

全球变暖情景下武陵山喀斯特地区植物群落干旱性特征分析

朱文艳, 庾清*, 陈茜*

吉首大学数学与统计学院, 湖南 吉首

收稿日期: 2024年2月26日; 录用日期: 2024年3月28日; 发布日期: 2024年4月30日

摘要

武陵山喀斯特区域是石漠化重点治理区之一, 探讨全球变暖情景下武陵山喀斯特石漠化地区植物群落演替是维持生态可持续发展的关键问题。本文以武陵山喀斯特地区为背景首次提出了物种生态位宽度的概念, 并分别从武陵山喀斯特地区植被时空变化、气候与环境、植物群落抗旱生理因素三个方面分析了武陵山喀斯特地区植物群落干旱性特征。在此基础上, 本文构建了基于Beverton-Hot和Lotka-Volterra模型的生态位宽度演替模型和NDVI演替模型, 并展示了演替模型的应用性。本研究对全球变暖情景下武陵山喀斯特地区的生态保护具有一定的参考意义。

关键词

武陵山喀斯特地区, 生态位宽度, 植物群落, 干旱性特征, 演替模型

Analysis of Aridity Characteristics of Plant Communities in the Karst Area of Wuling Mountain under Global Warming Scenarios

Wenyan Zhu, Qing Tuo*, Xi Chen*

College of Mathematics and Statistics, Jishou University, Jishou Hunan

Received: Feb. 26th, 2024; accepted: Mar. 28th, 2024; published: Apr. 30th, 2024

Abstract

The karst area of Wuling Mountain is one of the key control areas of rocky desertification. It is a

*通讯作者。

key issue to maintain sustainable ecological development to explore the succession of plant communities in the karst area of Wuling Mountain under the global warming scenario. In this paper, the concept of species niche width was proposed for the first time in the karst area of Wuling Mountain. At the same time, the aridity characteristics of plant communities in the karst area of Wuling Mountain were analyzed from three aspects: spatiotemporal variation of vegetation, climate and environment, and physiological factors of plant community drought resistance. On this basis, this paper constructs a niche width succession model and a succession model based on the Beverton-Hot and Lotka-Volterra, and demonstrates the applicability of the succession model. This study is useful for the ecological conservation of the Wuling Mountain Karst region under the global warming scenario.

Keywords

Wuling Mountain Karst Area, Niche Width, Plant Communities, Aridity Characteristic, Succession Model

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

武陵山喀斯特地区地跨四省,属中亚热带季风气候区,具有四季分明的特点(图 1)。夏季温暖多雨[1],冬季相对较干燥。降水主要集中在夏季[2],占全年总降水的大部分。由于地势西北高、东南低,表现出显著的地域、垂直差异,呈现出多层次、多元的气候格局。

因全球气候变暖及不合理的人为活动导致该地区部分呈现严重的石漠化现象[3],从而成为典型的生态脆弱区。植被遭到严重破坏,水土流失严重,大量岩石裸露,导致土地生产力衰退,甚至完全丧失。该地区土壤主要为石灰质,土层瘠薄,由于石灰岩溶蚀作用,土壤形成缓慢且容易流失,同时保水性能较差[4],临时性干旱频发。

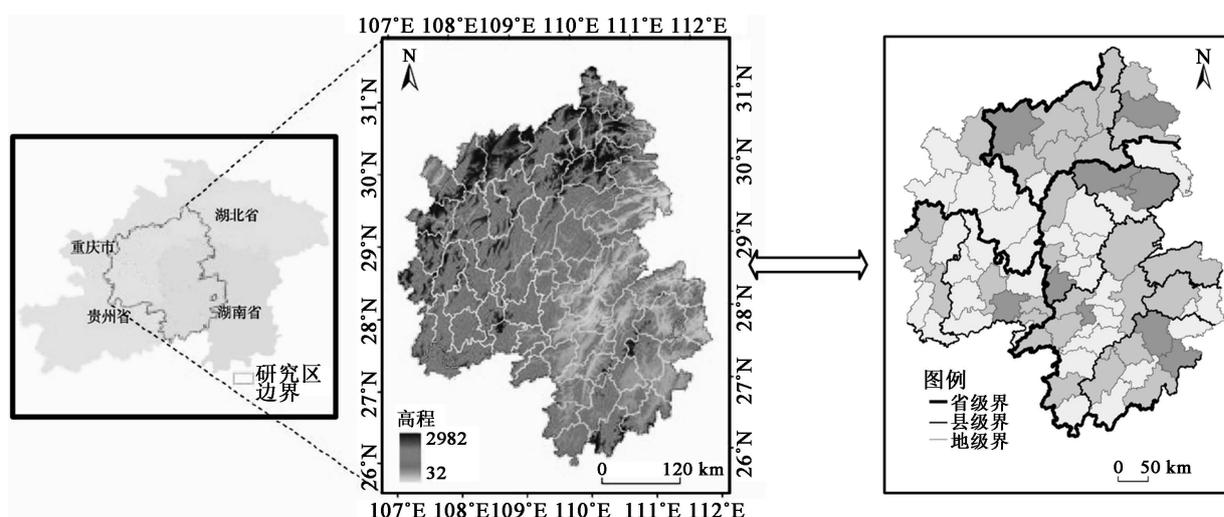


Figure 1. Schematic map of the topography and geographical location of the Wuling Mountains

图 1. 武陵山区地形及地理位置示意图

2. 国内外研究现状

在全球气候变暖和生态挑战的背景下，国内外研究者已展开大量相关研究，主要集中在武陵山喀斯特地区的生态响应、生态位、植物抗旱性等方面。本节将对相关研究现状进行综述，并明确当前存在的 key 问题，为本文的研究提供前期知识和理论基础。

2.1. 生态系统响应干旱性的研究现状

武陵山喀斯特地区的生态系统因地形多样性而呈现出植被多样、物种丰富的特征。然而，在全球变暖的背景下，干旱频发成为一个日益严重的问题。为提高抗旱性给出切实可行的对策，许多学者对该地区生态系统的响应进行了一系列的研究。如孙丽等的研究[5]揭示了该地区整体干旱发生规律及危险性，尤其在春夏季节轻旱和中旱频发，中北部地区较为严重。刘恒等的研究[6]进一步分析了植被生长季的变化，提供了关于植被覆盖动态的重要见解。

2.2. 生态位理论的研究现状及应用

生态位概念首次由 Grinnell 提出，是一个考虑了种内、种间关系的综合性概念。国外对生态位理论最具有权威性的三个支系分别是“空间生态位”、“功能生态位”、“n 维超体积生态位”，总的来说描述了在自然生态中一个种群的时空位置及种群的功能关系。国内生态位理论研究始于 20 世纪 80 年代初，以王刚等的广义生态位为出发点不断扩展从而演变形成实际生态位、潜在生态位、非存在生态位等。张光明等全面概括了生态位理论的概念：“一定生态环境里的某种生物在其入侵、定居、繁衍、发展以及衰退、消亡历程的每个时段上的全部生态学过程中所具有的功能地位”。

生态位的研究非常广泛，已涉及到森林生态学、城市生态学、生态农业等多个方面。该理论在物种间的关系、群落演替及结构、生物多样性等研究中得到了广泛的应用。它成为了研究生态系统稳定性和物种相互作用的有力工具，同时也成为了许多学者研究的焦点问题[7]，如刘秀珍等的研究[8]通过分析天龙山植被中优势种群的生态位，发现生态位宽度较大的种群表现出更强的环境适应和资源利用能力，对种群间的生态相似性和资源利用相似性产生显著影响。这为了解武陵山喀斯特地区植物群落的动态变化提供了重要线索。由于武陵山喀斯特地区独特的生态环境，因此本文将构造喀斯特地区植物抗旱性生态位来更加准确地反映干旱条件及相互作用下的生态变化。

2.3. 植物抗旱性研究的进展与挑战

植物的耐旱机理受植物形态、解剖和生理生化特性控制的复合遗传性状，因此，干旱对植物的生长发育及生理生化代谢的影响是多方面的。国内外许多研究者通过分析植物的生理响应机制[9]和抗旱特征[10]，揭示了许多与抗旱性相关的关键基因以及不同植被类型在干旱条件下的抵抗力和恢复力[11]。这为提高植物抗旱能力提供了启示，有望在未来应对干旱挑战中发挥重要作用。然而，正是植物抗旱性的复杂性，因此选取合适的指标来代表植物是极其关键的。

3. 研究方法

本文旨在深入研究武陵山喀斯特地区的物种生态位、该地植物群落的抗旱性特征，并探讨其群落演替。为了全面理解该地区的生态位特征，本文基于 Levins 公式[12]改进并明确定义了喀斯特地区各物种的生态位宽度。在研究植物群落抗旱性时，本文聚焦于时空变化、气候与环境、植物抗旱性等三个方面进行了深入分析。为进一步揭示群落演替的动态过程，基于 Beverton-Hot [13]和 Lotka-Volterra 模型建立了生态位宽度演替模型和 NDVI 演替模型，并展示了这些演替模型的实际应用。通过这一系列分析，本

文为加深对武陵山喀斯特地区生态系统动态变化的理解提供了有益见解。

符号说明

本文中使用了一些特定的符号、缩写和标记，为了帮助读者理解，以下表 1 是这些符号的含义和解释。

Table 1. Symbol description

表 1. 符号说明

符号	说明	单位
BL_i	物种 i 的生态位宽度	——
$NDVI_i$	物种 i 的归一化植被指数	——
σ	竞争矩阵	——
WUE_i	物种 i 的用水效率	$\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$
V_s	土壤蒸发率	$\text{mm}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$

请注意，以上符号仅为本论文中使用的一部分，其他符号和术语将在上下文中进行解释。在整个文中，我们将遵循统一的符号使用标准，确保读者能够准确理解和解释文中的内容。

4. 武陵山喀斯特地区植物群落干旱性相关性分析

4.1. 武陵山喀斯特地区植物抗旱性生态位

不同的生境下，植物的抗旱性不同[14]。武陵山喀斯特地区的特殊环境对植物的抗旱性提出了特殊的要求。由于自然界中存在很多生物因素，所以本文考虑现实生态位以此来反映更真实的情况。首先，本文基于 Levins 公式设武陵山喀斯特地区植物物种 i 的抗旱性生态位如下：

$$BL_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^r P_{ij}^2} \quad (1)$$

式中， P_{ij} 为物种 i 在资源位 j 上重要值与物种 i 在所有资源位上重要值总和之比， r 为资源位的总数。考虑到资源之间的关联性，物种 i 生态位宽度可以改进为：

$$BL_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^r p_{ij} + \alpha_{ijkl} p_{ik} p_{il} + \Lambda_i} \quad (2)$$

式中， α_{ijkl} 是资源位 j 和 k 之间以及 l 和 i 之间的相互作用系数， Λ_i 是特定于物种 i

的修正项，可以反映出该物种对其他未考虑因素的适应能力。进一步，又考虑到不同物种对资源的偏好不同即资源的利用差异性，引入资源权重项，则有：

$$BL_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^r p_{ij} + \alpha_{ijkl} p_{ik} p_{il} + \Lambda_i + \sum_{j=1}^r \chi_j f(p_{ij})} \quad (3)$$

式中， χ_j 代表权重， $f(p_{ij})$ 是一个关于 p_{ij} 的非线性函数，表示物种对资源的非均衡利用。该抗旱性生态位综合考虑了资源关联性和植物利用资源差异性。由于武陵山喀斯特地区石漠化现象严重，土壤保水

性较差,因此本文将土壤含水量[15]视为关键资源。

对于一个含有 n 种植物的群落而言,每个种群在群落中都有其特定的现实生态位宽度,并且为了不断地适应环境,生态位宽度也会在一定范围内产生波动。根据公式(3)可以得到群落中每个种群的初始生态位宽度,不妨设该群落的初始生态位为

$$BL = (BL_1, BL_2, \dots, BL_n) \quad (4)$$

式中, BL_i 越大说明物种 i 的适应能力越强。 BL_{total} 为群落内各植物的初始生态位之和。受气候、生态环境等因素影响, BL_{total} 在一定范围内波动。

4.2. 武陵山喀斯特地区植被时空变化

“归一化植被指数 NDVI”用于评估植被的生长状况和覆盖度,也可对植被分类。在大尺度植被研究中,NDVI的使用具有关键意义[16]。

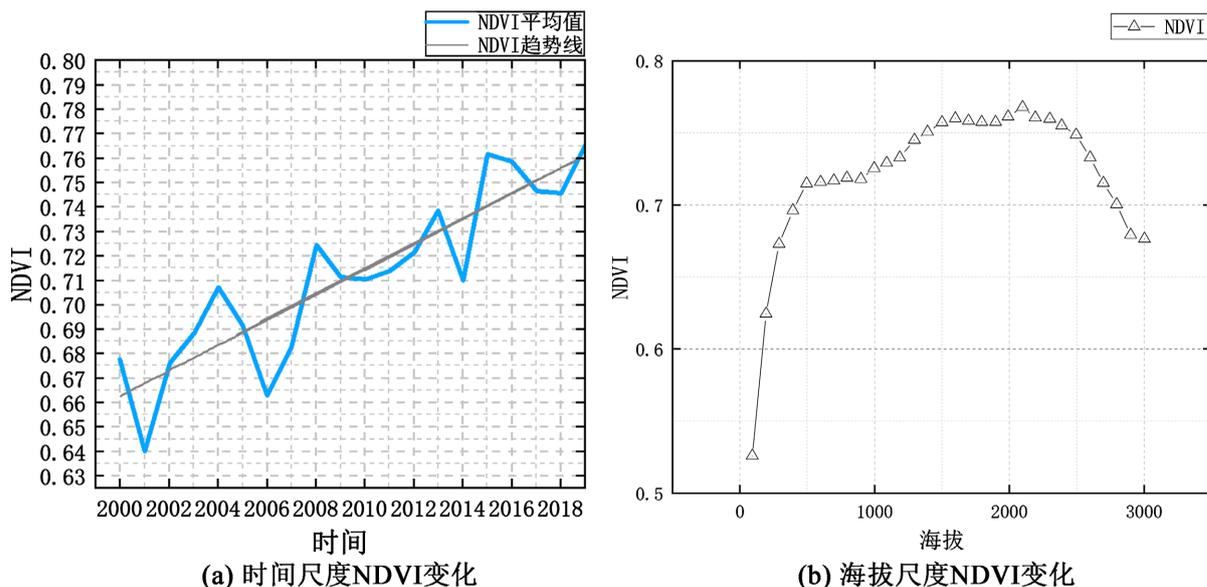


Figure 2. Spatiotemporal changes
图 2. NDVI 时空变化

在时间尺度上,武陵山地区的年均 NDVI 值呈现出波动上升的趋势,如图 2(a)所示。这一变化表明该地区的植被状况正在逐渐改善。此外,武陵山春季和夏季,NDVI 值较高,表明植被覆盖相对较好;而在秋季和冬季,NDVI 值较低,可能与植被凋落、生长季结束等因素有关。在海拔尺度上,如图 2(b)所示。随着海拔的升高,NDVI 呈现先上升后下降的趋势。在区域尺度上,武陵山区植被生长季 NDVI 均值范围为 0.1~0.86,整体呈现出较好的植被覆盖状况。区域上表现为东南和西部 NDVI 值偏低,东北 NDVI 值偏高。

4.3. 武陵山喀斯特地区的气候与环境

结合对武陵山喀斯特地区植被时空变化与气候关系的深入研究,温度、降水和土壤蒸发量被确认为影响植被生长的主导气候因素。在此基础上,武陵山喀斯特地区特殊的地质结构,尤其是石漠化地区,也显著影响着植被的发展。这些要素相互交织,共同塑造了武陵山地区独特的植被格局。需注意的是,植物对气候因素的响应存在一定的滞后效应[17]。

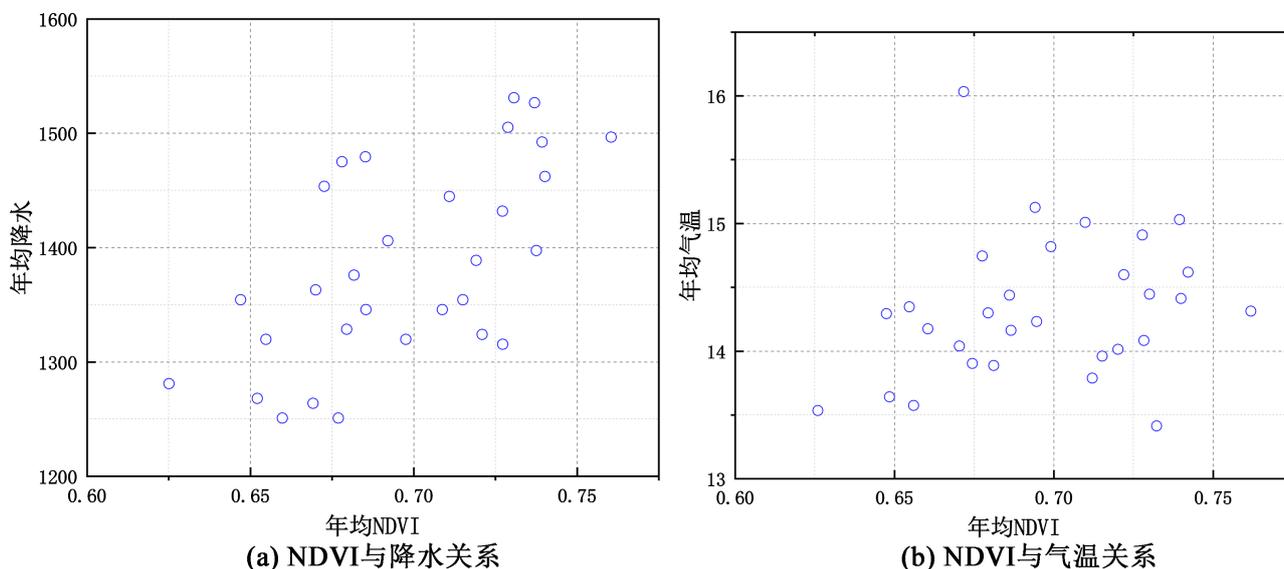


Figure 3. Relationship between NDVI and climate

图 3. NDVI 与气候关系

如图 3 所示, 武陵山喀斯特区的 NDVI 与气温、降水之间呈现出主要的正相关关系。然而, 降水对植被的影响相对较为显著。此外, 气温和降水在对区域 NDVI 的影响上存在着明显的空间差异, 总体趋势显示降水的影响范围较为广泛。由此可见, 降水是在影响武陵山地区植被状况的主要气候因素。

与此同时, 土壤蒸发量作为水热因子的耦合作用的产物也与植物的生长有着密切的联系。在时间尺度上, 近年来, 其在 808.56~898.88 mm 范围内呈波动增加。在区域尺度上, 蒸发量差异明显, 呈现中部高、四周低的分布格局。土壤蒸发量与温度呈正相关, 与降水量呈负相关[18], 这一综合效应进一步影响到了植物的生长。

4.4. 植物群落抗旱生理因素

当植物遭受干旱时, 水分的消耗超过吸收, 导致组织内水分亏缺。为了适应水分限制, 植物发展了抗旱性, 表现为在干旱环境中努力维持正常的生理活动、充分利用水资源, 并尽可能减少干旱对产量的不利影响。

从维持正常的生理活动角度来看, 细胞质膜透性、丙二醛(MDA)和过氧化酶(POD)活性是常用的生理学指标。这三个指标共同提供了对植物在抗旱过程中细胞膜稳定性、氧化损伤和抗氧化防御能力的深入洞察, 为理解植物抗旱机制提供了有力支持。

从利用水资源的角度来看, 面对干旱胁迫, 水分显然是植物群落生存中不可或缺的要害, 其重要性远超其他因素[19]。在干旱胁迫下, 植物叶片的相对水含量呈现特定趋势: 初期急速下降, 而后逐渐减缓[20]。同时, 水溶性最大的氨基酸, 游离脯氨酸, 在干旱胁迫下不断积累。基于这两个指标, 水分利用效率 WUE 可定义为植物在干旱条件下通过调整相对水含量和游离脯氨酸积累水平, 以便更有效地反映植物适应干旱环境的能力。

从产量的角度来看, 光合作用对植物的生产力起着关键作用, 通常与叶绿素密切相关, 其主要功能是将吸收的太阳能并将其转化为化学能。受到干旱影响, 叶绿素的含量可能会降低。本文基于叶绿素含量定义了净光合速率为 V_i^j , 更直接地反映了产量水平。

5. 武陵山喀斯特地区植物群落演替模型及应用展示

5.1. 喀斯特地区的植物群落生态位宽度演替模型

5.1.1. 多物种相互作用关系

多物种相互作用下，影响物种生存轨迹最大的关系是竞争。Pianka 指数是生态位宽度重叠的重要指标，其计算公式如下：

$$O = \frac{\sum_{i=1}^m p_i q_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^m p_i^2 \cdot \sum_{i=1}^m q_i^2}} \quad (5)$$

式中， O 表示物种 p_i 与物种 q_i 的生态位重叠指数， m 表示资源的数量。如果两个物种的生态位完全重叠，它们在所有资源上的相对利用率是相同的，即 $p_i = q_i$ 。此时，公式可以简化为：

$$O = \frac{\sum_{i=1}^m p_i^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^m p_i^2 \cdot \sum_{i=1}^m p_i^2}} = 1 \quad (6)$$

不妨设物种 i 与物种 j 的竞争系数为

$$\sigma_{ij} = \frac{BL_i - O \cdot BL_j}{BL_i} \quad (7)$$

故竞争矩阵为

$$\sigma = (\sigma_{ij})_{n \times n} \quad (8)$$

由于物种间的竞争是相互的，因此竞争矩阵为对称矩阵。若 $\sigma_{ij} > 0$ ，则物种 i 与物种 j 是互利关系；若 $\sigma_{ij} < 0$ ，则两物种是竞争关系；若 $\sigma_{ij} = 0$ ，则两物种没有必然关系。

5.1.2. 土壤含水量模型

由于武陵山喀斯特石漠化地区保水性不强，临时性干旱频发，因此需关注降水与土壤含水量的关系。土壤的含水量主要由降水量、土壤的蒸发量和植物的蒸腾作用来决定，当前单位面积土壤含水量可以定义为：

$$\phi(t) = \phi(t-1) + P - V_s \cdot \Delta t - V_l \cdot \Delta t \quad (9)$$

式中， $\phi(t)$ 为 t 时刻时单位面积土壤含水量， P 为降水量， V_s 为土壤蒸发率， V_l 为当前植物群落的蒸腾速率。当前植物群落蒸腾速率取决于其内部物种的特性，具体来说，

$$V_l = \sum_{i=1}^m \frac{V_l^i \cdot S_i}{WUE_i (\gamma_i, WUE_i)} \cdot P_i(t) \quad (10)$$

式中， WUE_i 为物种 i 对水的利用效率， V_l^i 为净光合速率， S_i 为种群的平均叶面积， $P_i(t)$ 为种群的平均密度， γ_i 为干旱响应系数。故土壤中水含量为：

$$\theta(t) = \frac{\phi(t) \cdot \rho_w}{1000 \cdot \rho_s + \phi(t)} \quad (11)$$

其中 ρ_w 为水的密度， ρ_s 为武陵山喀斯特石漠化地区土壤密度。

5.1.3. 生态位宽度演替模型

研究群落演替的实质是研究物种演替，而影响物种演替的直接因素是繁殖率和死亡率，故本文从繁殖率和死亡率开始着手进行分析。首先，本文将上文中所提及的土壤含水量标准化，则有：

$$SWC(t) = \frac{\theta(t)}{\theta_{\max}(t)} \quad (12)$$

式中， θ_{\max} 为饱和状态下土壤含水量， SWC 的取值范围在 0 到 1 之间。干旱胁迫下，影响植物生长的关键因素为水资源。随着土壤水分增加，植物的生长速率也会逐渐增加；但当土壤水分达到临界值时，植物会出现失水现象，随着土壤水分的增加生长速率逐渐减慢，甚至直接死亡。因此，植物的增长速率与标准化的土壤水分并不是简单的线性关系，不妨设生长速率 r_i 与标准土壤水分 SWC 有 *Logistic* 关系如下：

$$r_i(t) = \frac{L_i}{1 + e^{-k_i \cdot SWC(t)}} \quad (13)$$

式中， L_i 为物种 i 的最大增长速率， SWC 是标准化的土壤水分，表示相对土壤容量的百分比。在某一环境中，物种若展现出较大适应性和生态位宽度，可能会促使其更积极繁殖，扩大在生态系统中的地位。然而，在物种竞争激烈时，可能导致繁殖减少和生态位宽度的收缩。考虑到物种的生态位宽度、适应能力以及与其他物种可能的互利关系和竞争，基于 Lotka-Volterra equation 和 Beverton-Holt 可得出：

$$R_i = r_i \cdot BL_i \left(1 - \frac{BL_i(t)}{BL_{total}(t)} - g(\sigma_{ij}, BL_j) \right) \cdot \frac{BL_{total} - BL_i(t)}{BL_{total}} \quad (14)$$

式中， BL_{total} 是整个群落里所有生态位宽度的总和， $g(\sigma_{ij}, BL_j)$ 主要代表由于繁殖引起的竞争对物种 i 生态位宽度的影响，具体表达式如下：

$$g(\sigma_{ij}, BL_j) = \frac{\sum_{j=1}^{j \neq i} \sigma_{ij} BL_j(t)}{BL_{total}(t)} \quad (15)$$

若当前生态位宽度越大则死亡造成的影响也越大。又考虑到干旱胁迫与植物死亡有着密切的联系，且干旱程度与死亡并不是呈现简单的线性关系，因此不妨设

$$m_i(t) = \delta \frac{BL_i(t)}{1 + \exp(\xi_1 \psi + \xi_2)} \quad (16)$$

式中， ψ 是干旱系数， δ 、 ξ_1 、 ξ_2 为参数。故下一时刻的生态位宽度可以表示如下：

$$BL_i(t+1) = BL_i(t) + aR_i(t) - bm_i(t) + \varepsilon_i(t) \quad (17)$$

式中 $\varepsilon_i(t)$ 为扰动项。将(14)，(16)代入即可得到生态位宽度演替模型。

5.2. 喀斯特地区的植物群落 NDVI 演替模型

在理想情况下，植物生长空间充裕、气候适宜、资源充足。设植物 i 的 NDVI 为 $NDVI_i$ ，固有生长速率为 r_i 则植物生长模型建立如下：

$$\frac{dNDVI_i(t)}{dt} = NDVI_i(t) r_i \quad (18)$$

考虑到自然条件下植物生长受到空间限制和气候限制，基于 *Logistic* 生长模型可以将植物生长模型修正为：

$$\frac{dNDVI_i(t)}{dt} = NDVI_i(t) r_i(t) \left(1 - \frac{NDVI_i(t)}{NDVI_{i\max}} \right) \quad (19)$$

若已知物种 i 的初始 $NDVI_i(t)$ 为 $NDVI_i^0$ ，则得到一阶的非线性方程：

$$\begin{cases} \frac{dNDVI_i(t)}{dt} = NDVI_i(t) \cdot r_i(t) \left(1 - \frac{NDVI_i(t)}{NDVI_{i\max}} \right) \\ NDVI_i(0) = NDVI_i^0 \end{cases} \quad (20)$$

解该非线性方程则得物种 i 的 $NDVI_i$ 与时间 t 的关系：

$$NDVI_i(t) = \frac{NDVI_{i\max}}{1 + \left(\frac{NDVI_{i\max}}{NDVI_i^0} - 1 \right) \exp(-tr_i(t))} \quad (21)$$

当多个不同种类的植物在同一地区共存时，由于生态位重叠，相互作用如竞争等必然存在。在竞争中，各物种之间展开资源的争夺，从而形成优势和劣势。尽管物种之间可能存在不同的优势和劣势地位，但通常情况下，没有一种植物在资源获取方面显著占据优势。因此，每个物种的生长过程都会受到其他物种的影响。Lotka-Volterra 模型便将竞争对物种生长的影响考虑了进去。考虑到由于竞争对资源、生长、繁殖方面的影响，基于 Lotka-Volterra 最终得到植物生长模型如下：

$$\frac{dNDVI_i(t)}{dt} = NDVI_i(t) r_i(t) \left(1 - \frac{NDVI_i(t)}{NDVI_{i\max}} - \eta \sum_{j=1, j \neq i}^n \sigma_{ji} NDVI_j \right) \quad (22)$$

式中， η 为竞争强度。

5.3. 模型应用展示

为了充分展示模型的应用潜力，本文详细查阅了相关文献，以获取武陵山地区群落中几种代表性植物的生长参数，部分展示表 2。当涉及到其他不同种类的植株时，我们只需按照相同的方法，确定它们各自的生长参数，便可顺利将这些参数代入模型中进行模拟分析。

Table 2. Plant growth parameters
表 2. 植物生长参数

序号	物种	BL_i^0	γ_i	WUE_i	V_i^i
1	A	3	0.51	8.8	13.9
2	B	3	0.19	3.5	10.7
3	C	3	0.66	4.1	11.8
4	D	3	0.76	2.1	6.8
5	E	3	0.13	7.9	16.2
6	F	3	0.64	8.5	14.9
7	G	3	0.78	7.1	16.2
8	H	3	0.27	6.9	13.4
9	I	3	0.49	5.8	12.1
10	J	3	0.38	4.7	11.7

续表

11	K	3	0.65	5.2	11.2
12	L	3	0.48	7.6	15.4
13	M	3	0.31	4.3	10.9
14	N	3	0.54	3.1	7.4

以前 5 个物种为例来展示模型的应用性，确定其竞争矩阵如下：

$$\begin{pmatrix} 0 & 0.38 & -0.23 & -0.59 & -0.22 \\ 0.38 & 0 & 0.68 & 0.42 & -0.25 \\ -0.23 & 0.68 & 0 & -0.21 & 0.18 \\ -0.59 & 0.42 & -0.21 & 0 & 0.15 \\ -0.22 & -0.25 & 0.18 & 0.15 & 0 \end{pmatrix} \quad (23)$$

将前 5 个物种的具体参数代入模型，模拟干旱周期情况下武陵山地区 5 种植物的生态位宽度演替结果如下。

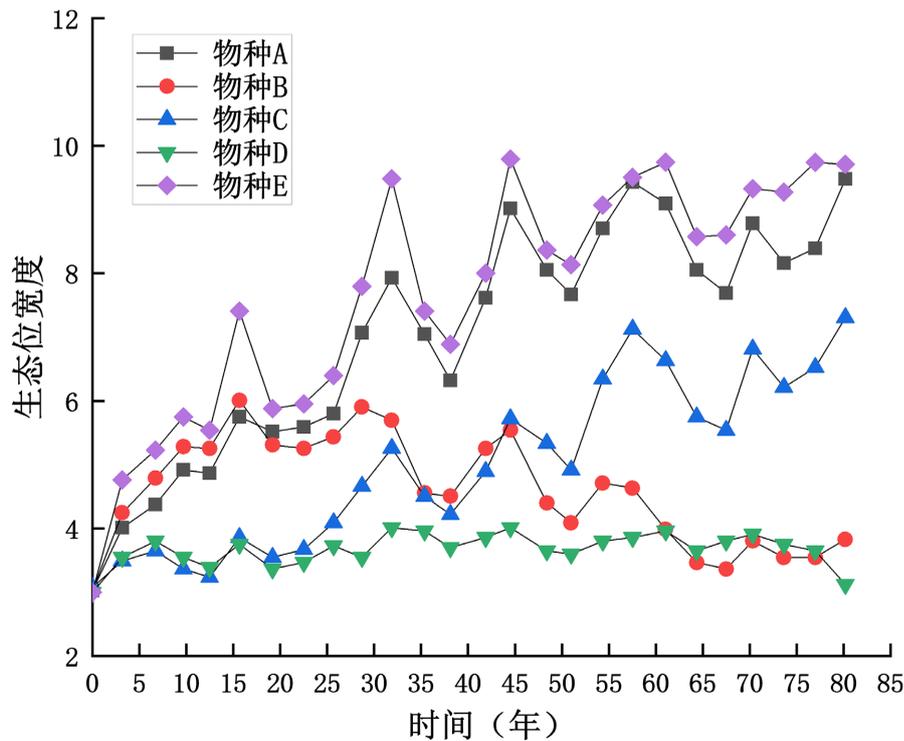


Figure 4. Niche breadth succession results.

图 4. 生态位宽度演替结果

由图 4 可知，5 个物种的初始生态位宽度起初是相同的。随着时间的流逝，5 个物种的生态位宽度不断发生变化。物种 A 与物种 E 的生态位宽度呈波动上升状态，处于相对优势地位；物种 C 的生态位宽度虽然也是呈波动上升但是没有超过物种 A 和 E；物种 B 的生态位宽度呈波动下降状态；物种 D 的生态位宽度没有明显的增减趋势，但始终处于较低水平。除此之外还可看出干旱胁迫会在一定程度上会使得植物的生态位宽度降低。

6. 结论与展望

6.1. 主要的研究结论

(1) 本文首次提出了综合考虑了资源关联性和植物利用资源差异性的武陵山喀斯特地区的生态位概念, 为该地区生态研究提供了新的理论框架。

(2) 研究发现, 干旱胁迫下, 植物发展了抗旱性, 表现为在干旱环境中努力维持正常的生理活动、充分利用水资源, 并尽可能减少干旱对产量的不利影响。

(3) 研究发现, 武陵山喀斯特地区的植被指数(NDVI)与气温、降水呈现出明显的正相关关系, 其中降水对植被影响的程度超过了温度。

(4) 基于该地区背景, 建立了生态位宽度演替模型和 NDVI 演替模型, 并展示了模型的应用价值。

6.2. 不足之处与展望

(1) 数据来源不足, 部分数据依赖于经验估计, 但关键数据可靠性有保障。

(2) 植被归一化指数(NDVI)虽然是大尺度植被定量指标, 但通过 NDVI 值分类并不十分准确, 因此 NDVI_t 没有那么实用。

(3) 加强对群落受益性的研究, 探索植物群落与生态系统功能之间的关系。未来将考虑更多因素的影响, 如物种类型、干旱、污染地和栖息地等因素对植物群落的影响, 以更全面地理解生态系统的动态变化。

(4) 加强武陵山喀斯特地区植物生态位的研究。生态位定量地反映物种与生境的相互作用关系。研究物种的生态位, 可以了解物种间关系、生物多样性、群落结构及动态演替、物种对资源的利用、种群进化和生物与环境关系等方面内容, 是植被恢复和群落构建的有效手段。

(5) 加强武陵山喀斯特地区生态系统服务功能的监测与评估, 得到更多准确的定量数据。以生态系统定位观测资料、常规气象数据库以及资源环境数据库为依托, 利用遥感和地理信息系统等技术手段为辅助, 结合数学模型及方法对武陵山喀斯特地区生态系统进行综合且深入的研究。

基金项目

基于武陵山区多物种相互作用下植物群落的抗旱性研究(JDCX2023937)。

参考文献

- [1] 刘建国, 袁洁, 吴柿憬, 等. 武陵山片区夏季高温天气统计分析 with 风险评估[J]. 怀化学院学报, 2019, 38(5): 22-27. <https://doi.org/10.16074/j.cnki.cn43-1394/z.2019.05.005>
- [2] 刘建国, 袁洁, 白业珊, 等. 武陵山片区夏季暴雨天气统计分析 with 风险评估[J]. 吉首大学学报(自然科学版), 2019, 40(4): 70-76. <https://doi.org/10.13438/j.cnki.jdzk.2019.04.014>
- [3] 董妍妍. 武陵山石漠化地区人工混交林土壤性质空间异质性[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021. <https://doi.org/10.27662/d.cnki.gznlc.2021.000344>
- [4] 闵小莹, 熊康宁, 申小云, 等. 喀斯特石漠化地区植物对干旱胁迫的适应性研究进展[J]. 世界林业研究, 2020, 33(3): 7-12. <https://doi.org/10.13348/j.cnki.sjlyyj.2020.0026.y>
- [5] 孙丽, 陈曦炜, 宋振华, 等. 武陵山地区干旱时空特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(S1): 118-125.
- [6] 刘恒, 汤弟伟, 孙毅, 等. 武陵山区植被生长季 NDVI 时空变化及其对气候变化的响应[J]. 水土保持研究, 2021, 28(5): 245-253. <https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2021.05.028>
- [7] 李德志, 石强, 臧润国, 等. 物种或种群生态位宽度与生态位重叠的计测模型[J]. 林业科学, 2006, 42(7): 95-103.
- [8] 刘秀珍, 张金屯. 天龙山植物群落优势种群生态位研究[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2004, 27(4): 418-423. [https://doi.org/10.13451/j.cnki.shanxi.univ\(nat.sci.\).2004.04.024](https://doi.org/10.13451/j.cnki.shanxi.univ(nat.sci.).2004.04.024)

- [9] 艾丽皎. 南川柳对三峡消落带干湿交替环境的生理生态响应研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京林业大学, 2013.
- [10] 德永军. 中间锦鸡儿带状林地根系和土壤水分特征及抗旱性研究[D]: [博士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
- [11] 刘媛媛, 李霞, 王小博, 等. 2001-2018年中国-老挝交通走廊核心区植被稳定性对极端干旱的响应[J]. 生态学报, 2021, 41(7): 2537-2547.
- [12] 张金屯. 数量生态学[M]. 第3版. 北京: 科学出版社, 2018.
- [13] De la Sen, M. (2008) The Generalized Beverton-Holt Equation and the Control of Populations. *Applied Mathematical Modelling*, **32**, 2312-2328. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2007.09.007>
- [14] 刘鸣, 乌里希·皮特扎卡, 安德烈亚斯·罗洛夫, 等. 不同生境中多树种生长对干旱胁迫的敏感性评价——以德国萨克森州为例[J]. 林业科学, 2023, 59(11): 12-22.
- [15] 刘椽锰, 税伟, 江聪, 等. 暖湿化气候情景下喀斯特木本植物群落构建机制研究[J]. 生态学报, 2024, 44(6): 2452-2463. <https://doi.org/10.20103/j.stxb.202304190805>
- [16] 靖娟利, 赵婷, 王永锋, 等. 西南喀斯特核心分布区植被对极端气候的响应[J/OL]. 中国环境科学, 2024: 1-13. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20240011.012>, 2024-02-23.
- [17] 田卫堂, 刘淼, 张子元, 等. 考虑气候时滞效应的河北山区 NDVI 演变归因[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(5): 962-971. <https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0092>
- [18] 周璐, 汤弟伟, 刘恒, 等. 武陵山区地表蒸散量时空变化特征及其对气候变化的响应[J]. 水土保持研究, 2022, 29(6): 206-213. <https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2022.06.025>
- [19] Wallin, G., Karlsson, P.E. and Sellden, G. (2002) Impact of Four Years Exposure to Different Levels of Ozone, Phosphorus and Drought on Chlorophyll, Mineral Nutrients, and Stem Volume of Norway Spruce, Picea Abies. *Physiologia Plantarum*, **114**, 192-206. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2002.1140205.x>
- [20] 孙雪婷, 曹妍, 李国树. 五种蕨类植物抗旱生理指标研究[J]. 楚雄师范学院学报, 2012, 27(6): 45-52.