

干旱还是死?受干旱影响的植物群落可以生存!

摘要: 在气候变化的情况下,降水制度的年际变率可能会增加,极端天气和气候事件可能更加强烈和频繁,包括多年干旱。因此,有必要关注植物群落的干旱适应性。我们团队在本文中构建了以下数学模型来探索植物群落对干旱的响应机制。

首先,为了考虑植物种间相互作用的影响,我们对经典模型 Lotka-Volterra model 进行了改进,将两个物种之间的方程调整为基于 Logistic 方程的多物种微分方程。我们利用 Spearman 相关分析得到衡量不同种间相互作用的系数。当两个物种的分布呈正相关时,我们认为两个物种在一定程度上是互惠互利的。

然后,我们考虑环境因素的影响。收集了过去 15 年的天气数据,我们拟合了降水、温度和土壤湿度之间的线性关系。我们还定义了一个环境影响因子 Q ,将其添加到基本微分方程中。然后我们用计算机设置温度和降水,控制变化周期来模拟不规则的天气周期。随机模拟以真实数据为基础,可以人为调节。通过这个模型,我们预测了植物群落随时间的变化趋势。

接下来,通过测量 shannon - wiener 指数和物种生物量变异系数的倒数 ICV,我们得到了植物群落干旱适应性的具体定量指标。我们计算了不同情况下植物群落在一段时间后这两个指标的变化率。用 2~7 个不同的物种测量每个群落,我们发现,如果群落想要从这种生物多样性中受益,植物物种的最小数量是 5 个。物种越多,群落的干旱适应能力越好。

进一步分析了复杂环境的潜在影响,使模型更加完整和全面。我们考虑了栖息地减少、环境污染和气候变暖的影响。对于每个因素,我们绘制了物种生物量随时间的变化曲线,直观地显示了该因素的影响。

最后,运用层次分析法(AHP)对各因素的重要性进行评价。我们获得了物种数量、物种类型、天气周期和其他环境因素的 4 个权重指标,分别为 0.257、0.543、0.131 和 0.069。这些指标帮助我们更好地分析确保植物群落长期生存能力的方法。指标越大,它就越优先于我们需要更多关注的其他因素。

关键词:群落稳定性生物多样性干旱微分方程 AHP 模型

目录

干还是死?受干旱影响的植物群落可以生存!.....1

1 介绍4

 1.1 问题背景4

 1.2 问题重述4

 1.3 我们的方法4

2 假设和论证5

3 变量5

4 植物群落变化模型 6

 4.1 环境影响因子 6

 4.2 基于 Lotka-Volterra 模型和 Spearman 相关分析的植物种间关系模型 7

 4.3 结果 10

5 基于 Shannon-Wiener 指数和 ICV 的社区效益模型 11

 5.1 物种多样性评价模型 11

 5.2 群落稳定性评价模型 11

 5.3 结果 12

 5.3.1 物种数量效应结果 12

 5.3.2 物种组成效应结果 12

6 复杂环境的潜在影响 14

 6.1 干旱的频率和变化 14

 6.1.2 变化范围更广 15

 6.2 不利因素 16

 6.3 结果分析 18

7 基于层次分析法确保植物群落长期生存能力的方法 18

 7.1 AHP 模型 18

 7.2 植物长期生存力建议 19

 7.3 对大环境的影响 20

8 敏感性分析 20

9 模型评估和进一步讨论 21

 9.1 优点 21

 9.2 缺点 21

 9.3 进一步讨论 21

参考文献 22

1 介绍

1.1 问题背景

近年来，随着气候变化下的全球变暖，极端干旱事件的发生频率和强度不断增加，对生态系统的结构和功能产生了很大的影响。降水已被确定为限制生态系统过程的主要因素。[1]因此，迫切需要更深入地研究物种相互作用对恢复力的影响，以使植物适应日益增加的干旱胁迫[2]。

不同的植物对干旱的反应方式不同，对于干旱环境的适应也不同。对于植物群落来说，它们对干旱周期的适应能力与物种数量有着密切的关系。干旱还可能改变群落结构，因为它代表了对植物的一种压力，对种群密度产生负面影响，并增加了较少丰富物种灭绝的可能性。[3]拥有多种植物的群落比只有一种植物的群落更能适应干旱。这与抗旱性的生物稳定性非常相似。

抗性稳定性是指生态系统抵抗外部干扰并保持其结构和功能完整的能力。一般来说，生态系统越复杂，其抗扰稳定性越高。对植物群落抗性稳定性的研究，为解释这一现象提供了新的视角。

1.2 问题重述

考虑到背景资料和限定条件确定的问题陈述，我们需要解决以下问题：

1)首先，我们需要建立一个模型来预测在不规则的天气周期中植物群落将如何随时间变化。必须考虑物种之间的竞争和共生关系。

2)然后，我们需要计算植物群落从局部生物多样性中受益所需的最小物种数量，并预测物种数量增加和物种组成变化的后果。

3)在之前模型的基础上，我们需要将其扩展到更复杂的环境中。例如：干旱频率、环境污染、栖息地减少的变化。

4)最后，我们需要提出确保植物群落长期生存能力的方法。

1.3 我们的方法

为了分析植物群落的干旱适应性，我们将如图 1 所示。

定义环境影响因子和种间相互作用影响因子。我们定义干旱环境，并考虑物种之间的相互作用。

设计植物群落变化模型。我们设计植物群落变化和

修改我们的模型参数来模拟更大的环境。

评估工厂社区效益。结合 Shannon-Weiner 指数和 M.Godron 稳定性判定法，可以量化植物群落的干旱适应性。

提供保证植物群落长期生存的方法。基于之前的模型，我们确定了不同因素对植物群落的影响，并提供了确保植物群落长期生存能力的方法。

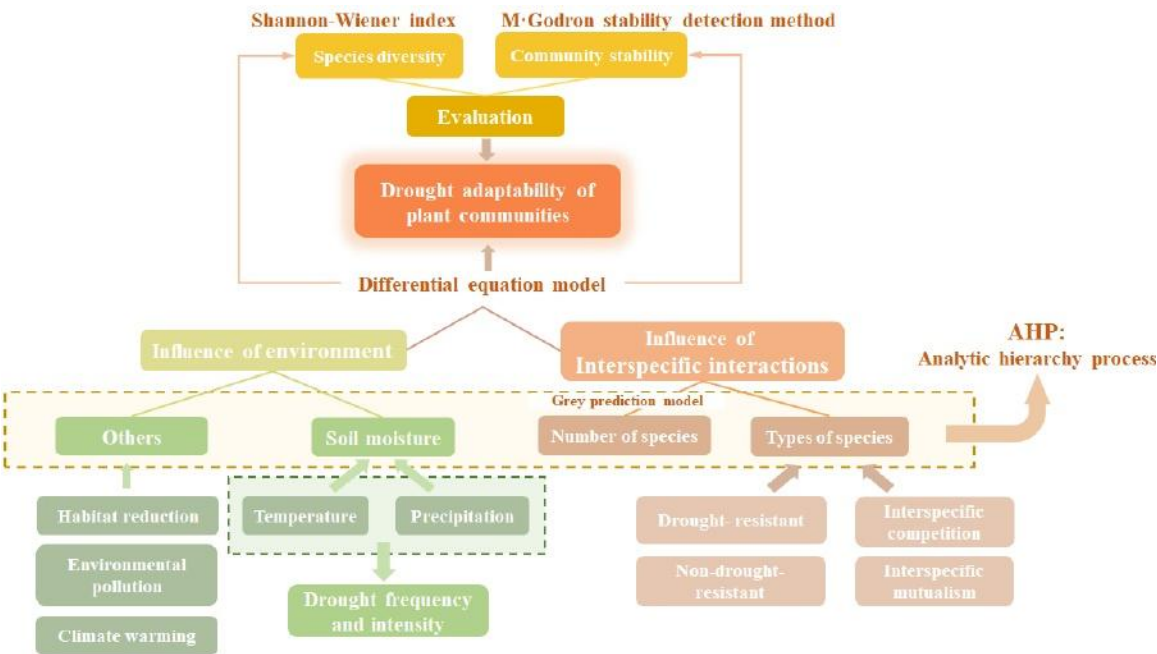


图 1:我们的方法

2 假设和论证

为了简化问题，方便我们模拟真实情况，我们做了以下假设，每一个假设都是合理的。

我们收集到的所有数据都是准确的。我们收集了各种来源的气候数据、土壤湿度数据、植被数量数据。而数据测量设备难免会有一些测量误差。所以在我们的模型中，我们假设我们收集的所有数据都是准确的。

除了干旱，植物不受其他极端天气的影响。极端天气事件发生的概率通常小于 5%或 10%。但随着全球变暖，极端天气气候事件发生频率发生变化，呈现增加趋势。该模型只考虑了可能发生的极端干旱，没有考虑其他极端天气条件。

忽略动物因素。动物也是生态系统的重要组成部分。有一种动物和植物之间存在捕食关系，影响植物的数量。可能出现的病虫害也会对植物的数量产生重要影响。由于我们的模型主要关注植物群落，动物因素的影响可以忽略不计。

土壤 pH 值和土壤微生物适宜。土壤的 pH 值会促进或抑制植物的生长，这取决于植物是否适应。土壤中的微生物也会促进或抑制植物的生长。为了简化我们的模型，我们假设它们都是合适的。

3 变量

Symbol	Definition	Unit
T	Temperature	$^{\circ}\text{C}$
R	Precipitation	mm
h	Soil moisture	-
Q	Environmental impact factor	-
n	Number of species	-
N_1, N_2, \dots, N_n	Biomass of different species	kg/hm^2
K_1, K_2, \dots, K_n	Environmental capacity of different species	kg/hm^2
r_1, r_2, \dots, r_n	The population growth rate of different species	day^{-1}
a_{ij}	Influence factors of species i on species j	-
H	Shannon-Wiener Index	-
P_i	Relative frequency of species i	-
N_i	Indivisual number of species i	-
ICV	Inverse of coefficient of vatiation	-
τ	Average biomass of each species	kg/hm^2
σ	Standard deviation of biomass of each species	-
ΔICV	Growth rate of ICV	-
CR	Consistency Ratio	-
CI	Consistency Index	-
RI	Random Index	-
λ_{max}	Maximun eigenvalue of the judgement matrix	-
k	Indicator to measure the concentration of SO_2	-
c	Current SO_2 concentration	ppm
c_0	Standard value of SO_2 concentration	ppm
D	Habitat reduction ratio	-

其中，我们定义了主要参数，而这些参数的具体值将在稍后给出。

4 植物群落变化模型

4.1 环境影响因子

本模型在确定环境影响因子时仅考虑干旱环境。

干旱是指由于土壤水分缺乏，作物水分平衡被破坏而造成的农业气象灾害。可分为土壤干旱、大气干旱和生理干旱三种类型。

土壤干旱是由于土壤中水分不足，植物根系不能吸收足够的水分来补偿蒸腾作用造成的损害。

大气干旱是空气中水分干燥，往往伴有一定的风，虽然土壤不缺水，但由于蒸腾作用强，使植物缺水而形成危害。

生理性干旱是由于土壤环境条件不良导致作物生理过程受阻，导致植物水分平衡失衡而造成的危害。这种不良条件包括土壤温度过高、过低、土壤通风不良、土壤溶液浓度过高、土壤中某些有毒化学物质的积累等。

影响干旱程度的因素很多，其中温度(T)和降水(R)是两个主要因素。而温度和降水可以直接影响土壤湿度。因此，我们可以对数据进行归一化。土壤湿度被用来反映温度和降水对干旱程度的影响。

我们将土壤湿度 h 定义为式(1)。

$$h = \mu T + \theta R \tag{1}$$

其中 μ 和 θ 为参数。参数需要根据具体的气候数据确定。

因为我们需要考虑干旱适应性与植物群落中物种数量的关系，所以气候数据需要有一个连续的干旱周期。同时，也不能长时间处于干旱状态，比如热带沙漠气候。最后，我们选择温带大陆性气候，特点是冬冷夏热，降水集中。在该地区的温带大陆性气候中，我们选择了中国新疆，因为那里有丰富的森林和草原植物，还有草甸、沼泽和水生植物。

通过收集国家青藏高原科学数据中心[4]的数据，我们可以量化土壤湿度、温度和降水之间的关系。计算结果表明， $\mu=4.7 \times 10^{-4}$ and $\theta=4.8 \times 10^{-3}$ 。

我们将土壤湿度低于 $h_0 = 12\%$ 定义为干旱环境。

然后考虑土壤湿度对植物生长的影响。根据植物生理，当土壤水分过高时，容易引起植物根系腐烂，当土壤水分过低时，植物根系无法吸收足够的水分，植物生长受到抑制。湿度适宜时，植物生长最快。因此，当仅考虑干旱时，环境影响因子(Q)为土壤湿度的二次函数[5]。

$$Q = mh^2 + nh + c \tag{2}$$

其中 m 、 n 、 c 为参数。

根据植物对土壤水分的需求，我们取 $h = 12\%$ 时 $Q = 1$, $h = 5\%$ 或 $h = 19\%$ 时 $Q = 0$ 。表示当土壤湿度为 12% 时，是植物的最佳湿度，所以 Q 可以达到可以达到最大值 1。当土壤湿度低于 5% 时，太干燥了，植物无法生存和生长。所以 Q 值为负，意味着该物种的生长速度为负，生物量会下降。当土壤湿度在 19% 以上时，就是太湿了。计算结果表明， $m=-10000$, $n=2400$ ，而 $c=-4995$ 。Q 的二次函数图像如图 2 所示。

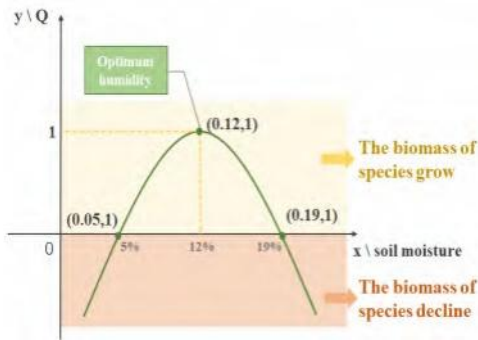


图 2 Q 的二次函数图像

结合我们收集的数据，我们以 10 天为一个天气变化周期，用计算机模拟各种不规则周期。

4.2 基于 Lotka-Volterra 模型和 Spearman 相关分析的植物种间关系模型

物种间的相互作用是生物群系形成的基础。根据物种之间的关系，相互作用可以分为积极的相互作用和消极的相互作用。积极的相互作用包括偏爱、原始合作和互惠，而消极的相互作用包括竞争、捕食和寄生。对于该模型中的植物群落，我们主要考虑互惠和竞争。

Lotka-Volterra 模型是一个非常经典的基于 Logistic 模型的种间竞争模型。我们扩展了这个模型，建立了一个多物种竞争和共生关系的模型。

假设这个植物群落中有 n 个物种。我们定义 N 为一个物种的生物量， K 为一个物种的环境容量， r 为一个物种的种群增长率。根据 Logistic 模型，我们有式(3)。

$$\frac{dN}{dt} = r \cdot N \cdot (1 - \frac{N}{K}) \cdot Q$$

(3)

其中： $\frac{N}{K}$ 可以理解为已经使用的空间， $(1 - \frac{N}{K})$ 可以理解为未使用的空间。当多个物种竞争或使用同一空间时，可以列出以下等式

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= r_1 \cdot N_1 \cdot (1 - \frac{N_1}{K_1} - a_{21} \frac{N_2}{K_2} - a_{31} \frac{N_3}{K_3} - \dots - a_{n1} \frac{N_n}{K_n}) \cdot Q \\ \frac{dN_2}{dt} &= r_2 \cdot N_2 \cdot (1 - \frac{N_2}{K_2} - a_{12} \frac{N_1}{K_1} - a_{32} \frac{N_3}{K_3} - \dots - a_{n2} \frac{N_n}{K_n}) \cdot Q \\ &\dots \\ \frac{dN_n}{dt} &= r_n \cdot N_n \cdot (1 - \frac{N_n}{K_n} - a_{1n} \frac{N_1}{K_1} - a_{2n} \frac{N_2}{K_2} - \dots - a_{n-1n} \frac{N_{n-1}}{K_{n-1}}) \cdot Q \end{aligned}$$

表 1:植物的初始生物量

Number	Species	Initial Biomass (kg/hm ²)
Species 1	Populus euphratica	154.57
Species 2	Haloxylon ammodendron	9.47
Species 3	Poacynum hendersonii	2.45
Species 4	Nitraria tangutorum	54.31
Species 5	Halimodendron halodendron	3.92
Species 6	Kalidium foliatum	95.38
Species 7	Tamarix chinensis	38.41
Species 8	Reaumuria songonica	83.90
Species 9	Alhagi sparsifolia	1.88
Species 10	Seriphidium kaschgaricum	9.08

式中， a_{ij} 为物种 i 对物种 j 的影响因素。当植物物种之间的关系是竞争时， $a_{ij} > 0$ 。当植物物种之间的关系是互惠共生时， $a_{ij} < 0$ 。

在这个模型中，我们选取了新疆地区 10 种具有代表性的植物。它们的高度不一，包括草本植物、灌木和乔木。这 10 种植物的拉丁名称及其初始生物量见表 1，它们的一些基本信息[6-10]见图 3。

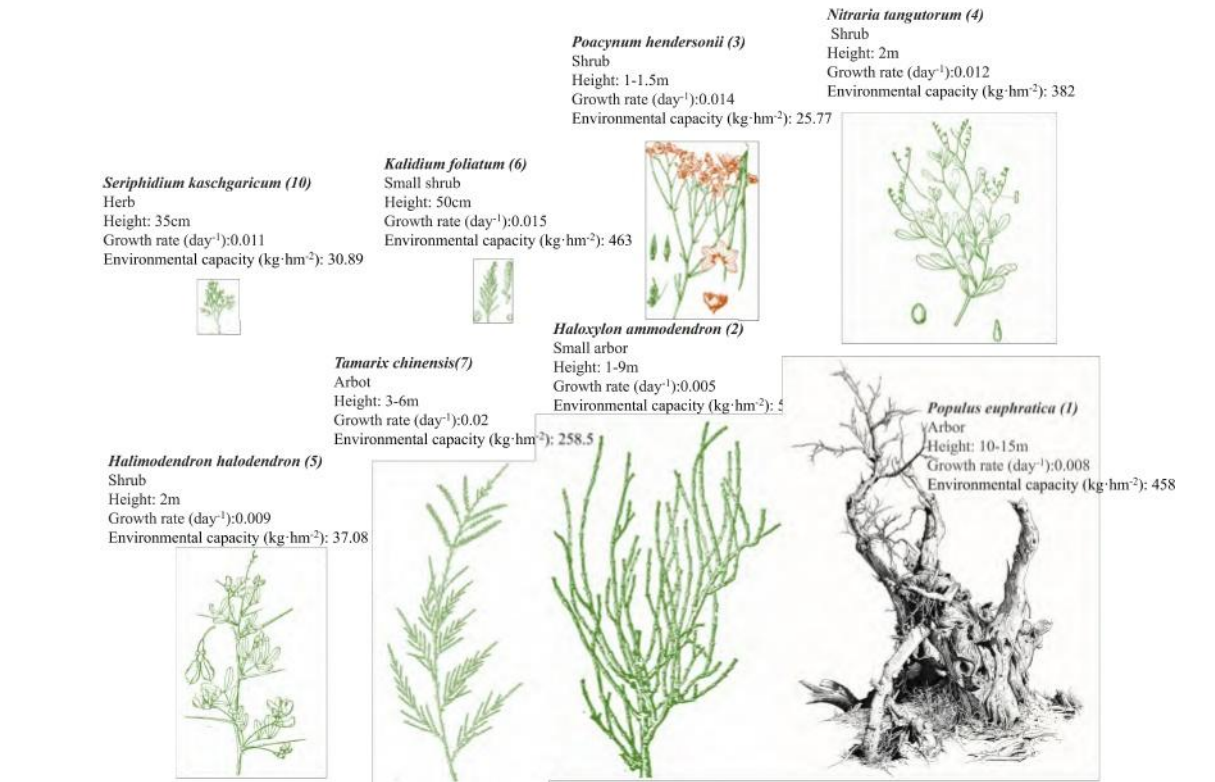


图 3:8 个物种的基本信息

在确定影响因子 a_{ij} 的值时，我们考虑使用斯皮尔曼相关分析。斯皮尔曼相关分析需要两个条件：

- 1)变量包含秩变量，或变量不遵循正态分布或分布类型未知。
- 2)两个变量之间存在单调的关系。

我们搜索典型群落样地的主要物种组成及其重要值[11]。根据生物学知识，当种间关系为竞争关系时，物种数量呈负相关。当种间关系是互惠关系时，物种数量是正相关的。数据可以同时满足上述两个条件。

计算后，我们可以得到图 4 所示的相关热图。



图 4:10 个物种热图的相关性分析

4.3 结果

在求解微分方程时，我们使用龙格-库塔方法。它是求解非线性常微分方程的重要迭代方法。它的高精度非常适合求解这一模型。

一个物种:

当只有一个物种时，我们选择物种 1 进行分析。将物种 1 的数据代入方程(3)，我们可以得到图 5 中的曲线。

从图 5 可以看出，随着时间的推移，物种 1 的生物量整体呈下降趋势，说明单个植物物种对干旱的适应能力较弱。

多个物种:

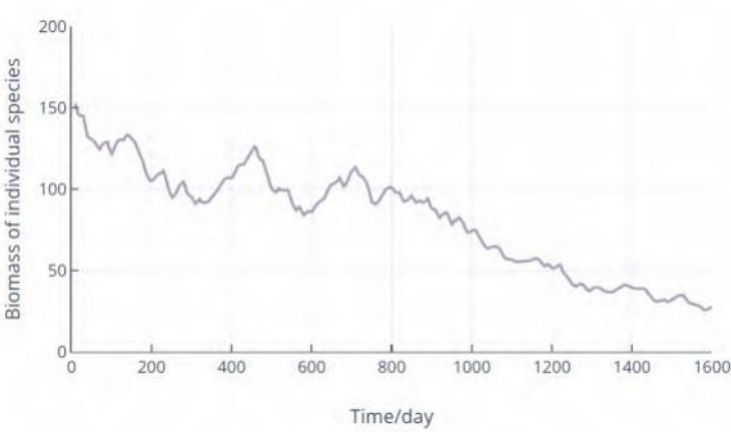


图 5:物种 1 生物量-时间曲线

当考虑多物种时，我们选择物种 1-5 (n = 5)进行分析。其种间影响因子矩阵如下图所示。

$$\begin{pmatrix} 1 & 0.284 & 0.164 & 0.093 & -0.33 \\ 0.284 & 1 & 0.336 & -0.165 & 0.163 \\ 0.164 & 0.336 & 1 & 0.073 & -0.084 \\ 0.093 & -0.165 & 0.073 & 1 & 0.33 \\ -0.33 & 0.163 & -0.084 & 0.33 & 1 \end{pmatrix}$$

通过将数据代入微分方程组，我们可以得到图 6 中的曲线。

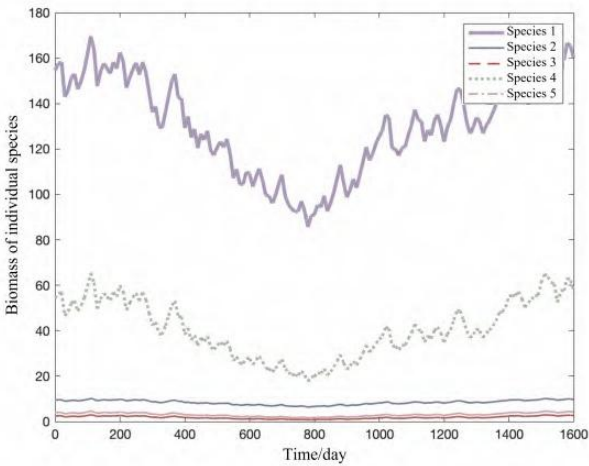


图 6:物种 1-5 生物量-时间曲线

从曲线上可以看出，每个物种的生物量都有一定程度的波动，但总体上生物量相对稳定。在 800 天左右，各物种的生物量曲线出现高峰和低谷。之所以会出现这种现象，是因为天气模拟中这一时期干旱天气发生的频率更高。

通过比较单物种和多物种的生物量时间曲线，我们可以发现多物种能够更好地适应干旱环境。

5 基于 Shannon-Wiener 指数和 ICV 的社区效益模型

5.1 物种多样性评价模型

Shannon-Wiener 指数是衡量生态系统中物种多样性和丰度的生物多样性指数。其基本原理是，物种多样性越高，熵值越高，反之亦然。熵越高，物种多样性越高，生态系统的多样性也就越高。

将 Shannon-Wiener 指数推广到植物群落中，用于评价植物群落的物种多样性。

Shannon-Wiener 指数(H)可用式(4)表示。

$$H = -\sum P_i \cdot \ln(P_i) \quad (4)$$

其中， P_i 为物种 i 的相对频率。可通过式(5)进行计算。

$$P_i = \frac{N_i}{N} \quad (5)$$

其中， N_i 为物种 i 的个体数。 N 为植物群落的个体总数

5.2 群落稳定性评价模型

稳定性是生态系统的必要条件和功能表现，也是决定生态系统结构和功能能否正常运行的重要特征之一。当外界干扰超过生态系统所能承受的阈值时，生态系统的结构和功能就会发生相应的变化，系统的稳定性就会降低，从而破坏生态平衡，造成生态系统的退化[12]。一般来说，物种数量越多，稳定性越强。

在这个模型中，我们用群落稳定性来评估植物物种的效益。

通过计算变异系数(ICV)的倒数来评估植物群落的稳定性，如式(6)所示。

$$ICV = \frac{\tau}{\sigma} \quad (6)$$

其中 τ 表示各物种的平均生物量， σ 表示各物种生物量的标准差。

τ 可由式(7)计算。

$$\tau = \frac{\sum N_i}{n} \quad (7)$$

σ 可由式(8)计算。

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (N_i - \tau)^2} \quad (8)$$

特别是，与 ICV 值较低的植物群落相比，ICV 值较高的植物群落具有更大的稳定性[13]。

我们将 ICV 的生长速率定义为 ΔICV 。当 $\Delta ICV > 0$ 时，社区稳定性增加。当 $\Delta ICV > 0$ 接近于 0 时，群落稳定性几乎不变。

5.3 结果

5.3.1 物种数量效应结果

取 n = 2、3、4、5、6、7，代入相应数据得到生物量-时间曲线和 Δ ICV。结果如图 7、图 8 所示。

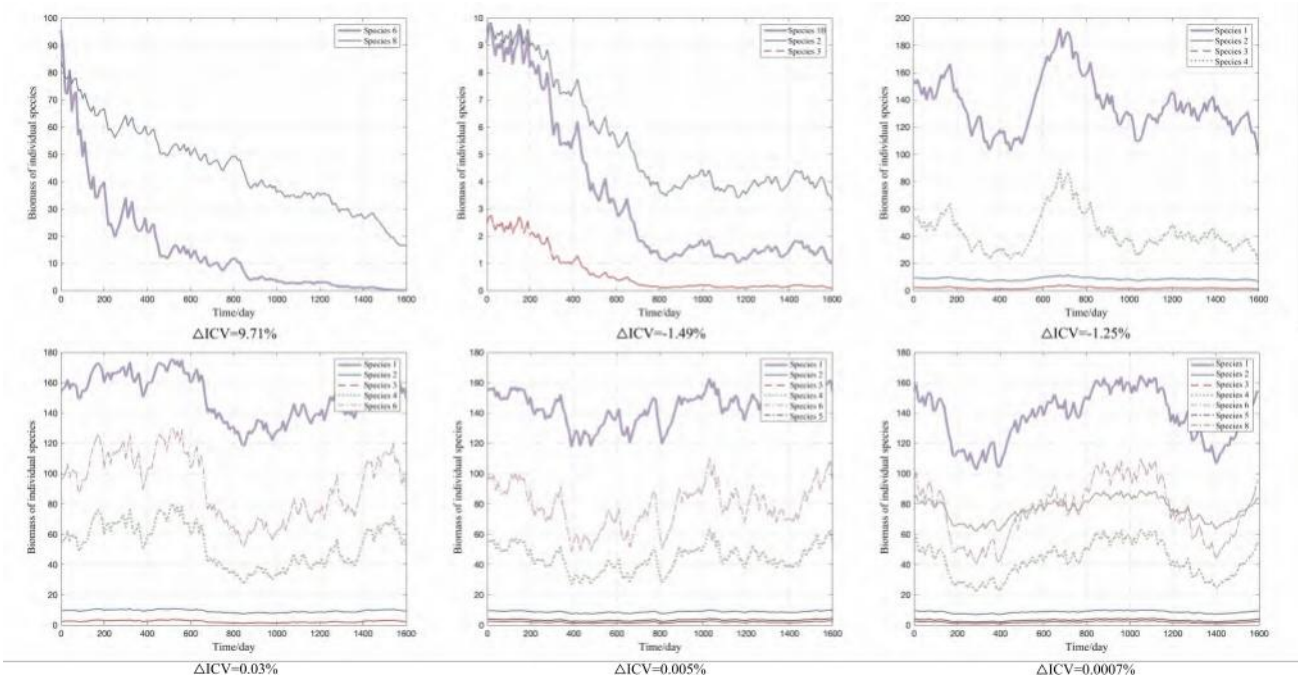


图 7:不同物种数量的生物量-时间曲线和 Δ ICV

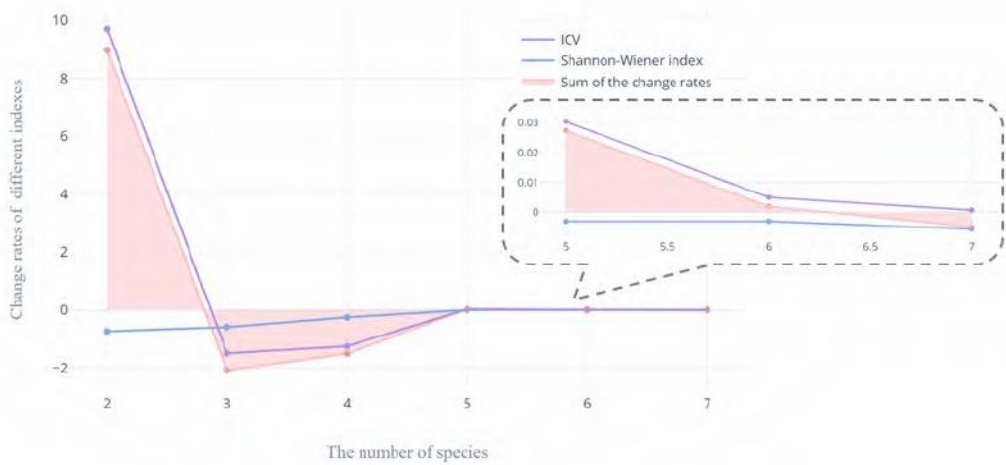


图 8:不同指标物种数量变化率曲线

由图 8 可以看出，当 n = 5 时，Shannon-Weiner 指数和 ICV 的变化率接近于 0。随着 n 的增大，Shannon-Weiner 指数和 ICV 的变化率基本不变。因此，我们可以预测，当 n 大于或等于 5 时，植物群落的稳定性几乎没有变化。植物群落从局部生物多样性中受益所需的最小物种数量是 5。

5.3.2 物种组成效应结果

从图 4 可以看出，物种 1 和物种 6 之间的竞争比较强。至于共生关系，没有很强的互利关系，但物种 1 和物种 5、物种 1 和物种 10 之间的共生关系强于其他物种。我们认为，不同的种间关系会影响植物群落对干旱的适应能力。

除了种间关系的差异外，物种本身的耐旱性也会影响结果。当一个植物群落中存在不耐旱的物种时，该群落对干旱的适应性也会发生变化。

因此，我们将讨论四种情况:强竞争、弱竞争、共生、不耐干旱物种存在。

在这 10 种植物中，我们主要选取了 7 种植物(物种 1-6 和物种 10)进行分析。在所有情况下，植物群落由 5 个物种组成(n = 5)。

为了评估群落稳定性变化，我们将初始状态的 ICV 定义为 ICV1，将 1600 天的 ICV 定义为 ICV2。

激烈的竞争:

本案例中的物种构成为 1-4 种，6 种。

在我们收集的数据中，以物种 1 为主体的样方中物种 6 的数量非常少，以物种 6 为主体的样方中物种 1 的数量非常少。由此，我们可以推断胡杨与叶利钾的竞争非常激烈。

5 个种的种间影响因素矩阵如下图所示。

1	0.284	0.164	0.093	0.629
0.284	1	0.336	-0.165	-0.023
0.164	0.336	1	0.073	-0.155
0.093	-0.165	0.073	1	0.13
0.629	-0.023	-0.155	-0.13	1

通过将数据代入微分方程组，我们可以得到如图 9 所示的曲线。

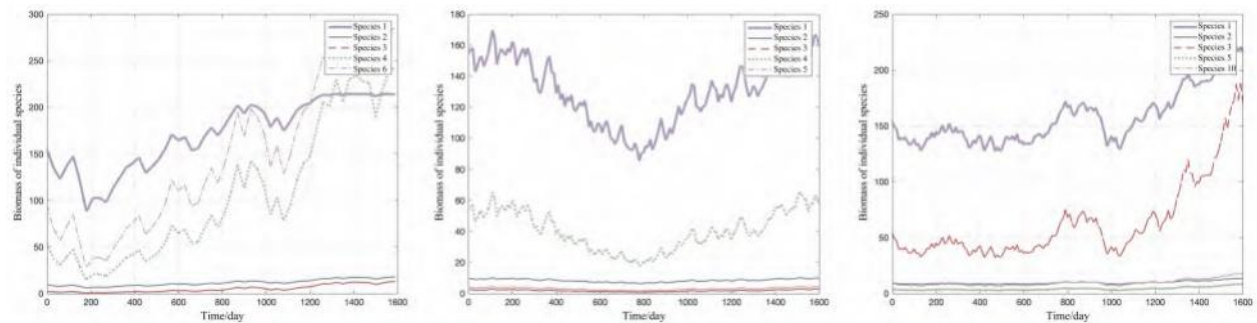


图 9:强竞争(左)、弱竞争(中)和共生(右)的生物量-时间曲线

从曲线上可以看出，除了物种 1 外，其他 4 个物种的生物量随时间逐渐增加，其中物种 6 成为优势物种。在 1200 天之前，物种 1 的生物量增加。1200 天后，在物种 6 的影响下，其生物量趋于不变。

群落稳定性方面，ICV1 = 0.6316, ICV2 = 0.6316。ICV 增长率为 0.013%。这表明，当物种之间存在激烈竞争时，群落稳定性几乎保持不变。

竞争弱:

本例的物种组成为 1-5 种。这 5 个物种之间存在竞争，但没有两个物种不能共存。结果如图 9 所示。

对于群落稳定性， $ICV1 = 0.6348$, $ICV2 = 0.6384$ 。ICV 增长率为 0.57%。这说明当物种间存在弱竞争时，群落稳定性增加，但增加幅度较小。

共生：

这种情况下的物种组成是物种 1- 3,5 和 10。在这 5 个物种中，物种 1 和物种 5、物种 1 和物种 10 之间存在较为明显的互利关系。

5 种的种间影响因子矩阵如下图所示。

$$\begin{pmatrix} 1 & 0.284 & 0.164 & -0.33 & -0.332 \\ 0.284 & 1 & 0.336 & 0.163 & 0.1 \\ 0.164 & 0.336 & 1 & -0.084 & 0.4 \\ -0.33 & 0.163 & -0.084 & 1 & 0.117 \\ -0.332 & -0.1 & 0.4 & 0.117 & 1 \end{pmatrix}$$

将数据代入微分方程组，我们可以得到图 9 所示的曲线。

曲线显示，各物种的生物量总体呈增加趋势。物种 10 和物种 2 的初始生物量接近。和物种 10，在物种 1 的互惠作用下，物种 10 的生物量在 1200 天后超过物种 2。

群落稳定性方面， $ICV1 = 0.6415$, $ICV2 = 0.7936$ 。ICV 增长率为 23.72%。这表明，当种间存在较强的互利关系时，群落稳定性可以得到很大的提高。

存在不耐旱物种：

我们也使用物种 1-5 进行分析。在这种情况下，我们假设物种 1 和 3 是不耐旱的。

在上一篇文章中，我们将植物的最佳生长湿度定义为 12%。对于抗旱植物，我们将最佳生长湿度定义为 15%。也就是说，在定义抗旱物种时，我们只需改变式(2)中的 m、n 和 c 值。

在求解微分方程时，使用式(2)计算物种 2、4 和 5 的 Q 值。对于物种 1 和 3，使用式(9)计算 q。

$$Q' = m'h^2 + n'h + c' \tag{9}$$

当 $h = 15\%$ 时我们取 $Q' = 1$ ，当 $h = 8\%$ 或 $h = 22\%$ 时取 $Q' = 0$ 。计算结果表明，

$$m' = -\frac{10000}{49}, n' = \frac{3000}{49}, c' = -\frac{176}{49}.$$

我们得到图 10 中的曲线。

曲线显示，物种 3 的生物量在 400 天左右减少到 0，物种 1 的生物量在 800 天左右减少到 0。物种 2、4、5 的生物量稳步增加。这说明不能耐受干旱的抗旱物种在干旱环境下会很快死亡，植物群落稳定性较低。

结果分析：

根据上述分类讨论的结果，当物种类型为互利物种时，植物群落的稳定性可以大大提高。当种型为竞争种时，植物群落可以保持基本稳定。当抗旱物种存在时，植物群落不能保持稳定。

6 复杂环境的潜在影响

6.1 干旱的频率和变化

6.1.1 频率

干旱的频率可能会发生变化。在人类活动的影响下，未来干旱的频率可能会进一步增加。评估干旱频率变化对干旱的影响

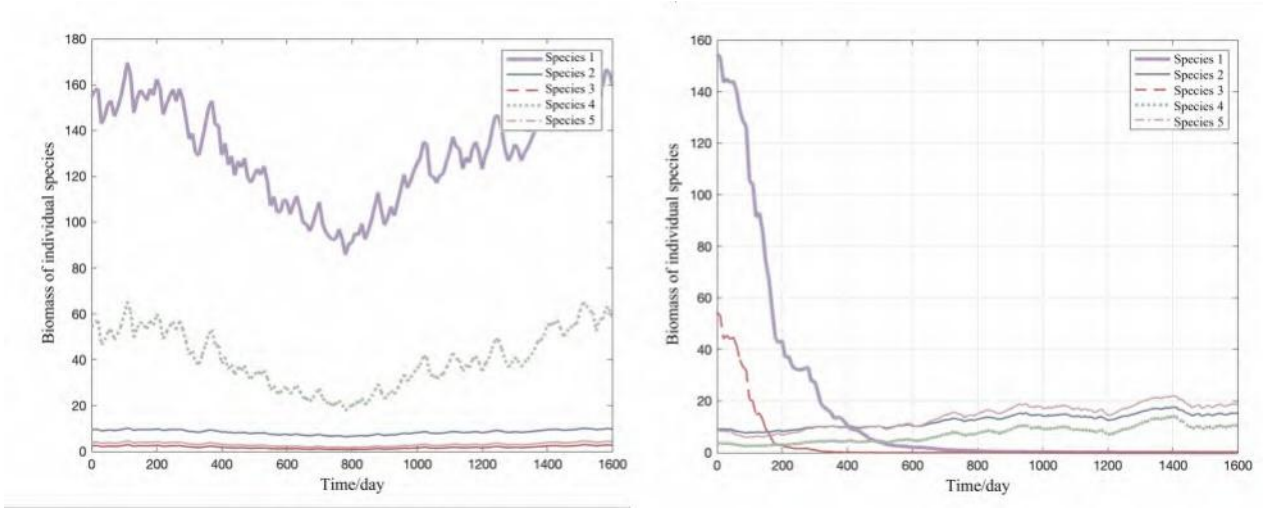


图 10:全部抗旱物种(左)和部分抗旱物种(右)生物量-时间曲线

植物群落的适应性，我们修改了模拟天气条件的参数，使干旱发生的频率更高或更低。
 当天气周期中干旱发生的频率较大时，将相关数据代入微分方程得到图 11 中的曲线。
 曲线显示，当干旱频率增加时，所有物种的生物量都随时间减少。这说明局部生物多样性对植物群落干旱适应性的影响是有限的。

我们可以推测，当干旱不那么频繁时，植物群落将生长良好。然而，与此同时，单株植物受干旱的影响较小。因此，当干旱频率较低时，局部多样性对植物群落干旱适应性的影响要低于干旱频率较高时。

6.1.2 变化范围更广

我们将干旱发生的更大变化定义为干旱发生的范围更广、持续时间更长。
 对于更大规模发生的干旱来说，这意味着干旱可以延伸到本应湿润的地区。而生长在这些地区的植物大多是不耐干旱的物种。从上面的分析可以看出，干旱对抗旱植物来说是致命的。它会严重破坏当地生态系统的稳定。

为了使干旱持续更长时间，我们可以通过改变天气变化周期的长度来模拟这一点。我们以 30 天为一个天气变化周期。与之前的 10 天周期相比，30 天周期明显改善了天气状况的持续时间。当计算机模拟的天气条件为干旱时，持续干旱对植物群落的影响更大。

改变天气周期，我们可以得到图 12 中的曲线。
 曲线显示，当干旱持续时间越长，在一个时间段内，生物量就会减少

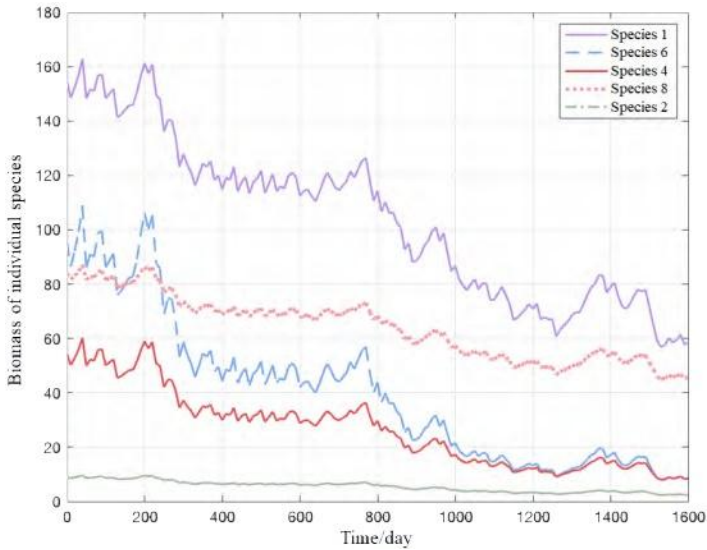


图 11:天气周期中频率更高的生物量-时间曲线

如果模拟条件是干旱，则更多。随着退化不断累积，生物量越来越少。

6.2 不利因素

影响植物群落的不利因素还有很多。主要考虑三个不利因素:空气污染、气候变暖和栖息地减少。

空气污染:

在人类活动的影响下，一些污染物被排放到大气中并逐渐积累。空气污染严重破坏了生态系统。常见的空气污染物包括粉尘、烟雾、雾和其他小颗粒物污染物，以及 SO₂ 和二氧化碳等气态污染物。

在这个模型中，我们主要考虑了 SO₂ 对植物群落的影响。

SO₂ 对叶绿素有漂白作用，叶绿素将叶绿素分子降解为无光合活性的去色色素，从而抑制光合作用和生长发育。结果表明，植物叶绿素含量与大气中 SO₂ 浓度呈负相关，可拟合为线性[14]。我们推断，大气中 SO₂ 的含量会导致植物生物量的下降。

我们将测量 SO₂ 浓度的指标数定义为 k 。 k ，可以用式（10）表示。

$$k = \frac{c - c_0}{c} \tag{10}$$

其中 c 为当前 SO₂ 浓度， c_0 为 SO₂ 浓度的标准值。

气候变暖:

在过去的一个世纪里，人类一直在大量使用化石燃料(如煤、石油等)，这已经排放了大量的二氧化碳 2 和其他温室气体。随着温室效应的不断积累，所吸收的能量与所排放的能量之间出现了不平衡

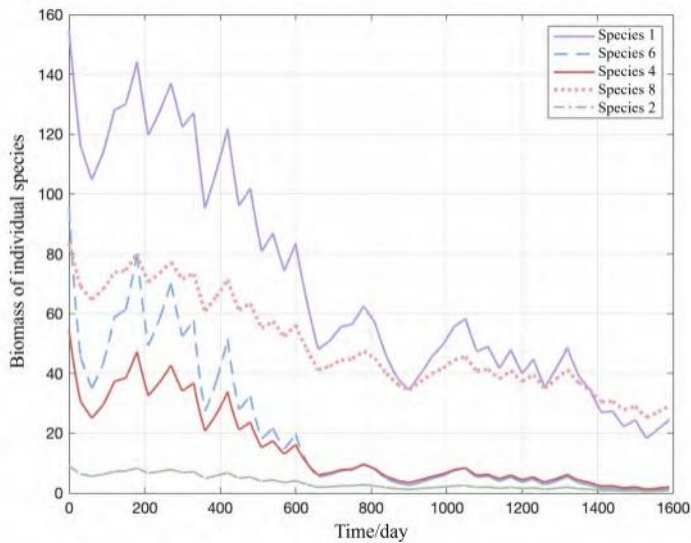


图 12:干旱持续时间更长生物量-时间曲线

地球-大气系统。因此，能量在地球-大气系统中不断积累，导致气温上升，全球变暖。

变暖通过影响光合作用和呼吸作用的速率来影响植物的生长。一般来说，气温升高会降低光合作用的速率，增加呼吸作用的速率。随着温度的进一步升高，呼吸速率降低。

我们假定变暖抑制了植物的生长。年升温速率可表示为 $\frac{dT}{dt}$ 。

栖息地的减少:

随着城市的扩张和工业的发展，大片土地被开发和利用，使生物失去了栖息地。与此同时，森林砍伐、盲目清理、草原盲目放牧、沼泽的不合理开发和水利工程的建设，使栖息地进一步减少。

栖息地的减少，必然导致植物的减少。我们将栖息地减少比定义为 d ，将以上三个因素结合起来，式(3)可以改写为式(11)。

$$\frac{dN_j}{dt} = r_j \cdot N_j \cdot (1 - D - \frac{dT}{dt} - \sum a_{ij} \frac{N_i}{K_j}) \cdot Q \cdot (1 - k) \tag{11}$$

我们设定了这三个因素的标准值。 $k = 0.0167$ ， $dT = 0.025$, $D = 0.08$ 。

在这三个因素中，我们固定两个因素不变，改变一个因素。变化的因子分别是标准值的 1 倍、2 倍、3 倍。

当 k 发生变化时，我们可以得到图 13 中相应的生物量-时间曲线。

从图中可以看出，在 SO_2 的影响下，所有物种的生物量都随着时间的增加而减少。当 k 逐渐增大时，生物量下降速率逐渐增大，甚至出现物种灭绝。

当 $\frac{dT}{dt}$ 发生变化时，我们可以得到图 14 中相应的生物量-时间曲线。

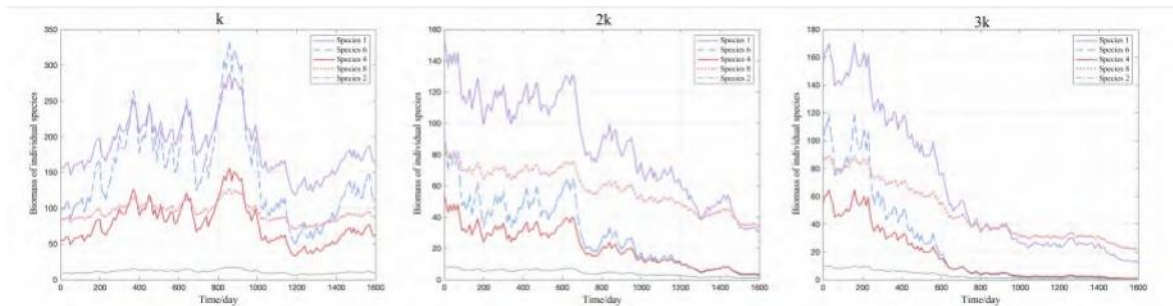


图 13:生物量-时间变化曲线 k

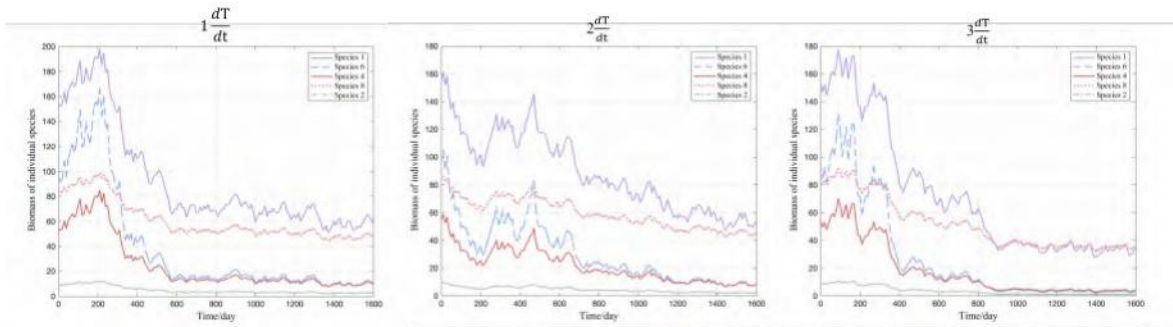


图 14:生物量-时间变化曲线

温度升高对生物量的影响与 SO_2 非常相似。所有物种的生物量都随着时间的增加而减少。当 dT/dt 逐渐增加时，生物量下降速率逐渐增大，甚至发生物种灭绝。

当 D 发生变化时，我们可以得到图 15 中相应的生物量-时间曲线。

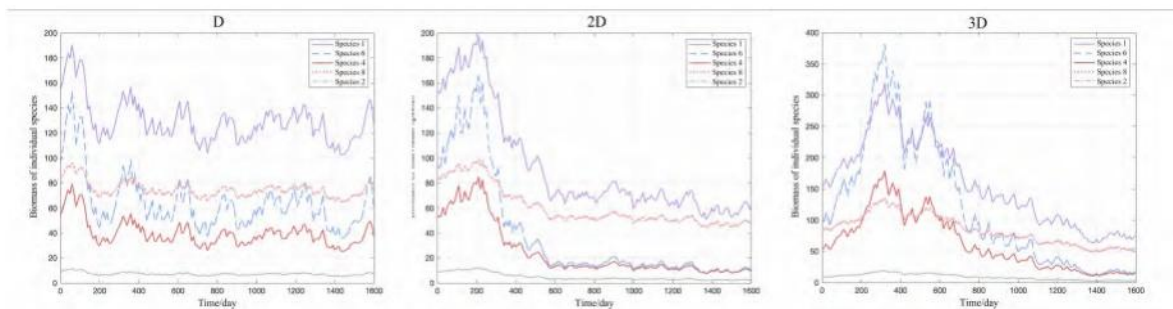


图 15:生物量-时间变化曲线

从曲线上可以看出，在 D 的影响下，所有物种的生物量都随着时间的增加而减少。当 D 增大时，生物量下降速率增大，但不会出现灭绝现象。

6.3 结果分析

在前人的分析基础上，我们发现许多环境因素会影响植物群落对干旱环境的适应性。

在大多数不利因素的影响下，植物群落生物量呈下降趋势，植物群落稳定性降低。这说明植物群落受益于局域生物多样性的能力，与生态系统的自我调节能力一样，存在一定的局限性。在条件恶劣的情况下，植物群落可以从局部生物多样性中获益良多，并保持稳定。然而，这些好处并不是无限的。随着环境的进一步恶化，它无法抵消环境对植物群落的影响。植物群落的稳定性被破坏，一些物种将会灭绝。

7 基于层次分析法确保植物群落长期生存能力的方法

7.1 AHP 模型

为了分析各因素对植物群落长期生存的影响和重要性，我们使用层次分析法模型得到各因素的权重。

层次分析法适用于具有主观性和不确定性的情况，在逻辑上运用经验、直觉和洞察力，非常适合我们的目标。

我们考虑了四个因素的影响:物种数量、物种类型、天气周期和其他环境因素。通过对各个影响因素进行配对比较，根据重要性等级可以得到如下判断矩阵。

$$\begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{3} & 2 & 5 \\ 3 & 1 & 4 & 6 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 1 & 2 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{6} & \frac{1}{2} & 1 \end{pmatrix}$$

我们需要检查判断矩阵的一致性。用一致性比(Consistency Ratio, CR)进行评价。CR 可由式(12)计算。

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{12}$$

其中 CI 为一致性指数，RI 为随机指数。CI 由式(13)计算。

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{13}$$

其中λmax 为判断矩阵的最大特征值。n 和 RI 之间的对应关系可以通过查表得到。

经计算，λmax = 4.07, CR = 0.027 < 0.1。一致性检查通过。每个因素的权重如图 16 所示。

7.2 植物长期生存力建议

建议 1:植物的栖息地需要与其习性相匹配，而更多互利的植物对群落是有利的。

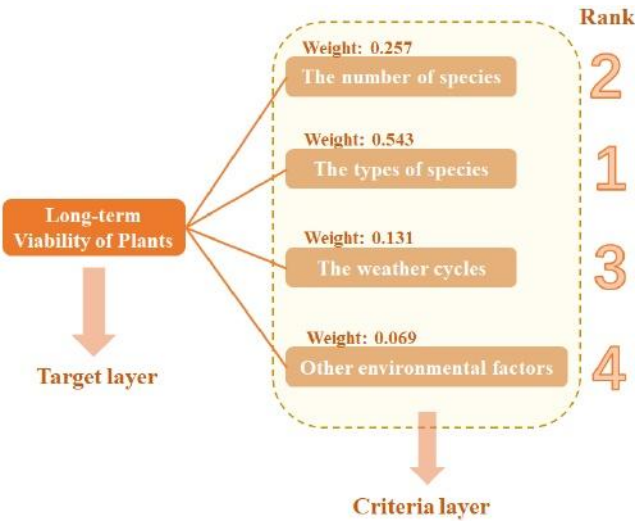


图 16:各因素的权重

从图 16 可以看出，物种的类型权重最高。因此，要保证植物群落的长期生存能力，首先要考虑物种类型。如 5.3.2 所述，当物种之间的关系是共生关系时，植物群落是最稳定的。

建议 2:适当增加物种数量。确保一个植物群落中有足够数量的物种。

第二重的是物种的数量。植物群落可以从局部生物多样性中获益。如 5.3.1 所述，植物群落受益于局域生物多样性所需的最小物种数为 5。因此，对于长期生存能力而言，物种越多，适应性越好。

建议三:保护环境人人有责!

剩下的两个因素权重较小，都与环境有关。在现实生活中，环境因素是无法人为控制的。然而，环境因素实际上直接或间接地受到人类活动的影响。所以，请保护环境，为了生态系统，也为了我们自己。

7.3 对大环境的影响

更大的环境意味着更极端的天气变化，种类繁多的植物，更复杂的种间相互作用，以及更多的影响因素，如动物，物种入侵等。因此，在更大的环境中，会有更多的不规则变化因素。根据我们之前提到的结果，外部干扰因素越多，植物群落的生存能力就越差。所以当在一个变异更大的环境中，有必要确保物种的数量是足够的，以及它们之间的相互作用。

8 敏感性分析

在我们之前的模型中，我们已经完成了每个部分的敏感性分析。我们调整了各种因素的变化范围，如物种数量(见图 7)、物种类型(见图 9-10)、干旱的频率和更广泛的变化(见图 11-12)，以及其他环境影响(见图 13-15)。

从图中我们可以看出，植物群落的生存条件和长期生存能力随着各种因素的变化而有规律地变化。所以可以看出，我们的模型具有很好的敏感性。

在图 17 中，我们分析了 5 个物种的模拟数据。x 轴为生长时间，y 轴为各物种相对于各自初始值随时间变化的对比分析，可称之为相对生物量。

可以看出，在模拟干旱的初始阶段，各物种的相对生物量变化较大，并随着模拟降水和模拟气温的不断变化而上下波动。但经过一段时间的变化后，我们观察图表发现，生物量的变化幅度减小。这说明随着时间的延长，各物种逐渐适应了干旱的环境，生长情况逐渐趋于稳定。物种对于干旱环境的敏感性降低。

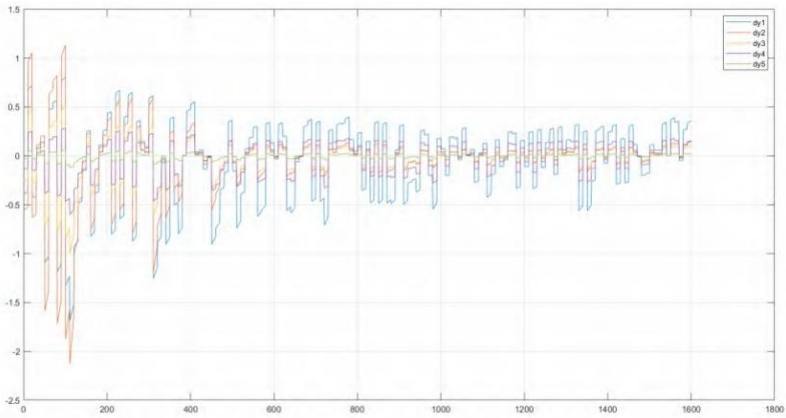


图 17:相对生物量-时间曲线

9 模型评估和进一步讨论

9.1 优点

新颖性通过 spearman 相关系数，得到不同植物物种分布的系数。在此基础上给出植物间的相互作用因子，非常具有创新性和科学性。

全面。在该模型中，我们综合运用了许多经典的和科学的数学模型，如计算生物量变化的微分方程模型和评估不同因素重要性的 AHP 模型模型。我们在这些模型的基础上进行了一些调整、简化和修改，最终构建了我们的整体综合模型。

统一、简洁。我们模型的基本框架和方程是一样的。当考虑更复杂的因素时，我们只是在方程中加入参数，新方程变得更复杂，可以得到很好的结果，模型表现良好。整个植物群落预测模型是统一的、简洁的。

准确严谨。我们使用 shannn - wiener 指数和 ICV 对植物群落的稳定性和生物多样性进行了具体量化，可以更准确地反映群落的抗旱性。而具体的数据也可以帮助我们更好地将我们的结论延伸到更多植物物种的情况。

9.2 缺点

AHP 模型的判断矩阵是在考虑各因素的权重时主观设定的数字。所以在客观性和合理性上可能有些空洞。

现实生活中的数据是连续的。温度和降水一直在变化。但是，计算机模拟很难处理连续数据，所以我们对数据进行分解，这使得连续数据丢失了一些信息。

由于时间限制，我们只分析了几种植物，这些植物一般分布在同一地区，生长习性相似。为了预测气候变化下树木的易感性，还需要从极端干旱期间和之后的各种植物物种组合中获得更多的实验证据。我们的结果可能有一定的局限性，并不能涵盖所有的情况。

9.3 进一步讨论

有证据表明，在干旱胁迫加剧的情况下，由于生态位重叠或竞争效应的增加，物种之间的相互作用可以从积极的相互作用转变为消极的相互作用。[2]植物间的相互作用因子，如土壤湿度的变化和物种种群密度的变化，都会在一定程度上受到影响。下一步，我们可以探索植物间相互作用因子随干旱程度的变化与其他因子的关系，来完善我们的模型。

参考文献

- [1] K. Cherwin and A. Knapp. Unexpected patterns of sensitivity to drought in three semi-arid grasslands. *eclogia*, 169(3):845–852, 2012.
- [2] S. Haberstrh and C. Werner. The role of species interactions for forest resilience to drought. *Plant Biology*, 2022.
- [3] Vjtech Lanta, Jiff Dlezal, Lenka Zemkva, and Jan Leps. Communities of different plant diversity respond similarly to drought stress: experimental evidence from field non-weeded and greenhouse conditions. *Naturwissenschaften*, 99(6):473–482, 2012.
- [4] National Tibetan Plateau Scientific Data Center. <https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/3c4feb37-7f5b-4aa6-b906-3b23dd4c520e>.
- [5] Fang Zhang. The Establishment and Study of The Suitability Model of Plant Growth Environment Based on IT. PhD thesis, Zhejiang A&F University.
- [6] Yuan Ma, Fang Liu, Yuguang Ha, Fangchun Lin, Yuting Liu, Yanan Liu, Zhan Yang, and Jiapeng Wang. Growth characteristics of typical plant communities in Ulanbuh Desert. *Temperate Zone Forestry Research*, 4(2):7, 2021.
- [7] Bin Sun, Bingyu Wang, Jin Feng, Jiachang Jiang, Dngrng Pan, Hui Wang, and Xia Li. Study on the biomass dynamics of *Kalidium flintum* grassland in Hexi Desert. *Chinese Herbivore Science*, 36(5):3, 2016.
- [8] Dnghng Fei. Preliminary study on growth conditions and population reproduction of the wild *Pachynum hendersnii* in the Qaidam basin. *Forestry Science and Technology*, 37(5):3, 2012.
- [9] Xiyi Wang, Shuzhen Peng, Hailiang Xu, Hngb Ling, and Tingting Ma. Dynamic simulation and macro-value evaluation of vegetation biomass in the lower reaches of Tarim River. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, (3):7, 2020.
- [10] Xiaqiang Wang, Min Wang, Xianhua Zhang, Jiaqi Tan, Hui Yuan, and Xiqing Han. Study on the relationship between species diversity and biomass of typical desert grassland communities around Urumqi. *Acta Agrestia Sinica*, (005):030, 2022.
- [11] Tingquan Wang. Analysis of species diversity, spatial pattern and ecological niche of desert plants in Ebinur. Xinjiang University, 2015.
- [12] Chenyang Xue, Xianghu LI, Zhiqiang Tan, and Zhen Li. Plant community stability and its Ecological Science.
- [13] Qiqi Zhang, Guangxuan Han, Feng Lu, Yingfeng Zhu, Xiajie Wang, Peiguang Li, Xiajing Chu, Wenjun He, Dngxue Yu, and Weimin Sng. Effects of different restoration ages on plant diversity and community stability of wetland in Yellow River Delta. *Chinese Journal of Ecology*, 41(7):9, 2022.
- [14] Yuwu Lian, Rnghua Chen, and Daying Huang. Correlation of chlorophyll in leaves and SO_2 in air. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1(4):5, 1990.

附录

some more text Input Matlab source:

```
function D=k5(m,n)
```

```
D=n;
```

```
Q1=weather1();
```

```
Q2=weather2();
```

```
ptins=deset('RelTl',1E-4,'AbsTl',[1E-5,1E-5,1E-5,1E-5,1E-5]);
```

```
[T,XYZPQ]=de45(@(t,y)zq5(t,y,Q1,Q2),m,D,ptins);
```

```
plot(T,XYZPQ(:,1),'clr','#B395DF','LineWidth',1.5);
```

```
hold on
```

```
plot(T,XYZPQ(:,2),'clr','#86A8E5','LineWidth',1.5,'LineStyle','—');
```

```
hold on
```

```
plot(T,XYZPQ(:,3),'clr','#CD5C5C','LineWidth',1.5,'LineStyle','-');
```

```
hold on
```

```
plot(T,XYZPQ(:,4),'clr','#E79FA6','LineWidth',2.5,'LineStyle',':');
```

```
hold on
```

```
plot(T,XYZPQ(:,5),'clr','#A6B9A1','LineWidth',1.5,'LineStyle','-');
```

```
x0=XYZPQ(end:end,1);
```

```
y0=XYZPQ(end:end,2);
```

```
z0=XYZPQ(end:end,3);
```

```
p0=XYZPQ(end:end,4);
```

```
q0=XYZPQ(end:end,5);
```

```
D=[x0,y0,z0,p0,q0];
```