

## 微小真菌:碳循环平衡的捍卫者

### 摘要

真菌作为地球上几乎唯一的木质素分解物种，在全球碳循环中发挥着重要作用。本文通过建立数学模型，分析影响真菌分解木质纤维速率的各种因素，从而加深对真菌群落与生态系统功能关系的认识。

首先，我们建立了一个基于不同种类真菌之间相互作用的逻辑生长模型。考虑真菌的生长模型和耐湿性，建立了真菌在木质纤维上的分解速率模型。然后，我们使用收集的真菌数据集并获得模型的未知参数。接下来，我们选择真菌的组合来测试模型。计算的分解率与实际值的相对误差低至 5.5%。同时，分析了一片固定土地上不同种类真菌之间的相互作用。

其次，考虑到快速的环境波动，我们详细分析了湿度对真菌活性的影响。我们选择一个典型的气候来研究真菌生长和分解速度的短期和长期趋势，以及真菌之间的相互作用。我们发现环境湿度的增加可以促进不同促进程度的真菌生长。同时，当大气趋势发生变化时，各种真菌的相对竞争优势也不同。这将导致真菌群落向不同方向演替。此外，我们还发现，在干旱环境中，耐湿性更强的真菌更容易占据优势地位。

第三，利用 K-means 算法对采集到的真菌数据集进行聚类，分析不同环境下真菌种类和种类组合的优缺点。根据环境湿度的差异，我们发现在低湿度环境中，具有稳定特征的真菌群落更占优势。当环境湿度的变化速率不同时，菌丝延伸速率较慢、耐湿性较强的真菌对环境变化更为稳健。对于气候变化不大的环境，如热带雨林，生长速度较快、耐湿性较弱的真菌更占优势。更何况，特征相似的真菌更容易共存。

第四，环境变化对相对单一的真菌群落的负面影响结果表明，物种多样性越丰富，越能适应环境变化。因此，分解率可以保持在较高水平，这有利于碳循环。

最后，对未知参数的敏感性进行了分析，结果表明该模型适应性强，易于推广。此外，还分析了该模型的优缺点。

关键词:逻辑增长模型；分解率；耐湿性；竞争关系；生物多样性

# 内容

1	Introduction	1
1.1	Problem Restatement	
1.2	Literature Review	
1.3	Our Work	
2	Assumptions and Justifications	2
3	Notations	3
4	Wood Decomposition Model of Multiple Fungi in a Patch of land	3
4.1	Growth of fungi	
4.2	Competition among different species of fungi	
4.3	Decomposition of woody fibers	
4.3.1	Fungal traits impact factors	
4.3.2	Ambient impact factors	
4.3.3	Decomposition model of wood fiber	
4.4	Model Solving	8
4.4.1	Methods and results of solution	
4.4.2	Model testing	
5	Effects of environmental changes on interactions between fungi	10
5.1	Introduction of humidity	
5.2	The short-term trends	
5.3	The long-term trends	
6	Predictions about fungal activities under the various ambient changes	13
6.1	Clustering of fungi	
6.2	Advantages and disadvantages prediction	
6.2.1	Difference of ambient humidity	
6.2.2	Difference of the changing rate of ambient humidity	
6.2.3	Analysis of the advantages and disadvantages of fungi in tropical rain forest	16
7	How does fungal biodiversity impose magic to the carbon cycle	17
8	Sensitivity Analysis	18
8.1	Impact of $\alpha_1$ on decomposition rate	
8.2	Impact of $\alpha_2$ on decomposition rate	
9	Model Evaluation and Further Discussion	19
9.1	Evaluation of Models	
9.2	Further Discussion and future work	
	References	20
	Article	21
	Appendix	23

# 1 介绍

## 1.1 问题重述

真菌作为有机植物物质的主要分解者，在全球碳循环中发挥着重要作用。真菌可以分解植物材料和木质纤维，使碳得以更新并以其他形式使用。真菌群落的多样性可以在生物群落和生态系统功能之间提供有形的联系。因此，真菌是生态系统功能的关键驱动力，对真菌功能的研究对于探索生物多样性、实现生态系统物质循环具有重要意义。

为了探索碳循环和全球气候模型的大规模建模，我们将根据真菌的生长速度和真菌对水分的耐受性，研究影响真菌对木材分解速度的因素。我们的研究需要包括以下任务：

- 建立数学模型描述多种真菌存在下木质纤维的分解。
- 整合不同种类真菌之间的相互作用。
- 对模型和不同种类真菌之间的相互作用进行动态分析，并考虑环境波动对模型的影响。
- 分析各树种或树种组合的相对优势，预测不同环境下的木材分解速率。
- 探索真菌群落多样性对分解速率的影响，预测环境变化时生物多样性的重要性。

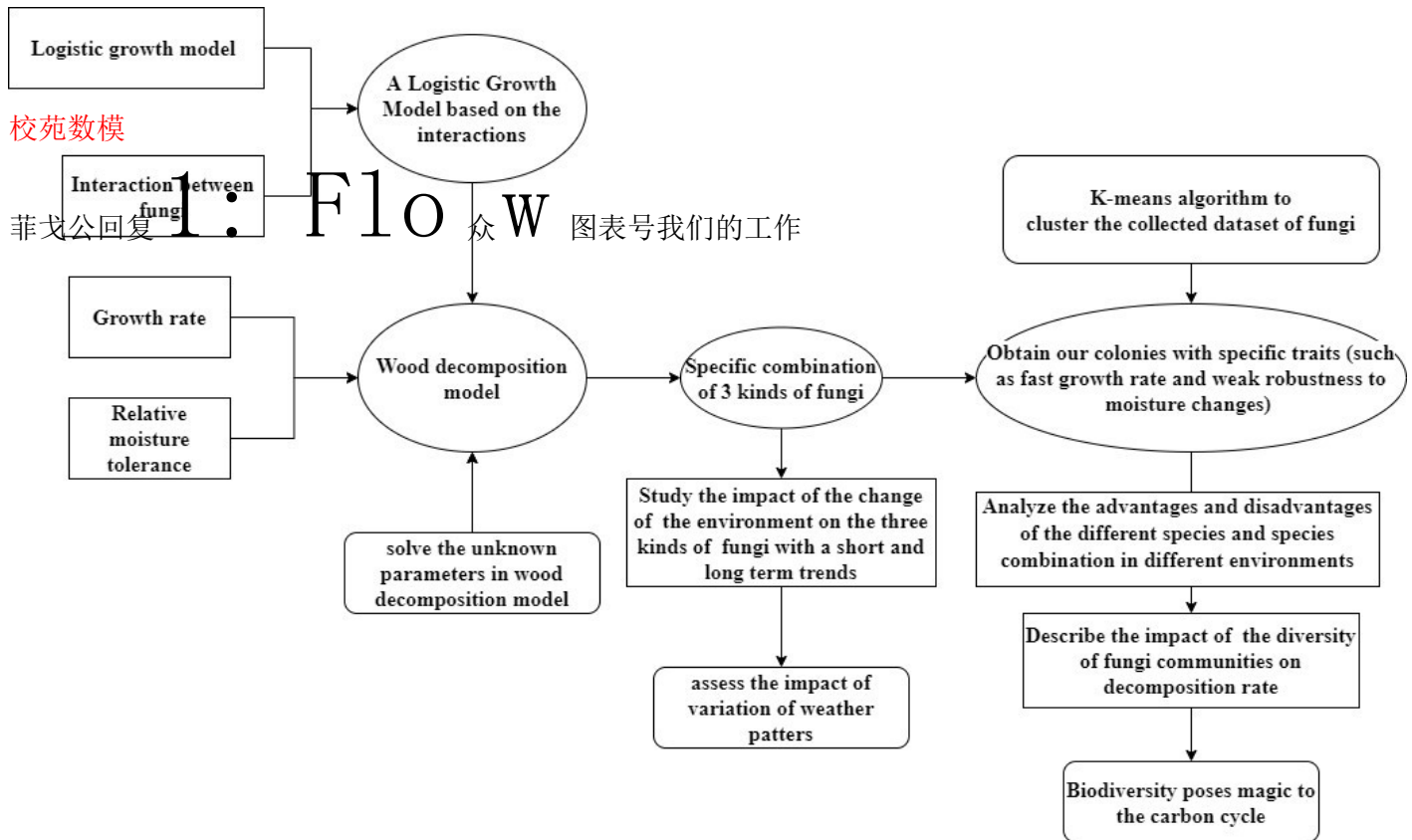
## 1.2 文献评论

许多研究人员先前已经对真菌分解木材做出了贡献。Diogenis A. Kiziridis 等人使用常微分方程和偏微分方程建立空间显式模拟模型，以纳入影响真菌相互作用的因素，从而预测真菌群落的动态[1]。Tiina Rajala 等人的研究发现，木材中的真菌群落依赖于不同地区不同的碳氮比，从而影响木质纤维的分解速率[2]。Daniel S. Maynard 等人设计了一种基于性状的方法，在广阔的空间尺度上探索真菌的优势-耐受性权衡，加强了对真菌生物地理学的理解[3]。在最近的研究中，Nicky Lustenhouwer 等人通过详细的基于性状的分析发现，分解速率与真菌的优势-耐受性历史权衡一致，这提高了预测木材腐烂的能力[4]。上述研究为我们的模型建立提供了广泛的思路。

## 1.3 我们的工作

我们主要构建两个模型来解决这个问题。通过选择具有代表性的真菌组合，研究了环境对真菌活性的影响和生物多样性的重要性。在建立和求解模型后，我们进行了敏感性分析，给出了模型的优缺点，并进行了比较

对未来工作的展望。最后，我们为一大学生物课本写一篇文章，谈谈我们对生态环境中真菌活动的理解。



## 2 假设和理由

为了简化模型，我们做了以下假设：

- 真菌只能无性繁殖。由于模型集中于真菌的营养阶段，我们假设在所研究的真菌中没有性别差异。
- 菌丝体的生长呈圆形向外扩散，具有最大的生长半径。菌丝体的生长通常从孢子的位置开始，并呈放射状向四周扩散。此外，由于环境资源的限制，菌丝体不能无限生长。考虑到菌丝延伸速度是研究的重点，我们做出这个假设来简化模型。
- 真菌对地面凋落物和木质纤维的分解速率是木质纤维随时间的质量损失率。植物材料和木质纤维的分解是碳循环的关键组成部分，所以我们只关注真菌在全球碳循环中的作用。
- 只有真菌活动引起地面枯枝落叶和木质纤维的分解，而木材分解被认为是真菌唯一的营养来源。真菌几乎是

地球上唯一能分解木质素的生物，所以为了更好地分析真菌活性，我们只考虑这一点对木材分解的影响。

- 真菌对木材分解各阶段的影响与木材腐烂周期的中期一致。根据问题提供的研究文章大纲，真菌在其腐烂周期的中期与木质材料的腐烂最为相关。因此，出于建模练习的目的，我们做了这个假设。

### 3 记号

表 1 列出了本文中使用的符号。

表 1:符号

标志	定义
$r$	第 $k$ 真菌的生长半径
$(k)$	
$\pi$	第 $k$ 真菌的菌丝延伸率
$(k)$ 不包括	
空间	真菌生长半径的最大值
$D$ 级 <sup>(k)</sup>	第 $k$ 种真菌竞争排名的标准值 (缩放至 $[0, 1]$ 的范围)
宽度 $m$ <sup>(k)</sup>	标准 $v$ 校的价值苑 $mo$ 数 $isture$ $n$ 模第 $k$ 个真菌的 $iche$ 宽度 (缩放至 $[0, 1]$ 的范围)
$MT$ <sup>(k)</sup>	相对潮湿公 $ure$ $tole$ 众兰斯奥号第 $k$ 种真菌
计算 <sup>(k)</sup> 机二 级	第 $k$ 种真菌的生长速度
	第 $I$ 种真菌与第 $k$ 种真菌竞争排名的相对值
$(k)$	
$M$	由钾分解引起的木质纤维的质量损失 真菌
$(k)$ $L$	
$m1 \cdot$ 马克 斯	木质纤维质量损失的最大值

## 4 一块土地上多种真菌的木材分解模型

### 4.1 真菌的生长

在本文中，真菌是通过菌丝的延伸生长的，菌丝的聚集就是菌丝体。此外，本文研究的真菌均通过菌丝分化产生的孢子进行无性繁殖。由于菌丝体的生长通常从孢子的位置开始，并呈放射状向四周扩散，我们将真菌的生长视为一个同心圆

圆圈扩展过程。半径的延伸速度就是真菌的菌丝生长速度。示意图如图 2 所示。

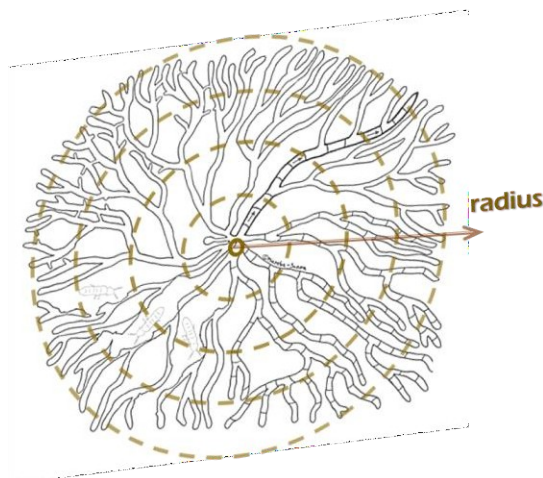


图 2: 菌丝体生长的等效圆图

我们首先考虑在空间和自然资源无限的情况下菌丝体可以无休止繁殖的理想情况。假设菌丝延伸速率为  $v_{ex}$ ，菌丝的生长半径  $r$  应符合下式：

$$\frac{dr}{dt} = v_{ex} \quad (1)$$

由于生长环境有限，菌丝体的生长半径最大值为  $R_m$ ，所以最大生长半径的菌丝体应该符合在式(1)等式(1)的一边。因此，我们引入了逻辑增长模型，然后是等式(1)

可以改写如下：

校苑数模  
公博  
士众  
五.r(1  
号  
r)

(2)

$$\frac{dr}{dt} = v_{ex} R_m \left( 1 - \frac{r}{R_m} \right)$$

在一块固定的土地上，我们认为可能有各种各样的真菌，而每一种真菌有多个殖民地。让  $r_k$  表示同一土地上第  $k$  种真菌的生长半径，

(k)

它应该满足以下等式：

震颤性精神错乱 (写)

$$\frac{dr(k)}{dt} = v_{ex} R_m \left( 1 - \frac{r(k)}{R_m} \right)$$

(1) (k)

此外，我们还应该选择真菌的初始生长半径。各种真菌的初始生长半径相同，为 r0。

$$r(k)_{t0} = r0 \tag{4}$$

最后，我们可以得到以下反映真菌生长半径与时间关系的一阶线性微分方程。



$$\frac{dr^{(k)}}{dt} = \lambda_k r^{(k)} \left( 1 - \frac{r^{(k)}}{R^{(k)}} \right) \quad (5)$$

通过求解上述微分方程，可以得到真菌生长半径与时间的关系。

$$r^{(k)}(t) = R^{(k)} \left( 1 - \exp\left(-\frac{\lambda_k t}{R^{(k)}}\right) \right) \quad (6)$$

## 4.2 不同种类真菌之间的竞争

当多种真菌存在于同一块土地上时，不同种类的真菌之间会发生一定的相互作用。本文将这种相互作用视为不同真菌群落之间的竞争。既然我们假设木质材料是真菌唯一的营养来源，那么不同种类真菌之间的竞争就是营养物质的竞争。

竞争排名是在同等条件下，一种真菌在竞争中相对于其他真菌的优势度量。我们将其引入真菌生长的逻辑模型。对于一种真菌来说，当它与其他类型的真菌竞争时，其他种类真菌的优势和这种真菌的优势之间是有相对价值的。这个相对值将成为阻碍这种真菌生长的一个因素。

假设在一块固定的土地上有  $n$  种真菌群落，那么我们研究其他种类的真菌 ( $I$ ) 对第  $k$  种真菌的影响。第  $k$  种真菌的生长半径满足的方程 (3) 应改写为：

$$\frac{dr^{(k)}}{dt} = \lambda_k r^{(k)} \left( 1 - \frac{r^{(k)}}{R^{(k)}} - \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_{ki} \frac{r^{(i)}}{R^{(i)}} \right) \quad (7)$$

其中  $\alpha_{ki}$  是第  $I$  种真菌与第  $k$  种真菌的竞争排名的相对值，即，

$$\alpha_{ki} = \frac{D^{(k)}}{D^{(i)}} \quad (8)$$

变量  $D^{(k)}$  等级  $D^{(k)}$ ，其值是按  $[0, 1]$  范围缩放的标准值代表第  $k$  种真菌的竞争排名。

因此，我们在模型中引入了不同种类真菌之间的竞争关系。这种竞争关系会阻碍真菌的生长，进而影响真菌对木材的分解速度。

## 4.3 木质纤维的分解

菌丝体作为基本结构与其营养模式相适应。从问题中提供的数字可以发现，真菌在木质纤维分解过程中受到菌丝延伸速度、耐湿性和温度等因素的影响。

因此，在建立真菌分解木质纤维过程的数学模型时，我们将影响分解速率的因素分为真菌性状影响因素和环境影响因素两个方面。

真菌对木质纤维的分解率是木质纤维的质量损失率，即  $d \text{ ML}(t) / dt$ ，其中  $\text{ML}(t)$  是木质纤维中的质量损失率。

#### 4.3.1 真菌特征影响因素

在这一部分中，我们分析了给定地块中的某种真菌  $(k)$ 。

##### ● 增长率 $v(k)_F$

真菌半径的延伸速度被认为是真菌的生长速度，即，

$$(五) (k) ; \frac{\text{博士}(k)}{\text{震颤性精神错乱}} \quad (9)$$

(Delirium Tremens 的缩写)

我们从 34 种真菌的数据集中获得了生长率和分解率之间关系的趋势，如图 3 所示。

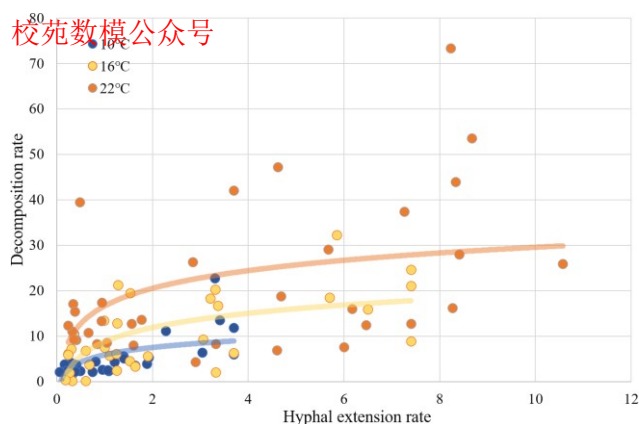


图 3: 分解率-菌丝延伸率曲线

##### ● 相对耐湿性

相对湿度公差公式如下：

$$\frac{MT(k) \text{ 等级}(k)}{MT(k)} \text{ 医学博士 } Width \quad (10)$$

可变宽度

(k)

其值是缩放到 $[0, 1]$ 范围的标准值。

代表水分生态位宽度。水分生态位宽度的定义是能使菌丝延伸速度大于或等于其最大值50%的湿度范围。这

范围

$MT(k)$ 为 $[-1, 1]$ 。

研究发现，水分生态位宽度与菌丝伸展率和竞争排序呈负相关，这与文献中给出的结论一致。能够更好地在更多样的湿度条件下生存的真菌有

木材分解速度较慢。因此，的值越小

$MT(k)$ 是，越强

真菌的耐湿性越强，分解速度越慢。

我们探索了 34 种真菌的相对耐湿性与分解率之间的关系，得到了如图 4 所示的关系曲线。最后发现分解速率与相对耐湿性呈对数关系，即，

糖尿病在

先生

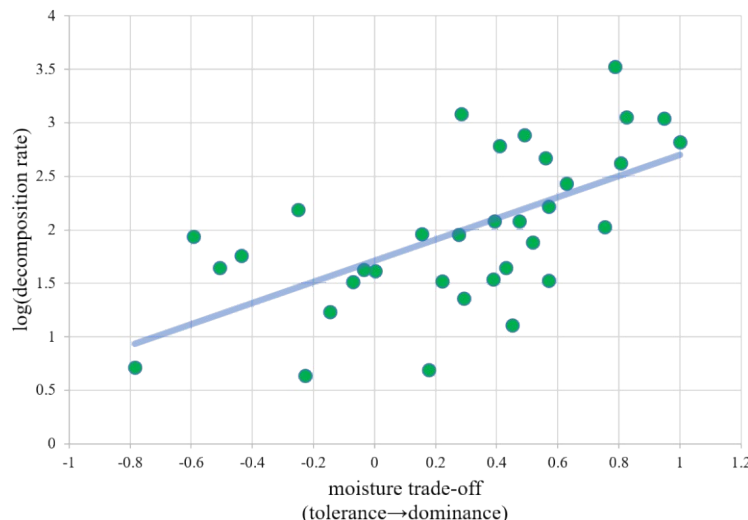


图 4: 对数(分解率)——耐湿性曲线

#### 4.3.2 环境影响因素

相关研究[3]表明，环境湿度等。也会影响真菌分解木质纤维的速度。然而，在这一部分中，我们只讨论了某块土地上的分解过程，并将环境变量视为常数值。在后续讨论环境变化对木质纤维分解速率的影响时，我们将对环境影响因素进行详细分析。

#### 4.3.3 木质纤维分解模型

通过以上分析，当一块固定的土地上存在多种真菌时，真菌的特性(包括生长速度和相对耐湿性)以及不同种类真菌之间的竞争会影响这块土地上木质纤维的分解速度。因此，假设  $M(k)$  代表木质纤维的质量损失

第  $k$  种真菌的分解，质量损失率可表示为：

$$\frac{dM(k)}{dt} = v_F(k) \cdot M(k) \cdot \exp(-\alpha \cdot MT(k)) \quad (11)$$

震颤性  
精神错  
乱  
(Deli  
rium  
Tremen  
s 的缩  
写)

其中  $v_F(k)$  是增长率(由等式 9 确定)； $MT(k)$  是相对湿度  
公差(由公式 10 确定)； $\alpha$  和  $\beta$  是未知的参数。

固定地块内木质纤维的大量损失是单位时间内各种真菌共同作用的结果。同时，考虑

到木质纤维的质量不能无限损失，我们定义了最大质量损失值 ML 最大值，它也可以是

被认为是木头的初始质量。因此，一块土地中木质纤维的分解速率满足以下等式：

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{M}{k} \cdot \left( 1 + e^{-\frac{M}{k}} \right) \quad (12)$$

震顛 (De  
liri  
um  
Trem  
ens  
的宿  
号)

1 最大

4.4 模型求解

4.4.1 解决方法和结果

我们认为  $k_1$  和  $k_2$  的未知参数是以上模型的常数在同样的条件。为了解决模型中的未知参数，我们收集了 34 种真菌的实验数据，包括菌丝延伸率、耐湿性、竞争排名和木纤维分解率。我们选择表 2 所示的三种真菌的六组作为我们解决方案的训练集。然后我们搜索参数  $k_1$  和  $k_2$  的值在合理的范围内，并使用获得的参数计算所有真菌组合的分解速率。通过比较得到的分解率和实际的分解率，我们选择了能使分解率误差最小的参数作为  $k_1$  和  $k_2$  的值。

表 2:六组真菌组合

	真菌 1	真菌 2	真菌 3
第一组	鸡蜜环菌_ FP1 02531 _ C6D	校忱郁茛雷德姆数 a setig 模 erum F P130263 _ B2C	merulius _ tremellosus _ FP15 0849 _ C3F
第二组	蜜环菌_gallica_EL8 _A6F	公丝膜众里亚_加尔号 4A lica SH1 A	亮菌_亮菌_FP102 622_A3C
第三组	蜜环菌_gallica_EL8 _A6F	蜜环菌_鸡_ FP1025 34 _ A5A	蜜环菌_鸡_ FP10253 5 _ A5D
第 4 组	鸡蜜环菌_ FP1 02531 _ C6D	蜜环菌_芥子碱_PR9	蜜环菌_鸡_OC1_A6 E
第 5 组	蜜环菌_鸡_SH1 _A4A	蜜环菌_芥子碱_PR9	亮菌_亮菌_FP102 622_A3C
第 6 组	桑黄_吉尔维斯_HHB 11977_C4H	桑黄_哈蒂吉_DMR94 _44_A10E	多孔盘_摆_HH B13576_B12C

\*真菌数据见参考文献。3.

解决和测试参数  $k_1$  和  $k_2$  的具体步骤如下所示：

第一步:在 34 种真菌中选择 6 组。

步骤 2:搜索未知参数  $k_1$  和  $k_2$  中的步长为 0.01 范围[0, 0.5]，并找到更精确的参数范围，以最小化误差。

步骤3:在精确范围内搜索步长为0.01的参数  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  找到最大限度减少误差的精确值。这些值作为最终参数  $\alpha_1$  和分解模型的  $\alpha_2$ 。

第四步:选择三种细菌的另一种组合,用计算出的参数求解分解率。利用计算值与实际值之间的相对误差来检验我们模型的正确性和参数选择的可靠性。

参数结果如表3所示。

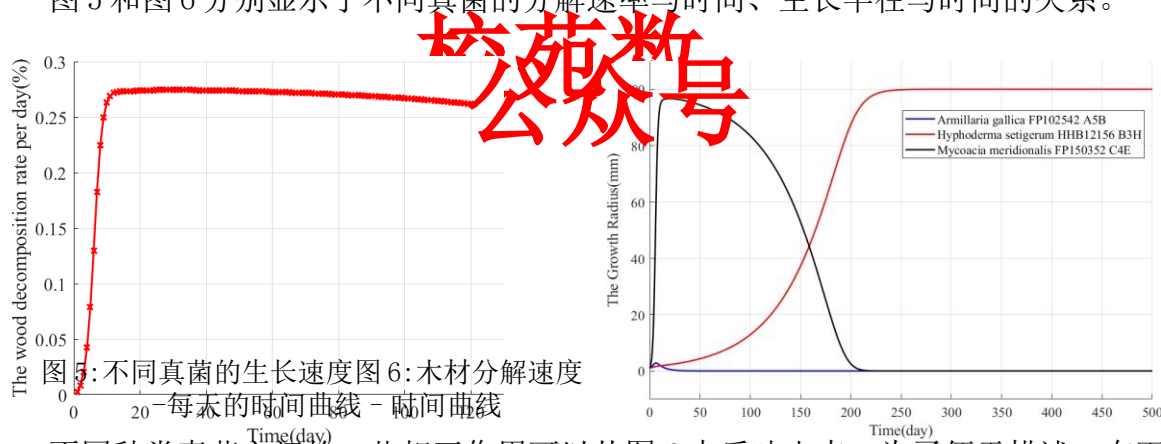
表3:模型参数的求解结果

均方根误差		
1	2	
0.0033	0.1674	123.42

#### 4.4.2 模型检验

为了检验我们的模型和参数的合理性,我们选择了另外三种真菌(蜜环菌\_鸡\_FP102542\_A5B、hypoderma\_setigerum\_hhb\_12156\_B3h、丝状真菌\_FP150352\_C4E)。它们在一定环境下的实际分解率为29.61%。通过对模型的计算,得到分解率为33.48%,相对误差为5.5%。误差在可接受的范围内,证明了我们的模型和参数是合理的。

图5和图6分别显示了不同真菌的分解速率与时间、生长半径与时间的关系。



不同种类真菌之间的一些相互作用可以从图6中反映出来。为了便于描述,在下面的分析中,以蓝、红、黑线为代表的真菌被称为蓝线真菌、红线真菌、黑线真菌。从图中可以看出,黑线真菌的生长半径在短时间内增加到最大,而蓝线真菌只存活前几天,然后死亡。红线内真菌的生长半径在前期增长缓慢。后期黑线真菌半径逐渐减小至0,红线真菌半径增大至峰值。因此,我们可以得出结论,黑色系短期内占主导地位,竞争力最强,红色次之,最弱。

蓝色。但由于某种原因，后期红线内真菌的竞争力高于黑线内真菌。黑色的资源被红色占据，导致红线内的真菌半径达到最大，黑色死亡。

### 5 环境变化对真菌间相互作用的影响

本文的重点是真菌的两个特性:真菌的生长速度和真菌的耐湿性。事实上，真菌活性不仅受真菌性状的影响，还受多种环境因素的影响。Daniel S. Maynard 等人[3]的研究发现，环境湿度对真菌的生长速度有很大的影响，并且两者呈正相关，可以近似认为是线性关系。增长率和分解率之间也存在正相关关系。同时，当湿度条件变化时，不同耐湿性的真菌会表现出不同的活性特征，进而影响分解速率。因此，我们将详细分析环境湿度变化对真菌活性的影响以及不同类型真菌之间的相互作用。

#### 5.1 湿度的引入

在这一部分，我们研究了环境湿度(时间维度)对不同种类真菌数量的影响。真菌数量的变化可以反映不同类型真菌之间的相互作用。我们选择 3 种真菌作为一个群体，研究热带季风气候的短期和长期活动趋势。真菌的种类和特征见表 4。

表 4: 真菌种类的选择

号 码	名字	耐湿性	稳健性
一	蜜环菌_鸡_FP1 公 02542_众 A5B 号	0.00156	强烈的
2	hypoderma _ setigerum _ hhb 12156 _ B3h	0.75337	无力的
3	南方分枝杆菌 FP150352_C4E	0.5695	普通的

我们首先选取热带季风气候代表城市孟买的年降水量数据，如图 7 所示。这些数据可以代表孟买的年湿度随时间的变化。现有真菌数据中，生长速率对应的湿度范围为[-5, 0]，通过数据标准化调整为[0, 1]。然后，生长速率和湿度进行线性拟合。最后，我们得到了真菌湿度和生长速率的三个方程，如下所示：

$$\begin{aligned}
 y1 &= 0.1421 x + 0.1214 \\
 y2 &= 5.4363 x + 0.3293 \\
 y3 &= 6.9485 x + 1.3943
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

其中 x 是环境湿度，以及 y1, y2 分别代表三种真菌的生长速度， y3



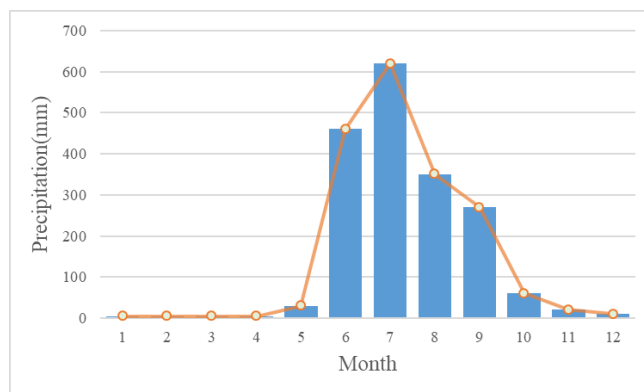


图 7: 孟买年降水量数据

对应上述湿度，孟买年降水量数据范围也调整为 $[0, 1]$ 。这样就可以计算出不同真菌在一定降水条件下的生长速度。

## 5.2 短期趋势

根据三个月的时间跨度，我们将湿度变化趋势分为三类：增加湿度、减少湿度和引起干旱。然后，利用建立的模型求解真菌分解率的变化，从而分析真菌分解率的变化真菌之间的短期相互作用。

校苑数模公众号

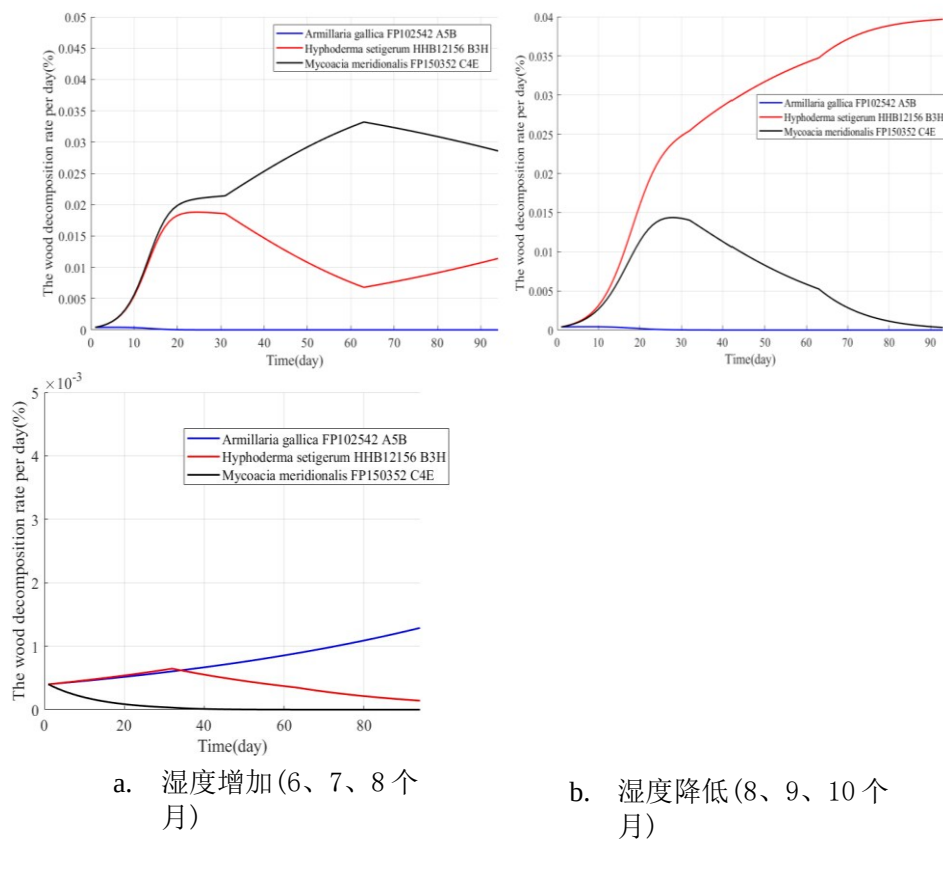


图 8: 短时间内分解率随时间的变化

从图 7 可以看出，降水较多的 6、7、8、9 个月的真菌分解率远好于降水较少的 10、11、12 个月。如图 7 (a) 所示，真菌 1 的分解速率在早期处于非常低的水平，不久后分解停止。这是因为真菌 1 号耐湿性强，生长速度慢，所以前期处于劣势，被淘汰。从等式 (13) 可以看出，真菌 3 的生长速率随着湿度的变化比真菌 2 变化得更快。由于分解速率与生长速率成正比，6-7 月湿度增大时，分解系统中以真菌 3 号为主；1-8 月湿度降低

时，真菌 3 号因增长速度较快而处于劣势。

至于图 7 (b), 与上述分析类似, 在 8 月至 10 月湿度下降期间, 真菌 2 比真菌 3 具有优势, 因为其生长速度较慢。从图 7 (c) 可以看出, 当环境相对干旱, 湿度变化幅度不大时, 菌类 1 在竞争过程中逐渐显示出优势。因此, 我们认为当菌株的分解速率处于较低水平时, 耐湿性较强的真菌更容易在干旱环境中占据优势地位。

综上所述, 当大气湿度水平和变化趋势存在差异时, 真菌群落之间的相互作用存在差异, 这将导致真菌群落在短期内向不同方向成功, 即群落的优势种不同。

### 5.3 长期趋势

我们以 6 月份为起始日期, 分析今年各种真菌的生长情况和木材的分解速度。结果如图 9 和图 10 所示。

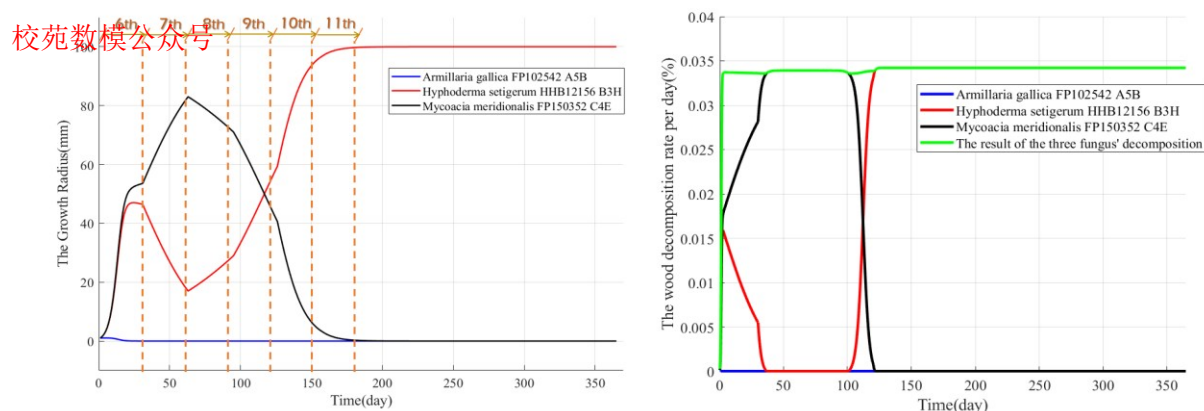


图 9: 生长半径随时间的变化图 10: 真菌长期不同类型的木材分解速率

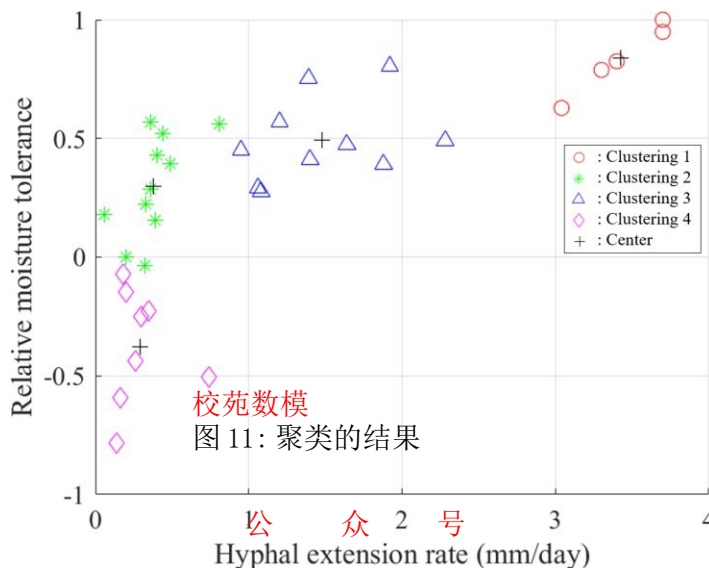
如图 9 所示, 在三种真菌相互作用的过程中, 真菌 1 由于生长速度慢, 一直处于劣势。湿度增加前期, 菌 2 在竞争中处于劣势, 但后期随着湿度逐渐降低, 菌 2 的生长速度逐渐加快, 最终占据优势地位。结合短期趋势分析, 这与其稳健性较好, 即增速较为稳定有关。同时也证实了耐湿性更强的真菌更能适应环境更剧烈的变化, 处于优势地位。

同时, 生长速度的变化影响木质纤维的分解速度。从图 10 可以看出, 在前期, 当真菌 3 在竞争中处于优势地位时, 木质纤维的分解速度也在增加。同时, 真菌 2 的分解速率被抑制到非常低的程度。值得注意的是, 图 10 中的纵坐标表示日分解木纤维质量占总质量的百分比。然而, 随着湿度的降低, 真菌 2 的生长速度增加, 木质纤维的分解速度也增加。同时, 真菌 3 对木质纤维的分解速率受到抑制。在这片固定的土地上, 真菌 2 是优势种。

## 6 对各种环境变化下真菌活动的预测

### 6.1 真菌聚类

在分析单个物种和物种组合时，为了便于讨论，将 34 种真菌进行了聚类。以菌丝伸展率和相对耐湿性为特征量，用 K 均值得到聚类结果，如图 11 所示：



通过积极的耐湿性分析，我们得出结论，关系越大值越大，真菌对环境湿度变化的鲁棒性越弱。因此，根据聚类结果，我们总结了四类真菌的特征，并分别列于表 5。具体分类结果见附录。

表 5: 四种真菌的特征

	聚类 1	聚类 2	聚类 3	聚类 4
增长率	快的	慢的	慢的	慢的
对湿度变化的鲁棒性	无力的	较弱的	较弱的	更强壮的

为了分析环境湿度对不同物种和物种组合的影响，我们制作了上述四种真菌的菌丝延伸速率与湿度的关系，如图 12 所示。为了描述各种真菌菌丝延伸速率随湿度变化的总体趋势，增加了趋势线来区分变化速率。我们认为极高的湿度在自然环境中是罕见的，所以不考虑菌丝延伸速度的下降阶段。

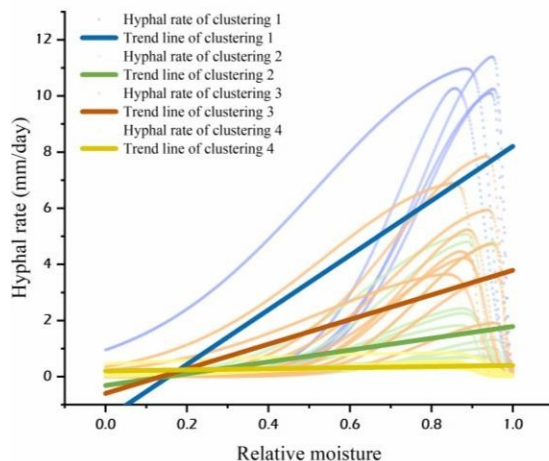


图 12: 四种真菌的菌丝延伸速度和湿度之间的关系

图中四条趋势线的方程如表 6 所示。

表 6: 趋势线方程

聚类 1	聚类 2	聚类 3	聚类 4
$y1 \ 9.72 \ x$	$y2 \ 2.10$	$y3 \ 4.39$	$y3 \ 0.20$
$1.51$	$x \ 0.32$	$x \ 0.60$	$x \ 0.20$

## 6.2 优缺点预测

这里我们用真菌的木材分解率来衡量物种的优劣。如果随着时间的推移，一种真菌的分解速率大于另一种，我们认为分解速率较高的真菌具有优势。

### 6.2.1 环境湿度差异

选取干旱半干旱地区年平均降水量的值，通过数值范围变换，得到干旱地区的相对湿度值为 0.08，半干旱地区为 0.15。

#### ● 干旱地区

干旱地区不同类型真菌的木材分解速率如图所示

13.

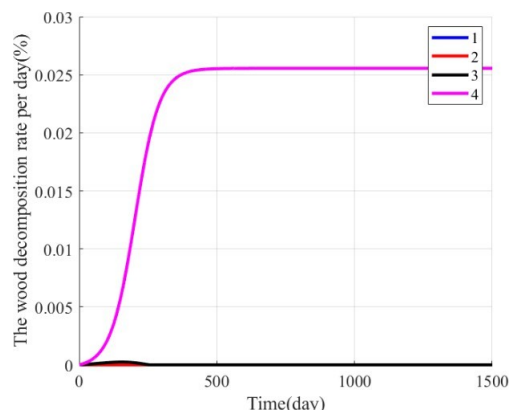


图 13: 干旱地区木材分解率随时间的变化

曲线 4 代表菌丝延伸速度慢、耐湿性强的真菌种类；曲线 1 代表菌丝延伸速度快、耐湿性弱的真菌种类；曲线 2、3 的菌丝延伸速率和耐湿性不突出。曲线 4 的木材分解速率在开始时增加，约 400 天后达到峰值，然后保持不变。

该图表明，即使真菌 1 的木材分解速率在合适的温度下相对较大，但由于其耐湿性的限制，在干旱条件下其分解速率低于其他三种真菌。相比之下，由于其优异的耐湿性，真菌 4 的分解速率与最佳条件相比变化不大，高于其他三种真菌。因此，我们得到了第一个预言。

预测 1: 在环境湿度较低的情况下，特征较为稳定的真菌群落处于优势地位。相反，特性不稳定的真菌群落即使其木质纤维分解率高，也处于劣势。

### ● 半干旱地区

从图 14 可以看出，真菌 1 的木材分解率在增加。在其他三种真菌中，它们的木材分解速率先增加后降低。

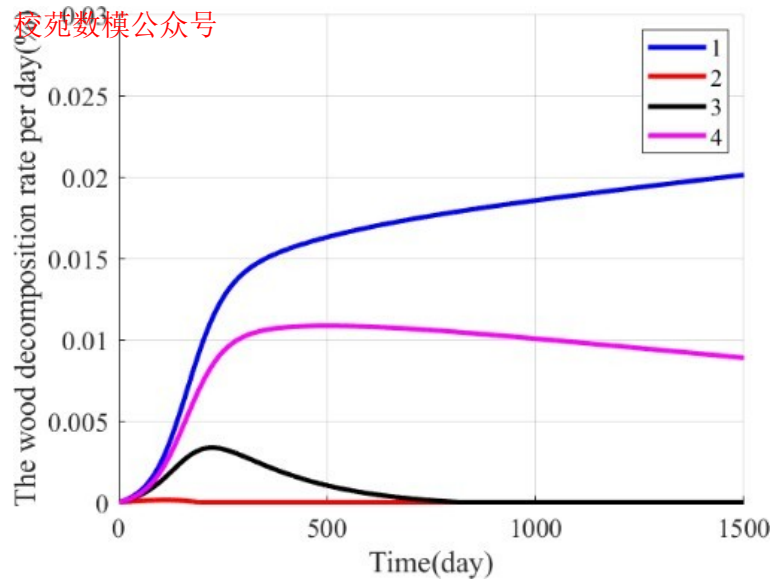
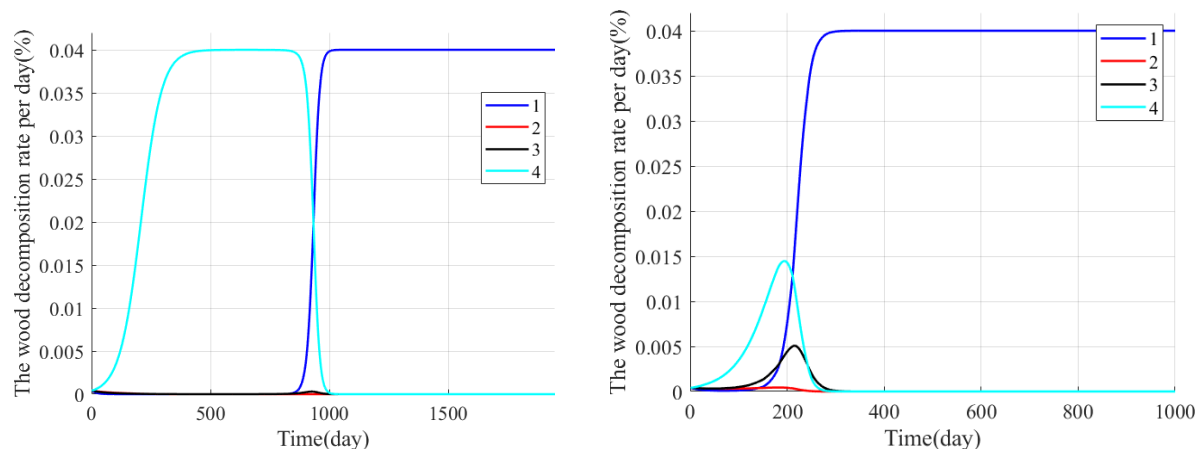


图 14: 半干旱地区木材分解率随时间的变化

在半干旱气候中，真菌 1 是所有类型真菌中最具竞争力的。因此可以推断，日分解率增加幅度最大的物种更具竞争力。至于其他三种真菌，它们的木材分解速率先增加后减少。真菌 4 的竞争力接近真菌 1，因此可以与真菌 1 长期共存。总的来说，在半干旱地区，真菌 1 号和真菌 4 号的组合比其他两种具有更大的竞争优势。

## 6.2.2 环境湿度变化率的差异



a. 分解速率随着湿度的缓慢变化而变化

b. 分解率随着湿度的快速变化而变化

图 15:不同湿度生长速率下生长半径随时间的变化

首先，我们选择合适的湿度范围 $[0.1, 0.7]$ ，分别以 $0.005$ 和 $0.2$ 的上升速率调整湿度值。左图为上升率 $0.005$ ，右图为上升率 $0.2$ 。

从图 15 可以看出，当环境湿度变化速率较慢时，真菌 4 维持最大木材分解速率的时间比环境湿度快速变化速率下的真菌要长，所以，我们得到了第二个预测。

预测二：在周围环境适合生物生存的条件下，环境变化速率越慢，多物种共存的可能性越高，群落的生物多样性越丰富。

利用这一分析，我们研究了温带海洋气候和温带季风气候中真菌群落的演化，发现温带海洋气候中真菌群落的多样性比温带季风气候中真菌群落的多样性更丰富，这与我们的分析是一致的。

此外，图 15 (b) 还表明，真菌 4 比真菌 3 具有更强的保持稳定性以抵抗环境变化的能力。于是，我们得到了第三个预测。

预测 3：菌丝延伸速度较慢、耐湿性较强的真菌对环境变化更为稳健。也就是说，在反复的环境变化影响下，耐湿性较强的真菌优势更大。

## 6.2.3 热带雨林真菌的利弊分析

热带雨林的气候特点是全年高温多雨，因此其环境湿度维持在较高水平，变化不大。根据数据，热带雨林气候的月平均降水量为 200 毫米。然后，我们绘制了热带雨林气候下木材分解速率与时间的关系曲线。说明真菌在这种气候条件下占优势。

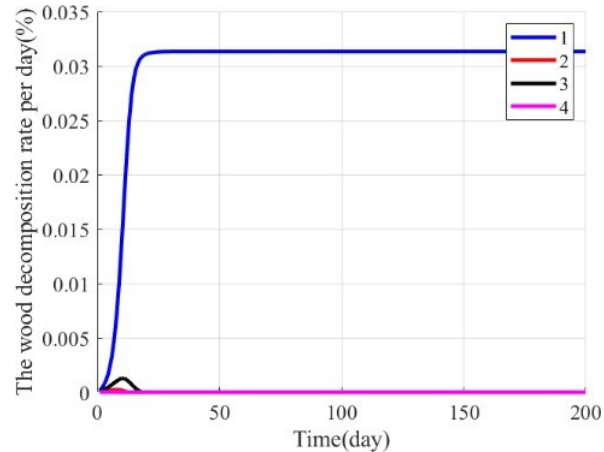


图 16: 热带雨林木材分解率随时间的变化

此外，我们在聚类 1 中选择另一种真菌，而不是聚类 2 中的真菌，并绘制以下图像。结果表明，红线和蓝线的木材分解率长期保持较高值，可以进行第四次预测。

预测 4: 具有相似特征的真菌更有可能在一片固定的土地上共存。

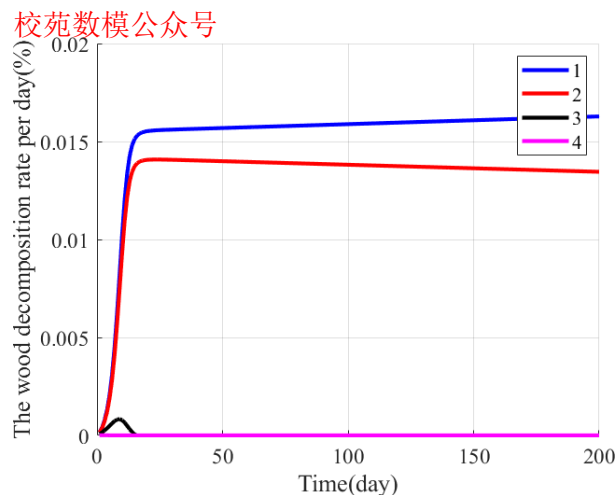


图 17: 木材分解率随时间的变化

## 7 真菌生物多样性如何给碳循环带来魔力

众所周知，如果没有生物多样性，一旦发生特定的气候变化，地球将束手无策。那么生物多样性如何作用于生态循环系统呢？本节以真菌为例，研究它们在碳循环中的重要作用。

我们仍然使用三种特定的真菌(蜜环菌\_鸡\_FP102542\_A5B、hypoderma \_ setigerum \_ hhb 12156 \_ B3h、丝状真菌\_FP150352\_C4E)来定性推导真菌生物多样性对系统分解地面凋落物效率的影响。在 Capture 5 的结果分析中，我们已经意识到在热带季风气候中，真菌的种类从 3 种减少到 1 种，种群逐渐趋于单一(如图 18 所示)。因此，我们可以预测如果一个



具有负面影响的环境变化是添加到一种仍然活着的真菌，这种真菌也会趋于死亡。

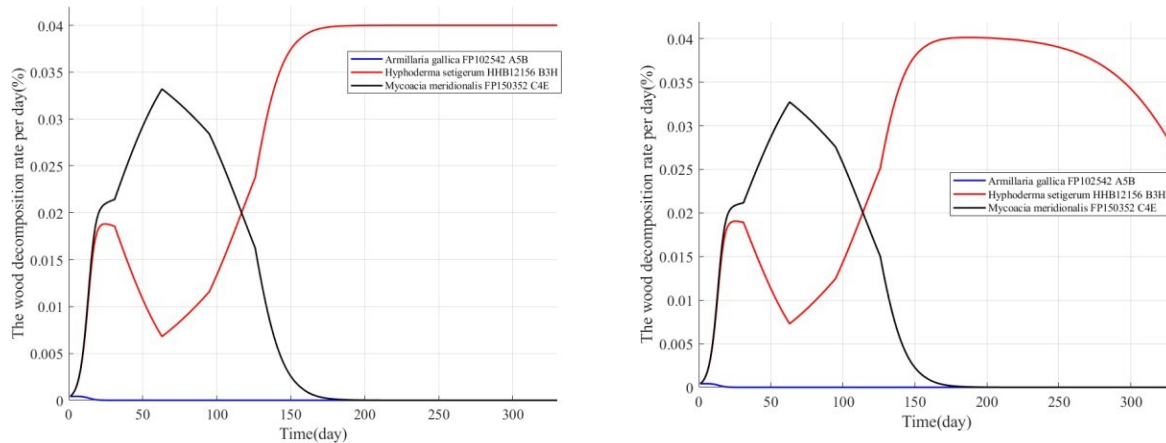


图 18:自然演替图 19:人工干预

为了验证我们的猜想，我们在第 175 天之后将湿度降低到 0.01 (这将对存活的真菌 *hypoderma\_setigerum\_hhb\_12156\_B3H* 产生负面影响)。结果如图 19 所示。可以清楚地看到，在负面气候变化的影响下，幸存真菌的分解速度逐渐降低，最终会使整个真菌群落灭绝。因此，该系统不能很好地适应剧烈的环境变化。

相反，如果一个系统的物种多样性非常丰富，那么，当当地气候发生变化时，就会有不同的物种占据优势地位，从而弥补了原有优势真菌数量减少而导致的木质纤维分解率下降。因此，分解系统能够很好地适应环境的变化，分解率一直保持在较高水平，因此碳循环能够顺利持续。

## 8 灵敏度分析

在分解率模型中， $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  是未知参数，它们是通过我们上面的算法计算。它们对模型的结果有影响分解速度。在这一部分，我们改变了  $\alpha_1$  的值和  $\alpha_2$  人为地评估我们模型的敏感性。

### 8.1 $\alpha_1$ 对分解速率的影响

为了评估  $\alpha_1$  对分解率的影响，我们将  $\alpha_2$  的值固定为 0.1674。然后，我们将  $\alpha_1$  值设置为 0.0023、0.0033、0.0043，并绘制每天的木材分解率-时间曲线。如图 20 所示，每天木材分解率的峰值多种多样，这与  $\alpha_1$  的价值正相关。总之， $\alpha_1$  的价值在于对模型的准确性至关重要，这意味着模型对  $\alpha_1$  很敏感。结果表明，该模型适应性强，易于推广。

## 8.2 $\alpha_2$ 对分解速率的影响

为了评估  $\alpha_2$  对分解率的影响，我们将  $\alpha_1$  的值固定为 0.0033。然后，我们将  $\alpha_2$  值设置为 0.1574、0.1674、0.1774，并绘制木材分解率每天-时间曲线。在图 21 中，我们还可以看到木材分解的各种峰值  $\alpha_2$  价值变化时的每日汇率。然而，与  $\alpha_1$  的影响相比  $\alpha_2$  对模型的准确性意义不大。该模型对  $\alpha_2$  的变化具有鲁棒性。

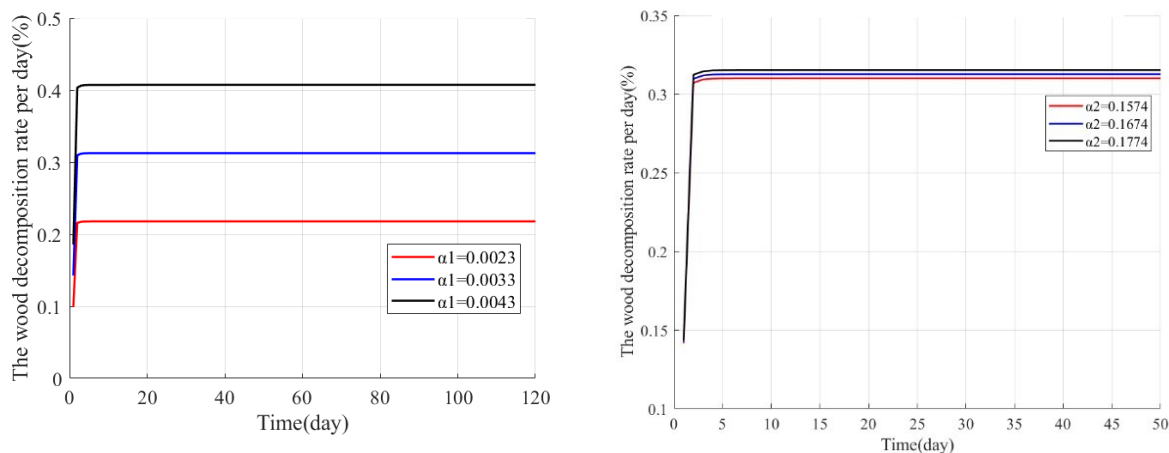


图 20: 木材分解率变化 ( $\alpha_1$ ) 图 21: 木材分解率变化 ( $\alpha_2$ )

## 9 模型评估及进一步讨论

### 9.1 模型评估

微生物的分解是碳循环中非常重要的一部分。通过建立木材分解和真菌生长的模型，我们完美地满足了问题的要求，得出了一系列关于环境变化对细菌种类的影响和生物多样性的结论。

在我们的建模过程中，我们设置了合理的假设来简化我们的模型。同时，进行了灵敏度分析，验证了模型的稳定性。

我们的模型的具体优势如下：

- 我们采用了包含真菌之间竞争的物流增长模型，以便很好地模拟物种之间的相互作用。此外，我们还合理地分析了不同特征的物种在不同环境中的优势和劣势。
- 未知参数的计算是科学的。合理的训练集和测试集帮助我们确定参数的准确性。

但是，我们的模型仍然有以下缺点：

- 我们的假设只考虑了影响真菌分解的两个参数，忽略了内源和外源因素。

- 我们只能使用现有的实验数据集来计算我们模型中的未知参数值，生物领域的大多数预测只能进行定性预测。
- 我们的模型直接以每个聚类中心的耐湿值和伸长速率值作为代表该聚类特征的值，这可能导致在分析物种间的相互作用时出现一些误差。

## 9.2 进一步讨论和今后的工作

在我们的模型中，我们只讨论了不同环境条件下真菌相互作用和分解速率的变化。但是我们的工作只局限于真菌的观点。未来的工作应该集中在我们是否可以人工改变天气条件，以对碳循环产生积极影响的方式影响真菌分解过程。这项理论研究可能为全球变暖提供一个合理的解决方案。

## 参考

- [1] 真菌对空间竞争的模拟:朝向群落动态的预测。离散和连续动力系统-系列B 25, 4411-4426 (2020)。
- [2] 腐烂挪威云杉真菌群落动态与基质质量的关系。北方森林中的原木。FEMS 微生物学院 81, 494-505 (2012)。
- [3] 梅纳德, D. S . 等。跨大空间尺度真菌性状表达的一致权衡。《自然微生物学》4, 846-853 (2019)。
- [4] 基于特征的真菌对木材分解的理解。  
*美国国家科学院学报* 117, 11551-11558 (2020)。



## Chapter 1 — Fungi

### 真菌扮演什么角色 在地球的地球化学循环中？

真菌作为植物材料和木质纤维分解者的重要成员，在全球碳循环中发挥着极其重要的作用。真菌的生长速度和对水分的耐受性会影响分解速度，两者呈负相关。此外，环境变化会通过影响不同真菌之间的相互作用来影响分解过程，不同的环境变化模式会产生不同类型的影响。最后，真菌群落的多样性可以保证分解系统的抗干扰能力和恢复能力。

地球生物圈中的碳元素通过碳循环进行交换、转化和更新，碳循环是地球化学循环的重要组成部分。作为植物材料的主要分解者

碳循环。相关研究[1]表明，真菌的某些性状对其分解速率起决定性作用，这些性状之间一定存在一定的相关性。例如菌丝延伸速度快的菌株往往不能适应快速变化的环境，但其分解速度较高。此外，环境因素也会影响真菌的分解速度。

在存在多种真菌的情况下，如何描述地面枯枝落叶和木质纤维上真菌群落的分解过程？不同变化模式下的环境因素如何影响真菌群落的演替和分解？系统中真菌群落的多样性如何提高碳循环效率？通过对上述问题的讨论，对更好地理解真菌在生态系统中的作用具有指导意义。

首先，我们考虑在多种真菌存在的情况下，给定地块上的木质纤维被真菌活动分解。引入逻辑生长模型来描述真菌的生长速度

是影响真菌分解速度的第一个变量。同时，我们收集了相关的真菌数据集来分析相对耐湿性和分解率的作用。在此基础上，将相对耐湿性作为第二变量引入真菌分解速率模型。

通过拟合，分别得到与这两个变量相关的两个未知参数的值。利用得到的分解率模型预测一个新的物种组合，预测值与实际值的相对误差为 5.5%，证明了模型的可靠性。





## 第4章 — Fungi

然后，我们在模型中引入一个环境变量，即相对湿度。相关研究[2]指出，环境湿度的增加会在很大范围内促进真菌的菌丝延伸速度。因此，我们将湿度对真菌生长速率的影响应用到模型中，并通过加入湿度波动来分析真菌分解活性的变化。

我们选择了一种典型的气候类型——热带季风气候，并将这种气候类型一年内相对湿度的变化应用于真菌组合的分解活动。通过分析，得出以下关于短期和获得长期趋势：

- 当大气湿度变化趋势，短期内真菌群落向不同方向成功，即群落优势种不同。
- 耐湿性较强的真菌更容易在干旱环境中占据优势地位
- 耐湿性较强的真菌更能适应环境中更剧烈的变化，处于优势地位。

在分析了典型气候下真菌的分解活动后，我们试图预测各种气候模式下各种物种的优缺点以及可能持续存在的物种组合。获得的预测如下：

### 参考

- [1] 基于特征的真菌对木材分解的理解。美国国家科学院学报 117, 11551–11558 (2020)。  
[2] 梅纳德, D. S. 等。跨大空间尺度真菌性状表达的一致权衡。《自然微生物学》4, 846–853 (2019)。

- 预测 1: 在环境湿度较低的情况下，性状较为稳定的真菌群落处于优势地位。相反，性状不稳定的真菌群落，即使其木质纤维分解率高，也处于劣势。
- 预测 2: 在环境适合生物生存的条件下，环境变化速率越慢，多物种共存的可能性越高，群落的生物多样性越丰富。
- 预测 3: 菌丝延伸速度较慢、耐湿性较强的真菌对环境变化更为稳健。
- 预测 4: 具有相似特征的真菌更有可能在一块固定的土地上共存。

最后，讨论了真菌群落多样性对碳循环过程的影响。如果一个系统的物种多样性非常丰富，那么，当当地气候发生变化时，就会有不同的物种占据主导地位。

这可以弥补原优势真菌数量减少造成的木质纤维分解率下降。因此，分解系统能够很好地适应环境的变化，分解率一直保持在较高水平，因此碳循环能够顺利持续。

同样，生物多样性对任何生态系统都特别重要。生产者、消费者和分解者的多样性确保了生态系统中各种化学元素的循环，并维持了各组成部分之间的正常能量流动。

## 附录

## ● 聚类结果：

使聚集	真菌种类
聚类 1	merulius _ tremullusa _ FP 102301 _ C3E
	merulius _ tremellosus _ FP 150849 _ C3F
	phlebiquis _ flavidoalba _ FP 150451 _ A8G
	Phlebia_acerina_MR4280_B9G
	Phlebia_acerina_DR60_A8A
	蜜环菌_鸡_FP102542_A5B
	A4A 蜜环菌
	蜜环菌_芥子碱_PR9
	亮菌_亮菌_TJV93_261_A1E
	Fomes_fomentarius_TJV93_7_A3E
聚类 3	hypoderma _ setigerum _ FP 150263 _ B2C
	南方分枝杆菌_FP150352_C4E
	桑黄_哈蒂吉_DMR94_44_A10E
	桑黄_刺槐_FP135708_A10G
	桑黄_刺槐_AZ15_A10H
	巴尼克/马克
	血螭_PR_SC_95_A11C
	Hyphodonia _ 硬壳_HHB13392_B7B
	hypoderma _ setigerum _ hhb 12156 _ B3h
	Laetiporus _ 针叶树种_HHB15411_C8B
	香菇_海百合_PR2058_C1B
	phlebiquis _ flavidoalba _ FP 102185 _ B12D
	桑黄_吉尔维斯_HHB11977_C4H
	多孔盘_摆_HHB13576_B12C
	裂褶菌_公社_TJV93_5_A10A
	裂褶菌_公社_PR1117
	酪丝菌_奇奥尼乌斯_HHB11933_B10F
	蜜环菌_鸡_FP102531_C6D
	蜜环菌_鸡_EL8_A6F
	蜜环菌_鸡_FP102534_A5A
	蜜环菌_鸡_FP102535_A5D
	蜜环菌_鸡_HHB12551_C6C
	蜜环菌_鸡_OC1_A6E
	亮菌_亮菌_FP102622_A3C