

衬膜水稻修复荒漠化土壤对土壤碳库变化的影响

孙琳, 欧阳, 于飞, 梁雷*

辽宁大学环境学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2022年2月28日; 录用日期: 2022年4月1日; 发布日期: 2022年4月8日

摘要

探究衬膜水稻种植技术对荒漠化土壤碳库和碳库管理指数的影响, 为荒漠化治理提供科学依据。本研究分析科尔沁奈曼旗沙地、稻田和休耕地0~15和15~30 cm土层的土壤全碳、有机碳、稳态碳和易氧化有机碳含量以及土壤碳库管理指数的变化特征。结果表明: 种稻和休耕对土壤碳库影响显著, 土壤全碳、有机碳、易氧化有机碳和稳态碳含量以及易氧化有机碳分配比例和碳库管理指数总体呈先显著升高后显著下降的变化趋势, 大小差异顺序均为: 稻田 > 休耕地 > 沙地。其中种稻后有机碳含量增幅最大达903%, 休耕后有机碳含量降幅最大达83.09%。综上, 研究区以风沙土为主, 土壤贫瘠, 修复难度大, 沙漠种植衬膜水稻能够短期内提升土壤碳库库容, 有利于土壤质量的持续改善, 但休耕后土壤碳库各组分含量和碳库管理指数仅比沙地略高, 土壤自然休耕后尚不能恢复到草原土壤水平。

关键词

土壤碳库, 易氧化有机碳, 荒漠化治理

Effect of Film Lined Rice on the Change of Soil Carbon Pool in Repairing Desertification Soil

Lin Sun, Yang Ou, Fei Yu, Lei Liang*

College of Environment, Liaoning University, Shenyang Liaoning

Received: Feb. 28th, 2022; accepted: Apr. 1st, 2022; published: Apr. 8th, 2022

*通讯作者。

Abstract

In order to explore the impact of film lined rice planting technology on desertification soil carbon pool and carbon pool management index, so as to provide scientific basis for desertification control. This study analyzed the variation characteristics of soil total carbon, organic carbon, non readily oxidized organic carbon, readily oxidized organic carbon and soil carbon pool management index in 0~15 and 15~30 cm soil layers of sandy land, paddy field and fallow land in Horqin Naiman Banner. The results showed that planting rice and fallow had a significant impact on soil carbon pool. The contents of soil total carbon, organic carbon, readily oxidized organic carbon and non readily oxidized organic carbon, as well as the distribution proportion of readily oxidized organic carbon and carbon pool management index, showed a changing trend of first significantly increasing and then significantly decreasing. The order of difference was: paddy field > fallow farmland > sandy land. Among them, the organic carbon content increased by 903% after planting rice and decreased by 83.09% after fallow. In conclusion, the study area is dominated by aeolian sandy soil, which is poor and difficult to repair. Planting film lined rice in the desert can improve the capacity of soil carbon pool in a short time, which is conducive to the continuous improvement of soil quality. However, the content of soil carbon pool components and carbon pool management index after fallow are only slightly higher than those in sandy land, and the soil can not be restored to the level of grassland soil after natural fallow.

Keywords

Soil Carbon Pool, Readily Oxidized Organic Carbon, Desertification Control

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

荒漠化是气候条件和人为干扰影响下的一种土地退化的现象。目前荒漠化在全球旱区均有发生[1]，约 33% 的土壤中度至高度退化[2]。本研究区科尔沁沙地由于气候干旱和不合理的人类经济活动导致科尔沁草原土地退化为沙漠，其沙地面积达 3.51 万 km² [3]。目前国内外有关荒漠化治理研究主要集中在荒漠化的防治方面，已退化土地修复的相关文献较少。现有研究成果表明植被恢复是沙漠土壤修复的主要方法，如退耕还草，种植沙地植物以及玉米水稻等农作物等。为了治理内蒙古自治区科尔沁沙地的荒漠化问题，本课题组从 2014 年起在内蒙古自治区通辽市奈曼旗科尔沁沙地建立衬膜水稻试验基地并展开研究，经过多年坚持不懈的努力，终于形成了较为成熟的技术和一定规模的衬膜水稻试验地。

为了评价衬膜水稻种植技术对研究区荒漠化土壤的生态修复效果，需对比分析未修复沙地、沙漠水稻修复区和休耕区的土壤质量。土壤质量是土壤多种功能的综合体现[4]，不同文献采用的土壤质量评价指标有所不同，多集中于有关土壤碳库变化的研究[5]。土壤碳库的库容和各组成成分对调节土壤养分流有很大影响，对土壤管理措施和质量变化响应敏感[6]，与土壤内在的生产力和稳定性高度相关；其动态和循环又影响温室效应和生态系统[7]。因此，本文通过研究 3 种土壤处理方式对土壤碳库的影响和修复荒漠化过程中土壤碳库管理指数的变化特征，从整体功能角度，以发展的眼光评价荒漠化地区衬膜水稻种植和休耕对土壤生态系统修复效果，对荒漠生态系统物质循环和生态系统稳定性的维持机理具有重要

意义。

2. 材料与方法

2.1. 研究区域概况

试验样地位于科尔沁沙地南部，行政区划隶属于内蒙古自治区通辽市奈曼旗 $42^{\circ}14'40''\sim43^{\circ}32'30''N$, $120^{\circ}19'40''\sim121^{\circ}31'44''E$ ，研究区属于北温带大陆性季风干旱气候[8]，春夏季降水较多，秋冬季降水较少，一年中降水集中在夏季(6~8月)，年均降水量 366 mm，年蒸发量 1935 mm。科尔沁沙地年平均气温 $6.00^{\circ}C\sim6.50^{\circ}C$ ，无霜期平均约 150 天，全年日照率 66.0%~69.9%，平均每日日照 8.70~9.20 h，年平均风速 3.60~4.10 $m\cdot s^{-1}$ [9]。试验样地土壤类型为风沙土，植被类型主要是黄柳(*Salix gordeivii*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、大针茅(*Stipa grandis*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)、羊草(*Leymus chinensis*)。

2.2. 土壤样品采集

不同土壤处理方式：裸露沙地沙土、衬膜水稻种植区沙土、衬膜水稻休耕区沙土，共计 3 个样地。

采样时间为 2021 年 9 月，在每个样地采用对角线法选取 5 个 $10\text{ m}\times10\text{ m}$ 的取样点，以五点法进行采样，采样深度为 30 cm，每 15 cm 为一个土层，5 个取样点相同土层土样混合，土样以四分法缩分至 1 kg 装袋保存。混合好的土样，带回实验室，剔除石子根茎等杂质，风干研磨后待测。

2.3. 测定方法

采用高温外热重铬酸钾氧化 - 容量法测定土壤总有机碳(TOC)含量[10]；采用元素分析仪测定土壤全碳(TC)含量；采用 KMnO₄ 氧化法测定土壤易氧化有机碳(ROOC)含量[11]。

2.4. 土壤碳库管理指标的计算方法

以 0~15 cm 土层沙地土壤为对照，计算碳库活度(A)、碳库活度指数(AI)、碳库指数(CPI)、碳库管理指数(CPMI)的指标值，碳库管理指标[12]计算公式如下：

$$\text{稳态碳} = \text{土壤有机碳} - \text{易氧化有机碳} \quad (1)$$

$$\text{碳库活度} = \text{易氧化有机碳} / \text{稳态碳} \quad (2)$$

$$\text{碳库活度指数} = \text{样品碳库活度} / \text{参考土壤碳库活度} \quad (3)$$

$$\text{碳库指数} = \text{样品总有机碳} / \text{参考土壤总有机碳} \quad (4)$$

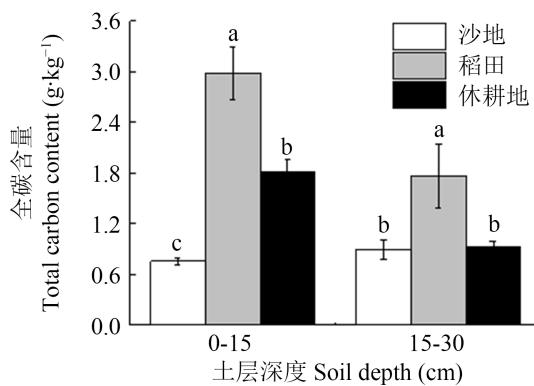
$$\text{碳库管理指数} = \text{碳库指数} \times \text{碳库活度指数} \times 100 \quad (5)$$

3. 结果与分析

3.1. 衬膜水稻修复荒漠化土壤对土壤全碳含量的影响

土壤碳素不仅在全球碳循环中占有重要的地位，同时也是土壤异养生物参与营养物质再循环活动的重要能量来源[13]。碳是土壤有机质最基本的组成元素，土壤全碳含量可以作为评价土壤肥力的重要指标[14]。如图 1 可知，在整个修复过程中，各处理表层土壤 TC(全碳)含量介于 $0.75\sim2.99\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间，变幅为 $2.24\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。三种处理中稻田、休耕地 0~15 cm 土层的 TC 含量较 15~30 cm 高出 69.06%、96.73%；沙地 15~30 cm 土层 TC 含量较 0~15 cm 高出 18.67%。稻田 0~15 cm、15~30 cm 土层 TC 含量较沙地分别增加 298.22%、98.50%；休耕地 0~15 cm、15~30 cm 土层 TC 含量较沙地分别增加 140.44%、3.00%；休耕地 0~15 cm、15~30 cm 土层 TC 含量较稻田分别下降 39.62%、48.11%。不同修复阶段土壤 TC 含量大小

差异顺序是:稻田 0~15 cm > 休耕地 0~15 cm > 稻田 15~30 cm > 休耕地 15~30 cm > 沙地 15~30 cm > 沙地 0~15 cm。



不同小写字母表示处理间的显著差异($P < 0.05$)。Different small letters meant significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

Figure 1. Effect of film lined rice on soil total carbon content in repairing desertification soil

图 1. 衬膜水稻修复荒漠化土壤对土壤全碳含量的影响

3.2. 衬膜水稻修复荒漠化土壤对土壤有机碳含量的影响

土壤总有机碳(TOC)量是土壤肥力的重要物质基础, 对土壤其他方面的特性具有多重作用, 它是评价土壤质量高低的重要指标之一[15]。如图 2 可知, 在整个修复过程中, 各处理表层土壤 TOC 含量介于 $0.12\sim1.38 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 变幅为 $1.26 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在整个修复过程中, 不同处理中沙地、稻田、休耕地 0~15 cm 土层的 TOC 含量较 15~30 cm 高 8.54%、346.06%、100.10%。稻田 0~15 cm、15~30 cm 土层 TOC 含量较沙地分别增加 903.17%、144.10%; 休耕地 0~15 cm 土层 TOC 含量较沙地增加 69.63%, 15~30 cm 土层 TOC 含量较沙地下降 3.00%; 休耕地 0~15 cm、15~30 cm 土层 TOC 含量较稻田分别下降 83.09%、62.31%。不同修复阶段土壤 TOC 含量大小差异顺序是: 稻田 0~15 cm > 稻田 15~30 cm > 休耕地 0~15 cm > 沙地 0~15 cm > 沙地 15~30 cm > 休耕地 15~30 cm。

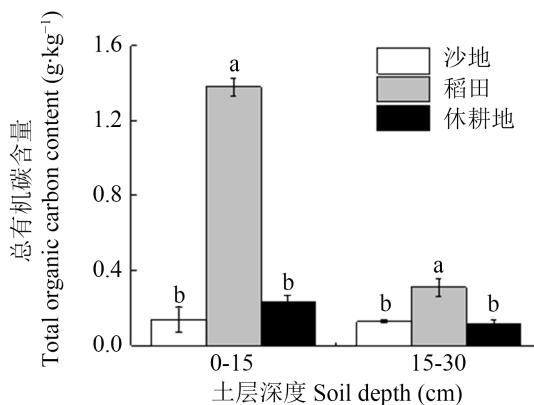


Figure 2. Effect of film lined rice on soil organic carbon content in repairing desertification soil

图 2. 衬膜水稻修复荒漠化土壤对土壤有机碳含量的影响

3.3. 衬膜水稻修复荒漠化土壤对土壤易氧化有机碳含量的影响

土壤碳库分为无机和有机两部分，其中有机碳库由易氧化有机碳库和稳态碳库组成，土壤碳库容量主要由土壤易氧化有机碳储量影响[16]。土壤易氧化有机碳库作为土壤碳库的活跃成分易受土壤微小扰动的影响，是衡量土壤质量与健康和有机碳库早期变化的指标[17]。

如图3可知，在整个修复过程中，各处理表层土壤易氧化有机碳(ROOC)含量介于 $0.012\sim0.155\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间，变幅为 $0.145\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。三种处理中沙地、稻田、休耕地0~15 cm土层的ROOC含量较15~30 cm高94.99%、109.32%、241.71%。稻田0~15 cm、15~30 cm土层ROOC含量较沙地分别增加586.72%、539.73%；休耕地0~15 cm、15~30 cm土层ROOC含量较沙地分别增加94.50%、10.99%；休耕地0~15 cm、15~30 cm土层ROOC含量较稻田分别下降71.68%、82.65%。不同修复阶段土壤ROOC含量大小差异顺序是：稻田0~15 cm>稻田15~30 cm>休耕地0~15 cm>沙地0~15 cm>休耕地15~30 cm>沙地15~30 cm。

在整个修复过程中，各处理土壤易氧化有机碳占土壤有机碳总量(ROOC/TOC)的9.32%~30.99%，变幅为21.67%。沙地、稻田、休耕地0~15 cm土层的易氧化有机碳分配比例较15~30 cm高70.87%、36.34%、68.09%。从整体来看，各处理土壤易氧化有机碳分配比例大小差异顺序是：稻田0~15 cm>稻田15~30 cm>休耕地0~15 cm>沙地0~15 cm>休耕地15~30 cm>沙地15~30 cm。

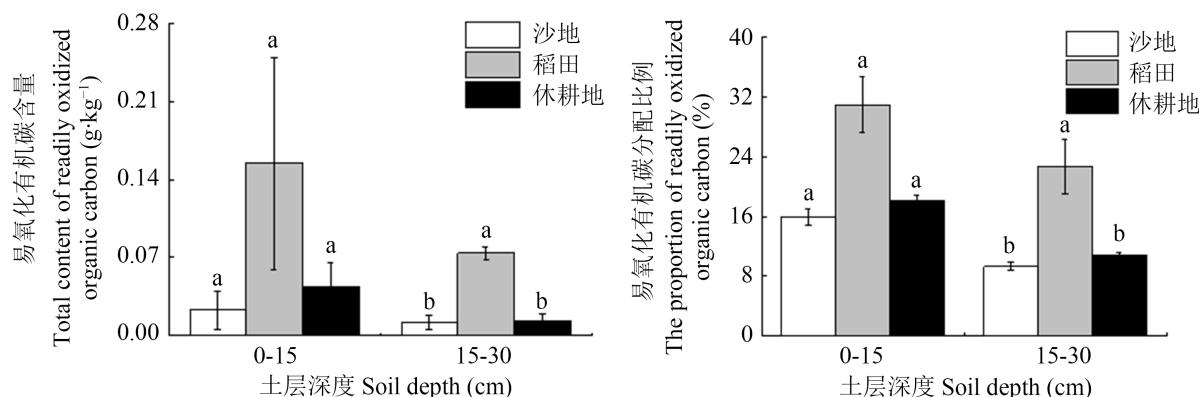


Figure 3. Effect of film lined rice on the content of readily oxidized organic carbon in desertification soil
图3. 衬膜水稻修复荒漠化土壤对土壤易氧化有机碳含量的影响

3.4. 衬膜水稻修复荒漠化土壤对土壤稳态碳含量的影响

易氧化有机碳是能被 $333\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ KMnO}_4$ 氧化的有机碳，在土壤中易被氧化分解，在土壤碳循环中起着非常重要的作用，而不能被氧化的有机碳称作非活性有机碳，或称作稳态碳(NROOC)，NROOC可以在一定程度上表征土壤长期碳积累和固碳能力[18]。

由图4可知，本研究中各处理阶段土壤稳态碳含量高于易氧化有机碳含量。各处理表层土壤NROOC含量介于 $0.104\sim0.305\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间，变幅为 $0.201\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。稻田土壤NROOC占比呈现明显低于沙地、休耕地之间差异较小的特点。NROOC分布规律与TOC和ROOC的分布特征基本一致。不同修复阶段土壤稳态碳含量大小差异顺序是：稻田0~15 cm>稻田15~30 cm>休耕地0~15 cm>沙地15~30 cm>沙地0~15 cm>休耕地15~30 cm。

NROOC含量的显著增加可以在一定程度上反应修复过程中土壤长期碳积累和固碳能力的提高。稻田土ROOC与NROOC含量的比率高于沙地，则可能是因为种稻使沙漠土壤优势菌种丰度增加，微生物活性增强，土壤有机质分解和矿化速率较高，加快养分释放。

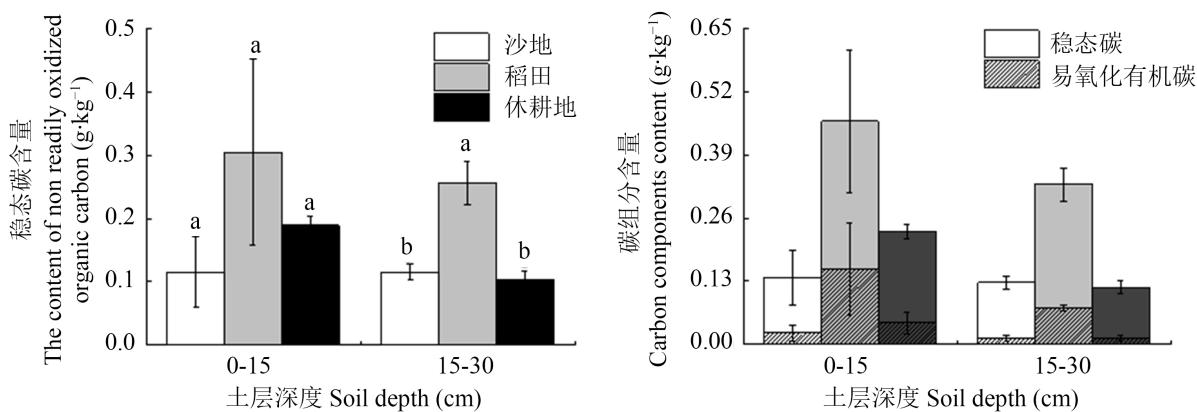


Figure 4. Effect of film lined rice on the content of non readily oxidized organic carbon in desertification soil
图 4. 衬膜水稻修复荒漠化土壤对土壤稳态碳含量的影响

3.5. 衬膜水稻修复荒漠化土壤对碳库管理指数的影响

土壤碳库管理指数是有效表征土壤碳库变化的量化指标[19]。如表 1, 将科尔沁奈曼旗内未种植过水稻的沙地土壤作为参照土壤, 以沙地 0~15 cm 指标做分母计算不同修复阶段不同土层土壤的碳库活度(A)、碳库活度指数(AI)、碳库指数(CPI)、碳库管理指数(CPMI)。

A 和 AI 都反映了土壤碳素的活跃程度, 活度越大, 表示有机碳越易被微生物分解, 土壤质量也就越高[20]。各处理样地土壤 A 指标值范围介于 0.11~1.00; AI 指标值范围介于 0.52~4.94。不同修复阶段土壤 A 和 AI 变化一致, 均为稻田 0~15 cm > 稻田 15~30 cm > 休耕地 0~15 cm > 沙地 0~15 cm > 休耕地 15~30 cm > 沙地 15~30 cm。土壤的碳库活度和活度指数与土壤有机碳周转和外界对土壤系统的干扰有关, 衬膜水稻田休耕后, 减少对土壤生态系统的人为干扰, 菌落丰度降低, 碳素转化过程速率下降, 从而将更多的碳素以非活跃状态贮存下来。

碳库指数和碳库管理指数是评价土壤质量的重要指标, 反映不同处理下碳库中各组分含量的变化, 其指标值升高, 表示随修复进行土壤向良性方向发展[21]。各处理样地土壤 CPI 指标值范围介于 1.00~3.98; CPMI 指标值范围介于 62.77~1912.13。稻田 0~15 cm、15~30 cm 土层 CPI 较沙地分别增加 298.00%、98.32%; 休耕地 0~15 cm、15~30 cm 土层 CPI 分别比沙地增加 140.00%、2.52%; 休耕地 0~15 cm、15~30 cm 土层 CPI 分别比稻田减少 39.70%、48.31%。不同恢复阶段对土壤碳库管理指数影响显著, 稻田 0~15 cm、15~30 cm 土层 CPMI 分别较沙地增加 1812.13%、502.66%; 休耕地 0~15 cm、15~30 cm 土层 CPMI 分别比沙地增加 169.00%、15.64%; 休耕地 0~15 cm、15~30 cm 土层 CPMI 分别比稻田减少 85.93%、80.81%。CPI 大小依次为: 稻田 0~15 cm > 休耕地 0~15 cm > 稻田 15~30 cm > 休耕地 15~30 cm > 沙地 15~30 cm > 沙地 0~15 cm。CPMI 大小依次为: 稻田 0~15 cm > 稻田 15~30 cm > 休耕地 0~15 cm > 沙地 0~15 cm > 休耕地 15~30 cm > 沙地 15~30 cm。可见种植衬膜水稻可以显著改善土壤经营和管理水平, 在沙漠修复过程中土壤系统向着良性方向转变, 该措施具有科学性。休耕后土壤肥力下降, 土壤质量向恶性方向发展, 该措施并不科学。

4. 讨论

土壤碳库的变化与土壤碳素的生物有效态之间密切相关, 土壤碳组分变化是衡量土壤质量与健康的指标[22]。本研究中, 沙地衬膜水稻田表层土壤(0~30 cm)全碳、有机碳、易氧化有机碳和稳态碳含量显著高于种稻前和休耕后的沙地土壤, 大小差异顺序为稻田 > 休耕地 > 沙地, 其中有机碳含量种稻前后

变幅最大较种稻前增加 903.2%，易氧化有机碳次之，增加 539.7%。土壤有机碳库和易氧化有机碳库反映了衬膜水稻种植对土壤质量的影响。种植衬膜水稻使沙漠土壤保水保肥能力提高，提高土壤质量。稳态碳含量的显著增加可以在一定程度上反应修复过程中土壤长期碳积累和固碳能力的提高。稻田土壤稳态碳与易氧化有机碳含量的比率低于沙地，则可能是因为种稻使沙漠土壤优势菌种丰度增加，微生物活性增强，土壤有机质分解和矿化速率较高，加快养分释放。本研究中，休耕一年后土壤碳库各组分含量显著降低，土壤快速退化，接近未修复沙地，休耕后土壤有机碳含量骤减，较全碳含量变化幅度更大，或表明停种水稻对沙土的有机碳库的影响大于无机碳库。除受科尔沁沙地的气候条件和成土母质的限制外，休耕初期草本植物生长发育消耗大量有机质和土壤养分也可能是导致碳库容量下降的原因之一。

Table 1. Soil activity, activity index, carbon pool index and management index under different treatments**表 1.** 不同处理的碳库活度、活度指数、碳库指数和碳库管理指数

土层 Soil depth (cm)	处理组 Treatment	碳库活度(A) Carbon pool activity	碳库活度指数(AI) Carbon pool activity index	碳库指数(CPI) Carbon pool index	碳库管理指数(CPMI) Carbon pool management index
0~15	沙地	0.20 ± 0.16b	1.00 ± 0.00a	1.00 ± 0.00c	100.00 ± 0.00b
	稻田	1.00 ± 0.54a	4.94 ± 0.76a	3.98 ± 0.42a	1912.13 ± 289.18a
	休耕地	0.23 ± 0.11b	1.13 ± 0.53a	2.40 ± 0.21b	269.00 ± 126.31b
15~30	沙地	0.11 ± 0.06b	0.52 ± 0.32b	1.19 ± 0.16b	62.77 ± 39.63b
	稻田	0.30 ± 0.06a	1.46 ± 0.30a	2.36 ± 0.51a	378.29 ± 49.97a
	休耕地	0.12 ± 0.05b	0.60 ± 0.23b	1.22 ± 0.10b	72.59 ± 23.35b

同列不同字母表示差异显著($P < 0.05$) Different letters in the same column meant significant difference at 0.05 level.

本研究中，0~15 和 15~30 cm 不同处理样地土壤的碳库活度、碳库活度指数、碳库指数和碳库管理指数的大小差异顺序均表现为稻田 > 休耕地 > 沙地。土壤的碳库活度和活度指数与土壤有机碳周转和外界对土壤系统的干扰有关，衬膜水稻田休耕后，减少对土壤生态系统的人为干扰，菌落丰度降低，碳素转化过程速率下降，从而将更多的碳素以非活跃状态贮存下来。碳库指数和碳库管理指数是评价土壤质量的重要指标，反映不同处理下碳库中各组分含量的变化，其指标值升高，表示随修复进行土壤向良性方向发展。稻田、休耕地土壤碳库管理指数较沙地增加 1812.1%、169.0%，可见种植衬膜水稻可以显著改善土壤经营和管理水平，在沙漠修复过程中土壤系统向着良性方向转变，该措施具有科学性。

5. 结论

不同土层各处理间土壤碳库各组分含量和碳库管理指数呈现相似的变化趋势，均表现为先显著升高后显著降低的变化趋势，大小差异顺序均为：稻田 > 休耕地 > 沙地，且各处理土壤碳库各组分含量和碳库管理指数指标的最高值均出现在 0~15 cm 土层的稻田土壤。0~15 cm 土层的各碳组分含量和碳库管理指数高于 15~30 cm 土层。与原始沙地相比，种稻后土壤碳库中有机碳含量增幅最大达 903%；土壤碳库管理指数指标值中碳库管理指数增幅最大达 1812.13%。种植衬膜水稻后土壤碳库含量和碳库管理指数均显著提高，休耕后土壤碳库含量和碳库管理指数与种稻前无显著差异。

综上，研究区以风沙土为主，土壤贫瘠，修复难度大，沙漠种植衬膜水稻能够短期内提升土壤碳库容，有利于土壤质量的持续改善。但休耕后土壤碳库各组分含量显著下降，仅比沙地略高，土壤自然休耕后尚不能恢复到草原土壤水平。

基金项目

辽宁省教育厅 2017 年度高等学校基本科研立项：双膜覆盖沙漠水稻种植技术研究(LFW201703)。

参考文献

- [1] 张永民, 赵士洞. 全球荒漠化现状及防治对策[J]. 西部大开发, 2016(5): 17-19.
- [2] 张骞, 马丽, 张中华, 徐文华, 周秉荣, 宋明华, 乔安海, 王芳, 余延娣, 杨晓渊, 郭婧, 周华坤. 青藏高寒区退化草地生态恢复: 退化现状、恢复措施、效应与展望[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7441-7451.
- [3] 屠志方. 第五次全国荒漠化和沙化监测结果及分析[J]. 林业资源管理, 2016(1): 1-5+13.
- [4] 汪媛媛, 杨忠芳, 余涛. 土壤质量评价研究进展[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(36): 22617-22622+22657.
- [5] 于法展, 张忠启, 单勇兵. 安徽皇藏峪自然保护区森林土壤碳库的变化特征[J]. 林业资源管理, 2020(6): 90-95.
- [6] 苏永中, 赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展[J]. 中国沙漠, 2002, 22(3): 220-228.
- [7] 陈朝, 吕昌河, 范兰, 武红. 土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展[J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5358-5371.
- [8] 于艳华, 乌兰图雅, 阿拉腾图雅. 科尔沁沙地退耕还林还草的生态效应分析——以通辽市奈曼旗为例[J]. 国土资源科技管理, 2007, 24(1): 23-28.
- [9] 洪光宇, 王晓江, 张雷, 武永智, 李卓凡, 海龙, 高孝威. 科尔沁沙地生物结皮与其他植被覆盖耗水率的研究[J]. 内蒙古林业科技, 2017, 43(4): 14-20.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [11] Lefroy, R.D.B., Blair, G.J. and Strong, W.M. (1993) Changes in Soil Organic Matter with Cropping as Measured by Organic Carbon Fractions and ^{13}C Natural Isotope Abundance. *Plant and Soil*, **155**, 399-402.
<https://doi.org/10.1007/BF00025067>
- [12] Blair, G.J., Lefroy, R.D.B. and Lisle, L. (1995) Soil Carbon Fractions Based on Their Degree of Oxidation, and the Development of a Carbon Management Index for Agricultural Systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, **46**, 1459-1466. <https://doi.org/10.1071/AR9951459>
- [13] 陈小红, 段争虎. 土壤碳素固定及其稳定性对土壤生产力和气候变化的影响研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(4): 765-772.
- [14] 张金波, 宋长春. 土地利用方式对土壤碳库影响的敏感性评价指标[J]. 生态环境, 2003, 12(4): 500-504.
- [15] 马艳芹, 黄国勤. 紫云英还田配施氮肥对稻田土壤碳库的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(1): 129-135.
- [16] 余健, 房莉, 卞正富, 汪青, 俞元春. 土壤碳库构成研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(17): 4829-4838.
- [17] 张哲, 王邵军, 李霁航, 曹润, 陈闽昆, 李少辉. 土壤易氧化有机碳对西双版纳热带森林群落演替的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(17): 6257-6263.
- [18] 魏燕华, 赵鑫, 翟云龙, 张二朋, 陈阜, 张海林. 耕作方式对华北农田土壤固碳效应的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 87-95.
- [19] 阎欣, 刘任涛, 安慧. 土壤易氧化有机碳与溶解性有机碳对荒漠草地沙漠化过程中土壤碳库变异的表征[J]. 草业学报, 2018, 27(11): 15-25.
- [20] 吕瑞珍, 熊瑛, 李友军, 吕强, 黄明. 保护性耕作对农田土壤碳库特性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 206-209.
- [21] 佟小刚, 韩新辉, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 梁爱华, 康迪. 碳库管理指数对退耕还林土壤有机碳库变化的指示作用[J]. 中国环境科学, 2013, 33(3): 466-473.
- [22] 戴全厚, 刘国彬, 薛莲, 余娜, 张超, 兰雪. 侵蚀环境退耕撂荒地土壤活性有机碳与碳库管理指数演变[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(6): 24-28.