DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.03.006
王德富,董凌勃,李澳,等.毛乌素沙地不同植被恢复类型的土壤碳水效应[J].水土保持学报,2024,38(3):101-110,120.
WANG Defu, DONG Lingbo, LI Ao, et al. Soil organic carbon and moisture effects of on different vegetation restoration types in the Mu Us sandy land[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(3):101-110,120.

毛乌素沙地不同植被恢复类型的土壤碳水效应

王德富[1], 董凌勃[1], 李 澳[1], 于志静[1], 邓 蕾[1,2]
(1.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(水土保持研究所)黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100;2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘　要:[**目的**]探讨不同植被恢复类型下土壤有机碳和水分含量特征及其关系,为毛乌素沙地植被恢复类型的选取提供科学依据。[**方法**]以毛乌素沙地自然恢复草地及沙蒿、沙柳、沙蒿×沙柳(灌灌混交)、樟子松、沙柳×樟子松(乔灌混交)为研究对象,并以裸沙地为对照,分析不同植被恢复类型对 0—5.0 m 土层土壤剖面碳、水的影响及其相关性。[**结果**](1)植被恢复增加土壤有机碳含量,沙柳×樟子松、樟子松、草地、沙蒿×沙柳、沙柳、沙蒿依次降低,0—0.2 m 土层显著高于深层,表现为表聚效应;随着土层深度的增加,各植被类型的有机碳含量逐渐降低;沙蒿、沙柳、沙蒿×沙柳在 0.8—2.2 m 土层范围内表现为碳损失。(2)不同植被恢复类型在深层均存在不同程度的水分亏缺,主要集中在 1.0—3.0 m 土层,具体亏缺程度为沙柳×樟子松>樟子松>沙蒿×沙柳>沙柳>草地>沙蒿。(3)根系是影响土壤有机碳含量和水分消耗的主要因素;土壤有机碳含量与土壤含水量在 0—5.0 m 土层范围内负相关。[**结论**]植被固存有机碳以消耗深层土壤水分为代价,沙柳×樟子松固定同等单位量的碳消耗水分最少。因此,从土壤固碳和保水 2 个角度同时考虑,沙柳×樟子松在毛乌素沙地的植被恢复中具有较好的恢复效果。

关键词: 植被恢复;土壤有机碳;土壤水分;根系;毛乌素沙地
中图分类号:S154.3　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1009-2242-(2024)03-0101-10

Soil Organic Carbon and Moisture Effects of Different Vegetation Restoration Types in the Mu Us Sandy Land

WANG Defu[1], DONG Lingbo[1], LI Ao[1], YU Zhijing[1], DENG Lei[1,2]
(1.*College of Soil and Water Conservation Science and Engineering*, *Institute of Soil and Water Conservation*, *Northwest A&F University*, *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*; 2. *Institute of Soil and Water Conservation*, *Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: [**Objective**] This study was aimed to explore the characteristics of soil organic carbon and moisture content under different vegetation restoration types and their relationships, and to provide a scientific basis for the selection of vegetation restoration models in the Mu Us sandy land. [**Methods**] Different vegetation restoration types, including natural restoration of grassland and various plants such as *Artemisia desertorum*, *Salix psammophila*, *A. desertorum S. psammophila* mixed (shrub-shrub mixed), *Pinus sylvestris*, *S. psammophila P. sylvestris* mixed (tree-shrub mixed), in the Mu Us sandy land, were studied. Bare sand was used as the control. The effects and correlations of different vegetation restoration types on carbon and water in the 0—5.0 m soil profile were analyzed. [**Results**] (1) Vegetation restoration increased, with *S. psammophila P. sylvestris* mixed, *P. sylvestris*, Grassland, *A. desertorum S. psammophila* mixed, *A. desertorum S. psammophila* mixed, and *A. desertorum* showing decreasing trends, with significant accumulation effects observed within the 0—0.2 m soil depth. As soil depth increased, the organic

收稿日期:2023-08-17　　**修回日期:**2023-11-16　　**录用日期:**2023-12-27　　**网络首发日期(**www.cnki.net**):**2024-04-08
资助项目:国家自然科学基金联合基金重点项目(U2243225)
第一作者:王德富(2000—),男,湖南衡阳人,在读硕士研究生,主要是从事植被恢复的生态效应研究。E-mail:wdf20002020@163.com
通信作者:邓蕾(1986—),男,河南驻马店人,研究员,博士,博士生导师,主要从事生态恢复和水土保持碳汇研究。E-mail:leideng@ms.iswc.ac.cn

carbon content of all vegetation types gradually decreased. Within the depth range of 0.8—2.2 cm, *A. desertorum*, *S. psammophila*, and *A. desertorum S. psammophila* mixed exhibited carbon loss. (2) Different vegetation restoration types showed varying degrees of soil moisture deficit in deep soil layers, primarily concentrated at 1—3.0 m soil layer, with *S. psammophila P. sylvestris* mixed showing the most severe deficit, followed by *P. sylvestris*, *A. desertorum S. psammophila*, *S. psammophila*, Grassland, *A. desertorum*. (3) Roots were identified as the main factors influencing soil organic carbon content and moisture consumption. Soil organic carbon content exhibited a negative correlation with soil moisture within the 0—5.0 m soil depth range. [**Conclusion**] Vegetation carbon storage was achieved at the expense of utilizing deep soil moisture, with *S. psammophila P. sylvestris* mixed exhibiting the lowest water consumption per unit of fixed carbon. The study suggests that *S. psammophila P. sylvestris* mixed exhibits favorable effects in vegetation restoration from the perspective of soil carbon retention and water retention in the Mu Us sandy land.

Keywords: vegetation restoration; soil organic carbon; soil moisture; root system; the Mu Us Sandy Land

Received: 2023-08-17 **Revised**: 2023-11-16 **Accepted**: 2023-12-27 **Online**(www.cnki.net): 2024-04-08

随着全球气候变化的加剧和人类活动的扩张,荒漠化问题日益凸显,已成为全球关注的焦点[1]。荒漠化导致一系列的生态环境问题,如土壤质地粗化、土壤表层碳损失、水土流失等[2]。由于显著的土壤碳固存与水源涵养能力,植被恢复已被认为是阻止土地退化最有效的措施之一[3]。然而,生态脆弱区的植被恢复也可能存在负面影响,如增加有机碳但造成土壤水分减少,造成生态环境进一步恶化。因此,有必要研究荒漠化地区不同植被类型对土壤有机碳和水分的影响。

土壤有机碳(soil organic carbon,SOC)是评价植被恢复成效的一个重要参数[3]。不同植被恢复类型的土壤有机碳固存能力存在差异。陈闻等[4]研究表明,毛乌素沙地0—0.4 m土壤的固碳能力为樟子松>草地>沙蒿。然而,已有研究[5]表明,在毛乌素沙地上进行植被恢复,0—0.4 m土层的自然恢复草地的有机碳含量高于樟子松和柠条。由此可见,不同植被恢复类型的土壤表层碳固存能力仍存在争议。此外,深层土壤有机碳对植被恢复的响应仍不清楚。有研究[6]表明,植被恢复显著增加深层土壤的有机碳含量。在降水量较少的区域,营养物质从表层到深层的迁移率较低,深层土壤碳源主要由根系分泌物及其死亡组织贡献[7]。然而,植被恢复后地下根系的增加并不总是促进土壤有机碳的积累,在植被恢复过程中深层土壤有机碳也有损失[8]。研究[7]表明,根系分泌的草酸可通过释放受矿物质保护的有机化合物导致土壤碳的损失。冯棋等[9]在黄土高原北部发现,刺槐、自然恢复草地、柠条1.0—3.0 m土层相较于恢复前的农田的土壤固碳量为负,而3.0—5.0 m土层表现为碳固存。目前,有关植被恢复对土壤有机碳的影响主要集中在表层土壤,对深层土壤固碳能力研究较少,且不同植被类型的固碳能力也存在争议,因此,有必要展开进一步的研究。土壤水分(soil moisture,SM)是干旱半干旱区植被恢复与生态建设的限制性因子[10]。随着植被恢复的进行,植被恢复对土壤水分的影响受到越来越多的关注。研究[11]发现,毛乌素沙地的天然草地在0.8 m处存在水分消耗,人工恢复植被(如樟子松、紫穗槐、柠条)在0—1.0 m土层范围内储水量不足,其中,紫穗槐最低[12]。也有研究[2]指出,樟子松和柠条在0—5.0 m层较裸沙地储存土壤水分,表明植被类型对土壤水分的影响存在显著差异。通常来说,表层土壤水分消耗取决于土壤蒸发,影响因素包括植被盖度、凋落物量和土壤质地等[11]。深层土壤水分是沙区植被的重要水源,干旱半干旱区植被根系发达且分布较深,深层水分消耗大[13]。土壤含水量与根系生物量的显著负相关已得到大量研究[14]的证明。此外,植被恢复过程中深层土壤的水分利用与固碳为特殊的生态过程。在降水量稀少的干旱半干旱区,土壤固碳以消耗土壤水分为前提,土壤有机碳与土壤水分表现为显著负相关[15],但也有少数研究[9]发现为正相关,主要是由根系在土壤剖面的固碳和耗水所介导的[14]。因此,不合理的植被恢复造成碳水关系失调,影响生态系统的稳定性,从而进一步加剧土壤荒漠化[13]。目前,多集中于植被恢复后单一的生态系统功能提升的探讨,关于土壤水分与有机碳对不同植被恢复类型的响应及二者之间的关系的研究较少。

近20年,一系列大规模的植被恢复措施有效地促进毛乌素沙地土壤有机碳库的提高[3]。土壤水分消耗是植被固碳的必要条件,不合理的恢复类型加速土壤干旱,导致固沙植被出现衰退、死亡等现象,威胁到沙

区生态恢复的可持续性[15]。因此，在全球气候变化加剧及人类活动不断增强的背景下，认识生态脆弱区植被恢复的土壤碳、水关系显得尤为重要。以毛乌素沙地自然恢复草地及典型人工林（沙蒿、沙柳、沙蒿×沙柳、樟子松、沙柳×樟子松）为研究对象，以裸沙地为对照，对比分析深剖面（0－5.0 m）不同植被恢复类型对土壤有机碳和水分含量，探讨植被恢复对土壤固碳与水分关系的影响，确定该区域最佳的植被恢复类型，为毛乌素沙地植被建设和可持续发展提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于陕西省神木市西沟（38°36′N，110°10′E），地处毛乌素沙地东南，平均海拔为 1 000～1 350 m。该区为温带大陆性季风气候，年平均降水量 250～400 mm，集中在 7－9 月，年平均气温 6.0～8.5 ℃。土壤类型为非地带性的风沙土，结构疏松，营养成分差，含沙量高，无明显分层特征。主要植被恢复类型有自然恢复草地、人工沙蒿（*A. ordosica*）、沙柳（*S. psammophila*）、沙蒿×沙柳、樟子松（*P. sylvestris*）、沙柳×樟子松，常见草本有沙鞭（*Psammochloa villosa*）、沙蓬（*Agriophyllum squarrosum*）、阿尔泰狗娃花（*Aster altaicus*）、地锦草（*Euphorbia humifusa*）、画眉草（*Eragrostis pilosa*）、刺藜（*Teloxys aristata*）等。

1.2　研究方法

1.2.1　*试验设计与样品采集*　2022 年 9 月，选取该区域立地条件相似，人为干扰较少的自然草地及人工恢复的沙蒿、沙柳、沙蒿×沙柳、樟子松、沙柳×樟子松，其恢复年限均为 18 年，以裸沙地为对照，进行土壤和植物样品采集。在每个沙地不同植被类型及裸沙地上选取 3 块样地，共 21 块样地，每块样地设置为 20 m×20 m，沿着对角线设置 3 个 1 m×1 m 的样方。在每个样方内，调查物种组成和植株高度、多度、盖度及胸径、冠幅，采用直接收获法得到地表层生物量，去除地上的鲜活植物后收集枯落物（表 1）。用根钻（内径 9 cm）采集 0—5.0 m 土层包含根系的土样，其中，0—1.0 m 土层每间隔 0.2 m 取样 1 次，1.0—5.0 m 土层每间隔 0.4 m 取样 1 次，共计 15 个土层，每个样方沿对角线取 3 钻，混合后过 2 mm 筛来获取根系。土壤样品一部分自然风干，测定理化性质；另一部分装入铝盒后封装，测定土壤含水量。在取样点旁挖取土壤剖面，用环刀（100 cm^3）采集 0—1.0 m 土层的原状土（间隔0.2 m），用于土壤容重测定，每个样地 3 个重复。

1.2.2　*测定项目与方法*　土壤有机碳采用 $K_2Cr_2O_7$－H_2SO_4 氧化法[16]测定；土壤含水量采用烘干法（105～110 ℃，24 h）测定，以湿土和烘干土的质量差计算，以百分比（%）表示；土壤 pH 采用 PHS－3G 数字 pH 计测定（水土比 5∶1）；采用 Mastersizer 2000 激光粒度仪测定土壤机械组成。乔灌层生物量采用植物生物量估测模型[17-19]计算；0—1.0 m 土层土壤容重采用环刀法测量，由于野外传统的环刀法采样实测工作量大，1.0—5.0 m 土层土壤容重通过土壤容重传递函数模型（Pedotrafer function）[20]来预测和估算。

表 1　采样点基本信息

Table 1　The basic information of the sampling sites

样地类型	草地	沙蒿	沙柳	沙蒿×沙柳	樟子松	沙柳×樟子松	裸沙地
海拔/m	1 240	1 223	1 250	1 245	1 220	1 222	1 223
坡位	沙丘中上	沙丘中上	沙丘中上	沙丘中上	沙丘中上	沙丘中上	沙丘中上
株高/m	0.29	1.10	3.50	0.90/0.70	6.50	3.30/5.50	－
覆盖度/%	73	30	40	55	70	80	
种植密度/(m×m)	－	1.0×1.5	2.0×3.0	1.5×1.5	3.0×3.0	2.0×3.0	－
恢复年限/a	18	18	18	18	18	18	
优势草种	沙鞭、刺藜	沙鞭	沙蓬、刺藜	沙鞭、刺藜	小花鬼针草	阿尔泰狗娃花	－
乔灌层生物量/($kg \cdot m^{-2}$)	－	3.77±0.31c	29.10±3.59a	16.44±1.76b	35.13±1.39a	14.55±1.80b	－
地表层生物量/($g \cdot m^{-2}$)	222.57±38.64b	43.31±0.66c	81.10±5.30bc	86.28±14.90bc	111.39±21.22b	94.75±7.17bc	－
凋落物生物量/($g \cdot m^{-2}$)	245.69±15.72b	236.15±54.94b	511.74±32.41a	337.57±37.67b	303.45±58.66b	313.75±20.39b	－
容重/($g \cdot cm^{-3}$)	1.60±0.02b	1.65±0.03ab	1.65±0.01ab	1.67±0.01ab	1.63±0.01ab	1.64±0.03ab	1.68±0.02a
黏粒/%	0.23±0.03b	0.01±0.01b	1.79±0.55a	1.79±0.55a	1.28±0.34a	0.22±0.08b	－
粉粒/%	1.54±0.60bc	0.14±0.06c	7.25±1.75a	1.52±1.19bc	3.47±0.83b	1.10±0.24bc	0.41±0.04c
砂粒/%	98.17±0.66ab	99.85±0.07a	90.96±2.30c	98.29±1.37ab	95.26±1.08b	98.68±0.31a	99.59±0.04a

注：容重、黏粒、粉粒、砂粒在 0—5.0 m 土层间的差异不显著，故取平均值；同行不同小写字母表示不同样地类型间差异显著（$p<0.05$）。

1.2.3 关键指标计算 不同植被恢复类型的土壤有机碳固存效应[9]（soil carbon sequestration effect，SOCSE）、土壤水分亏缺度[15]（soil moisture deficit effect，SMDE）及土壤水分利用的固碳效应[21]（carbon sequestration effect of soil moisture use，θ）计算公式为：

$$SOCSE_{m,n}=\frac{SOC_{m,n}-SOC_{0,n}}{SOC_{0,n}} \quad (1)$$

$$SMDE_{m,n}=\frac{SMC_{m,n}-SMC_{0,n}}{SMC_{0,n}} \quad (2)$$

$$\theta=\frac{SMDE_{m,n}}{SOCSE_{m,n}} \quad (3)$$

式中：$SOC_{m,n}$ 和 $SOC_{0,n}$ 分别为第 m 的植被恢复类型和对照的第 n 个土层的 SOC（g/kg）；$SMC_{m,n}$ 和 $SMC_{0,n}$ 分别为第 m 的植被恢复类型和对照的第 n 个土层的 SMC（%）。

1.2.4 数据统计及分析 使用 Microsoft Excel 2021 和 SPSS 27.0 软件对试验数据进行整理分析。采用单因素方差分析法（One－way ANOVA）和最小差异显著法（LSD）对不同处理各指标进行统计分析（$p<0.05$）；采用双因素方差分析法（Two－way ANOVA）分析植被类型与土层深度对 SOC 和 SMC 的影响；采用线性回归模型分析不同样地的 SOC 和 SMC 间的关系（$p<0.05$）；采用 Pearson 相关性对不同样地的土壤碳、水的影响因子之间进行分析。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳对植被恢复的响应

植被类型和土层深度以及二者交互作用对 SOC 有显著影响，其中土层深度对 SOC 的影响最大（表 2，$p<0.01$）。SOC 在 0—5.0 m 土层范围内随着植被类型和土层深度的变化而变化（图 1a）。0—0.2 m 土层土壤 SOC 最高，草地、沙蒿、沙柳、沙蒿×沙柳、樟子松、沙柳×樟子松、裸沙地土壤 SOC 分别为 5.0，2.7，3.3，3.5，6.1，9.8，1.0 g/kg，但随着土层的加深，SOC 呈普遍下降趋势，且变化幅度越来越小，各土层间越来越接近。在 0.6 m 土层以下，沙蒿、沙柳以及沙蒿×沙柳的 SOC 与裸沙地接近，总体上不超过 1.0 g/kg，而草地、樟子松、沙柳×樟子松各土层的 SOC 整体上高于 1.0 g/kg。

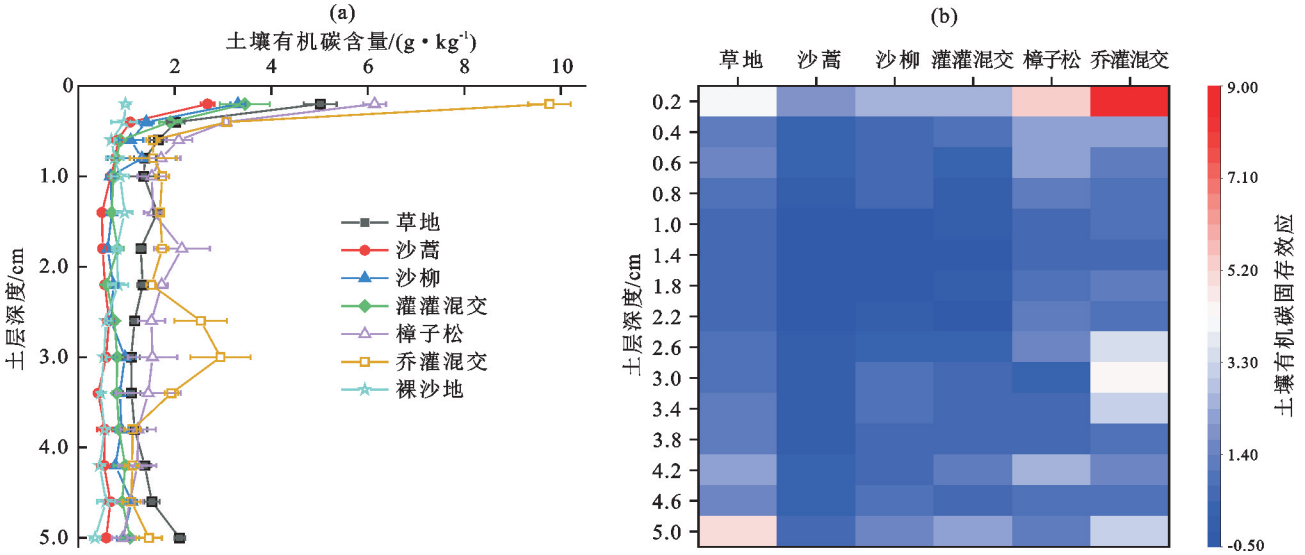
SOCSE 与 SOC 有着相似的变化趋势（图 1b），0—0.2 m 土层 SOCSE 最大，表现为沙柳×樟子松＞樟子松＞草地＞沙蒿×沙柳＞沙柳＞沙蒿，但随着土层深度增加呈下降趋势。在整个剖面内，沙柳×樟子松、樟子松以及草地高于相应土层的沙蒿、沙柳和沙蒿×沙柳，且 3 种灌木的 SOCSE 相对较弱且接近。在 0.8—2.2 m 土层，灌木相较于恢复前的裸沙地发生碳损失，沙蒿、沙柳、沙蒿×沙柳的平均碳损失效应分别为－0.35，－0.22，－0.17。

表 2 植被类型与土层深度对土壤有机碳含量和土壤含水量影响的双因素方差分析

Table 2 Two-way ANOVA summary of the effects of vegetation type and soil depth on soil moisture content and soil organic carbon content

变化的来源/因素	植被类型		土层深度		植被类型×土层深度	
	F	η^2	F	η^2	F	η^2
土壤有机碳含量	78.628**	0.686	90.997**	0.876	6.132**	0.705
土壤含水量	8.129**	0.184	4.023**	0.238	2.094**	0.449
根生物量密度	8.817**	0.197	44.775**	0.777	1.710**	0.399

注：* 表示 $p<0.05$；** 表示 $p<0.01$。下同。

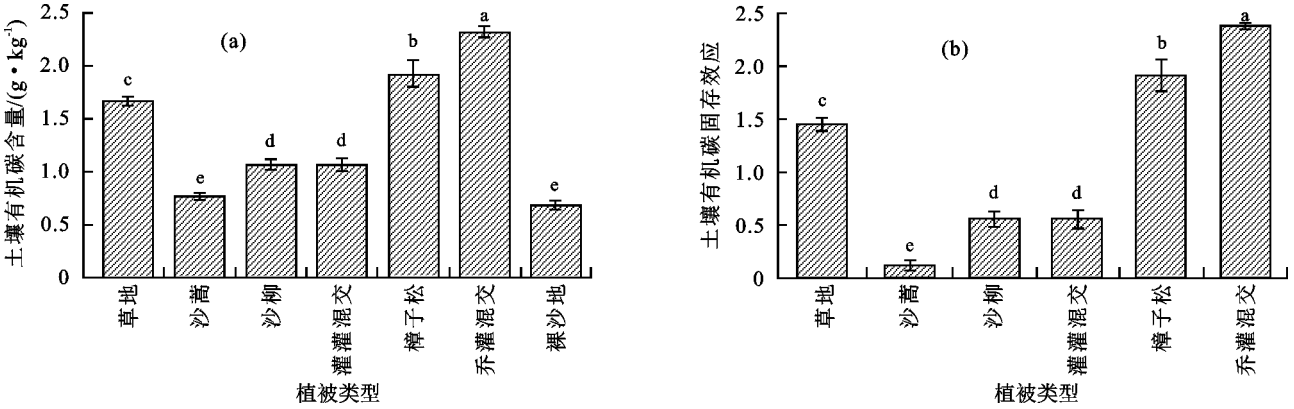


注：灌灌混交为沙蒿×沙柳；乔灌混交为沙柳×樟子松。下同。

图 1 不同植被恢复类型 0—5.0 m 剖面土壤有机碳分布及固存效应

Fig. 1 Soil organic carbon distribution and sequestration effect in 0—5.0 m profiles of different vegetation restoration types

不同样地 0—0.5 m 土层土壤平均 SOC 为 0.7～2.3 g/kg(图 2a)，沙柳×樟子松(2.3 g/kg)最高，其次是樟子松(1.9 g/kg)、草地(1.7 g/kg)、沙蒿×沙柳(1.1 g/kg)、沙柳(1.1 g/kg)、沙蒿(0.8 g/kg)和裸沙地(0.7 g/kg)，沙蒿与裸沙地间 SOC 差异不显著($p>0.05$)，沙柳与沙蒿×沙柳差异不显著，其他处理间 SOC 均存在显著差异($p<0.05$)。总体而言，沙柳×樟子松(2.38)的 SOCSE 最强(图 2b)，其次是樟子松(1.91)、草地(1.45)、沙蒿×沙柳(0.55)、沙柳(0.56)和沙蒿(0.12)，沙柳与沙蒿×沙柳间 SOCSE 无显著差异($p>0.05$)，其他不同植被类型间 SOCSE 差异显著($p<0.05$)。



注：不同小写字母表示不同样地类型间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 2　不同植被恢复类型平均土壤有机碳含量及土壤有机碳固存效应

Fig. 2　Average soil organic carbon content and soil carbon sequestration effect of different vegetation restoration types

2.2　土壤水分对植被恢复类型的响应

SMC 受到植被类型、土层深度以及二者交互作用的影响显著，其中，交互作用对 SMC 有较强的影响(表 2，$p<0.01$)。在整个剖面，草地、沙蒿、沙柳、沙蒿×沙柳、樟子松、沙柳×樟子松、裸沙地的 SMC 分别为 4.2%～2.4%，1.3%～5.1%，1.4%～7.7%，0.8%～3.6%，1.2%～4.4%，1.3%～3.6%，0.9%～4.3%(图 3a)。除樟子松外，其他植被类型 SMC 随着土层加深而增加。在浅层土壤，各植被类型的 SMC 差异大，相比裸沙地，各植被类型在浅层不同深度储存一定的水分，樟子松和草地在 0—1.0 m 土层的平均储水效应分别为 0.94 和 0.48，沙柳、沙柳×樟子松、沙蒿在 0—0.2 m 土层的平均储水效应分别为0.45，0.37，0.32(图 3b)。当到达一定土层深度，又表现出水分亏缺，沙柳×樟子松在 0.2—0.6，1.0—3.8 m 土层的平均 SMDE 为 −0.66，樟子松在 1.0—3.8 m 土层的平均 SMDE 为−0.38，沙蒿×沙柳在 0—3.4 m 土层的平均 SMDE 为−0.25，沙柳在 0.2—2.6 m 土层的平均 SMDE 为 −0.21，草地在 1.0—3.0 m 土层的平均 SMDE 为 −0.18，沙蒿在 0.2—2.6 m 土层的平均 SMDE 为 −0.16。随着土层的进一步下降，各植被类型又相较于恢复前的裸沙地储存一定量的水分(图 3b)。

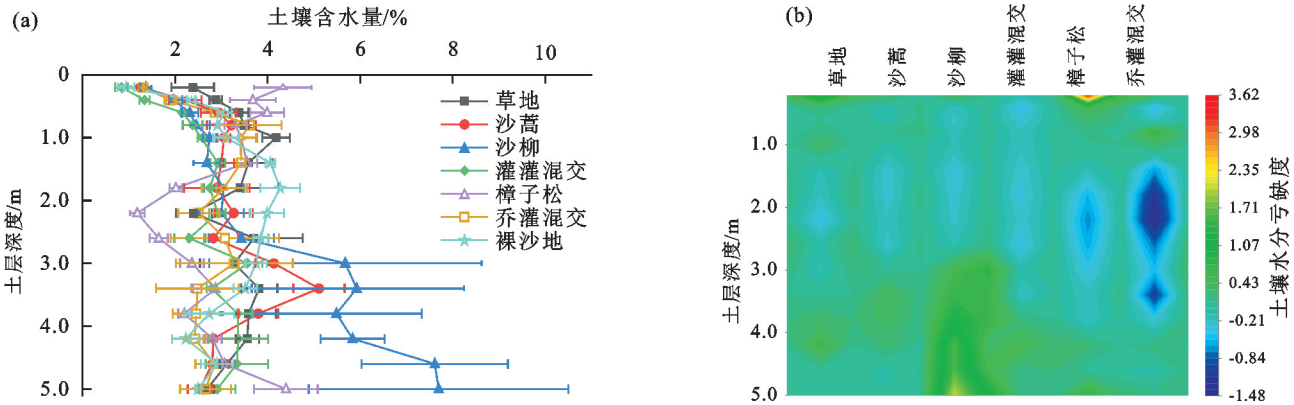


图 3　不同植被恢复类型 0—5.0 m 剖面土壤含水量分布及亏缺度

Fig. 3　Soil moisture content distribution and deficit effect in 0—5.0 m profiles of different vegetation restoration types

各样地 0—5.0 m 土层土壤平均 SMC 为 2.5%～4.1%(图 4a)，除草地(3.3%)外，沙柳(4.1%)与沙蒿(3.1%)、沙蒿×沙柳(2.6%)、樟子松(2.5%)、沙柳×樟子松(2.8%)、裸沙地(3.1%)间差异显著($p<0.05$)，沙蒿、沙蒿×沙柳、樟子松、沙柳×樟子松的平均 SMC 低于裸沙地，而草地和沙柳的平均 SMC 均

高于裸沙地。对于 0—5.0 m 土层平均 SMDE(图 4b),除草地(0.07)外,沙柳(0.32)分别与沙蒿(−0.01)、沙蒿×沙柳(−0.15)、樟子松(−0.03)、沙柳×樟子松(−0.11)存在显著差异($p<0.05$)。平均 SMDE 表现为沙蒿×沙柳>沙柳×樟子松>樟子松>沙蒿,而沙柳和草地的 SMC 高于裸沙地,说明 2 种植被类型总体上储存一定量的土壤水分,具体为沙柳>草地。

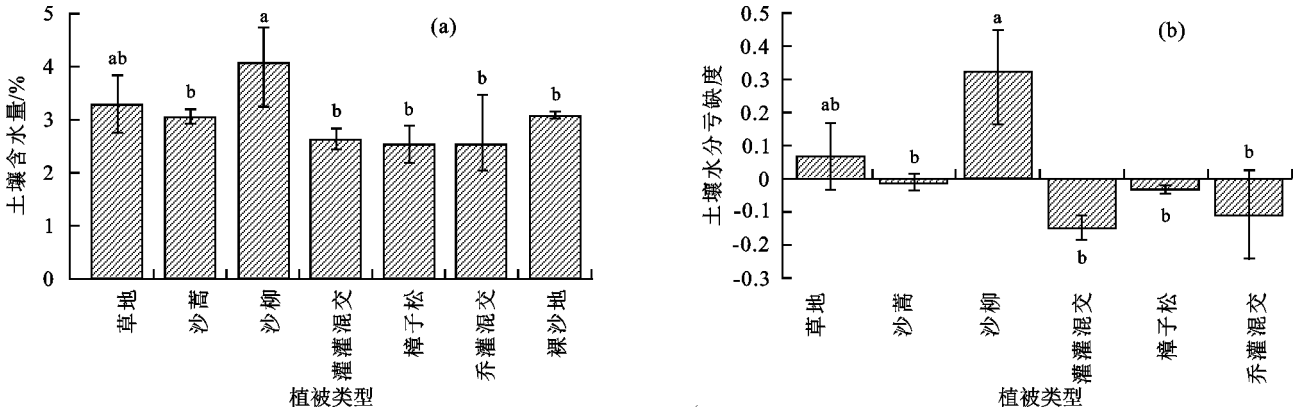
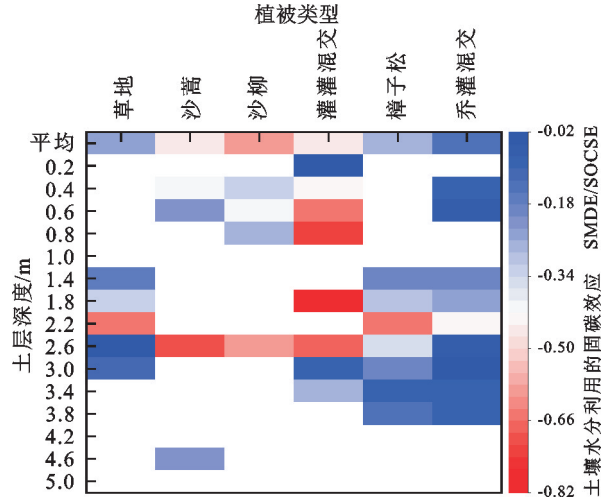


图 4 不同植被恢复类型平均土壤含水量及土壤水分亏缺度

Fig. 4 Average soil moisture content and soil moisture deficit effect of different vegetation restoration types

2.3 土壤水分利用的固碳效应(SMDE/SOCSE)

为探索最佳的植被恢复类型,利用 SMDE 和 SOCSE 的比值分析不同植被类型下两者的转化效率(图 5)。各植被类型在 0—5.0 m 土层剖面内均存在土壤水分利用的固碳效应,草地、沙蒿×沙柳、樟子松和沙柳×樟子松主要发生在 1.0 m 以下的深层土壤,沙蒿、沙柳主要发生在 0.8 m 以上的浅层土壤。沙柳×樟子松的效应值在剖面分布较广但较小。总体来说,在整个剖面,沙柳×樟子松、草地、樟子松、沙蒿×沙柳、沙蒿、沙柳 SMDE/SOCSE 分别为−0.15,−0.26,−0.28,−0.46,−0.47,−0.59。



注:空白区域无实际意义,仅当 SMDE 为负和 SOCSE 为正时,存在消耗土壤水分固存土壤有机碳的效应。

图 5 不同植被恢复类型 0—5.0 m 剖面土壤水分利用的固碳效应

Fig. 5 Carbon sequestration effect of soil moisture use in 0—5.0 m profile of different vegetation restoration types

2.4 根生物量密度在剖面的垂直分布

植被类型和土层深度以及二者交互作用对根生物量密度(root biomass density,RBD)有显著影响,土壤深度的影响较强(表 2,$p<0.01$)。根系多集中在浅层,且在 0—0.2 m 层,各植被类型的 RBD 存在较大差异(图 6),表现为沙柳(4 126.6 g/m³)>沙柳×樟子松(3 368 g/m³)>樟子松(2 894.8 g/m³)>沙蒿×沙柳(1 857.7 g/m³)>草地(1 601.2 g/m³)>沙蒿(1 194.5 g/m³)。随着土层深度的增加,不同植被类型的 RBD 差异逐渐减小,而沙柳×樟子松在各土层高于其他类型,特别是在 1.8 m 土层以下。各植被类型 RBD 在剖面内虽然有所波动,但整体上呈下降趋势。

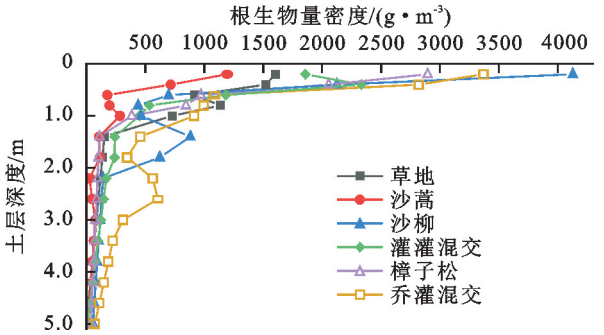


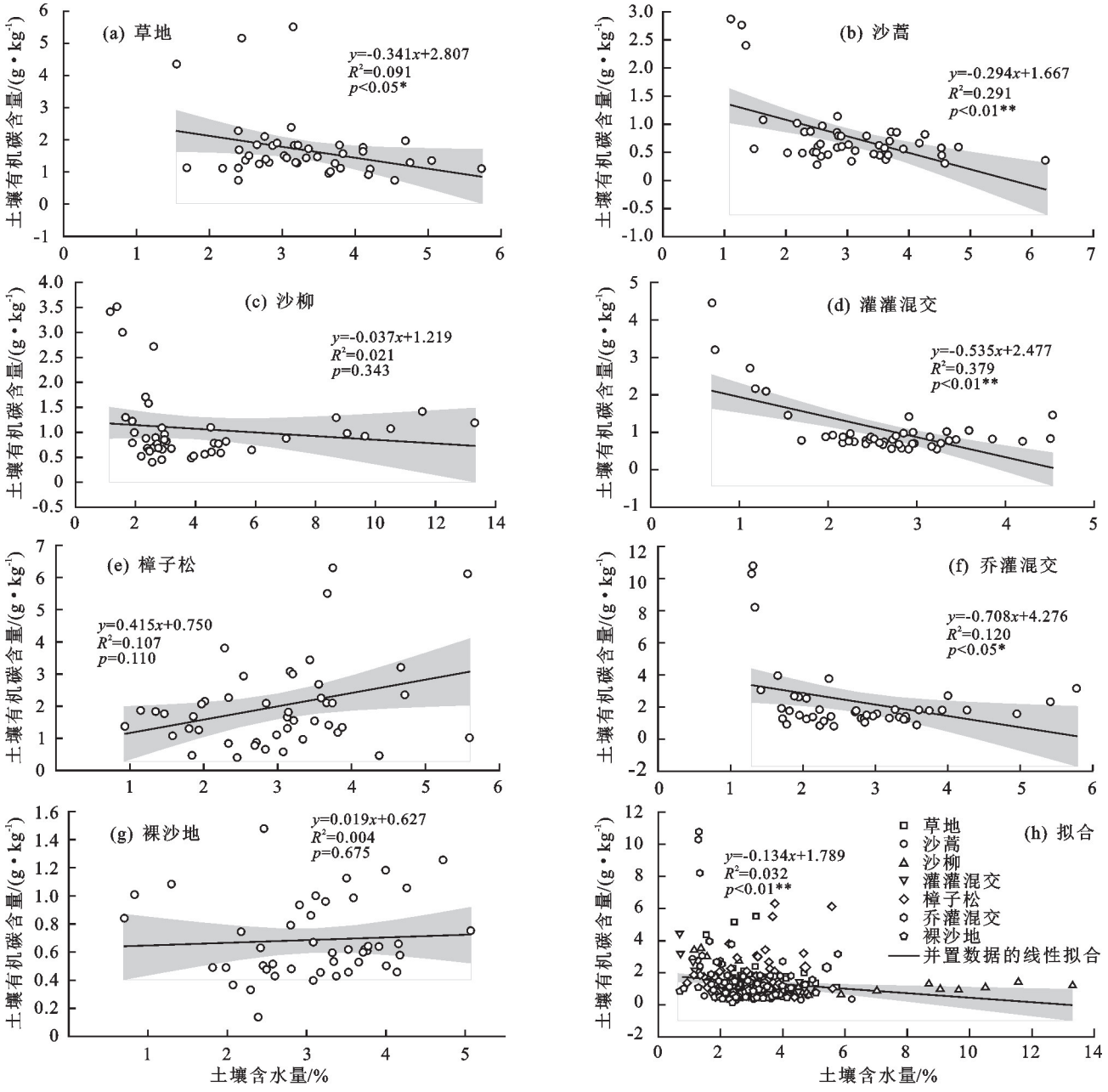
图 6 不同植被恢复类型 0—5.0 m 剖面的根生物量密度分布

Fig. 6 Distribution of root biomass density in 0—5.0 m profile of different vegetation restoration types

2.5 土壤有机碳含量、土壤含水量、土壤水分利用的固碳效应与各影响因子之间的关系

在 0—5.0 m 土层内,对于草地、沙蒿、沙柳、沙蒿×沙柳、沙柳×樟子松、裸沙地及整个沙地植被恢复生态系统而言,各自的 SOC 和 SMC 呈负相关(图 7,$p<0.05$)。其中,草地的 SOC 和 SMC 相关性显著

($p<0.05$)，沙蒿的 SOC 和 SMC 相关性极显著，沙柳的 SOC 和 SMC 相关性不显著，沙蒿×沙柳的 SOC 和 SMC 相关性极显著($p<0.01$)，樟子松的 SOC 和 SMC 相关性不显著，沙柳×樟子松的 SOC 和 SMC 相关性显著($p<0.05$)，裸沙地的 SOC 和 SMC 相关性不显著($p>0.05$)。总体来说，在裸露的沙地上进行植被恢复后，SOC 和 SMC 存在极显著的负相关关系($p<0.01$)。



注：*、**分别表示 $p<0.05$，$p<0.01$。

图 7　土壤有机碳含量与土壤含水量的回归分析

Fig. 7　The regression analysis between soil organic carbon content and soil moisture content

在整个土壤剖面中，各植被类型的 SOC 与 RBD 均呈正相关，SMC 与 RBD 均呈负相关(表 3)；容重与沙柳的 SOC 呈正相关，与其他植被呈负相关，与草地和沙蒿×沙柳的 SMC 呈正相关，与其他植被呈负相关；砂粒与 SOC 均存在负相关；乔灌层生物量、凋落物生物量和 SOC 及 SMC 的相关性不显著；地表层生物量与沙蒿、沙柳、沙蒿×沙柳、樟子松、沙柳×樟子松的 SMC 均存在负相关；对于裸沙地，粉粒、砂粒与 SOC 和 SMC 的相关性显著。而对于整个沙地植被恢复生态系统，SOC 主要与容重呈极显著负相关，与表层生物量和 RBD 呈极显著正相关，SMC 主要与黏粒、粉粒、砂粒、凋落物生物量呈极显著正相关，与 RBD 呈极显著负相关。与土壤水分利用的固碳效应呈显著相关的主要是砂粒和生物量(表 3)。

表 3 0—5.0 m 土层中 SOC、SMC、θ 与影响因子的皮尔逊相关性

Table 3 The Pearson correlation between SOC, SMC, θ and influencing factors in the soil layer of 0—5.0 m

样地类型	土壤碳	容重	黏粒	粉粒	砂粒	乔灌层生物量	地表层生物量	凋落物生物量	根生物量密度
草地	SOC	−0.592*	0.006	0.196	−0.162	−	0.071	−0.074	0.468
	SMC	0.328	0.267	0.306*	−0.309*	−	0.889	0.946	−0.604**
	θ	0.271	−0.097	0.237	−0.167	−	0.385*	0.390*	−0.175
沙蒿	SOC	−0.358	−0.065	0.313*	−0.282	−0.928	−0.990	0.825	0.763**
	SMC	−0.771**	0.010	−0.121	0.111	−0.876	−1.000*	0.887	−0.521**
	θ	0.408**	0.193	−0.353	0.353	0.286	0.400	−0.417	−0.287
沙柳	SOC	0.162	−0.014	0.007	−0.003	−0.976	−0.277	−0.553	0.585**
	SMC	−0.160	0.880**	0.867**	−0.872**	−0.635	−0.983	−0.993	−0.664**
	θ	0.159	−0.529	−0.523	0.585*	−0.165	0.225	0.107	0.143
沙蒿×沙柳	SOC	−0.365	0.067	0.084	−0.082	0.322	0.090	0.860	0.632**
	SMC	0.300	0.074	0.052	−0.055	−0.828	−0.673	−0.994	−0.736**
	θ	0.320	0.160	0.378	−0.382	−0.212	0.143	0.270	−0.132
樟子松	SOC	−0.674**	0.146	0.108	−0.081	−0.345	0.041	−0.285	0.717**
	SMC	−0.454	0.130	0.158	−0.111	0.970	−0.998*	0.984	−0.132
	θ	−0.159	0.172	0.060	−0.078	0.376	−0.347	0.373	−0.246
沙柳×樟子松	SOC	−0.574*	0.298*	0.509*	−0.490*	0.595	−0.825	0.967	0.605**
	SMC	−0.427	−0.042	−0.246	0.216	0.984	−1.000**	0.939	−0.242
	θ	−0.091	−0.098	−0.163	0.159	0.195	−0.157	−0.077	−0.167
沙地植被恢复生态系统	SOC	−0.281**	0.044	0.022	−0.015	0.072	0.171**	−0.072	0.588**
	SMC	−0.071	0.640**	0.624**	0.640**	0.070	0.035	0.172**	−0.219**
	θ	−0.045	0.043	−0.003	−0.009	−0.124	−0.049	0.190**	0.029
裸沙地	SOC	0.250	−−	0.336*	−0.336*	−	−	−	−
	SMC	−0.604*	−−	0.387**	−0.387**	−	−	−	−

3 讨 论

3.1 植被恢复对土壤有机碳的影响

植被恢复显著增加 0—0.2 m 土层土壤有机碳含量，随着土层的加深，植被恢复对土壤碳含量的增加能力逐渐减小(图 1)。主要归因于凋落物和根系在剖面上的分布差异，凋落物和根系均是土壤有机碳的主要来源[3]。首先，地表的凋落物难以输送到底土，导致凋落物输入的碳很难进入深层土壤。此外，各植被类型的表层根系生物量均高于底层，且均随着土层的加深逐渐减少，造成根系输入的碳也随着土层的加深而减少，导致随着土层的加深，土壤有机碳含量降低。土壤有机碳与根生物量密度显著正相关也证实此观点。此外，沙柳×樟子松在 2.2—3.4 m 土层的土壤有机碳含量局部增大，与根系在此处突变一致，再次证实土壤有机碳含量与根生物量密度的密切关系(表 3，$p<0.01$)。因此，植被恢复对表层土壤有机碳的增加能力高于底层。

地下根系的增加并不总是促进土壤有机碳的积累。在本研究中，沙蒿、沙柳、沙蒿×沙柳在 0.8—2.2 m 土层处相较于裸沙地出现不同程度的碳损失，可能是灌木根系分泌物(如草酸)通过释放矿物保护的有机化合物而导致碳损失[8]。此外，不稳定碳源的输入刺激土壤微生物的活动，从而增强土壤有机碳的矿化，导致碳损失[22]。各植被类型土壤有机碳含量并不是完全随着土层深度增加而减小的，可能是因为该区域土壤砂粒含量高达 95%以上，质地较粗，水分容易向深层渗透，有利于上层碳的淋溶，导致下层局部的碳聚集。整个剖面的平均有机碳含量表现为沙柳×樟子松＞樟子松＞草地＞沙蒿×沙柳＞沙柳＞沙蒿，主要是不同植被类型凋落物生物量、地表层和乔灌层生物量以及根系输入量的差异导致的。乔木拥有发达的根系和复杂的凋落物，可持久地向土壤输入有机碳，而草地根系较浅且密度小，凋落物易分解，有机碳输入不如乔木，灌木次之。混交林的有机碳含量更高，是因为混交林较纯林根系发达，乔木较灌木根系发达，表层凋落物复杂较多，有机物输入的增多。

3.2 植被恢复对土壤水分的影响

毛乌素沙地地上的土壤水分主要以降水为补充，砂质土壤具有较高的透水性，且裸露沙地的土壤水分不受植被的影响[2]，主要受到土壤机械组成(粉粒、砂粒)和容重的显著影响。植被生长的需水能力因植被类型而异，主要取决于植被的地上生物量、根系分布，导致植被恢复后不同恢复类型的土壤水分状况不同。不同植被类型的表层土壤水分表现出显著差异，主要

受到植物蒸腾和土壤蒸发 2 个过程的影响[9]。与裸沙地相比，植被恢复增加 0—1.0 m 土层土壤含水量，是因为植被恢复增加地表的枯落物覆盖，减少土壤蒸发。樟子松和草地 0—1.0 m 土层土壤含水量明显高于其他植被类型，是因为较高的凋落物和地上生物量，减少土壤的蒸发，保存一定量的土壤水分。然而，沙蒿、沙柳、沙蒿×沙柳、沙柳×樟子松的林下的覆盖度较低，土壤蒸发比樟子松和草地严重，不利于水分的储存。在 1.0—3.8 m 土层范围内，不同植被类型的土壤含水量存在低于裸沙地的现象，证明植被恢复后，深层土壤出现严重的水分消耗。刘新春等[14]研究表明，晋西北的人工恢复导致土壤深层(0.7—5.0 m)存在水分亏缺，与本研究结果类似。

深层土壤水分的消耗主要取决于根系，土壤水分与根生物量密度存在显著的负相关。本研究的深层水分亏缺表现为沙柳×樟子松＞樟子松＞沙蒿×沙柳＞沙柳＞草地＞沙蒿。毛乌素沙地的乔木根系相较灌木和草地发达且分布较深，导致乔木吸收更多且更深的土壤水分维持自身的生长，而灌木和草地水分消耗主要集中的土壤浅层。混交林的深层水分亏缺大于相应的纯林，主要是混交林比纯林的根系发达。沙区的蒸发量远大于降水量，降水是该区域地表水唯一的补充来源，而且地下水位较深，深层水分得不到有效的补给。植被需要通过根系消耗大量的土壤水分维持自身的生理活动，深层根系吸收主要调节深层水分状态，从而加速土壤干旱[13]。

3.3　土壤固碳和水分消耗与植被恢复的关系

在中国北方的广大沙区，植被恢复对土壤固碳能力的提升与土壤水分维持有着显著的关系[9]。在 0—5.0 m 土层范围内，草地、沙蒿、沙柳、沙蒿×沙柳、沙柳×樟子松、裸沙地及整个沙地植被恢复生态系统，土壤有机碳含量与土壤含水量间存在负相关(图 7)，与 ZHANG 等[23]在黄土高原北部长期自然恢复演替的研究结果相似，0—2.0 m 的土壤水分储存与土壤有机碳储存呈负相关。在土壤水分发生亏缺的深层，有机碳含量越高，水分消耗越严重，说明高有机碳的固存是以高土壤水分消耗为代价的。乔木和灌木的碳水关系拟合较其他类型好，可能是在深剖面具有更完整的根系分布(图 6)，使得碳水关系更为密切，而乔木和灌木在剖面广泛存在的 SMDE/SOCSE 关系，也证明此现象。与其他植被类型相反的是，樟子松的土壤有机碳与含水量表现为正相关，也减弱沙柳×樟子松的碳水关系，使得其拟合较差。在以往研究[24]也有类似结果，乔木林 0.4—3.0 m 土层的土壤有机碳密度与土壤含水量呈正相关。土壤水分与土壤有机碳间的不一致关系可能是由不同植物类型、种植密度、局部土壤质地差异等因素造成的[7]。根系生物量密度与土壤有机碳含量显著正相关，与土壤含水量显著负相关(表 3)，已有研究[13]表明，土壤水分通过影响根系生物量来影响土壤有机碳含量。当深层土壤水分严重亏缺时，水分胁迫可能限制根系的发育，降低有机物的归还，从而影响土壤有机碳的固存[14]。

在毛乌素沙地进行大规模的植被恢复导致深层土壤水分的过度消耗，随着未来干旱气候的加剧，深层土壤干旱可能导致植被退化，从而限制土壤的碳汇功能。为提高生态系统的稳定性，在提升固碳能力的同时，应尽可能考虑减少深层土壤水分的消耗，注重碳水的协调。在本研究区，沙柳×樟子松虽然是高耗水植被类型，但在固定同等数量的碳的情况下，相较于其他植被恢复类型消耗的水分最少。从长远角度考虑，沙柳×樟子松为毛乌素沙地植被恢复较为合适的一种模式。在水资源有限的毛乌素沙地，未来可以适当减少林分密度，以期减少深层土壤水分消耗来增加土壤碳汇功能。

4　结 论

(1)在裸沙地上进行植被恢复，总体上增加土壤有机碳含量，表现为沙柳×樟子松＞樟子松＞草地＞沙蒿×沙柳＞沙柳＞沙蒿，其中，表层土壤的有机碳含量增加最显著，随着土层深度的增加而减少。0.8—2.2 m 土层的沙蒿、沙柳、沙蒿×沙柳存在土壤碳损失。

(2)植被恢复后，不同植被类型在 0—5.0 m 土层内均存在不同程度的水分亏缺情况，主要集中在1.0—3.0 m 的深层土壤剖面，具体亏缺程度表现沙柳×樟子松＞樟子松＞沙蒿×沙柳＞沙柳＞草地＞沙蒿。

(3)根系是影响深层土壤有机碳输入和水分消耗的主要因素。在毛乌素沙地进行植被恢复，土壤有机碳与含水量在 0—5.0 m 范围内呈显著负相关，植被以消耗土壤水分为代价来固存有机碳，同时，考虑有机碳固存效应和土壤水分亏缺，沙柳×樟子松具有较好的恢复效果。

本文在一定程度上描述毛乌素沙地自然恢复草地和人工恢复林的深层土壤有机碳和含水量特征，对于优化毛乌素沙地植被恢复措施和促进生态的可持续发展具有重要意义，但关于植被恢复的土壤碳水关系的作用机理还需进一步研究。

参考文献：

[1] 卢琦，雷加强，李晓松，等.大国治沙：中国方案与全球范式[J].中国科学院院刊，2020，35(6)：656-664.
LU Q，LEI J Q，LI X S，et al. China's combating desertification：National solutions and global paradigm[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences，2020，35(6)：656-664.

[2] WANG L M，MA A S，ZHANG H，et al. Effects of long-term vegetation restoration on distribution of deep soil moisture in semi-arid northwest of China[J].Journal of Soil Science and Plant Nutrition，2020，20(4)：2123-2132.

[3] 邓蕾，刘玉林，李继伟，等.植被恢复的土壤固碳效应：动态与驱动机制[J].水土保持学报，2023，37(2)：1-10.
DENG L，LIU Y L，LI J W，et al. Effect of vegetation restoration on soil carbon sequestration：Dynamics and its driving mechanisms[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2023，37(2)：1-10.

[4] 陈闻，杨晶晶，袁媛，等.毛乌素沙地人工固沙植被的土壤养分效应[J].干旱区研究，2020，37(6)：1447-1456.
CHEN W，YANG J J，YUAN Y，et al. Effects of artificial sand-fixing vegetation on soil nutrients in Mu Us Sandy Land[J].Arid Zone Research，2020，37(6)：1447-1456.

[5] 姜丽娜，马洁，刘建康，等.毛乌素沙地不同植被恢复措施下土壤理化性质空间分布特征[J].水土保持通报，2022，42(5)：1-7.
JIANG L N，MA J，LIU J K，et al. Spatial distribution of soil physicochemical properties under different vegetation restoration measures in Mu Us sand land[J].Bulletin of Soil and Water Conservation，2022，42(5)：1-7.

[6] 周仕轩，夏彬，郝旺林，等.黄土高原坝地深层土壤有机碳稳定性研究[J].水土保持学报，2022，36(4)：284-289，298.
ZHOU S X，XIA B，HAO W L，et al. Stability of deep soil organic carbon of dam land on the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2022，36(4)：284-289，298.

[7] YANG F，HUANG M B，LI C H，et al. Changes in soil moisture and organic carbon under deep-rooted trees of different stand ages on the Chinese Loess Plateau[J]. Agriculture，Ecosystems and Environment，2022，328：e107855.

[8] KEILUWEIT M，BOUGOURE J J，NICO P S，et al. Mineral protection of soil carbon counteracted by root exudates[J].Nature Climate Change，2015，5：588-595.

[9] 冯棋，杨磊，王晶，等.黄土丘陵区植被恢复的土壤碳水效应[J].生态学报，2019，39(18)：6598-6609.
FENG Q，YANG L，WANG J，et al. Response of soil moisture and soil organic carbon to vegetation restoration in deep soil profiles in Loess Hilly Region[J]. Acta Ecologica Sinica，2019，39(18)：6598-6609.

[10] 常学尚，常国乔.干旱半干旱区土壤水分研究进展[J].中国沙漠，2021，41(1)：156-163.
CHANG X S，CHANG G Q. Advances in research and prospect on soil moisture in arid and semi-arid areas[J]. Journal of Desert Research，2021，41(1)：156-163.

[11] 图娜拉，巴音青克乐，莫日根，等.毛乌素沙地不同植被类型土壤水分特征研究[J].人民黄河，2020，42(增刊1)：63-64，72.
TU N L，BAYIN Q K L，MO R G，et al. Study on soil moisture characteristics of different vegetation types in mu us sandy land[J].Yellow River，2020，42(S1)：63-64，72.

[12] 郝宝宝，艾宁，贾艳梅，等.毛乌素沙地南缘不同植被类型土壤水分特征[J].干旱区资源与环境，2020，34(5)：196-200.
HAO B B，AI N，JIA Y M，et al. Soil water characteristics of different vegetation types in the south of MU Us Sandy Land[J].Journal of Arid Land Resources and Environment，2020，34(5)：196-200.

[13] LI H J，SI B C，MA X J，et al. Deep soil water extraction by apple sequesters organic carbon via root biomass rather than altering soil organic carbon content[J]. Science of the Total Environment，2019，670：662-671.

[14] 刘新春，赵勇钢，刘小芳，等.晋西黄土区人工林细根与土壤水碳的耦合关系[J].生态学报，2019，39(21)：7987-7995.
LIU X C，ZHAO Y G，LIU X F，et al. Coupling fine roots with soil moisture and organic carbon in artificial forests in loess region of western Shanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica，2019，39(21)：7987-7995.

[15] GAO X D，LI H C，ZHAO X N，et al. Identifying a suitable revegetation technique for soil restoration on water-limited and degraded land：Considering both deep soil moisture deficit and soil organic carbon sequestration[J].Geoderma，2018，319：61-69.

[16] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京：中国农业出版社，2000：30-38.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing：China Agriculture Press，2000：30-38.

[17] 黄奇，刘陟，周延林，等.毛乌素沙地沙柳生物量估测模型研究[J].内蒙古大学学报(自然科学版)，2015，46(3)：256-261.
HUANG Q，LIU Z，ZHOU Y L，et al. Study on the biomass estimating models of *Salix psammophilain* Maowusu sandland[J]. Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition)，2015，46(3)：256-261.

(下转第120页)

Total Environment,2021,754:e142304.

[22] ZHANG G H, TANG M K, ZHANG X C. Temporal variation in soil detachment under different land uses in the Loess Plateau of China[J].Earth Surface Processes and Landforms,2009,34(9):1302-1309.

[23] LIU J X, LIU G B, FLANAGAN D C, et al. Effects of soil-incorporated plant litter morphological characteristics on the soil detachment process in grassland on the Loess Plateau of China[J].The Science of the Total Environment,2020,705:e134651.

[24] 吴秋菊,吴发启,王林华.土壤结皮坡面流水动力学特征[J].农业工程学报,2014,30(1):73-80.
WU Q J, WU F Q, WANG L H. Hydrodynamic characteristics of overland flow under soil crusts condition [J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2014,30(1):73-80.

[25] 张光辉.坡面薄层流水动力学特性的实验研究[J].水科学进展,2002,13(2):159-165.
ZHANG G H. Study on hydraulic properties of shallow flow[J].Advances In Water Science,2002,13(2):159-165.

[26] 柳玉梅,张光辉,李丽娟,等.坡面流水动力学参数对土壤分离能力的定量影响[J].农业工程学报,2009,25(6):96-99.
LIU Y M, ZHANG G H, LI L J, et al. Quantitative effects of hydro-dynamic parameters on soil detachment capacity of overland flow[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2009,25(6):96-99.

[27] 王凯,王玉杰,王彬,等.黄壤坡面土壤分离速率研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(9):2114-2121.
WANG K, WANG Y J, WANG B, et al. Study on soil detachment rate on a yellow-soil hillslope[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2018,27(9):2114-2121.

[28] 安妙颖,韩玉国,王金满,等.黄土丘陵区坡面薄层水流动力学特性及其对土壤侵蚀的影响[J].中国农业大学学报,2020,25(2):142-150.
AN M Y, HAN Y G, WANG J M, et al. Hydrodynamic characteristics of overland flow and its impact on erosion in Loess Hilly Region[J].Journal of China Agricultural University,2020,25(2):142-150.

[29] 肖丛宇,程金花,姜群鸥,等.台田措施下坡面流土壤侵蚀水动力学特征[J].水土保持学报,2019,33(4):10-15.
XIAO C Y, CHENG J H, JIANG Q O, et al. Hydrodynamic characteristics of soil erosion in overland flow under terraced field measure[J].Journal of Soil and Water Conservation,2019,33(4):10-15.

[30] WANG B, ZHANG G H, YANG Y F, et al. Response of soil detachment capacity to plant root and soil properties in typical grasslands on the Loess Plateau[J].Agriculture, Ecosystems and Environment,2018,266:68-75.

(上接第 110 页)

[18] 刘陟,黄奇,周延林,等.毛乌素沙地油蒿生物量估测模型研究[J].中国草地学报,2014,36(4):24-30.
LIU Z, HUANG Q, ZHOU Y L, et al. Study on the models for estimating the biomass of *Artemisia ordosicain* Mu Us sandland[J].Chinese Journal of Grassland,2014,36(4):24-30.

[19] 樊兰英.雁北地区樟子松单木生物量模型研究[J].山西林业科技,2014,43(4):15-16.
FAN L Y. Study on single biomass model for *Pinus sylvestris* in Yanbei area[J].Shanxi Forestry Science and Technology,2014,43(4):15-16.

[20] WANG Y Q, SHAO M A, LIU Z P, et al. Prediction of bulk density of soils in the Loess Plateau region of China[J].Surveys in Geophysics,2014,35(2):395-413.

[21] WANG S F, GAO X D, YANG M, et al. The efficiency of organic C sequestration in deep soils is enhanced by drier climates[J].Geoderma,2022,415:e115774.

[22] RODRIGUES L A T, GIACOMINI S J, AITA C, et al. Short- and long-term effects of animal manures and mineral fertilizer on carbon stocks in subtropical soil under no-tillage[J].Geoderma,2021,386:e114913.

[23] ZHANG Y W, SHANGGUAN Z P. The coupling interaction of soil water and organic carbon storage in the long vegetation restoration on the Loess Plateau[J].Ecological Engineering,2016,91:574-581.

[24] TUO D F, GAO G Y, CHANG R Y, et al. Effects of revegetation and precipitation gradient on soil carbon and nitrogen variations in deep profiles on the Loess Plateau of China[J].Science of the Total Environment,2018,626:399-411.