DOI: 10. 11686/cyxb2025464 http://cyxb. magtech. com. cn
陈燕，闫永刚，赵香君，等. 围封与补播对退化荒漠草原植被生物量、土壤有机碳及颗粒特征的影响. 草业学报，2026，35(11)：13－23.
CHEN Yan, YAN Yong-gang, ZHAO Xiang-jun, *et al*. Impacts of grazing exclusion and reseeding on vegetation biomass, soil organic carbon, and soil particle characteristics in a degraded desert steppe. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(11): 13－23.

围封与补播对退化荒漠草原植被生物量、土壤有机碳及颗粒特征的影响

陈燕[1]，闫永刚[2]，赵香君[2]，李志刚[1,3*]
（1. 宁夏大学林业与草业学院，宁夏 银川 750021；2. 宁夏灵武白芨滩国家级自然保护区管理局，宁夏 灵武 751400；3. 盐池北部荒漠草原宁夏回族自治区野外科学观测研究站，宁夏 盐池 751500）

摘要：围封与补播是退化荒漠草原的主要恢复措施，但二者对荒漠草原植被、土壤有机碳及土壤颗粒特征的影响机制尚不明确。以宁夏盐池退化荒漠草原为对象，设置不同起始年份的围封（2017，2021年）、补播（2017，2021年）及对照长期自由放牧处理，于2024年测定地上植被生物量、凋落物量以及0～60 cm土层的根系生物量、土壤有机碳和颗粒组成。结果表明：1）与对照相比，2021年补播与2017年围封对地上生物量和凋落物量的提高均最具优势，但二者间差异不显著（$P>0.05$）；2）2017年恢复措施较2021年对地下根系生物量的提升效果更为明显，且2017年围封略优于2017年补播；3）各恢复措施均不同程度提高了土壤有机碳含量，但2017年恢复措施显著优于2021年，且2017年补播略优于2017年围封；4）各恢复措施均不同程度降低了细砂粒比例，提升了极细砂粒和粉黏粒比例，并提高了土壤分形维数，但2017年恢复措施优于2021年，且2017年围封略优于2017年补播。5）路径分析模型表明，地下生物量是驱动有机碳积累和促进分形维数值升高的关键因子。结果表明，短期补播较短期围封对草地植被的恢复更具优势，但是长期围封较长期补播对草地植被恢复及土壤物理结构的改善更具优势。总之，退化荒漠草原的恢复需依赖长期人为正向干预。

关键词：封育；补播；土壤颗粒组成；分形维数；荒漠草原

Impacts of grazing exclusion and reseeding on vegetation biomass, soil organic carbon, and soil particle characteristics in a degraded desert steppe

CHEN Yan[1], YAN Yong-gang[2], ZHAO Xiang-jun[2], LI Zhi-gang[1,3*]
1. *School of Forest and Grassland Science, Ningxia University, Yinchuan* 750021, *China*; 2. *The Administration Bureau of Baijitan National Nature Reserve, Lingwu* 751400, *China*; 3. *Northern Yanchi Desert Grassland and Observation and Research Station of Ningxia, Yanchi* 751500, *China*

Abstract: Grazing exclusion and reseeding are the two primary restoration measures for degraded desert steppes, but their mechanisms affecting soil vegetation biomass, soil organic carbon, and soil particle characteristics remain unclear. In this study, restoration treatments with different starting years (grazing exclusion from 2017 or 2021 and reseeding in 2017 or 2021), were applied alongside a freely-grazed control in a degraded desert steppe in Yanchi, Ningxia. In 2024, aboveground vegetation biomass, litter biomass, root biomass (0－60 cm), soil organic carbon (0－60 cm), and particle composition (0－60 cm) were determined. It was found that: 1) Compared with control,

收稿日期：2025-11-11；改回日期：2026-02-04
基金项目：宁夏自然科学基金（2025AAC020027）和宁夏科技惠民项目（2025CMG03050）资助。
作者简介：陈燕（1999－），女，宁夏固原人，在读硕士。E-mail: 2818453867@qq. com
*通信作者 Corresponding author. E-mail: lizg001@sina. com

both reseeding in 2021 and grazing exclusion initiated in 2017 were effective in increasing aboveground biomass and litter biomass, with no significant difference between them ($P>0.05$). 2) The restoration measures initiated in 2017 had a more significant effect on increasing the underground biomass compared to those in 2021, and the grazing exclusion initiated in 2017 was slightly better than the reseeding in 2017. 3) All restoration treatments increased soil organic carbon content, and restoration measures initiated in 2017 were slightly better than restoration measures initiated in 2021. Meanwhile, reseeding in 2017 slightly outperformed grazing exclusion from 2017 in soil organic carbon accumulation. 4) All restoration measures reduced the proportion of fine sand and increased the proportions of very fine sand and silt+clay, consequently raising the soil fractal dimension. Restoration measures implemented in 2017 exhibited this effect more than those implemented in 2021, with grazing exclusion initiated in 2017 showing a slight advantage over reseeding carried out in 2017. 5) Path analysis indicated that underground biomass is a key factor driving soil organic carbon accumulation and promoting the increase in fractal dimension value. This study demonstrated that short-term reseeding is more advantageous than short-term enclosure for steppe vegetation recovery, whereas long-term enclosure surpasses long-term reseeding in restoring steppe vegetation and improving soil physical structure. In conclusion, the restoration of degraded desert steppe land requires sustained positive human intervention.

Key words: enclosure; reseeding; soil particle composition; fractal dimension; desert steppe

荒漠草原作为干旱半干旱区的典型生态系统,具有维持生物多样性、碳固存和防风固沙等重要生态功能[1]。然而,过度放牧和气候变化导致全球范围内荒漠草原严重退化,表现为植被覆盖度降低、土壤有机碳流失乃至土壤结构恶化(如粗粒化)等。为恢复退化草地,排除放牧干扰的围栏封育和引入乡土草种的补播措施成为广泛应用的技术措施,且国内外研究已证实二者对植被恢复与土壤碳积累的积极效应[2]。然而,目前也存在长期恢复措施对草地生态系统结构与功能恢复可持续性的争议,因此开展短期与长期恢复措施对退化草地生态功能影响的对比研究显得十分有必要。

围栏封育被认为是恢复退化草地生态系统以及提升碳汇能力的有效方法,特别是围封后的草原有充足的凋落物输入以提升土壤有机碳的积累[3],在宁夏荒漠草原的研究结果发现,4年的短期围封可以显著改善中度和重度退化草原的植被群落结构和提高草原生产力[4]。还有研究显示,荒漠草原围封7年能显著增加土壤有机碳库,但当年均降水量低于160 mm或年均温低于3.5 ℃时,土壤有机碳增速可能降低40%以上[5-7]。一项基于2000—2023年对中国北方荒漠草原围封效果的Meta分析结果也表明,荒漠草原经历20多年围栏封育恢复后,地上植被恢复较快,但土壤结构和功能恢复滞后,生态系统过程的稳定性尚未完全实现[8]。值得注意的是,围封还可能因缺乏凋落物多样性而导致土壤无机碳比例上升,有机碳固存效率反而下降,尤其在干旱区深层土壤中固存效率下降更为明显[7]。除围封外,补播措施被认为是显著促进退化草地恢复的又一有效措施。在宁夏荒漠草原的研究表明,禾本科+豆科牧草混播对提高草地生产力,改善荒漠草原植物群落及其土壤养分具有促进作用[9]。补播通过引入深根性草本(如豆科牧草),可加速土壤团聚体形成并改良粒径分布[10]。研究表明,在内蒙古荒漠草原进行补播后,>0.25 mm水稳性团聚体比例增加12%~18%,有效遏制了风蚀导致的细颗粒损失[11]。特别是补播豆科植物的共生固氮作用可提升氮素有效性,间接促进有机质矿化—腐殖化平衡[12]。近年来的研究还表明,补播乡土牧草对植被以及土壤水分、微生物活性及养分的改善效果均十分显著[13-14]。然而,目前还缺少围封和补播2种恢复措施对退化草地植被及土壤性状影响的比较研究,而系统比较两种措施在短期与长期尺度上对草地植被与土壤关键属性的影响,更能为退化荒漠草原因地制宜地选择恢复策略、优化恢复模式提供直接的科学依据。

土壤颗粒特征是最基本的土壤物理性质之一,对土壤的基本结构、理化性质及抗侵蚀性等具有较大影响,尤其与土壤养分的关系最密切,影响了土壤养分的变化及土壤侵蚀过程,因此常被作为对土壤质地、肥力以及土地退化与恢复效果评价的重要指标[15-16]。表征土壤颗粒特征的指标包括土壤颗粒组成和分形维数,而土壤颗粒分

形维数可定量表征粒径分布的均一性与结构稳定性，因为分形维数值与黏粉粒含量及水稳性团聚体比例呈正相关，而与砂粒占比负相关[17]。在草地恢复过程中，植物根系分泌物和菌丝网络会促进微团聚体胶结，致使分形维数值升高，土壤持水和抗蚀能力增强[18-19]。特别是在干旱区，土壤颗粒的分形维数被证实能敏感指示水分条件变化，其值与土壤有效水含量呈显著正相关[20]，这为荒漠草原生态恢复过程中持水能力的评价提供了理论依据。然而，围封和补播作为荒漠草原主要的恢复措施，二者对土壤颗粒特征影响的比较研究尚不深入。因此，阐明两种主要恢复措施驱动土壤颗粒特征改良的路径与机制，对于全面评估其生态恢复成效、推动恢复实践从植被重建向土壤结构与功能协同恢复的深化至关重要。据此，本研究以宁夏荒漠草原为对象，研究围封和补播对退化荒漠草原植被生物量、凋落物量、土壤有机碳及土壤颗粒特征的影响，旨在评价围封与补播对干旱半干旱区草地的恢复效果，以期为未来退化草地恢复提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于宁夏盐池北部荒漠草原（107°16′19″－107°16′26″ E，37°45′16″－37°45′22″ N），地处毛乌素沙地边缘，该区域地势起伏不大，为缓坡丘陵地貌，海拔约 1380～1600 m，属典型温带大陆性气候。年均温为 9.4 ℃，年均无霜期 162 d，年平均降水量为 290 mm，降水主要集中在 7－9 月，约占全年总降水量的 80%。年蒸发量约 2136 mm。试验地土壤类型为灰钙土，植被类型为荒漠草原，主要分布有短花针茅（*Stipa breviflora*）、蒙古冰草（*Agropyron mongolicum*）、牛枝子（*Lespedeza potaninii*）、猪毛蒿（*Artemisia scoparia*）等植物。

1.2　试验设计

在研究区选择地势平坦且退化程度一致的重度退化草原开展试验。试验共设 5 个处理：2017 和 2021 年分别在退化草地设立面积约为 10 hm^2 围栏封育样地（分别记为 E_{2017}，E_{2021}）；同年，在以上 2 个围栏封育草地中均选择面积约为 2 hm^2 草地建植蒙古冰草＋牛枝子混播样地（R_{2017}，R_{2021}）；选择持续自由放牧草地为对照（CK）。补播草地的播种方式为条播，播深约 2～3 cm，行距 50 cm，补播条带宽 5 m。在以上封育草地、补播草地及放牧地均设置面积为 5 m×10 m 的固定研究小区 5 个（5 次重复），2 个小区间的距离为 5 m。以上补播草种均来自研究地点的封育草地（≥10 年）。蒙古冰草和牛枝子的净度分别为 90% 和 90%，发芽率分别为 85% 和 76%。基于牧草纯净度、发芽率、千粒重及该地区以往补播经验，禾豆混播比例为 1∶1，其中蒙古冰草和牛枝子播量分别为 17 和 8 $kg·hm^{-2}$。

1.3　样品采集及测定

1.3.1　生物量与凋落物测定　2024 年 8 月，在每个处理的每个试验小区中，随机设置 4 个 1 m×1 m 样方用于地上和地下生物量测定。分种类收集样方内所有植被，经流水冲洗去除淤泥后，置于 60 ℃烘箱中烘干至恒重（精确度 0.1 g），称量后即为地上生物量。同时，利用根钻采集各样方 0～60 cm 土层的根系样品，经流水冲洗淤泥后，同样在 60 ℃条件下烘干至恒重（精确度 0.1 g），作为地下生物量。凋落物质量测定采用随机设置 4 个 1 m×1 m 样方的方式，收集样方内所有凋落物，经流水冲洗去除泥沙后，于 85 ℃烘箱中烘干至恒重（精确度 0.1 g），称量后获得凋落物质量。

1.3.2　土壤样品采集与指标测定　在植物样采集同期，每个处理每个小区随机设置 4 个 1 m×1 m 样方，采用“S”形 5 点取样法，按 0～10 cm、10～20 cm、20～40 cm、40～60 cm 土层分层采集土壤样品。采集后的土样去除植物凋落物及残留根系，将同一处理样地中同一土层的土样混合均匀，过 2 mm 筛后备用。土壤颗粒组成采用英国马尔文公司 Mastersizer 3000 激光粒度仪测定，依据美国农业部分类系统进行分级[21]。因试验样地黏粒（＜2 μm）和粗砂粒（500～2000 μm）含量几乎为 0，故将土壤颗粒划分为中砂粒（250～500 μm）、细砂粒（100～250 μm）、极细砂粒（50～100 μm）和粉黏粒（＜50 μm）。由于本研究中土壤黏粒含量极低，因此将粉粒与黏粒合并为粉黏粒。有机碳含量采用重铬酸钾容量法－外加热法测定[22]。在外加热条件下，以一定浓度的重铬酸钾－硫酸溶液氧化土壤有机碳，剩余的重铬酸钾用硫酸亚铁滴定，根据滴定消耗的重铬酸钾量计算有机碳含量。

1.4　数据处理与分析

1.4.1　土壤颗粒分形维数（D）的计算　根据杨培岭等[23]提出的以不同级别颗粒的质量分布表征的土壤分形

模型来计算土壤颗粒分布的分形维数。土壤颗粒质量分布与平均粒径的分形维数关系式如下：

$$\log\left[\frac{V(r<R_i)}{V_t}\right]=(3-\mathrm{D})\log\frac{R_i}{R_{\max}}$$

式中：r为粒径；R_i为粒径分区中第i级粒径，一般为该粒级区间上下限的算术平均值；$V(r<R_i)$为粒径小于R_i的土壤颗粒累积体积；V_t为土壤全部颗粒总体积；$R_{\max}$为土壤颗粒中最大粒径，本研究中$R_{\max}$=2000 μm；对公式两边同时取对数，通过对数曲线的拟合斜率可得到土壤分形维数，拟合的直线斜率为3−D，土壤颗粒体积分形维数为D。

1.4.2 数据的统计分析 采用Excel整理数据，利用R 4.4.2软件进行各处理间植物生物量、土壤有机碳、土壤颗粒组成及土壤颗粒分形维数的差异单因素方差分析(one-way ANOVA)；采用线性回归分析土壤颗粒组成与分形维数间的关系；采用皮尔逊相关分析(Pearson's correlation analysis)探究土壤颗粒在不同土层与植物生物量及有机碳间的相关关系，以及不同土层土壤颗粒分形维数与植物生物量及有机碳间的相关关系，然后根据此结果进一步采用R中的"plspm"包(偏最小二乘路径模型)分析地上生物量、地下生物量及土壤有机碳对土壤颗粒及分形维数的影响路径。

2 结果与分析

2.1 围封与补播对荒漠草原植被生物量的影响

不同恢复措施对植物地上生物量、地下生物量及地上凋落物量均产生了显著的影响($P<0.05$，图1)。即，与CK相比，封育和补播均不同程度地提高了草地地上生物量，但只有R_{2021}和E_{2017}处理显著高于CK ($P<0.05$)，且R_{2021}和E_{2017}二者间差异不显著($P>0.05$)。对凋落物而言，4种恢复处理凋落物量均显著高于CK($P<0.05$)，且仍以R_{2021}和E_{2017}处理表现出凋落物量较高的趋势，R_{2021}和E_{2017}二者间差异不显著($P>0.05$)。地下生物量的变化规律在不同土层有所不同，但总体而言，0～10 cm、20～40 cm、40～60 cm与0～60 cm土层的地下生物量在处理间变化规律一致，总体上表现为$E_{2017}>R_{2017}>R_{2021}>CK>E_{2021}$；而10～20 cm土层则表现为$R_{2017}>E_{2017}>R_{2021}>CK>E_{2021}$。

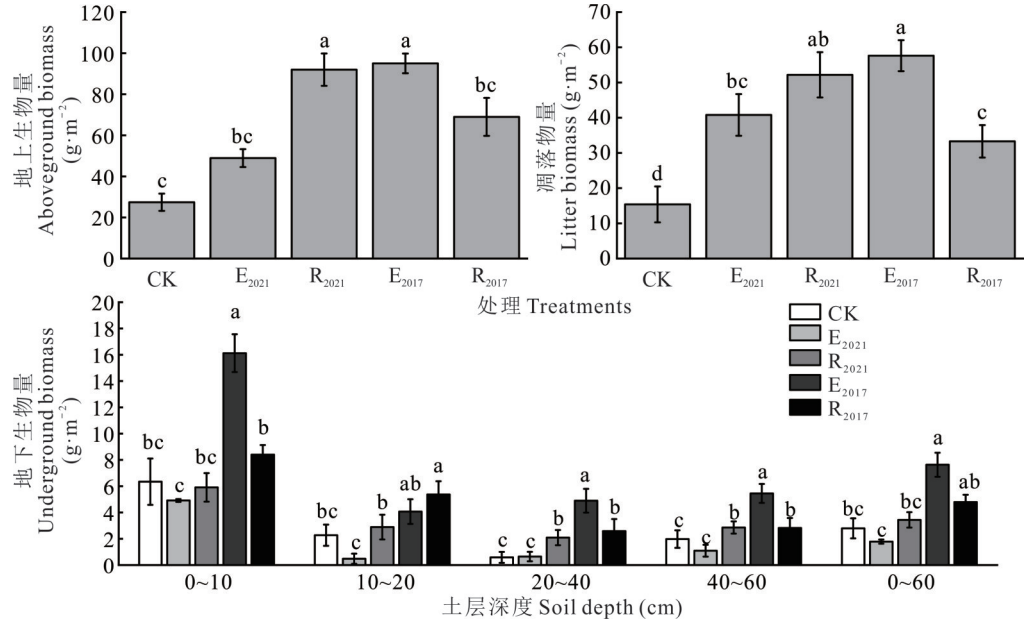


图1 不同处理地上生物量、凋落物蓄积量和地下生物量的变化规律

Fig. 1 Changes of aboveground biomass, litter biomass, and underground biomass among different treatments

CK：对照 Control；E_{2021}：2021年围封草地 Enclosed grassland in 2021；E_{2017}：2017年围封草地 Enclosed grassland in 2017；R_{2021}：2021年补播草地 Reseeded grassland in 2021；R_{2017}：2017年补播草地 Reseeded grassland in 2017. 不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)，下同。Different letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

2.2　围封与补播对荒漠草原土壤有机碳的影响

与 CK 相比，不同恢复措施均不同程度地提高了土壤有机碳含量，但是不同土层下各处理间的土壤有机碳含量变化规律存在不同（图 2）。具体而言，0～10 cm、20～40 cm 和 40～60 cm 土层的有机碳含量呈 R_{2017}＞E_{2017}＞R_{2021}＞E_{2021}＞CK；而 10～20 cm 土层则表现为 E_{2017}＞R_{2017}＞E_{2021}＞R_{2021}＞CK。然而，就 0～60 cm 土层而言，土壤有机碳含量呈 R_{2017}＞E_{2017}＞E_{2021}＞R_{2021}＞CK。

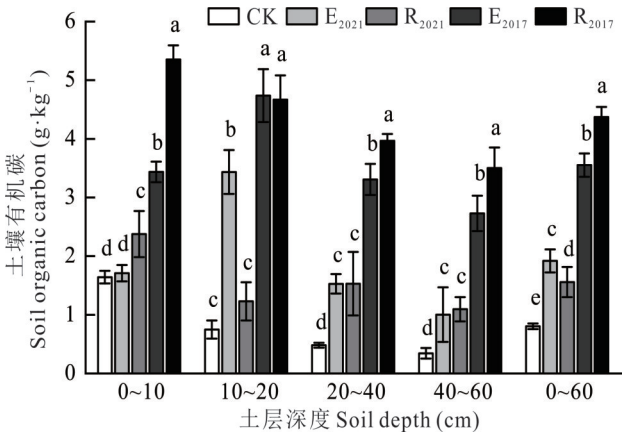


图 2　不同处理土壤有机碳的变化规律

Fig. 2　Changes of soil organic carbon among different treatments

2.3　围封与补播对荒漠草原土壤颗粒组成及分形维数的影响

本研究中土壤颗粒组成以细砂粒（37.72%～67.68%）和极细砂粒（27.07%～44.03%）为主（表 1）。与 CK 相比，恢复措施总体上改变了土壤颗粒组成。在 20～40 cm 土层中，各恢复处理中砂粒（250～500 μm）比例均显著低于 CK（P＜0.05）；在 10～20 cm 土层，长期恢复措施（E_{2017} 和 R_{2017}）也显著降低了其比例（P＜0.05）。细砂粒（100～250 μm）比例在长期恢复措施（E_{2017} 和 R_{2017}）的 0～60 cm 土层较 CK 均呈降低趋势。相反，极细砂粒（50～100 μm）和粉黏粒（＜50 μm）比例在长期恢复措施的 0～60 cm 土层较 CK 均呈增加趋势（极细砂粒 40～60 除

表 1　不同处理下土壤的粒径组成

Table 1　Soil particle compositions among different treatments (%)

土层深度 Soil depth (cm)	处理 Treatments	中砂粒 Medium sand (250～500 μm)	细砂粒 Fine sand (100～250 μm)	极细砂粒 Very fine sand (50～100 μm)	粉黏粒 Silt+clay (＜50 μm)
0～10	CK	2.33±0.21ab	54.99±6.42a	37.11±3.72a	5.57±2.89a
	E_{2021}	3.76±2.25ab	55.18±3.32a	35.44±1.07b	5.63±1.84a
	R_{2021}	4.36±2.04a	58.32±3.87a	34.41±5.27b	2.92±0.70a
	E_{2017}	1.45±0.99b	50.97±7.88a	40.08±5.04a	7.51±4.44a
	R_{2017}	2.97±0.80ab	52.80±7.38a	37.42±4.80a	6.81±3.64a
10～20	CK	2.39±1.33a	59.15±2.20a	36.25±3.34b	2.22±0.60c
	E_{2021}	2.33±0.63a	59.81±5.97a	35.48±4.81b	2.38±0.76c
	R_{2021}	2.36±2.04a	59.28±4.03a	35.59±5.11b	2.77±0.98c
	E_{2017}	1.12±0.95b	45.63±3.96b	40.47±3.41a	12.78±1.45a
	R_{2017}	1.15±1.08b	45.04±3.95b	44.03±5.91a	9.79±1.30b
20～40	CK	6.42±2.22a	62.49±1.78a	28.67±3.41b	2.43±0.47c
	E_{2021}	2.27±0.26b	67.68±4.27a	28.57±3.80b	1.49±0.31c
	R_{2021}	2.56±2.11b	59.75±5.80a	35.93±6.62a	1.75±1.02c
	E_{2017}	3.27±1.73b	41.47±5.00b	37.39±2.79a	17.88±3.14a
	R_{2017}	1.74±0.74b	49.02±2.80b	41.35±0.67a	7.89±2.97b
40～60	CK	1.72±0.16a	56.06±1.98b	38.17±2.00a	4.05±0.51c
	E_{2021}	4.43±1.78a	65.67±4.58a	27.07±3.06b	2.84±0.881c
	R_{2021}	2.05±0.43a	57.56±4.91b	37.95±4.35a	2.45±0.85c
	E_{2017}	5.02±4.26a	37.72±1.68d	38.22±2.76a	19.04±2.60a
	R_{2017}	3.99±1.27a	44.21±5.24c	37.52±4.18a	14.28±2.76b

不同字母表示处理间差异显著（P＜0.05）。Different letters indicate significant differences among treatments (P＜0.05).

外)。短期恢复措施(E_{2021}和R_{2021})对颗粒组成的影响较弱,多数土层与CK无显著差异。总体而言,长期恢复措施降低了土壤中≥100 μm的粗颗粒比例,提高了<100 μm的细颗粒比例,且长期围封(E_{2017})在促进粉黏粒增加方面略优于补播(R_{2017})。

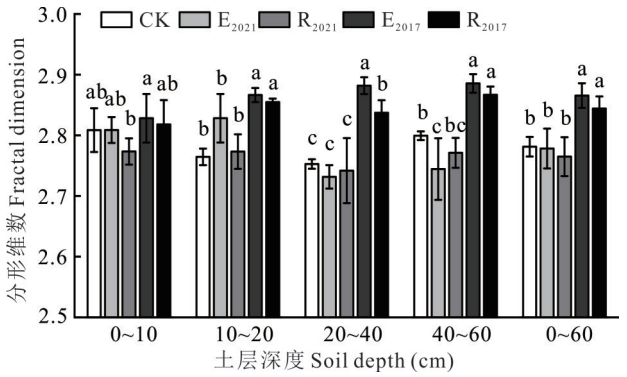


图3 不同处理下土壤颗粒分形维数特征

Fig. 3 Fractal dimension characteristics of soil particles among different treatments

对分形维数的计算结果如图3所示,与CK相比,10~20 cm、20~40 cm和40~60 cm土层分形维数均表现为E_{2017}和R_{2017}显著高于CK($P<0.05$),但在0~10 cm土层,E_{2017}和R_{2017}与CK间差异不显著($P>0.05$),同时在0~60 cm土层E_{2017}和R_{2017}间差异不显著($P>0.05$)。而在0~10 cm、10~20 cm以及20~40 cm土层,E_{2021}和R_{2021}与CK间无显著差异($P>0.05$),但在40~60 cm土层出现了E_{2021}和R_{2021}低于CK的情况($P>0.05$),同时E_{2021}和R_{2021}间无显著差异($P>0.05$)。就0~60 cm土层分形维数的平均值而言,E_{2017}和R_{2017}显著高于CK($P<0.05$),而E_{2021}和R_{2021}与CK间无显著差异($P>0.05$)。如图4所示,中砂粒比例与分形维数间无显著相关关系($P>0.05$),细砂粒比例与分形维数间呈显著负相关($P<0.01$),而极细砂粒和粉黏粒比例均与分形维数间呈显著正相关($P<0.01$),即粒径<100 μm的土壤颗粒比例的升高促进了土壤分形维数值的升高。

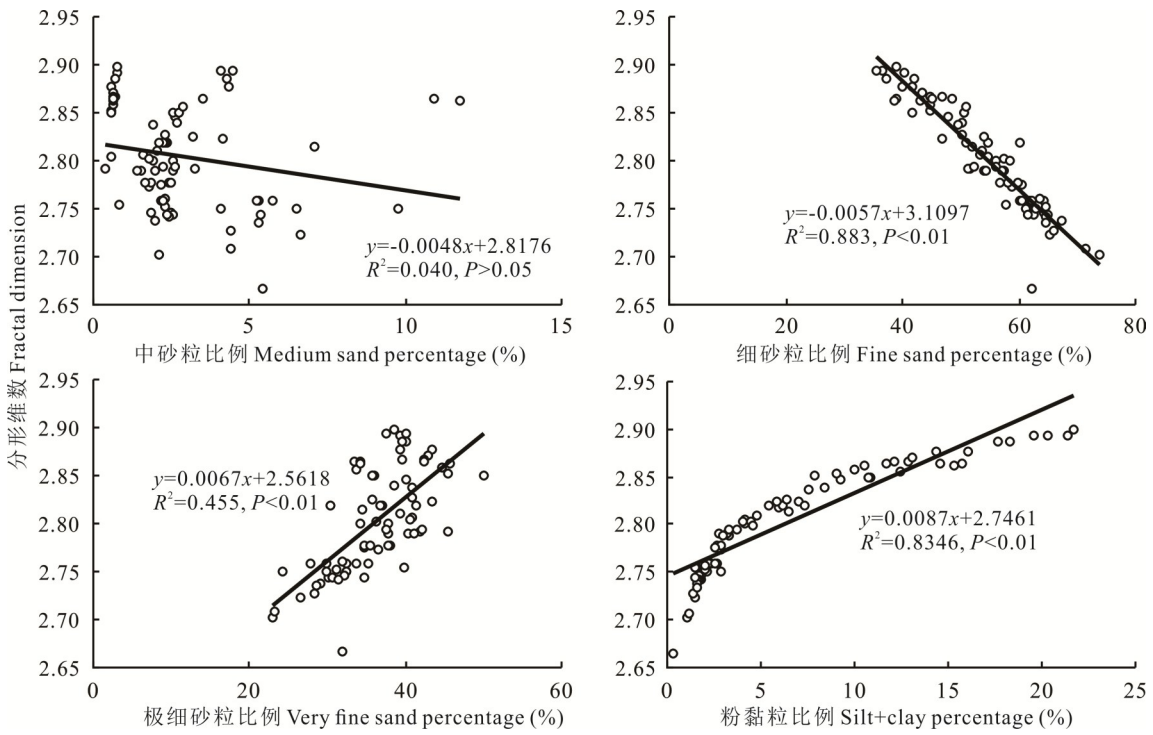


图4 土壤颗粒组成与分形维数间的关系分析

Fig. 4 Correlation analysis between soil particle composition and fractal dimension

2.4 围封与补播对荒漠草原土壤颗粒组成及分形维数影响的机制分析

相关分析结果表明(表2),不同粒径的土壤颗粒主要和地上生物量、地下生物量及土壤有机碳间存在相关关系。总体而言,中砂粒与细砂粒比例和地上生物量、地下生物量及土壤有机碳间呈负相关,而极细砂粒及粉黏粒比例与地上生物量、地下生物量及土壤有机碳间呈正相关。即地上生物量、地下生物量及土壤有机碳的升高促进

了粒径＜100 μm的土壤颗粒比例。土壤颗粒分形维数与植物生物量及土壤有机碳间的相关分析结果表明(表3),土壤分形维数与地表凋落物量无显著相关关系($P>0.05$),10～20 cm土层的土壤分形维数与地上生物量呈显著正相关($P<0.05$),0～40 cm土层的土壤分形维数与地下生物量呈显著正相关($P<0.05$或$P<0.01$),10～60 cm土层的土壤分形维数与有机碳呈显著正相关($P<0.01$)。

表2　不同土层土壤颗粒组成与植物生物量及土壤有机碳的相关分析

Table 2　Correlation analysis between soil particles composition and plant biomass and soil organic carbon in different soil depths

土壤颗粒 Soil particles	土层深度 Soil depth (cm)	地上生物量 Aboveground biomass	凋落物量 Litter biomass	地下生物量 Underground biomass	土壤有机碳 Soil organic carbon
中砂粒 Medium sand	0～10	－0.001	0.117	－0.165	－0.165
	10～20	－0.239	－0.160	－0.365	－0.365
	20～40	－0.446*	－0.469*	－0.446*	－0.446*
	40～60	0.158	0.207	0.310	0.310
细砂粒 Fine sand	0～10	－0.046	－0.037	－0.246	－0.246
	10～20	－0.429	－0.264	－0.751**	－0.751**
	20～40	－0.589**	－0.350	－0.725**	－0.725**
	40～60	－0.475*	－0.236	－0.741**	－0.741**
极细砂粒 Very fine sand	0～10	0.078	0.033	0.205	0.205
	10～20	0.201	0.070	0.506*	0.506*
	20～40	0.553*	0.268	0.660**	0.660**
	40～60	0.248	－0.040	0.192	0.192
粉黏粒 Silt＋clay	0～10	－0.018	－0.037	0.277	0.277
	10～20	0.573**	0.418	0.812**	0.812**
	20～40	0.554*	0.454*	0.669**	0.669**
	40～60	0.456*	0.293	0.831**	0.831**

*：$P<0.05$；**：$P<0.01$. 下同 The same below.

表3　不同土层土壤颗粒分形维数与植物生物量及土壤有机碳间的相关分析

Table 3　Correlation analysis between soil particles fractal dimension and plant biomass and soil organic carbon in different soil depths

土层深度 Soil depth (cm)	地上生物量 Aboveground biomass	凋落物量 Litter biomass	地下生物量 Underground biomass	土壤有机碳 Soil organic carbon
0～10	－0.080	－0.088	0.450*	0.241
10～20	0.534*	0.363	0.652**	0.783**
20～40	0.475*	0.289	0.611**	0.687**
40～60	0.363	0.134	0.627**	0.590**

基于相关分析结果(表2和表3),本研究进一步构建了地上生物量、地下生物量及土壤有机碳对土壤颗粒及分形维数影响的偏最小二乘路径模型(图5),结果显示,极细砂粒和粉黏粒的比例由地下生物量和土壤有机碳直接共同正向调控($P<0.01$),同时土壤有机碳的积累也受地下生物量的正向驱动($P<0.05$)。最终,极细砂粒、粉黏粒和土壤有机碳共同正向驱动荒漠草地土壤分形维数($P<0.05$),同时地下生物量对土壤分形维数也具有显著的直接正向调控作用($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 围封与补播对植被生物量及土壤有机碳的影响

本研究通过历时7年的控制试验(2017—2024年),系统比较了围封和补播2种恢复措施对重度退化荒漠草地植被生物量积累的短期和长期效应,发现短期补播较单一的短期围封更能有效促进地上植被生物量和凋落物的蓄积,而长期围封较长期补播对地上植被生物量和凋落物的蓄积更有效。由于补播乡土优势牧草,这种近自然恢复模式能缩短草地向顶级群落演替进程,短期内改善草群结构,加速地上生物量及凋落物的积累[10],因此短期补播较短期围封对草地地上植被的恢复效果更显著。但值得注意的是,本研究中短期补播的地上生物量甚至高于长期补播,这可能源于补播措施本身的动态效应:补播初期,高生产力目标物种的快速建植能显著提升地上生物量,而随着恢复时间延长,群落可能进入竞争加剧、资源重分配的演替阶段,地上净生产力下降并趋于稳定。然而长期围封也是草地近自然恢复的一种典型措施,虽然恢复周期较长,但这种恢复措施可能更接近于近自然恢复,因此最终表现出其草地生物量高于长期补播的情况。地下生物量的变化虽然总体上与地上生物量类似,但是长期的围封对地下生物量特别是深层土壤根系生物量的积累作用明显。

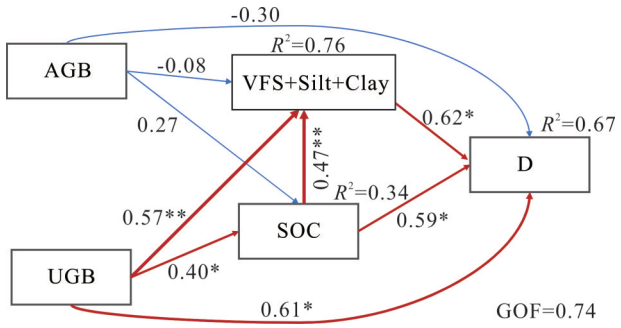


图5 地上生物量、地下生物量及土壤有机碳对土壤颗粒及分形维数影响的偏最小二乘路径模型

Fig. 5 The partial least squares path model showing effects of aboveground biomass, underground biomass and soil organic carbon on soil particle composition and fractal dimension

红色线条表示正相关,绿色线条表示负相关。R^2表示每个内生潜变量被模型解释的变异比例;GOF表示模型的整体拟合优度,>0.64表示拟合良好。Red lines indicate positive correlations, while green lines indicate negative correlations. R^2 represents the proportion of variance in each endogenous latent variable explained by the model; GOF denotes the overall goodness of fit of the model, with a value greater than 0.64 suggesting a good fit. *: $P<0.05$; **: $P<0.01$. AGB: 地上生物量 Aboveground biomass; UGB: 地下生物量 Underground biomass; VFS: 极细砂粒 Very fine sand; Silt: 粉粒; Clay: 黏粒; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; D: 分形维数 Fractal dimension.

植物源碳是土壤有机碳的主要输入源,前人的研究也已经表明荒漠草地的土壤有机碳与植物生物量间呈正相关[24]。然而,在本研究中,不同处理土壤有机碳与地上生物量、凋落物量及地下生物量的变化规律并不完全一致,即长期补播处理下土壤的有机碳含量最高。前人曾对该地区补播草地进行了土壤水分方面的研究,发现补播由于改善了地下根系的形态结构,导致土壤水分入渗及持水性显著提高[13,25]。因此,本研究推测补播可能较围封更能通过改善根系形态而促进荒漠草地土壤水分条件的改善,并促进微生物加速对根系凋落物的分解周转,最终促进土壤有机碳的积累[14]。特别是本研究中发达细根系型蒙古冰草与深根型牛枝子混播可以协同驱动根系向深层土壤拓展,促进深层土壤有机碳的积累,但具体原因还需进一步的研究。然而,从0~60 cm均值看,2021年围封草地土壤有机碳含量高于2021年补播草地,其结果与2017年相反。这是因为短期补播草地是在破坏了原有植被后进行的补播,补播的牧草在2~3年内才能完成萌发和定植过程,期间草地植被仍较为稀疏,特别是地下根系生物量较少,不能为土壤输入较多有机碳;而短期围封未破坏原有植被,同时地下根系生物量也高于短期补播草地,因而较短期补播草地能向土壤输入更多的有机碳。

3.2 围封与补播对土壤颗粒组成及分形维数的影响

本研究中,围封和补播处理均使得粒径≥100 μm的土壤颗粒比例降低,粒径<100 μm的土壤颗粒比例升高,这说明2种恢复措施促进了荒漠草地土壤的恢复,且以长期围封和长期补播效果较为显著。本研究结果还显示,粒径≥100 μm的中砂粒和细砂粒比例与土壤有机碳含量呈负相关,而粒径<100 μm的极细砂粒和粉黏粒比例与土壤有机碳呈正相关,表明土壤有机碳含量提高显著促进土壤向黏粒化方向发展。前人的研究已表明,土壤有机碳可以通过包裹砂粒、促进菌丝粘结粉黏粒,从而抑制草地粗粒化的趋势[26]。但在本研究中,虽然长期补播较长期围封对土壤有机碳含量的提升效果更明显,但二者对土壤粒径<100 μm的极细砂粒和粉粒比例提升效果基本一致,这可能是土壤物理结构的变化远比化学性状的变化缓慢,使得7年的补播和围封也未能表现出显著差异。

此外，土壤颗粒组成的变化直接决定着分形维数的变化，回归分析结果表明细砂粒比例的升高显著降低了土壤分形维数，而极细砂粒和粉粒比例的升高显著提升了分形维数。该结果也符合前人的研究结果，即随着土壤中黏粒和粉粒含量的增加，其分形维数也相应增大，反映出土壤结构复杂度的同步提升[27]。在荒漠草原的放牧试验表明，随放牧强度增加，样地中土壤黏粒和粉粒含量呈下降趋势，土壤分形维数也逐渐降低[15]。值得注意的是，本研究中的长期围封和补播措施能显著提升土壤分形维数，而短期围封和补播对土壤分形维数并未产生显著影响，而这进一步说明土壤物理结构的变化需要长期的恢复措施才能改善。同时本研究还发现，长期围封和补播措施对土壤分形维数提升效果差异不大，这与对土壤颗粒组成的影响基本一致，也说明物理结构的变化较化学性状的响应更为缓慢。

本研究中的相关分析结果还显示，地下生物量和土壤有机碳是影响土壤分形维数的主要因子。而结构方程模型进一步表明，土壤分形维数主要受地下生物量的驱动，即地下生物量的积累可以提升土壤有机碳，有机碳含量的提高有利于土壤向黏粒化方向发展，并最终提升土壤分形维数。因此，本研究表明，不论围封还是补播，由于显著提升了根系生物量的积累，进而促进了土壤有机碳的输入，并最终改善了土壤物理结构，利于退化草地的恢复。然而，长期围封处理表现出最高的地下生物量，这与其在促进土壤细粒化和分形维数提升上的略微优势相吻合；而长期补播处理则表现出最高的土壤有机碳含量，这为其通过有机胶结途径改善土壤结构提供了优势。虽然围封和补播均促进了地上生物量和凋落物量，但是在降水稀少的荒漠草原，地表凋落物的分解速率很低，向土壤输入有机碳的数量有限[28]，因此不论短期还是长期的凋落物蓄积对荒漠草原土壤物理结构的改善作用均不明显。

4　结论

本研究通过对比围封与补播对宁夏盐池退化荒漠草原植被与土壤结构的恢复效应，表明两种措施均能显著提升地上/地下生物量、凋落物积累及土壤有机碳含量，但长期恢复效果优于短期。同时，长期围封和补播措施均显著降低了中砂粒与细砂粒比例，提高了极细砂粒与粉黏粒含量，从而增大了土壤分形维数，表明土壤质地由粗粒化向细粒化、结构复杂化改善。然而，长期围封更利于根系发育并同时促进有机碳积累，而长期补播则显著促进深层土壤有机碳积累。地下生物量是驱动土壤有机碳积累和结构改良的核心因素，植物根系通过促进有机碳积累而提升细颗粒比例与分形维数，而地上凋落物对土壤颗粒和分形维数的作用不明显。总之，围封与补播均是退化荒漠草原的有效恢复措施，但退化土壤需要长期的人为正向干预才能得以改善其物理结构。

参考文献 References：

[1] Wang T, Chen L, Xie Y L, *et al*. Responses of rhizosphere bacteria to grazing in alpine meadow of Henan County, Qinghai Province. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(10): 3263－3271.
王添, 陈兰, 谢永丽, 等. 青海省河南县高寒草甸根际土壤细菌对放牧的响应. 草地学报, 2025, 33(10): 3263－3271.

[2] Tian X. A report on E－C translation of current state and future impacts of climate change on biodiversity (Excerpts) from the perspective of translation skopos theory. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2024.
田雪. 目的论视角下《气候变化对生物多样性的影响：现状与未来》(节选)英汉翻译实践报告. 兰州: 兰州交通大学, 2024.

[3] Zhang G R, Wang X Y, Lyu J L, *et al*. Impact and mechanisms of grazing exclusion on soil organic carbon dynamics in grasslands. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(16): 8243－8252.
张光茹, 王星宇, 吕佳霖, 等. 围栏封育对草地土壤有机碳动态的影响机制研究进展. 生态学报, 2025, 45(16): 8243－8252.

[4] Nan W L, Xie Y Z, Peng W D, *et al*. Restoration effects of reseeding and enclosure on the vegetation of different degraded desert steppes. Pratacultural Science, 2024, 41(5): 1068－1077.
南万璐, 谢应忠, 彭文栋, 等. 补播与围封对不同退化程度荒漠草地植被的恢复效果. 草业科学, 2024, 41(5): 1068－1077.

[5] Yu S, Tao L B, Xu D M, *et al*. Effects of enclosure on the soil organic carbon and its active components in desert steppe grassland. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(2): 190－196.
于双, 陶利波, 许冬梅, 等. 封育对荒漠草原土壤有机碳及其活性组分的影响. 草业学报, 2019, 28(2): 190－196.

[6] Yan B L, Wang Z W, Qu Z Q, *et al*. Effects of enclosure on carbon density of plant－soil system in typical steppe and desert

steppe in Nei Mongol, China. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(3): 327－336.
闫宝龙, 王忠武, 屈志强, 等. 围封对内蒙古典型草原与荒漠草原植被－土壤系统碳密度的影响. 植物生态学报, 2018, 42(3): 327－336.

[7] Wang L Y, Zhou G N, Zhu X Y, *et al.* Effects of litter on soil organic carbon and microbial functional diversity. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(7): 2709－2718.
王利彦, 周国娜, 朱新玉, 等. 凋落物对土壤有机碳与微生物功能多样性的影响. 生态学报, 2021, 41(7): 2709－2718.

[8] Zhang Y F, Wang X, Pan H Z, *et al.* Long-term enclosure restoration effect and their environmental dependencies in desert steppes of northern China. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(17): 8529－8543.
张艺斐, 王兴, 潘海珠, 等. 中国北方荒漠草原长期围栏封育恢复效应及其环境依赖性. 生态学报, 2025, 45(17): 8529－8543.

[9] Bao P A, Wen Z L, Wang Y, *et al.* Effects of different forage reseeding patterns on plant community structure and soil characteristics in desert steppe. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(10): 62－73.
鲍平安, 文志林, 王炎, 等. 不同牧草补播模式对荒漠草原植物群落结构及土壤特性的影响. 草业学报, 2025, 34(10): 62－73.

[10] Zhang Y J, Zhou J Q, Yang G W, *et al.* Theory and application of no-tillage reseeding in degraded grasslands. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(16): 1546－1555.
张英俊, 周冀琼, 杨高文, 等. 退化草原植被免耕补播修复理论与实践. 科学通报, 2020, 65(16): 1546－1555.

[11] Wang X, Yu S, Xu D M, *et al.* Effects of different restoration measures on soil carbon and nitrogen and their component fractions in a degraded desert steppe. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(1): 26－35.
王星, 于双, 许冬梅, 等. 不同恢复措施对退化荒漠草原土壤碳氮及其组分特征的影响. 草业学报, 2022, 31(1): 26－35.

[12] Lynch J P. Root phenes for enhanced soil exploration and phosphorus acquisition: Tools for future crops. Plant Physiology, 2011, 156: 1041－1049.

[13] Wang B, Lin X K, Feng Z R, *et al.* Effects of reseeded native forage species on soil water holding capacity and vegetation biomass in a desert steppe. Pratacultural Science, 2023, 40(9): 2247－2256.
王博, 蔺雄奎, 冯占荣, 等. 补播乡土牧草对荒漠草地土壤持水性及植被生物量的影响. 草业科学, 2023, 40(9): 2247－2256.

[14] Dong Y W, Wang B, Lin X K, *et al.* Impacts of reseeding native grass and a legume on soil microbial community structure in the desert steppe of Ningxia. Pratacultural Science, 2024, 41(5): 1099－1111.
董月唯, 王博, 蔺雄奎, 等. 补播乡土禾豆牧草对宁夏荒漠草地土壤微生物群落结构的影响. 草业科学, 2024, 41(5): 1099－1111.

[15] Guo Z N, Tan J G, Sun S X, *et al.* Study on fractal dimension and nutrient characteristics in different grazing intensity. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(12): 3698－3705.
郭振宁, 谭建国, 孙世贤, 等. 不同放牧强度荒漠草原土壤粒径分形维数和养分特征研究. 草地学报, 2024, 32(12): 3698－3705.

[16] Zhang H D, Zhou S L, Li Q, *et al.* Soil particle composition and pore characteristics in the root zone of date palm in the dry zone under different irrigation methods. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(24): 98－105.
张华东, 周少梁, 李侨, 等. 不同灌溉方式下旱区枣树根区土壤颗粒组成和孔隙特征. 农业工程学报, 2024, 40(24): 98－105.

[17] Zhao M Y, Zhao W W, Liu Y X. Comparative analysis of soil particle size distribution and its influence factors in different scales: a case study in the Loess Hilly-gully area. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 4625－4632.
赵明月, 赵文武, 刘源鑫. 不同尺度下土壤粒径分布特征及其影响因子－以黄土丘陵沟壑区为例. 生态学报, 2015, 35(14): 4625－4632.

[18] Ma X C, Jin W H, Tu J Y, *et al.* Impact of shifts among mycorrhizal types on soil aggregate composition and characteristics. Journal of Zhejiang A&F University, 2023, 40(6): 1149－1157.
马行聪, 金文豪, 屠嘉莹, 等. 不同优势菌根类型转变对土壤团聚体组成及性状的影响. 浙江农林大学学报, 2023, 40(6): 1149－1157.

[19] Jiang H X, Zhou Y, Hu K, *et al.* Effects of different grazing times on soil particle composition and fractal dimension in the desert steppe. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(6): 17－28.
姜海鑫, 周瑶, 胡科, 等. 不同放牧时间对荒漠草原土壤颗粒组成及分形维数的影响. 草业学报, 2024, 33(6): 17－28.

[20] Shi J C, Jie D M, Liu L D, *et al*. The preliminary research on the fractal characteristics of *Phragmites* communis phytolith in northeast China. Quaternary Sciences, 2017, 37(6): 1444－1455.
史吉晨, 介冬梅, 刘利丹, 等. 东北地区芦苇植硅体分形特征初步研究. 第四纪研究, 2017, 37(6): 1444－1455.

[21] Yoshihara Y, Tatsuno Y, Miyasaka K, *et al*. Can complementarity in water use help explain diversity-productivity relationships in semi-arid grasslands? Journal of Arid Environments, 2020, 173: 103994.

[22] Bao S D. Soil agricultural chemistry analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2013.
鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2013.

[23] Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Soil fractal characteristics characterized by the weight distribution of particle size. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(20): 1896－1899.
杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征. 科学通报, 1993, 38(20): 1896－1899.

[24] Huang F, Liu J, Wang B, *et al*. The impacts of shrub branch covering on soil respiration in a desert steppe of Ningxia. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(7): 3218－3228.
黄飞, 刘静, 王博, 等. 灌枝覆盖对宁夏荒漠草地土壤呼吸的影响. 生态学报, 2025, 45(7): 3218－3228.

[25] Wang B, Liu J, Li Z G, *et al*. The contributions of root morphological characteristics and soil property to soil infiltration in a reseeded desert steppe. Catena, 2023, 225: 107020.

[26] Cai A D, Zhang W J, Shen X R, *et al*. Carbon sequestration efficiency of different soil particle sizes under long-term fertilization. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(6): 1431－1438.
蔡岸冬, 张文菊, 申小冉, 等. 长期施肥土壤不同粒径颗粒的固碳效率. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1431－1438.

[27] Xu X. The interaction network of "Rhizosphere－bulk－rooting zone" soil microbiota－Taking *Rhododendron lapponicum* in Qilian Mountains as an example. Lanzhou: Northwest Normal University, 2024.
徐笑. "根际－非根际－根围"土壤微型生物互作网络——以祁连山高山杜鹃为例. 兰州: 西北师范大学, 2024.

[28] Lin X K, Schneider R L, Morreale S J, *et al*. The impacts of shrub branch shelter and nitrogen addition on soil microbial activity and plant litter decomposition in a desert steppe. Applied Soil Ecology, 2025, 207: 105956.