

关键概念 Glossary

维度	一句话定义	本课程中的问题
 生理学	植物“如何活着”？	植物是如何应对环境胁迫和人类使用的？ 关注植物的基本生命活动，如光合作用、呼吸作用、水分与养分运输、生长发育、激素调控等。植物是具有自主调节能力的生命体，它们对环境有实时响应、会移动、会防御，也会“沟通”。这些功能性机制构成了人类使用植物（如食物、药物、燃料、材料等）的基础。往往和解剖学、实验学、植物分类等学科关系密切。
 进化生物学	植物“为何如此”？	人类对植物的利用如何影响植物的进化？ 探讨植物多样性从何而来、如何演化至今——是自然选择、性选择、适应、协同进化、基因突变、漂变、人为选择等机制共同作用的结果。植物的每一个形态特征都有其历史轨迹和适应背景。理解进化，才能理解为什么某种植物在某个文化中如此重要，以及植物和人共同成就了人类文明的前进。
 生态学	植物“如何交互”？	为什么某些植物常出现某些地区、某些文化中？ 研究植物在群体、群落和生态系统中的相互关系及其与生物、非生物环境的互动。植物与其他植物、动物、微生物、物质环境共同构成一个在时间和空间上不断变化的动态系统。生态学帮助我们理解植物如何从个体自组织到不同的层级，如何在与动物、人类社会交互中构成不同的群落景观和气候植被带。它帮助我们理解“联系”的结构、功能、规律与影响。
 复杂系统	植物“如何形成世界”？	为什么气候变化可能使植被发生不可逆的转变？ 研究大量组成部分在彼此相互作用下，整体行为无法直接从局部推断出来的系统。强调非线性、涌现、自组织与反馈机制。植物世界如同人类社会，本质上是一个复杂系统：从细胞到森林，从演替到气候反馈，一个外部干扰产生的变化往往是突变式的（例如蝴蝶效应）。跨越自然科学与社会系统的边界，复杂系统学帮助我们为复杂的问题找寻复杂的答案，而非只是还原论的简化。

关键图



图 1. 生命系统研究学科

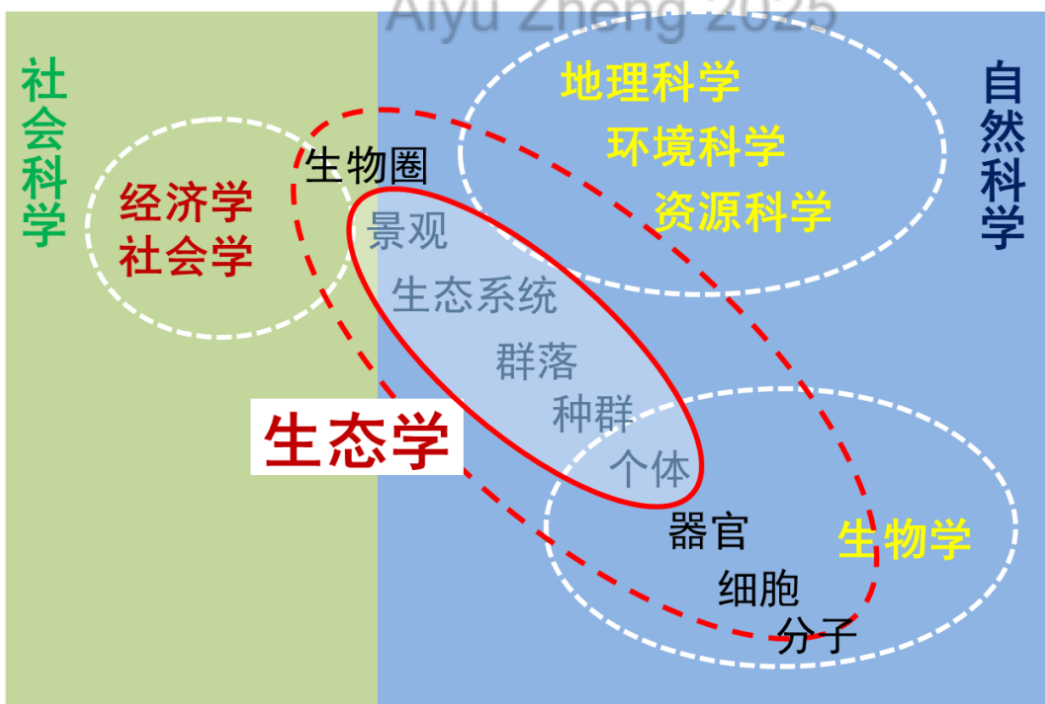


图 2. 生态学与其他学科的关联

文章来源：《大学与学科》2021 年第四期

第二章 植物生命的基础：生理活动

核心问题 Key Questions

1. 植物有哪些核心生命活动？这些活动分别靠哪些器官完成？
2. 植物的生理机制如何适应不同的环境？是否存在局限？植物如何应对这些局限？
3. 植物的一生如何展开？其“生活史”有何策略与变化？

关键概念 Glossary

术语	释义	课程关联 / 例子
光合作用 Photosynthesis	植物利用阳光、二氧化碳和水合成有机物同时释放氧气的过程	是植物制造能量的方式与生态系统能量的起点；主要由叶绿体完成→不同的植物在对环境的适应中为了提高光合作用效率形成了不同的光合作用器官（叶为主，有时也有茎）和机制（C3：温和湿润/C4：高温高光/CAM：干旱）
呼吸作用 Respiration	植物将储存的有机物分解以获取能量的过程，产生二氧化碳和水	与光合作用相对，共同驱动生理活动（基本新陈代谢）；两者达到生理的动态平衡—当呼吸作用消耗能量大于光合作用合成能量时，植物器官坏死，逐渐死亡。
气体交换 Gas Exchange	植物与外界进行气体交换	主要发生在气孔（stomata），植物在光合作用时吸入二氧化碳，释放氧气；在呼吸作用时释放二氧化碳；植物的蒸腾作用也通过气孔发生。气孔导度因此是植物很重要的生理性状，植物的气孔分布、数量、开合控制如何随环境变化而变化也是植物生理学最基础、重要的课题之一。
水分/养分的运输	根吸收的水分和矿物质通过维管系统传输到全株（限于维管植物）	植物从海洋到陆地的进化革新，解决陆生植物基本新陈代谢的资源限制：光的获取要求枝干结构来支撑叶，繁殖的要求要求枝干结构支撑花与果实。而结构的出现意味着从根到叶资源运输的距离增大。
养分的吸收	植物有不同的与真菌共生、交换养分的方式；与真菌的交换依赖基因控制的代谢途径和免疫调控	绝大部分植物依靠共生真菌（丛枝 AM，外生，ECM）真菌来获取养分，而真菌则获得植物一部分的光合作用产物作为交换；有一些植物则是通过根瘤菌直接从空气中固氮（比如豆科），还有更少数则是进化出了特殊的高效吸收养分的根系，不依赖共生和根瘤菌。

繁殖与传播	包括有性或无性方式繁殖，以及种子或孢子的扩散	植物的繁殖系统是一个植物进化并不是“单线前进”的典型例子，不存在“种子”就是更高级的形式。进化过程从最早的无性生殖（分裂）到有性生殖、孢子、种子，但在现代种子中仍然保留了很多“祖先”的策略，通过地下茎、根等器官进行分蘖（克隆）以适应环境的改变。比如竹子具有种子繁殖的能力，但受人类和干扰环境的影响，更多地以无性方式繁殖。
植物器官：根/茎/叶/花/果实	植物的主要器官，分别执行吸收、支撑、能量交换、繁殖等功能	并非所有植物都具有同样的器官和构造，这一部分是因为进化历史局限，比如裸子植物没有真花，单双子叶植物的种子内部结构不同——使得它们的生长发育不同；另一部分是对环境的适应造成的（环境约束），这意味着即使是同一种“基因蓝图”的植物也会在不同的环境中发展出不同的形态。
功能性状 Functional Traits	与植物适应环境密切相关的形态或生理特征	这些性状是进行植物生理活动功能的反应。比如单位叶面积干重：每单位叶面积的干重，强调叶子的“构造投资”，比如落叶树种在叶片结构上的投资要比针叶树（耐寒抗旱）小很多。又比如植物导管导水率，代表木质部在单位时间横截面积下最大的水流量…我们可以通过比较不同物种在同样环境条件下的功能性状来推断它们演化适应的历史。
生活史策略 Life history Strategies	植物如何在生长、繁殖和生存之间做出权衡	K-r 策略：r 策略侧重快速繁殖、个体小，生命周期短，比如高山上的短命植物，在融雪后通过快速生长积累生物量，产出很多小、易扩散的种子来适应环境不稳定但资源相对丰富的条件；K 策略则强调繁殖更少的个体、对它们投入更多来适应环境稳定但资源有限的条件。植物的开花策略则是与传粉、传播种子相辅相成的：植物有单次开花（一生中积累足够资源后开花生殖后死亡）、多次开花等策略，也有一年生、两年生、多年生的区别。这些对开花的投资也会体现在种子和花等繁殖器官的性状当中。
植物次生代谢产物 Secondary Metabolites	植物化学防御物，不直接参与基本的生理活动而是在长期的进化中发展出应对环境的化学工具，用于防御、竞争、吸引、调控生理活动等。	生物碱如吗啡、咖啡因，会作用于动物神经系统，干扰植物天敌的神经传导；萜类比如青蒿素、松树的油脂，主要是植物通过挥发物来抗虫、抗菌等疾病感染和传播；酚类则是辣椒素、茶多酚等具有苦味、辛辣等刺激感官的化学物质，是为了保护植物器官远离捕食。同时，植物也运用这些代谢产物来竞争（化感作用）——抑制同环境内其他同种个体或不同物种的生长发育，或用来繁殖——招蜂引蝶、与真菌传递信号。

另可根据自己的背景知识、掌握程度和兴趣自行参考《基础生态学》和《植物生理学》。

植物案例



雄蕨 (*Dryopteris filix-mas*) [图源](#)

名字里带“雄”却不是雄性，因为我们见到的蕨类成熟植株是雌雄同体的孢子体。图中是该雄蕨个体的器官和完整的生活史解剖图，（古典西方植物解剖学图示）。左侧的蕨类植物形态为孢子体（二倍体），叶片背面是孢子囊群，横截面解剖图展示了孢子产生的位置，中间的各小图展示了孢子的萌发过程。绿叶心形结构是配子体（单倍体），具有造精器和颈卵器，能同时

产生精子和卵子。右下角受精后的孢子体从配子体中长出，完成世代交替。

蕨类植物 是植物界中最古老的陆生植物，属于蕨类植物门 (Pteridophyta) ——植物的水生祖先在适应陆地的过程中进化出了真正的维管组织，但保留了对水生环境依赖较强的孢子繁殖机制。它不只包括林下矮小的蕨类“草本”，还有 20 多米的巨大蕨类（例如桫欏）。不仅水生，还有土生、石生、附生蕨类。



银杏 (*Ginkgo Biloba*) [图源](#)

- 1 雌株：胚珠
- 2 胚珠
- 3 雄株：花粉穗
- 4 发芽的种子
- 5 叶片
- 6 包裹种皮的成熟种子
- 7 种子：白果

银杏是罕见的阔叶裸子植物，植物界的“活化石”。银杏是现存唯一的银杏科植物，属于裸子植物门，距今已有 2 亿年以上的历史。不同于多数针叶状的裸子植物，银杏拥有独特的扇形阔叶，叶脉呈二叉分叉状，形态上与单子叶植物相似，但属于趋同演化的结果。银杏为雌雄异株植物，不开花也不结果。雄株产生花粉穗，雌株则在短枝顶端形成胚珠，授粉过程依赖风力传播。它的精子具有多条鞭毛，能在胚珠中游动完成受精，这是裸子植物中极为原始的特征。春季授粉、秋季受精，成熟种子外包一层黄色肉质外种皮，虽外形类似果实，实为裸露种子。银杏在解剖与繁殖结构上保留了古老植物的许多特征，是研究植物演化的重要“活化石”。



红树科 (Rhizophoraceae) [图源](#)

红树 (*Rhizophora mangle*) 是红树林中非常典型的被子 (双子叶 C3) 植物。红树林生活在潮间带，能适应高盐、缺氧环境。它们通过根系阻盐、叶片排盐或落叶贮盐等方式抵御盐分侵害；利用发达的支柱根和呼吸根吸收氧气，并通过潮水带来的泥沙摄取养分。繁殖上，许多红树采用胎生繁殖，种子在母树上发芽，形成长胚轴，成熟后直接插入泥滩生根，迅速长成新株。

- A 整株红树 展示 *Rhizophora mangle* 整株形态，包括对生叶片、发达的支柱根 (prop roots) 和枝条上悬挂的胎生胚轴 (propagule)。支柱根提供稳定性并辅助气体交换，是红树潮间带适应性的关键器官。
- B 叶与枝条结构 展示红树的对生叶、花朵、果实和明显的托叶 (stipule)。叶片厚革质，边缘全缘，具光泽，托叶位于两个叶柄之间，脱落后留有环状痕迹，是红树属的典型特征。
- C 花朵结构 (展开) 展示完整的花朵，具四枚萼片和四枚花瓣，花瓣内面常具柔毛，中心为多枚雄蕊围绕雌蕊。红树为两性花，结构整齐，对称明显，属于四数花。
- D 雄蕊 (花药) 红树的雄蕊，即花的雄性器官。*Rhizophora mangle* 通常有八枚雄蕊，几乎无花丝，花药贴生在花筒上，向内开裂释放花粉。
- E 雌蕊 (子房+花柱+柱头) 正确展示了红树的雌蕊结构：一枚半下位子房 (一部分埋在花托内)，细长的花柱 (style) 和二裂柱头 (stigma)。子房为二室，每室具两枚胚珠。
- F 子房剖面 (展示胚珠) 展示了红树子房的纵剖面，可见两个心皮所围成的室 (locule)，每室包含两枚悬垂的胚珠 (apical placentation)。这是受精和种子发育的部位。
- G 果实 (胎生子早期) 红树的果实为单种子的浆果状果实 (berry)，外被宿存萼片，内部为正在发育的种子。此图显示种子尚未完全萌发前的果实阶段。

龙舌兰 (Agave) 图源



美国龙舌兰 (*Agave americana*) 是一种典型的单子叶多年生植物，叶片厚实、排列成莲座状，边缘具锐刺，能储水抗旱。它有着长期营养生长期：一生中大部分时间用于叶片的生长和水分储存，常达 10 - 30 年。在积累足够资源后，龙舌兰一生只开花一次（单次结实），花后整株死亡，但可通过根际蘖芽进行无性繁殖。所以龙舌兰是典型的有性与无性繁殖并存。它采用 CAM 光合作用：夜间吸收 CO_2 形成有机酸，白天关闭气孔再行光合，有效减少水分蒸发，使其能在干旱、高温环境中生存，是荒漠植物中水分利用效率极高的代表。

位置	图示内容	植物学描述与功能说明
下方	基生叶丛	叶子呈莲座状排列，宽厚多汁，边缘具锐刺；为单子叶植物典型叶型。叶面具蜡质层和下陷气孔，有效减少水分蒸发，是主要的储水与光合作用器官。
上方	花序	高大的总状花序从叶丛中央抽出，常高达数米，顶端开出大量黄色小花，为一次性生殖结构，即花后整株死亡（单次结实）。
左上 & 右上	花的解剖图	展示六枚雄蕊（长花药）和一个子房；符合单子叶植物的“三的倍数”特征。可见完整的花被、雄蕊和雌蕊结构，中轴为子房与柱头，构成雌蕊。
中	子房的横切面	子房为三室性（trilocular），每室内含多个胚珠，是种子发育的位置，体现出典型的子房构造。



玉米 (*Zea mays* L.) [图源](#)

玉米是一种一年生单子叶植物，由种子（成熟的粒状果实）萌发，先发出主根和胚芽，然后进入营养生长阶段：茎节逐渐抽高，叶片展开进行光合作用，地下根系扩展。顶部长出雄穗，产生大量花粉；叶腋生出雌花（果穗），柱头丝露出，等待授粉；花粉落在玉米须上，一根花粉管通向一个胚珠。所以每粒玉米粒都是一个胚珠发育而成的种子。当种子成熟与脱落供人类或自然散播传播，玉米即完成生命周期。C₄光合作用使玉米在高温、强光和干旱环境下仍能高效固定二氧化碳，提升光合效率与水分利用率，是其成为全球重要高产作物的关键生理优势。

- | | | |
|------|-------------|--|
| A | 根部与茎基部 | 展示了玉米的支撑根（冠根）和须根系统；玉米的根系发达，既有地下主根，也有地上不定根，可增强植株稳定性并协助吸水。 |
| B | 雄穗（顶端） | 玉米为雌雄同株、花异位植物，顶端为雄花序（雄穗），生有花药的雄蕊，可散出大量花粉。 |
| C | 雌花与丝状柱头 | 雌花位于叶腋处，被叶鞘包裹，长丝即为柱头（玉米须），每一丝通向一个胚珠。接受花粉后通过花粉管授精形成种子。 |
| D | 成熟果穗（雌花果实） | 展示成熟的玉米果穗，由多个果实（实际上是粒状果实）构成，每粒玉米粒来源于一个受精的胚珠。 |
| E | 雄花细部 | 展示雄花结构，包括三枚花药的一枚雄蕊，典型的单子叶“三数系”特征。 |
| 其他小图 | 子粒剖面、胚珠、果皮等 | 包括玉米种子的纵剖（胚乳+胚）、果皮结构、以及发育中的胚珠等组成部分。 |

第三章 植物的进化史：植物生命的延续

核心问题 Key Questions

1. 什么是进化？进化如何发生？
2. 植物的进化历史上有哪些里程碑事件？
3. 我们如何借助植物的性状特征来理解植物的进化历史？

关键概念 Glossary

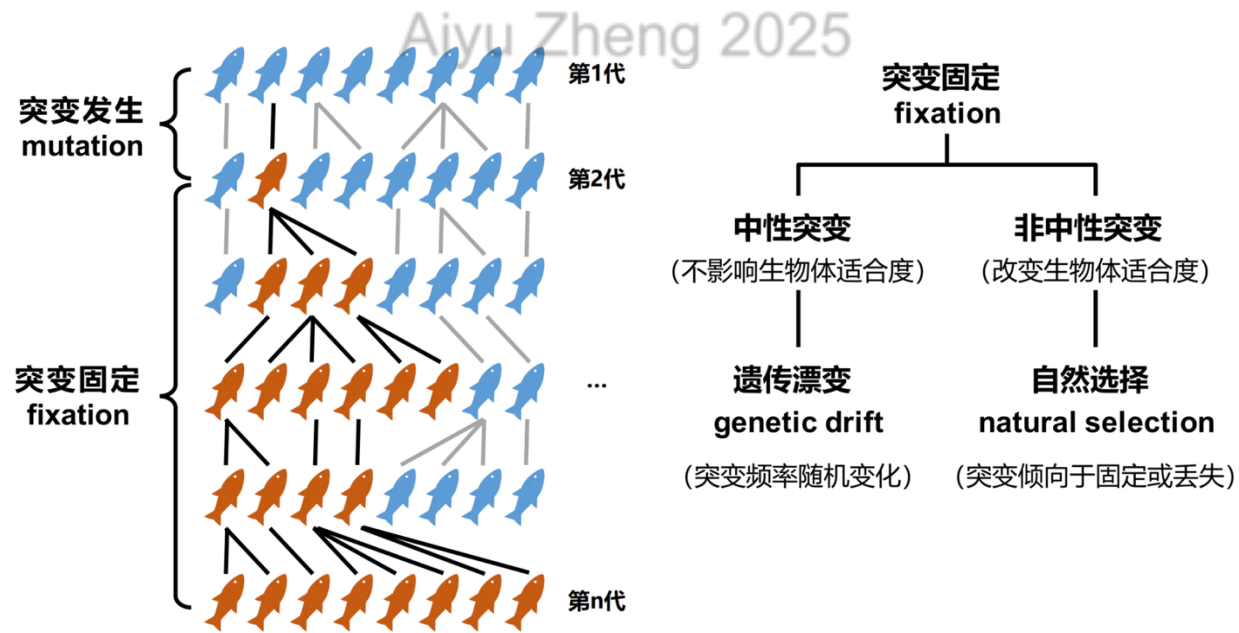
术语	释义	课程关联 / 例子
进化 Evolution	指种群中基因频率随时间发生改变的过程，这些改变的长期积累可能导致新物种的出现。进化是生物对环境筛选的回应，并非简单的“进步”。	是理解整个课程的基础：我们所看到的所有植物特征（如器官形态、生理机制、生活史策略）都是进化的产物。例如，仙人掌的肉质茎和刺是其在干旱环境中适应性进化的结果。
基因与性状 Gene - Trait	植物的性状（如形态、生理功能、发育方式等）由基因控制和调控。基因的改变会直接影响性状的表现。表观遗传学也揭示了性状表现如何反过来影响基因的表达和遗传。	结合前一课的“功能性状”，理解性状背后的遗传基础。例如，不同的叶形（如掌状叶、针状叶）、水分利用效率（如C3/C4/CAM植物）、开花策略（如单次/多次）都与特定基因的表达有关。基因工程中，科学家尝试改变基因来“优化”植物性状。
自然选择 Natural Selection	环境对具有不同性状的个体施加的“筛选”作用。那些更适应环境的个体更有可能存活并繁殖后代，从而使它们的有利基因在种群中逐渐增多。	“适者生存”并非主动选择，而是生存与繁殖差异的积累。例如，在长期干旱地区，具有发达根系和耐旱基因的植物比其他植物更有可能存活并繁衍，这些耐旱基因就会在种群中逐渐普及。
突变 Mutation	基因组中发生的随机改变。它们是产生新基因和新性状的根本来源，为自然选择提供了变异的“原材料”。	进化的原始动力。突变可以是微小的（如一个DNA碱基的改变），也可以是较大的（如染色体结构变异）。例如，植物光合效率、花期、抗病性等性状的变异，最初都可能来源于突变。
遗传漂变 Genetic Drift	种群基因频率因随机事件（非自然选择）而发生的改变。在小种群中这种影响尤其显著，可能导致某	说明并非所有性状变化都源于环境筛选。比如，一场意外的火灾可能随机消灭了种群中大部分个体，幸存个体的性状不一定是最好适应环境的，但它们却决定了新种群的基因库。又如，一个旅行者偶然将入侵

	些基因偶然消失或成为主流。	物种的少数个体带到新大陆，这些偶然的个体就决定了该物种在新大陆的初始基因库。
物种多样性 Species Diversity	指地球上生命形式的丰富性，是进化过程中不断分化和灭绝共同作用的结果。多样性不仅体现在物种层面，也包括基因多样性、性状多样性、生态系统多样性等其他层级的多样性。	理解生物多样性来源于演化的动态过程，新物种的产生与旧物种的灭绝是同时发生的。例如，地球上现存的数百万种植物，从简单的藻类到复杂的高等植物，都是漫长进化历史的产物。人类活动正加速物种灭绝，打破这种自然平衡。
谱系/系统发育 Phylogeny	物种之间基于进化关系的“家谱”或“亲缘关系图”，通常用进化树（phylogenetic tree）来表示。进化树展示了物种从共同祖先分化而来的历程。	通过进化树，我们可以追踪某一性状的起源和传播，了解不同物种之间的亲缘远近。在课堂活动中，我们将尝试绘制简易的植物进化树，了解如何通过性状推断植物间的关系。进化树的根部代表所有被研究类群的共同祖先。
共有衍生性状 Synapomorphy	某些特定类群共同拥有，并且源自它们最近共同祖先的新性状。这些性状是在共同祖先演化过程中首次出现，并遗传给其所有后代的。	是判断植物是否属于同一演化支系的关键证据。例如，所有种子植物（裸子植物和被子植物）都拥有种子这一共有衍生性状，这表明它们拥有一个共同的、会产生种子的祖先。花朵和果实则是所有被子植物的共有衍生性状。
历史约束 Historical Constraint	指生物的某些结构或生理机制，由于受到其祖先遗传基础的限制，不能“重新设计”或完全改变，即使这些性状在当前环境中看似“低效”。	解释为什么有些植物性状看起来“不完美”但仍然保留，这体现了进化路径依赖。例如，单子叶植物（如棕榈、竹子、玉米）通常不具备真正的次生生长能力（即无法像乔木一样形成增粗的木质茎），这是它们祖先遗传的限制。但它们会发展出其他策略（如竹子的空心茎秆）来达到高大的目的。
性状演化 Trait Evolution	某些特定性状（如根、叶、花、C4光合作用等）在进化过程中如何逐步出现、改变或丧失的过程。它揭示了环境与性状之间的相互塑造关系。	通过对比不同植物的性状差异，我们可以推测其起源与演化方向。例如，通过比较蕨类植物和开花植物，我们可以了解维管组织、种子、花朵和果实是如何在植物进化史中依次出现的。在此过程中，我们会发现进化突破（如陆生适应）和协同进化（如植物与传粉者、真菌的共生）。
外群 Outgroup	在构建进化树时，指与所研究的主要类群（内群）	外群的主要作用是为进化树定根，帮助我们确定所有研究类群的最近共同祖先，并

	亲缘关系较远的一个或多个物种或类群。它被假定在进化历史上更早地与内群分离出来。	推断性状的祖先状态和衍生状态。例如，在分析陆生植物进化时，绿藻常被用作外群，因为它被认为是所有陆生植物的祖先。外群可以帮助我们理解时间方向和新特征出现的时点。
趋同进化 Convergent Evolution	指亲缘关系较远的物种，因为适应相似的环境或生态位，而独立地演化出相似的特征。这些相似的特征在它们的最近共同祖先中并不存在。	是独立进化的一种特殊情况。例如，不同谱系的陆生植物（如某些被子植物和蕨类：像是上一章讲义里的红树和雄蕨）独立地适应水生环境，发展出了类似的适应水生生活的特征，这就是趋同进化。再如，仙人掌和非洲大戟科植物都演化出肉质茎和刺来适应干旱，但它们亲缘关系很远。

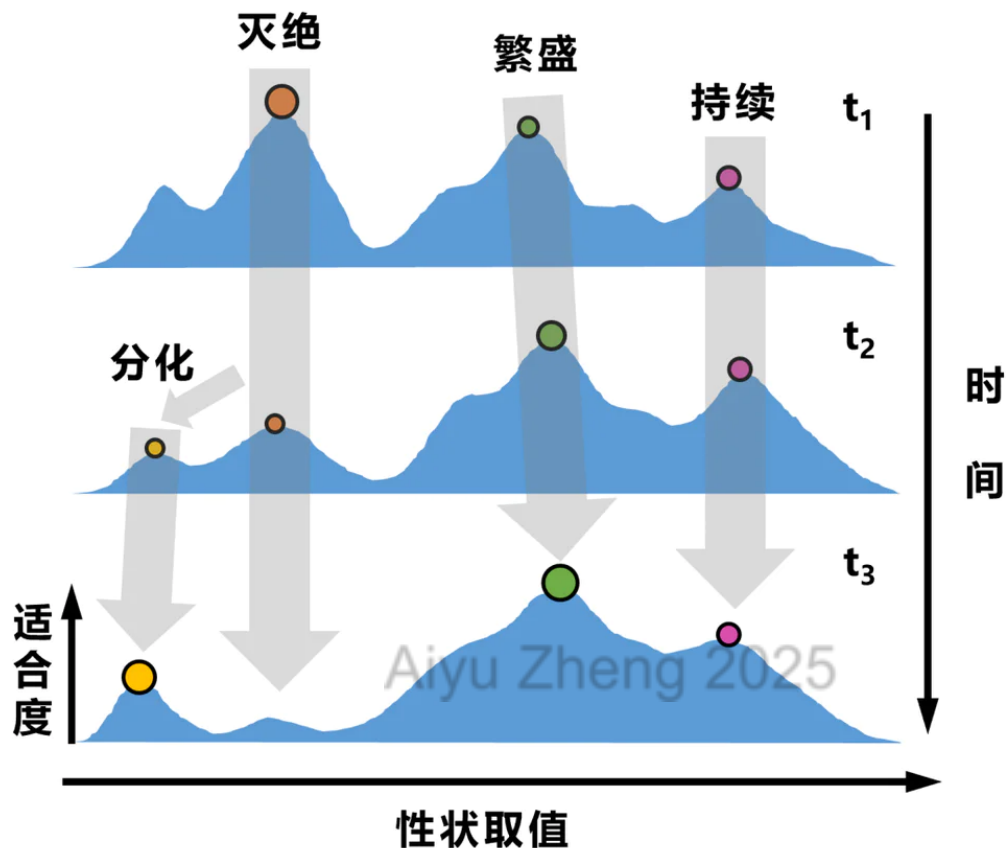
相关图表

1. 进化的不同机制（[source: 卢平](#)）



生物演化的两个步骤：突变→突变固定
 突变固定有两个场景，其中自然选择往往是有方向的，进化中的“进”也是出于对此的暗示。

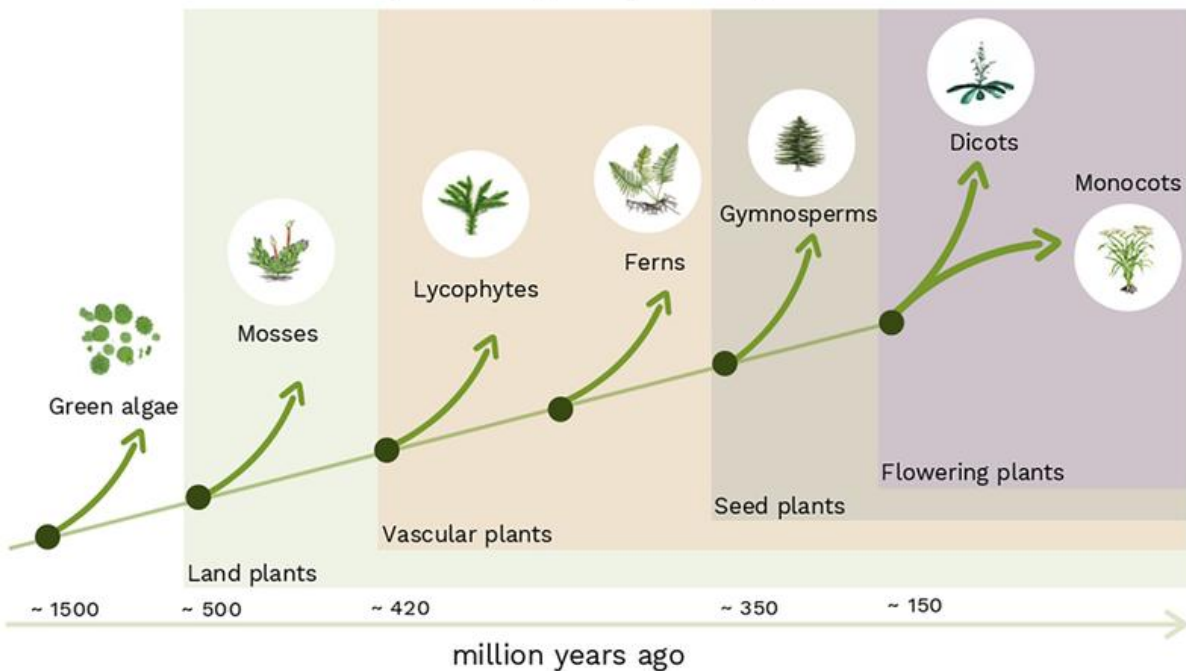
进化到底有没有方向？这是一个需要根据环境的维度和时空的规模来讨论的问题。



性状空间的各个维度是生物的不同性状，而环境空间的各个维度是不同的环境因素。一个物种就是各种性状的一个特定的取值组合，因为对一个生态位的适应而具有特定的适合度，这个从性状空间到适合度的映射叫做适合度地形图（fitness landscape）。物种对环境（一个生态位）的适应过程，可以看成是在适合度地形上发生性状的改变，向着适合度高的“山峰”攀爬的过程。因此，适应性演化是生物在很多性状维度上，针对某些环境因素导致的选择压力，在自然选择作用下发生的具体可遗传的变化。而当我们把视角从这一个单一的“爬山”过程拓展到更多物种、更多生态位，就会发现适应性演化的维度很高，方向很多。同时，由于环境在不断变化，适应过程在相应维度的局部方向性也是随之不断变化的。总结来说，环境是高维度且频繁变化的，物种的适应性演化是多方向的复杂过程，并受到物种与物种、物种与环境的相互作用的影响。所谓演化的方向性，是局部演化历史中，在单一稳定环境选择压力下，物种某个维度性状变化的适应性演化，以及由此发生的多样性辐射演化。一个环境下更为适应的类群，可能在其他环境中并不适应。所以，演化过程的方向性，只体现在空间和时间的局部。

2. 植物的简易进化史与进化的重大突破

Evolution of land plants (simplified)



Zhang, Yuzhou, et al. "Evolution of fast root gravitropism in seed plants." *Nature communications* 10.1 (2019): 3480.

Q2.1 图中第一个分叉点之前的直线代表什么？

图中第一个分叉点之前的直线，代表了所有陆生植物的共同祖先。它表明在植物成功登陆之前，它们在水中经历了一个漫长的、共同的演化阶段。这条直线可以看作是陆生植物“家族史”的开端，凝聚着所有后续植物类群的遗传基础和早期适应水生环境的策略。

Q2.2 这一条完整的直线代表什么？

这条完整的直线，从图的最左侧（时间轴的起点）一直延伸到最右侧，代表了植物从最原始的形态（水生藻类）开始，经历数十亿年的漫长演化，最终形成我们今天所见的丰富多样的植物界。它象征着植物生命连续不断的传递和适应，以及它们在地球生态系统中扮演的越来越重要的角色。这条线是植物生命延续的“主轴”，记录了它们在不同地质时期所经历的挑战和取得的进化成就。

Q2.3 直线上依次出现的分叉点代表什么？分出去的箭头指向的具体是什么植物？

直线上依次出现的分叉点代表着植物进化史上的**重大突破或里程碑事件**。每个分叉点都标志着一个新的、具有显著适应性优势的植物类群的出现，它们成功地演化出新的性状，使其能够更好地适应环境，并开辟了新的生存空间。分出去的箭头指向的是从主干分化出来的**主要植物类群及其代表**：

- **苔藓植物 (Mosses)**：这是植物**成功登陆**的第一个分叉点。它们是地球上最早适应陆地生活的植物之一。虽然它们已经能在陆地生存，但仍需要潮湿环境进行繁殖，结构相对简单，没有真正的根、茎、叶和维管组织。
- **蕨类植物 (Ferns)**：这个分叉点代表了**维管组织**的出现。维管组织（木质部和韧皮部）就像植物体内的“管道系统”，能高效运输水分和养分，让植物可以长得更高、更大，更好地抵抗重力，从而更彻底地征服陆地。
- **裸子植物 (Conifers)**：这个分叉点标志着**种子**的出现。种子的演化是一大飞跃，它为胚胎提供了保护和营养，并且不需要水来繁殖，使得植物可以扩散到更干燥、更广阔的陆地环境。松树就是典型的裸子植物代表。
- **被子植物 (Flowering Plants)**：这是植物进化史上**最新的一个主要分叉点**，代表了**花朵和果实**的出现。花朵吸引传粉者，提高了繁殖效率；果实则有助于种子的传播，使得被子植物成为地球上种类最多、分布最广的植物类群，如橡树和玉米都属于被子植物。

Q2.4 观察时间轴，你认为新的交叉点出现的速度如何变化？

观察时间轴可以发现，**新的交叉点（即新的主要植物类群的出现）在植物进化的后期出现的速度似乎更快了**。从最早期到苔藓植物出现，以及从苔藓到蕨类，中间经历的时间尺度相对较长（数亿年）。然而，从裸子植物到被子植物的出现，所需的时间相对缩短了（特别是与前两个阶段相比）。被子植物在地球上快速多样化，并在相对较短的时间内占据了主导地位，这被称为“被子植物的辐射适应”。

这种加速可能是因为：

- a. **关键性状的积累**：早期进化积累的适应性性状（如维管组织、种子）为后续更复杂的演化奠定了基础。
- b. **协同进化**：被子植物的出现伴随着与昆虫、鸟类等动物的**协同进化**，例如花朵吸引传粉者、果实吸引动物传播种子，这种相互作用极大地加速了多样化进程。
- c. **环境变化**：地球环境的不断变化也可能提供了新的生态位，驱动了植物的快速分化和适应。

这种“加速”趋势表明，随着进化机制的不断完善和环境的动态变化，生命可以以更快的速度产生巨大的多样性。

第四章 植物塑造人，人又塑造植物

核心问题 Key Questions

1. 什么是协同进化？
2. 植物与动物和真菌的协同进化表现在哪些方面？
3. 植物和人类的协同进化有哪些例子？植物对人类文明的发展有哪些关键作用？

关键概念 Glossary

术语	释义	课程关联 / 例子
协同进化 Coevolution	指两个或多个物种之间，由于长期相互作用而发生的相互适应性进化。一个物种的进化变化会影响另一个物种的进化，反之亦然。这种相互作用可以是互利、拮抗或竞争的。	是理解本章核心概念。它强调物种间的相互依赖与影响，而非独立演化。例如，植物演化出鲜艳的花朵吸引传粉者，同时传粉者也演化出特定的口器以获取花蜜。甚至有时我们会看到非常独特的例子：榕树与榕小蜂是高度互赖的“搭档”，榕小蜂是唯一能为榕树授粉的昆虫，而榕树则是榕小蜂繁衍后代的唯一场所，它们彼此离不开对方，共同演化出了这种独特的生命循环。
互利共生 Mutualism	一种互利的协同进化关系，其中两个物种都从相互作用中受益。	植物与传粉者是经典的互利共生例子：植物提供花蜜、花粉作为食物，动物则帮助植物传播花粉。植物与菌根真菌也是互利共生：真菌帮助植物吸收水分和矿物质，植物为真菌提供光合产物（糖）。这些关系极大地促进了地球生物多样性的形成。
拮抗关系 Antagonism	一种负面的协同进化关系，其中一个物种以牺牲另一个物种为代价而获益（如捕食者与猎物，寄生者与宿主）。	典型的例子是植物与食草动物。植物为了避免被吃掉，演化出各种防御机制（如毒素、刺、难以消化的纤维），而食草动物则相应地演化出克服这些防御的策略（如解毒酶、特殊的消化系统）。这种关系驱动了军备竞赛。我们的祖先也是在这种与植物的对抗中通过驯化植物发展出了早期农业。
军备竞赛 Evolutionary Arms Race	描述在拮抗协同进化中，物种双方为了竞争生存而不断发展和升级各自“武器”和“防御”能力的过程。就像	很好地解释了植物如何抵抗食草动物。例如，植物演化出新的毒素（如辣椒素、尼古丁），而与其互动的昆虫或动物则可能演化出更强的解毒能力或耐受性。这在农作物病虫害防治中也可见：病原体产生抗

	一场永无止境的升级战。	性，人类开发新农药。不过人类活动的干预可能会打乱军备竞赛原本的平衡。
红皇后假说 Red Queen Hypothesis	强调物种必须不断进化才能维持其在生态系统中的相对适应性，即使表型看起来没有改变。因为环境（包括其他物种）也在不断变化，“你需要不停地奔跑，才能保持在原地。”	解释了为什么即使在看似稳定的生态系统中，基因层面也在持续变化以适应动态环境。例如，植物不断演化新的防御物质来抵抗食草昆虫，而昆虫也必须不断进化才能继续以植物为食。停止进化意味着被淘汰。你所在的队伍参加接力赛，你必须跑到交棒（繁殖，增加你的物种的适应性），你所在的队伍才有资格参与最后的评优。
植物驯化 Plant Domestication	指人类在长期选择和培育下，使野生植物逐渐适应人类的需求，并发生形态、生理和遗传上的显著变化，最终形成栽培植物的过程。	这是植物与人类协同进化的关键体现，也是农业起源的基石。例如，将野生类蜀黍驯化成玉米，使其穗更大、籽粒更易获取，完全依赖人类才能生存繁殖。又如，人类选择性培育出更高产、更美味的谷物、水果和蔬菜。有时人类对某种植物的选择也会推动其他植物的进化：比如人为栽培竹子主要通过营养生殖，这使得竹子很容易通过鞭根分蘖入侵森林，形成大片纯林，通过竞争和其他形式的交互影响其他植物的进化。
农业起源 Origin of Agriculture	指人类从狩猎采集的生活方式逐渐转变为定居种植农作物、饲养牲畜的过程，是人类文明发展史上一次里程碑式的转变。它与植物驯化紧密相连。	植物驯化是农业起源的核心。农业的出现使人类获得稳定的食物来源，促进了人口增长、定居生活、社会分工和文明的诞生。玉米的驯化是农业起源的经典案例，它展现了人类如何通过定向选择彻底改变一个物种。同时，人类也发展出烹饪和解毒技术（如处理木薯、豆类），与植物驯化同步发展，确保了食品安全。植物的药用则是人类对于植物次生代谢产物的理解与运用，也推动了文明的发展。
文化入侵 Cultural Invasion	指一种强势文化通过各种途径（包括贸易、移民、传播等），渗透并取代某一地区的原有本土文化，导致当地文化特性的丧失和文化多样	强调植物传播的负面社会文化影响。例如，一些经济作物（如龙舌兰）因出口需求而过度商业化，可能冲击其原产地的传统生产方式和文化习俗，导致本土文化的流失，使其从一种具有文化精神价值的植物，简化为纯粹的商品。鸦片（罌粟）在

	性的减少。植物的引入有时会成为这种过程的载体。	近代中国的传播也是植物引入导致文化和社会危机的极端案例。
入侵物种 Invasive Species	指被引入到一个非原生地的生态系统中，并对当地生态环境、经济或人类健康造成负面影响的物种。它们通常具有强大的繁殖和适应能力，会挤压本地物种的生存空间。	虽然不完全是协同进化，但它体现了人类活动对植物传播的巨大影响。例如，大洋洲的桉树在中国南方大规模种植，虽然有经济价值，但也可能对当地水资源、生物多样性和火灾风险带来负面影响，是引入植物“双刃剑效应”的体现。很多基于市场需求新兴种植的作物，比如世界范围内的咖啡热和牛油果热，即使不是生态学意义上的入侵，也可能产生文化和经济入侵的后果。所以从这个角度关注入侵物种有助于思考人类与植物交互的复杂影响。

案例：蚂蚁与植物的相爱相杀



[Rubin, Benjamin ER, and Corrie S. Moreau. "Comparative genomics reveals convergent rates of evolution in ant-plant mutualisms." Nature Communications 7.1 \(2016\): 12679.](#)

蚂蚁不仅有自己的社会，还发展出农业和农场！

进化军备竞赛描述的是物种之间为了生存和繁衍，不断发展和升级各自的“武器”与“防御”能力，形成螺旋式上升的相互适应过程。这种“竞赛”不仅发生在直接的敌对关系中，也存在于看似和谐的互利共生中，以维持关系的“公平”或效率。

1. 植物与一般蚂蚁：防御与适应的早期较量

这种军备竞赛发生在植物和那些并非“养殖”或“农作”蚂蚁之间，它们可能只是随机取食者，或仅仅是路过的普通昆虫。这种关系更接近经典的捕食者-猎物（或植食者-植物）模型。

植物的防御升级：为了避免叶片、花朵或果实被蚂蚁啃食或破坏，植物会演化出各种防御策略。

- 物理防御：如叶片表面的腺毛分泌黏性物质困住蚂蚁；蜡质层使蚂蚁难以附着；或者植物茎秆上的刺阻碍蚂蚁爬行。
- 化学防御：合成忌避剂或毒素（如某些植物的汁液中含有的乳胶，会凝结并粘住或毒害蚂蚁）；酚类物质降低叶片的适口性；或产生挥发性有机化合物来“报警”吸引蚂蚁天敌。

一般蚂蚁的适应升级：为了能够接触和利用植物资源（例如蜜露、花粉，或偶尔的取食），蚂蚁则会演化出克服这些防御的策略。

- 行为策略：例如，一些蚂蚁会避开有腺毛的植物；另一些可能会在植物分泌乳胶前快速取食，或者通过咬断植物的乳导管来阻止乳胶流出，然后取食其“下游”的汁液。
- 化学感应与耐受：蚂蚁需要能够识别植物的化学信号，判断哪些植物是安全的，哪些具有防御性。一些蚂蚁可能也发展出一定程度的解毒能力或对某些化学物质的耐受性。

2. 切叶蚁与植物（及真菌）：复杂的多方战争



[source](#)

切叶蚁的“农业”系统展示了一场涉及植物、切叶蚁、共生真菌和共生细菌的多方复杂军备竞赛。

植物的化学防御：植物产生毒素和抗真菌化合物，旨在阻止叶片被啃食和真菌生长。

切叶蚁及其共生者的“应对联盟”：

- 切叶蚁的选择与切割：它们会选择毒性较低的植物，并以巧妙的方式（如切断维管束）来避免或减少毒素摄入。
- 共生真菌的“解毒工厂”：切叶蚁培养的真菌是核心武器，它演化出强大的酶系统，能够有效分解植物叶片中的毒素和复杂化合物，将有害物质转化为可消化的营养。
- 共生细菌的“抗生素武器”：为了保护真菌农场免受其他寄生真菌的侵害，切叶蚁身上共生着一种链霉菌，它能产生特定的抗生素来抑制这些有害真菌的生长。
- 寄生真菌的“反击”：作为回应，寄生真菌也会不断演化出对这些抗生素的抗药性，从而迫使蚂蚁的共生细菌继续演化出新的抗生素。

例子：切叶蚁的真菌农场就像一个微型的生态系统，其中每个参与者（植物、蚂蚁、共生真菌、共生细菌）都在不断演化，以应对其他参与者的进化压力，从而维持这种独特的共生关系和自身的生存。

3. 养殖蚜虫的蚂蚁与植物：互利关系中的微妙平衡与冲突



[中国科学院](#)

这种关系是蚂蚁（保护者）、蚜虫（提供蜜露者）和植物（被吸食者）之间的三角互动，其中也包含着军备竞赛的维度：

植物对蚜虫的防御：植物为了减少被蚜虫吸食的损害，会演化出各种防御机制，如产生毒素、吸引蚜虫天敌（如寄生蜂）等。

蚜虫的适应与蚂蚁的保护：

- 蚜虫的适应性取食：蚜虫演化出特殊的口器和生理机制，能够穿透植物的组织并吸取汁液，甚至能耐受或处理植物的某些防御性化学物质。
- 蚂蚁的“牧羊”行为：蚂蚁为获取蜜露，会积极保护蚜虫，驱赶天敌、清洁环境，甚至通过刺激来诱导蚜虫分泌更多蜜露或加速繁殖。这种刺激可以被看作是蚂蚁为了最大化收益而对蚜虫施加的进化压力，促使蚜虫在产出蜜露方面不断“优化”。

- 三方动态平衡：植物不断演化防御，蚜虫和蚂蚁则需要不断协同进化来克服这些防御，同时蚂蚁和蚜虫之间也存在着维持“收益-成本”平衡的进化压力。

例子：当植物的防御力增强时，蚜虫可能需要更有效地适应，或者蚂蚁需要投入更多的保护资源。反之，如果蚜虫产蜜量下降，蚂蚁可能会减少保护甚至“抛弃”它们。这种动态的相互作用，推动着三者关系的不断调整和演化。

这三种关系都清晰地展现了进化军备竞赛不仅仅是“你死我活”的斗争，它也可以是互利共生关系中为维持合作而产生的持续适应，甚至是多物种间复杂且动态的协同演化。从蚂蚁的例子中，我们也可以看到人类与植物的军备竞赛中虽远不止第三方，但仍然可以看到类似的推动因素。

Aiyu Zheng 2025

第五章 植物在时间上的变化规律

核心问题 Key Questions

1. 什么是生态位？它是如何形成的？
2. 物种种群动态指的是什么？我们如何描述和记录它们？
3. 演替是一种什么样的过程？

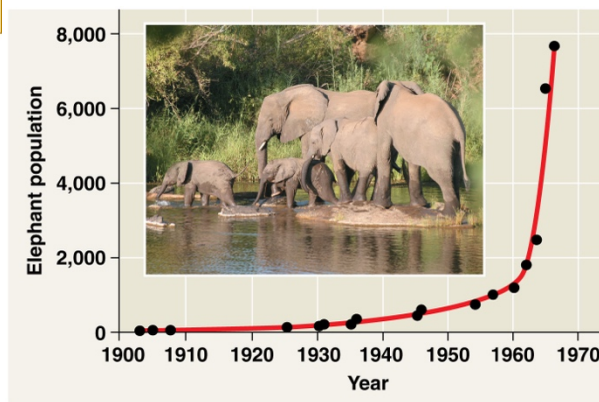
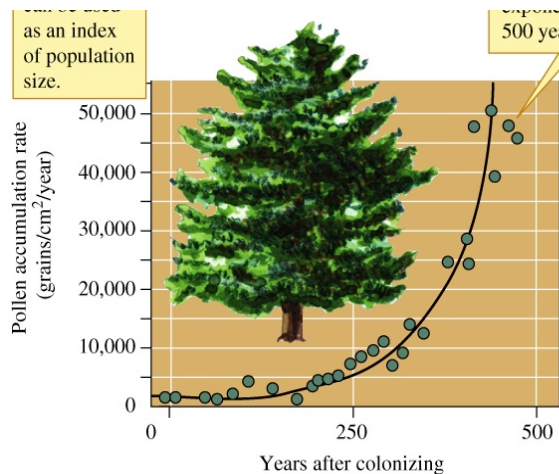
术语	释义	课程关联 / 例子
生态位 (Ecological Niche)	指一个物种在生态系统中所占据的独特“位置”和“角色”。它包括物种如何利用资源（如食物、光照、水分）、它与其他物种的关系（如竞争、捕食）、以及它能适应的环境条件（如温度、湿度）。可以理解为物种在生态系统中的“位置”或“生存之道”。	帮助我们理解物种为何能共存。例如，一片森林中，高大的乔木需要充足阳光，而低矮的灌木和地被植物则能忍受弱光，它们通过分化对光照的需求来占据不同的生态位，避免直接竞争。不同植物可能在根系深度、开花时间上分化生态位。
限制性资源 (Limiting Resources)	是指那些对物种的生长、繁殖或分布构成限制的资源。当某种资源稀缺时，即使其他资源充足，也会阻碍种群的增长，被称为种群的“短板”。在对同样的限制性资源的竞争上，往往会出现演替序列。	理解物种如何被环境塑型。对植物而言，常见的限制性资源包括光照、水分和土壤养分（如氮、磷）。例如，在干旱地区，水是限制性资源，只有耐旱植物才能生存；在森林底层，光照是限制性资源，耐阴植物更有优势。
生态位分化 (Niche Partitioning)	指不同物种在资源利用或生活方式上产生差异，从而减少竞争，使它们能够在同一区域内共存。	解释物种多样性的机制。例如，同一片草原上，不同种类的草可能根系深度不同，分别利用地表水和深层水；或者不同物种的花期错开，避免争夺传粉者，这都是生态位分化。
种内交互 (Intraspecific Interactions)	指同一物种内部个体之间的相互作用。这种交互会影响种群的增长模式。	理解种群如何随时间变化。主要形式包括：对资源的竞争（如植物为争夺阳光和水分而互相遮挡）、繁殖竞争（如雄鹿争夺配偶），甚至合作（如植物分泌化学物质吸引同类聚居，通过生长在一起形成适合生长的微气候）。

指数增长 (Exponential Growth)	在理想条件下（资源无限、无天敌、无环境限制），种群数量会以恒定且越来越快的速率持续增长，呈现“J”型曲线。这种增长在自然界中很难长时间维持。	是理解种群增长的起点。例如，当外来入侵植物刚进入一个资源丰富的区域时，在短时间内可能呈现指数增长。但它通常不符合自然界中植物种群的长期增长模式。
逻辑斯谛增长 (Logistic Growth)	当资源有限时，种群增长会受到环境容纳量 (K) 的限制。种群数量先快速增长，然后增长速度逐渐减缓，最终稳定在环境容纳量附近，呈现“S”型曲线。这个模型更符合自然界中种群增长的实际情况。	更真实地描述种群增长。例如，一片新开垦的土地上种植的作物，最初生长迅速，但随着养分和空间变得有限，它们的生长速度会减慢，最终达到这片土地所能支持的最大数量。环境容纳量 (K) 是该环境下物种能达到的最大种群规模。
元种群 (Metapopulation)	指由多个在空间上分离但通过个体迁移而相互联系的局部种群组成的集合。它强调栖息地破碎化和种群间的动态联系。	帮助理解物种在破碎化景观中的存活策略。例如，一片森林被农田分割成许多小块，生活在这些小块森林中的植物种群就是局部种群，它们之间通过风或动物传播的种子进行交流，共同构成一个元种群。理解元种群对保护濒危物种至关重要。
种间交互 (Interspecific Interactions)	指不同物种之间的相互作用。这些作用对物种的生存、分布和演替产生重要影响。	是驱动生态系统动态的关键力量。主要类型包括：竞争、捕食和寄生。
竞争 (Competition)	两个或多个物种为争夺相同的有限资源而发生的相互作用。	例如，在农田中，杂草与作物会竞争光照、水分和土壤养分。在自然森林中，不同树种幼苗会竞争阳光和土壤中的矿物质。竞争可能导致一个物种排挤另一个物种，或通过生态位分化实现共存。
捕食 (Predation)	一个物种（捕食者）杀死并取食另一个物种（被捕食者）的相互作用。	例如，食草动物取食植物就是一种捕食关系。虽然植物通常不会被“杀死”，但其生长和繁殖会受到影响。这种关系驱动了植物的防御性演化（如刺、毒素），以及食草动物的适应性演化（如解毒能力）。
寄生 (Parasitism)	一个物种（寄生者）生活在另一个物种（寄主）体内或体表，并从中获取营养，通常不直接导致寄主死亡，但会降低其健康状况或繁殖能力。	例如，菟丝子是一种藤蔓植物，它没有叶绿素，不能进行光合作用，而是通过吸器插入寄主植物的维管束，吸取水分和养分。这种关系对寄主植物的生长造

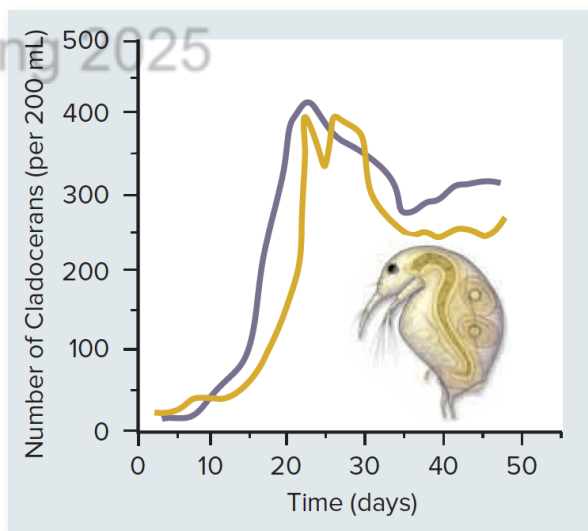
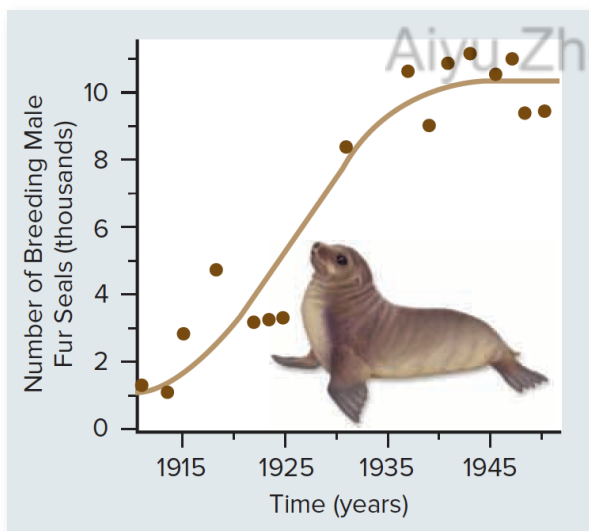
		成负面影响。许多植物病原体（细菌、真菌：比如冬虫夏草）也是寄生者。
植被演替 (Vegetation Succession)	指在特定区域内，植物群落的物种组成随时间发生有方向性的更替过程。它通常从一个先锋群落开始，通过一系列中间阶段，最终可能达到一个相对稳定的顶极群落。	是理解生态系统如何发展和变化的核心。例如，一片被火烧毁的森林，最初只有少数草本植物和灌木定居（先锋群落），随着时间的推移，各种树木幼苗逐渐长成，最终恢复为森林（顶极群落）。限制性资源（如土壤、水分、光照）的变化和种间交互（如竞争）是演替的主要驱动力。
先锋群落 (Pioneer Community)	演替早期定居的物种群落。它们通常适应恶劣环境，生长迅速，繁殖能力强，但竞争力不强。它们会改变环境，为后续物种的定居创造条件。	例如，在裸岩上，地衣和苔藓是典型的先锋植物。它们能分解岩石，积累有机质，开始形成土壤，为蕨类和草本植物的到来铺平道路。在被砍伐的森林空地上，杂草和快速生长的灌木常是先锋群落。
顶极群落 (Climax Community)	在没有重大干扰的情况下，演替最终可能达到的一个相对稳定、物种组成和结构变化较小的群落阶段。然而，现代生态学认为，实际的演替是一个更为动态和复杂的过程，一个系统可能存在多个稳定态。	例如，在某些气候条件下，一片成熟的常绿阔叶林可能被认为是顶极群落。在这个阶段，群落中的物种组成相对稳定，生物多样性达到较高水平。但重要的是，“顶极”并非永恒不变，干扰（如火灾、人类活动）随时可能使其重回早期阶段。
干扰 (Disturbance)	指外部事件（如火灾、风暴、洪水、病虫害爆发）或人为活动（如砍伐、农业开垦）对生态系统造成的突然改变，它们可以打断演替的进程，使其停留在某个中间阶段或重新开始。	解释为什么生态系统会保持动态变化。例如，森林火灾会烧毁现有植被，导致演替从头开始；台风可能会吹倒大量树木，为新的物种创造生长空间。适度的干扰有时是维持生态系统多样性的关键。

种内竞争：同物种之内

当资源充足时，种群可能会呈指数或几何级数增长（J形曲线）



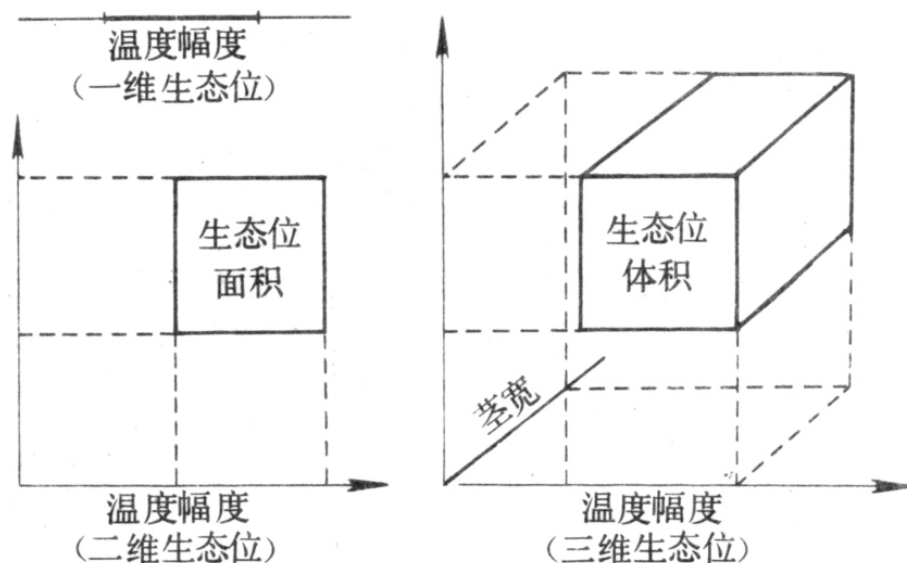
当伴随着种群数量的增长，个体之间对资源的竞争、冲突加剧，疾病的传染率和死亡率可能会变高（S形曲线）



我们可以通过简单的数学模型来模拟这两种物种增长的模式；背后的假设是种群密度的增长是否会影响这个种群的出生率或死亡率。

种间竞争：物种之间

生态位 Ecological Niche



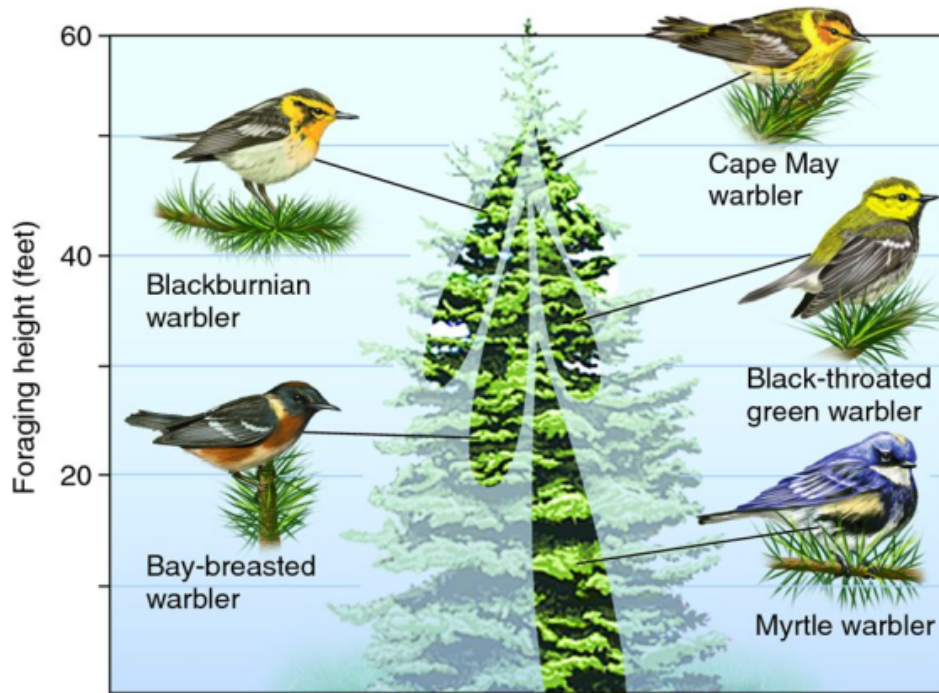
来源: [智汇三农](#)

哈钦森 (Hutchinson) 的多维超体积生态位模型中, **限制性资源** 构成生态位的关键坐标轴。物种需在资源维度上占据特定区间 (如温度适应性、营养摄取范围), 资源重叠度直接决定种间竞争强度。

竞争排斥 Competitive Exclusion

苏联生态学家格奥尔基·弗朗采维奇·高斯 (Georgii Frantsevich Gause) 于 1934 年首次提出该假设。其基本内容是在稳定的环境中, 生态位相同的物种不可能长期共存。即 **生态位重叠**: 在特定生态系统中, 两个或多个物种在资源利用上存在重叠, 即它们共享相同的生态位。这种重叠越大, 竞争越激烈。高斯认为如果一个物种在资源竞争中处于劣势, 最终会被排斥甚至灭绝。高斯通过草履虫实验来说明这一原理。实验中, 当大草履虫和双小核草履虫被放在一起培养时, 大草履虫最终会消失; 而大草履虫与袋状草履虫则可以共存, 因为它们的生态位不完全重叠。但罗伯特·麦克阿瑟的发现影响了“生态位重叠”就一定会导致竞争排斥的这一理论发展。因为除了竞争排斥, 也可能导致生态位分化。

生态位分化 Niche Partitioning



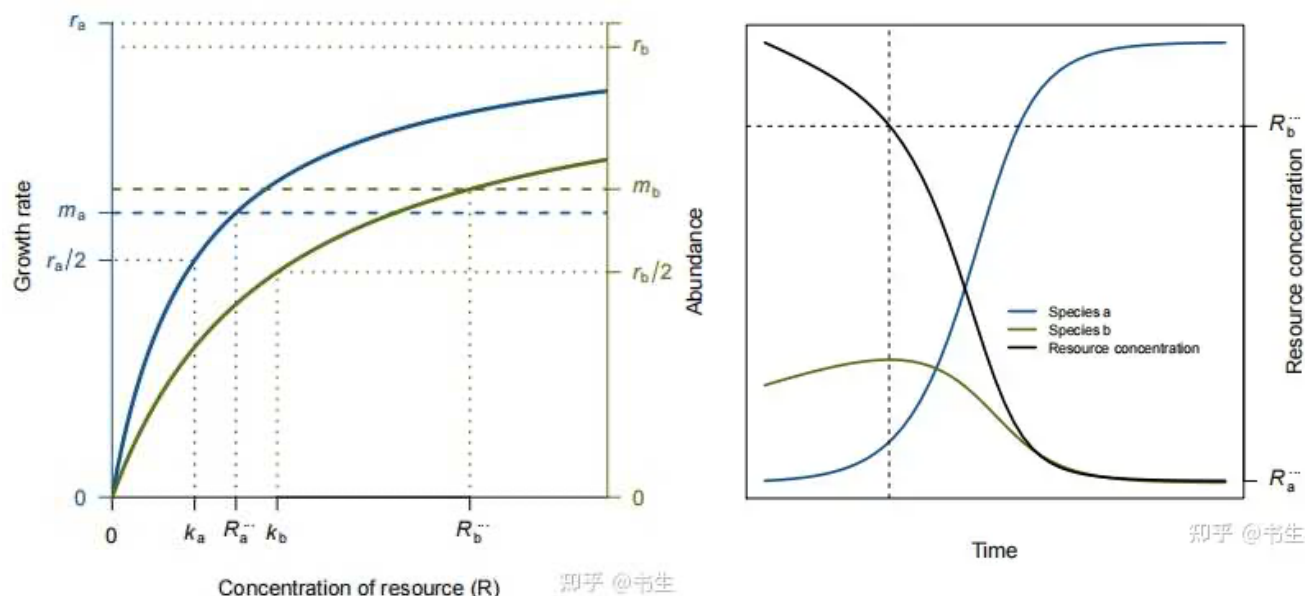
The McArthur Warblers. 麦克阿瑟的林莺。

罗伯特·麦克阿瑟发现有五种林莺生活在同样的云杉森林里。它们都需要觅食且食物类似，那为什么它们不会发生竞争排斥（competitive exclusion）？

具体来说，如果几种林莺生活在同一生境中，体型大小相似，且食物来源相同，它们之间的生态位就会发生重叠，理论上会因为资源竞争而难以共存。然而，尽管存在生态位重叠，这五种林莺不仅能够共存，还能进行杂交，这说明实际生态位可能比理论上的更为复杂。生态位重叠并不必然导致物种间的激烈竞争，资源的丰富性、行为的调整以及生态位的分化等因素都可能使物种在重叠的生态位中找到共存的方式。

或者某种意义上说，这代表着原本重叠的生态位空间增添了新的维度——比如行为的维度，资源的空间而不只是数量的维度。这些向高维拓展之后的生态位重叠会降低，也从而使物种更容易共存。

限制性资源竞争理论 (R*竞争)



物种 a 的死亡率为 m_a , 增长率 r_a 随着 x 轴资源的浓度而变化。物种 b 同理。已知当增长率 $>$ 死亡率时, 物种 a 种群会增长; 反之种群会减少。当两者相等时, 物种的种群密度不随时间而改变 (平衡)。当 a 和 b 都位于同一个资源环境中, 当资源下降到 R_b 时, b 还勉强能增长率与死亡率持平, 但是物种 a 的死亡率持平不变, 生长率还是高于 b 的; 当资源继续下降到 R_a 时, b 的死亡率高于 b 的出生率, a 就会完全竞争排斥掉 b。所以在这个图上, 我们看到当物种 a 与 b 依赖同一种限制性资源 R 的时候, a 能忍受的最低限度资源量为 R_a , 而 b 能忍受的最低限度资源量为 R_b , 且 $R_a < R_b$, 所以 a 比 b 能忍受资源的限制, 因此会最终在竞争中胜出。

植被演替

植被演替是 R* 竞争模型的一个很经典的例子。光也是一种限制性资源, 尤其是在植被生长旺盛的森林。光补偿点是指植物在光合作用制造的有机物质与呼吸作用消耗的有机物质达到平衡时的光照强度。此时, 植物的光合作用速率等于呼吸作用速率, 有机物的积累为零。简单来说, 光补偿点就是植物既不积累也不消耗有机物质时的光照强度。如果光照强度低于光补偿点, 植物的呼吸作用会超过光合作用, 导致有机物消耗, 甚至可能造成植物死亡。所以当光照低于一种植物的光补偿点之后, 该植物如果不能及时响应, 或者长时间得不到光照, 就会死亡。光的竞争是一种 **不对称的竞争**——因为长得高不仅能获取更多光线, 还能遮挡其他植物本来能获取到的光线。所以在越高、枝叶越密集地产生荫蔽的树下, 只有能适应低光、光补偿点低的植物能够活下来。

演替又分为初生和次生演替；初生演替是从裸岩开始风化产生土壤，从苔藓、蕨类、地衣等植物慢慢演变为有垂直结构的植物群落；而次生演替则是指一个已经有成熟结构的植物群落被干扰后（已经发育出土壤）再次发展群落物种组成的过程。所以演替就是指植物群落的物种构成随时间变化的过程。[下图](#)中的从弃耕的耕地中发展出的森林就是次生演替的例子。



限制性资源驱动演替： 植被演替的过程往往受到限制性资源变化的驱动。例如，在裸岩开始的初生演替中，最初的限制性资源可能是土壤和水分。先锋植物（如地衣和苔藓）通过分解岩石形成土壤，并积累有机质，从而改善环境，为后续植物的定居创造条件。

种间交互塑造演替： 随着环境的改变，不同物种的竞争能力发生变化，导致物种组成发生更替。往往是由先锋物种在和环境的交互中塑造对后来种更有利的环境，导致自己在新环境中的适应度下降，从而让位给后来的物种，直至整个系统趋于稳定。

- 对光的竞争： 在森林演替中，早期定居的阳生植物（需要充足阳光才能生长）可能会被后期定居的耐阴植物所取代，因为后者在林冠下也能存活并最终在高度上超越前者，从而获得更多的光照。

- 对水的竞争：在干旱地区的演替中，早期定居的可能是一些耐旱性较差的植物，随着土壤水分保持能力的提高，可能会有更耐旱的植物种类入侵并占据优势。
- 对养分的竞争：在土壤形成初期，先锋种往往是固氮植物（比如豆科的槐树等可以合成氮），而它们使得土壤肥沃之后会被花费更少能量固氮而更多地增加自己资源竞争力的植物所取代。

演替的阶段性的：演替通常经历一系列相对可预测的阶段，从先锋群落到中间群落，最终可能达到一个相对稳定的顶极群落。每个阶段的物种组成和优势种都不同，这反映了不同物种在特定环境条件下的竞争能力和适应性。但是这也是老掉牙的理论；实际的演替比这决定性的理论更为动态和复杂，比如一个系统可能存在多个稳定态；或者一个系统受内力、外力影响停留在非稳定态或中间稳态。

干扰对演替的影响：自然干扰（如火灾、风暴）或人为干扰（如砍伐）可以打断演替的进程，使其停留在某个中间阶段或重新开始。

综上，植被演替是一个由生态位、限制性资源和物种间相互作用共同驱动的动态过程。我们会在课堂上利用一个模拟器（<https://aiyu-zheng.shinyapps.io/ForestCarbon/>）来演示植被演替的过程如何由光竞争和干扰（伐木）推动。

Aiyu Zheng 2025

第六章 植物在空间上的变化规律

核心问题 Key Questions

- 1. 什么是群落？与生态系统的区别是什么？
- 2. 不同的植物群落在空间上的分布有什么规律？
- 3. 这种分布的规律是绝对的吗？

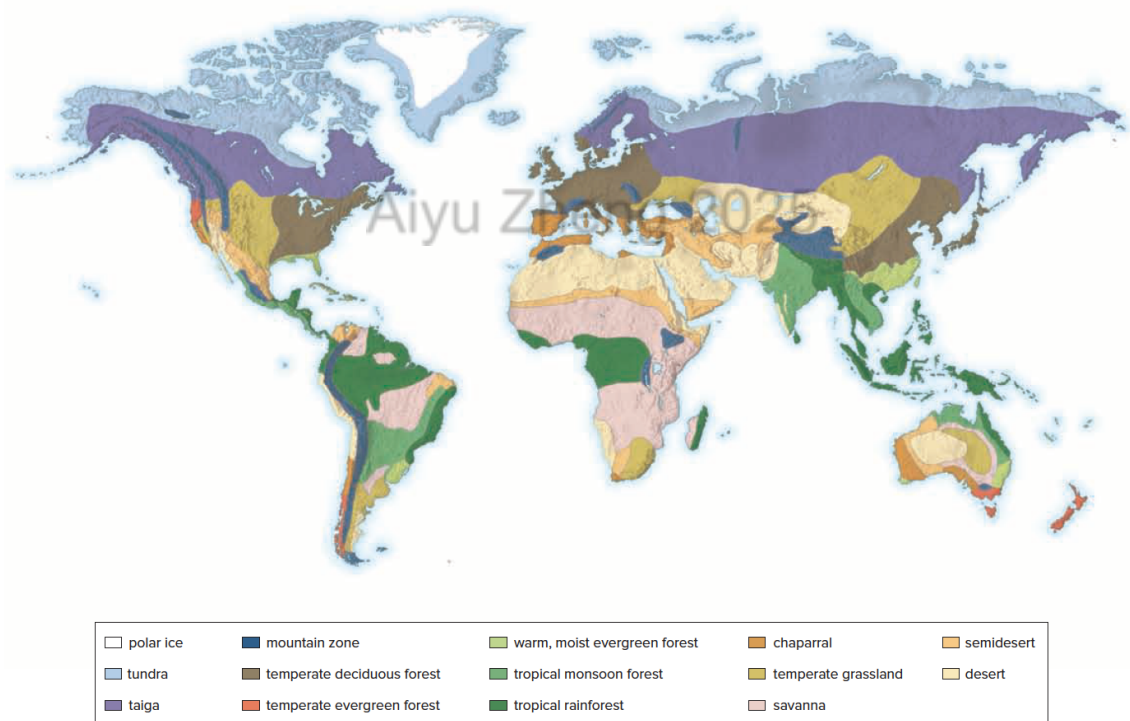
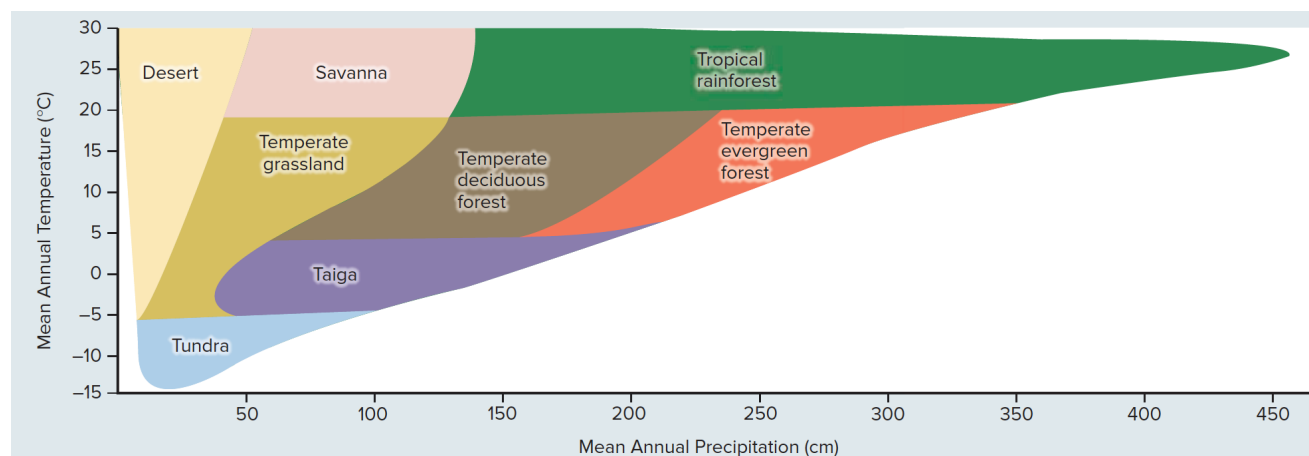
Glossary

术语	释义	课程关联 / 例子
生境（生物群落） Biome	指在全球大尺度上，由相似气候条件（主要是温度和降水）决定的、具有相似植被类型和动物群落特征的生态系统类型。	课程中将通过惠特克图来展示其全球分布。例如：热带雨林、沙漠、草原、温带森林、苔原等。往往我们基于身体对温度和水分的感知，会对一个地区的植被有一定的预判。
惠特克图 Whittaker Diagram	一种二维图表，用年平均温度和年平均降水作为坐标轴，展示了地球上主要陆地生物群落的全球分布格局。	这是理解全球植被格局的宏观框架，将帮助我们理解气候如何塑造地球上的生命图景。
气候带 Climate Zone	地球上根据气候特征（如温度、降水、季节变化等）划分出的区域，每个气候带通常对应着特定的自然植被类型。	这背后的机制主要是不同植物群落中的植物如何组合在一起，长期以来它们又会如何影响该群落气候的形成。比如热带雨林之所以称其为雨林，是因为森林植物的蒸腾作用产生的水分以及温暖的空气形成了高频降雨的必要条件。
微生境 Microhabitat	在一个大的生态系统中，局部范围内具有独特物理和化学条件（如光照、湿度、土壤成分、温度波动）的小型环境，对特定物种的生存和分布有重要影响。	尽管大气候在大尺度上决定了生物群落，但在一个公园内、一个城市、一座山等小尺度空间内，土壤类型、光照强度、地形坡度等微生境因素，以及人造景观（如水池、建筑）都会对植物的分布产生关键影响。
生态过渡带 Ecotone	两种或多种不同生态系统之间的过渡区域，通常表现出物种多样性高、群落结构复杂等特点。	例如，森林与草原的边界（如高山林线）、河流与陆地的交界处（如公园内水体边缘的湿地区域）。这些区域的植被组成往往是相邻群落的混合，显示出植物对微生境变化的敏感性。

新型竞争者 Novel Competitors	气候变化背景下，由于环境条件变化而扩散到新区域，并与当地原有物种形成新的竞争关系的植物或动物。	气候变化可能导致某些植物物种向新的区域扩散，在这些区域它们会遇到并与当地原生物种形成新的竞争关系。这种新的竞争压力可能会改变原有植物群落的结构和组成。
入侵物种 Invasive Species	那些被引入到非原生环境后，能够快速繁殖、扩散，并对本地生态系统、经济或人类健康造成负面影响的物种。	气候变化也可能为入侵物种提供有利条件，使其更容易在新环境中建立并扩散。这些入侵物种往往具有强大的竞争优势，能够排挤本地物种，导致生物多样性下降和群落结构改变。
群落 Community	生态群落是指在同一时间和地点内，所有不同种类的生物种群的集合，它们之间通过捕食、竞争、互利共生等关系互相作用。	植被演替就是推动生态群落结构不断发展的一个例子。群落结构变化是由不同物种之间多种交互形式推动的，比如竞争、共生、寄生、捕食等等。
生态系统 Ecosystem	生态系统是在生态群落的基础上，加入了非生物环境（如阳光、水、土壤、温度等），强调生物与环境的能量与物质交换关系。	生态系统的组织层级其实和群落是类似的，但使用“生态系统”这个术语时往往是为了强调它的系统属性。除了系统的能量和物质交换，有时系统的状态也非常重要。比如同样的生态系统，可能有好几个不同的群落组成都可以成为其稳定时的结构，我们称其为多稳态。

大尺度的规律

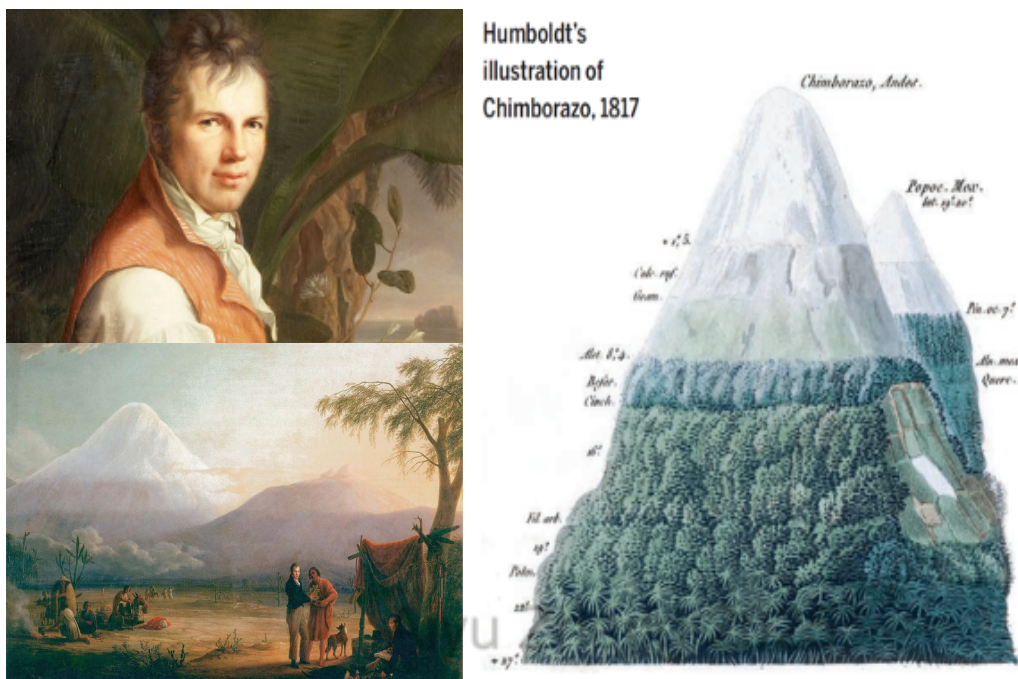
惠特克图 (Whittaker Diagram): 气候塑造生物群落



在全球尺度上，降水和温度这两个关键气候因子决定了地球上主要生境（Biome）的分布。其轴线代表年平均降水和年平均温度，不同区域代表的生物群落类型（例如，热带雨林、沙漠、草原、温带森林、苔原等）。这是一个大尺度、宏观的规律，提供了一个理解全球植被格局的框架。气候带的概念也是类似，是由温度、降水量决定。不同的气候带对应着不同的植被类型。

植物地理学（生物地理学）：biogeography

亚历山大·冯·洪堡（Alexander von Humboldt）开创性地提出了植物垂直带谱系（vertical zonation）的概念，将生态分布与气候、地形联系起来，为生态学、地理学乃至现代环境科学奠定了基础。



小尺度的规律

生态过渡带（Ecotone）

两种或多种不同生态系统之间的过渡区域，通常表现出物种多样性高、群落结构复杂等特点。如森林与草原的边界（高山林线）、河流与陆地的交界处（湿地）。这些区域的植被组成往往是相邻群落的混合，并受小尺度环境梯度（如水分、土壤深度）的强烈影响，显示出植物对微生境的敏感性。

气候变化下的物种扩张与竞争

- 新型竞争者（Novel Competitors）：气候变化可能导致某些植物物种向新的区域扩散，在这些区域它们会遇到并与当地原生物种形成新的竞争关系。这种新的竞争压力可能会改变原有植物群落的结构和组成。
- 入侵物种（Invasive Species）：气候变化也可能为入侵物种提供有利条件，使其更容易在新环境中建立并扩散。这些入侵物种往往具有强大的竞争优势，能够排挤本地物种，导致生物多样性下降和群落结构改变。

第七章 植物和人类共同成就的复杂系统

核心问题 Key Questions

1. 什么是生态系统的临界点 (tipping point) ?
2. 人类活动如何导致双稳态系统的不可逆转变?
3. 人类的社会、经济、政治系统中是否有类似生态系统的不可逆转变?

Glossary

术语	定义	相关例子
双稳态 Bistable State	指生态系统在相似的外部条件下, 可以存在两种不同的稳定状态, 并能通过正反馈机制维持其中一种状态。	热带稀树草原是典型的例子: 在相似降水条件下, 一片区域既可以维持为森林, 也可以维持为稀树草原 (树木的密度可能在“高”的状态和“低”的状态)。
多稳态	指在相同的外部环境条件下, 一个生态系统能够维持两种或两种以上不同的稳定状态。	这比“双稳态”概念更广, 指出了生态系统可能存在多个替代性的稳定平衡点。例如, 在相同气候条件下, 一个区域可能既能维持为森林, 也能维持为稀树草原, 甚至完全的草原 (树木的密度可能在高、低和零的状态)。
正反馈机制 Positive Feedback Mechanism	指系统中某个过程的输出会增强该过程本身的效应, 从而推动系统向某个方向持续发展或维持某种状态。	双稳态的关键。例如: 充足的草本燃料 -> 高频高强度火灾 -> 杀死幼树 -> 维持草原; 茂密的森林冠层 -> 抑制下层草本 -> 减少燃料 -> 降低火灾 -> 维持森林; 森林增加区域湿度 -> 促进降雨/减少径流 -> 有利于森林; 草本蒸腾低 -> 增加径流/蒸发 -> 土壤水分低 -> 不利乔木; 大型草食动物啃食抑制幼树生长 -> 有利草原扩张。
临界点 Tipping Point	指生态系统在外部干扰下, 从一个稳定状态快速且常常不可逆地转变为另一个稳定状态的阈值或转折点。一旦越过此点, 系统将难以恢复到原有状态。	当人类活动 (如大规模砍伐、焚烧、土地利用改变) 达到某个临界阈值时, 会将生态系统从一个稳定状态推向另一个。例如: 湖泊富营养化、珊瑚礁白化。这种转变的“不可逆性”是核心概念, 就像一个球滚入一个有很多深浅不一的凹槽的地形—如果一旦滚入进了非常深的一个凹槽, 需要非常大的外力先将它拉出来, 才能进入另一个凹槽。

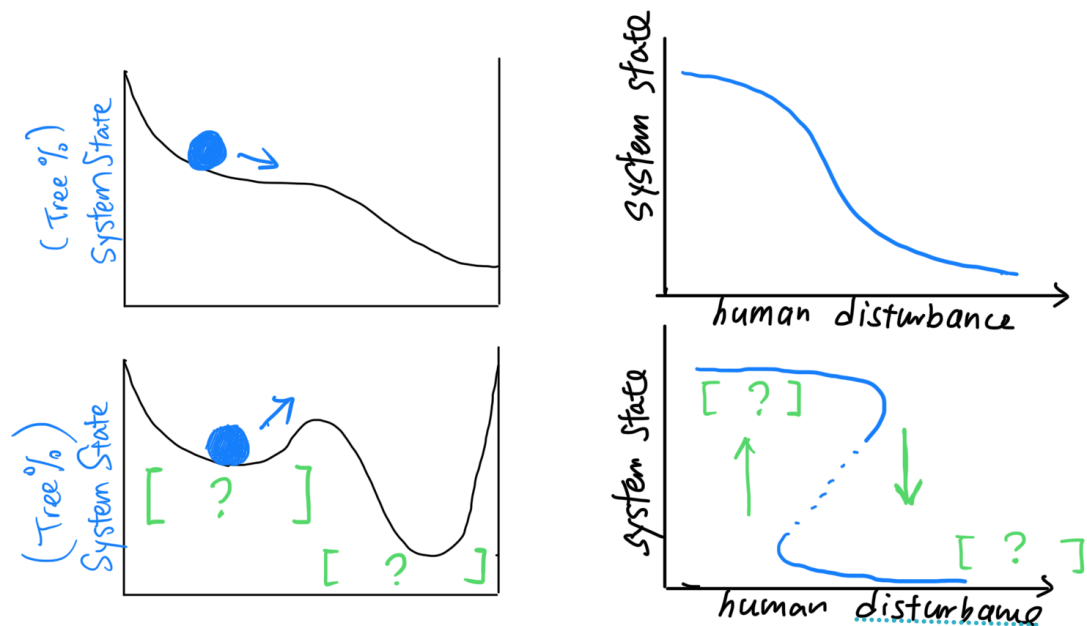
不可逆转变 / 滞后现象 Irreversible Shift/Hysteresis	指生态系统一旦越过临界点转变为新的稳定状态后，即使导致转变的干扰被移除或逆转，系统也很难或不可能自行回到原来的状态。系统对回到原状态的条件会表现出“滞后”效应，需要更大的努力和时间。	强调临界点转变的严重后果。例如，过度捕捞导致渔业崩溃后，即使停止捕捞，鱼群也可能长期无法恢复；森林砍伐导致土壤退化后，即使停止砍伐，森林也难以自然再生。
环境容纳量 (K) Carrying Capacity	特定环境下，某一物种所能长期维持的最大种群规模。当种群数量达到环境容纳量时，其增长率趋于零。	逻辑斯谛增长模型的核心。一片土地上的作物或植物，最终其数量和生物量会受限于该土地所能提供的养分、水、空间等资源。
碳汇 Carbon Sink	任何能够吸收和储存大气中二氧化碳的自然或人工系统。	植物通过光合作用吸收大气中的二氧化碳，并将其存储在生物量中，尤其如热带雨林和高纬度针叶林（冻土）拥有巨大的碳储量。土壤碳固存也是重要方式。森林和其他植被在全球碳循环中扮演关键碳汇角色，是减缓气候变化的重要自然途径。
碳源 Carbon Source	任何向大气中释放二氧化碳的自然或人工系统。	当森林被砍伐、焚烧或退化时，存储在生物量和土壤中的碳会以二氧化碳形式释放回大气，成为碳源。大规模森林火灾也是碳排放的重要来源。植物死亡后的分解过程也会释放碳，但在平衡的生态系统中通常会被新的生长抵消。
基于自然的解决方案 Nature-based Solutions (NbS)	利用自然生态系统的力量来有效和适应性地应对社会挑战，同时提供人类福祉和生物多样性效益的方法。	是应对气候变化、生物多样性丧失、水资源安全等挑战的策略。具体实践包括： - 植树造林/再造林 (Afforestation/Reforestation)：在非森林或退化土地上种植树木，增加碳汇和恢复生态功能。 - 生态系统恢复：恢复湿地、红树林、草原等多种生态系统，增强固碳、防灾等功能。 - 可持续土地管理：如农林复合系统、土壤健康管理等，提升农业生态系统的固碳能力和韧性。
韧性 Resilience	生态系统抵抗干扰并从干扰中恢复到原有状态或功能的能力。	在生态修复中，修复目标之一是提升生态系统的韧性，使其更能抵抗未来干扰。然而，气候变化加剧，使得我们设定的韧性目标是否可行充满挑战，也存

		在基线漂移（我们想要恢复到哪一个历史状态）的问题。
基线漂移 Shifting Baselines	指随着时间推移，人们对于“正常”或“健康”的生态系统状态的认知标准发生变化的现象。	在生态修复中，我们需要思考：我们想要恢复到哪一个“正常”状态？这个“正常”是基于我们当下的经验，还是更遥远的历史基线？这关系到修复目标的设定和实际效果的评估。
环境伦理 Environmental Ethics	探讨人类与自然界之间道德关系的哲学分支，涉及人类对待环境的权利与义务，以及如何平衡人类利益与生态保护的问题。	在生态保护和修复中，常常面临“谁来决定我们该如何保护、保护什么？”的伦理困境。需要讨论如何平衡生态目标与社会公平、经济发展的需求，并强调在地性和参与式管理的重要性。

生态系统的临界转变：

生态系统有时会经历“临界转变”，从一种稳定状态突然跳到另一种稳定状态。这就像一个球在一个碗里滚动，它在一个低点（稳定状态）是稳定的，但如果推得太用力，它会跳到另一个低点。当这种转变发生时，它可能是可逆的（可以回到原来的状态），也可能像疤痕一样是不可逆的（很难或不可能回到原来的状态）。

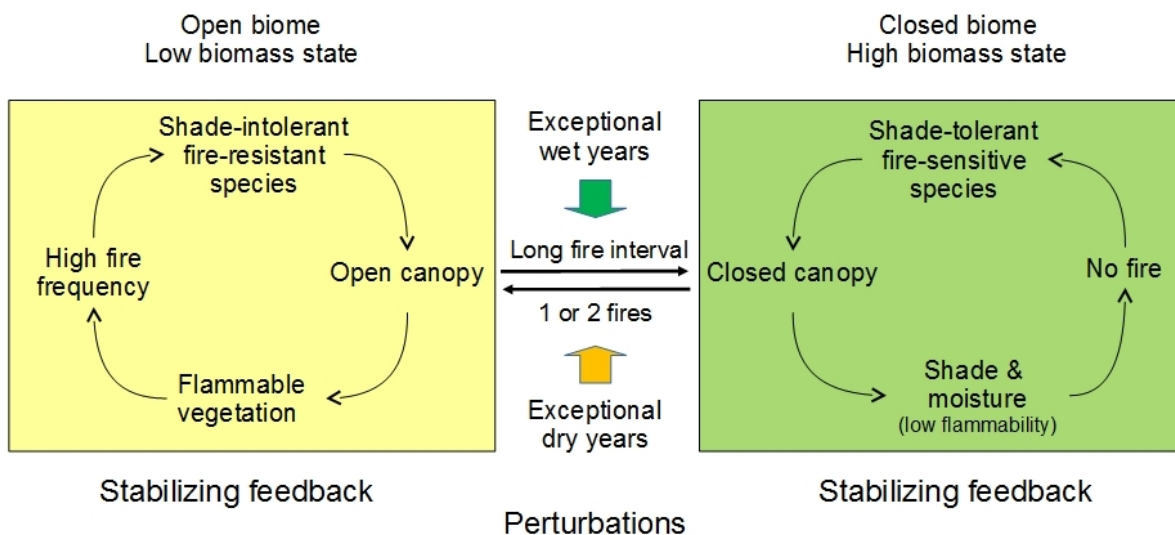
图中的两组图展示了两种理解“临界转变”的方式：左边是吸引盆地图（想象成山谷和山峰），右边是相变图（表示系统状态如何随外部变化而改变）。



左上角的吸引盆地图（单个稳定点） 对应 右边第一张相变图（平滑下降曲线）。这代表可逆转变。系统状态随外部干扰平滑变化，当干扰移除或减弱时，系统可以回到初始状态。左下角的吸引盆地图（两个稳定点） 对应 右边第二张相变图（S形滞后回线）。这

代表不可逆转变（滞后现象）。系统在达到某个临界点后会突然跳变到另一个状态，即使外部干扰参数逆转，系统也无法轻易回到原来的状态。

双稳态/多稳态系统：



出处: <https://jgpausas.blogs.uv.es/2020/01/08/alternative-biome-states/>

非洲的萨瓦纳稀树草原生态系统是一个经典的双稳态系统。

- 森林状态 (Forest State): 以高密度乔木为主导的植被类型，林冠郁闭，下层草本植物相对稀少。
- 草地状态 (Grassland State) 或 荒漠/半荒漠草地 (Arid Grassland/Desert State): 以草本植物为主导，乔木或灌木极为稀少甚至没有。
- 图中没有展示出的还有两者中间的过渡状态，稀树草原状态 (Savanna State): 乔木与草本植物共存的混合型植被，乔木分布较为稀疏，下层有茂盛的草本层。

这些稳态是怎么维系自身稳定的？主要通过正反馈机制来维系自身的稳定。

- 森林状态的维持：
 - 火灾抑制反馈： 茂密的森林冠层遮蔽地面，抑制下层草本植物生长，减少了可燃物，从而降低了火灾的发生频率和强度。低火灾风险使得幼树能够存活并长大，进一步巩固了森林结构。
 - 水文反馈： 森林树木通常拥有深根系统，能够吸收深层土壤水分。树冠的蒸腾作用也可能促进局地降水或增加大气湿度，从而有利于森林自身的维持。

- 光照抑制：郁闭的林冠减少了地表光照，不利于喜光草本植物的生长，进一步减少了火灾燃料。
- 稀树草原/草地状态的维持：
 - 火灾驱动反馈：茂盛的草本层提供了充足且连续的燃料。高频率、高强度的火灾能够杀死乔木幼苗或损害成年乔木，阻止森林的侵占，从而维持草本植物的优势。
 - 水文反馈：草本植物根系通常较浅，主要利用表层土壤水分。地表蒸发和径流可能较高，使得深层土壤水分相对缺乏，不利于深根乔木的生长。
 - （图中没有写到）草食动物反馈：大型草食动物（如大象、羚羊）的啃食和践踏会抑制乔木幼苗的生长，同时促进草本植物的繁衍，进一步巩固了稀树草原/草地状态。

这些稳态在什么样的情况下能够彼此转换？

稳态之间的转换（也称为状态转换或相变）通常发生在外部驱动力（如气候变化、人类活动）或干扰机制的强度跨越了某个临界阈值时。这些临界阈值决定了系统从一个吸引盆地跳跃到另一个吸引盆地。

主要的转换条件包括（1）降水（2）干旱。长期持续的降水显著增加，且火灾和草食动物影响减弱，可能使乔木幼苗得以生长，逐渐形成森林。长期持续的干旱或降水减少，导致水分胁迫加剧，乔木死亡，为草本植物生长创造条件。除了图上描述的，还有人为火灾的变化：长期的人为火灾抑制或自然火灾频率/强度的显著降低，允许乔木幼苗存活并生长，导致森林入侵。这在许多地区的“林木侵占”（woody encroachment）现象中可见。或是极端干旱导致的森林火灾强度和频率的异常增加，足以摧毁现有森林，使其退化为以草本为主的稀树草原或草地。还有草食动物密度和行为变化（放牧）：大型草食动物数量的急剧增加和高强度取食，可能通过啃食幼树、剥皮等方式，将林地或稀树草原转化为更为开阔的草地。而长期缺乏草食动物的控制，可能使得乔木幼苗免受侵害，促进林木密度增加。

简而言之，当影响正反馈机制的外部条件（如降水、火灾、生物扰动）发生足够大的变化，并越过某个非线性的阈值时，系统就会从一个稳定状态迅速转换到另一个稳定状态。

第八课 我们体验的植物世界与未来

辩论活动

总时长：40 分钟

辩题：基于植物碳汇的碳交易是否是有效的减排手段？

队伍：正方（支持观点） vs. 反方（反对观点或强调其重大局限性）

第一部分：开场立论（共 10 分钟）

讲师开场与规则重申（3 分钟）：讲师介绍辩论主题、正反方，强调辩论规则（时间控制、尊重对手等）。提醒学生运用课堂所学知识，特别是结合小组作业 2 和 3 的内容。

- 正方一辩立论（3 分钟）：清晰阐述正方观点（基于植物碳汇的碳交易是有效的减排手段）。提出支持本方观点的核心论点和主要证据。
- 反方一辩立论（3 分钟）：清晰阐述反方观点（基于植物碳汇的碳交易并非有效或存在重大局限性）。提出支持本方观点的核心论点和主要证据。

第二部分：自由辩论（共 18 分钟）

双方交锋（18 分钟）：

- 这是辩论的核心环节，双方辩手可以自由提问、反驳对方观点、补充己方论点。
- 讲师需严格控制时间，并确保双方都有发言机会，避免一方长时间主导。
- 鼓励辩手引用数据、案例（如碳汇时效性、额外性、泄漏效应等），并结合生态演替、临界转变、社会公平等多个维度进行论证。

第三部分：驳论与总结（共 12 分钟）

- 反方二辩驳论（4 分钟）：针对正方在立论和自由辩论中提出的主要论点进行集中反驳，指出其逻辑漏洞或证据不足之处。可以补充己方论点，但主要侧重于“驳”。
- 正方二辩驳论（4 分钟）：针对反方在立论和自由辩论中提出的主要论点进行集中反驳，指出其逻辑漏洞或证据不足之处。可以补充己方论点，但主要侧重于“驳”。
- 反方三辩总结陈词（2 分钟）：对本方观点进行总结和升华，重申本方最核心的论点。无需提出新论点。
- 正方三辩总结陈词（2 分钟）：对本方观点进行总结和升华，重申本方最核心的论点。无需提出新论点。

评选最佳辩手及颁奖流程

在辩论赛的 40 分钟结束后，进入 10 分钟的休息。休息时可以请全班以匿名投票方式选出正反方的最佳辩手。请大家综合考量辩手的逻辑性、表达清晰度、论证力量和现场反应等因素，在小纸条上写下认为表现最佳的正方辩手名字和反方辩手名字各一位。讲师利用休息时间统计结果。

休息结束后，进入 25 分钟的总结环节。

- 辩论总结与反思（约 10 分钟）
 - 讲师引导： 提问学生对双方论点和论证的看法，有哪些论点让你印象深刻？哪些地方可以再深入？（引导学生思考论证的严谨性，而非评判输赢）。
 - 讲师梳理： 总结双方提出的主要论点、优势和潜在挑战。强调一个复杂议题往往没有绝对的黑白对错，需要综合权衡。
- 全课程回顾与核心概念串联（约 15 分钟）
 - 讲师引导： 回顾本课程的整体目标和所有关键概念。
 - 总结与展望： 强调课程主题，并鼓励学生未来的思考。
- 最佳辩手表彰与参与奖颁发（约 2-3 分钟，放在最后）；每位学生选择的植物构成的植物宇宙回顾与展示

Aiyu Zheng 2025

正方提示单：支持“基于植物碳汇的碳交易是有效的减排手段”

核心观点：基于植物碳汇的碳交易是一种有效且必要的减排手段，它提供了重要的经济激励，能够大规模促进碳移除，并带来多重生态和经济效益。

你可以从以下角度思考和论证：

1. 巨大的自然固碳潜力：植物的生物学基础
2. 规模效益：通过植树造林和再造林项目，理论上可以实现大规模的碳汇能力。
3. 可操作性：相较于复杂的工程固碳技术，植树造林在许多地区具有更高的可操作性和推广性。
4. 经济激励与市场机制的积极作用。
5. 多重生态系统协同效益（Co-benefits）：生态系统服务价值；基于自然的解决方案（NbS）；等等。

要留意反方可能驳斥你方的方面：

1. 标准和监管：碳交易中存在的“时效性”和“额外性”等问题，碳汇的真实性和持久性。
2. 风险评估：火灾、病虫害、气候变化、人为管理的风险。
3. 生物多样性恢复的同时也会有一些限制；我们提到的社会公平和环境正义问题

反方提示单：支持“基于植物碳汇的碳交易不是有效的减排手段”

核心观点：基于植物碳汇的碳交易存在根本性、难以克服的局限性和风险，其在实际减排效果上可能被夸大，甚至可能带来负面生态和社会影响，并非解决气候危机的有效或公平手段。

你可以从以下角度思考和论证：

1. 碳汇的“时效性”和“不可逆转”问题：结合作业2和小组作业3（关于演替和临界转变的图）
2. 不可逆的临界转变：一旦生态系统因人类活动越过不可逆转的临界点…
3. 碳汇的永久性难以保证，极强的不确定性
4. 额外性争议与泄漏效应
5. “漂绿”和责任转移的风险：碳交易可能让高排放企业通过购买碳信用来“漂绿”其环境记录，而非真正投资于自身产业链的深度减排技术和转型，延缓了根本性减排的紧迫性，将减排责任从主要排放者转移到发展中国家的土地上。

要留意正方可能驳斥你方的方面：

1. 植物本身就是天然的碳汇，但注意这是有条件的，面对紧迫的危机我们需要一切有用的方案
2. 碳交易的核心是为森林保护和恢复提供急需的资金，这些资金如果没有碳市场可能难以获得。
3. 碳交易市场体系仍然在发展、完善当中