

西北干旱区绿洲 - 荒漠过渡带生态演变机理与可持续管理研究

肖 云

新疆岳途工程咨询有限公司, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2026年6月12日; 录用日期: 2026年7月11日; 发布日期: 2026年7月21日

摘 要

绿洲 - 荒漠过渡带是西北干旱区生态安全格局中的关键屏障, 其位于灌溉绿洲或河岸林外缘与连续荒漠背景之间, 沿地下水埋深、土壤水分、植被覆盖度和风沙活动呈显著梯度变化的生态交错带, 可通过高分辨率遥感解译、NDVI/植被覆盖度梯度、地下水埋深监测与样带调查共同识别。本文围绕西北干旱区绿洲-荒漠过渡带生态演变机理与可持续管理展开综述, 重点分析水文过程、植被演变、人类活动和生态系统服务价值变化之间的相互关系。研究表明, 地下水位是调控过渡带天然植被健康状态的重要因子; 灌溉方式改变可能通过减少深层渗漏和侧向补给、降低地下水可及性、改变土壤水盐格局等路径影响天然植被, 但现有证据多来自遥感趋势、地下水观测和案例研究, 因果强度仍需长期定位观测、稳定同位素和通量观测进一步验证。胡杨、柽柳和梭梭等典型荒漠植物通过差异化水分利用策略和空间分布格局适应干旱环境, 但仍受到水分竞争、养分限制及二者耦合作用的制约。同时, 农业扩张和土地利用转型导致生态系统服务价值下降, 尤其影响水文调节、碳储量和防风固沙功能。未来应从流域尺度优化水资源配置, 维持合理地下水位, 实施差异化生态治理, 加强人工林抚育, 并推动政府、农户和社会多主体协同管理, 以提升绿洲 - 荒漠过渡带生态稳定性和可持续发展能力。

关键词

绿洲 - 荒漠过渡带, 干旱区, 地下水位, 植被退化, 可持续管理

Research on the Ecological Evolution Mechanisms and Sustainable Management of Oasis-Desert Ecotones in Arid Northwest China

Yun Xiao

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

Abstract

The oasis-desert ecotone is a critical ecological barrier in the arid regions of Northwest China, and it is operationally defined as the transitional belt between the outer margin of irrigated oases or riparian forests and the continuous desert matrix, where groundwater depth, soil moisture, vegetation cover and aeolian activity change along clear gradients. This belt can be identified by combining high-resolution remote-sensing interpretation, NDVI or fractional vegetation-cover gradients, groundwater-depth monitoring and field transects. This review focuses on the ecological evolution mechanisms and sustainable management of oasis-desert ecotones in arid Northwest China, with emphasis on the interactions among hydrological processes, vegetation dynamics, human activities and changes in ecosystem service values. The review indicates that groundwater depth is an important factor regulating the health of natural vegetation in the ecotone. Changes in irrigation practices may affect natural vegetation by reducing deep percolation and lateral recharge, lowering groundwater accessibility and reshaping soil water-salt conditions; however, most available evidence is based on remote-sensing trends, groundwater observations and case studies, so the strength of causality should be evaluated cautiously and further tested with long-term monitoring, stable isotopes and flux observations. Typical desert plants, such as *Populus euphratica*, *Tamarix* and *Haloxylon ammodendron*, adapt to drought through differentiated water-use strategies and spatial distribution patterns, but remain constrained by water competition, nutrient limitation and water-nutrient coupling. Meanwhile, agricultural expansion and land-use transformation have reduced ecosystem service values, especially hydrological regulation, carbon storage and windbreak functions. Future management should optimize water allocation at the watershed scale, maintain appropriate groundwater levels, implement differentiated ecological restoration, improve artificial forest tending and promote coordinated governance among governments, farmers and society to enhance ecological stability and sustainable development in oasis-desert ecotones.

Keywords

Oasis-Desert Ecotone, Arid Region, Groundwater Depth, Vegetation Degradation, Sustainable Management

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

绿洲-荒漠过渡带是干旱区生态系统中较为特殊且敏感的地理单元之一，通常分布于人工绿洲、河流冲积扇、山前平原与外围荒漠之间，是水分、土壤、植被和人类活动相互作用强烈的区域[1]。为避免概念使用过宽，本文将“绿洲-荒漠过渡带”操作性定义为：从灌溉绿洲、河岸林或人工防护林外缘向连续荒漠背景过渡的空间带，其内部同时表现出三类可观测特征：一是植被覆盖度、NDVI或群落组成由绿洲型向荒漠型逐步转变；二是地下水埋深、土壤水分和盐分沿距离绿洲或河道方向形成明显梯度；三是风沙活动、裸地比例和土壤粗化程度逐渐增强。实际研究中，可利用高分辨率遥感影像、样带调查、地下水埋深监测和土壤水盐剖面共同确定其边界与宽度，而不宜机械地将其固定为某一单一距离[2][3]。该区域既不同于水分条件相对较好的绿洲核心区，也不同于极端干旱、植被稀疏的典型荒漠区，而是处

于二者之间的生态交错地带。由于其生态环境长期受到水资源限制和风沙活动影响,绿洲-荒漠过渡带通常表现出明显的脆弱性、敏感性和不稳定性。一旦水文过程、土地利用方式或植被结构发生变化,该区域生态系统往往会迅速产生响应,甚至出现植被退化、土壤盐渍化、沙漠化扩展和生态服务功能下降等问题。

从生态功能来看,绿洲-荒漠过渡带具有重要的生态屏障作用[4]。它可以缓冲荒漠向绿洲内部的侵袭,减弱风沙危害,维持绿洲边缘土地稳定,并为多种荒漠植物和野生动物提供栖息环境。在西北干旱区,胡杨、怪柳、梭梭等典型荒漠植物不仅是维持区域植被结构的重要组成部分,也是防风固沙、调节小气候和保持生物多样性的关键物种。因此,过渡带的稳定性直接关系到绿洲生态安全、农业生产安全以及区域社会经济的可持续发展。

然而,近年来在全球气候变化和人类活动加剧的双重影响下,西北干旱区绿洲-荒漠过渡带正面临严峻挑战。一方面,气候变暖导致蒸发增强,极端高温、干旱事件发生频率增加,使本已有限的水资源压力进一步加剧。另一方面,随着绿洲农业扩张、灌溉方式改变、地下水开采增加和土地利用强度提升,天然植被赖以维持的水分来源受到明显影响。特别是在塔里木河流域、克里雅河流域、玛纳斯河流域以及河西走廊等典型干旱区,农业开发与生态需水之间的矛盾日益突出,导致过渡带生态系统呈现出明显的退化趋势。

绿洲-荒漠过渡带生态演变的核心问题在于水分过程对植被格局和生态功能的控制。地下水位变化、灌溉回归水、侧向水分补给、土壤水分空间分异以及植物根系吸水策略共同决定了植被的分布、健康状态和群落演替方向。对于深根性植物而言,地下水往往是维持其长期生存的重要水源;而对于人工林和农田边缘植被而言,灌溉制度和土壤水分运移过程则可能改变其生长环境。因此,从水文过程出发理解生态格局变化,是认识绿洲-荒漠过渡带生态演变机理的关键。

此外,人类活动对该区域生态系统服务价值的影响也越来越受到关注。土地利用转型、农业扩张、防护林建设、生态输水和退耕还林等活动既可能造成生态压力,也可能成为生态恢复的重要途径。因此,如何在保障农业生产的同时维持过渡带生态稳定,已成为西北干旱区可持续管理的重要科学问题。本文围绕水文过程、植被演变、人类活动和生态系统服务变化等方面,对西北干旱区绿洲-荒漠过渡带生态演变机理进行综述,并在此基础上提出可持续管理对策,以期干旱区生态保护、绿洲农业调控和区域生态安全建设提供理论参考。

近年来,相关研究方法正在由单一野外调查或中低分辨率遥感,转向多源数据融合和过程观测。一方面,1 m 级绿洲数据集、Sentinel-2/Google Earth 精细解译、无人机和光学-雷达融合反演提升了过渡带边界识别、土壤水分估算和植被退化监测的空间精度[5];另一方面,稳定同位素、功能性状分析和通量/碳循环评估使研究者能够从“植被变绿或变黄”的表象进一步追踪植物水源、蒸散分配和碳水耦合过程[6]-[9]。这些新技术为解释水分变化-植被响应-生态服务变化之间的传导机制提供了更强的证据链。

从国际比较看,西北中国的绿洲-荒漠过渡带与美国西部地下水依赖生态系统、阿曼山地绿洲和撒哈拉绿洲具有相似的水文敏感性,但在农业灌溉强度、绿洲扩张速度和人口-生态耦合方式上存在差异。美国西部案例表明,Landsat 长期序列可用于识别地下水位、气候波动和资源管理对地下水依赖植被活力的影响[10];阿曼绿洲研究强调地形、地质和水源类型共同决定绿洲结构[11];撒哈拉绿洲研究则提示,生物多样性保护常与传统文化景观和社区管理密切相连[12]。因此,西北干旱区研究不仅要关注局地地下水阈值,还应借鉴国际干旱区关于“水文连通性-植被斑块-社会治理”耦合的理论框架。

2. 水文过程对生态格局的驱动机制

2.1. 地下水位的核心调控作用

在西北极端干旱区,降水稀少、蒸发强烈,地表水和土壤水资源十分有限,因此地下水成为维持绿

洲-荒漠过渡带天然植被生存的关键水源。地下水位不仅决定植物根系能否有效获取水分,也直接影响土壤水盐运移、植被覆盖度、群落结构和生态系统稳定性[13]。对于胡杨、柽柳等深根性荒漠植物而言,地下水位可被视为维持其生命活动和群落稳定的核心因子。当地下水埋深处于适宜范围时,植物能够通过深根系统吸收稳定水源,维持正常生长;而当地下水位持续下降并超过植物根系可利用深度时,植被便会出现生理胁迫,表现为叶面积减少、枝条枯死、冠层稀疏和群落退化。

以克里雅河流域为例,相关研究表明,地下水位下降是驱动柽柳群落退化的重要因素之一,但不宜将其绝对化为唯一控制因子。随着地下水埋深增加,柽柳获得水分的难度明显增大,植株枯枝率显著上升,群落健康状况逐渐下降;同时,土壤盐分、微地形、根系分布差异、灌溉回归水变化和人为干扰也可能共同影响退化过程。研究将柽柳健康生长的地下水位阈值量化为 2.59~4.38 m,说明该范围内的地下水条件能够较好地满足柽柳群落的生态需水[14]。近期基于遥感、野外监测和数值模拟的研究进一步表明,不同植物群落对应的地下水埋深范围并不完全相同,芦苇、胡杨、柽柳和骆驼刺等群落可沿地下水梯度发生替代[15]。因此,地下水位并非单纯的水文指标,而是连接水资源变化与植被生态响应的重要桥梁,但其生态效应需要与土壤盐分、地表水频率和土地利用背景共同解释。

地下水位变化还会引起生态格局的空间分异。在靠近河道、渠道或地下水补给较充分的区域,植被覆盖度通常较高,群落结构相对稳定;而在远离水源、地下水埋深较大的区域,植被往往呈斑块化、稀疏化分布。长期来看,地下水下降可能导致过渡带植被向耐旱、低覆盖度类型演替,甚至诱发裸地扩张和沙漠化。因此,在绿洲-荒漠过渡带管理中,地下水位应被作为生态安全控制的核心指标。单纯强调农业用水效率而忽视地下水生态阈值,可能会导致天然植被系统持续退化。

2.2. 灌溉方式改变的生态风险

绿洲农业的发展高度依赖灌溉。在西北干旱区,灌溉不仅影响农田作物产量,也通过土壤水分再分配、地下水补给和侧向渗流等过程影响周边天然植被。因此,灌溉制度的改变往往会对绿洲-荒漠过渡带产生深刻影响。近年来,南疆棉田大面积推广“干播湿出”等节水灌溉技术,在提高农业用水效率、减少无效蒸发和保障棉花出苗方面发挥了重要作用。然而,从生态系统角度看,节水灌溉并不一定意味着区域生态用水压力的降低,反而可能改变传统灌溉条件下形成的水分补给格局。

“干播湿出”等节水灌溉技术通过膜下滴灌、播前或出苗期精准供水减少农田内部无效蒸发和深层渗漏,其农业效益较为明确;但在生态水文学上,其影响需要沿“农田水量削减-深层渗漏减少-地下水补给或侧向渗流减弱-根区土壤水分下降/盐分累积-天然植被水分胁迫增强-群落更新受阻”这一传导路径来理解。过去传统漫灌或较高强度灌溉条件下,部分农田灌溉水会通过深层入渗、侧向渗流或地下水回补形式,为周边天然植被提供间接水分来源。虽然这种方式从农业水资源利用效率上看存在浪费,但对于绿洲边缘植被而言,却可能构成一种隐性的生态补给。当节水灌溉显著减少深层渗漏和侧向补给后,远离农田的天然植被可能失去原有的水分支持,从而出现“人为干旱”现象。

现有研究和遥感监测发现,在部分南疆棉田节水灌溉推广后,远田区域天然植被 NDVI 呈下降趋势,说明植被生长活力可能受到抑制。需要指出的是,NDVI 下降本身只能证明植被活力变化与灌溉制度变化在时空上相关,不能单独证明严格因果关系;气候年景、地下水开采量、渠系衬砌、放牧压力、土壤盐分、作物结构调整和植被本身年龄结构等因素都可能产生混杂影响。因此,本文将“节水灌溉诱发外围植被退化”视为具有较强合理性的生态水文假说,而不是已经完全排除其他解释的确定结论。未来需要结合地下水连续观测、土壤水分剖面、光学-雷达土壤水分反演、植物水分稳定同位素和通量观测,验证农田水分管理变化是否真正改变了过渡带天然植被的水源结构和蒸散过程[7][8]。

未来的灌溉管理应从“农业节水”转向“农业-生态协同节水”。在保障作物生产的基础上,需要

设置合理的生态水分补给机制,避免因过度削减渗漏而破坏绿洲边缘植被赖以生存的水分条件。同时,应通过遥感监测、土壤水分观测、地下水动态分析和植物水源示踪,识别节水灌溉对周边生态系统的长期影响。对于证据不足的区域,应优先开展小流域或样带尺度的对照研究,比较不同灌溉制度下农田边缘、过渡带和荒漠背景区的地下水埋深、土壤含水量、盐分和植被生理指标,以降低管理决策的不确定性。

2.3. 植物的水分利用策略

绿洲-荒漠过渡带植物长期处于水分亏缺环境,因此形成了多样化的水分利用策略。不同植物种在根系分布、水源利用深度、气孔调节能力和抗旱生理机制方面存在明显差异[16]。这些差异不仅决定了植物个体对干旱胁迫的适应能力,也影响群落结构、种间竞争关系和生态演替方向。胡杨和怪柳是西北干旱区绿洲-荒漠过渡带最具代表性的优势植物,它们在水分获取和利用方面表现出不同的生态策略。

胡杨通常具有较深的根系系统,能够利用深层土壤水甚至较深层地下水,因此在河岸林和过渡带中具有较强的抗旱能力。面对高温和干旱胁迫时,胡杨往往通过调节气孔导度、降低蒸腾速率和减少水分损失来维持体内水分平衡。这种相对保守的水分利用策略有助于其在极端环境下维持生存,但也可能限制其光合作用和生长速度。也就是说,胡杨在干旱条件下更倾向于“保水生存”,而不是通过高耗水维持快速生长。

相比之下,怪柳对地下水的依赖性更强[17]。怪柳根系能够深入土壤并利用地下水资源,因此当地下水位稳定且埋深适宜时,其生长状况较好,群落覆盖度较高。然而,当地下水位持续下降时,怪柳群落往往会迅速表现出退化迹象,如枝条枯死、植株矮化和种群更新能力下降。这说明怪柳虽然具有较强的耐盐耐旱能力,但其生态稳定性仍然高度依赖地下水条件。

植物水分利用策略还受到土壤质地、盐分含量、微地形和人类活动的共同影响。在水分条件相对较好的区域,植物可能通过较高蒸腾维持较强生长;而在水分受限区域,植物则倾向于降低水分消耗,形成低生长、低耗水的生存模式。近年的稳定同位素研究进一步表明,怪柳等荒漠灌木会随地下水埋深增加而调整水源组合:在浅地下水和低盐环境下较多利用地下水与深层土壤水,在地下水变深时则增加对中层、深层土壤水乃至浅层降雨补给的综合利用。在黑河下游胡杨-怪柳河岸林中,降水、土壤水、地下水和木质部水同位素的联合观测也显示,植物水源分配与土壤蒸发损失、林分类型和季节变化密切相关。因此,绿洲-荒漠过渡带植被格局并不是单一由降水决定,而是地下水、土壤水、植物根系和生理调节共同作用的结果。深入理解不同植物的水分利用策略,有助于在生态恢复中合理选择物种,并制定差异化的植被保护方案。

3. 植被演变与空间结构特征

3.1. 种群动态与空间格局

绿洲-荒漠过渡带植被演变不仅表现为覆盖度和生物量变化,也体现在种群结构、空间分布格局和群落更新能力的改变。由于水分资源在空间上高度异质,荒漠植物通常呈现斑块状、带状或聚集状分布。种群个体之间既存在相互庇护作用,也存在对有限水分和养分的竞争。因此,植被空间格局能够反映植物群落对环境胁迫的适应过程,也是判断人工林稳定性和天然植被退化程度的重要指标。

梭梭是西北荒漠区重要的防风固沙植物,广泛用于人工林建设和沙地治理。梭梭人工林在不同发育阶段表现出明显不同的空间结构特征。在幼龄阶段,由于植株个体较小,对水分和养分的需求相对有限,个体之间竞争较弱,群落通常能够保持较高成活率。随着林龄增加,植株根系扩展,个体间对土壤水分的竞争逐渐增强。如果初植密度过大,土壤水分消耗长期大于补给,人工林便可能出现生长衰退、枯死

率升高和群落退化等问题。

在古尔班通古特沙漠南缘, 研究发现梭梭林随着林龄增加表现出一定退化特征, 其主要原因在于个体间对有限土壤水分的竞争不断加剧[18]。为缓解这种竞争, 研究建议将梭梭人工林最适密度维持在 8.5~9 m²/株左右。这一结果说明, 人工林建设不能简单追求高密度覆盖, 而应根据区域水分承载力确定合理种植密度。过高密度虽然在短期内能够提高植被覆盖度, 但长期可能导致水分亏缺和群落整体退化。

在河西走廊等典型干旱区, 梭梭林的空间分布格局也受到水分胁迫的显著影响。尤其在 40 年以上林分中, 梭梭群落表现出全尺度聚集分布特征[18]。这种聚集分布一方面可能与种子扩散和微地形水分条件有关, 另一方面也反映了极端干旱环境下植物更倾向于在水分条件相对有利的斑块中存活。随着环境胁迫增强, 原本均匀或随机分布的群落可能逐渐转变为聚集分布, 说明可利用生境范围缩小, 植被空间结构趋于不稳定。

因此, 种群动态与空间格局研究对于绿洲-荒漠过渡带管理具有重要意义。通过分析不同林龄、不同密度和不同水分条件下的空间结构, 可以判断人工林是否超过水资源承载力, 并为间伐、修枝、补植和自然更新提供依据。对于老龄人工林, 应更加重视密度调控和水分竞争缓解, 而不是单纯依靠继续造林扩大植被面积。

3.2. 养分循环与化学计量特征

水分过程与养分循环并不是两个彼此独立的主题。地下水埋深和土壤水分决定植物能否维持根系活性、微生物分解和养分矿化, 而氮、磷供应又会影响叶片光合能力、根冠分配和抗旱策略。因此, 前文所述的水分限制会进一步放大养分限制, 养分贫乏也会降低植物对水分胁迫的恢复能力。基于这一耦合关系, 过渡带植被演变应从“水分单因子控制”拓展为“水分-盐分-养分-植物功能性状”共同调节的过程。

除水分限制外, 养分贫乏也是西北干旱区绿洲-荒漠过渡带植被生长的重要限制因素。荒漠土壤通常有机质含量低, 氮、磷等养分供应不足, 加之干旱条件限制了微生物活动和有机质分解过程, 使植物长期处于水分和养分双重胁迫之下。因此, 荒漠植物在长期适应过程中形成了独特的养分利用和再吸收策略。植物生态化学计量特征, 特别是碳、氮、磷比例及其内稳态调节能力, 是理解植物适应机制和生态系统养分循环的重要途径[19]。

相关研究表明, 荒漠植物常通过“高磷利用、高氮再吸收”的策略应对贫瘠环境。磷在植物能量代谢、根系发育和抗逆过程中具有重要作用, 而氮则是叶绿素、蛋白质和酶的重要组成元素。在干旱区, 土壤有效磷水平往往对植物氮动态具有调控作用。当土壤磷供应不足时, 植物对氮的吸收、分配和再利用也会受到限制, 进而影响光合作用和生物量积累。因此, 磷不仅是植物生长的限制性养分之一, 也在维持植物养分内稳态中发挥关键作用。

植物体内氮、磷含量的变化还反映了其对环境胁迫的适应方式。在水分和养分均受限制的条件下, 植物可能通过提高养分再吸收效率来减少对外界养分输入的依赖。例如, 在叶片衰老前, 植物将部分氮、磷重新转移至根、茎或新生组织中, 从而提高有限养分的利用效率。这种机制有助于荒漠植物在贫瘠环境中维持基本生理功能, 但也可能导致生长速度较慢、生产力较低。

土地利用变化同样会影响过渡带养分循环。农田退耕为果园或农林复合系统后, 由于多年生植物根系增加、枯落物输入增多以及人为管理方式变化, 土壤有机碳含量通常显著提升[20]。土壤有机碳的增加不仅改善土壤结构和保水能力, 也能促进微生物活动和养分释放, 从而增强生态系统恢复潜力。与单一农田相比, 农林复合系统具有更高的生物多样性和更复杂的根系结构, 有利于提升土壤碳汇功能和养分循环效率。

然而, 养分改善并不意味着生态系统一定能够快速恢复。在极端干旱区, 水分仍然是制约养分转化和植物吸收的关键条件。即使土壤有机质含量提高, 如果缺乏稳定水分条件, 微生物矿化、根系吸收和养分向叶片转移仍可能受到限制; 反过来, 当氮、磷供应不足时, 植物光合组织建成和根系扩展受限, 也会降低对有限水分的利用效率。近期关于克里雅河尾间绿洲群落功能性状的研究表明, 地表水扰动、地下水埋深、土壤水分和土壤全氮能够通过直接与间接路径影响叶片氮含量、氮磷比、叶厚和相对叶绿素含量, 说明水分与养分共同塑造了植物由保守型向获取型资源利用策略的转变。因此, 绿洲-荒漠过渡带恢复应同时考虑水分管理和养分调控。未来研究需要进一步结合植物化学计量、土壤微生物群落、稳定同位素和长期水分动态, 揭示水分-养分耦合过程对植被演变的影响机制。

4. 人类活动与生态系统服务价值演变

4.1. 生态系统服务价值流失

绿洲-荒漠过渡带不仅具有植被保护和防风固沙功能, 还承担着水文调节、碳固定、土壤保持、生物多样性维持和景观生态稳定等多种生态系统服务[21]。然而, 在农业扩张、城镇建设、交通开发和水资源过度利用的影响下, 该区域土地利用格局发生显著变化, 生态系统服务价值呈现下降趋势。尤其是在绿洲农业快速扩张的区域, 自然植被和荒漠缓冲带被不断压缩, 导致生态系统结构简化、功能退化和服务能力下降。

以玛纳斯河流域为例, 农业扩张驱动下的土地利用转型显著加剧了生态功能退化。研究表明, 在 23 年间, 该流域生态系统服务价值累计减少 273.89 亿元, 其中水文调节服务价值减少最为明显[22]。这一结果说明, 土地利用变化对干旱区生态系统服务的影响并不局限于植被面积减少, 更重要的是改变了水循环过程和生态调节功能。绿洲农业扩张往往伴随着大量引水灌溉和地下水开采, 导致天然生态系统可获得水量减少, 进而削弱湿地、河岸林和过渡带植被的水文调节能力。

生态系统服务价值流失还具有明显的空间梯度特征。以天山北坡为例, 碳储量表现出显著的海拔梯度效应。低海拔绿洲区受农业开发、城镇扩张和人类活动影响较强, 碳储量变化主要受人为因素控制; 而高海拔区域植被变化则更多受到气候、地形和自然生态过程影响。近期对河西走廊绿洲与非绿洲区碳通量的研究也表明, 2000~2022 年绿洲扩张显著提高了 GPP、NEP 和生态系统呼吸, 并改变了区域碳汇贡献格局, 说明人类活动既可能通过扩大灌溉植被提高局地碳吸收, 也可能通过挤压天然过渡带和增加耗水改变生态风险。这表明, 不同空间位置的生态系统服务变化机制并不相同, 低海拔绿洲开发区应重点关注土地利用强度、生态水量约束和生态补偿, 高海拔山区则应强调冰川、森林和水源涵养功能保护。

生态系统服务价值下降的后果具有长期性和累积性。短期内, 农业扩张可能提高粮食或经济作物产量, 带来一定经济收益; 但从长期看, 若过渡带生态屏障功能持续削弱, 风沙危害、水资源短缺、土壤盐渍化和生态退化风险将不断增加, 最终反过来威胁绿洲农业自身的稳定性。因此, 生态系统服务价值评估可以为土地利用规划提供重要依据, 使管理者更加直观地认识生态退化带来的隐性成本。未来应将 ESV 评估纳入绿洲开发和水资源配置决策中, 避免单纯追求短期经济收益而损害区域生态安全。

4.2. 农户认知与参与

绿洲-荒漠过渡带的生态保护不仅是自然科学问题, 也是社会经济和管理问题。防护林建设、退耕还林、生态输水和人工林抚育等措施能否长期发挥作用, 很大程度上取决于当地居民, 尤其是农户的认知水平、参与意愿和管理行为。农户既是绿洲农业生产的主体, 也是生态保护政策的直接参与者和受影响者。因此, 理解农户对生态保护的态度和支付意愿, 对于构建可持续管理机制具有重要意义。

在河西走廊等地区, 防护林对农田保护和风沙防治具有重要作用。研究发现, 约 95% 的农户愿意为

防护林建设和管护出资, 平均支付意愿为 54.30 元/年。这一结果表明, 多数农户能够认识到防护林在减少风沙危害、保护农田和改善生产环境方面的重要价值。虽然单个农户的支付金额有限, 但较高的参与比例说明社会力量在生态保护中具有较大潜力。如果能够建立合理的组织机制和资金管理方式, 农户参与可以成为防护林长期管护的重要补充。

然而, 农户参与生态保护仍面临一些现实限制。首先, 农户对防护林生态功能的认知程度存在差异。一些农户可能更关注短期经济收益, 而对生态系统长期服务价值认识不足。其次, 生态保护往往具有公共产品属性, 个体投入与收益之间并不完全对应, 容易出现“搭便车”现象。再次, 如果生态保护措施占用耕地、限制灌溉或增加劳动成本, 农户参与积极性可能下降。因此, 单纯依靠农户自愿投入难以保证长期稳定的生态保护效果, 需要政府、社区和农户之间形成多元协同机制。

提高农户参与水平的关键在于将生态保护与农户实际利益结合起来。一方面, 应通过宣传教育和示范工程提升农户对绿洲-荒漠过渡带生态功能的理解, 使其认识到防护林和天然植被保护对农业生产安全的重要性。另一方面, 应建立生态补偿机制, 对参与防护林管护、节水灌溉和生态恢复的农户给予适当经济支持或政策激励。此外, 还可以通过合作社、村集体和水资源协会等组织形式, 提高生态管理的集体行动能力。

从长期看, 绿洲-荒漠过渡带可持续管理需要从单一政府主导转向政府引导、农户参与、社会协同和科技支撑相结合的模式。只有当当地居民真正理解生态保护的价值, 并在制度上获得合理激励时, 生态治理措施才能持续发挥作用。

5. 结论与对策

西北干旱区绿洲-荒漠过渡带生态演变是水文过程、植被结构、人类活动和生态系统服务变化共同作用的结果。其中, 水分条件是决定该区域生态稳定性的重要基础。地下水位变化直接影响胡杨、柽柳等天然植被的生长和退化过程, 灌溉方式改变则可能通过影响土壤水分运移、地下水补给和侧向水分供应, 间接改变过渡带植被格局。需要强调的是, 不同案例中的证据强度并不完全一致: 地下水埋深与植被分布之间的关联证据较强, 而灌溉方式改变导致外围天然植被退化的因果链条仍需更多长期观测和多源数据验证。植物自身的水分利用策略决定了其对干旱胁迫的响应能力, 而种群空间结构、养分循环特征和水分-养分耦合关系则进一步反映了生态系统对长期环境压力的适应过程。

绿洲-荒漠过渡带生态稳定性具有显著的距离效应和水分依赖性。靠近河道、农田或地下水补给区的植被通常生长较好, 而远离水源的区域则更容易发生退化。随着绿洲农业扩张和节水灌溉技术推广, 传统水分补给格局发生变化, 外围天然植被可能面临更强的水分胁迫。同时, 土地利用转型导致生态系统服务价值下降, 特别是水文调节、碳储量和防风固沙等功能受到影响。因此, 未来管理必须从单一农业生产目标转向农业发展与生态安全协同优化。

首先, 应加强流域尺度水资源优化配置。绿洲-荒漠过渡带的水分来源往往与上游来水、灌溉制度和地下水动态密切相关, 因此管理不能仅局限于局部农田或单个行政区域。应将维持下游过渡带地下水位纳入流域水资源配置的硬性生态约束目标。例如, 对于柽柳等地下水依赖型植被, 应参考其适宜地下水位阈值, 将地下水埋深控制在生态安全范围内, 避免因过度取水导致群落退化。

其次, 应实施差异化生态治理。不同地貌部位和海拔带的生态问题具有明显差异。低海拔绿洲开发区受人类活动影响强, 应重点控制耕地无序扩张, 提升农业用水效率, 并建立生态补偿机制。高海拔山区则承担水源涵养、冰川补给和林地保护功能, 应加强自然生态系统保护, 减少过度开发对水源区的扰动。对于绿洲边缘过渡带, 应优先保护现有天然植被斑块, 维持其生态屏障功能。

第三, 应推广科学的人工林抚育措施。对于老龄梭梭林等人工防护林, 应根据水分承载力合理调整

林分密度。对于密度过高、退化明显的人工林,可通过间伐、修枝和补植等措施缓解个体间水分竞争,促进群落自然更新。人工林建设不应单纯追求面积扩张,而应更加重视长期稳定性和生态适宜性。

第四,应推动管理方式多元化。生态输水、长期地下水监测、高分辨率遥感 NDVI/植被覆盖度监测、光学-雷达土壤水分反演、稳定同位素水源示踪、通量观测、土壤微生物群落监测和生态系统服务价值评估应结合使用,形成综合管理体系。对于退化土壤,可探索通过植物恢复、有机质提升和微生物调控等方式增强土壤修复能力。同时,应鼓励农户、社区和地方政府共同参与生态治理,通过生态补偿和公众参与机制提高管理措施的持续性。

总体而言,绿洲-荒漠过渡带是维护西北干旱区生态安全的重要屏障。未来研究应进一步加强长期定位观测、多源遥感监测、稳定同位素示踪、通量观测和水文-植被-社会经济耦合分析,特别要通过对照样带和长期序列区分气候变化、地下水开采、灌溉制度、土地利用和植被年龄结构的相对贡献。只有在明确证据强度和不确定性的基础上,才能将生态阈值、农业用水效率和社区治理机制有效结合,为干旱区绿洲可持续发展提供更可靠的科学支撑。

参考文献

- [1] 陈亚宁,李卫红,徐长春,等.新疆塔里木河下游断流河道输水的生态效应分析[J].中国科学(D 辑:地球科学),2004(5):475-482.
- [2] Ji, S., Bai, X., Qiao, R., Wang, L. and Chang, X. (2020) Width Identification of Transition Zone between Desert and Oasis Based on NDVI and TCI. *Scientific Reports*, **10**, Article No. 8060. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65286-5>
- [3] Lin, J., Gui, D., Liu, Y., Liu, Q., Zhang, S. and Liu, C. (2024) A High-Precision Oasis Dataset for China from Remote Sensing Images. *Scientific Data*, **11**, Article No. 726. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03553-0>
- [4] 周洪华,陈亚宁,李卫红.塔里木河下游绿洲-荒漠过渡带植物多样性特征及优势种群分布格局[J].中国沙漠,2009,29(4):688-696.
- [5] Aili, Y., Nurmamet, I., Li, S., Lv, X., Yu, X., Aihaiti, A., *et al.* (2025) Retrieval of Soil Moisture in the Yutian Oasis, Northwest China by 3D Feature Space Based on Optical and Radar Remote Sensing Data. *Land*, **14**, Article 627. <https://doi.org/10.3390/land14030627>
- [6] Shi, H., Shi, Q., Zhou, X., Cui, C., Li, X., Zhang, Z., *et al.* (2024) Influence of Surface Water and Groundwater on Functional Traits and Trade-Off Strategies of Oasis Communities at the End of the Keriya River, China. *Frontiers in Plant Science*, **15**, Article 1340137. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1340137>
- [7] Liu, L., Yin, L., Yang, Z., Cui, L., Han, B., Bian, J., *et al.* (2026) Stable Isotope Insights into Water Use Sources and Adaptation Strategies of Tamarix Chinensis in Desert Ecotone of Arid Regions. *Scientific Reports*, **16**, Article No. 7218. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-38933-6>
- [8] Zhang, Q., Feng, Q., Su, Y., Liu, W., Zhu, M. and Xue, Y. (2026) Soil Evaporation and Plant Water Use Strategy of Riparian Forests in Extremely Arid Deserts, Northwestern China: A Stable Isotope Perspective. *Frontiers in Plant Science*, **17**, Article 1797109. <https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1797109>
- [9] Zhou, X., Wang, X., Ren, Z., Zhang, Y., Tan, J. and Nawaz, Z. (2025) Human Activities Rather than Climate Change Dominate the Growth of Carbon Fluxes in the Hexi Corridor Oasis Area, China. *Journal of Geographical Sciences*, **35**, 252-272. <https://doi.org/10.1007/s11442-025-2321-8>
- [10] Huntington, J., McGwire, K., Morton, C., Snyder, K., Peterson, S., Erickson, T., *et al.* (2016) Assessing the Role of Climate and Resource Management on Groundwater Dependent Ecosystem Changes in Arid Environments with the Landsat Archive. *Remote Sensing of Environment*, **185**, 186-197. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.07.004>
- [11] Luedeling, E. and Buerkert, A. (2008) Typology of Oases in Northern Oman Based on Landsat and SRTM Imagery and Geological Survey Data. *Remote Sensing of Environment*, **112**, 1181-1195. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.08.007>
- [12] Tydecks, L., Hernández-Agüero, J.A., Böhning-Gaese, K., Bremerich, V., Jeschke, J.M., Schütt, B., *et al.* (2023) Oases in the Sahara Desert-Linking Biological and Cultural Diversity. *PLOS ONE*, **18**, e0290304. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0290304>
- [13] 李向义,徐海量,叶茂,等.策勒绿洲外围不同地下水埋深下主要优势植物的分布和群落特征[J].干旱区地理,2009,32(6):906-911.
- [14] Chang, J., Zeng, F., Tao, H., Wang, S., Liu, X. and Xue, J. (2025) Determining Groundwater-Dependent Ecological Thresholds in the Oasis-Desert Ecotone by Exploring the Linkage between Plant Communities and Groundwater Depth. *Journal of Arid Land*, **17**, 1590-1603. <https://doi.org/10.1007/s40333-025-0059-x>

-
- [15] Peng, L., Wan, Y.B., Li, H., Du, M. and Shi, Q. (2024) Influence of Surface Water and Groundwater Gradient on Spatial Distribution of Typical Vegetation in the Hinterland of Taklamakan Desert. *Science of the Total Environment*, **953**, Article 176060. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176060>
- [16] Wu, G., Jiang, S., Liu, W., Zhao, C. and Li, J. (2016) Competition between *Populus euphratica* and *Tamarix ramosissima* Seedlings under Simulated High Groundwater Availability. *Journal of Arid Land*, **8**, 293-303. <https://doi.org/10.1007/s40333-015-0019-y>
- [17] Imin, B., Dai, Y., Shi, Q., Guo, Y., Li, H. and Nijat, M. (2021) Responses of Two Dominant Desert Plant Species to the Changes in Groundwater Depth in Hinterland Natural Oasis, Tarim Basin. *Ecology and Evolution*, **11**, 9460-9471. <https://doi.org/10.1002/ece3.7766>
- [18] Zheng, Y., Zhao, W.Z. and Zhang, G.F. (2017) Spatial Analysis of a *Haloxylon ammodendron* Plantation in an Oasis-Desert Ecotone in the Hexi Corridor, Northwestern China. *Forests*, **8**, Article 200. <https://doi.org/10.3390/f8060200>
- [19] 程瑞梅, 王娜, 肖文发, 沈雅飞, 刘泽彬. 陆地生态系统生态化学计量学研究进展[J]. 林业科学, 2018, 54(7): 130-136.
- [20] 郭全恩, 李保国, 南丽丽, 曹诗瑜, 陈建刚. 疏勒河流域绿洲荒漠过渡带土壤呼吸特征及其影响因素[J]. 生态环境学报, 2016, 25(6): 934-938.
- [21] 张宏锋, 欧阳志云, 郑华, 肖燚. 玛纳斯河流域农田生态系统服务功能价值评估[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(6): 1259-1264.
- [22] Wang, X., Dong, X., Liu, H., Wei, H., Fan, W., Lu, N., *et al.* (2017) Linking Land Use Change, Ecosystem Services and Human Well-Being: A Case Study of the Manas River Basin of Xinjiang, China. *Ecosystem Services*, **27**, 113-123. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.08.013>