

新疆沙漠生态系统中的胡杨：适应极端环境的生长与生态特征

董理

新疆岳途工程咨询有限公司，新疆 乌鲁木齐

收稿日期：2026年5月21日；录用日期：2026年7月3日；发布日期：2026年7月16日

摘要

胡杨是新疆沙漠生态系统中的关键物种，广泛分布于干旱和半干旱地区，尤其在塔里木盆地、准噶尔盆地等沙漠化区域。作为典型的沙漠河岸植物，胡杨在防风固沙、保持水土、调节气候等方面发挥着至关重要的生态功能。本文围绕胡杨在沙漠生态系统中的生长适应性、环境因素对其生长的影响以及其生态功能与服务展开研究。首先，探讨了胡杨如何通过深根系获取地下水并适应干旱和盐碱环境，揭示了其水分管理和盐碱耐受机制。其次，分析了胡杨的营养回收机制，特别是在贫瘠土壤中的资源利用效率提升。接着，本文讨论了水文因素(如地下水位)和气候因素(如温度、降水量)对胡杨生长的影响，重点分析了干旱环境下温度升高和降水减少对其生长周期的变化。最后，研究了胡杨在沙漠化防治、碳储存、气候调节及水源涵养等方面的生态服务功能，强调了胡杨在生态恢复中的关键作用。本文的研究不仅丰富了胡杨生态适应性和功能的理论框架，也为干旱地区的生态保护和恢复提供了实践依据。未来的研究应进一步探讨胡杨在全球气候变化背景下的生长机制和生态服务功能，以促进其在沙漠化防治和生态恢复中的广泛应用。

关键词

胡杨，生态适应性，水文因素，沙漠化防治，碳储存

Populus euphratica in the Desert Ecosystem of Xinjiang: Growth and Ecological Characteristics Adapted to Extreme Environments

Li Dong

Xinjiang Yuetu Engineering Consulting Co., Ltd., Urumqi Xinjiang

Received: May 21, 2026; accepted: July 3, 2026; published: July 16, 2026

文章引用：董理. 新疆沙漠生态系统中的胡杨：适应极端环境的生长与生态特征[J]. 林业世界, 2026, 15(3): 641-650.
DOI: 10.12677/wjf.2026.153074

Abstract

Populus euphratica is a key species in the desert ecosystem of Xinjiang, widely distributed in arid and semi-arid regions, particularly in desertification-prone areas such as the Tarim Basin and Junggar Basin. As a typical riparian plant of desert regions, *P. euphratica* plays a critical ecological role in wind and sand prevention, soil and water conservation, and climate regulation. This paper focuses on the growth adaptability of *P. euphratica* in desert ecosystems, the influence of environmental factors on its growth, and its ecological functions and services. Firstly, the study explores how *P. euphratica* utilizes its deep root system to access groundwater and adapt to arid and saline-alkaline environments, revealing its water management and salt tolerance mechanisms. Secondly, the nutrient recycling mechanism of *P. euphratica* is analyzed, particularly in improving resource utilization efficiency in nutrient-poor soils. Next, the paper discusses the impact of hydrological factors (such as groundwater level) and climate factors (such as temperature and precipitation) on the growth of *P. euphratica*, with a focus on how temperature increases and reduced precipitation in arid environments affect its growth cycle. Finally, the ecological service functions of *P. euphratica* in desertification control, carbon storage, climate regulation, and water conservation are examined, emphasizing its key role in ecological restoration. This research enriches the theoretical framework on the ecological adaptability and functions of *P. euphratica* and provides practical guidance for ecological protection and restoration in arid regions. Future research should further explore the growth mechanisms and ecological services of *P. euphratica* in the context of global climate change, to promote its widespread application in desertification control and ecological restoration.

Keywords

Populus euphratica, Ecological Adaptability, Hydrological Factors, Desertification Control, Carbon Storage

Copyright © 2026 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

1.1. 背景

胡杨是新疆沙漠生态系统中的代表性植物,广泛分布在干旱和半干旱的地区,尤其是在塔里木盆地、准噶尔盆地等沙漠化较为严重的区域。作为典型的沙漠河岸植物,胡杨不仅适应了极端的气候条件,还在维持生态平衡、促进生态恢复方面发挥着至关重要的作用。其深根系使其能够深入地下水层,从而有效应对干旱环境中的水分压力[1]。此外,胡杨对盐碱土壤的耐受性使其成为沙漠化地区防风固沙、保护水源和防止土地退化的重要植物[2]。

在新疆的沙漠地区,胡杨通过其强大的根系和树冠对土壤进行固定,减少了风沙对生态环境的侵蚀。胡杨林在沙漠绿洲中发挥着防风固沙、保持水土、调节局部气候等多种生态功能,特别是它们对沙丘的固定和水土保持作用,使得沙漠环境中的生态系统保持了一定的稳定性。胡杨的存在不仅有助于防止沙漠化的蔓延,还对改善区域气候、促进水源涵养起到了重要作用。

胡杨的生态作用不仅局限于其自身的生长和繁殖,它还为沙漠中的动植物提供了重要栖息地。胡杨林中栖息着多种沙漠物种,包括鸟类、昆虫和小型哺乳动物等,这些物种的生存和繁衍进一步增强了生

态系统的多样性和稳定性。因此,胡杨作为沙漠生态系统的基础物种,对于维持生态平衡和促进生态恢复至关重要。

1.2. 研究意义

胡杨的生长与生态适应性研究,特别是在干旱、极端气候下的适应机制,对于理解沙漠生态系统的运作和维持具有重要意义[3]。在全球气候变化的大背景下,极端天气事件的频发,使得沙漠地区的生态系统面临着越来越大的压力。温度升高、降水减少以及土地退化等问题,使得胡杨及其他沙漠植物的生长面临新的挑战。因此,深入研究胡杨在干旱和极端气候条件下的适应机制,不仅能够揭示胡杨如何维持其生长和繁殖,还能够为干旱地区的生态保护与恢复提供理论依据和实践指导。

胡杨在沙漠生态系统中的适应机制涉及多个方面,包括水分管理、盐碱耐受性、营养回收等。胡杨通过发达的根系获取地下水,并且能够在盐碱化土壤中生长,这使得胡杨在沙漠化地区的生态恢复中起到了先锋作用。研究胡杨的生态适应性,有助于了解植物如何应对干旱、盐碱等极端环境,以及其如何通过生理机制和生态行为来维持生态平衡。通过这些研究,能够为其他干旱地区的生态恢复提供借鉴,推动沙漠化防治工作。

此外,胡杨作为一种典型的沙漠植物,其生长和生态适应性也为全球气候变化下的植物生态学研究提供了宝贵的素材。随着全球气候变暖,沙漠化问题日益严重,研究胡杨的适应性机制可以为其他干旱地区的植物适应气候变化提供理论支持和实践经验。

1.3. 研究目标

本研究旨在深入探讨胡杨在新疆沙漠生态系统中的生态适应性、环境因素对其生长的影响,以及胡杨的生态功能与服务[4]。通过对这三大核心领域的系统分析,本文的研究目标具体如下:

(1) 研究胡杨的生态适应性机制

本研究将全面分析胡杨如何通过其独特的生理结构和机制,适应极端干旱和盐碱的环境条件。重点将放在胡杨的水分管理和盐碱耐受性上,探讨胡杨如何通过深根系获取地下水,并调节根系对盐分的吸收与分配。此外,研究还将分析胡杨在极端气候下的生长策略,包括其如何通过生长形态的变化(如叶片、枝条的结构调整)来适应不稳定的水分和养分供应。通过这些分析,揭示胡杨在极端环境中维持生命活动的内在机制。

(2) 分析环境因素对胡杨生长的影响

本研究将重点探讨水文因素、气候变化和土壤条件对胡杨生长的综合影响。具体来说,研究将分析地下水位变化、气温升高、降水变化等因素如何共同作用于胡杨的生长周期和生长速率。特别是气候变化带来的温度升高和降水减少,对胡杨的生长周期、物候变化(如生长季节开始和结束的时间)以及生物量积累的影响。通过综合考虑这些环境压力,研究胡杨如何在变化的气候和水文条件下调整其生长模式,适应不同的环境挑战。

(3) 评估胡杨的生态功能与服务

胡杨在沙漠生态系统中提供多种重要的生态服务,尤其是在防风固沙、碳储存和生态恢复方面。本研究将探讨胡杨在沙漠化防治中的作用,分析其如何通过防风固沙、保持水土、减少风沙侵袭等功能,促进沙漠化地区的生态恢复。进一步研究胡杨作为碳汇的潜力,探讨其如何通过固定大气中的二氧化碳减少温室气体排放,并调节局部气候。此外,研究还将评估胡杨在水源涵养、土地复垦等方面的作用,揭示其在维持生态系统稳定性、促进生物多样性保护和生态环境修复中的关键功能。

通过对以上三个方面的深入研究,本文将全面揭示胡杨在新疆沙漠生态系统中的重要作用,进一步

了解其在干旱、盐碱环境中的适应性、生长特征以及对环境变化的响应。同时，本研究将为胡杨在沙漠生态恢复、气候变化应对和生态保护等领域的应用提供科学依据，推动胡杨在全球气候变化背景下的保护与利用。

2. 胡杨的生态适应性

胡杨是新疆沙漠生态系统中最具代表性的树种之一，其生态适应性使其能够在极为严酷的干旱和盐碱环境中生长并维持生命。胡杨的适应性包括水分管理、营养回收机制以及在生物多样性保护方面的关键作用。这些特性不仅帮助胡杨应对沙漠化环境，还对整个生态系统的稳定性和功能发挥着至关重要的作用。

2.1. 胡杨的耐旱性与水分管理

胡杨的耐旱性是其适应极端环境的关键特征之一。新疆地区的气候干旱、降水稀少，而胡杨能够在这些极端干旱的环境中生长，依赖于其深根系统和对水分的高效利用。胡杨通过发达的根系深达地下水层，可以在缺水的季节仍然保持生命活动^[5]。胡杨根系的深度能够超过 10 米，有效地获取地下水，这使其能够在干旱、无降水的环境中生存，并且能够在其他植物无法生长的地方占据生态位。

此外，胡杨的根系在盐碱环境中也表现出极强的适应能力。新疆地区的土壤普遍含盐碱，而胡杨通过特殊的生理机制，使其能够在盐碱化严重的土地上生长。研究表明，胡杨能够通过调节根系的盐分积累和分布，将盐分隔离在根部或者叶片中，从而减少盐分对植物生长的负面影响。这种“盐分隔离”机制是胡杨能够在盐碱地上生长的关键，使其在干旱和盐碱双重压力下仍能维持生态功能。

此外，胡杨的叶片和枝条也能通过气孔的调节来控制水分蒸散，减少水分流失。在干旱季节，胡杨通过关闭气孔来减少水分的蒸发，进一步提高水分利用效率。胡杨的这一生理特性使其能够在长时间干旱的环境中保持生长，避免水分过度蒸发，维持生命活动。

2.2. 营养回收机制

胡杨不仅具备强大的耐旱性和盐碱适应能力，还通过其独特的营养回收机制来提高资源的利用效率。在自然界中，大多数植物在叶片衰老时会将叶片中的养分，如氮、磷等，回收到其他生长部位，以减少对土壤养分的依赖。而胡杨则表现出非常高效的营养重吸收能力，特别是在贫瘠土壤中^[6]。

胡杨的营养回收机制主要发生在叶片衰老阶段，叶片中的氮、磷等元素会被重新吸收并转移到根部或树干等生命活动旺盛的部位。这一过程能够显著减少胡杨对土壤营养的依赖，特别是在生长环境极其贫瘠的沙漠中，胡杨通过这种方式最大化地利用有限的土壤养分。这一特性使得胡杨能够在贫瘠的沙漠土地上长时间生长，并维持生物量积累。

在营养回收的过程中，胡杨能够调整氮与磷的回收效率。例如，胡杨在高水分的环境下表现出较高的氮回收效率，而在较为干旱的地区，胡杨则更多地依赖于磷的回收。通过这种灵活的适应机制，胡杨能够在不同的环境条件下优化其养分利用效率，并保持生长。

这种营养回收机制还与胡杨的生物量积累密切相关。通过有效的养分回收，胡杨能够保证其在生长周期中的营养需求，同时减少对土壤的负担。这一机制不仅帮助胡杨提高了对干旱、贫瘠土壤的适应能力，也为生态恢复和沙漠化治理提供了重要的生态服务。

2.3. 生物多样性保护作用

胡杨不仅是沙漠生态系统的核心物种之一，也是区域生物多样性保护的重要力量。胡杨作为沙漠生态系统的基础植物，其生长和繁殖为许多其他物种提供了栖息地和食物来源，从而维持了生态系统的稳

定性和多样性[7]。

胡杨林中的栖息物种种类繁多，涵盖了昆虫、鸟类、哺乳动物以及其他植物。胡杨的树干、树枝和叶片为一些昆虫和鸟类提供了栖息地，而其根系为地下生物提供了庇护。此外，胡杨林为一些野生动物提供了食物来源，尤其是在沙漠地区，胡杨的叶片、树皮和果实是许多沙漠动物的重要食物来源。

除了为动植物提供栖息地，胡杨还通过其生态功能对维持生物多样性发挥重要作用。例如，胡杨的根系不仅能固定土壤，还能改善土壤质量，为其他植物的生长提供条件。因此，胡杨的存在对于维持沙漠和干旱地区的生态平衡至关重要，尤其在抗击沙漠化、恢复土壤肥力和维持水循环方面，胡杨发挥了不可替代的作用。

胡杨的生物多样性保护作用不仅局限于物种栖息地的提供，还在于其在生态恢复中的应用。由于胡杨具有较强的耐旱性和抗盐碱性，许多沙漠化地区的生态恢复项目中，胡杨被广泛用于恢复植被、改善生态环境。其在沙漠边缘地区的广泛分布，不仅提升了生物多样性，还有效地防止了沙漠化的蔓延，保护了区域生态系统。

胡杨展现出了非常强的生态适应性，通过深根系获取地下水、在盐碱环境中生长以及高效的营养回收机制，胡杨能够在新疆沙漠等极端环境中生存并维持生态功能。此外，胡杨作为沙漠生态系统的重要组成部分，其在生物多样性保护和生态恢复中的作用不容忽视。胡杨不仅是区域生态稳定的关键物种，也是应对气候变化和沙漠化的生态工程植物。通过研究胡杨的适应性机制，可以为沙漠生态系统的保护和恢复提供重要理论支持。

3. 环境因素对胡杨生长的影响

胡杨作为典型的沙漠植物，能够在极端干旱和盐碱的环境条件下生长。然而，其生长过程和生态适应性受到多种环境因素的影响，尤其是水文和气候因素。通过研究这些环境因素对胡杨生长的影响，可以深入了解胡杨在恶劣环境中如何维持其生态功能，并为未来的生态保护与恢复提供理论支持。

3.1. 水文因素对胡杨生长的影响

水文因素，尤其是地下水位，对胡杨的生长有着重要影响。胡杨的根系能够深入地下水层，以获取水分，这使得其能够在干旱的沙漠环境中生存。然而，地下水位的变化对胡杨的生长有着直接而深远的影响。

研究表明，地下水位的深度是影响胡杨径向生长的关键因素之一。胡杨生长的最适地下水深度通常为4至6米，当地下水位过低时，胡杨的生长速率显著减缓。在较深的地下水层(如超过7米深)，胡杨的根系获取水分的能力受到限制，从而导致胡杨树木的径向生长变得缓慢，甚至可能发生枯死现象。因此，地下水位的变化直接影响胡杨的生长发育和生态稳定性。

地下水位的波动不仅影响胡杨的水分供给，还与土壤的盐碱含量密切相关。在地下水位较浅的地区，水分蒸发的速度较快，这可能导致土壤盐碱度的升高，对胡杨的根系造成压力[8]。而在地下水位较深的地区，尽管胡杨的根系能够获得更多的水分，但长期的干旱环境可能导致胡杨的适应性下降，影响其生长和存活率。因此，地下水位的适当调节对于胡杨的健康生长至关重要。

3.2. 气候因素对胡杨生长的影响

胡杨的生长周期受到气候因素，特别是温度和降水量的影响。在新疆等干旱地区，温度和降水量的变化直接影响胡杨的物候特征，即生长季节的开始和结束。温度升高和降水减少可能会引发胡杨生长周期的变化，从而影响其生态功能。

温度是影响胡杨物候变化的一个重要因素[9]。在温度升高的情况下，胡杨的生长季节往往提前开始，

并且生长周期延长。研究表明, 温度升高有助于促进胡杨叶片的生长和枝条的延伸。然而, 温度的过度升高可能会对胡杨产生负面影响, 尤其是在干旱季节, 过高的温度会加剧水分蒸发, 使胡杨的生长受到限制。

降水量的变化同样对胡杨的生长产生影响。降水量的减少会导致胡杨生长季节的缩短, 尤其在干旱地区, 降水不足会导致土壤水分的缺乏, 从而影响胡杨的生长发育。尤其是在新疆地区, 降水量的不稳定性和季节性差异对胡杨生长周期的影响较大。降水量的变化不仅影响胡杨的水分供给, 还会影响土壤的营养状况, 进而影响胡杨的生长速率和健康状态。

随着全球气候变化的加剧, 温度和降水量的变化将变得更加不可预测, 对胡杨的影响将更加显著。研究气候变化对胡杨生长周期的影响, 对于预测未来生态变化、制定生态保护政策具有重要意义。

3.3. 环境压力的综合作用

胡杨的生长不仅受单一环境因素的影响, 水文和气候因素通常是相互交织的, 且与土壤盐碱度等环境压力共同作用, 影响胡杨的生长[10]。在干旱和高温的环境下, 水分和养分的供给成为制约胡杨生长的关键因素。干旱环境中的胡杨需要通过深根系获取地下水, 但在水资源有限的情况下, 土壤的盐碱化可能进一步限制胡杨的生长。

土壤盐碱度是新疆地区普遍存在的环境压力。盐碱土壤中的盐分浓度过高会抑制胡杨根系的生长, 影响胡杨的水分[11]和养分吸收, 进而降低其生长速率。盐碱土壤不仅限制了水分的有效利用, 还可能导致根系腐烂或死亡, 从而严重影响胡杨的生长。胡杨通过其根系在盐碱环境中能够有效地调节盐分的吸收和积累, 从而适应这些恶劣环境。然而, 当盐碱度过高时, 胡杨的适应能力会受到极大挑战。

综合来看, 胡杨的生长受到多重环境因素的综合影响。在极端干旱、气候变化和盐碱化的共同作用下, 胡杨可能会面临生长受限、死亡率增加等问题。因此, 研究这些综合压力对胡杨生长的影响, 对于更好地理解其生态适应性并制定有效的生态保护和恢复措施至关重要。

胡杨作为新疆沙漠生态系统的关键物种, 其生长受水文、气候等多重环境因素的影响。地下水位的变化、气候变化(尤其是温度升高和降水减少)以及土壤盐碱度的变化都对胡杨的生长周期和生长速率产生深远影响。胡杨能够通过深根系获取地下水、调节盐分吸收以及适应温度和降水变化来应对环境压力。然而, 当这些环境因素出现极端变化时, 胡杨的生长和生态功能可能受到严重威胁。因此, 保护胡杨的生长环境、合理调节水资源和土壤条件, 以及预测气候变化对其影响是确保胡杨生长和生态系统稳定的关键。

4. 胡杨的生态功能与服务

胡杨是新疆沙漠生态系统中的核心物种之一, 凭借其独特的生长适应性和广泛的生态作用, 胡杨在防风固沙、水土保持、碳储存、气候调节以及生态恢复等方面发挥着重要的生态服务功能。随着全球气候变化和人类活动对生态环境的影响加剧, 胡杨的生态功能和服务显得尤为重要。本文将深入探讨胡杨在沙漠化防治、碳储存、气候调节以及生态系统服务等方面的作用。

4.1. 防风固沙与生态恢复

胡杨在防风固沙和生态恢复中的作用尤为突出, 尤其是在沙漠化和干旱地区。胡杨的根系发达, 能够深入地下深层获取水源, 并通过强大的根系网络稳定土壤, 防止风沙侵袭[12]。胡杨林是沙漠化防治的先锋, 具有较强的防风固沙能力, 能够有效减少沙丘的移动, 并防止沙漠向绿洲的侵蚀。

胡杨林在沙漠化地区的生态恢复中起着至关重要的作用。胡杨通过其丰富的生物量和根系密集性改

善土壤结构，增强土壤的水分保持能力，从而促进其他植物的生长。研究表明，胡杨的根系能够增加土壤的有机质含量，改善土壤的结构，使土壤更加适宜其他植物的生长。此外，胡杨的树冠和叶片有助于改善当地的小气候条件，增加空气湿度，从而为沙漠地区提供了更多的生物生存空间。

在生态恢复方面，胡杨不仅能够在荒漠化土地上恢复植被，还能通过生物多样性提升生态系统的稳定性和韧性。胡杨林通过提供栖息地和食物来源，促进了沙漠地区野生动植物的繁衍生息，进一步增强了生态系统的服务功能。

4.2. 碳储存与气候调节

胡杨作为新疆荒漠河岸林的优势树种，具有重要的碳储存和气候调节功能。其通过光合作用吸收大气中的二氧化碳，并将碳固定于树干、枝叶、根系以及林下土壤中，形成植被碳库和土壤碳库。与一般干旱区灌丛或草本群落相比，胡杨具有较长的生命周期、较大的单株生物量和较强的地下水利用能力，因此在干旱、半干旱生态系统中具有较高的碳汇潜力。

现有研究表明，胡杨林碳储量并非只由植被覆盖度决定，而是受到地下水埋深、土壤水盐状况、林分年龄结构、群落组成以及人类活动等多种因素的共同影响。地下水位较适宜时，胡杨能够维持较高的光合效率和径向生长速率，从而促进生物量积累；当地下水位持续下降或土壤盐分过高时，胡杨生长受限，枝叶枯死、更新困难等问题会削弱其碳固定能力。由此可见，胡杨林的碳储存功能本质上依赖于水文过程、土壤环境和林分健康状况的协同维持。

为进一步比较不同研究对胡杨林碳储存及其影响机制的认识，本文结合已有文献，从研究区域、主要发现、影响因素和研究方法等方面进行归纳，如表 1 所示。

Table 1. Comparison of carbon storage and related ecological processes of *Populus euphratica* forests in different regions
表 1. 不同地区胡杨林碳储存及相关生态过程研究比较

研究区域	研究结果	研究方法	主要影响因素
塔里木盆地 周边胡杨林	胡杨生长与地下水埋深和干旱强度密切相关，适宜地下水位有利于维持其碳汇功能	径向生长分析、 地下水位监测、 气候因子分析	地下水埋深、温度、干旱程度
额济纳三角 洲胡杨林	胡杨水分来源受地下水、土壤水和河道补水共同影响，水分来源变化会影响其生长稳定性	稳定同位素分析、 样地调查	地下水、土壤水、生态输水
额济纳绿洲胡杨 - 柽柳分布区	土壤水盐条件和柽柳扩张会影响胡杨分布，并可能改变胡杨林群落结构	土壤水盐测定、 植被调查	土壤水分、土壤盐分、 种间关系
干旱绿洲胡杨 与柽柳群落	不同荒漠河岸植物具有不同水分利用策略，群落结构会影响胡杨林生态功能	水分来源分析、 群落调查	水分来源、植物竞争、 生态位分化
极端干旱区 胡杨个体	胡杨可利用多种水源缓解干旱胁迫，有助于维持生长和碳固定能力	水分来源分析、 生理生态测定	凝结水、土壤水、 树干储水、 干旱胁迫
盐碱胁迫 下胡杨	胡杨通过生理调节和分子响应提高耐盐能力，为其在盐碱环境中维持生长和碳积累提供基础	转录组分析、 生理指标测定	盐分胁迫、离子平衡、 抗逆基因表达

由表 1 可见，当前关于胡杨林碳储存及其相关生态过程的研究已形成若干共识。第一，水分条件是影响胡杨生长和碳积累的核心因素，地下水埋深、生态输水、土壤水分和凝结水利用共同决定了胡杨能

否维持稳定生长。第二，土壤盐分和干旱胁迫会削弱胡杨的生理活性和生物量积累能力，但胡杨自身具有较强的抗旱、耐盐和水调节机制。第三，胡杨林碳储存功能并不是单株尺度问题，而是与林分结构、群落组成、天然更新能力和土壤碳库变化密切相关。

然而，不同研究之间仍存在一定争议和不足。一方面，部分研究强调地下水位是决定胡杨生长的主导因素，另一方面，也有研究表明土壤盐分、种间竞争、气候变暖和极端干旱事件同样可能对胡杨林健康产生显著影响。也就是说，胡杨林碳储量变化并不能简单归因于单一环境因子，而应从水文-土壤-气候-群落结构的综合作用中加以解释。另一方面，现有研究多集中于胡杨的水分利用、抗逆生理或生长响应，对胡杨林生态系统碳储量的直接测定仍相对不足，尤其缺乏植被碳库、土壤碳库和枯落物碳库之间的综合比较。

因此，未来胡杨林碳储存研究仍需解决三个关键问题：一是不同区域胡杨林碳储量估算方法尚不统一，导致研究结果之间可比性不足；二是地下水位、土壤盐分和极端气候事件对胡杨碳汇功能的交互影响机制仍不清楚；三是生态恢复措施能否长期提升胡杨林碳汇稳定性，仍缺少长期定位监测和多尺度模型验证。

4.3. 生态系统服务

胡杨不仅具有防风固沙、碳储存等功能，还提供多种生态系统服务，包括水源涵养、土地复垦等。胡杨作为沙漠和干旱地区的主要森林资源之一，对水资源的保护和利用具有重要意义。其深根系统能够有效地增加地下水储量，并在极端干旱条件下仍能维持生态系统的水分平衡。

胡杨通过根系的渗透作用，可以改善地下水循环，稳定水位。尤其在塔里木河流域等地区，胡杨对水源的涵养作用至关重要。研究表明，胡杨能够通过其根系调节地下水流向，促进水源的长期稳定。此外，胡杨还能够通过蒸腾作用释放水分，调节局部气候，增加空气湿度，为周边植物和动物提供适宜的生长环境。

在土地复垦方面，胡杨通过改善土壤结构和增加有机物质的积累，促进了土壤的恢复。胡杨的根系能够通过分泌有机酸和酶类物质，改善土壤的酸碱度和营养成分，使其更加适合其他植物的生长。在沙漠和半沙漠地区，胡杨的生态恢复作用帮助提高了土地的生产力，为农业和牧业的可持续发展提供了支持。

胡杨还在生物多样性保护方面发挥着重要作用。胡杨林为沙漠地区的动植物提供了栖息地和食物来源，促进了生物种群的多样性。在胡杨的庇护下，许多物种能够在干旱环境中生存并繁衍，从而保持了生态系统的稳定性和功能。

4.4. 胡杨生态功能的综合作用

胡杨的生态功能具有综合性，其不仅为沙漠生态系统提供多种服务，还通过其独特的生长模式和生理机制帮助改善区域环境。胡杨作为沙漠化防治的重要植物，通过其防风固沙、碳储存、水源涵养等功能，帮助改善了干旱地区的生态环境。随着胡杨的生长和生态恢复，沙漠化进程得到了有效遏制，生态系统的稳定性得到了增强。

随着气候变化和人类活动对生态系统的影响加剧，胡杨的生态服务功能将变得更加重要。因此，胡杨在生态保护和恢复中的作用应得到更加重视，尤其是在干旱和半干旱地区，胡杨的生态服务对当地环境的改善和可持续发展具有重要意义。

胡杨作为新疆沙漠生态系统中的关键物种，其生态功能和服务对生态环境的保护和恢复具有重要意义。通过防风固沙、碳储存、水源涵养等多种方式，胡杨为干旱和半干旱地区的生态恢复提供了重要的生态支持。在全球气候变化和沙漠化日益严重的背景下，胡杨的生态功能将更加重要，保护和利用胡杨

的生态功能对于实现区域可持续发展具有深远意义。

5. 结论与展望

5.1. 结论

胡杨是新疆沙漠生态系统中最具代表性的荒漠河岸树种之一，也是维持绿洲稳定、防治沙漠化和保护生物多样性的关键物种。本文围绕胡杨的生态适应性、环境影响因素及生态服务功能进行了系统分析。总体来看，胡杨能够在极端干旱、盐碱和贫瘠环境中生存，主要依赖于其深根系取水能力、较强的水分调节能力、盐分耐受机制以及高效的营养回收机制。这些适应性特征使其能够在新疆干旱区维持生长，并在生态系统稳定中发挥基础性作用。

从胡杨保护和生态恢复实践来看，可以得出以下几点启示。

第一，胡杨保护的核心是水分保障。地下水位是影响胡杨生长、更新和碳积累的关键因素。若地下水位持续下降，胡杨即使具有较强耐旱能力，也会出现生长衰退、更新困难和林分退化等问题。因此，在塔里木河流域、额济纳绿洲等典型分布区，应将生态输水、地下水位调控和河岸林保护结合起来，维持胡杨生长所需的基本水文条件。

第二，胡杨林恢复不能只关注植被覆盖度，还应重视林分结构和天然更新能力。单纯提高植被覆盖并不等于生态系统功能完全恢复。健康的胡杨林应具有合理的年龄结构、稳定的幼苗更新、较高的群落多样性以及较好的土壤水盐条件。因此，退化胡杨林修复应从“种树造林”转向“恢复生态过程”，重点关注水分补给、土壤改良、幼苗成活和群落稳定性。

第三，胡杨林的碳汇功能提升需要水文、土壤和群落管理协同推进。胡杨具有较强的碳储存潜力，但其碳汇能力受到地下水埋深、土壤盐分、干旱强度和林分健康状况的共同制约。未来在评估胡杨林生态价值时，应将植被碳储量、土壤碳储量和枯落物碳库纳入统一评价体系，避免仅以地上生物量或覆盖度判断其生态恢复效果。

第四，胡杨保护具有明显的区域生态安全意义。胡杨林不仅是单一植物群落，更是干旱区绿洲生态屏障的重要组成部分。其防风固沙、水源涵养、气候调节和生物多样性保护功能，对新疆沙漠边缘地区的可持续发展具有重要支撑作用。因此，胡杨保护应纳入区域水资源管理、荒漠化防治和生态安全格局建设之中。

综上，胡杨的价值不仅在于其能够适应极端环境，更在于其能够通过自身生长和群落构建维持沙漠生态系统的稳定。未来胡杨研究和保护工作应从适应性机制分析进一步走向生态系统功能提升和恢复路径优化。

5.2. 展望

尽管已有研究对胡杨的抗旱、耐盐、水分利用和生态服务功能进行了较多探讨，但在全球气候变化和干旱区水资源压力加剧的背景下，仍有若干科学问题需要进一步深入研究。

首先，未来研究应精确解析胡杨在不同干旱阶段的水分来源及其变化机制。当前研究已表明胡杨能够利用地下水、土壤水甚至凝结水维持生长，但不同季节、不同地下水埋深和不同干旱强度下，各类水源对胡杨生长的贡献比例仍不清楚。未来应利用氢氧稳定同位素技术，精确解析胡杨在不同旱季对地下水、土壤水和凝结水的利用比例，并进一步分析不同水分来源对光合作用、径向生长和碳积累的影响。

其次，应建立胡杨林健康状况对气候变化的响应模型。随着气候变暖、极端高温和持续干旱事件增多，胡杨林可能面临更强的水分胁迫和退化风险。未来应结合遥感监测与地面调查，建立胡杨林健康状况对气候变化的响应模型，动态评估温度升高、降水减少、蒸散增强和地下水位下降对胡杨林生长、更

新和死亡风险的影响。

第三，应加强胡杨林碳储量的长期定位监测。现有研究对胡杨抗逆机制和水分利用过程关注较多，但对生态系统尺度碳储量的连续观测不足。未来应建立长期样地，系统监测胡杨林地上生物量、地下根系生物量、枯落物输入和土壤有机碳变化，明确不同退化阶段和恢复阶段胡杨林碳库的变化规律。

第四，应明确生态输水和人工修复措施对胡杨林恢复的长期效果。生态输水能够改善胡杨生境，但其对胡杨天然更新、土壤盐分变化、群落演替和碳汇功能的长期影响仍需验证。未来应比较生态输水、封育保护、人工补植、土壤改良等措施的实际效果，筛选适合不同退化类型胡杨林的恢复模式。

第五，应加强胡杨林生态服务功能的综合评估。胡杨林同时具有防风固沙、碳储存、水源涵养、土壤改良和生物多样性保护等多种功能，但不同功能之间可能存在协同或权衡关系。未来应构建综合评价体系，量化胡杨林多种生态服务功能的相互关系，为新疆干旱区生态保护红线划定、生态补偿和荒漠化防治工程提供科学依据。

总体而言，未来胡杨研究应更加注重多学科交叉和多尺度融合，将稳定同位素技术、遥感监测、长期样地调查、生态模型和分子生物学方法结合起来，从个体生理、群落结构、生态系统功能和区域景观格局等多个层面揭示胡杨对极端环境和气候变化的响应机制。通过这些研究，可为新疆及其他干旱区胡杨林保护、沙漠化治理和生态恢复提供更加明确的科学支撑。

参考文献

- [1] Chen, J., Zhang, J., Hu, J., Xiong, W., Du, C. and Lu, M. (2017) Integrated Regulatory Network Reveals the Early Salt Tolerance Mechanism of *Populus euphratica*. *Scientific Reports*, **7**, Article No. 6769. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05240-0>
- [2] Zhang, Y., Hao, X., Sun, H., Hua, D. and Qin, J. (2019) How *Populus euphratica* Utilizes Dew in an Extremely Arid Region. *Plant and Soil*, **443**, 493-508. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04244-1>
- [3] Fan, X., et al. (2023) *Populus euphratica* Counteracts Drought Stress through the Dew Coupling and Root Hydraulic Redistribution Processes. *Annals of Botany*, **131**, 451-461. <https://doi.org/10.1093/aob/mcac159>
- [4] Wan, Y., Shi, Q., Dai, Y., Marhaba, N., Peng, L., Peng, L., et al. (2022) Water Use Characteristics of *Populus euphratica* Oliv. and *Tamarix chinensis* Lour. at Different Growth Stages in a Desert Oasis. *Forests*, **13**, Article 236. <https://doi.org/10.3390/f13020236>
- [5] He, Q.Z., Ye, M., Pan, X.T., Zhao, F.F. and Zhang, K.L. (2023) Xylem Formation of *Populus euphratica* and Its Response to Water-Heat Factors in the Lower Reaches of Tarim River, China. *The Journal of Applied Ecology*, **34**, 1244-1252.
- [6] Yang, X.D., Zhang, X.N., Lv, G.H. and Ali, A. (2020) Linking *Populus euphratica* Hydraulic Redistribution to Diversity Assembly in the Arid Desert Zone of Xinjiang, China. *PLOS ONE*, **9**, e109071. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0109071>
- [7] Abdureym, A., Dai, Y., Wan, Y., Flora, E. and Shi, Q. (2025) Response of *Populus euphratica* Radial Growth to Drought in Desert Oases, Taklamakan Desert, China. *Catena*, **252**, Article ID: 108873. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.108873>
- [8] Jam, M., Zamani, E., Tahmasebi, A., Razi, H., Moghadam, A., Hildebrand, D., et al. (2026) Identification of Common Transcriptional Responses to Salinity of Two Halophytes: *Bruguiera gymnorrhiza* and *Populus euphratica*. *Scientific Reports*, **16**, Article No. 17655. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-48626-9>
- [9] Brinker, M., et al. (2010) Linking the Salt Transcriptome with Physiological Responses of a Salt-Resistant *Populus* Species as a Strategy to Identify Genes Important for Stress Acclimation. *Plant Physiology*, **154**, 1697-1709. <https://doi.org/10.1104/pp.110.164152>
- [10] Yu, L., Huang, Z., Tang, S., Korpelainen, H. and Li, C. (2023) *Populus euphratica* Males Exhibit Stronger Drought and Salt Stress Resistance than Females. *Environmental and Experimental Botany*, **205**, Article ID: 105114. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105114>
- [11] 李亚飞, 于静洁, 陆凯, 等. 额济纳三角洲胡杨和多枝怪柳水分来源解析[J]. 植物生态学报, 2017, 41(5): 519-528.
- [12] Zhang, Y.Y., Zou, X.G., Wang, Y., Wang, J.M. and Li, J.W. (2023) Effects of *Tamarix ramosissima* on the Distribution of *Populus euphratica* in Various Soil Water and Salinity Environments in the Ejina Oasis, Inner Mongolia of Northern China. *Journal of Beijing Forestry University*, **45**, 11-20.