

群落演替模拟:干旱生存

摘要: 植物群落的物种丰富度对其抗旱能力有重要影响。我们从生态位的角度,模拟干旱条件下植物群落演替,分析各种因素的影响。

首先,建立了基于生态位理论的植物群落演替模型,模拟干旱条件下的群落演替。该模型将生态位宽度的变化作为模拟群落演替的指标,利用竞争矩阵来描述物种间的相互作用,包括竞争和促进。然后,综合考虑繁殖、死亡和不确定性等因素的影响,建立生态位宽度模型。其中,繁殖取决于干旱程度、生态位宽度、种间关系和环境容量,而死亡率则取决于干旱程度和生态位宽度。不确定度用高斯白噪声测量。

基于Beverton-Holt方程和Lotka-Volterra方程,建立了生态位宽度微分方程模型。为了解释各种不规则的天气周期,我们利用服从正态分布的随机变量来模拟干旱的程度和持续时间。作为一个案例研究,我们模拟了一个三物种群落的进化,并得出结论:群落的总生态位宽度增加,表明长期生存。为了研究物种数量对群落动态的影响,我们利用植物群落进化模型分别模拟了包含1~4种物种的群落。结果表明,群落需要3个物种才能受益。此外,随着物种数量的增加,抗旱性会提高,然后趋于稳定。

基于竞争矩阵,我们建立了三个不同的群落,并通过模拟讨论了它们的抗旱性。可以得出结论,以促进为主导的关系增强了抗旱性,增加了群落的生存时间。此外,我们改变了干旱的频率和强度,然后得出结论,在严重干旱期间更容易发生物种灭绝。污染和栖息地萎缩影响植物群落的生态位宽度和竞争关系。因此,我们相应地调整了生态位宽度和竞争矩阵。结果表明,污染和生境萎缩可能导致某些物种的灭绝。最后,基于各种因素的影响,我们提出了一些保证植物群落长期生存能力的措施。此外,我们还分析了保护脆弱群落对生态系统整体健康的重要性。

关键词:群落演替;抗旱性;生态位宽度;人口的相互作用;Beverton-Holt方程

目录

1 介绍 3

 1.1 背景3

 1.2 问题的重述 3

 1.3 本文内容3

2 符号和假设 4

 2.1 符号4

 2.2 假设5

3 植物群落进化模型 5

 3.1 模型概述5

 3.2 物种的初始条件和生态位特征6

 3.3 植物群落进化规律7

 3.3.1 物种繁殖对生态位宽度的影响7

 3.3.2 物种死亡率对生态位宽度的影响 8

 3.4 不规则天气周期 9

 3.5 植物群落进化模拟 9

 3.5.1 植物种类和初始参数9

 3.5.2 不规则天气模拟 10

 3.5.3 物种进化模拟结果 11

4 植物群落进化模型的应用 13

 4.1 物种数量对群落的影响 13

 4.1.1 群落受益的最小物种数量 13

 4.1.2 物种数量增加对群落的影响14

 4.2 物种类型对群落进化的影响 15

 4.3 干旱严重程度的影响 16

 4.4 污染和栖息地减少的影响 16

 4.5 延长植物群落寿命的措施 17

5 敏感性分析 18

 5.1 对不可预知因素的敏感性 18

 5.2 对干旱系数的敏感性 18

6 优势与劣势 19

 6.1 优势19

 6.2 缺点19

7 结论 19

参考文献。 19

1 介绍

1.1 背景

不同物种的植物具有不同的敏感性和抗旱能力[1]。大量观察表明，植物群落的物种丰富度会显著影响其长期适应缺水的能力[2]。物种数量较多的群落在后代中对于干旱胁迫表现出更高的抵抗力，而物种较少的群落则表现出较低的抵抗力。因此，分析植物群落中干旱适应性与物种数量之间的关系对于植物群落的长期生存至关重要。

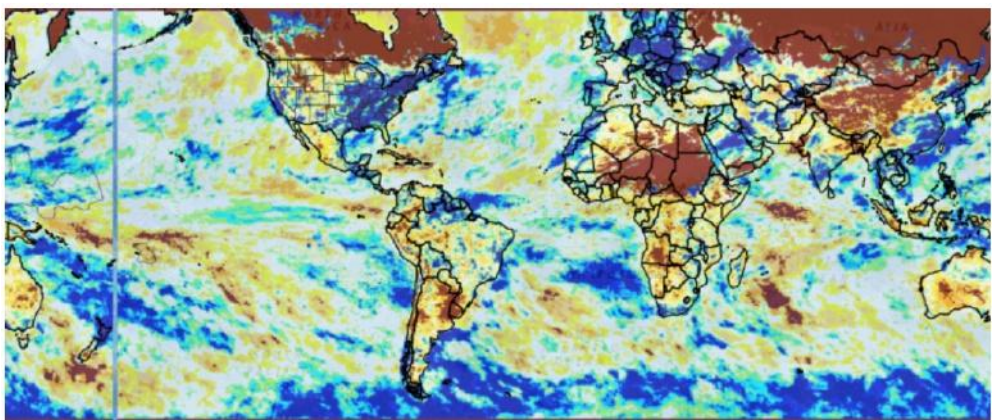


图 1:来自 NIDIS 的世界干旱情况

1.2 问题的重述

- 建立一个模型来预测各种不规则天气周期下植物群落的进化，并考虑物种之间的相互作用。
- 确定群落受益所需的最小物种数量，以及物种数量增加对群落的影响。
- 分析物种类型对群落进化的影响
- 讨论干旱的频率和宽度的增加或减少的影响。
- 分析污染和栖息地减少等其他因素对模型的影响
- 根据模型，确定应该如何确保群落的长期生存能力
- 确定植物群落及其对大环境的影响。

1.3 本文内容

总结全文，本文做了以下工作：

- 开发一个考虑不确定天气周期的生态位模型来模拟植物群落的进化。该模型基于种间竞争解释物种相互作用和演替过程，并建立竞争矩阵来描述群落内的种群相互作用。
- 使用该模型确定群落从增加的物种数量中受益所需的最小物种数量。该模型使用基于 Beverton-Holt 和 Lotka-Volterra 方程的微分方程，考虑了不确定干旱条件下每个种群的生态位宽度。
- 分析不同物种类型对群落进化的影响。该模型表明，不同类型的种群具有不同的相互作用，互惠共生可能导致更强的抗旱性。然而，在严重和长期干旱期间，竞争优势可能导致种群灭绝，降低物种丰富度和群落稳定性。
- 利用该模型研究不同干旱周期对群落进化的影响。分析表明，频繁和持续时间长的干旱可能对种群产生负面影响，而不太频繁的干旱可能使种群更能适应干旱环境。
- 讨论污染和栖息地减少等其他因素对群落进化的影响。该模型设置污染和栖息地减少系数来影响生态位宽度和物种相互作用，从而影响群落演替。污染和栖息地减少增加了竞争，允许更具竞争力的种群占据资源，但可能导致物种灭绝，影响群落稳定。

•提出措施，确保植物群落的长期生存能力及其对更大环境的影响。增加一个群落的物种数量可能会提高干旱适应能力，但必须与避免竞争、确保互惠、减少环境污染和栖息地减少相平衡，以确保群落稳定和长期生存能力。

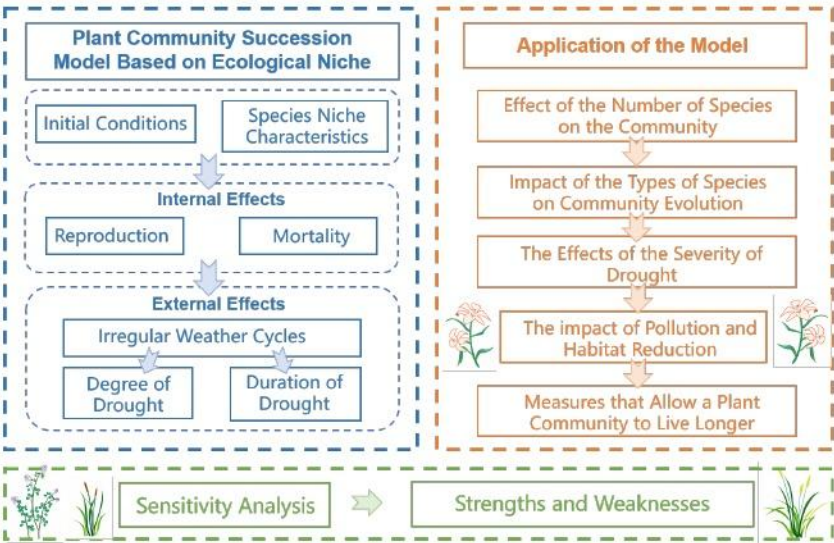


图 2:工作流程图

2 符号和假设

2.1 符号

Symbols	Description
C	Competition matrix of species
L	Niche width of species
Γ	Species' sensitivity to drought
$l_i(t)$	Niche width of the i -th species at time t
$b_i(t)$	Increase in niche width of the i -th species due to its reproduction
$d_i(t)$	fraction of niche width of the i -th species reduced by death
$\sigma_i(t)$	Gaussian white noise for unpredictability
$K(t)$	Niche width of a community at time t
g_i	Growth rate of the i -th species under no competition condition
dr	Drought coefficient that describes the extent of the drought
$f(dr)$	Drought response function that impact death rate
t_{INR}	Time interval until the next drought
t_d	Duration of the drought

2.2 假设

为了简化问题并方便我们模拟现实生活条件，我们做了以下基本假设，每个假设都是合理的。

- 假设 1:植物群落的物种数量不会增加。理由:我们假设一个封闭的系统，没有新物种被引入，也不能在植物群落中定居。
- 假设 2:物种不会突变，但种群及其控制的资源会随着时间而变化。
理由:研究的时间尺度相对较短，可能导致生态变化的基因变化和突变被假设为可以忽略不计。
- 假设 3:群落中物种之间的竞争或互利关系保持不变。
理由:群落中物种之间的相互作用是复杂的，并且可能因各种因素而随时间变化。这是为了简化模型，重点关注干旱对群落结构的影响。
- 假设 4:群落中各物种的干旱敏感系数是固定的，不随时间和空间变化。
理由:为了使模型简单易懂，为每个物种通常被视为不变量，可以帮助我们更好地理解物种之间的相互作用以及干旱事件对群落结构的影响。

3 植物群落进化模型

生态位是指一个物种在考虑时间和空间的情况下，就其与相关物种的功能关系和角色而言，在群落中的位置。生态位宽度是生物利用资源多样性的一个指标[3]。一个物种的生态位宽度越宽，其特化程度越低，对环境的适应能力越强。

3.1 模型概述

生态位模型描述了基于种间相互作用的植物群落进化[4]。根据生态位模型，每个物种占据一个特定的生态位，具有特定的资源利用策略和环境适应性。该模型通过资源竞争与合作考虑物种间的相互作用。

生态位模型模拟植物群落进化的基本步骤如下。

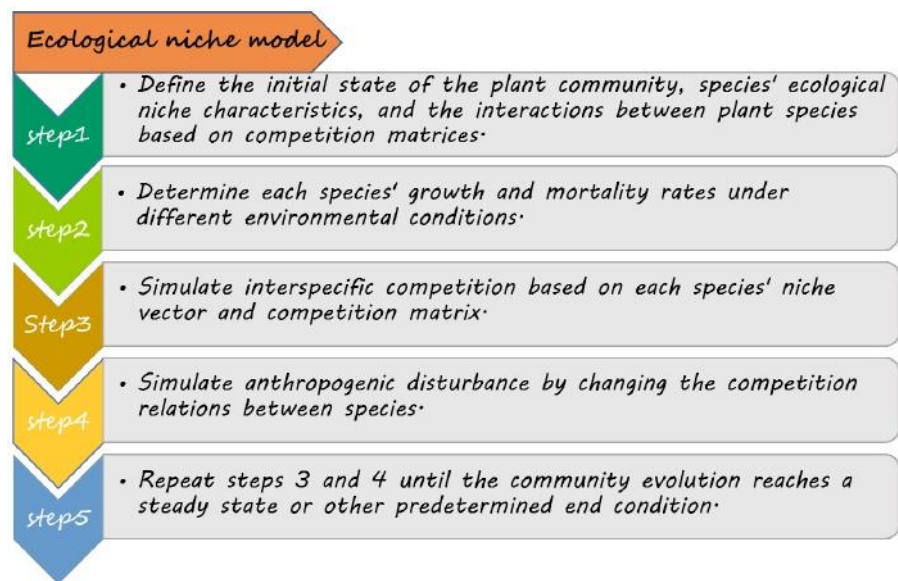


图 3:生态位模型的步骤
基于生态位模式的社区演化过程如图 4 所示。

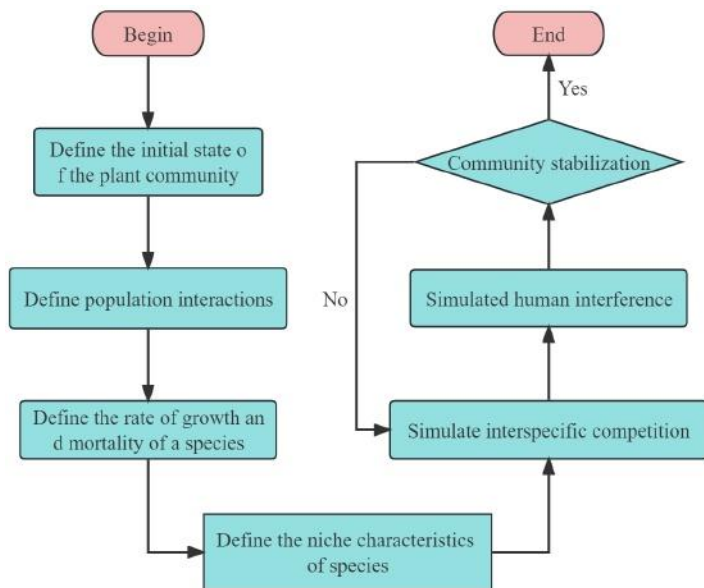


图 4:社区的演化过程

3.2 物种的初始条件和生态位特征

在群落演替的初始时刻，有 m 个物种，环境容量为 k 。环境容量是给定环境所能容忍的最大种群数量。

干旱敏感系数是植物物种对于干旱敏感性的常用指标。该系数通常为 0 到 1 之间的值，值越高表示对于干旱的敏感性越高。

一个群落对于干旱的敏感性可以用以下向量来表示：

$$\Gamma = [\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_m] \quad (1)$$

式中 γ_i 为第 i 个物种的干旱敏感系数。

在生态位模型中，竞争矩阵是描述不同物种之间竞争互利关系的矩阵[5]，表示为：

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & \cdots & c_{mm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中表示 c_{ij} 第 i 个物种与第 j 个物种之间的竞争系数。

当 $c_{ij} = 0$ 时，两个物种之间不存在竞争。 $c_{ij} > 0$ 表示第 i 个物种损害了第 j 个物种的生存和繁殖，即竞争。相比之下， $c_{ij} < 0$ 表示第 i 个物种正向影响第 j 个物种的存在和繁殖，即共生或互惠。竞争系数绝对值越大，说明竞争关系或互利关系越强。

竞争矩阵通常需要根据实验数据、生态调查数据，或其他相关数据和知识来估算。考虑到物种之间的竞争是双向的、相互影响的，所以竞争矩阵通常是对称的，即 $c_{ij} = c_{ji}$ 。

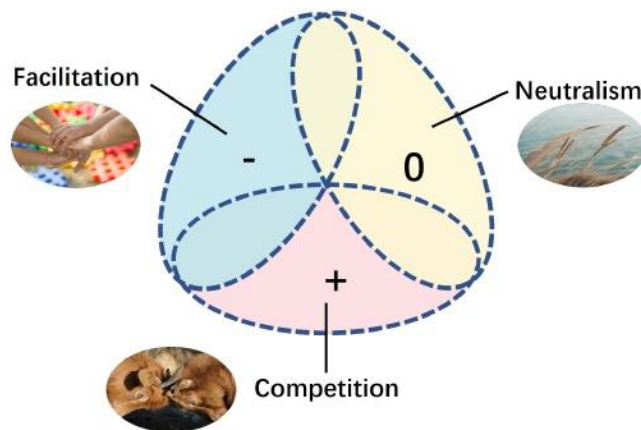


图 5:物种竞争示意图

在生态学中，生态位是指物种在其生态系统中的功能和作用。它指的是物种在生态系统中的位置，它利用资源的方式，以及物种与周围环境之间的相互作用。

生态位宽度是指生物可以利用的各种资源的总和，是生物利用资源多样性的一个指标。设一个群落的生态位宽度为:

$$L = [l_1, l_2, \dots, l_m] \quad (3)$$

其中， l_i 表示第 i 个物种使用的资源的总和。 L 值越大，表示该物种可以利用的资源越多。考虑到群落的扩展，各物种的生态位 K 之和可以在特定范围内发生变化。

$$K(t) = \sum_{i=1}^m l_i(t) \quad (4)$$

3.3 植物群落进化规律

生态位宽度受种群个体死亡数量和繁殖数量的影响。为了更准确地模拟气候不稳定和干旱对植物群落进化的影响，在生态位模型中加入了一个随机扰动项。生态位模型如图所示下图:

$$l_i(t+1) = l_i(t) + b_i(t) - d_i(t) + \sigma_i(t) \quad (5)$$

- $l_i(t)$ 为第 i 个物种在 t 时刻的生态位宽度;
- $b_i(t)$ 为第 i 个物种由于繁殖而增加的生态位宽度;
- $d_i(t)$ 为第 i 个物种因死亡而减少的生态位宽度占比;
- $\sigma_i(t)$ 为高斯白噪声，均值为 0，方差为 σ^2 。

值得注意的是，在实践中，我们需要对随机干扰项进行适当的调整，以确保它不会对模拟结果产生过大的影响。此外，模型需要进行敏感性分析和验证，以确保其可靠性和可重复性。

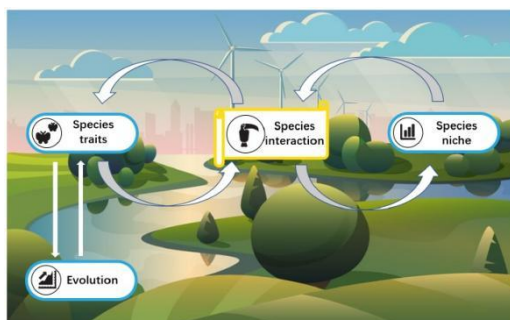


图 6:物种相互作用与群落进化

3.3.1 物种繁殖对生态位宽度的影响

在本文中，每个物种因繁殖而增加的生态位宽度受到当前生态位宽度、环境容量和种间竞争的影响。一个物种的当前生态位宽度或环境容量越大，其繁殖越多，其生态位宽度的增加也越多。反之，物种间的竞争越大，它繁殖的就越少，它们增加的生态位宽度也就越少。因此，根据 Beverton-Holt[6]方程和 Lotka-Volterra 方程[7][8]得到 $b_i(t)$ 的表达式如下

$$b_i(t) = g_i l_i(t) \left(1 - \frac{l_i(t) + \sum_{j=1}^{j \neq i} c_{ij} l_j(t)}{K(t)} \right) \quad (6)$$

其中， g_i 表示 i 第 i 个物种的非竞争性增长率，只受环境条件的影响。环境条件越适合该物种， g_i 就越大。

在干旱环境条件下，植物的水资源减少，生长速度也相应降低。一个物种对于干旱越敏感，在干旱条件下其生长速度就越低。干旱敏感系数不是静态的，而是随着干旱条件的变化而变化。物种的非竞争性生长率为

$$g_i = g_{max} e^{-dr \times \gamma} \quad (7)$$

其中 dr 为衡量干旱程度的干旱系数， γ 为第 i 个物种的干旱敏感系数， g_{max} 为它的最大增长率。

3.3.2 物种死亡率对生态位宽度的影响

物种死亡导致的生态位宽度减小与物种的生态位宽度成正比。考虑到干旱时植物的死亡率增加，一个干旱响应函数 $f(dr)$ 是物种对于干旱程度的响应函数。该函数可以模拟干旱对植物群落的不利影响。因此，得到 $d_i(t)$ 的表达式如下：

$$d_i(t) = f(dr) \beta_i l_i(t) \quad (8)$$

式中 $f(dr)$ 表示因干旱导致的物种死亡率 i ， β 表示比例系数。

干旱程度越大，植物物种的死亡率越大。当干旱程度较小时，物种死亡率处于较低水平且变化不大的环境适合植物生长。但是，当干旱严重时，环境就很恶劣。因此，植物的死亡率会处于很高的水平。因此，可以根据 Logistic 函数确定 $f(dr)$ 。

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (9)$$

设 $x = 12(dr - 0.5)$ ，即将 dr 从 $[0,1]$ 映射到 $[-6,6]$ 。

$$f(dr) = \frac{1}{1 + e^{-12(dr - 0.5)}} \quad (10)$$

函数 $f(dr)$ 的图像如下：

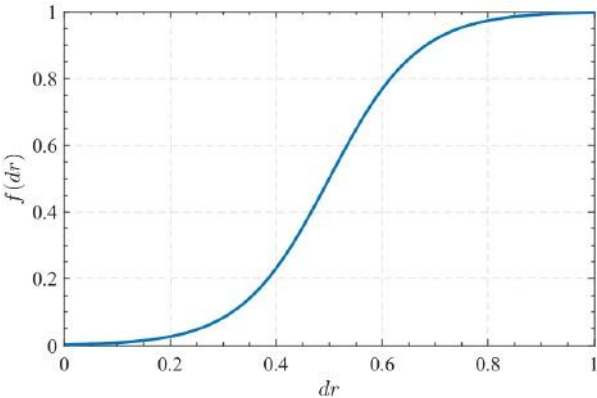


图 7:函数 $f(dr)$ 的图像

将式(6)和式(8)代入式(5)，我们得到：

$$l_i(t+1) = l_i(t) + g_i l_i(t) \left(1 - \frac{l_i(t) + \sum_{j=1}^{j \neq i} c_{ij} l_j(t)}{K(t)} \right) - f(dr) \beta_i l_i(t) + \sigma_i(t) \quad (11)$$

然后，可以得到生态位宽度的微分形式。

$$\frac{dl_i(t)}{dt} = g_i l_i(t) \left(1 - \frac{l_i(t) + \sum_{j=1}^{j \neq i} c_{ij} l_j(t)}{K(t)} \right) - f(dr) \beta_i l_i(t) + \sigma_i(t) \quad (12)$$

3.4 不规则天气周期

考虑到气候环境的波动、干旱周期的不确定性和干旱水平，我们通过引入随机变量来模拟这些不确定性的影响。气候变化被认为是一个随机过程。气候环境波动的模拟是基于随机数生成器生成的随机数。此外，干旱周期和干旱程度服从一定的概率分布。

本文采用指数分布对干旱事件的概率进行建模。指数分布是泊松点过程中事件之间时间间隔的概率分布，即事件以恒定平均速率连续独立发生的过程。

λ 为指数分布参数，反映干旱事件发生的频率。 λ 越大，干旱事件发生的频率越高。反之， λ 越小，干旱事件发生的频率和程度越低。因此，干旱发生的频率是通过 λ 的值来调整的。

$$P(t_{INR}) = 1 - e^{-\lambda t_{INR}} \quad (13)$$

式中 $P(t_{INR})$ 为时间间隔 t_{INR} 发生干旱事件的概率。

干旱的程度和持续时间因每次干旱事件而异。为了简化问题，我们认为干旱的程度和持续时间满足相互独立的一维正态分布。

$$\begin{aligned} dr &\sim N(\mu_d, \sigma_d^2) \\ t_d &\sim N(\mu_t, \sigma_t^2) \end{aligned} \quad (14)$$

其中 Dr 为干旱系数，表示干旱程度， $tisd$ 为干旱持续时间。

通过调整干旱的概率、强度和持续时间，模型可以模拟气候条件变化对植物群落演替的影响。当没有干旱发生时， dr 为给定的默认值。气候变化过程如图 8 所示。

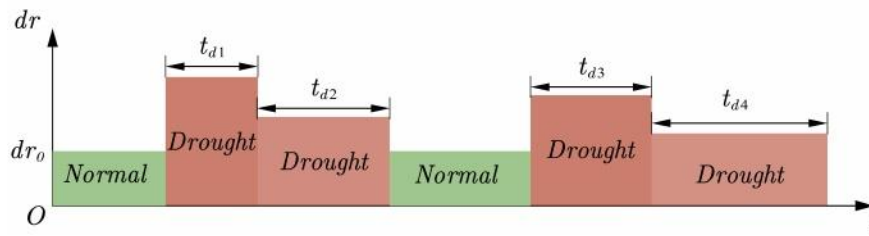


图 8:不规则的天气周期

3.5 植物群落进化模拟

3.5.1 植物种类和初始参数

本文模拟的群落进化总时间长度为 100 年，时间步长为 1 年。此外，为了简化问题，群落中首先有三个物种。对于每个物种，其干旱敏感系数、初始生态位宽度、最大生长系数如表 1 所示。具体数据可以通过实地调查或根据文献获得，以下数据仅用于展示我们的模型如何应用。

表 1:三个物种的相关参数

Species	γ_i	g_{max}	β_i	Initial l_i
1	0.5	0.23	0.1	2
2	0.7	0.15	0.1	2
3	0.2	0.33	0.1	2

生态系统参数:

$$\left\{ \begin{array}{l} C = \begin{bmatrix} 0 & -0.2 & 0.4 \\ -0.2 & 0 & 0.6 \\ 0.4 & 0.6 & 0 \end{bmatrix} \\ K = 10 \\ dr \sim N(1.5, 0.3^2) \\ t_d \sim N(15, 5^2) \\ P(t; \lambda = 0.04) = 1 - e^{-\lambda t} \end{array} \right. \tag{15}$$

3.5.2 不规则天气模拟

根据 3.4 节天气模拟的规则，可以得到未来 100 个月的天气。不规则天气模拟算法如下图所示。

Algorithm 1 Irregular Weather Simulation

Input: Maximum iterations n

Output: Drought coefficient dr at certain time point

1: $P(t_{INR}) \leftarrow 1 - \exp^{-\lambda t_{INR}}, \lambda = 0.04;$

2: $dr_0 \leftarrow 0.2;$

3: $t_{INR} \leftarrow 0;$

4: $i \leftarrow 0$

5: **while** $i \leq n$ **do**

6: $r \leftarrow rand();$

7: $p \leftarrow Exponential(\lambda, t_{INR});$

8: **if** $r \leq p$ **then**

9: $dayn \leftarrow round(2 * randn() + 10);$

10: **for** $j \leftarrow i: i + dayn - 1$ **do**

11: $dr_j = 0.15 * randn() + 0.6;$

12: **end for**

13: $i \leftarrow i + dayn;$

14: $t_{INR} \leftarrow 0;$

15: **else**

16: $dr_i \leftarrow dr_0;$

17: $t_{INR} \leftarrow t_{INR} + 1;$

18: $i \leftarrow i + 1;$

19: **end if**

20: **end while**

▷ The probability of drought

▷ $dayn$ is the duration of the drought

▷ Update the time interval points

▷ reset t_{INR} to 0

▷ Update the time interval since the last drought

▷ Update the time points

利用不规则天气模拟算法可以获得未来 100 年的天气，如图 9 所示。

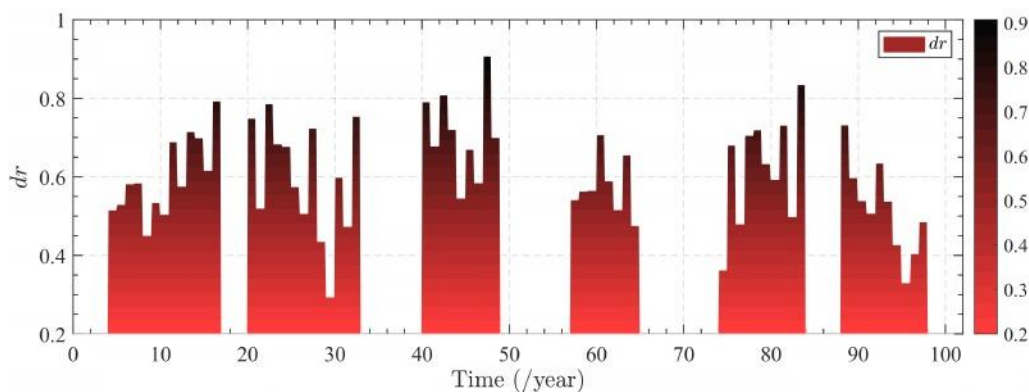


图 9:100 年不规则天气模拟

如图 9 所示，开始时，气候处于正常状态，环境有利。随着时间的推移，植物群落将面临不规律的干旱，持续时间和程度各不相同。

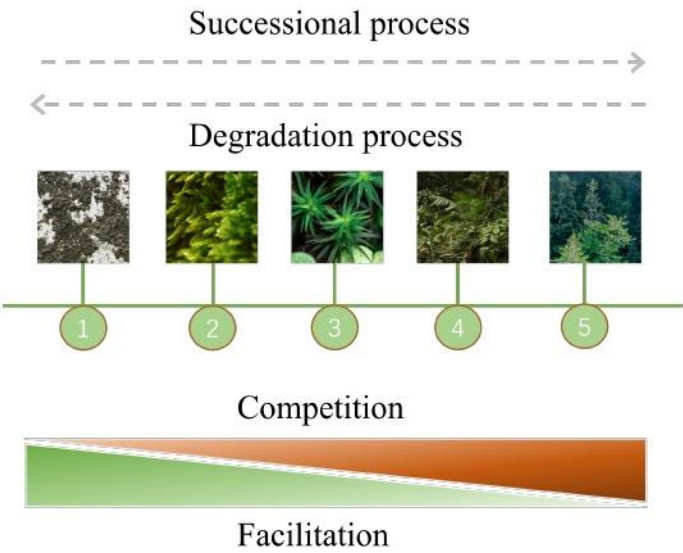


图 10:植物群落演替过程

3.5.3 物种进化模拟结果

根据式(12)，可以得到各物种的生态位宽度的差分方程。这样，我们就可以通过求解微分方程得到各物种在 100 年内的生态位宽度。

我们有

$$\begin{cases} \frac{dl_i(t)}{dt} = g_i l_i(t) \left(1 - \frac{l_i(t) + \sum_{j=1}^{j \neq i} c_{ij} l_j(t)}{K(t)} \right) - f(dr) \beta_i l_i(t) + \sigma_i(t) \\ l_i(0) = l_{i0} \end{cases} \quad (16)$$

其中 $\sigma_i(t)$ 服从 $N(0,0.52)$ 。

图 11 显示了这三个物种在 100 年内的生态位宽度。

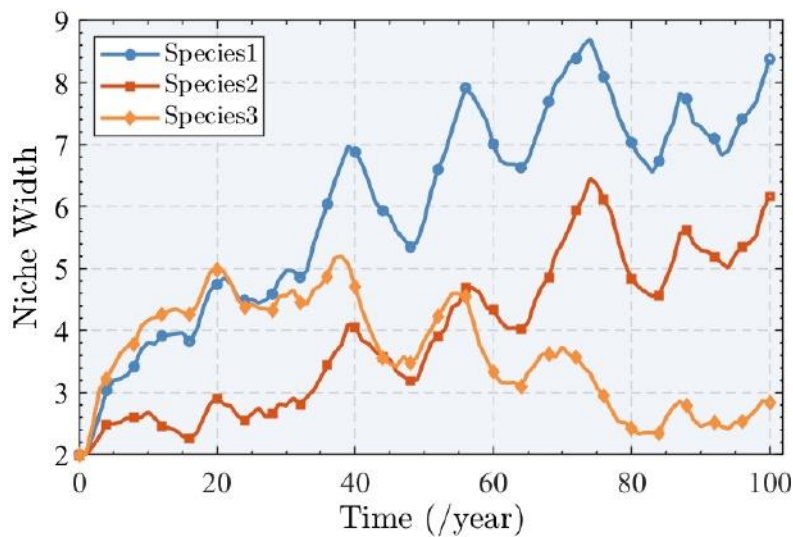


图 11:三种物种 100 年的生态位宽度

从图 11 可以看出，三种物种的生态位宽度一开始都等于 2。在不规则天气下，物种 1 和物种 2 的生态位宽度随波动而增加，而物种 1 的增加速度最快。一般情况下，物种 3 的生态位宽度先增大后减小，最终趋于平稳。干旱对几乎所有物种都不利。

在不规则的天气条件下，每个物种的生态位宽度比例也随时间而变化。图 12 显示了 1 年、20 年、40 年、60 年、80 年和 100 年各物种生态位宽度占比。

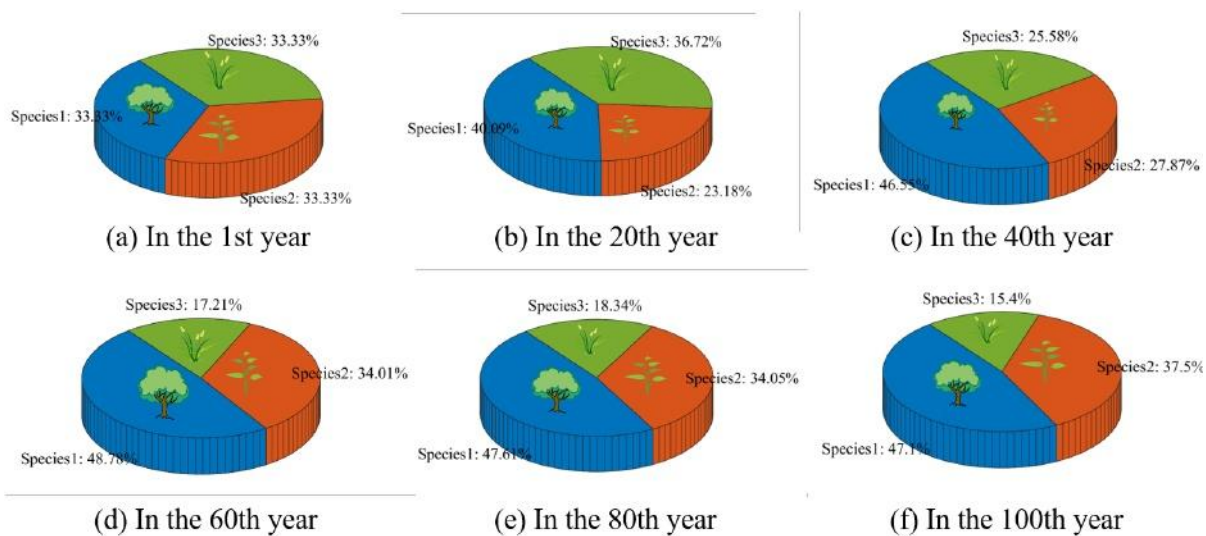


图 12:1、20、40、60、80、100 年各物种生态位宽度占比

如图 12 所示，在第一年，我们假设所有三个物种的生态位宽度比例相等。随着时间的推移，物种 1 的生态位宽度比例增加。到第 60 年时，各物种的生态位宽度占比趋于稳定。

植物群落的进化主要受干旱的影响。图 13 展示了干旱发生对群落总生态位宽度的影响。

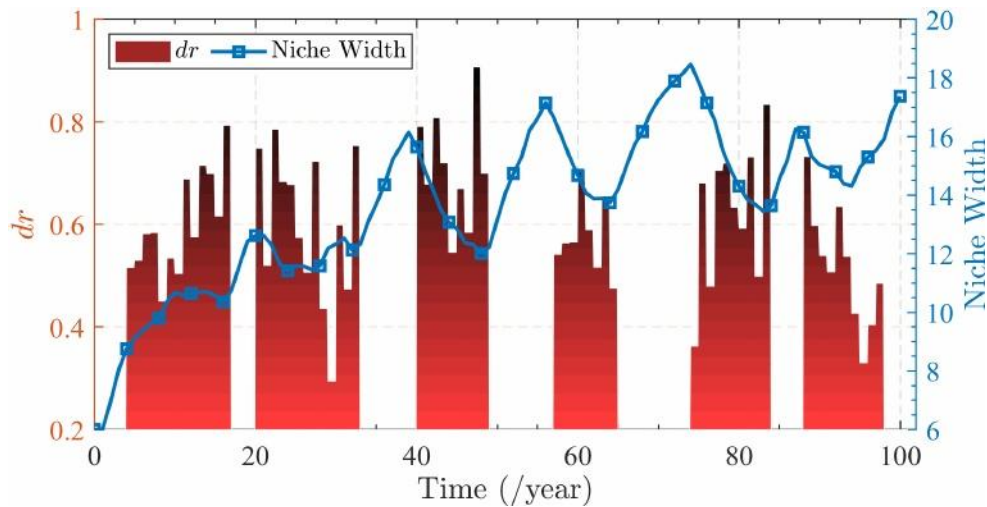


图 13:干旱系数 dr 和生态位宽度随时间的变化

如图 13 所示，在不发生干旱的情况下，群落的总生态位宽度呈增加趋势。这说明该环境适合植物生长，此时种群繁殖较多。然而，当发生干旱时，生态位总宽度呈下降趋势。干旱越严重，即 dr 越大，总生态位宽度减小得越快。说明干旱对种群的繁殖有抑制作用，且抑制作用随干旱程度的增加而增强。

4 植物群落进化模型的应用

4.1 物种数量对群落的影响

在自然环境中，物种之间存在竞争和互惠关系。当环境更加恶劣时，比如干旱，为了生存，物种之间的互惠关系会得到加强。因此，群落的整体抗旱性得到增强。为了研究物种数量对群落的影响，我们利用第 3 节的植物群落进化模型分别模拟了包含 1 到 4 个物种的群落的进化。

4.1.1 群落受益的最小物种数量

根据第 3 节中的植物群落进化模型，可以模拟包含 1、2、3 和 4 个物种的群落的进化，如图 14 所示。

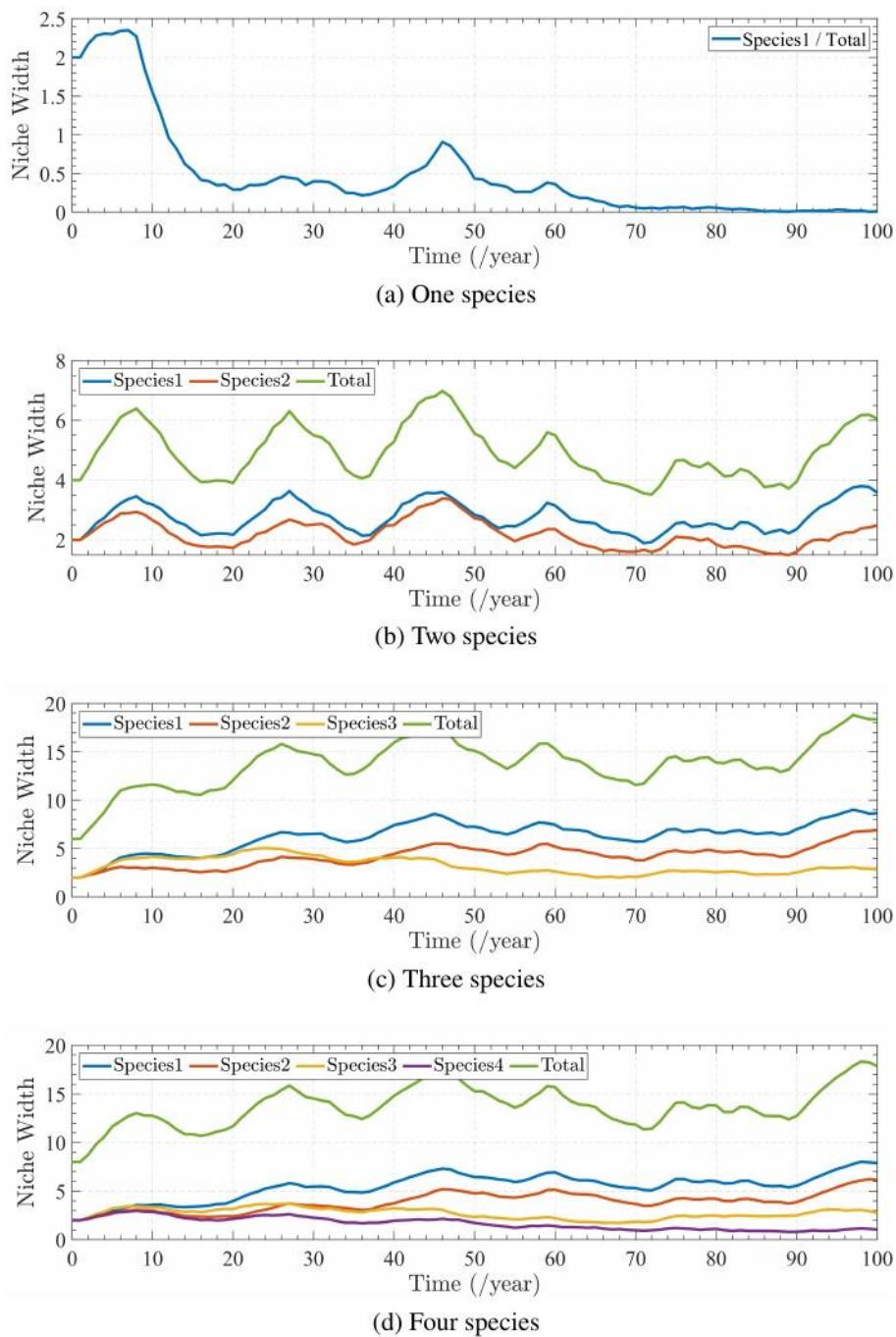


图 14:分别预测 4 年的海水温度

从图 14 中我们可以看到，当一个群落中只有一个物种时，在不规则的干旱条件下，该物种会慢慢灭绝。当有两个物种时，每个物种的生态位宽度会随着干旱的发生而剧烈波动。说明种群在面临不规律干旱时，无法长期稳定生存。

当有三个物种时，每个物种的生态位宽度随波动而增加。这说明这个群落可以通过种间共生来提高抗旱性，从而使社区能够长期生存。四种的情况与三种的情况相似。因此，可以得出结论，群落受益的最小物种数为 3 个。

4.1.2 物种数量增加对群落的影响

根据 4.1.1 节的 4 个群落演化模拟结果，我们可以得出随着物种数量的增长，群落生态位宽度越大，其抗旱性越强的结论。当物种数量增加到一定值时，其抗旱性趋于稳定，甚至可能下降。

单物种群落的抗旱性往往低于多物种群落。多物种群落往往具有更高的资源利用、促进效应和物种多样性效应。因此，它们能更好地适应干旱环境，表现出更强的抗旱性。其原理如下：

- 生态位划分:指不同物种之间资源利用的差异，从而避免植物之间的竞争。它使群落能够利用有限的资源，增强其抗旱能力。
- 促进效应:多个物种之间可能存在互惠共生，从而提高水分和养分的利用效率，增强植物的抗旱性。
- 物种多样性效应:多样性是衡量生态系统中物种的数量和多样性。多样性的增加可以增加系统的稳定性，减少其对外部干扰的暴露，从而增强群落的抗旱性。

然而，从生态位模型的角度来看，物种过多的群落抗旱性并不一定更强。物种过多会导致生态位重叠，种间竞争更加激烈。这也会导致群落稳定性下降，从而使群落对于干旱的抵抗力下降。

4.2 物种类型对群落进化的影响

不同植物群落的物种类型各不相同。因此，物种之间的相互作用也各不相同。一些群落之间的物种竞争更为激烈，而另一些群落之间则以种间互利共生为主。本文基于第 3 节的物种竞争关系，通过改变竞争矩阵，设计了竞争群落和互惠群落。

•一般植物群落

植物群落的物种间存在竞争主导和促进主导的关系，用第 3 节中的竞争矩阵表示。

$$C = \begin{bmatrix} 0 & -0.2 & 0.4 \\ -0.2 & 0 & 0.6 \\ 0.4 & 0.6 & 0 \end{bmatrix} \tag{17}$$

•有竞争力的植物社区

竞争性植物群落由物种间的竞争关系主导。竞争矩阵如下：

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1.0 & 0.8 \\ 1.0 & 0 & 0.9 \\ 0.8 & 0.9 & 0 \end{bmatrix} \tag{18}$$

•互利共生的植物群落

互利共生的植物群落以物种间的互利关系为主导。竞争矩阵为：

$$C = \begin{bmatrix} 0 & -0.3 & -0.2 \\ -0.3 & 0 & -0.25 \\ -0.2 & -0.25 & 0 \end{bmatrix} \tag{19}$$

图 15 展示了这三个社区的演变。可以看出，互惠支配的群落会有更大的生态位宽度和更多的物种繁殖。这说明它的抗旱性越强。相反，当一个群落中物种间竞争激烈时，其生态位宽度越小，种群繁殖越少，说明其抗旱性较弱。

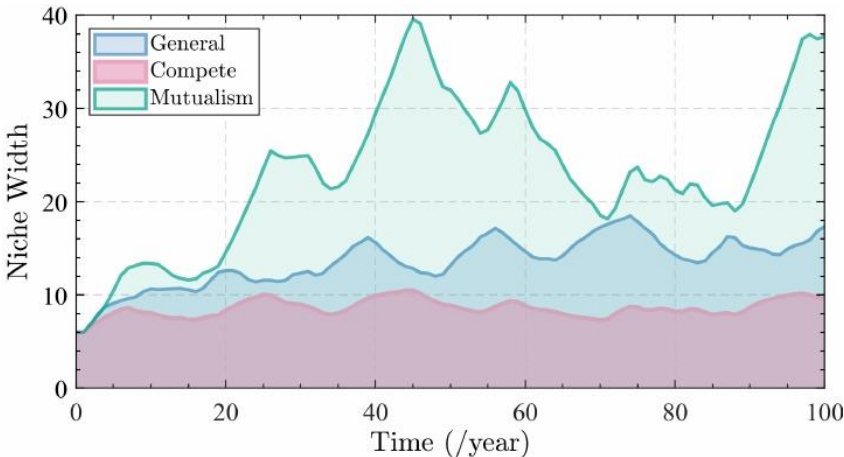


图 15:具有三种不同组成的群落的进化

4.3 干旱严重程度的影响

干旱程度和持续时间的增加会对植物群落产生负面影响。在植物群落进化模型中，通过调整干旱系数 dr 和干旱持续 d 时间来模拟干旱的严重程度。当干旱程度加重时， dr 和 tof 服从 d 如下正态分布：

$$\begin{aligned} dr &\sim N(0.8, 0.1^2) \\ t_d &\sim N(12, 3^2) \end{aligned} \quad (20)$$

当干旱较温和时， dr 和 $towd$ 服从如下正态分布：

$$\begin{aligned} dr &\sim N(0.45, 0.15^2) \\ t_d &\sim N(8, 1.5^2) \end{aligned} \quad (21)$$

基于植物群落进化模型，三种干旱条件下的群落演替过程如图 16 所示。

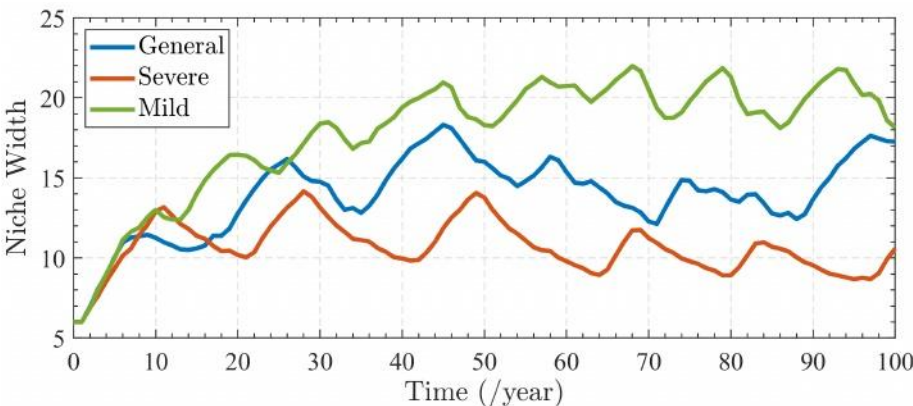


图 16: 三种干旱条件下的群落演替

从图 16 中我们可以看到，随着干旱的加剧，群落的生态位宽度减小，这意味着更多的物种死亡。因此，群落可以存活的时间更短。

4.4 污染和栖息地减少的影响

污染和栖息地萎缩会减少生态位宽度，限制生物可利用资源的数量。资源的减少增加了竞争强度，使更具竞争力的物种占据主导地位，并对其他物种施加额外的压力，导致它们的衰落或灭绝。

在植物群落进化模型中，灭绝的物种将从竞争矩阵中移除。这可能导致竞争关系的变化，从而可能影响其他物种的竞争能力和群落演替过程。

污染和生境萎缩会影响植物群落的生态位宽度和竞争关系。因此，生态位宽度和竞争矩阵可以进行如下调整。

$$\begin{aligned} L' &= L(1 - P_r)H \\ C' &= C(1 - P_r)H \end{aligned} \quad (22)$$

式中 L' 为调整后的生态位宽度， C' 为调整后的竞争矩阵，偏好 r 为植物群落污染程度， H 为生境缩减系数。

根据植物群落进化模型，可以模拟面临污染和栖息地萎缩的群落的进化。结果如图 17 所示。

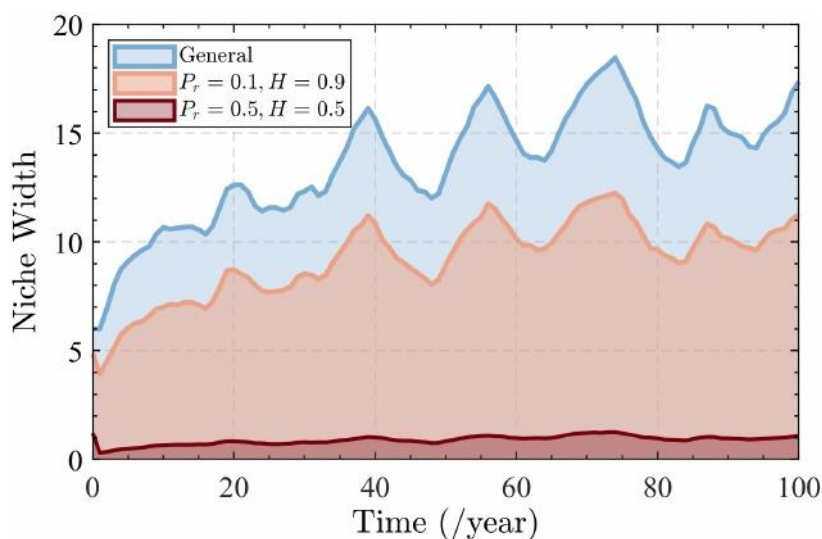


图 17:面临污染和栖息地萎缩的植物群落的演变

如图 17 所示，污染较轻、栖息地减少较少时，群落生态位宽度相对减小。此时，植物群落仍能长期稳定生存。当污染较重，栖息地减少较多时，生态位宽度接近 0，即此时群落中的许多物种将走向灭绝。

4.5 延长植物群落寿命的措施

对生态位模型的分析表明，在干旱环境中，多样的植物群落具有更高的抗旱性。这是由于不同物种的互补生态位减少了竞争，能够更好地适应干旱的挑战。

为确保植物群落的长期生存，可采取以下措施：

- 1.保护自然环境，维护生态系统的完整性和稳定性，减少人类活动对自然环境的破坏。特别是要保护植被和水源，防止过度砍伐和过度放牧，过度使用化肥和农药，过度开发水资源等。
- 2.鼓励植物多样性，保持群落多样性。通过种植不同类型的植物，可以增加植物群落的多样性，提高植物的适应性和抗性，减少植物之间的竞争，保持群落的稳定性。
- 3.推广节水措施。水是维持生命的重要资源。人类可以采取节水措施，如合理利用和节约水资源，减少对天然水源的污染和破坏，为植物提供更好的生长环境。
- 4.培育抗旱品种。可以通过育种或基因编辑技术培育抗旱植物品种，提高植物抗旱性，更好地适应干旱环境。



图 18:拯救地球，保护我们共同的家园

综上所述，生态位模型表明，生物群落中的每个物种都有一个特定的生态位，并通过竞争和互惠相互作用。保护脆弱群落可以维持生态系统的稳定性和生态多样性。此外，保护脆弱群落对人类自身利益至关重要，因为生态系统中的动植物为人类需求提供资源，而生态系统的破

坏会影响人类的生产和生计。因此，保护脆弱群落对于维护生态系统稳定性、生态多样性、维护人类自身利益具有重要意义。

5 敏感性分析

5.1 对不可预测因素的敏感性

在建立种群生态位宽度的微分方程时，加入白噪声模拟不可预测因素对群落演替的影响。白噪声的方差需要在一定的范围内。如果方差太小，就无法模拟不可预测因素的影响。如果方差过大，则会影响群落演替过程的正确性。

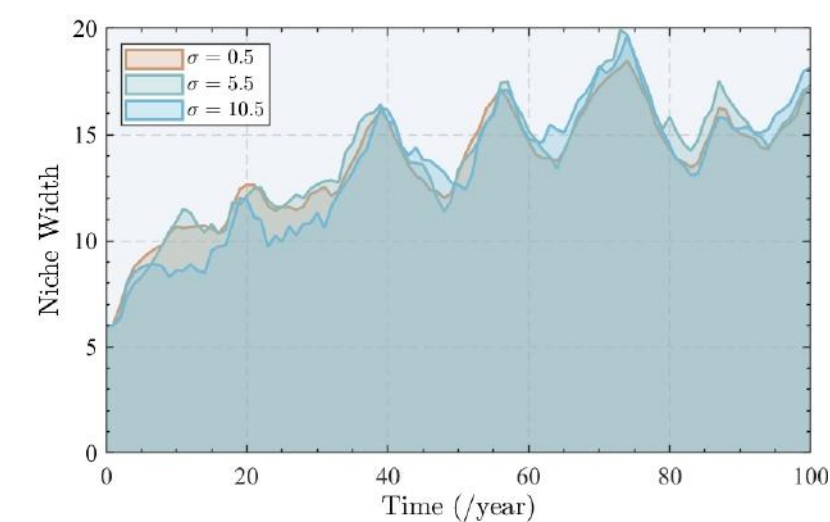


图 19:不同白噪声下的群落生态位宽度之和

白噪声的方差对群落整体生态位宽度的影响较小。这是因为我们独立计算了每个物种的白噪声，当物种较多或模拟次数足够时，群落的整体生态位宽度变化不大。但是，某些偶然因素可能会对群落中所有物种产生负面影响，而不是对每个物种的独立影响。因此，在考虑不可预测的干扰时，需要更复杂的模型来获得更好的结果。

5.2 对干旱系数的敏感性

干旱系数用来描述物种对干旱的敏感性，我们通过调整干旱系数来观察不同干旱适应性的物种和群落的表现。

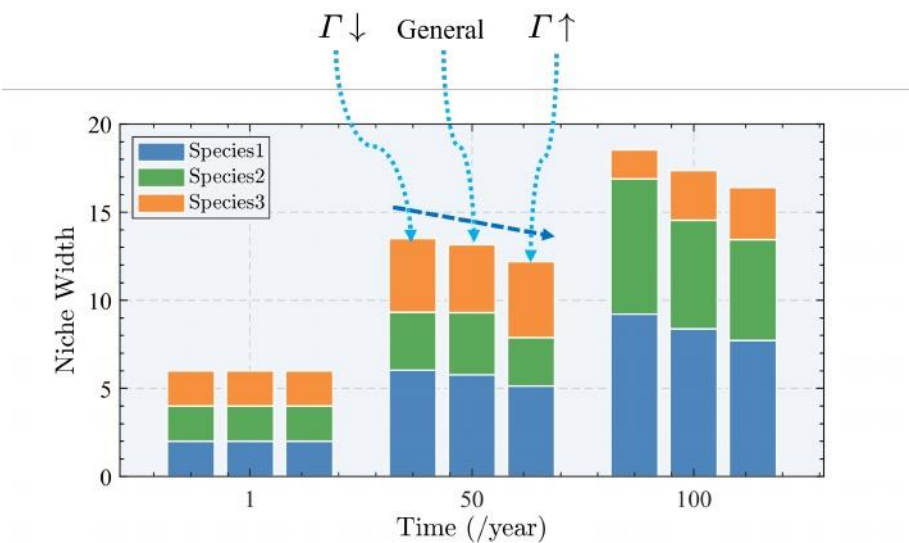


图 20:不同干旱系数下物种的生态位宽度

从图中可以看出，一个物种对干旱越敏感，其生态位宽度就越小，整个群落的生态位宽度也就越小。

6 优势与劣势

6.1 优势

- 生态位模型提供了对不同物种之间生态关系的全面理解，包括竞争和合作，并可以模拟植物群落随时间的进化。
- 该模型具有灵活性，可以适应不同的环境条件，如干旱事件或栖息地丧失，从而可以评估这些干扰对群落的潜在影响。
- 生态位模型可以结合植物物种相互作用的经验观察，使其成为检验生态理论和预测群落对环境变化反应的有用工具。

6.2 缺点

- 该模型可能对社区的初始条件很敏感，这些条件的微小变化可能导致社区随时间演变的显著差异。
- 该模型假设物种之间的相互作用仅基于对资源的竞争和合作，这可能无法捕捉到群落中所有的生态相互作用，例如捕食或寄生。
- 竞争矩阵的参数需要满足的条件可能与自然界的实际情况不一致，例如竞争矩阵不一定是对称矩阵。

7 结论

- 由于资源利用效率和物种多样性效应，多物种群落通常比单物种群落表现出更强的抗旱性。
- 当物种数量增加到一定水平时，其抗旱性趋于稳定甚至下降。这是因为过多的物种会导致生态位重叠，导致种间竞争加剧。
- 以共生关系为主的群落具有更强的干旱适应能力关系。
- 当干旱发生得更频繁、持续时间更长时，物种可能无法快速适应不断变化的环境，导致一些物种的种群规模减少，从而破坏生态平衡。相反，如果干旱发生的频率较低，物种可能更容易适应干旱环境，因为它们有更多的时间来适应干旱条件。
- 生境数量和减少都导致生态位宽度减小，加剧了竞争程度。竞争物种可能占据更多的资源，对其他物种施加更大的竞争压力，导致其他物种减少或灭绝。

参考文献。

- [1] DT Rosenow et al. "Drought tolerant sorghum and cotton germplasm". In: Agricultural Water Management 7.1-3 (1983), pp. 207–222.
- [2] J Sardans and Josep Peñuelas. "Plant-soil interactions in Mediterranean forest and shrublands: impacts of climatic change". In: Plant and soil 365 (2013), pp. 1–33.
- [3] Mustaqeem Ahmad et al. "Niche width analyses facilitate identification of high-risk endemic species at high altitudes in western Himalayas". In: Ecological Indicators 126 (2021), p. 107653.
- [4] Jitka Polechová and David Storch. "Ecological niche". In: Encyclopedia of ecology 2 (2008), pp. 1088–1097.
- [5] Andrew D Letten, Po-Ju Ke, and Tadashi Fukami. "Linking modern coexistence theory and contemporary niche theory". In: Ecological Monographs 87.2 (2017), pp. 161–177.
- [6] M De la Sen. "The generalized Beverton–Holt equation and the control of populations". In: Applied Mathematical Modelling 32.11 (2008), pp. 2312–2328.
- [7] S Das and PK Gupta. "A mathematical model on fractional Lotka–Volterra equations". In: Journal of Theoretical Biology 277.1 (2011), pp. 1–6.

[8] Martin Bohner and Rotchana Chieochan. “The Beverton–Holt q -difference equation”. In: *Journal of Biological Dynamics* 7.1 (2013), pp. 86–95.