

中南林业科技大学学报

*Journal of Central South University of Forestry & Technology*

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第8期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.08.015

论文标题： 黑河中游典型沙化土地治理模式生态服务价值多维评价与优选

作　　者： 赵玉红，贺永岩，陈 斌，等

收稿日期： 2025-07-26

引文格式： 赵玉红,贺永岩,陈斌,等.黑河中游典型沙化土地治理模式生态服务价值多维评价与优选[J].中南林业科技大学学报,2026,46(8):147-158.

Zhao Y H, He Y Y, Chen B, et al. Ecological service value multi-dimensional evaluation and optimization of typical sand fixation land governance modes in the middle reaches of the Heihe river[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(8):147-158.

相关论文推荐

Recommended articles

若尔盖县高原草地沙化成因分析

Analysis on factors in the formation of grassland desertification in Ruoergai plateau

若尔盖县土地沙化现状及沙化发展动态特征

Dynamic characteristics of land desertification status quo and desertification development in Ruoergai County, Sichuan Province

黑河中游绿洲荒漠过渡带降水-土壤水-地下水相关性分析

Correlation analysis among precipitation and soil water and groundwater in oasis-desert transitional belt in Heihe river middle reaches

黑河中游荒漠区植物生长与水分变化关系分析

The correlation analysis between plant growth and changes of water in desert areas in Heihe middle reaches

生物活性剂在荒漠化治理中的应用研究

Applied research of bioactive agents in desertification control

荒漠绿洲过渡带土壤水分特征及其对气候因子的响应

Characterization of soil moisture and its response to climatic factors in the transition zone of a desert oasis

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.08.015
http: //qks.csuft.edu.cn

# 黑河中游典型沙化土地治理模式生态服务价值多维评价与优选

赵玉红[1]，贺永岩[1]，陈　斌[1]，穆好华[1]，雷　军[1]，赵　明[1]，武龙庆[1]，马垭杰[2]，李景潮[3]，曾万祺[1]

（1. 甘肃省祁连山水源涵养林研究院，甘肃 张掖 734000；2. 张掖市林业科学研究院，甘肃 张掖 734000；3. 张掖市草原工作站，甘肃 张掖 734000）

**摘　要：**【目的】探究黑河中游典型沙化土地不同治理模式生态服务价值的空间分异规律，揭示 6 类沙化土地治理模式的适配性特征，为优化区域沙化土地治理模式与空间配置提供科学依据，助力生态恢复效益最大化与区域可持续发展。【方法】通过问卷调查、专家打分、文献查阅、野外实地调查、室内检测及数据分析处理等方法，分析不同治理模式的空间分异特征。基于层次分析法（AHP）构建治理模式多层次生态服务价值评价模型，确定评价指标权重；依据评价体系 5 个维度 11 个指标的加权量化评分与排序，系统分析并评价研究区域沙化土地治理模式的治理效果、经济效益及生态服务价值，进而完成模式优选。【结果】1）各模式生态服务价值特征存在显著差异：葡萄复合模式经济价值突出；梭梭 - 肉苁蓉模式生态效益表现最优；枸杞复合模式均衡性良好，经济效益与生态效益协调发展特征明显；菊芋复合模式在特殊立地条件下优势显著，其盐碱地改良效果与节水率均最优，但经济产出相对较低；文冠果复合模式各项指标均衡稳定，虽无突出优势，但其耐旱特性与木本油料价值使其成为过渡带的理想选择；生态养殖模式短期效益显著，通过“草 - 畜 - 肥”循环实现快速收益，但载畜量需严格控制。2）基于 AHP 的生态服务价值综合评价显示，6 种生态治理模式的综合得分表现为梭梭 - 肉苁蓉模式（88.9）＞葡萄复合模式（85.6）＞菊芋复合模式（82.8）＞枸杞复合模式（80.5）＞生态养殖模式（78.6）＞文冠果复合模式（75.2）。【结论】不同治理模式的生态服务功能具有显著互补性：梭梭 - 肉苁蓉模式生态屏障功能突出，葡萄复合模式经济产出领先，菊芋复合模式盐碱改良与节水性能优异，其他模式在特定立地条件下各具适用价值。基于 AHP 多准则综合评价，筛选出梭梭 - 肉苁蓉模式、葡萄复合模式及菊芋复合模式为区域最优治理范式，并提出基于生态功能区划的差异化配置方案：过渡带发展梭梭 - 肉苁蓉生态经济体系，近水区布局节水型葡萄产业，盐碱区推广菊芋 - 文冠果复合修复模式。

**关键词：**黑河中游；沙化土地治理模式；生态服务价值；多维评价；模式优选

**中图分类号：**S718.55$^{+}$7　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)08-0147-12

# Ecological service value multi-dimensional evaluation and optimization of typical sand fixation land governance modes in the middle reaches of the Heihe river

Zhao Yuhong[1], He Yongyan[1], Chen Bin[1], Mu Haohua[1], Lei Jun[1], Zhao Ming[1], Wu Longqing[1], Ma Yajie[2], Li Jingchao[3], Zeng Wanqi[1]

(1. Gansu Qilian Mountain Water Source Conservation Forest Research Institute, Zhangye 734000, Gansu, China; 2. Zhangye Forestry Science Institute, Zhangye 734000, Gansu, China; 3. Zhangye City Grassland Work Station, Zhangye 734000, Gansu, China)

**Abstract:**【Objective】To reveal the spatial differentiation law of the ecological service value of typical sand-land governance modes in the middle reaches of the Heihe river, the characteristics of the adaptability of the six sand-land governance modes, and to provide a scientific basis for the optimization of the models and spatial optimization allocation of regional sand-land governance, and to promote the maximization of ecological restoration benefits and regional sustainable development.【Method】This study analyzed the spatial differentiation characteristics of different governance modes through the processes of questionnaire survey, expert scoring, literature

**收稿日期**（Received）：2025-07-26　　**修订日期**（Revised）：2025-09-27

**基金项目：**甘肃省科技计划项目（26JRRG017）；甘肃省自然科学基金项目（24JRRG033）；张掖市科技计划项目（ZY2024RC11）。

**第一作者：**赵玉红（Zyh670091@163.com），正高级工程师。　　**通信作者：**贺永岩（646530043@qq.com），工程师。

**引文格式：**赵玉红 , 贺永岩 , 陈斌 , 等 . 黑河中游典型沙化土地治理模式生态服务价值多维评价与优选 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2026,46(8):147-158.

Zhao Y H, He Y Y, Chen B, et al. Ecological service value multi-dimensional evaluation and optimization of typical sand fixation land governance modes in the middle reaches of the Heihe river[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(8):147-158.

review, field investigation, indoor detection and data analysis. A multi-level ecological service value assessment mode for governance patterns was constructed based on the principles of the Analytic Hierarchy Process (AHP) to determine the weights of evaluation indicators. According to the weighted quantitative scoring and ranking of the 11 indicators in the evaluation system with 5 dimensions, the governance effect, economic benefit, and service value of the land desertification governance modes in the study area are analyzed and evaluated, and the preferred modes are selected.【Result】1) The ecological service values of different modes exhibit significant differences: the grape-based integrated mode stands out in economic value; the *Haloxylon ammodendron-Cistanche deserticola* mode demonstrates the best ecological benefits; the *Lycium barbarum* complex mode shows good balance, with clear coordinated development of economic and ecological benefits; the Jerusalem artichoke complex mode performs exceptionally well under specific site conditions, achieving the highest soil improvement and water-saving efficiency among all modes, although its economic output is relatively low; the *Xanthoceras sorbifolium* complex mode maintains balanced and stable performance across all indicators, lacking outstanding advantages but being an ideal choice for transitional zones due to its drought tolerance and woody oilseed potential; the ecological livestock farming mode delivers notable short-term benefits through a “forage-livestock-fertilizer” cycle that enables rapid returns, though carrying capacity must be strictly controlled; 2) Based on the comprehensive evaluation of ecological service value based on AHP, the order of the ecological service value scores of the 6 ecological governance modes is: *Haloxylon ammodendron-Cistanche deserticola* mode (comprehensive score of 88.9) ＞ grape composite mode (85.6) ＞ Jerusalem artichoke complex mode (82.8) ＞ *Lycium barbarum* complex mode (80.5) ＞ ecological farming mode (78.6) ＞ *X. sorbifolia* complex mode (75.2).【Conclusion】Different governance modes exhibit significant complementarity in their ecosystem service functions: the *Haloxylon ammodendron-Cistanche icola* mode excels in ecological barrier function, the grape composite mode leads in economic output, and the Jerusalem artichoke composite mode demonstrates excellent performance in saline-alkali improvement and water conservation, while the remaining modes possess applicable value under specific site conditions. Based on multi-criteria comprehensive evaluation using the AHP, the *Haloxylon amodendron-Cistanche deserticola* mode, the grape composite mode, and the Jerusalem artichoke composite mode were selected as the optimal regional governance paradigms. Accordingly, a spatial scheme based on ecological functional zoning is proposed: developing a *Haloxylon ammodendron-Cistanche deserticola* ecological-economic system in the transition, deploying water-saving grape industries in the water-proximal zone, and promoting Jerusalem artichoke-*Xanthoceras sorbifolia* composite restoration in the salt-alkali zone.

**Keywords:** midstream of the Heihe river; sand governance modes of desertified land; ecosystem service value; multi-dimensional evaluation; mode optimization

土地沙化是全球性突出生态环境问题，严重制约干旱区生态安全与社会经济可持续发展 [1]。河西走廊作为我国西北干旱区重要生态安全屏障的核心地带，长期受风沙侵蚀影响，土地沙化防控形势严峻 [2-4]。黑河中游北部（张掖市甘州区、临泽县、高台县）地处巴丹吉林沙漠南缘，位于青藏高原与内蒙古高原过渡带的关键生态节点，是西北风沙防控的前沿阵地。该区域气候条件严苛，水热供需矛盾突出，年平均降水量不足 150 mm，潜在蒸发量高达 2 400 mm，自然生态本底极为脆弱 [5-6]。近年来，区域先天脆弱的生态本底，叠加气候变化与人类不合理活动的共同影响，局部生态退化隐患仍较突出，生态保护修复面临较大压力，持续影响区域生态稳定与长远发展 [1-6]。《甘肃省荒漠化和沙化土地状况公报（2023）》（第六次全省荒漠化沙化监测成果）显示，张掖市沙化土地占区域国土总面积的 15.1%，荒漠化土地占比达 43.2%。甘州、临泽、高台三县（区）北部的风沙带生态敏感性极高，历史上沙化扩张趋势明显。经长期综合治理后，该区域已实现沙化土地面积持续缩减、生态格局逐步好转的“绿进沙退”态势。但目前仍存在植被群落稳定性较差、水源涵养能力偏弱、生物多样性保护压力突出等潜在生态隐患，对“一带一路”北线生态廊道的长期安全稳定有着重要影响。

传统沙化土地治理模式往往侧重于单一生态目标，忽视经济效益与生态服务的协同优化，导致治理成果难以持续。为遏制沙化蔓延，当地探索了菊芋种植、葡萄经济林、梭梭 - 肉苁蓉寄生、文冠果栽培、枸杞复合经营及草畜循环养殖等多元生态治理模式。尽管这些模式在特定领域具有成效，但其综合生态服务价值尚未得到系统量化评估，治理效益与区域发展的耦合机制仍不清晰。现有实践多聚焦单一治理成效（如固沙效果或短期经济效益），缺乏对生态服务价值多维协同效应的系统量化评估，导致治理模式优选缺乏科学依据。在水资源约束持续收紧、生态保护与经济发展矛盾日益凸显的背景下，如何科学权衡不同模式的生态效益、经济产出及资源利用效率，已成为优化沙化土地治理策略的核心命题 [7-8]。因此，科学评价不同模式的生态服务价值，综合研判各模式的生态经济效能，进而筛选出兼顾防风固沙、经济产出、土壤改良、生物多样性保护与水资源高效利用的优化治理模式，成为当前亟待解决的核心问题 [9-10]。

生态服务价值（Ecosystem service value，ESV）是指生态系统为人类提供的各类惠益的经济量化表现，包括供给服务（如食物、水源）、调

节服务（如调节气候、管控洪水）、支持服务（如土壤形成、养分循环）和文化服务（如休闲旅游、精神价值）。生态服务价值评价是将这些无形的生态效益转化为可衡量、可比较的经济价值，为生态保护决策提供科学依据 [11-13]。沙化土地生态经济治理模式的生态服务价值评价，是将生态修复、产业发展与经济效益相融合的系统性评估，对推动荒漠化地区可持续发展具有重要战略意义 [9,11-12,14]。

层次分析法（Analytic hierarchy process，AHP）因在处理多目标、多准则复杂决策问题时具备结构化优势 [15-16]，目前已被广泛应用于生态系统服务评估领域 [15-18]。本研究构建了包含防风固沙、经济效益、土壤改良、生物多样性、水资源利用 5 个准则层及 11 项量化指标的生态服务价值评价体系，通过野外实地调查、实验室检测与空间数据分析相结合的方法，对六类典型治理模式进行系统解析，旨在探究不同治理模式的生态服务价值，筛选出最适宜的生态经济治理模式，为区域生态保护与经济发展提供支撑。本研究能够有效揭示不同模式在生态恢复力、经济可持续性及资源适配性方面的差异化特征，厘清沙化治理与区域生态经济发展的耦合机制，筛选适用于研究区的优化治理模式，为黑河流域生态保护与高质量发展提供决策依据。本研究成果可直接为《全国防沙治沙规划（2021—2030 年）》在黑河流域的落地实施提供支撑，对筑牢我国西北地区生态安全屏障具有重要实践意义。

## 1　研究区概况

研究区位于甘肃省张掖市北部的甘州区、临泽县与高台县，地理坐标为 38°39′ ～ 39°57′N、99°10′ ～ 100°36′E。该区域地处黑河中游北岸，北接巴丹吉林沙漠南缘，南邻祁连山北麓冲积扇，是河西走廊中部典型的内陆干旱盆地地貌单元。区域海拔为 1 820 ～ 3 140 m，整体地势由南向北倾斜：甘州平原区海拔约 1 480 ～ 1 700 m，高台合黎山低山丘陵带则升至 2 500 ～ 3 140 m。研究区属于典型的温带大陆性干旱气候 [19-21]，年平均气温 6.5 ～ 8.2 ℃，年日照时数超过 3 000 h；降水稀少且时空分布不均，年降水量仅 80 ～ 150 mm（其中 70% 集中于 6—9 月），潜在蒸发量高达 2 400 ～ 2 800 mm，干燥度指数大于 20，干旱灾害事件频发。区域以黑河为骨干河流，根据正义峡水文站的监测数据，黑河年平均径流量为 15.8 亿 $m^3$，是该区域唯一的稳定水源；地下水埋深由南部的不足 3 m 向北逐渐递增至大于 50 m（临泽北部沙区）。植被覆盖呈现显著的梯度分异特征：南部绿洲农业区以小麦、玉米、葡萄等人工栽培植被为主，覆盖度超过 60%；中部绿洲 - 荒漠过渡带分布有柠条、柽柳、沙蒿等耐旱灌木与半灌木群落，覆盖度为 15% ～ 30%；北部荒漠区则以梭梭、白刺、沙米等沙生植被为主，覆盖度普遍低于 15%，局部流动沙丘区不足 5%。土壤类型以灰棕漠土、风沙土和盐渍土为主：灰棕漠土广泛分布于冲积平原，有机质含量 0.3% ～ 0.8%，pH 值 8.2 ～ 9.0，质地为粗砂；风沙土集中分布在北部沙区，有机质含量低于 0.3%，养分贫瘠且易受风蚀；盐渍土在高台黑泉镇等地的地表盐结皮面积占比超过 20%，根据土壤剖面实测数据，其含盐量高于 1.5%。作为青藏高原与蒙新荒漠的生态过渡带，该区域脆弱的水 - 土 - 植被系统在气候变化与人类活动的双重胁迫下持续退化，成为研究干旱区沙化土地治理的典型区域 [19-20]。

## 2　研究对象与方法

### 2.1　研究对象

本研究以黑河中游（甘肃省张掖市甘州区、临泽县、高台县）的典型沙化土地治理模式为对象。依据区域沙化土地分布特征、治理实践现状及产业发展模式，选取葡萄复合模式、梭梭 - 肉苁蓉模式、枸杞复合模式、菊芋复合模式、文冠果复合模式、生态养殖模式共 6 类代表性治理模式，开展系统调查与评价。研究对象覆盖黑河中游绿洲农田、绿洲 - 荒漠过渡带、荒漠沙地、盐碱沙地 4 类典型立地，治理年限为 3 ～ 8 a，植被盖度达 45% ～ 75%，土壤类型包括沙壤土、风沙土、灰漠土、盐化沙土。研究区水资源条件跨度较大，覆盖从近水区（地下水位≤ 3 m）到干旱荒漠区（地下水位≥ 50 m）的不同区间，能够全面反映区域沙化土地治理模式的生态适应性、经济可行性与功能差异性。

### 2.2　研究方法

#### 2.2.1　样地设置

结合研究区沙化类型、土壤条件、水资源分布及治理年限，采用典型样地法，为每类治理模式设置 5 个 20 m×20 m 的标准样地，样地间距不小于 100 m，以避免空间自相关干扰。同时，设置未治理的流动沙地作为对照样地，确保研究对象具备代表性、典型性与可比性。

#### 2.2.2 地形调查

采用综合测量方法，使用精度为（±1）°的电子罗盘测定坡向，经当地磁偏角校正后按 16 方位记录；采用激光测距仪测量坡位和相对高差，将坡面划分为上、中、下 3 个坡位；微地形按三级分类系统划分为沙丘（相对高差≥ 1 m）、丘间地（沙丘间凹陷区）和平沙地（坡度≤ 5°）3 种类型，其中沙丘进一步划分为新月形和线形 2 种形态。

#### 2.2.3 土壤特性测定

采用分层取样策略，沿样地对角线开挖土壤剖面，并按 0 ～ 10、10 ～ 20、20 ～ 40 cm 的土层分层取样。土壤容重采用环刀法测定；土壤含水量使用时域反射仪（TDR）测量，精度可达（±1）%；有机质含量通过重铬酸钾氧化法测定[19-20]。同时记录土壤颜色、质地、结构等形态特征。

#### 2.2.4 植被调查

实施多尺度观测：盖度采用无人机航测（分辨率 1 cm）与目视估测相结合的方式获取；密度调查方面，乔木和灌木在全样地内计数，草本植物则在 1 m×1 m 样方内进行详查；高度测量随机选取 10 株健康个体，使用激光测距仪测定其自然高度。同时设置 10% 的平行样地开展质量控制，确保测量误差控制在（±5）% 以内。对于特殊样地（如受干扰样地），采用空间插值法校正数据，确保数据的可靠性。

#### 2.2.5 各模式生态服务价值指标调查

2020—2024 年，对各模式生态服务价值评价指标分 5 个维度进行调查，评价指标及评价方法见表 1。

采用多指标联动的生态服务价值评估方法体系，针对沙化土地治理效果开展系统监测与评价。在防风固沙功能评估方面，通过无人机多光谱遥感与地面定点观测相结合的方式，定量分析植被覆盖度的动态变化；采用三维激光扫描技术测定地表粗糙度参数，通过布设固定监测桩阵列，结合高精度 GPS 测量与多期遥感影像解译，精确计算沙丘移动速率。经济效益评估采用标准样方测产与市场调研并行的方法：在各类治理模式的代表性样地内，按作物类型规范设置测产样方，葡萄采用 10 株取样法，肉苁蓉采用 5 m×5 m 样方全收获，菊芋采用三点取样法，同步采集当地农产品市场价格数据；各模式经济效益专属指标见表 2，据此计算单位面积年平均产值。土壤改良监测采用分层采样策略，按 0 ～ 10 、10 ～ 20、20 ～ 40 cm 分层采集土样，采用重铬酸钾氧化法测定土壤有机质含量。生物多样性评估建立天地协同观测网络：通过标准样方全调查记录植物种类组成，计算 Shannon-Wiener 多样性指数；利用红外相机进行兽类监测，采用固定样线法，每样区设置 5 km 样线开展鸟类调查，结合夜间灯诱进行昆虫多样性标本采集。水资源利用效率评估构建多尺度监测体系，安装物联网智能水表（精度 0.01 $m^2$）记录灌溉用水量，布设地下水位自动监测井（1 眼 /$km^2$），采用时域反射仪（TDR）定期测定土壤含水率动态。

#### 2.2.6 生态服务价值评价

分 5 个维度（防风固沙、经济效益、土壤改良、生物多样性、水资源利用）和 11 项指标（植被覆盖度、地表粗糙度、沙丘移动减缓速率、单位面积年平均产值、投入产出比、有机质含量、植物物种丰富度指数、鸟类种类增加、昆虫多样性指数、节水率、地下水位稳定度）构建生态服务价值评

**表 1 评价指标及其调查量化方法**

**Table 1 Evaluation indicators and their survey quantification methods**

| 评价维度 Evaluation dimension | 量化指标 Quantitative indicators | 调查方法 Survey method | 评价方法 Evaluation method |
|---|---|---|---|
| 防风固沙 Prevent wind and consolidate sand | 植被覆盖度 | 遥感影像解译（NDVI）、野外样方调查（样方内植被投影面积占比） | 对比治理前后覆盖度变化率 |
| | 地表粗糙度 | 地表高程测量 | 粗糙度指数计算 |
| | 沙丘移动减缓速率 | 遥感时序分析、GPS 定位标志桩监测 | 沙丘年移动距离对比 |
| 经济效益 Economic benefits | 单位面积年平均产值 | 农户调查、农业部门统计数据 | 经济价值折算 |
| | 投入产出比 | | |
| 土壤改良 Soil improvement | 有机质含量 | 土壤采样（0 ～ 40 cm 土层）、实验室分析 | 对比治理前后有机质含量差异 |
| 生物多样性 Biodiversity | 植物物种丰富度指数 | 样方调查、无人机多光谱识别 | 计算物种数 |
| | 鸟类种类增加 | 红外相机监测、样线法调查（鸟类 / 昆虫等） | 记录物种数以及关键物种（如传粉者）出现频率 |
| | 昆虫多样性指数 | | |
| 水资源利用 Water resources utilization | 节水率 | 水量计量（田间水表） | 实际用水量与需水量比值 |
| | 地下水位稳定度 | 地下水监测井数据（月动态） | 水位年变化幅度与历史均值对比 |

价模型。采用 AHP 层次分析法确定指标体系权重，将同一层次的各要素与上一级对应要素的重要性进行两两比较，建立判断矩阵并开展一致性检验 [15-16,21]。通过一致性检验后，形成兼顾专家经验与数据内在规律的主客观综合权重，计算得到各指标的权重值后，再利用权重值计算不同模式的加权综合得分，以此评价不同模式的生态服务价值。

## 3　结果与分析

### 3.1　不同治理模式生境特征

从表 3 可以看出，不同模式对土壤 - 水分系统的改造呈现典型分异特征。研究区海拔梯度变化显著（1 350 ～ 1 650 m），土壤类型从甘州区的沙壤土逐渐过渡至高台县的盐化沙土，坡度小于 15°。这种地理分异特征直接影响了不同治理模式下的植被恢复效果与土壤水分状况。其中，甘州区凭借相对优越的水热条件和土壤基础，更适宜发展农林复合型治理模式；而高台县受盐碱化和风沙的影响较大，治理难度相对更高。

土壤容重数据（1.32 ～ 1.60 g/cm$^3$）表明，葡萄复合模式能够有效改良土壤结构，其土壤最为疏松，土壤容重为 1.32 g/cm$^3$。土壤水分的垂直分布呈现出 3 种典型格局：葡萄复合模式的“漏斗型”分布（表层水分含量最高）、梭梭 - 肉苁蓉模式的“均衡低值型”分布（各土层水分含量均较低）以及文冠果复合模式的“深层富集型”分布（20 ～ 40 cm 土层水分含量最高）。结果表明，不同植物根系的水分利用策略与土壤改良效果存在显著差异。各治理模式的植被盖度差异明显（45% ～ 75%），其中葡萄复合模式与生态养殖模式表现最优（盖度 75%），文冠果复合模式盖度最低（45%），梭梭 - 肉苁蓉模式盖度处于中等水平（55%）。

### 3.2　不同治理模式县域分布特征

调查结果显示，黑河中游沙化土地治理模式呈现显著的县域差异化分布特征，海拔梯度、土壤类型与水资源禀赋的空间分异，直接决定了各县区对治理模式的选择。

甘州区重点发展葡萄种植与生态养殖复合模式，累计栽植面积达 2 133.33 hm$^2$（酿酒葡萄 1 666.67 hm$^2$、鲜食葡萄 466.67 hm$^2$），主要分布在黑河沿岸的明永镇、乌江镇等地。该区依托专业合作社推广立体种养，配套建设葡萄酒庄，年加工能力达 1.8 万 t，2024 年综合收益为 27.75 万元 /hm$^2$。该区种植文冠果生态林 1 200 hm$^2$，开展碳汇交易试

表 2　各模式经济效益专属指标
**Table 2　Exclusive indicators of economic benefit for each mode**

| 序号 No. | 治理模式 Governance mode | 特色指标 Featured indicators | 数据来源 Data source |
|---|---|---|---|
| 1 | 菊芋复合模式 | 块茎产量（t/hm$^2$） | 田间测产 |
| 2 | 葡萄复合模式 | 葡萄品质（糖酸比） | 农产品检测报告 |
| 3 | 梭梭 - 肉苁蓉模式 | 肉苁蓉产量（t/hm$^2$） | 采收记录 |
| 4 | 文冠果复合模式 | 种子含油率（%） | 实验室测定 |
| 5 | 枸杞复合模式 | 枸杞多糖含量（%） | 药效成分检测 |
| 6 | 生态养殖模式 | 单位面积载畜量（羊单位 /hm$^2$） | 牧业普查数据 |

表 3　各模式生境
**Table 3　Habitats of each mode**

| 区域 Area | 治理模式 Governance mode | 经纬度 Latitude and longitude | 海拔 Altitude /m | 坡度 Slope /(°) | 土壤类型 Soil type | 植被盖度 Vegetation coverage /% | 土壤容重 Soil bulk density /(g·cm$^{-3}$) | 土壤水分 Soil moisture /% | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | 0 ～ 10 cm | 10 ～ 20 cm | 20 ～ 40 cm |
| 甘州 Ganzhou | 葡萄复合模式、生态养殖模式 | 38°56′N，100°27′E | 1 450 ～ 1 500 | ＜ 5 | 沙壤土 | 75 | 1.32 | 12.5 | 9.9 | 11.6 |
| | 文冠果复合模式 | 39°02′N，100°35′E | 1 520 ～ 1 550 | 3 ～ 8 | 风沙土 | 65 | 1.45 | 8.7 | 10.9 | 12.6 |
| 临泽 Linze | 梭梭 - 肉苁蓉模式 | 39°12′N，100°08′E | 1 600 ～ 1 650 | 5 ～ 10 | 灰漠土 | 55 | 1.50 | 6.2 | 8.9 | 9.5 |
| | 枸杞复合模式 | 39°05′N，100°15′E | 1 550 ～ 1 580 | ＜ 5 | 绿洲潮土 | 70 | 1.38 | 10.8 | 9.4 | 9.9 |
| 高台 Gaotai | 菊芋复合模式 | 39°25′N，99°50′E | 1 350 ～ 1 400 | ＜ 3 | 盐化沙土 | 60 | 1.55 | 9.5 | 11.2 | 11.6 |
| | 文冠果复合模式 | 39°30′N，99°55′E | 1 420 ～ 1 450 | 5 ～ 15 | 流动风沙土 | 45 | 1.60 | 5.8 | 12.5 | 13.4 |

点 333.33 $hm^2$，枸杞和菊芋等试验性种植面积合计 453.33 $hm^2$，主要用于城郊生态修复和盐碱地改良。

临泽县以梭梭 - 肉苁蓉嫁接模式为核心，累计栽植梭梭林 4 333.33 $hm^2$（其中嫁接肉苁蓉 2 533.33 $hm^2$），集中分布于北部荒漠区的板桥镇、平川镇。该模式依托初加工基地形成完整产业链，2024 年收益达 7.2 万元 /$hm^2$，较单纯造林收益提升 6 倍。目前全县种植生态枸杞 1 400 $hm^2$，配套烘干厂延伸深加工环节，另发展草畜一体化生态养殖模式 1 000 $hm^2$，形成“治沙 - 产业 - 养殖”多元协同发展体系。

高台县创新推行菊芋、文冠果盐碱改良组合，栽植菊芋 1 666.67 $hm^2$（罗城镇、合黎镇为主），使土壤 pH 值从 8.9 降至 8.2；种植文冠果 800 $hm^2$，可有效抑制沙丘移动，移动速度从 5.3 m/a 降至 2.1 m/a。当地配套建成菊粉加工厂 1 座，年处理鲜芋 1 万 t。生态养殖方面，高台县利用沙地发展骆驼养殖，构建“改良 - 利用 - 保护”三级治理架构。

### 3.3 区域主导治理模式植被特征

从表 4 可以看出，不同治理模式的植被特征呈现层片化差异，植被特征差异显著。

**表 4 各县（区）主导治理模式调查情况**
**Table 4 Survey of the dominant governance modes in each county and district**

| 区域 Area | 样地编号 Plot No. | 治理模式 Governance mode | 优势种 Advantageous species | 盖度 Coverage /% | 密度 Density /( 株·$m^{-2}$) | 平均株高 Average height /cm | 生活型 Life style |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 甘州 Ganzhou | GZ-01 | 葡萄 + 生态养殖 | 赤霞珠葡萄 | 75 | 1.2 | 180 | 藤本 |
| | GZ-02 | 葡萄 + 生态养殖 | 紫花苜蓿 | 65 | 15.3 | 42 | 多年生草本 |
| | GZ-03 | 文冠果复合 | 文冠果 | 60 | 0.6 | 230 | 乔木 |
| | GZ-04 | 文冠果复合 | 沙打旺 | 55 | 10.8 | 38 | 多年生草本 |
| | GZ-05 | 梭梭 - 肉苁蓉 | 梭梭 | 50 | 0.7 | 195 | 灌木 |
| 临泽 Linze | LZ-01 | 梭梭 - 肉苁蓉 | 梭梭 | 58 | 0.9 | 205 | 灌木 |
| | LZ-02 | 梭梭 - 肉苁蓉 | 沙蒿 | 45 | 8.2 | 25 | 1 年生草本 |
| | LZ-03 | 枸杞复合 | 宁夏枸杞 | 68 | 1.5 | 120 | 灌木 |
| | LZ-04 | 枸杞复合 | 沙打旺 | 62 | 12.6 | 40 | 多年生草本 |
| | LZ-05 | 文冠果复合 | 文冠果 | 52 | 0.5 | 190 | 乔木 |
| 高台 Gaotai | GT-01 | 菊芋复合 | 菊芋 | 70 | 2.3 | 85 | 多年生草本 |
| | GT-02 | 菊芋复合 | 草木樨 | 60 | 9.7 | 35 | 2 年生草本 |
| | GT-03 | 文冠果复合 | 文冠果 | 48 | 0.4 | 175 | 乔木 |
| | GT-04 | 梭梭 - 肉苁蓉 | 梭梭 | 53 | 0.6 | 185 | 灌木 |
| | GT-05 | 沙蒿 + 沙米 | 沙蒿 | 40 | 6.5 | 22 | 1 年生草本 |

甘州区样地葡萄 + 生态养殖复合模式表现出最优的植被覆盖状况，葡萄架平均盖度达 75%，藤本植物垂直空间利用率高，配套种植的紫花苜蓿密度达 15.3 株 /$m^2$，形成良好的地表覆盖；文冠果复合模式中，文冠果乔木层平均高度为 230 cm，但林下草本层盖度相对较低（55%），反映出乔木与草本的协同效应有待加强；梭梭 - 肉苁蓉模式的灌木层结构较为稀疏，梭梭密度仅 0.7 株 /$m^2$，这可能与栽植时间较短（3 年生）有关，后续需关注定植情况。

临泽县作为梭梭 - 肉苁蓉模式核心区，梭梭长势良好，平均高度 205 cm，显著高于其他县区同模式样地，说明该技术在当地已较为成熟，但沙蒿伴生层盖度（45%）较低，反映出该模式仍需加强林下植被管理；枸杞复合模式表现出较高的群落稳定性，枸杞灌木与沙打旺草本形成双层结构，总盖度达 68%，其中沙打旺密度 12.6 株 /$m^2$，有效抑制了沙面活化；文冠果在该县的生长表现相对滞后（平均高度 190 cm），这可能与当地降水偏少有关。

高台县菊芋复合模式呈现出独特的植被结构，菊芋作为优势种，株高达 85 cm，显著高于常规沙生植物，其块茎生长形成的特殊微地形改变了局部生境。草木樨作为伴生种，密度为 9.7 株 /$m^2$，与菊芋形成互补的生长格局。高台县文冠果生长指标最低（株高 175 cm），明显反映出盐碱胁迫对木本植物的抑制作用。结果表明，沙蒿 + 沙米组成的先锋群落盖度仅为 40%，属于典型的生态恢复早期阶段，后续需持续监测演替动态。

不同植被类型的株高表现出显著的梯度差异，葡萄植株最高（180 cm），显著高于文冠果，枸杞植株最矮（120 cm）。各模式的组分密度特征表现为文冠果、枸杞复合草本层模式（以配置沙

打旺为代表，密度 12.6 株 /m²）密度最大，其次为菊芋复合模式（密度 2.3 株 /m²），梭梭 - 肉苁蓉模式密度最小，为 0.6 ～ 0.9 株 /m²。不同配置模式的植被盖度差异明显，经济林模式盖度最高，为葡萄的 75%，显著高于药用植物模式，即枸杞的 68%。

### 3.4　不同治理模式的生态服务价值

通过对研究区六大沙化土地治理模式进行系统评估可以发现，各模式的生态服务价值特征存在明显差异（表 5）。

表 5　各模式生态服务价值 †

**Table 5　The value of ecosystem services in each mode**

| 评价维度 Evaluation dimension | 评价指标 Evaluation index | 葡萄复合模式 Grape composite mode | 梭梭 - 肉苁蓉模式 *Haloxylon ammodendron-Cistanche deserticola* mode | 枸杞复合模式 *Lycium barbarum* complex mode | 菊芋复合模式 Jerusalem artichoke complex mode | 文冠果复合模式 *Xanthoceras sorbifolium* complex mode | 生态养殖模式 Ecological farming mode |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 防风固沙 Prevent wind and consolidate sand | 植被覆盖度 /% | 68±5 | 72±6 ▲ | 65±4 | 60±7 | 63±5 | 58±6 |
| | 地表粗糙度 /cm | 4.2±0.8 | 5.6±1.2 ▲ | 3.8±0.6 | 3.5±0.9 | 4.0±0.7 | 3.0±0.5 |
| | 沙丘移动减缓速率 /% | 65±8 | 85±7 ▲ | 60±9 | 55±10 | 70±8 | 50±12 |
| 经济效益 Economic benefits | 单位面积年平均产值 /（万元·hm⁻²） | 35.25±6.30 ▲ | 21.75±4.65 | 27.30±5.70 | 14.25±2.70 | 18.75±4.20 | 25.20±5.25 |
| | 投入产出比 | 1∶2.8 ▲ | 1∶2.1 | 1∶2.3 | 1∶1.5 | 1∶1.9 | 1∶2.5 |
| 土壤改良 Soil improvement | 有机质增幅 /% | 170 | 210 ▲ | 185 | 230 ▲ | 150 | 120 |
| 生物多样性 Biodiversity | 植物物种丰富度指数 | 2.25±0.32 | 2.55±0.38 ▲ | 2.15±0.29 | 1.98±0.25 | 2.10±0.30 | 1.85±0.22 |
| | 鸟类种类增加 /% | 50 | 70 ▲ | 55 | 40 | 45 | 60 |
| | 昆虫多样性指数 | 1.85±0.21 | 2.05±0.25 ▲ | 1.78±0.19 | 1.65±0.18 | 1.72±0.20 | 1.92±0.23 |
| 水资源利用 Water resources utilization | 节水率 /% | 32±4 | 25±3 | 28±3 | 38±5 ▲ | 30±4 | 22±3 |
| | 水位稳定度 | 7.2±0.8 | 8.1±0.9 ▲ | 7.0±0.7 | 6.8±0.9 | 7.5±0.8 | 6.5±0.6 |

† ▲表示该指标最优值；数据为平均值 ± 标准差。▲ denotes the optimal value of the indicator; the data is the average ± standard deviation.

葡萄复合模式的经济价值优势突出，单位面积年平均产值达 35.25 万元 /hm²，投入产出比（1∶2.8）在各模式中位居第一，这主要得益于酿酒葡萄的高附加值和种养结合的循环利用模式。然而，该模式对水资源依赖较大，节水率仅为 32%，相对偏低，建议配套智能滴灌系统以提升水资源利用效率。

梭梭 - 肉苁蓉模式的生态效益表现最为突出，该模式下植被覆盖度达 72%，沙丘移动减缓率达 85%，均为各模式中最高，显示出极强的防风固沙功能。该模式下土壤有机质增幅达 210%，同时维持 21.75 万元 /hm² 的单位面积年平均产值，特别适合在生态脆弱的荒漠 - 绿洲过渡带推广种植。

枸杞复合模式呈现出良好的均衡性，具备明显的经济效益与生态效益协调发展特征。林药间作使鸟类物种增加 55%，昆虫多样性指数达 1.78，显著高于单一栽培模式。该模式在绿洲边缘区推广时，建议控制枸杞种植密度（以 1.5 m×2.0 m 为宜），以保障林下草本植物正常发育。

菊芋复合模式在特殊立地条件下优势显著，其盐碱地改良效果（有机质增幅 230%）和节水率（38%）均为各模式最优，但经济产出相对较低（14.25 万元 /hm²）。监测数据显示，该模式可使 pH 值 8.5 以下盐碱地的年脱盐率提升 15%，建议与文冠果搭配种植，以提高综合收益。

文冠果复合模式各项指标均衡稳定，虽无突出优势，但其耐旱特性（需水量比葡萄低 40%）和木本油料价值使其成为过渡带的理想选择。需注意的是，该模式在种植后第 3 年才会逐步显现效益，因此需建立长效补偿机制。

生态养殖模式短期效益显著，通过“草 - 畜 - 肥”的循环实现快速收益，但载畜量需严格控制在 10 羊单位 /hm² 以下，避免过度放牧引发植被退化。监测结果表明，合理控制载畜量可使地表覆盖度增长 5% ～ 8%。

### 3.5　黑河中游典型沙化土地治理模式优选

在综合各类调查数据与专家评分的基础上，通过层次分析法得出各模式相关指标得分（表 6）。评分采用 0 ～ 100 标准化分值，依据生态服务价值评价体系中 5 个维度共 11 个指标的量化评分，结合 AHP 赋权法计算，最终通过加权得到各模式的综合得分。所有数据均通过 $P < 0.05$ 的显著性检验，各模式综合得分见表 7。按综合得分排序后，确定最优治理模式为梭梭嫁接肉苁蓉模式、葡萄复合模式和菊芋复合模式。

表 6 各模式生态服务价值评价指标权重及一致性比例

**Table 6 The weight of each evaluation index and the consistency ratio of the ecological service value of each mode**

| 评价维度 Evaluation dimension | 维度权重 Dimension weight | 评价指标 Evaluation index | 指标权重 Weight of indicators | 一致性比例 Consistency ratio | 综合权重 Comprehensive weight |
|---|---|---|---|---|---|
| 水资源利用 Water resources utilization | 0.237 0 | 地下水位稳定度 | 0.377 3 | 0.050 1 ＜ 0.1 | 0.100 8 |
| | | 节水率 | 0.626 7 | | 0.136 2 |
| 生物多样性 Biodiversity | 0.143 8 | 鸟类种类增加 | 0.289 1 | 0.032 9 ＜ 0.1 | 0.039 1 |
| | | 植物物种丰富度指数 | 0.410 7 | | 0.061 9 |
| | | 昆虫多样性指数 | 0.300 2 | | 0.042 8 |
| 土壤改良 Soil improvement | 0.228 2 | 有机质含量 | 1.000 0 | 0.000 0 ＜ 0.1 | 0.228 2 |
| 经济效益 Economic benefits | 0.162 7 | 单位面积年平均产值 | 0.434 2 | 0.030 7 ＜ 0.1 | 0.064 3 |
| | | 投入产出比 | 0.565 8 | | 0.098 4 |
| 防风固沙 Prevent wind and consolidate sand | 0.228 3 | 沙丘移动减缓速率 | 0.216 9 | 0.022 5 ＜ 0.1 | 0.065 8 |
| | | 地表粗糙度 | 0.388 5 | | 0.072 6 |
| | | 植被覆盖度 | 0.394 6 | | 0.089 9 |

表 7 各模式综合得分及排序

**Table 7 Comprehensive scores and ranking of each mode**

| 模式 Mode | 节水率 Water-saving rate | 地下水位稳定度 Ground water level stability | 昆虫多样性指数 Biodiversity of insects | 鸟类种类增加 Increase in bird species | 植物物种丰富度 Plant species richness | 有机质含量 Inorganic matter content |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 梭梭 - 肉苁蓉模式 *Haloxylon ammodendron-Cistanche deserticola* mode | 92.3 | 86.3 | 85.9 | 76.5 | 76.8 | 78.5 |
| 葡萄复合模式 Grape composite mode | 82.5 | 82.6 | 84.6 | 75.9 | 79.1 | 80.6 |
| 菊芋复合模式 Jerusalem artichoke complex mode | 80.1 | 88.6 | 88.2 | 56.8 | 56.8 | 82.8 |
| 枸杞复合模式 *Lycium barbarum* complex mode | 88.9 | 85.7 | 76.6 | 72.9 | 72.9 | 77.9 |
| 生态养殖模式 Ecological farming mode | 83.5 | 78.9 | 80.7 | 77.5 | 77.5 | 83.9 |
| 文冠果复合模式 *Xanthoceras sorbifolium* complex mode | 81.6 | 85.8 | 78.4 | 77.6 | 77.6 | 71.5 |

| 模式 Mode | 单位面积年平均产值 Annual average output value per unit area | 投入产出比 Return on investment | 沙丘移动减缓速率 The rate of dune movement slows | 地表粗糙度 Surface roughness | 植被覆盖度 Vegetation coverage | 综合得分 Comprehensive score | 排序 Sorting |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 梭梭 - 肉苁蓉模式 *Haloxylon ammodendron-Cistanche deserticola* mode | 85.9 | 90.6 | 88.3 | 86.3 | 89.1 | 88.9 | 1 |
| 葡萄复合模式 Grape composite mode | 88.6 | 89.4 | 87.6 | 87.5 | 86.4 | 85.6 | 2 |
| 菊芋复合模式 Jerusalem artichoke complex mode | 86.0 | 85.7 | 85.5 | 87.8 | 76.2 | 82.8 | 3 |
| 枸杞复合模式 *Lycium barbarum* complex mode | 82.4 | 86.8 | 88.4 | 85.9 | 85.2 | 80.5 | 4 |
| 生态养殖模式 Ecological farming mode | 80.9 | 77.6 | 86.9 | 85.6 | 77.6 | 78.6 | 5 |
| 文冠果复合模式 *Xanthoceras sorbifolium* complex mode | 84.6 | 82.8 | 85.9 | 84.9 | 82.1 | 75.2 | 6 |

梭梭 - 肉苁蓉模式利用梭梭的深根系特性（可达 5 ～ 8 m）和肉苁蓉的寄生生长特点 [22-23]。该模式以防风固沙功能突出闻名，植被覆盖度年均提升 6.8%，沙丘移动速率降低 85%，同时通过药材生产实现 21.75 万元 /hm$^2$ 的经济收益。该模式成功的关键在于“窄带式”配置方案，采用 2 m×2 m 网格栽植，配合 3 年轮作制度，既保障了生态功能，又维持了经济可持续性。在水资源保障区域（具备灌溉条件，地下水位不高于 3 m），优先推荐葡萄复合模式。该模式通过“葡萄 + 生态养殖 + 牧草”的三元结构，可实现 15 ～ 42 万元 /hm$^2$ 的年综合收益。针对盐碱化土

壤（pH 值≥ 8.0，含盐量≥ 0.3%），菊芋复合模式展现出独特优势。该模式通过菊芋（耐盐阈值达 0.8%）与草木樨（年固氮量≥ 100 kg/hm$^2$）的协同作用，可实现年脱盐率 15% ～ 18%，土壤 pH 值降低 0.5 ～ 0.8。普通沙地（含盐量≤ 0.3%）则适合枸杞 / 文冠果复合模式，其中枸杞采用 1.5 m×2.0 m 的宽行距种植，为文冠果（3 m×4 m 定植）提供生长空间，形成“高 - 中 - 低”立体结构，使光能利用率提升 20% 以上。

## 4　讨　论

### 4.1　主客观协同赋权提升评价科学性

本研究构建的“AHP 框架约束 - 主客观协同赋权—综合模型评价”三阶递进式评价体系，为沙化土地治理模式评价实现了方法学创新。传统 AHP 法在生态系统服务价值评估中多依赖专家主观判断，存在权重分配与实地情况脱节的风险 [15-16]。本研究深度整合专家咨询意见与实地调查数据，在权重生成阶段实现了专业性与实践性的统一。与单纯依赖遥感数据或模型模拟的方法相比 [24]，本方法的优势在于通过实地调查数据对专家判断进行校验和修正，让权重分配更贴合治理场景的真实需求。例如在防风固沙功能评估中，专家赋予“植被覆盖度”较高权重（0.25），但实地调研数据显示，在干旱区“地表粗糙度”对阻沙同样重要，最终将这 2 项权重调整至相对均衡（分别为 0.20、0.18）。这种动态调整机制有效降低了单一主观赋权的偏差风险，提升了评价结果的可靠性。

### 4.2　生态适应性与经济可行性的动态平衡

本研究揭示了不同治理模式生态服务价值特征，本质上反映了生态适应性与经济可行性的动态制衡关系。梭梭 - 肉苁蓉模式的生态优势，得益于梭梭深根系（＞ 5 m）对沙层水分的超强汲取能力 [22]，以及肉苁蓉寄生关系形成的“植物 - 微生物”协同固沙机制 [23]。这一发现验证了程莉等 [25] 提出的“干旱区植物水力性状决定生态系统功能”结论，且本研究进一步明确了药用植物寄生关系对生态系统的增效作用。葡萄复合模式的高经济产出依托于河西走廊“光热资源 - 酿酒葡萄品质”的耦合效应，但其平均耗水量达 78 000 m$^3$/hm$^2$，远超黑河流域的农业用水红线（56 250 m$^3$/hm$^2$）。这种“经济作物 - 水资源冲突”与全球干旱区普遍存在的问题一致 [26]，本研究通过量化分析进一步明确了具体冲突阈值：当灌溉水量超过 60 000 m$^3$/hm$^2$ 时，经济收益增幅（＜ 5%）远低于生态成本增幅（＞ 15%），这一结果为水资源红线的制定提供了科学依据。菊芋模式的盐碱改良效能突出（土壤有机质含量提升 230%），归因于其肉质根分泌有机酸溶解碳酸钙的生化过程，与周梦佳 [27] 关于“菊芋耐盐机制”的研究结论一致。同时，本研究进一步发现了连作障碍与生化他感作用的关联性（种植第 3 年菊芋素累积量可达 1.2 μg/g），这一发现为轮作制度设计（如与沙打旺间作）提供了理论支撑，填补了现有研究中关于“生物治理长期效应”的认知空白。

### 4.3　基于多重约束的差异化治理策略

治理模式的优选必须立足水资源条件、土壤类型与生态敏感性的三重约束，这一观点与于贵瑞等 [28] 提出的“生态系统管理需考虑多维度承载力”理念相符。本研究创新性地提出“水土定基、效益协同、时序适配”的空间配置范式，进一步发展了现有的生态治理规划理论。在生态红线区实施防护优先策略 [29]，是对“生态优先”原则的具体实践，而本研究通过量化分析明确了具体管控阈值：当植被覆盖度低于 30% 或土壤容重高于 1.6 g/cm$^3$ 时，必须强制实施防护措施。这一量化标准为生态红线管理提供了可操作的依据。本研究提出的分区治理策略充分体现了“因地制宜”的生态治理思想。针对近水源区提出发展节水灌溉型葡萄产业链的建议，有效平衡了经济效益与生态约束；针对荒漠 - 绿洲过渡带提出布局梭梭 - 肉苁蓉复合体系的方案，则切实践行了“生态与经济协同发展”的理念 [30]。特别值得注意的是，本研究提出的“密度可控枸杞间作（1.5 m×2.0 m）”配置规格是经过实地试验验证的最优配置，既保障了林下草本层的生物多样性，又维持了经济产出的稳定性。

### 4.4　价值转化与制度创新的双轮驱动

本研究结果对生态治理政策制定具有重要启示。首先，梭梭 - 肉苁蓉模式存在经济收益空窗期问题，暴露出生态产品价值实现机制的缺失。临泽县调研数据显示，农户仅能获取初级产品总价值的 18%，这一发现与卓静等 [31] 提出的“生态产业链利益分配不均”的研究结论相互印证。因此，建议通过发展深加工产业与开展碳汇交易提升农户收益份额，建立“保护者受益、使用者付费”

的市场化机制。其次，水资源管理需要设计更精细的制度。本研究揭示的经济作物耗水超限问题，要求建立基于水权交易的弹性管理机制。水资源约束是模式优化的核心限制因子，需构建以水定产机制。葡萄模式的高耗水特性与区域地下水超采的矛盾十分突出，而梭梭模式通过深根系（＞ 5 m）汲水、菊芋模式凭借高节水率（38%），分别展现出对水资源条件的适应性。未来推广需严格遵循“以水定植”原则，将灌溉水量控制在生态阈值范围内；建议通过技术升级将葡萄复合模式的现状耗水量降至 52 500 $m^3/hm^2$ 以下，并借助智能监测手段推动用水效率提升。最后，治理模式的推广需要配套政策支持。本研究提出的分区协同治理体系，需要与生态补偿、产业扶持等政策工具结合运用。需要注意的是，不同模式的政策需求存在差异：梭梭 - 肉苁蓉模式需加强加工产业链扶持，菊芋模式需要设立盐碱地改良专项补贴，生态养殖模式则需建立载畜量监管机制。这种差异化的政策设计，是实现精准治理的关键。

## 5 结 论

本研究采用层次分析法，对黑河中游典型沙化土地的不同治理模式开展生态服务价值多维评价与优选，主要结论如下：

1）不同治理模式的生态服务功能存在显著互补性。梭梭 - 肉苁蓉模式的生态屏障功能最为突出，葡萄复合模式的经济产出领先，菊芋复合模式在盐碱改良与节水性能方面表现优异，其余治理模式在特定立地条件下也各有适用价值。

2）通过 AHP 多准则综合评价，筛选出梭梭 - 肉苁蓉模式、葡萄复合模式及菊芋复合模式为最优治理范式，并据此提出基于生态功能区划的差异化配置方案：在沙化过渡带发展梭梭 - 肉苁蓉生态经济体系，在近水区域布局节水型葡萄产业，在盐碱区域推广菊芋 - 文冠果复合修复模式。

3）本研究构建的“主观赋权 - 客观校验 - 多维耦合”AHP 评价框架，有效弥补了传统评估方法系统性不足的缺陷，为干旱区沙化土地治理模式的优选提供了科学可靠、可推广应用的决策方法与实践路径。

**参考文献：**

[1] 刘二燕 , 赵媛媛 , 周蝶 , 等 . 科尔沁 - 浑善达克沙地 2000—2020 年土地沙化时空变化格局 [J]. 中国沙漠 ,2024,44(4):46-56.
Liu E Y, Zhao Y Y, Zhou D, et al. Spatiotemporal variation patterns of land desertification from 2000 to 2020 in the Horqin-Otindag sandy land[J]. Journal of Desert Research,2024,44(4):46-56.

[2] 李季 , 王静 . 河西走廊绿洲社会 - 生态系统韧性时空格局演变特征 [J]. 干旱区研究 ,2025,42(10):1887-1898.
Li J, Wang J. Evolutionary characteristics of spatiotemporal patterns of resilience in oasis social-ecological systems in the Hexi Corridor[J]. Arid Zone Research,2025,42(10):1887-1898.

[3] 焦岩 , 闫峰 , 卢琦 , 等 . 西北干旱区绿洲时空变化及驱动力 [J]. 应用生态学报 ,2024,35(8):2206-2216.
Jiao Y, Yan F, Lu Q, et al. Spatiotemporal variation and driving factors of oases in the arid region of northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2024,35(8):2206-2216.

[4] 苏付荣 , 占玉芳 , 鲁延芳 , 等 . 河西走廊沙地人工梭梭林草本植物种群生态位特征 [J]. 江西农业学报 ,2025,37(6):24-31.
Su F R, Zhan Y F, Lu Y F, et al. Niche characteristics of herbaceous plant community of artificial *Haloxylon ammodendron* plantation in sandy land of Hexi corridor[J]. Acta Agriculturae Jiangxi,2025,37(6):24-31.

[5] 雷军 , 程新平 , 薛春 , 等 . 黑河流域中游北部荒漠区植物群落特征与稳定性 [J]. 中国沙漠 ,2024,44(6):187-194.
Lei J, Cheng X P, Xue C, et al. The characteristics and stability of plant communities in the northern desert area of the middle reaches of the Heihe river basin[J]. Journal of Desert Research, 2024,44(6):187-194.

[6] 李昊辰 , 胡广录 , 王涛 , 等 . 黑河中游砂壤地农田不同灌溉模式土壤水分动态模拟 [J]. 干旱区研究 ,2025,42(7):1333-1347.
Li H C, Hu G L, Wang T, et al. Soil moisture under different irrigation patterns in sandy loam farmland in the middle reaches of the Heihe river dynamic simulation[J]. Arid Zone Research, 2025,42(7):1333-1347.

[7] Chen Y T, Li Z B, Li P, et al. Impacts and projections of land use and demographic changes on ecosystem services: a case study in the Guanzhong region, China[J]. Sustainability,2022,14:3003.

[8] 李加林 , 张旖芯 , 张海涛 , 等 . 基于“潜力 - 弹性 - 稳定性”模型的温州市生态韧性时空变化及影响因素研究 [J]. 生态学报 ,2024,44(8):3253-3267.
Li J L, Zhang Y X, Zhang H T, et al. The research of spatio-temporal characteristics and influence factors of Wenzhou ecological resilience based on the potential-elastic-stability model[J]. Acta Ecologica Sinica,2024,44(8):3253-3267.

[9] 程琳琳 , 黄婷 , 刘焱序 . 基于改进价值当量因子的 1992—2015 年青藏高原生态系统服务价值演化分析 [J]. 水土保持通报 ,2019,39(5):242-248.
Cheng L L, Huang T, Liu Y X. Analysis on evolution of

ecosystem service value in Qinghai-Xizang Plateau based on improved value equivalent factors from 1992 to 2015[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2019,39(5):242-248.

[10] 赵瑜 , 陈超 , 胡振琪 . 中国西部生态脆弱区生态系统服务价值评估研究进展 [J]. 林业经济问题 ,2018,38(4):91-97,112.
Zhao Y, Chen C, Hu Z Q. Research progress on ecosystem service value assessment in ecological fragile areas of western China[J]. Issues of Forestry Economics,2018,38(4):91-97,112.

[11] 陈端吕 , 陈哲夫 , 彭保发 . 土地利用生态服务价值与经济发展的协调及空间分异 : 以西洞庭湖区为例 [J]. 地理研究 , 2018,37(9):1692-1703.
Chen D L, Chen Z F, Peng B F. Spatial differentiation and coupling effect between land ecosystem services value and economic development: a case study of west Dongting lake area[J]. Geographical Research,2018,37(9):1692-1703.

[12] 郭旭东 , 常青 , 刘筱 , 等 . 基于碳储量视角的城镇土地利用模式与生态效益分异特征 [J]. 中国土地科学 ,2017,31(4):61-70.
Guo X D, Chang Q, Liu X, et al. Urban land use pattern and its ecological benefit from the perspective of carbon storage[J]. China Land Sciences,2017,31(4):61-70.

[13] 江波 , 张路 , 欧阳志云 . 青海湖湿地生态系统服务价值评估 [J]. 应用生态学报 ,2015,26(10):3137-3144.
Jiang B, Zhang L, Ouyang Z Y. Ecosystem services valuation of Qinghai lake[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015,26(10):3137-3144.

[14] 宁虎森 , 罗青红 , 吉小敏 , 等 . 新疆梭梭林生态系统服务价值评估 [J]. 生态科学 ,2017,36(3):74-81.
Ning H S, Luo Q H, Ji X M, et al. Assessment on ecosystem service value of *Haloxylon ammodendron* forest in Xinjiang[J]. Ecological Science,2017,36(3):74-81.

[15] 张梅 , 王利娜 , 王姝婧 , 等 . 基于层次 - 关联度的新疆骏枣品质性状分析及综合评价 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2022,42(1): 78-85.
Zhang M,Wang L N,Wang S J,et al. Analysis and comprehensive evaluation of Xinjiang Jun jujube quality by hierarchy-relation analysis[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2022,42(1):78-85.

[16] 赵玉红 , 周玉丽 , 王艳霞 , 等 . 基于 AHP 的干旱半干旱区丰产型文冠果优良单株选择 [J]. 经济林研究 ,2024,42(2):267-274.
Zhao Y H, Zhou Y L,Wang Y X, et al. Selection of high-yield plus tree *Xanthoceras sorbifolia* in arid and semi-arid areas based on AHP[J]. Non-wood Forest Research,2024,42(2):267-274.

[17] 王奕淇 , 李国平 , 马嫣然 . 流域生态服务价值补偿分摊研究 : 以渭河流域为例 [J]. 干旱区资源与环境 ,2019,33(11):83-88.
Wang Y Q, Li G P, Ma Y R. Study on watershed ecosystem service value compensation apportionment: taking the Weihe watershed as an example[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2019,33(11):83-88.

[18] 夏鹏志 , 徐涛 , 金磊 . 基于 AHP-TOPSIS 的合肥市生态环境质量评价 [J]. 赤峰学院学报 ( 自然科学版 ),2023,39(10): 98-102.
Xia P Z, Xu T, Jin L. Evaluation of ecological environment quality in Hefei City based on AHP-TOPSIS[J]. Journal of Chifeng University (Natural Science Edition),2023,39(10):98-102.

[19] 麻进 . 黑河中游荒漠 - 绿洲过渡带不同灌丛植物根区土壤水分及其环境影响因素 [D]. 兰州 : 兰州交通大学 ,2023:8-9.
Ma J. Soil moisture and its environmental factors in the root zone of different shrub plants in the desert-oasis transitional zone in the middle reaches of the Heihe river[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University,2023:8-9.

[20] 成彩霞 , 赵玉红 , 许尔文 , 等 . 荒漠绿洲过渡带土壤水分特征及其对气候因子的响应 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025, 45(6):136-146.
Cheng C X, Zhao Y H, Xu E W. et al. Characterization of soil moisture and its response to climatic factors in the transition zone of a desert oasis[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025,45(6):136-146.

[21] 郭金玉 , 张忠彬 , 孙庆云 . 层次分析法的研究与应用 [J]. 中国安全科学学报 ,2008,18(5):148-153.
Guo J Y, Zhang Z B, Sun Q Y. Study and applications of analytic hierarchy process[J]. China Safety Science Journal,2008,18(5): 148-153.

[22] 李栋栋 . 荒漠区梭梭人工接种肉苁蓉技术 [J]. 现代园艺 ,2025, 48(17):94-96.
Li D D. Artificial inoculation technology of *Haloxylon ammodendron* with *Cistanche deserticola* in desert area[J]. Contemporary Horticulture,2025,48(17):94-96.

[23] 储晗 . 立足实际作业流程的荒漠肉苁蓉人工栽培技术应用过程探究 [J]. 种子世界 ,2025(7):243-245.
Chu H. Study on the application process of artificial cultivation technology of desertliving *Cistanche deserticola* based on actual operation process[J]. Seed World,2025(7):243-245.

[24] 张文凯 , 张宇飞 , 汪雯雯 , 等 . 基于遥感评估的生态系统服务价值时空变化研究 : 以山阴县为例 [J]. 环境生态学 ,2024,6(6): 49-58.
Zhang W K, Zhang Y F, Wang W W, et al. Temporal and spatial variation of ecosystem service value in Shanyin County based on remote sensing assessment[J]. Environmental Ecology, 2024,6(6):49-58.

[25] 程莉 , 李玉霖 , 宁志英 , 等 . 木本植物应对干旱胁迫的响应机制 : 基于水力学性状视角 [J]. 生态学报 ,2024,44(7):2688-2705.

Cheng L, Li Y L, Ning Z Y, et al. Response mechanisms of woody plants to drought stress: a review based on plant hydraulic traits[J]. Acta Ecologica Sinica,2024,44(7):2688-2705.

[26] 吴子晗 , 章孙逊 , 张帆 , 等 . 未来气候情景下黑河中游灌溉缺水风险评估 [J]. 灌溉排水学报 ,2025,44(1):97-103.
Wu Z H, Zhang S X, Zhang F, et al. Assessing irrigation water shortage in the middle reaches of the Heihe river basin under future climate scenarios[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2025,44(1):97-103.

[27] 周梦佳 . 耐盐菊芋在不同施氮处理下的地下部微生物群落分析及其内生固氮寡养单胞菌促进菊芋生长的机制研究 [D]. 南京 : 南京农业大学 ,2020:9-10.
Zhou M J. The analysis of underground microbial community in salt-tolerant Jerusalem artichoke and the mechanism of endogenous nitrogen-fixing *Stenotrophomonas* to promote this growth under different nitrogen treatments[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University,2020:9-10.

[28] 于贵瑞 , 于宗绪 , 王秋凤 , 等 . 宏观生态系统科学理论研究和实践应用知识体系的构建 [J]. 应用生态学报 ,2025,36(8):2257-2269.
Yu G R, Yu Z X, Wang Q F, et al. Construction of a knowledge system for theoretical research and practical application of macroecosystem science [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2025,36(8):2257-2269.

[29] 李维 . 为科学放生划定生态红线 [J]. 环境经济 ,2025(12):68-72.
Li W. Draw an ecological red line for scientific release[J]. Environmental Economy,2025(12):68-72.

[30] 董玉莲 . 基于“两山”理论的农村生态与经济协同发展探析 [J]. 农业经济 ,2023(9):57-59.
Dong Y L. On the coordinated development of rural ecology and economic development based on the theory of “Two Mountains”[J]. Agricultural Economy,2023(9):57-59.

[31] 卓静 , 朱延年 , 李韬 , 等 . 陕北黄土高原区生态服务价值对土地利用变化的响应 [J]. 水土保持研究 ,2022,29(5):336-342.
Zhuo J, Zhu Y N, Li T, et al. Response of ecological service value and quality to land use change in China’s Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation,2022,29(5):336-342.

[ 本文编校：戴欧琳 ]

（上接第 137 页）

[27] 王俪玢 , 黄云浩 , 范春雨 , 等 . 东北鼠李生殖耗费的性别分异研究 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2020,40(12):69-74.
Wang L B, Huang Y H, Fan C Y, et al. Study on gender differentiation of reproduction cost in *Rhamnus schneideri* var. *manshurica* [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2020,40(12):69-74.

[28] Zhou Q, Shi H, He R, et al. Plastic and adaptive response of carbon allocation to temperature change in alpine treeline trees[J]. Environmental and Experimental Botany,2023,208:105271.

[29] Herrera-Ramírez D, Hartmann H, Römermann C, et al. Anatomical distribution of starch in the stemwood influences carbon dynamics and suggests storage-growth trade-offs in some tropical trees[J]. Journal of Ecology,2023,111:2532-2548.

[30] 李帆 , 田娜玲 , 余殿 , 等 . 林木非结构性碳水化合物的分布特征及影响因素研究进展 [J]. 温带林业研究 ,2025,8(1):39-44,62.
Li F, Tian N L, Yu D, et al. Research progress on the distribution characteristics and influencing factors of non-structural carbohydrates in forest trees[J]. Journal of Temperate Forestry Research, 2025,8(1):39-44,62.

[ 本文编校：戴欧琳 ]