

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2025.02.001

CSTR: 32310.14.stbxb.2025.02.001

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 Yongsheng, MA Rui, LIU Teng, et al. The effects of different desertification control measures on soil physicochemical properties and enzyme activities in sand blocking and fixation zone[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 39(2): 57-64.

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

田永胜, 马瑞, 刘腾, 马彦军

(甘肃农业大学林学院, 兰州 730070)

摘要: [目的] 为探究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及其相关关系, 为措施选择及效益评价提供技术支撑。[方法] 以流动沙丘+梭梭(CK)为对照组, 以生态垫沙障+梭梭(ES)、尼龙网格沙障+梭梭(NS)、编织袋沙障+梭梭(WS)、草方格沙障+梭梭(GS)、黏土沙障+梭梭(CS)为试验组, 对6种不同治沙措施0~60 cm土层土壤的理化性质和酶活性进行分析。[结果] 相较于CK治沙措施, 其他5种治沙措施土壤理化性质和酶活性均存在显著变化。1) 在0~60 cm土层土壤的pH变化不显著, 土壤水分体积分数(SWC)随土层的增加而增加, 土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)及全钾(TK)质量分数随土层的增加而降低, 与CK治沙措施相比, 其他5种治沙措施影响下土壤养分明显增加, 其中NS治沙措施增加最显著。2) 不同治沙措施下, NS措施的土壤酶活性最高, GS次之, CS最小, 0~60 cm土层土壤酶活性总体呈降低趋势。3) 土壤理化性质与土壤酶活性存在显著相关关系, 不同治沙措施下土壤理化性质对土壤酶活性的贡献不同, 土壤酶活性主要受TK、SOC及SWC的影响。[结论] 5种不同治沙措施对土壤理化性质和酶活性均起到不同程度的促进作用, 其中, NS治沙措施产生的生态效益最佳, 且具有长期稳定性。

关键词: 阻沙固沙带; 治沙措施; 土壤理化性质; 土壤酶活性

中图分类号: S156.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0057-08

The Effects of Different Desertification Control Measures on Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities in Sand Blocking and Fixation Zone

TIAN Yongsheng, MA Rui, LIU Teng, MA Yanjun

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

Abstract: [Objective] To explore the effects of different sand control measures on soil physicochemical properties and enzyme activity in sand blocking and stabilization zones, and their relationships, in order to provide technical support for measure selection and benefit evaluation. [Methods] Using mobile sand dunes and *Haloxylon ammodendron* (CK) as the control group, and ecological cushion sand barrier+*Haloxylon ammodendron* (ES), nylon mesh sand barrier+*H. ammodendron* (NS), woven bag sand barrier+*H. ammodendron* (WS), grass square grid sand barrier+*H. ammodendron* (GS), and clay sand barrier+*H. ammodendron* (CS) as the test groups, physical and chemical properties and enzyme activities of soil within 0~60 cm depth for six different sand control measures were analyzed. [Results] Compared with CK, there were significant changes in soil physicochemical properties and enzyme activities among the other five different sand control measures. 1) Within the depth range of 0~60 cm, there was no significant change in soil pH, but soil moisture content (SWC) increased with increasing soil depth. The mass fractions of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and total potassium (TK) decreased with increasing soil depth. Compared with CK, the other five different sand control measures had a significant increase in soil nutrient content, with NS showing the most significant increase. 2) Under different

收稿日期: 2024-09-09

修回日期: 2024-10-26

录用日期: 2024-11-07

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-11-18

资助项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(U21A2001); 甘肃农业大学青年导师基金项目(GAU-QDFC-2020-09)

第一作者: 田永胜(1998—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: 18894325817@163.com

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: mr031103@126.com

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

desertification control measures, soil enzyme activities of NS measure were the highest, followed by that of GS, and that of CS were the lowest. Within the depth range of 0~60 cm, soil enzyme activities showed a decreasing trend. 3) There were significant correlations between soil physicochemical properties and soil enzyme activities. The contribution of soil physicochemical properties to soil enzyme activities varied under different desertification control measures, and soil enzyme activities were mainly influenced by TK, SOC, and SWC. [Conclusion] Five different sand control measures have varying degrees of promoting effects on soil physicochemical properties and enzyme activities, among which NS sand control measures have the best ecological benefits and long-term stability.

Keywords: sand blocking and fixation zone; sand control measures; soil physical and chemical properties; soil enzyme activities

Received: 2024-09-09

Revised: 2024-10-26

Accepted: 2024-11-07

Online(www.cnki.net): 2024-11-18

沙漠化是指在沙质地表下,由于自然因素或人为活动的影响,破坏脆弱的自然生态系统平衡^[1],出现以风沙活动为主要标志,并逐步形成风蚀、风积地貌结构景观的土地退化过程^[2]。我国是世界上沙漠化土地面积较大、危害最严重的国家之一^[3]。第六次全国沙漠化和沙化调查结果^[2]显示,截至2019年,全国沙化土地总面积达 $1.69 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 约占国土总面积的 17.58%。在防治荒漠化的生产实践中多采用人工布设机械沙障或种植固沙植物的措施,机械沙障和固沙植物可以改变下垫面微地形和地表粗糙度,进而改变近地表风沙流结构,减弱风蚀^[4-5],同时还具有改善沙化土壤理化性质和酶活性及微生物群落结构的功能^[6]。

通过长期的研究,“机械沙障”+“固沙植物”的复合治沙措施技术发展成熟,并广泛应用在荒漠-绿洲过渡带的生态屏障——阻沙固沙带的建设中。阻沙固沙带是由机械沙障、固沙植物、封育等措施组合而成的防风固沙措施体系,是荒漠和绿洲生态系统之间极为重要的生态缓冲区,其中“机械沙障”+“固沙植物”的复合治沙措施对维护荒漠-绿洲过渡带的生态安全和沙化土壤的生态修复具有重要作用。近年来,对防治沙漠化的研究^[7-9]集中在塔里木-准噶尔盆地荒漠区、阿拉善高原-河西走廊荒漠区、西鄂尔多斯高原-阴山北麓荒漠区及内蒙古中东部半干旱荒漠区等地域。对防风固沙林下土壤酶活性和理化性质^[10]、机械沙障的综合防护效益^[11]、机械沙障对沙化土地结构和物种多样性的影响^[5],以及不同治沙措施对土壤理化性质的影响^[12]等方面已开展大量研究。王新源等^[11]研究表明,布设沙障和封禁措施直接或间接影响并提高表层土壤细颗粒物质量分数,改善土壤质地,增加土壤养分;也有研究^[10]表明,在荒漠-绿洲过渡带全氮对土壤纤维素酶起直接负作用,并通过硝态氮对其产生间接正效应;李昌龙^[5]研究发现,荒漠草地物种数量随着沙障设置年限的增加而逐渐增多,植被结构由沙蓬种群向五星蒿种群演变,物种生活型由一年生草本向一年和多年生

草本及灌木的复合型演变。

地处河西走廊东端的民勤县东、西、北三面被巴丹吉林和腾格里沙漠包围,是全国土地沙化最严重的地区,绿洲边缘布设的阻沙固沙带对延缓沙漠的前进,控制荒漠-绿洲过渡带的风沙活动和改善绿洲生态具有显著效果,但阻沙固沙带中布设的成规模的多种不同机械沙障+梭梭林复合固沙措施对风沙土壤理化性质和酶活性的改善程度尚不明确。基于此,本研究以民勤连古城自然保护区西沙窝防沙区的5种典型机械沙障内梭梭林地土壤为研究对象,测定其理化性质和土壤酶活性,分析其不同治沙措施影响下的变化特征,阐明不同沙障内种植梭梭后对沙化土壤理化性质和酶活性的改善情况,旨在为阻沙固沙带内土壤质量的评价提供基础数据,对阻沙固沙带的建设提供科学指导和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于石羊河下游甘肃省民勤县西沙窝的老虎口防沙治沙示范基地($38^{\circ}45'33''\text{N}$, $103^{\circ}10'04''\text{E}$),被巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠所包围,属于典型的温带大陆性极干旱气候,其气候特点是夏季炎热,冬季严寒,风大沙多,昼夜温差大,光照充足。年平均降水量仅为 113.2 mm,蒸发量高达 2 604.3 mm,干燥度为 23.1,降雨多集中在 7—9 月,冬季盛行西北风,年平均风速 2.5 m/s,最大瞬时风速可达 23.0 m/s,全年扬沙天为 59 d,其中沙尘暴 27 d,集中在 2—5 月。土壤以风沙土为主,植被以人工种植灌木梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)和一年生或多年生草本沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)及猪毛菜(*Salsola ikonnikouii*)等。

1.2 试验设计

2023年6月,对研究区6种不同治沙措施的梭梭

林地进行植被调查和土壤样品采集。本区域沙障及梭梭大面积布设于 2008 年,每年对破损沙障进行修复和更换,样品采集时研究区沙障完整,无损毁。以生态垫沙障+梭梭(ES)、尼龙网沙障+梭梭(NS)、编织袋沙障+梭梭(WS)、草方格沙障+梭梭(GS)和黏土沙障+梭梭(CS)区域内根区 0~60 cm 土壤为试验组,以流动沙丘+梭梭(CK)区域内根区 0~60 cm 土壤为对照组(表 1)。每 20 cm 为 1 个土层,共 3 个土层。

表 1 采样点基本信息

Table 1 Basic information of the sampling sites				
治沙措施	经度(E)	纬度(N)	沙障规格/m	梭梭高度/cm
ES	103°09'55"	38°45'31"	1.5×1.5	141.67±14.29a
NS	103°09'53"	38°45'47"	1.0×1.0	155.00±3.61a
WS	103°09'55"	38°45'30"	2.0×2.0	151.00±9.54a
GS	103°09'50"	38°44'59"	1.0×1.0	147.33±7.51a
CS	103°09'53"	38°45'32"	2.0×2.0	156.67±5.69a
CK	103°09'56"	38°45'00"	—	113.00±4.58b

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。

在不同治沙措施区域内分别随机布设 3 个标准样方(20 m×20 m),样方间距均>20 m,共计 18 个标准样方,在每个样方内沿对角线设置 5 个小样方(1 m×1 m),并用取土铲分别采集 5 个小样方内梭梭根区土壤(0~60 cm),同一样地土壤样品采集时设置 3 个重

复。将采集的土壤样品装入密封袋,并分类标记,带回实验室,先去除枯落物及根系,再测定土壤体积分数,待自然风干后,过 1 mm 筛,测定土壤理化性质和酶活性。土壤有机碳(SOC)、土壤全氮(TN)、土壤全磷(TP)、土壤全钾(TK)、土壤水分体积分数(SWC)、土壤 pH、电导率(DDL)、土壤脲酶活性(UE)、土壤蔗糖酶活性(SC)、土壤碱性磷酸酶活性(ALP)及土壤过氧化氢酶活性(CAT)测定方法见参考文献[13]。

1.3 数据处理

采用 WPS Office 2023 和 IBM SPSS Statistics 26 软件对研究数据进行处理和分析,利用 Origin 2021 软件绘制柱状图,利用 R 语言绘制相关系数热图,应用单因素方差分析法比较不同类型治沙措施根区土壤理化性质和土壤酶活性的差异性,计算数据间的 Pearson 相关系数来检验土壤理化因子与酶活性之间的相关性。利用 Canoco 5.0 软件对数据进行冗余分析,显著性水平设为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同治沙措施对土壤理化性质的影响

由表 2 可知,与 CK 相比,5 种不同治沙措施对 0~60 cm 土层土壤 SWC、SOC、TN、TP 及 TK 影响显著($p<0.05$),对 pH 影响不显著,且同一措施不同土层深度间差异显著($p<0.05$)。

表 2 阻沙固沙带不同治沙措施 0~60 cm 土壤理化性质指标

Table 2 Soil physical and chemical properties of 0—60 cm soil under different sand control measures in the sand blocking and fixation zone

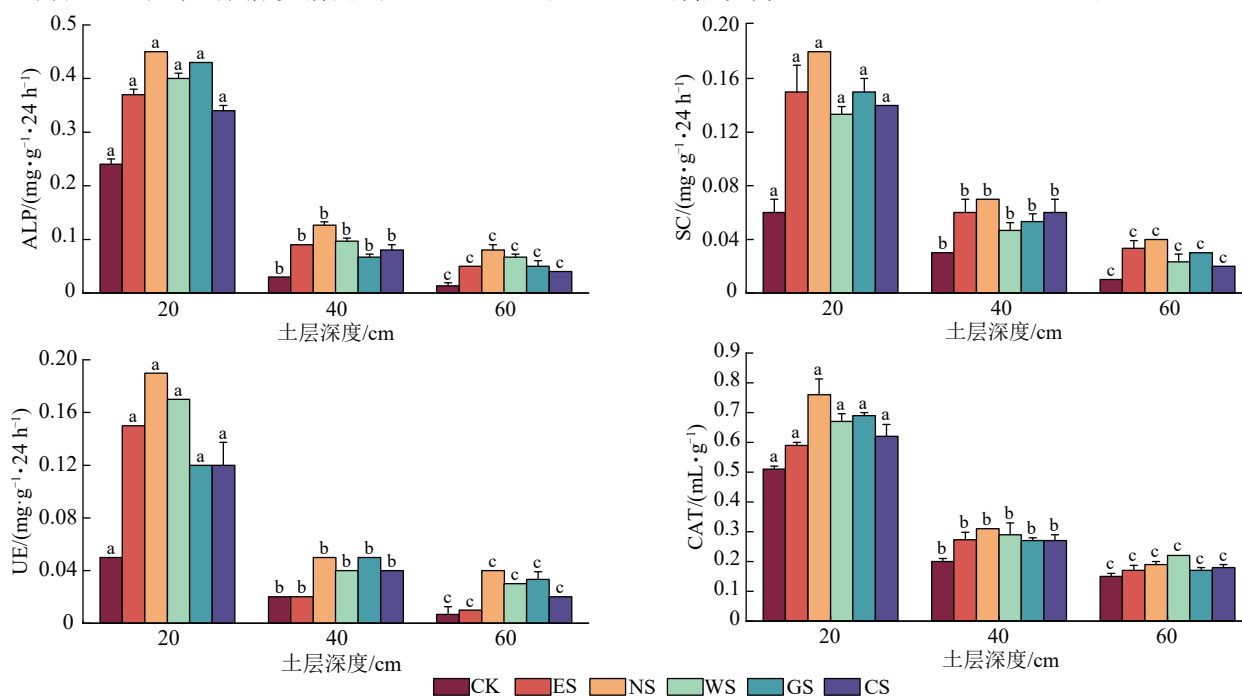
治沙措施	土层深度/cm	pH	SWC/(g·kg ⁻¹)	SOC/(g·kg ⁻¹)	TN/(g·kg ⁻¹)	TP/(g·kg ⁻¹)	TK/(g·kg ⁻¹)
CK	0~20	8.55±0.03a	0.11±0c	0.34±0.02a	0.07±0.01a	0.08±0.01a	0.30±0a
	20~40	8.59±0.02a	0.29±0.01b	0.03±0.01b	0.02±0b	0.05±0.01b	0.15±0b
	40~60	8.55±0.02a	0.44±0.01a	0.01±0.01b	0.01±0c	0.01±0.01c	0.04±0.01c
ES	0~20	8.41±0.03c	0.21±0a	0.75±0.03a	0.15±0.02a	0.24±0.01a	0.55±0.03a
	20~40	8.33±0.02b	0.41±0.01b	0.27±0.01b	0.05±0.02b	0.11±0.01b	0.25±0.01b
	40~60	8.23±0.01a	0.45±0.01c	0.12±0.01c	0.02±0c	0.07±0c	0.13±0.01c
NS	0~20	8.34±0.01a	0.23±0.01a	0.76±0.05a	0.19±0a	0.22±0a	0.59±0.01a
	20~40	8.22±0.01b	0.39±0.01b	0.15±0.01b	0.08±0.01b	0.14±0b	0.31±0.01b
	40~60	8.20±0.01c	0.49±0.01c	0.07±0.01c	0.04±0c	0.08±0.01c	0.19±0.01c
WS	0~20	8.94±0.06a	0.18±0.01c	0.85±0.02a	0.16±0a	0.19±0.01a	0.67±0.01a
	20~40	8.49±0.08b	0.36±0.01b	0.32±0.01b	0.07±0b	0.12±0.01b	0.24±0.01b
	40~60	8.81±0.03c	0.45±0.02a	0.17±0.01c	0.03±0c	0.05±0.01c	0.14±0.01c
GS	0~20	8.81±0.02a	0.20±0.01c	0.76±0.02a	0.19±0.01a	0.22±0a	0.50±0.02a
	20~40	8.78±0.02b	0.33±0.01b	0.14±0.01b	0.12±0.01b	0.14±0.01b	0.27±0.01b
	40~60	8.66±0.01c	0.42±0.01a	0.07±0c	0.04±0.01c	0.06±0.01c	0.19±0.01c
CS	0~20	8.31±0.04c	0.18±0.01c	0.47±0.01a	0.15±0.01a	0.16±0a	0.49±0.01a
	20~40	8.59±0.06b	0.35±0.01b	0.15±0.01b	0.04±0b	0.09±0b	0.23±0.01b
	40~60	8.60±0.03a	0.44±0.02a	0.07±0.01c	0.02±0c	0.04±0c	0.15±0.01c

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示同一治沙措施不同土层间差异显著($p<0.05$)。

ES、NS、WS、GS 及 CS 治沙措施显著提高 0~60 cm 土层土壤 SWC、SOC、TN、TP 及 TK 质量分数; 0~20 cm 土层土壤 SWC、SOC、TN、TP 及 TK 质量分数分别提高 63.64%~109.09%、39.21%~147.52%、109.14%~159.21%、99.52%~204.13%、63.33%~123.33%。随着土层深度的增加,土壤养分质量分数显著降低。综合比较可知,5种不同治沙措施对土壤理化性质的影响依次为 NS>GS>WS>ES>CS。

2.2 不同治沙措施对土壤酶活性的影响

由图 1 可知,5种治沙措施对 0~60 cm 土层土



注:图柱上方不同字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。

图 1 阻沙固沙带不同治沙措施 0~60 cm 土层土壤酶活性

Fig. 1 Soil enzyme activities of 0~60 cm soil under different sand control measures in the sand blocking and fixation zone

2.3 土壤理化性质与酶活性的关系

通过 Origin 2021 软件,利用 Pearson 相关系数计算不同治沙措施 0~60 cm 土层土壤理化性质与酶活性之间的相关性。结果(图 2)表明,在土壤理化性质和酶活性方面,各因子之间呈显著正相关与极显著正相关,而与土壤 pH 无显著相关关系。

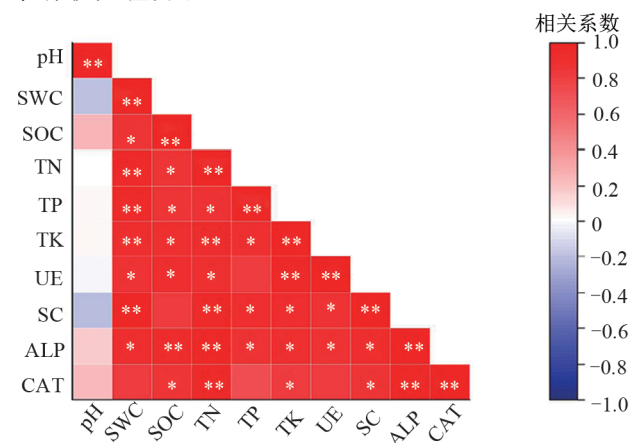
2.4 土壤酶活性和土壤理化性质冗余分析

冗余分析(RDA)是回归分析和主成分分析的结合,利用 Canoco 5.0 软件($\alpha = 0.05$),以 6 个土壤理化性质指标为解释变量,4 个酶活性指标为响应变量进行冗余分析,可以直观反映土壤理化性质对土壤酶活性的解释程度。RDA 分析结果(表 3)表明,0~60 cm 土层土壤的第 1 轴、第 2 轴、第 3 轴和第 4 轴对土壤酶活性和理化性质关系的解释量分别为 76.98%、19.32%、0.92%、0。RDA 结果(图 3)表明,0~60 cm 土层土壤 SOC、TK、SWC 和 TN 对土壤酶

壤 UE、SC、ALP 及 CAT 影响显著($p < 0.05$)。与 CK 措施相比,5 种治沙措施显著提高 0~60 cm 土层土壤酶活性,且酶活性随土层深度的增加而降低。0~20 cm 土层土壤 UE、SC、ALP 及 CAT 活性分别提高 140%~280%、116%~200%、42%~88%、16%~40%;与 0~20 cm 土层土壤酶活性相比,20~40、40~60 cm 土层土壤酶活性呈降低趋势。

经综合比较分析,5 种治沙措施对酶活性的影响依次为 NS>GS>WS>ES>CS。

活性影响较大。比较各土壤理化性质对酶活性的单独解释率(表 4)发现,各土壤理化性质的单独解释率有较大差异。



注:色柱颜色越深,相关性越大;*表示 $p < 0.05$,**表示 $p < 0.01$ 。

图 2 土壤酶活性与土壤因子的相关性

Fig. 2 Correlations between soil enzyme activities and soil factors

表 3 土壤酶活性的解释变量冗余分析

Table 3 Redundancy analysis of explanatory variables for soil enzyme activities

RDA 分析轴	特征值/%	酶活性-土壤相关性	酶活性累积解释量/%	酶活性-土壤累积解释量/%
第 1 轴	76.98	76.98	0.99	79.18
第 2 轴	19.32	96.30	1.00	99.06
第 3 轴	0.92	97.21	0.71	100.00
第 4 轴	0	0	0	0

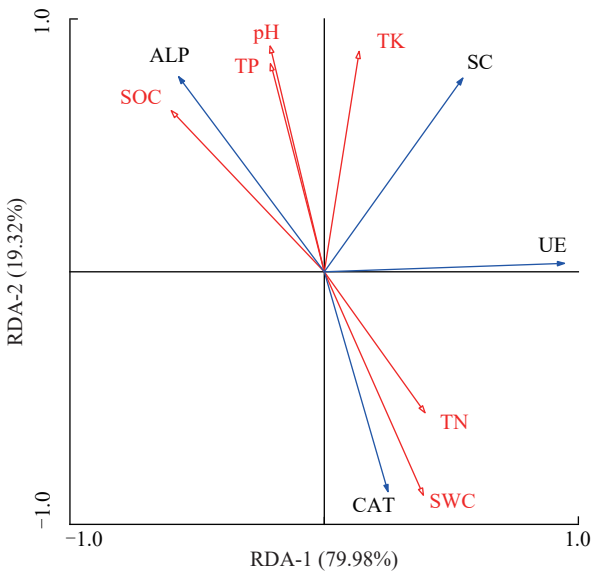


图 3 土壤酶活性与土壤因子 RDA

Fig. 3 RDA of soil enzyme activities and soil factor

表 4 RDA 排序结果各土壤因子的单独解释率

Table 4 The individual interpretation rate of each soil factor in RDA sorting results

土壤理化性质	解释率/%	<i>p</i>
SOC	38.1	0.058
TK	40.1	0.022
SWC	7.8	0.012
TP	7.5	0.306
TN	2.4	0.046
pH	1.4	0.426

0~60 cm 土层土壤 SOC、TK、SWC、TP、TN、pH 的单独解释率分别为 38.1%、40.1%、7.8%、7.5%、2.4%、1.4%，土壤 TN、SOC、SWC 及 TK 对酶活性的影响达到显著水平($p<0.05$)，土壤 pH、TP 对酶活性的影响不显著($p>0.05$)；土壤理化性质单独解释率排名为 TK>SOC>SWC>TP>TN>pH。

3 讨论

3.1 不同治沙措施对土壤理化性质的影响分析

不同治沙措施造成生境的差异，而生境的差异使治沙措施对土壤理化性质的影响不同。碳、氮、磷、钾是构成植物有机体的基本元素，水分是植物生

长不可或缺的物质^[14]，酸碱度影响着土壤内部生化反应，间接作用于植物体^[15]。土壤理化性质反映土壤质量状况，并影响土壤生态服务功能^[16]。本研究中，试验区原生土壤状况为绿洲边缘生境条件一致的流动沙丘迎风坡坡面，土壤理化性质本底值一致，因此，不同的治沙措施成为影响土壤理化性质和酶活性的主导因素。实施治沙措施后，其生境发生变化，对内部固沙植被的生长发育产生直接影响。植物通过凋落物分解^[17]、沃岛效应^[15]等生态化学过程改变土壤性状，导致土壤理化性质发生变化。通过布设治沙措施，直接或间接影响土壤颗粒物质量分数，改善土壤质地，提高土壤养分，与苏永中等^[15]和王国华等^[18]对河西治沙区域的研究结果一致。

本研究中，与 CK 治沙措施相比，土壤 SWC、SOC、TN、TP 及 TK 等土壤养分在 5 种治沙措施区均呈积极变化，土壤 pH 无明显变化，试验结果表明，5 种治沙措施对土壤理化性质的影响由高到低分别为 NS、GS、WS、ES 和 CS。主要原因是布设治沙措施后，梭梭和沙障在降低风沙侵害的同时，在措施内部截获和聚集大量的植物凋落物和细颗粒物^[19]。有研究^[20]表明，以 SOC、TN、TP 及 TK 为主的各类养分，主要来源于植被自身的转化和颗粒物沉淀过程。尼龙网格和草方格沙障能够极大地增加地表粗糙度，有效降低近地面风速，且尼龙网格沙障的防风效益优于草方格沙障^[21]，为颗粒物的沉积提供有利条件，植物凋落物也不易被风吹走，使得土壤养分得到充分堆积，改善土壤质地。

编织袋沙障在经过长时间的风吹、日晒、雨淋及人为的破坏后出现不同程度的破损^[22]，导致袋内物质外溢，形成新的沙源。沙障内干沙层不断积累，增加梭梭林地内的输沙量^[23]，减少凋落物和颗粒物的沉淀，导致对土壤理化性质的影响弱于 NS 和 GS。黏土沙障经过长时间的风化后，成为新的沙源，导致土壤固持养分的能力下降，且黏土沙障不易修复，破损后抗风蚀能力减弱^[24]。生态垫沙障虽能有效降低风蚀，保护表层土壤，但其紧密的结构却使植物凋落物和颗粒物无法充分与土壤接触，相对减少碳、氮、磷、钾等元素的摄入。在不同治沙措施间，0~20 cm 土层土壤养分质量分数显著高于 20~40、40~60 cm 土层，与表层土壤养分的富集作用密不可分。

3.2 不同治沙措施对土壤酶活性的影响分析

土壤酶是土壤中的生物催化剂，参与土壤发生发育及土壤肥力形成的过程^[5]，包括有机质的分解、合成及转化和元素循环，对于荒漠区生态系统的物质循环具有重要作用^[25]，可以反映土壤中生物化学

过程的方向和强度。安花等^[26]、张延文等^[27]研究发现,通过在流沙区域布设沙障及种植固沙植被,可以有效提高土壤酶活性,并且不同沙障和植被对酶活性的影响不同。本研究中,与CK措施相比,其他5种治沙措施土壤酶活性均得到显著提高,对酶活性的影响依次为NS>GS>WS>ES>CS,与对土壤理化性质的影响相一致。主要原因是土壤酶活性受土壤条件的影响,脲酶与氮元素、蔗糖酶与有机质、碱性磷酸酶与磷元素、过氧化氢酶与微生物活性的关系密不可分^[28]。通过相关性分析可知,土壤理化性质与酶活性呈显著正相关与极显著正相关,与土壤pH无显著相关性;水分是土壤酶促反应的必要物质,而SWC与4种土壤酶活性呈显著正相关,与杨智姣等^[29]的研究成果相一致。本研究中,土壤理化性质对酶活性的影响为TK>SOC>SWC>TP>TN>pH,而SOC在不同治沙措施间质量分数较高,因此对土壤酶活性主要的影响因子为TK和SWC,与梁钰镁等^[30]对治沙区域土壤理化因子与酶活性关系的研究结果相一致。虽然不同治沙措施能显著提高土壤养分质量分数和土壤酶活性,但土壤养分整体匮乏,尤其钾元素和水分是限制治沙措施内土壤酶活性和固沙植被生长的主要因素。

3.3 不同治沙措施对营造阻沙固沙带效益分析

对不同治沙措施优劣的分析,应以生态效益为主,经济效益为辅^[11]。本研究中,在提升土壤养分和酶活性方面GS、WS、ES及CS治沙措施具有一定的效果,但相较于NS治沙措施增益水平偏低。WS和SC治沙措施易损毁,损毁后袋内物质流出和黏土风化后易形成新的沙源,后期维护成本高,因此,不是营造阻沙固沙带的最佳选择。ES治沙措施生态效益在5种治沙措施中偏低,且生态垫是从马来西亚进口的油棕榈树果壳纤维制造,其经济效益偏低^[31],不宜大范围推广。NS和GS中沙障组成同为高立式沙障,但NS相较于GS治沙措施,对土壤养分和酶活性的增益更明显,可能是因为尼龙网格沙障的耐风蚀能力更强,较麦草方格沙障更能增加地表粗糙度^[32]。NS治沙措施除生态效益优于GS治沙措施外,尼龙网格沙障的长期使用成本亦相对较低^[33]。综合来看,在营造阻沙固沙带时需同时考虑固沙效果、对土壤养分和酶活性的增益效果及治沙措施的长期稳定性等生态效益,还需兼顾治沙材料等经济效益。

4 结论

1)相较于CK治沙措施,其他5种治沙措施均能显著提升0~60 cm土层土壤SWC、SOC、TN、TP及TK质量分数,增加土壤UE、SC、ALP及CAT活性,

但对土壤pH影响不显著。随着土层的增加,除土壤SWC外,其余理化指标与酶活性呈降低趋势。

2)土壤酶活性的影响因子主要为TK、SOC及SWC,后续营造阻沙固沙带时应重点考虑其养分状况。

3)NS治沙措施具有较高的土壤养分水平,产生的生态效益和经济效益更明显,后续营造阻沙固沙带时宜优先考虑尼龙网格+梭梭治沙措施。

参考文献:

- [1] 国家林业和草原局.第六次中国沙漠化和沙化状况公报[R].北京:国家林业和草原局,2022,12.
National Forestry and Grassland Administration. Sixth China desertification and desertification status bulletin [R]. Beijing: National Forestry and Grassland Administration, 2022, 12.
- [2] 胡关云,潘江涛,李仕忠,等.国土空间规划中资源整合利用助力碳中和:从农林业综合发展的视角分析[J].环境科学导刊,2024,43(1):27-33.
HU G Y, PAN J T, LI S Z, et al. Resource integration in territorial spatial planning helps carbon neutralization-the perspective of comprehensive development of agriculture and forestry [J]. Environmental Science Survey, 2024, 43 (1): 27-33.
- [3] 秦雯.民勤县近30年植被覆盖度时空变化特征研究[J].甘肃科技,2023,39(9):51-54.
QIN W. Temporal and spatial variation characteristics of vegetation coverage in Minqin County in recent 30 years [J]. Gansu Science and Technology, 2023, 39(9): 51-54.
- [4] 靳灵娜,党晓宏,高永,等.库布齐沙漠北缘机械沙障对地表土壤可蚀性的影响[J].水土保持通报,2021,41(3):50-55.
JIN L N, DANG X H, GAO Y, et al. Effects of mechanical sand barriers on soil erodibility on northern edge of Kubuqi desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(3): 50-55.
- [5] 李昌龙,张永虎,段晓峰,等.民勤荒漠草地机械沙障对草地结构及物种多样性的影响[J].中国草地学报,2021,43(12):100-106.
LI C L, ZHANG Y H, DUAN X F, et al. Effects of mechanical sand barriers on vegetation structure and species diversity in Minqin desert grassland [J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(12): 100-106.
- [6] 孙特生,李文彦,刘继亮.黑河中游荒漠绿洲人工梭梭土壤养分特征[J].干旱区资源与环境,2017,31(5):179-185.
SUN T S, LI W Y, LIU J L. Soil nutrient characteristics of *Haloxylon ammodendron* plantation in a desert-oasis region in the middle reaches of Heihe River basin

- [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(5): 179-185.
- [7] 顾峰雪, 文启凯, 潘伯荣, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地人工绿地风沙土的理化性质研究[J]. 干旱区资源与环境, 2000, 14(1): 74-79.
- GU F X, WEN Q K, PAN B R, et al. Reseaechon soil physico-chemical properties of artificial vegetation in center of Taklimakan Desert [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2000, 14(1): 74-79.
- [8] 赵晨, 高永, 党晓宏, 等. 不同铺设年限沙柳沙障土壤养分的变化[J]. 四川农业大学学报, 2022, 40(4): 583-590.
- ZHAO C, GAO Y, DANG X H, et al. Changes surrounding soil nutrients of *Salix psammophila* sand barriers in different setting years [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2022, 40(4): 583-590.
- [9] 程莉, 宁志英, 杨红玲, 等. 固沙措施对流动沙丘植被和土壤特性的影响[J]. 中国沙漠, 2024, 44(2): 273-282.
- CHENG L, NING Z Y, YANG H L, et al. Effects of different sand-fixation measures on vegetation and soil characteristics of high and flat mobile dunes [J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(2): 273-282.
- [10] 李春霖. 甘肃民勤荒漠区典型植物群落土壤酶活性和土壤微生物量碳氮特征研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022: 23-49.
- LI C L. Study on soil enzyme activities and soil microbial biomass carbon and nitrogen characteristics of typical plant communities in Minqin desert area of Gansu Province [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2022: 23-49.
- [11] 王新源, 马立鹏, 程小云, 等. 不同治沙措施对荒漠绿洲过渡带植物群落与土壤因子的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(14): 5869-5883.
- WANG X Y, MA L P, CHENG X Y, et al. Effects of different sand control measures on plant communities and soil factors in the desert-oasis ecotone [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 5869-5883.
- [12] 孙雪, 龙永丽, 刘乐, 等. 河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征[J]. 环境科学, 2023, 44(6): 3353-3363.
- SUN X, LONG Y L, LIU L, et al. Soil stoichiometry characterization in the oasis-desert transition zone of Linze, Zhangye [J]. Environmental Science, 2023, 44(6): 3353-3363.
- [13] 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 and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd Edtion. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 25-114.
- [14] CHAMIZO S, CANTÓN Y, MIRALLES I, et al. Biological soil crust development affects physicochemical characteristics of soil surface in semiarid ecosystems [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 49: 96-105.
- [15] 苏永中, 刘婷娜. 流动沙地建植人工固沙梭梭林的土壤演变过程[J]. 土壤学报, 2020, 57(1): 84-91.
- SU Y Z, LIU T N. Soil evolution processes following establishment of artificial sandy-fixing *Haloxylon ammodendron* forest [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(1): 84-91.
- [16] 李明军, 喻理飞, 杜明凤, 等. 不同林龄杉木人工林植物-凋落叶-土壤C、N、P化学计量特征及互作关系[J]. 生态学报, 2018, 38(21): 7772-7781.
- LI M J, YU L F, DU M F, et al. C, N, and P stoichiometry and their interaction with plants, litter, and soil in a *Cunninghamia lanceolata* plantation with different ages [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): 7772-7781.
- [17] ZHENG F, XU T, AI Y S, et al. Deep structure of the Wulong goldfield, Liaodong Peninsula, China, revealed by receiver functions: Implications for the tectonic and mineralization dynamics [J]. Frontiers in Earth Science, 2024, 12: e1437605.
- [18] 王国华, 任亦君, 缙倩倩. 河西走廊荒漠绿洲过渡带封育对土壤和植被的影响[J]. 中国沙漠, 2020, 40(2): 222-231.
- WANG G H, REN Y J, GOU Q Q. The changes of soil physical and chemical property during the enclosure process in a typical desert oasis ecotone of the Hexi Corridor in Northwestern China [J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(2): 222-231.
- [19] WANG G, ZHAO W, LIU H, et al. Changes in soil and vegetation with stabilization of dunes in a desert-oasis ecotone [J]. Ecological Research, 2015. DOI: 10.1007/s11284-015-1267-1.
- [20] FAN B L, ZHANG A P, YANG Y, et al. Long-term effects of *Xerophytic* shrub *haloxylon ammodendron* plantations on soil properties and vegetation dynamics in northwest China [J]. PLoS One, 2016, 11(12): e0168000.
- [21] 潘加朋, 张克存, 安志山, 等. 基于风洞模拟试验的典型机械防沙工程防护效益对比[J]. 水土保持学报, 2023, 37(6): 104-110.
- PAN J P, ZHANG K C, AN Z S, et al. Comparative analysis of protective benefits of typical mechanical sand control projects based on wind tunnel simulation experiment [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(6): 104-110.
- [22] 赵名彦, 丁国栋, 罗俊宝, 等. 浑善达克沙地高速公路沙袋沙障的综合防护效益研究[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(7): 105-109.
- ZHAO M Y, DING G D, LUO J B, et al. Study on comprehensive protecting efficiency of sand-bag obstacle of highway in Otindag Sandy Land [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(7): 105-109.

- [23] SILVA D F, ARAUJO A S F, LIMA A Y V, et al. Enzymatic stoichiometry in degraded soils after two decades of restoration in a Brazilian semiarid region [J]. Catena, 2024, 236: e107768.
- [24] 宋达成, 马全林, 刘世权, 等. 民勤黏土沙障-人工梭梭林物种多样性及土壤水分变化特征 [J]. 干旱区研究, 2024, 41(4): 618-628.
- SONG D C, MA Q L, LIU S Q, et al. Species diversity in Minqin clay sand barrier-artificial *Haloxylon ammodendron* plantations and the characteristics of soil moisture changes [J]. Arid Zone Research, 2024, 41(4): 618-628.
- [25] 徐春燕, 王涛, 贾晨波, 等. 贺兰山东麓荒漠植物对土壤化学性质和酶活性的影响 [J]. 生态环境学报, 2020, 29(12): 2346-2354.
- XU C Y, WANG T, JIA C B, et al. Effects of different desert plants on the soil chemical properties and enzyme activities in Helanshan eastern region [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(12): 2346-2354.
- [26] 安花, 蒙仲举, 李浩年, 等. 库布齐沙漠不同林龄沙柳树对土壤酶活性的影响 [J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 77-85.
- AN H, MENG Z J, LI H N, et al. Effects of different ages of *Salix psammophila* forest on soil enzyme activity in Hobq Desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 77-85.
- [27] 张延文, 周雅洁, 张不染, 等. 固沙林恢复土壤酶化学计量特征与养分限制效应 [J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 102-111.
- ZHANG Y W, ZHOU Y J, ZHANG B R, et al. Soil enzymatic stoichiometry and nutrient limitation during revegetation in sand-fixing forest [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 102-111.
- [28] RAZAVI B S, BLAGODATSKAYA E, KUZYAKOV Y. Temperature selects for static soil enzyme systems to maintain high catalytic efficiency [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 97: 15-22.
- [29] 杨智姣, 温晨, 杨磊, 等. 半干旱黄土小流域不同恢复方式对生态系统多功能性的影响 [J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8606-8617.
- YANG Z J, WEN C, YANG L, et al. Effects of different restoration methods on ecosystem multifunctionality in the semi-arid loess small watershed [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8606-8617.
- [30] 梁钰镁, 高永, 王瑞东, 等. 沙柳沙障腐烂过程对土壤微生物生物量及酶活性的影响 [J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 305-311.
- LIANG Y M, GAO Y, WANG R D, et al. Effects of *Salix psammophila* sand barriers decay on soil microbial biomass and enzymes activities [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 305-311.
- [31] 潘颜霞, 赵洋, 张志山. 生态垫铺设对风沙固定及土壤温湿度的影响 [J]. 中国沙漠, 2023, 43(5): 186-193.
- PAN Y X, ZHAO Y, ZHANG Z S. The influence of ecotone laying on sand fixation and soil temperature and humidity [J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(5): 186-193.
- [32] 李镒, 汪季, 焦宏远, 等. 基于破损规律及植物保存率的沙障选择 [J]. 西北林学院学报, 2021, 36(2): 130-135.
- LI Z, WANG J, JIAO H Y, et al. Sand barrier selection based on the damage rule and plant preservation rate [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(2): 130-135.
- [33] 马全林, 王继和, 刘虎俊, 等. 机械沙障在退化人工梭梭林恢复中的应用 [J]. 干旱区研究, 2005, 22(4): 526-531.
- MA Q L, WANG J H, LIU H J, et al. Application of sand barriers in regenerating the degenerated artificial forests of *Haloxylon ammodendron* bge [J]. Arid Zone Research, 2005, 22(4): 526-531.
- (上接第 56 页)
- [32] CHEN D, WEI W, CHEN L D. Effects of terracing practices on water erosion control in China: A meta-analysis [J]. Earth-Science Reviews, 2017, 173: 109-121.
- [33] MA T L, LIU B Y, HE L, et al. Response of soil erosion to vegetation and terrace changes in a small watershed on the Loess Plateau over the past 85 years [J]. Geoderma, 2024, 443: e116837.
- [34] 张玥, 郭学锋, 韩剑桥, 等. 黄土高原近 40 年梯田建设的土壤固碳效益初步估算 [J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 190-197.
- ZHANG Y, GUO X F, HAN J Q, et al. Preliminary estimation of soil carbon sequestration benefits of terrace construction on the Loess Plateau in the past nearly 40 years [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 190-197.
- [35] CHEN D, WEI W, CHEN L D, et al. Response of soil nutrients to terracing and environmental factors in the Loess Plateau of China [J]. Geography and Sustainability, 2024, 5(2): 230-240.