

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.06.013 CSTR:32310.14.stbxb.2025.06.013

詹仪, 马瑞, 马彦军, 等. 基于DPSR模型的河西走廊阻沙固沙带防护体系健康评价[J]. 水土保持学报, 2025, 39(6): 270-280.

ZHAN Yi, MA Rui, MA Yanjun, et al. Health evaluation of sand prevention and fixation belt protection system in Hexi Corridor based on DPSR model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6): 270-280.

## 基于DPSR模型的河西走廊阻沙固沙带防护体系健康评价

詹仪, 马瑞, 马彦军, 田永胜, 刘腾, 陈玉皎

(甘肃农业大学林学院, 兰州 730070)

**摘要:** [目的] 构建科学合理的阻沙固沙带健康评价体系并准确评估其健康状况, 对于保障区域生态安全与促进经济可持续发展具有重要意义。[方法] 以河西走廊阻沙固沙带防护体系为研究对象, 基于文献综述和专家咨询法构建评价指标体系, 运用专家打分法结合层次分析法确定各项指标权重, 采用专家咨询法进行指标量化与健康等级划分, 最后利用综合指标法计算阻沙固沙带健康综合指数, 并开展实例研究。[结果] 1) 基于DPSR模型构建了河西走廊阻沙固沙带健康评价指标体系, 该体系由驱动力、压力、状态、响应4个准则层因子及其下属的33项具体评价指标组成; 准则层内响应因子>压力因子>状态因子>驱动力因子的权重(其权重分别为0.344、0.246、0.225、0.185); 制定各指标评价标准, 并根据研究区实际情况将阻沙固沙带健康状况划分为5个等级。2) 运用上述评价体系对选取的3条河西走廊阻沙固沙带样地进行健康综合评价, 评价结果显示, 高台样地处于亚健康状态, 民勤昌宁和红砂岗样地均处于不健康状态。[结论] 研究构建的阻沙固沙带健康评价体系能够客观反映阻沙固沙带的健康状况及其健康差异, 具有一定的科学性、实用性和可操作性。

**关键词:** 河西走廊; 阻沙固沙带防护体系; 健康评价; DPSR模型

**中图分类号:** S714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2025)06-0270-11

## Health Evaluation of Sand Prevention and Fixation Belt Protection System in Hexi Corridor Based on DPSR Model

ZHAN Yi, MA Rui, MA Yanjun, TIAN Yongsheng, LIU Teng, CHEN Yujiao

(College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** [Objective] The establishment of a scientific and reasonable health evaluation system for the sand prevention and fixation belt and the accurate evaluation of its health status are crucial for ensuring regional ecological security and promoting sustainable economic development. [Methods] Taking the sand prevention and fixation belt protection system in the Hexi Corridor as the research object, an evaluation index system was constructed based on literature review and expert consultation. The weights of each index were determined using the expert scoring method and the analytic hierarchy process (AHP). Index quantification and health grade classification were conducted using the expert consultation method. Finally, the comprehensive index method was used to calculate the integrated health index of the sand prevention and fixation belt, followed by a case study. [Results] 1) Based on the DPSR model, the health evaluation index system for the sand prevention and fixation belt in the Hexi Corridor was constructed, consisting of four criterion-level factors-driving force, pressure, state, and response-and 33 specific evaluation indices under them. Within the criterion layer, the weights of response factor>pressure factor>state factor>driving force factor were 0.344, 0.246, 0.225, and 0.185, respectively. Evaluation criteria for each index were established, and the health status of the sand prevention and fixation belt was classified into five grades based on the actual conditions in the study area. 2) The proposed evaluation system

收稿日期: 2025-04-19 修回日期: 2025-05-31 录用日期: 2025-06-18 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-08-01

资助项目: 国家自然科学基金项目(U21A2001); 甘肃省自然科学基金项目(1506RJZA016)

第一作者: 詹仪(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: 1073323020224@st.gsau.edu.cn

通信作者: 马瑞(1977—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: mar@gsau.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

was applied to conduct comprehensive health assessments of three selected sample plots of sand prevention and fixation belt in the Hexi Corridor. The evaluation results indicated that the Gaotai sample plot was in a sub-healthy state, and the Minqin Changning and Hongshagang sample plots were in an unhealthy state. [Conclusion] The health evaluation system developed in this study can objectively reflect the health status and health differences of the sand prevention and fixation belt, demonstrating a certain degree of scientific validity, practical applicability and operational feasibility.

**Keywords:** Hexi Corridor; sand prevention and fixation belt protection system; health evaluation; DPSR model

**Received:** 2025-04-19

**Revised:** 2025-05-31

**Accepted:** 2025-06-18

**Online**(www.cnki.net): 2025-08-01

荒漠化加剧土壤侵蚀和水土流失,引起沙尘暴、干旱等气候灾害频发,不仅威胁人类居住的生态环境,还阻碍区域经济可持续发展<sup>[1-2]</sup>。因此,荒漠化防治是人类面临的共同挑战。阻沙固沙带是布置于荒漠-绿洲过渡带前沿的生态屏障,是由乔、灌木防护林带、机械沙障、封育等措施组成的复合带状防风固沙体系<sup>[3-4]</sup>,属于一个相对独立的自然-社会-经济的复合生态系统<sup>[5]</sup>。作为绿洲与荒漠之间不可或缺的生态缓冲区,阻沙固沙带在防治荒漠化和保护生态环境方面发挥着重要作用,能够有效降低风速、减少风沙活动强度、固定流沙、遏制沙漠扩张、保护绿洲生态安全与区域经济的可持续发展。然而,当前阻沙固沙带防护体系正面临诸多严峻挑战。防护体系建设规划不当、人工管护不到位及固沙植物生长状态不佳等问题,严重影响防护体系的长期稳定性和可持续性,防护体系破碎程度加剧,其综合效能也显著下降。生态系统健康评价是衡量生态系统破碎和稳定程度的有效方法<sup>[5]</sup>,客观评价阻沙固沙带防护体系健康状况,可为政府和管理部门提供预警数据,助力防沙治沙工作的持续优化与完善。

当前关于阻沙固沙带的研究主要集中在土壤理化性质和酶活性特征<sup>[4]</sup>、荒漠植物叶功能性状<sup>[3]</sup>及土壤细菌群落结构<sup>[6-7]</sup>等方面。在健康评价领域,杜鹃<sup>[5]</sup>等从压力、状态和响应3个方面对民勤县绿洲-荒漠交错带生态系统健康状况进行了评估。然而荒漠-绿洲过渡带是一个较广阔的研究范围,真正对风沙流起到拦挡、阻隔和固定作用,并形成生态防护屏障的是布置在荒漠绿洲过渡带最前沿的阻沙固沙带,目前对于阻沙固沙带防护体系健康关注较少,还未有统一的健康评价体系。河西走廊地处中国西北干旱半干旱地区,由于其特殊的地理与气候条件,风沙活动频繁,荒漠化问题极其严峻,已经对区域生态和社会经济发展造成严重威胁。因此,本文以河西走廊阻沙固沙带防护体系为研究对象,基于DPSR模型

系统构建阻沙固沙带健康评价体系,科学评价阻沙固沙带健康状况,旨在为阻沙固沙带生态环境综合治理提供科学依据,促进其健康可持续发展。

## 1 研究区概况

河西走廊地处黄河以西、祁连山和巴丹吉林沙漠中间,位于甘肃省西北部,是一个呈北西—南东走向的狭长地带<sup>[3,8]</sup>。该区域深居内陆,远离海洋,属于温带大陆性气候,其太阳辐射强,日照丰富,年降水量30~160 mm,而大部分地区年蒸发量2 000~3 000 mm,蒸发量远高于降水量,且降水分布由东到西、自南向北递减<sup>[9-10]</sup>,多大风天气,存在大面积的戈壁滩和荒漠,沙尘暴频发<sup>[8]</sup>,土壤类型以风沙土为主。河西走廊绿洲正遭受不同程度的风沙危害,阻沙固沙带作为荒漠-绿洲过渡带的核心生态屏障,通过人工植被、天然植被、机械沙障等组分的协同作用,发挥着遏制沙漠扩张、保护绿洲生态安全等重要功能。其中人工植被以梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、白杨(*Populus*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)为主,天然植被有白刺(*Nitraria tangutorum*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)和芦苇(*Phragmites australis*)等。然而,受气候变化加剧与人类活动干扰的双重影响,防护体系破碎化严重<sup>[11]</sup>,区域生态健康面临的威胁日益增大。

## 2 阻沙固沙带健康评价体系

### 2.1 评价指标体系的构建

2.1.1 DPSR模型构成 DPSR模型源于压力-状态-响应(PSR)模型,PSR模型是生态系统健康评价常用的一种指标体系框架<sup>[12]</sup>,体现了人类社会活动与生态环境紧密联系的逻辑关系<sup>[13]</sup>。相较于PSR模型,DPSR模型结合了生态系统变化驱动因素,强调导致环境压力与状态变化的潜在因素,更清晰地描述了人类与环境之间相互影响的因果关系<sup>[14]</sup>,且该模型具有系统性、层次性,能较全面系统地反映生态系统健康状况<sup>[8]</sup>,因此本文尝试利用此模型对阻沙固沙带防护体系健康状况进行评价(图1)。

其中  $D$  为驱动力,是影响阻沙固沙带健康状况的潜在间接因素; $P$  为压力,表示促使阻沙固沙带健康状况发生变化的直接因素; $S$  为状态,表示在驱动力和

压力共同作用下阻沙固沙带所处的状态; $R$  为响应,表示人类社会针对阻沙固沙带健康变化所制定的各类积极政策及应对措施(图 1)。

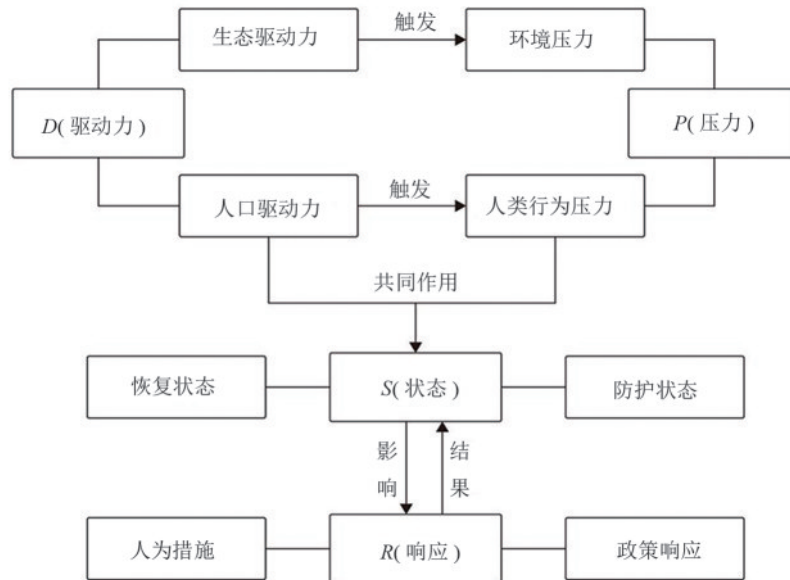


图 1 DPSIR 模型构建

Fig. 1 Construction of DPSIR model

2.1.2 阻沙固沙带防护体系健康评价指标选取 健康的阻沙固沙带应该具备的条件是完整的组织结构,良好的自我调节和恢复能力,较高的生态系统稳定性,完备的生态服务功能。阻沙固沙带作为一个多层次、开放且结构复杂的复合生态系统,其健康状况受气候、水文、土壤、植被及管理等多重因素共同影响。

河西走廊深居西北内陆,降水稀少而蒸发量极大,光照充足,年太阳总辐射量达  $5\ 700\sim 6\ 400\ \text{MJ}/\text{m}^2$ ,多大风天气,沙尘暴频发。由于气候条件的影响,导致区域生态环境较为脆弱,生态系统恢复力和稳定性较低。水分因素是影响河西走廊阻沙固沙带健康的主要限制因素,它不仅制约着植被的生长与分布,还对土壤及其他环境资源的发育和稳定构成威胁,影响防护体系长期稳定性。土壤质量直接影响植被的生长状况和生态系统的恢复能力。河西走廊土壤普遍存在养分含量较低、结构不良、抗蚀性差等问题,进一步加剧了阻沙固沙带生态脆弱性,影响其可持续健康发展。作为阻沙固沙带的核心组分,植被的合理配置与良好生长有助于阻沙固沙带健康稳定发展,提高其防护能力。此外,科学的人为管理措施和响应机制,则是保障阻沙固沙带持续健康发展的关键所在。通过定期实施人工抚育、不断优化防护体系结构、严格执行相关法律法规等举措,能够帮助阻沙固沙带抵御自然与人为的双重压力,确保其生态功能可持续发展。

选择合适的评价指标是构建科学合理评价指标体系的前提和关键<sup>[15]</sup>。本研究通过系统梳理相关文献,深入分析河西走廊阻沙固沙带防护体系健康影响因素并结合其实际情况,从生态、经济及社会 3 个维度综合选取评价指标。为确保评价指标的科学性、系统性、可操作性、代表性,邀请业内专家对评价指标进行审核评估,根据专家意见调整评价指标体系,最终基于 DPSIR 模型,构建了由目标层(A)、准则层(B)、指标层(C和D)共 33 项指标组成的评价指标体系(图 2)。

## 2.2 评价指标权重确定

层次分析法<sup>[16-17]</sup>可将复杂的决策问题分解成目标、准则、指标等层次,并构建一个多层次的结构模型,进行定性与定量分析,随后通过专家经验衡量低层次因素对高层次因素的相对重要性,并据此得出权重的排序。该方法具有系统性与层次性,结构清晰且实用有效,因此本研究应用层次分析法,结合专家打分对阻沙固沙带防护体系健康评价各层指标权重进行确定。具体步骤:

1) 构建判断矩阵 按照图 2 建立的健康评价指标体系,共构建 8 个判断矩阵(A—B、B1—C、B2—C、B3—C、B4—C、C11—D、C21—D、C22—D),向本领域 30 位专家发出指标权重评分表,专家根据经验对每一层次指标相对于它所属上一级指标的重要程度进行两两比较,然后根据重要性等级及评分标准(表 1)进行赋值。

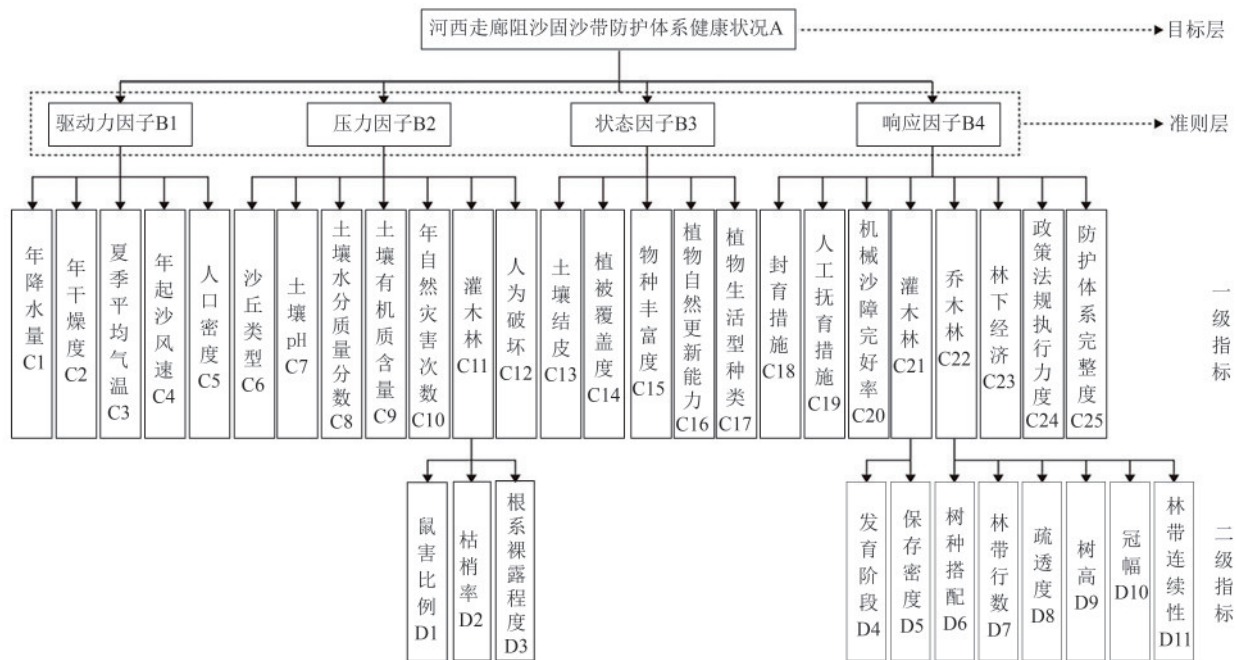


图 2 阻沙固沙带防护体系健康评价指标体系

Fig. 2 Health evaluation index system for sand prevention and fixation belt protection system

表 1 判断矩阵标度值及含义

标度	含义
1	2 个指标对比, 具有同等重要性
3	2 个指标对比, 前者比后者稍微重要
5	2 个指标对比, 前者比后者明显重要
7	2 个指标对比, 前者比后者强烈重要
9	2 个指标对比, 前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	表示上述相邻判断的中间值
1~9 的倒数	表示相应 2 个指标交换次序比较的重要性

2) 计算各指标相对权重 对于上述 8 个判断矩阵, 采用方根法计算指标权重, 首先计算判断矩阵中每行的乘积的  $n$  次方根 ( $\bar{w}_i$ ), 计算公式为:

$$\bar{w}_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad (1)$$

式中:  $a_{ij}$  为判断矩阵中元素 (两两比较结果);  $n$  为判断矩阵阶数;  $\bar{w}_i$  为判断矩阵第  $i$  行元素乘积的  $n$  次方根。

对  $\bar{w}_i$  进行归一化处理, 计算指标相对权重 ( $w_i$ ), 计算公式为:

$$w_i = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{w}_i} \quad (2)$$

3) 一致性检验 计算判断矩阵最大特征根 ( $\lambda_{max}$ ), 计算公式为:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(A_w)_i}{w_i} \quad (3)$$

式中:  $A_w$  为判断矩阵 \* 标准化后的权重按行的累加值;  $n$  为矩阵阶数。

计算一致性指标 (CI), 计算公式为:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

由表 2 可知, 平均随机一致性指标 (RI) 分别为 0.90、1.12、1.32、1.12、1.41、0.58、0、1.24, 随机一致性比率 CR 计算公式为:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

表 2 平均随机一致性指标 (RI) 取值

矩阵阶数 ( $n$ )	平均随机一致性指标 (RI)
1	0
2	0
3	0.58
4	0.90
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41
9	1.45
10	1.49

层次分析法中一致性检验的目的在于判断专家给出的指标两两比较重要性是否存在逻辑矛盾, 当  $CR < 0.1$  时, 表明判断矩阵的一致性在容许范围内, 专家的判断结果有效; 若  $CR \geq 0.1$ , 说明判断矩阵出现逻辑错误, 应考虑对判断矩阵进行修正。通过一致性检验后得到各评价指标对上一层的权重及各评价指标对目标层的最终权重 (表 3)。

表 3 阻沙固沙带防护体系健康评价指标权重  
Table 3 Weights of health evaluation indices for sand prevention and fixation belt protection system

目标层	准则层	权重	一级指标	权重	二级指标	权重
河西走廊阻沙固沙带防护体系健康评价	驱动力(D)	0.185	年降水量 C1	0.055 5		
			年干燥度 C2	0.055 5		
			夏季平均气温 C3	0.027 7		
			年起沙风速 C4	0.037 1		
			人口密度 C5	0.009 2		
	压力(P)	0.246	沙丘类型 C6	0.020 4		
			土壤 pH C7	0.015 2		
			土壤水分质量分数 C8	0.061 5		
			土壤有机质含量 C9	0.049 4		
			年自然灾害次数 C10	0.014 7		
			鼠害比例 D1	0.015 9		
			灌木林 C11	0.067 4	枯梢率 D2	0.031 3
					根系裸露程度 D3	0.020 2
			人为破坏 C12	0.017 4		
			土壤结皮 C13	0.018 0		
	状态(S)	0.225	植被覆盖度 C14	0.045 0		
			物种丰富度 C15	0.067 5		
			植物自然更新能力 C16	0.067 5		
			植物生活型种类 C17	0.027 0		
			封育措施 C18	0.026 1		
	响应(R)	0.344	人工抚育措施 C19	0.031 8		
			机械沙障完好率 C20	0.032 5		
			灌木林 C21	0.031 5	发育阶段 D4	0.014 4
					保存密度 D5	0.017 1
					树种搭配 D6	0.021 1
				林带行数 D7	0.011 4	
				疏透度 D8	0.010 2	
乔木林 C22			0.087 6	树高 D9	0.010 2	
				冠幅 D10	0.012 9	
				林带连续性 D11	0.021 8	
				林下经济 C23	0.017 2	
		政策法规执行力度 C24	0.012 2			
		防护体系完整度 C25	0.105 1			

### 2.3 评价指标量化

阻沙固沙带健康评价指标包括定性指标和定量指标,由于各指标间存在量纲差异,不能直接进行比较,因此需先对各指标进行量化并做标准化处理。本文采取等级评价法<sup>[18-19]</sup>对阻沙固沙带健康评价指标进行量化处理,并制定相应评价优劣等级表,将每个评价指标划分为 3 个等级:差、中、好,采用黄金分割法<sup>[18-19]</sup>分别对每个等级进行赋值 0.38、0.62、1.00,详见表 4。

### 2.4 综合评价

健康综合指数是为了定量地评价阻沙固沙带健康状态,其取值为 0~1。本研究采用综合指标法<sup>[20]</sup>,把各指标的标准化值及相应权重代入综合评价模

型,通过加权求和的方法计算阻沙固沙带的健康综合评价分值,计算公式为:

$$H = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (6)$$

式中: $H$ 为阻沙固沙带健康综合指数; $w_i$ 为各指标综合权重值; $x_i$ 为各指标得分; $n$ 为评价指标个数。

### 2.5 健康等级划分

阻沙固沙带防护体系健康评价等级划分是健康评价中的关键环节,目前该领域健康等级划分仍处于探索阶段,尚未形成统一的健康度量标准。本文借鉴前人<sup>[5]</sup>研究结果并结合研究区实际情况,采用专家咨询法,将阻沙固沙带健康状况划分为健康状态、亚健康状态、不健康状态、病态状态和濒危状态 5 个等级(表 5)。

表 4 阻沙固沙带防护体系健康评价指标等级  
Table 4 Grading criteria for health evaluation indices of sand prevention and fixation belt protection system

一级指标	二级指标	评价优劣等级		
		差(0.38)	中(0.62)	好(1.00)
年降水量/mm		<100	100~200	>200
年干燥度		>16	8~16	<8
夏季平均气温/℃		>22.5	20.0~22.5	<20
年起沙风速/(m·s <sup>-1</sup> )		>5	3~5	<3
人口密度/(人·km <sup>-2</sup> )		>300	<100	100~300
沙丘类型		流动沙丘	半固定沙丘	固定沙丘
土壤 pH		>8.5	7.5~8.5	6.5~7.5
土壤水分质量分数/%		<0.5	0.5~1.0	>1.0
土壤有机质质量分数/(g·kg <sup>-1</sup> )		<0.5	0.5~1.0	>1.0
年自然灾害次数		>3	≤3	无
灌木林	鼠害比例/%	>30	10~30	<10/无鼠害
	枯梢率/%	>30	10~30	<10/无枯梢
	根系裸露程度/%	≥30	<30	无裸露
人为破坏		重度	中度	轻度/无
土壤结皮		无结皮	物理结皮	生物结皮
植被覆盖度/%		<10	10~20	>20
物种丰富度/种		<5	5~8	>8
植物自然更新能力		样方内更新苗少于 10 株	更新苗数量 10~20 株	更新苗 20 株以上
植物生活型种类		<2	2~3	>3
封育措施		仅有视频监控	仅封育	有封育且安装视频监控
人工抚育措施		灌溉/施肥/病虫害防治	灌溉+施肥/灌溉+病虫害防治/施肥+病虫害防治	灌溉、施肥、病虫害防治
机械沙障完好率/%		<60	60~80	>80
灌木林	发育阶段	幼龄林/过熟林	中龄林	近熟林/成熟林
	保存密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	<270/>1 500	270~699	700~1 500
乔木林	树种搭配	乔木	乔木+灌木/乔木+草本	乔木+灌木+草本
	林带行数	单行一带	多行一带	两行一带
	疏透度	<0.2/>0.7	0.2~0.3/0.4~0.7	0.3~0.4
	树高/m	<5	5~10	>10
	冠幅/m	<3.0	3.0~5.0	>5.0
	林带连续性/%	<0.5	0.5~0.8	>0.8
林下经济		种植锁阳、肉苁蓉等但人类活动剧烈	仅种植锁阳、肉苁蓉等	种植锁阳、肉苁蓉等且辅以灌溉措施
政策法规执行力度/%		<50	50~80	>80
防护体系完整度/%		<50	50~75	>75

注:为确保指标量化科学性、客观性、适用性,查阅相关资料并结合河西走廊阻沙固沙带实际情况,再次向本领域 30 位专家分发调查问卷进行评价指标等级划分。参照《造林技术规程》<sup>[21]</sup>标准制定灌木林保存密度评分等级;疏透度指林带纵断面的透光面积与其纵断面总面积的比值;冠幅为树木在南北和东西方向宽度的平均值;林带连续性是 100 m 长林带断带长度与 100 的比值<sup>[18]</sup>。需特别说明的是,对于乔木林、机械沙障完好率、灌木林、封育措施、人工抚育措施及林下经济的评分需先确定有或无,有则按表 4 进行评分,无则记 0 分。

表 5 阻沙固沙带防护体系健康等级

Table 5 Health grades of sand prevention and fixation belt protection system

健康综合指数(H)	健康等级
[0.80,1.0]	健康
[0.60,0.80)	亚健康
[0.40,0.60)	不健康
[0.20,0.40)	病态
[0,0.20)	濒危

健康状态:阻沙固沙带自然状态良好,结构完整,具备良好的自我调节和恢复能力,生态系统稳定性高。植被种类丰富,各类植被协同构建生态屏障,能长期有效地提供防沙治沙服务,是可持续发展模式下的理想生态状态。

亚健康状态:阻沙固沙带自然状态较好,结构较为完整,具有一定的自我调节和恢复能力,系统尚且稳定。基本能维持其阻沙固沙功能,但面临退化的潜在风险,需适度干预提升其服务能力。

不健康状态:阻沙固沙带结构缺失,自我调节和恢复能力较弱,生态结构单一或失衡。服务功能退化且不健全,仅能局部阻挡风沙,防治能力弱化,需加强管理措施以改善现状。

病态状态:阻沙固沙带结构破碎,基本丧失自我修复能力与大部分服务功能,亟须采取大规模综合治理措施以挽回退化趋势。

濒危状态:阻沙固沙带结构破碎,土壤与植被严重退化,丧失自我修复能力,不再具备生态屏障功能,恢复治理难度极高。

### 3 案例验证分析

本研究以河西走廊阻沙固沙带防护体系为研究对象,选取3条具有代表性的阻沙固沙带样地,应用上述健康评价体系进行健康综合评价,以验证该评价体系的科学性、适用性。阻沙固沙带作为绿洲前沿最关键的生态屏障,是由乔、灌木林带、机械沙障及封育措施组成的复合带状防风固沙体系,通过多层次防护结构实现高效

治沙。本研究遵循防护体系构建标准,以合格的建设单位(至少具有上述4项核心措施中的2项)作为研究对象,选择河西走廊常见的3种阻沙固沙带结构模式(乔木林+灌木林;乔木林+灌木林+封育措施;乔木林+灌木林+机械沙障+封育措施)开展系统的健康评价研究。3条阻沙固沙带分别位于武威市民勤县昌宁镇、红砂岗镇、张掖市高台县。

#### 3.1 样地调查

2023年8—10月,对选取的3条阻沙固沙带开展系统的野外调查。为全面表征防护体系的生态特征,根据阻沙固沙带的空间结构特征,将每条样带从流动沙丘前缘至绿洲边缘的完整防护范围视为1个纵断面,在每个纵断面前端(近沙丘区)、中部(过渡区)、末端(近绿洲区)沿同一水平线分别设置3个20 m×20 m的标准大样方进行植被特征调查,每个样方内沿对角线设置5个1 m×1 m小样方用于土壤采样。

1)野外实地调查:记录样地经纬度、海拔、土壤类型、沙丘类型等环境因子,调查乔木林、灌木林、机械沙障及封育措施等防护体系的结构参数,统计样方内植被覆盖度、植物种类和更新苗数量等植被特征。2)问卷调查:了解群众对阻沙固沙带的认知程度及管护措施、政策法规执行力度及有无林下经济等信息。3)试验测定:采用直径50 mm土壤取样器在每个小样方分层采集0~10、10~20、20~40、40~60 cm土层的土壤样品,带回实验室测定其土壤pH(电位法)、水分质量分数(烘干法)、有机质含量(重铬酸钾外加热法)<sup>[22]</sup>。4)查阅统计年鉴:查阅《民勤年鉴2023》<sup>[23]</sup>《高台年鉴2023》<sup>[24]</sup>获取年降水量、年干燥度、夏季平均气温、年起沙风速、人口密度、年自然灾害次数等数据。样地基本情况见表6。

#### 3.2 样地调查结果

结合野外调查与室内试验分析得到3条阻沙固沙带样地健康评价指标的统计值(表7)。

表 6 样地基本情况

Table 6 Basic information of sample plots

序号	样地	地理坐标		海拔/m	阻沙固沙带宽度/m	沿绿洲长度/m	防护体系结构	主要植物
		北纬(N)	东经(E)					
1	民勤县昌宁镇	38°66'89"	102°41'04"	1 340.1	1 050	850	乔木林+灌木林	梭梭、白刺、白杨
2	民勤县红砂岗	38°86'98"	103°27'31"	1 288.1	1 500	800	乔木林+灌木林+封育措施	沙拐枣、梭梭、柽柳、沙枣
3	高台县黑泉镇	39°53'02"	99°58'28"	1 286.0	2 200	1 300	乔木林+灌木林+机械沙障+封育措施	芦苇、梭梭、白刺、白杨

注:表中样地地理坐标及海拔均对应于阻沙固沙带沿绿洲一侧中心位置。

表 7 样地健康评价指标统计值  
Table 7 Statistical values of health evaluation indices for sample plots

指标	民勤昌宁	民勤红砂岗	高台黑泉
年降水量/mm	120.8	120.8	115.7
年干燥度	21.93	21.93	13.39
夏季平均气温/°C	23.3	23.3	23.5
年起沙风速/(m·s <sup>-1</sup> )	5.6~6.3	5.6~6.3	1.6
人口密度/(人·km <sup>-2</sup> )	10.83	10.83	36.32
沙丘类型	流动沙丘	半固定沙丘	半固定沙丘
土壤 pH	8.8	8.4	8.2
土壤水分质量分数/%	0.44	0.56	0.72
土壤有机质质量分数/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.51	0.60	0.83
年自然灾害次数	8	8	2
鼠害比例/%	0	15	20
灌木林枯梢率/%	45	32	23
根系裸露程度/%	25	33	0
人为破坏土壤结皮	中度	无	无
植被覆盖度/%	无	物理结皮	物理结皮
物种丰富度/种	17	21	25
植物自然更新能力	7	12	6
植物生活型种类	3	3	4
封育措施	3	3	3
人工抚育措施	无	仅封育	仅封育
机械沙障完好率/%	无	无	无
发育阶段	无	无	85
灌木林保存密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	中龄林	近熟林	中龄林
乔木林树种搭配	2 000	1 110	1 320
林带行数	乔木+灌木+草本	乔木+灌木	乔木
疏透度	两行一带	两行一带	两行一带
树高/m	0.27	0.22	0.18
冠幅/m	13.2	12.5	7.7
林带连续性/%	3.5	4.2	2.5
林下经济政策法规执行力度/%	0.85	0.91	0.89
防护体系完整度/%	无	无	无
	70	70	90
	50	75	100

### 3.3 评价结果与分析

应用上述评价指标体系和评价方法,结合评价指标统计值(表 7)对选取的 3 条阻沙固沙带样地进行健康综合评价。评价结果(表 8)显示,高台样地健康综合指数最高,为 0.677,处于亚健康状态;民勤昌宁和红砂岗样地健康综合指数分别为 0.496、0.586,均处于不健康状态。

表 8 阻沙固沙带样地健康评价结果  
Table 8 Health evaluation results of sample plots in sand prevention and fixation belt

评价指标	民勤昌宁	民勤红砂岗	高台黑泉
驱动力因子(D)	0.086	0.086	0.122
压力因子(P)	0.124	0.143	0.167
状态因子(S)	0.119	0.166	0.140
响应因子(R)	0.167	0.191	0.248
健康综合指数(H)	0.496	0.586	0.677
健康等级	不健康	不健康	亚健康

民勤县被巴丹吉林和腾格里两大沙漠包围,年平均降水量仅 120.8 mm,蒸发量高达 2 651.2 mm,风大沙多,属于气候变化敏感区和生态环境脆弱区,是我国北方防风固沙的重要区域。民勤昌宁阻沙固沙带样地内土壤水分与养分匮乏且土壤呈强碱性,极大程度限制了植物生长,影响植物自然更新,导致区域植被覆盖度较低。此外,该区域防护体系结构缺失,未布设机械沙障(尼龙网格沙障、草方格沙障等),使得灌木林长期遭受大风侵袭,且缺乏有效的人工抚育措施,导致许多植株出现枯梢率高、根系裸露等问题,生长状态不佳,部分甚至已经枯死;缺乏封育管护导致阻沙固沙带内出现人为踩踏破坏痕迹,对其健康状况有一定影响。在脆弱的自然环境与人类活动的双重压力下,阻沙固沙带处于不健康状态。

民勤红砂岗样地土壤水分与有机质含量低,植物自然更新能力受限;且阻沙固沙带内未布设机械沙障,固沙植物长期受风蚀作用影响,生长条件恶劣。加之该区域长期缺乏人工抚育管护措施,灌木林遭受鼠害侵袭,根系裸露及植株枯死状况严重,导致其生态功能衰退,阻沙固沙带呈现不健康状态。

高台样地防护体系结构完整,基本能维持其防风固沙功能。然而,由于高台地区干旱缺水,灌木林内未配备节水灌溉设施,且缺乏必要的人工抚育措施,部分固沙植物出现枯梢,并伴随鼠害问题。此外,乔木林树种单一,种植密度较高,林分疏透度较低,对其健康状况有一定影响,阻沙固沙带整体处于亚健康状态。

## 4 讨论

阻沙固沙带作为绿洲与荒漠生态系统之间极为重要的生态缓冲区,能够有效拦截、阻隔和固定风沙流,形成生态屏障,维护区域生态安全<sup>[3-4]</sup>。随着可持续发展战略的深入实施,建立健康的阻沙固沙带防护体系必将成为区域防沙治沙的主要目标,因此有必要开展相关研究,建立一套适用于阻沙固沙带防护体系的健康评价理论体系,系统评估其健康状况、识别关键限制因素,为阻沙固沙带优化管理提供基础数据和科学决策依据,以期实现社会、经济和环境的可持续发展。

评价指标体系的构建和权重确定是决定阻沙固沙带健康评价结果可靠性的关键<sup>[15,19]</sup>。本研究在构建阻沙固沙带健康评价指标体系时,查阅相关文献并结合河西走廊阻沙固沙带实际情况,初步建立评价指标库,随后,通过专家咨询对指标进行筛选和优化,最终构建了包含驱动力、压力、状态、响应 4 个准则层和 33 项具体指标的综合评价指标体系。与其他同类型研究构建的指标体系相比<sup>[5,19]</sup>,本研究所建立的评价指标体系不仅关注阻沙固沙带自身生态健康,还纳入区域经济及社会管理因素,构建了更具综合性的评价框架;在常规野外调查数据的基础上,补充了室内试验分析数据,通过多源数据交叉验证提升了评价结果的客观性;最后,通过定性分析与定量分析的有机结合,使评价结果更加准确可靠。在指标权重确定过程中,为降低专家打分带来的主观影响,本研究采用层次分析法结合专家打分进行权重计算<sup>[18]</sup>。各指标权重计算结果(表 3)显示,准则层内响应因子(0.344)权重最高,其次为压力因子(0.246)、状态因子(0.225)和驱动力因子(0.185),这一分布特征表明,在阻沙固沙带这个自然脆弱的生态系统中,人类社会的政策干预和管理措施等响应机制对阻沙固沙带健康维持起着主导作用。在具体指标层内,防护体系完整度、物种丰富度、植物自然更新能力及土壤水分质量分数等指标具有较高权重,是影响阻沙固沙带健康发展的关键因素。人口密度、疏透度、树高等指标权重较低,对阻沙固沙带健康状况影响相对有限。通过权重差异分析能够有效识别关键治理指标,为决策者制定优先治理方案提供科学依据,提升治理效率。

阻沙固沙带的健康状况会直接影响其稳定性。生态系统健康状态与稳定性存在本质关联,健康状态是保障系统稳定性的前提,而稳定性则是健康状态的外在表现<sup>[25-26]</sup>。运用上述评价体系对河西走廊 3 条阻沙固沙带样地进行健康综合评价,评价结果显

示,高台样地处于亚健康状态,民勤昌宁和红砂岗样地处于不健康状态,与杜娟等<sup>[5]</sup>的研究结果一致,与何晨晨等<sup>[11]</sup>关于防护体系稳定性的研究结果相对应。基于评价结果诊断,当前阻沙固沙带样地存在土壤水分与有机质匮乏、人工灌木林生态功能衰退、乔木林配置不当、防护体系结构不完善等问题。针对以上问题,建议采取的优化措施为:

- 1) 增大阻沙固沙带管理力度。加强灌木林抚育管护,定期进行灌溉补水、施肥、病虫害防治等措施;建立健全长效管护机制,加强生态保护监管力度。
- 2) 构建多层次防护体系。优化乔木林带配置结构,建立乔灌草复合型林带;完善防护体系结构,促进多种治沙措施协同作用,构建多尺度生态屏障网络。

由于阻沙固沙带健康涉及多个研究领域,内容广泛,制约阻沙固沙带维持与发展的因素多样且相互之间的关系也较为复杂,目前其健康评价还处于试验和摸索阶段,尚未形成一套成熟、系统的方法体系,要构建一套适用性强、可广泛应用于大范围的指标体系需要不断创新和完善。此外,阻沙固沙带健康的未来发展方向及可持续性,依赖于对整个区域进行定期、规范和科学的动态监测<sup>[18]</sup>。在后续研究中,应采用长时间序列的野外调查、室内试验分析及其他统计数据,进一步完善评价体系并验证其合理性。

## 5 结论

本研究通过现场调研、专家咨询、层次分析、专家评议打分等多种形式对河西走廊阻沙固沙带健康评价指标和指标权重进行研究,构建河西走廊阻沙固沙带健康评价体系。该体系由驱动力、压力、状态、响应 4 个准则层(其权重分别为 0.185、0.225、0.246、0.344)构成,包含 33 项具体评价指标;其中,防护体系完整度(0.105 1)、物种丰富度(0.067 5)、植物自然更新能力(0.067 5)及土壤水分质量分数(0.061 5)4 项指标权重占比最大,合计占 33 项指标总权重的 30.16%,是影响阻沙固沙带健康状况的关键因子。研究同时明确了各指标的评分标准,依据健康综合指数得分将阻沙固沙带健康状态划分为 5 个梯度(健康、亚健康、不健康、病态、濒危)。该评价体系突破单一维度限制,融合生态、经济及社会多维度要素,形成逻辑严密、层次分明的综合评估框架。经实践验证,该评价体系能够准确客观地反映阻沙固沙带健康现状,且具有较强的适用性和可操作性,系统分析评价结果可有效识别制约阻沙固沙带健康状况的主要因素,为制定阻沙固沙带生态修复、综合治理方案提供科学依据,助力阻沙固沙带健康可持续发展。

## 参考文献:

- [1] 刘永杰,杜鹤强,范亚伟,等.基于Google Earth Engine (GEE)的毛乌素沙地风蚀荒漠化过程监测[J].中国沙漠,2025,45(2):262-274.  
LIU Y J, DU H Q, FAN Y W, et al. Monitoring of wind erosion desertification process in the Mu Us Desert based on Google Earth Engine (GEE) [J]. Journal of Desert Research, 2025, 45(2): 262-274
- [2] XIANG Y, LEI J Q, GAO X. An over review of desertification in Xinjiang, northwest China [J]. Journal of Arid Land, 2022, 14(11): 1181-1195.
- [3] 柴巧弟,马瑞,王安林,等.河西走廊阻沙固沙带典型荒漠植物叶功能性状[J].干旱区研究,2024,41(11):1898-1907.  
CHAI Q D, MA R, WANG A L, et al. Leaf functional traits of typical desert plants in the sand-blocking and sand-fixing belt of the Hexi Corrido [J]. Arid Zone Research, 2024, 41(11): 1898-1907
- [4] 田永胜,马瑞,刘腾,等.阻沙固沙带不同治沙措施对土壤理化性质和酶活性的影响[J].水土保持学报,2025,39(2):57-64.  
TIAN Y S, MA R, LIU T, et al. The effects of different desertification control measures on soil physicochemical properties and enzyme activities in sand blocking and fixation zone [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(2): 57-64.
- [5] 杜娟,陈英.基于PSR模型的民勤县绿洲-荒漠交错带生态系统健康评价[J].水土保持研究,2016,23(1):215-220.  
DU J, CHEN Y. Ecosystem health evaluation of oasis-desert ecotone in Minqin County based on PSR model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(1): 215-220.
- [6] WANG A L, Ma R, MA Y J, et al. Soil bacterial community structure and physicochemical influencing factors of artificial *Haloxylon ammodendron* forest in the sand blocking and fixing belt of Minqin, China [J]. Forests, 2023, 14(11): e2244.
- [7] 王安林,马瑞,马彦军,等.民勤荒漠绿洲过渡带人工梭梭林土壤细菌群落结构及功能预测[J].环境科学,2024,45(1):508-519.  
WANG A L, MA R, MA Y J, et al. Prediction of soil bacterial community structure and function in Minqin desert-oasis ecotone artificial *Haloxylon ammodendron* forest [J]. Environmental Science, 2024, 45(1): 508-519.
- [8] 李雪宁,徐先英,杨雪梅,等.基于DPSIR模型的河西走廊农田防护林健康评价[J].中国沙漠,2023,43(1):234-243.  
LI X N, XU X Y, YANG X M, et al. Health assess-
- ment of farmland shelter belt in Hexi Corridor based on DPSIR model [J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(1): 234-243.
- [9] 蔡宗彩.基于生态系统健康-风险-服务的河西走廊生态安全评价[D].安徽淮南:安徽理工大学,2024.  
CAI Z C. Ecological security assessment of Hexi Corridor based on ecosystem health-risk-service [D]. Huainan, Anhui: Anhui University of Science and Technology, 2024.
- [10] 薛华柱,金磊,董国涛,等.河西走廊近40年地表土壤冻融状态变化特征[J].水土保持学报,2023,37(6):65-73.  
XUE H Z, JIN L, DONG G T, et al. Analysis of spatio-temporal variations of freeze-thaw state of surface soil in Hexi Corridor in recent 40 years [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(6): 65-73.
- [11] 何晨晨,王振亭,张春来.河西走廊绿洲外缘典型风沙防护体系的功能稳定性评估[J].福建农林大学学报(自然科学版),2024,53(4):549-555.  
HE C C, WANG Z T, ZHANG C L. Functional stability assessment of typical blown-sand prevention systems in the periphery of Hexi Corridor oases [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2024, 53(4): 549-555.
- [12] 罗鹏,谈存峰,齐婷婷.基于PSR模型的黄河流域甘肃段生态系统健康评价及预测[J].水土保持通报,2024,44(3):180-189.  
LUO P, TAN C F, QI T T. Evaluation and prediction of ecosystem health in Gansu section of Yellow River basin based on PSR model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3): 180-189.
- [13] 陈昱霖,周连凤,王春芳,等.我国基于PSR模型水生态系统健康评价的研究进展[C]//中国水利学会,黄河水利委员会.中国水利学会2020学术年会论文集第一分册.水利部中国科学院水工程生态研究所水生态监测中心,2020:87-91.  
CHEN Y L, ZHOU L F, WANG C F, et al. Research progress of water ecosystem health assessment based on PSR model in China [C]//Chinese Hydraulic Engineering Society, Yellow River Conservancy Commission. 2020 CHES Annual Conference Volume I. Monitoring Center of Institute of Hydroecology, MWR & CAS, 2020: 87-91.
- [14] 赵建鹏.基于DPSR模型的黄河流域甘肃段生态系统健康评价[D].兰州:西北师范大学,2024.  
ZHAO J P. Ecosystem health assessment of Gansu section of the Yellow River basin based on DPSR model [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2024.
- [15] 曹美芹,陈芸芝,汪小钦,等.荒漠森林生态系统健康评价与分析:以塔里木河下游为例[J].遥感信息,2021,36(2):72-80.  
CAO M Q, CHEN Y Z, WANG X Q, et al. Evaluation and analysis of desert forest ecosystem health: Taking

- lower reaches of Tarim River for an example[J]. Remote Sensing Information, 2021, 36(2): 72-80.
- [16] 梁政锦, 乐笑玮, 李小双. 基于层次分析法的上海市古银杏健康评价指标体系研究[J]. 林业与环境科学, 2023, 39(2): 89-96.
- LIANG Z J, LE X W, LI X S. Research on health evaluation index system of ancient ginkgo biloba in Shanghai based on analytic hierarchy process[J]. Forestry and Environmental Science, 2023, 39(2): 89-96.
- [17] QI Q Q, WANG Z Q, YIN H, et al. Construction and application of a seasonal river health evaluation system in arid and semi-arid areas[J]. Water, 2024, 16(5): e691.
- [18] 李雪宁, 徐先英, 杨雪梅, 等. 瓜州县农田防护林健康评价体系构建及应用[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(3): 187-194.
- LI X N, XU X Y, YANG X M, et al. Construction of health evaluation system for farmland shelterbelt in Guazhou County [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(3): 187-194.
- [19] 徐先英. 干旱荒漠区典型防风固沙林健康评价: 以民勤沙区为例[C]//中国治沙暨沙业学会, 内蒙古自治区林业和草原局, 内蒙古农业大学. 世界防治荒漠化与干旱日纪念大会暨荒漠化防治国际研讨会: 人才·科技·绿色·共享论文集. 甘肃省治沙研究所甘肃省荒漠化与风沙灾害防治国家重点实验室培育基地, 2019: 99-124.
- XU X Y. Health assessments on windbreak and sand-fixation forest in arid areas: A case of Minqin sandy area in the northwest region of China[C]//China National Sand Control and Desert Industry Society, Forestry and Grassland Bureau of Inner Mongolia Autonomous Region, Inner Mongolia Agricultural University. World Day to Combat Desertification and Drought Commemorative Conference and International Symposium on Desertification Control- Proceedings of Talent-Science and Technology-Green-Sharing. Gansu Desertification Control Research Institute, Cultivation Base of the State Key Laboratory of Desertification and Wind-Sand Disaster Prevention and Control in Gansu Province, 2019: 99-124.
- [20] 汪小钦, 林梦婧, 丁哲, 等. 基于指标自动筛选的新疆开孔河流域生态健康评价[J]. 生态学报, 2020, 40(13): 4302-4315.
- WANG X Q, LIN M J, DING Z, et al. Ecological health assessment of Kaikong River basin based on automatic screening of indicators in Xinjiang [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13): 4302-4315.
- [21] 全国造林标准化技术委员会(SAC/TC 385). 造林技术规范: GB/T 15776—2023[S]. 中国标准出版社, 2023.
- Afforestation and Forest Management (SAC/TC 385). Technical regulation for forestation: GB/T 15776—2023 [S]. Standards Press of China, 2023.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-114.
- BAO S D. Soil Agrochemical Analysis [M]. Third Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 25-114.
- [23] 中共民勤县委党史和地方志研究中心. 民勤年鉴[M]. 兰州: 甘肃民族出版社, 2023.
- Research Center for Party History and Local Chronicles of Minqin County Committee of the Communist Party of China. Minqin yearbook [M]. Lanzhou: Gansu Minorities Press, 2023.
- [24] 高台县地方史志办公室. 高台年鉴[M]. 兰州: 甘肃文化出版社, 2023.
- Gaotai County Local History and Annals Office. Yearbook of Gaotai [M]. Lanzhou: Gansu Culture Press, 2023.
- [25] XU D, CAI Z, XU D, et al. Land use change and ecosystem health assessment on Shanghai-Hangzhou bay, eastern China [J]. Land, 2022, 11(6): 867-867.
- [26] 李洁, 刘春芳. 气候变化下河西走廊生态系统健康时空变化及应对策略[J]. 应用生态学报, 2025, 36(2): 537-546.
- LI J, LIU C F. Spatial and temporal variations in ecosystem health and coping strategy in the Hexi Corridor under climate change [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(2): 537-546.