

# Restoration Changes in Organic Carbon Stocks of the Vegetation and Soil Ecosystems in the Reversion Process of Desertification in Arid Areas

Quanlin Ma<sup>1\*</sup>, Liheng Xu<sup>2</sup>, Fang Chen<sup>1</sup>, Dekui Zhang<sup>1</sup>, Xinyou Wang<sup>3</sup>, Hujia Jin<sup>1</sup>, Youjun Liu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Desertification and Aeolian Sand Disaster Combating, Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou Gansu

<sup>2</sup>The Qingyang Forestry Bureau, Qingyang Gansu

<sup>3</sup>College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou Gansu  
Email: \*mql925@126.com

Received: Feb. 3<sup>rd</sup>, 2018; accepted: Feb. 17<sup>th</sup>, 2018; published: Feb. 26<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

Carbon sequestration is one of the important ecological functions of land ecosystem, and it is also an important aspect of ecological restoration. An unrestored shifting sand dune and three formerly shifting sand dunes that had been afforested for 5, 15 and 25 years were selected in the middle reaches of Shiyang River to study restoration changes in biomass carbon (BC) and soil organic carbon (SOC) stocks of the desertified lands in the reversion process of desertification and their influence factors. Results showed that BC stocks of the desertified lands was increased and then reduced in the reversion process of desertification, and the average vegetation carbon sequestration rate reached only 0.05 Mg/hm<sup>2</sup>·a in 25 years. Total BC stocks of the desertified lands afforested for 5 years, 15 years and 25 years only accounted for 22.6%, 54.9% and 45.3% of native zonal vegetation, respectively. SOC in 0 - 1 m layer and ecosystem stocks increased gradually in the reversion process of desertification, and the average carbon sequestration rate reached 0.48 Mg/hm<sup>2</sup>·a and 0.53 Mg/hm<sup>2</sup>·a in 25 years, respectively. 0 - 5 cm topsoil was the fastest layer for restoration of SOC stocks. SOC stocks accounted for more than 87.5% of the ecosystem organic C stocks, and soil was major C stocks of the different restoration stages in the reversion process of desertification and native zonal vegetation. Therefore, sand-fixation afforestation not only promoted the reversal of desertification, but also increased BC and topsoil SOC stocks rapidly, which proved that sand-fixation afforestation was the effective way to fix atmospheric CO<sub>2</sub> in the desertified lands. However, C stocks of the desertified lands at the different restoration stages were lower than native zonal vegetation obviously and there was still a growth potential for BC of underground vegetation and SOC stocks of deep soil of the desertified lands afforested for 25 years.

## Keywords

Desertified Land, Sand-Fixation Afforestation, Biomass Carbon Stocks, Soil Organic Carbon Stocks, Zonal Vegetation

---

\*通讯作者。

# 干旱区沙漠化逆转过程植被 - 土壤碳储量的恢复演变规律研究

马全林<sup>1\*</sup>, 徐丽恒<sup>2</sup>, 陈芳<sup>1</sup>, 张德奎<sup>1</sup>, 王新友<sup>3</sup>, 靳虎甲<sup>1</sup>, 刘有军<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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, 甘肃 兰州

<sup>2</sup>庆阳市林业局, 甘肃 庆阳

<sup>3</sup>兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州

Email: mql925@126.com

收稿日期: 2018年2月3日; 录用日期: 2018年2月17日; 发布日期: 2018年2月26日

## 摘要

碳汇作用是陆地生态系统的重要生态功能之一,也是生态修复关注的重要方面。以地带性植被区为对照,应用空间代替时间的方法,在石羊河中游选择流动沙丘及造林恢复5年、15年和25年沙化土地样地,研究了沙漠化逆转过程沙地生态系统植被 - 土壤有机碳储量的恢复演变过程、规律及其影响因素。结果表明:固沙植被碳储量随沙漠化逆转过程先增加后降低,造林恢复25年平均固碳速率仅达到0.05 Mg/hm<sup>2</sup>·a。尽管沙漠化逆转过程的不同恢复阶段地上植被碳储量大,但是造林恢复5年、15年和25年沙化土地地下植被总碳储量也仅占到地带性植被的22.6%、54.9%和45.3%。0~1 m土壤和生态系统有机碳储量均随沙漠化逆转过程持续增加,造林恢复25年平均固碳速率分别达到0.48 Mg/hm<sup>2</sup>·a和0.53 Mg/hm<sup>2</sup>·a,远远高于固沙植被的固碳速率,而且0~5 cm表层土壤是有机碳储量为增长最快的层次。土壤有机碳储量所占比例均在87.5%以上,是沙漠化逆转不同恢复阶段沙化土地和地带性植被区的主要碳库。上述结果证明,固沙造林加速了沙漠化逆转过程,快速提高了沙化土地植被和表层土壤的碳储量,是固定大气CO<sub>2</sub>于沙地植被和土壤中的有效途径。但是,造林恢复25年沙化土地碳储量与地带性植被间依然存在明显差距,特别是地下植被和深层土壤有机碳储量还存在较大的增长潜力。

## 关键词

沙化土地, 固沙造林, 植被碳储量, 土壤有机碳储量, 地带性植被

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

气候变化是全球面临的最重大环境问题之一,其主要原因是温室气体 CO<sub>2</sub> 浓度的急剧增加,但根源还是人类活动对陆地生态系统与化石燃料碳库的改变,管理好陆地生态系统现存的碳储量和增加新的碳储存成为降低大气 CO<sub>2</sub> 浓度、减缓气候变化的一个新的挑战[1] [2] [3]。大量研究与实践表明,退化土地造林、农业管理措施改进以及农田施肥是固定大气 CO<sub>2</sub> 于植物和土壤的有效途径,在未来 20~50 年间可减少大气 CO<sub>2</sub> 0.4~1.2 Pg C/年[4] [5] [6] [7] [8]。其中,植树造林作为一种人为的土地利用变化和陆地管

理活动,能增加陆地生态系统的碳储量,并可用来抵消各国承诺的温室气体减排指标,已公认为增加碳汇的重要措施[7] [8] [9] [10]。但是,一方面在估计造林对陆地碳汇的贡献时,几乎所有研究都只考虑植被生物量增长对陆地碳汇的贡献,而对土壤碳积累考虑的很少。另一方面,对造林碳汇作用的研究,多是基于农田或牧场转变为人工林地进行的,对沙化土地等脆弱生态系统的碳汇作用重视不足[9] [11]。

沙化土地是陆地生态系统的重要组成部分,也是最典型的脆弱生态系统,而且在气候变化和不合理经济行为的共同作用下,脆弱性增加[12] [13]。截至2014年,我国沙化土地面积达172.12万 $\text{km}^2$ ,占到国土总面积的17.93%,不仅造成每年540亿元的直接经济损失,也引起碳排放[14]。据Duan研究[15],1950~1990年我国土地沙漠化导致的碳排放总量为2.812 Pg,因此我国沙化土地治理对全球碳循环和缓解碳排放可能具有较大的潜力。固沙造林作为治理沙化土地最有效的措施,在“三北防护林体系建设工程”、“防沙治沙工程”以及“环京津沙源区防沙治沙工程”等生态工程实施中建立了大规模的人工固沙林,有效控制了土地沙化,也必然减缓了碳排放。然而,由于缺乏沙漠化逆转过程植被-土壤的碳固存效应及其碳累积规律的深入研究,目前对固沙造林的碳汇作用还存在争议[8] [9] [10]。

为此,以石羊河流域中游地带性植被区为对照,选择流动沙丘以及造林恢复5年、15年和25年沙化土地样地作为沙漠化逆转过程的不同恢复阶段,研究了沙漠化逆转过程沙地生态系统有机碳储量的恢复演变过程、规律及其影响因素,从而量化固沙造林对沙地生态系统碳库的影响,为评价沙化土地碳累积潜力及固沙造林作用提供数据支撑,对干旱区固沙植被建设与管理也具有一定的指导作用。

## 2. 研究区自然概况

研究区选择在古浪县北部的鸣沙咀( $37^{\circ}32' \sim 37^{\circ}35' \text{N}$ ,  $103^{\circ}38' \sim 103^{\circ}42' \text{E}$ ),其位于石羊河中游,腾格里沙漠的南缘,海拔1730~1810 m。区内气候属大陆性干旱气候,多年平均气温 $6^{\circ}\text{C}$ ,多年平均降水量175 mm,地下水位埋深约65 m。区内地貌类型包括流动沙丘、半固定和固定沙丘、干河床和风蚀沙地;土壤以风沙土为主;地带性植被为草原化荒漠植被,主要组成植物有短花针茅(*Stipa breviflora*)、中亚紫菀木(*Asterothamnus centrali-asiaticus*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、沙蒿(*A. sphaerocephala*)、沙竹(*Psammochloa villosa*)、刺蓬(*Cornulaca alaschanica*)和沙米(*Agriophyllum squarrosum*)等。研究区采用低密度造林(花棒 *Hedysarum scoparium*, 1650株/ $\text{hm}^2$ ) + 封育措施对研究区沙化土地进行了长期治理,经过20多年的自然恢复,人工固沙林演替成为以半灌木和多年生草本为主的人工 + 自然沙地植被,初步实现沙漠化逆转[10] [11]。

## 3. 研究方法

### 3.1. 样地选择

应用生态学研究通用的空间代替时间的方法,在石羊河中游古浪鸣沙咀花棒(*H. scoparium*)造林恢复区,以人工固沙林林龄作为生态恢复时间,选择未造林流动沙丘(0 a)以及造林恢复5年(5 a)、15年(15 a)和25年(25 a)沙化土地固定样地,代表沙漠化逆转过程的不同恢复阶段,并以紧邻的地带性植被(草原化荒漠植被)样地(NV)为对照。沙漠化逆转过程不同造林恢复阶段沙化土地样地初始状态均为流动沙丘,各样地相距50~2000 m,气候和土壤等生境条件基本一致。同时,各样地选择在平缓地段,样地坡度为 $3^{\circ} \sim 6^{\circ}$ ,取样坡面向阳,以消除地形的影响。

### 3.2. 植被数量特征及其碳储量

在沙漠化逆转不同恢复阶段及其对照地带性植被样地,设置面积 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 大样方3个,选择荒漠植物生长茂盛季节8月,开展固沙林植被组成、群落结构与生物量调查。在每个大样方内沿对角线设置

1 m × 1 m 小样方 5 个, 开展草本植物数量特征与生物量调查。在每一个样方内, 对灌木进行每株调查, 测量株(丛)的长度、宽度、高度和地径, 统计每一物种的株(丛)数。

生物量采用收获法测定, 包括地上生物量、枯死木与地上枯落物、地下生物量的测量[16]。根据固沙植被调查结果, 灌木花棒和半灌木油蒿、沙蒿以及中亚紫萼木在每个样地选取标准单株 3 株, 按新生枝叶、老龄枝杆和根系测量地上、地下生物量, 并结合种群平均密度换算成单位面积的生物量。对植被调查的每个 1 m × 1 m 小样方内地面以上的所有绿色部分用剪刀齐地面剪下, 不分物种按样方分别装袋; 收集小样方内的枯落物, 5 个小样方为 1 组合并称量, 由于量很少, 不再单独计算枯落物碳储量, 并入地上植被部分; 同时挖取小样方 1 m 深度地下部分根系, 装入大信封带, 带回室内漂洗掉附带的沙粒以及枯死腐烂根系。在实验室, 全部生物量样品放入 80℃ 的烘箱中烘干 24 h 至恒量后称其干质量, 单位用 g/m<sup>2</sup> 表示。植物样品含水率采用烘干称重法, 碳含量重铬酸钾氧化法[16]。根据植被生物量及其含水率和碳含量, 计算地上、地下植被碳储量[17]。

植物地上碳储量:

$$PC_i = B_i \times (1 - W_i\%) \times C_i / A \quad (1)$$

地上植被碳储量:

$$BC_a = \sum PC_i \quad (2)$$

式中,  $i$  代表样地内不同植物种及小样方(草本),  $B_i$  为植物地上生物量,  $W_i$  为植物地上部分含水率、 $C_i$  为植物地上部分碳含量,  $A$  为面积。

植物根系碳储量:

$$PC_j = B_j \times (1 - W_j\%) \times C_j / A \quad (3)$$

地下植被碳储量:

$$BC_b = \sum PC_j \quad (4)$$

式中,  $j$  代表样地内不同小样方,  $B_j$  为地下根系生物量,  $W_j$  为植物根系部分含水率,  $C_j$  为植物根系碳含量,  $A$  为面积。

植被碳储量:

$$BC = BC_a + BC_b \quad (5)$$

### 3.3. 土壤理化性质及其碳储量

开展植被调查的同时, 在沙漠化逆转不同恢复阶段及其对照地带性植被样地, 挖取 3 个 1 m 深度的土壤剖面, 并按照 0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm 和 80~100 cm 分层取样, 带回实验室处理, 采用烘干称重法测定土壤水分, 环刀法测定土壤容重, 马尔文激光粒度仪(英国产 MALVERN-S 型)测定土壤粒度, 重铬酸钾氧化法测定有机碳含量, 采用半微量开氏消煮法测定全氮, 采用 DDS-2 型便携式电导仪测定电导率等理化指标[16]。目前, 国内外大多数研究是以 1 m 深度为计算土壤有机碳储量的对照标准, 这样有利于结果之间相互比较[17]。

不同土壤层次的有机碳密度或碳储量:

$$SOC_k = C_k \times d_k \times D_k / A \quad (6)$$

0~1 m 土壤有机碳储量:

$$SOC = \sum SOC_k \quad (7)$$

式中,  $k$  代表不同土壤层次,  $C_k$  为各层土壤有机碳含量,  $d_k$  为各层土壤容重,  $D_k$  为各层土壤厚度,  $A$  为面积。

### 3.4. 数据分析

应用 SPSS16.0 软件对数据进行单因素方差分析(One-way ANOVA), 采用 Duncan 氏新复极差法对沙漠化逆转不同恢复阶段土壤水分、容重、有机质、全氮、沙粒含量、粘粒含量和电导率等土壤理化性质, 植被盖度、草本盖度和生物量等植被数量特征指标以及植被、土壤和系统碳储量进行显著性检验(显著性水平设置为  $\alpha = 0.05$ ), 分析前检验数据的正态性和方差同质性。沙漠化逆转过程固沙植被、土壤的固碳速率( $\text{Mg}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ )由单位面积沙化土地碳储量净累积量除以造林年限计算。采用 Excel2007 进行数据统计和作图, 所有数据用平均值  $\pm$  标准误表示。

## 4. 结果与分析

### 4.1. 沙漠化逆转过程植被 - 土壤系统的恢复演变特征

在地处典型干旱地区的石羊河中游, 流动沙丘优势植物主要为一年生植物沙米和多年生植物沙竹。流动沙丘固沙造林后, 伴随人工种群的发育, 5a 优势植物演替为花棒、油蒿、沙蒿和沙米, 15a 优势植物演替为油蒿、花棒及狗尾草(*Setaria viridis*)和画眉草(*Eragrostis poaeoides*)等禾草, 25a 优势植物演替为油蒿、短花针茅及狗尾草和画眉草等禾草, 自然植被优势种群由一年生草本植物向半灌木、半灌木与多年生草本植物演替; 而地上生物量、植被总盖度表现为先增加后降低, 草本植被盖度持续增大, 固沙植被生产力、多样性逐渐提高, 25 年后在沙化土地形成相对稳定的人工 + 自然固沙植被。伴随人工灌木固沙植被的发育及其衰败过程, 沙化土地 0~60 cm 土壤水分随造林恢复年限先降低后增加, 整体过程土壤趋于干旱; 表层 0~5 cm 土壤容重和沙粒含量逐渐降低, 土壤粘粒、有机质、全氮和土壤电导率含量逐渐增大, 土壤结构逐渐改善, 肥力逐渐增加。造林恢复 25 年后, 沙化土地植被总盖度、生物量显著高于地带性植被, 但是草本植物盖度显著低于地带性植被, 与地带性植被的相似性仅达到 50%; 表层土壤沙粒成分显著高于地带性植被, 但是有机质与氮含量已接近地带性植被(表 1)。造林恢复 25 年后, 沙化土地植被 - 土壤系统呈现向草原化荒漠演变的趋势, 初步实现了沙漠化逆转。

**Table 1.** Restoration dynamics of soil and vegetation systems in the reversion process of desertification

**表 1.** 沙漠化逆转过程土壤 - 植被系统的恢复演变特征

植被与表层土壤性状指标	0a 流动沙丘	5a 造林恢复 5 年沙 化土地	15a 造林恢复 15 年 沙化土地	25a 造林恢复 25 年沙 化土地	NV 地带性植被
物种丰富度	3	9	10	10	15
优势种	沙米、沙 蒿、沙竹	花棒、油蒿、 沙蒿、沙米	油蒿、花棒、 禾草	油蒿、禾草、短花 针茅	银灰旋花、短花针茅、 中亚紫菀木
植被总盖度(%)	6.14 <sup>c</sup>	18.11 <sup>b</sup>	40.23 <sup>a</sup>	36.44 <sup>a</sup>	35.48 <sup>a</sup>
草本盖度(%)	1.26 <sup>c</sup>	5.22 <sup>bc</sup>	8.02 <sup>b</sup>	8.96 <sup>b</sup>	29.86 <sup>a</sup>
地上植被生物量( $\text{kg}/100\text{m}^2$ )	0.92 <sup>c</sup>	20.95 <sup>b</sup>	37.9 <sup>a</sup>	23.05 <sup>b</sup>	14.84 <sup>b</sup>
与地带性植被的相似性	0.00	0.20	0.28	0.50	1
0~60 cm 土壤水分(%)	2.97 <sup>b</sup>	1.92 <sup>c</sup>	1.46 <sup>d</sup>	1.79 <sup>c</sup>	5.59 <sup>a</sup>
土壤容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.56 <sup>a</sup>	1.51 <sup>b</sup>	1.49 <sup>c</sup>	1.37 <sup>d</sup>	1.35 <sup>e</sup>
沙粒含量(%)	98.48 <sup>a</sup>	94.62 <sup>a</sup>	77.52 <sup>b</sup>	68.18 <sup>c</sup>	49.64 <sup>d</sup>
粘粒含量(%)	0.87 <sup>c</sup>	1.70 <sup>c</sup>	4.34 <sup>b</sup>	6.65 <sup>b</sup>	12.59 <sup>a</sup>
土壤有机质(%)	0.143 <sup>d</sup>	0.203 <sup>c</sup>	0.466 <sup>b</sup>	0.508 <sup>a</sup>	0.574 <sup>a</sup>
土壤全氮(%)	0.013 <sup>c</sup>	0.026 <sup>b</sup>	0.039 <sup>a</sup>	0.043 <sup>a</sup>	0.044 <sup>a</sup>
土壤电导率( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	81.20 <sup>d</sup>	90.50 <sup>c</sup>	123.78 <sup>b</sup>	133.40 <sup>a</sup>	135.69 <sup>a</sup>

## 4.2. 沙漠化逆转过程植被碳储量的恢复演变特征

在石羊河中游,造林恢复 5a、15a 和 25a 沙化土地地上植被碳储量分别达到  $0.41 \text{ Mg/hm}^2$ 、 $1.00 \text{ Mg/hm}^2$  和  $0.69 \text{ Mg/hm}^2$ ,地上植被碳储量随沙漠化逆转过程呈现先增加后降低趋势。5a、15a 和 25a 地上植被碳储量达到流动沙丘的 5.6 倍、13.7 倍和 9.5 倍,甚至超过地带性植被,其中 15a 达到地带性植被的 2.6 倍(图 1)。与地上植被碳储量不同,地下植被储量随沙漠化逆转过程逐渐增大,5a、15a 和 25a 地下植被碳储量分别达到流动沙丘的 12.9 倍、31.2 倍和 31.4 倍,但仅占到地带性植被的 10.9%、26.2%和 26.4%,显著低于地带性植被(图 1)。

流动沙丘固沙造林后,固沙植被总储量也随沙漠化逆转过程呈现先增加后降低的趋势(图 1)。5a、15a 和 25a 植被碳储量分别达到  $0.70 \text{ Mg/hm}^2$ 、 $1.71 \text{ Mg/hm}^2$  和  $1.41 \text{ Mg/hm}^2$ ,是流动沙丘的 7.3 倍、17.9 倍和 14.7 倍,其中 0~15 年呈现正增长,15~25 年呈现负增长,造林恢复 25 年固沙植被平均固碳速率仅达到  $0.05 \text{ Mg/hm}^2 \cdot \text{a}$ 。5a、15a 和 25a 固沙植被碳储显著低于地带性植被,仅占到地带性植被的 22.6%、54.9%和 45.3%。地上植被与地下植被碳储量相比,造林恢复 15 年之前沙化土地地上植被碳储量大于地下植被,25 年基本接近,但地带性植被地上植被碳储量显著低于地下植被。

## 4.3. 沙漠化逆转过程土壤有机碳储量的恢复演变特征

### 4.3.1. 土壤有机碳密度的空间分布特征

在石羊河中游,沙漠化逆转不同恢复阶段垂直层次土壤有机碳密度呈现明显波动变化,而且波动程度随造林恢复年限呈现增强趋势,这可能与物种根系、凋落物以及生物分布以及风沙土反复沉积有关(图 2)。尽管不同层次土壤有机碳密度呈现明显波动变化,但是均以 0~20 cm 土壤层次最高。0~20 cm 土壤有机碳密度随逆转过程逐渐增加,5a、15a 和 25a 沙化土地分别达到  $0.25 \text{ Mg/hm}^2$ 、 $0.49 \text{ Mg/hm}^2$  和  $0.53 \text{ Mg/hm}^2$ ,是流动沙丘的 1.4 倍、2.7 倍和 3.0 倍,但依然明显低于地带性植被区,仅占地带性植被区的 31.9%、62.5%和 67.7%。

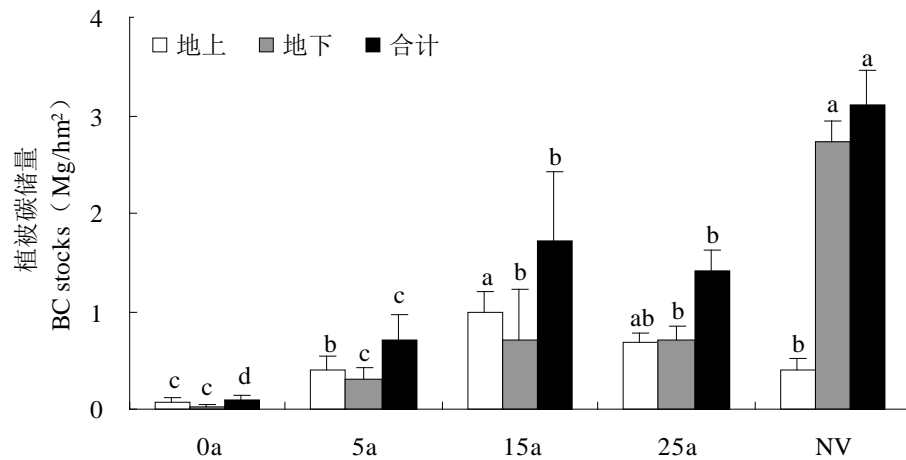
### 4.3.2. 土壤有机碳储量动态变化

在石羊河中游,造林恢复 5a、15a、25a 沙化土地 0~1 m 深度土壤有机碳储量分别达到  $8.70 \text{ Mg/hm}^2$ 、 $11.90 \text{ Mg/hm}^2$  和  $18.78 \text{ Mg/hm}^2$ ,随沙漠化逆转过程逐渐增加。沙漠化逆转不同恢复阶段土壤有机碳储量总体差异显著,但是 15 年后差异不显著(图 3)。与流动沙丘相比,5a、15a 和 25a 土壤有机碳储量分别增加了 29.5%、77.1%和 179.5%,呈现持续增加趋势,造林恢复 25 年平均土壤固碳速率达到  $0.48 \text{ Mg/hm}^2 \cdot \text{a}$ 。显然,固沙造林显著提高了沙化土地土壤的碳固存能力,但是 5a、15a 和 25a 土壤有机碳储量仅占到地带性植被区的 35.8%、49.0%和 77.4%,仍存在较大的固碳潜力。

5a、15a 和 25a 表层 0~5 cm 土壤有机碳储量分别达到  $0.89 \text{ Mg/hm}^2$ 、 $1.98 \text{ Mg/hm}^2$  和  $2.0 \text{ Mg/hm}^2$ ,随沙漠化逆转过程逐渐增加。沙漠化逆转不同恢复阶段土壤有机碳储量总体差异显著,但是 15a 与 25a 间无显著差异,与 0~1 m 深度明显不同(图 3)。与流动沙丘相比,5a、15a 和 25a 表层土壤有机碳储量显著增大,分别增加了 62.7%、264.3%和 267.8%,造林恢复 15 年前增长快速,15 年到 25 年增长缓慢。与地带性植被区相比,5a、15a 和 25a 表层土壤有机碳储量仅占到 24.2%、39.4%、88.2%和 89.0%,表层土壤较其他层次增长较快,造林恢复 15 年后沙化土地与地带性植被样地间无显著差异。

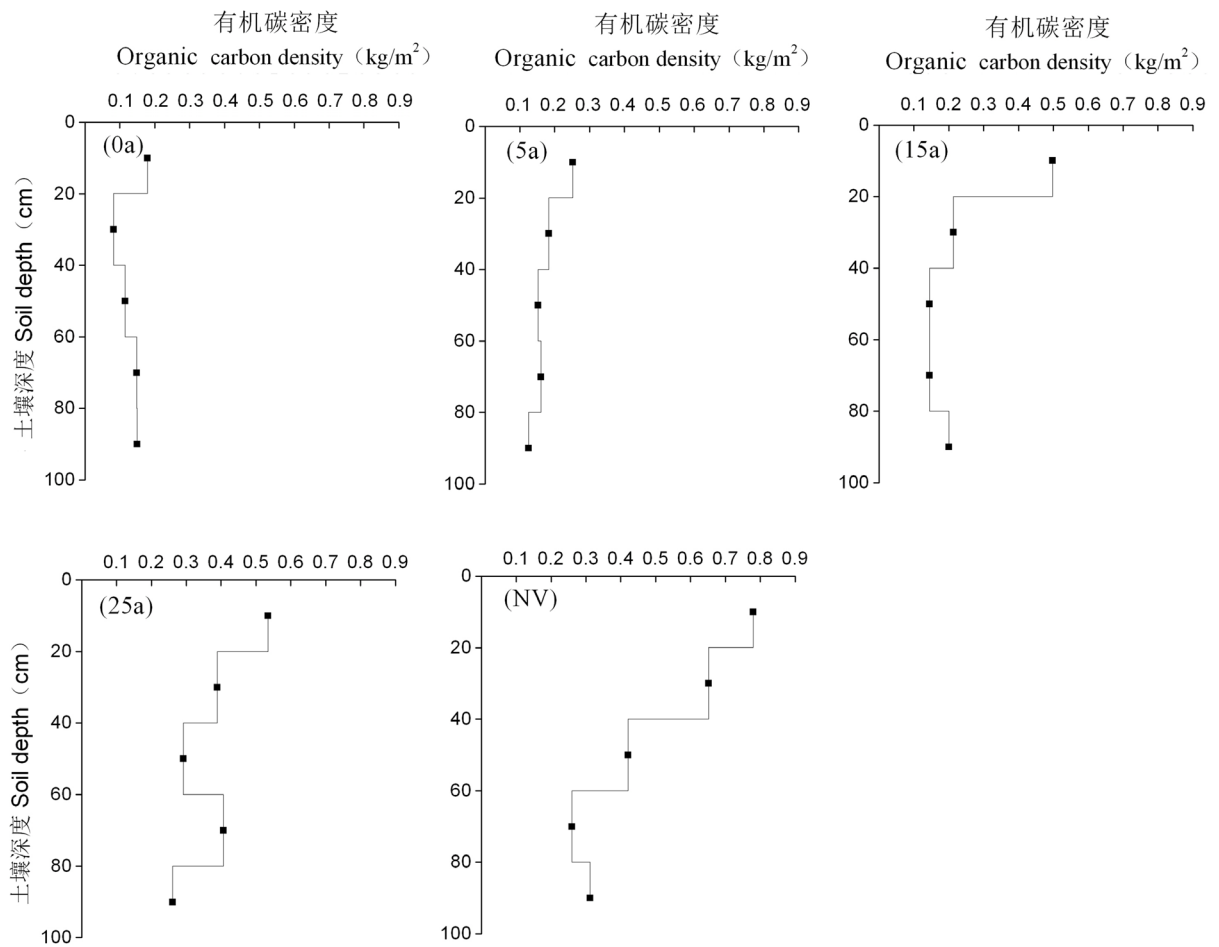
## 4.4. 沙漠化逆转过程系统有机碳储量的恢复演变特征

在石羊河中游,造林恢复 5a、15a、25a 沙化土地系统有机碳储量分别达到  $9.40 \text{ Mg/hm}^2$ 、 $13.61 \text{ Mg/hm}^2$  和  $20.19 \text{ Mg/hm}^2$ ,随沙漠化逆转过程逐渐增加(图 4)。沙漠化逆转不同恢复阶段植被-土壤系统有机碳储



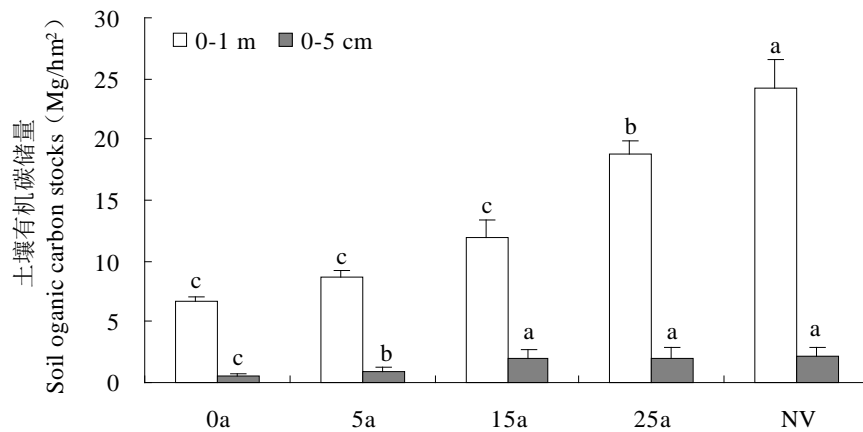
**Figure 1.** Dynamic changes of biomass carbon (BC) stocks of aboveground, belowground and total vegetation of the desertified lands in the reversion process of desertification (Different letters indicates significant differences at 0.05 level, the same below)

**图 1.** 沙漠化逆转过程地上、地下植被碳储量的动态变化(不同字母表示  $P < 0.05$  差异显著, 下同)



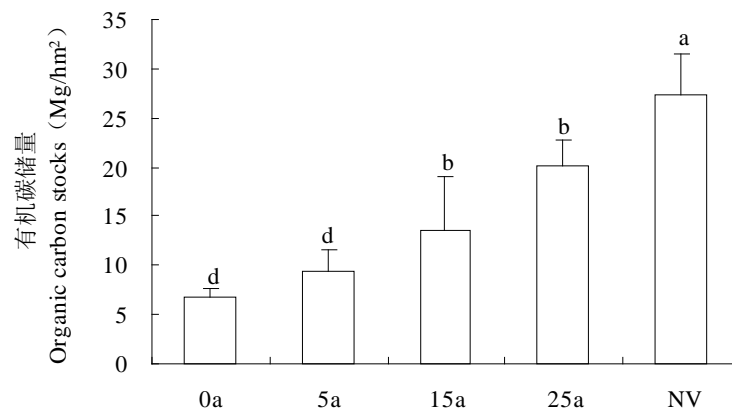
**Figure 2.** Vertical changes in soil organic carbon (SOC) densities at the different soil layers of the desertified lands in the reversion process of desertification

**图 2.** 沙漠化逆转过程土壤有机碳密度的垂直变化



**Figure 3.** Dynamic change of SOC stocks at the layer of 0 - 5 cm and 0 - 1 m of the desertified lands in the reversion process of desertification

**图 3.** 沙漠化逆转过程 0~5 cm、0~1 m 土壤有机碳储量的动态变化



**Figure 4.** Dynamic changes of SOC stocks of the desertified land ecosystem in the reversion process of desertification

**图 4.** 沙漠化逆转过程系统有机碳储量的动态变化

量总体差异显著，但是 15a 和 25a 间差异不显著。与流动沙丘相比，5a、15a 和 25a 系统有机碳储量分别增加了 37.9%、99.6% 和 196.1%，呈现持续增加趋势，造林恢复 25 年的植被 - 土壤系统平均固碳速率达到  $0.53 \text{ Mg/hm}^2 \cdot \text{a}$ 。尽管沙漠化逆转过程的碳固存能力显著提高，但 5a、15a 和 25a 系统有机碳储量仅占到地带性植被区的 34.3%、49.7% 和 73.7%，仍存在较大的增长潜力。

在流动沙丘，土壤有机碳储量占到沙地生态系统有机碳储量的 98.6%，是流动沙丘的主要碳库。5a、15a 和 25a 土壤有机碳储量占到生态系统有机碳储量的比例分别达到 92.5%、87.5% 和 93.0%，显然土壤碳库所占的比例随沙漠化逆转过程先降低后有所增加，但土壤依然是沙漠化逆转过程不同恢复阶段的主要碳库。在地带性植被区，土壤有机碳储量占到生态系统有机碳储量的 88.6%，低于流动沙丘、造林恢复 5 年及 25 年沙化土地，土壤也是草原化荒漠生态系统的主要碳库。

#### 4.5. 沙漠化逆转过程沙化土地有机碳储量的影响因素

在植被因子中，沙漠化逆转过程沙化土地固沙植被碳储量与植被物种丰富度和草本盖度呈显著正相关关系，与植被生物量呈极显著正相关关系；而土壤有机碳储量和生态系统有机碳储量仅与物种丰富度和草本盖度呈显著相关关系(表 2)。在 0~1 m 土壤因子中，植被碳储量仅与土壤粉粒含量、粘粒含量、有



**Table 2.** Correlation between organic carbon stocks and environmental factors in the reversion process of desertification  
**表 2.** 沙漠化逆转过程沙化土地碳储量与环境因子间的相关系数

植被与土壤性状指标	植被碳储量 (Mg/hm <sup>2</sup> )	土壤有机碳储量 (Mg/hm <sup>2</sup> )	生态系统有机碳储量 (Mg/hm <sup>2</sup> )
物种丰富度	0.840 <sup>*</sup>	0.826 <sup>*</sup>	0.840 <sup>*</sup>
植被生物量(kg/100m <sup>2</sup> )	0.861 <sup>**</sup>	0.664	0.701
草本盖度(%)	0.845 <sup>*</sup>	0.813 <sup>*</sup>	0.829 <sup>*</sup>
灌木盖度(%)	0.138	0.014	0.031
植被总盖度(%)	0.423	0.562	0.551
土壤含水率 (%)	0.530	0.584	0.585
土壤容重(g/cm <sup>3</sup> )	-0.667	-0.867 <sup>**</sup>	-0.851 <sup>*</sup>
沙粒含量(%)	-0.814 <sup>*</sup>	-0.866 <sup>**</sup>	-0.871 <sup>**</sup>
粉粒含量(%)	0.814 <sup>*</sup>	0.870 <sup>**</sup>	0.875 <sup>**</sup>
粘粒含量(%)	0.813 <sup>*</sup>	0.847 <sup>*</sup>	0.855 <sup>*</sup>
土壤孔隙度(%)	0.607	0.840 <sup>*</sup>	0.819 <sup>*</sup>
土壤有机质(%)	0.820 <sup>*</sup>	0.896 <sup>**</sup>	0.898 <sup>**</sup>
土壤全氮(%)	0.792 <sup>*</sup>	0.863 <sup>**</sup>	0.865 <sup>**</sup>
土壤电导率(μs/cm)	0.797 <sup>*</sup>	0.833 <sup>*</sup>	0.839 <sup>*</sup>
土壤 pH	0.224	0.378	0.363

注: \*\*为  $p < 0.01$  极显著; \*为  $p < 0.05$  显著。

机质、全氮和土壤电导率呈显著正相关关系,与土壤沙粒含量显著负相关关系;土壤有机碳储量与土壤容重和沙粒含量呈极显著负相关关系,与土壤粉粒含量、有机质和全氮呈极显著正相关关系,与土壤粘粒含量、孔隙度和电导率显著正相关关系;生态系统有机碳储量与土壤沙粒含量呈极显著负相关关系,与土壤粉粒含量、有机质和全氮呈极显著正相关关系,与土壤容重、粘粒含量、孔隙度和电导率呈显著相关关系(表 2)。初步认为,影响植被碳储量的主要因子为植被生物量,其次为物种丰富度、草本盖度以及土壤有机质、粒度、全氮和电导率;影响土壤有机碳储量的主要因子为土壤有机质、全氮、容重、沙粒含量和粉粒含量,其次为物种丰富度、草本盖度以及土壤粘粒含量、孔隙度和电导率;影响生态系统有机碳储量的主要因子为土壤有机质、全氮、沙粒含量和粉粒含量,其次为物种丰富度、草本盖度以及土壤容重、粘粒含量、孔隙度和电导率。

## 5. 讨论

植被是陆地生态系统的重要组成部分,是决定陆地生态系统中碳盈亏与平衡的主要因素之一,是生态系统碳固存的基础[18]。本研究发现,石羊河流域中游固沙植被碳储量随沙漠化逆转过程先增加后降低,造林恢复 5 年、15 年和 25 年沙化土地植被碳储量较流动沙丘增长了 6.3 倍、16.9 倍和 13.7 倍,固沙造林加速了沙漠化逆转进程,也快速提高了植被的碳储量,该结论与其他树种和区域造林研究相一致[9] [19] [20]。例如,在退耕农田、牧草地上造林,人工林植被碳储量均显著增加,其中 14 龄松树、湿地松、杉木等速生树种人工林植被碳储量比草地高出数十倍[19] [20] [21]。但是,造林恢复 5 年、15 年和 25 年沙化土地植被碳储量仅占到地带性植被的 22.6%、54.9%和 45.3%,特别是地下植被碳储量显著低于地带性植被,更低于松、杨等速生树种的人工林,显然沙漠化逆转过程不同恢复阶段固沙植被碳储量显著低于森林、防护林和经济林果等其他植被类型[19] [20] [21]。同时,沙漠化逆转过程 25 年的平均植被固碳速

率仅达到  $0.05 \text{ Mg/hm}^2\cdot\text{a}$ ，远远低于森林植被的固碳速率  $0.70\sim 4.0 \text{ Mg/hm}^2\cdot\text{a}$  [22]。另外，本研究发现沙漠化逆转过程固沙植被碳储量随造林恢复年限先增加后降低，而其他研究发现造林后植被碳储量随林分年龄增加而增加，直到森林成熟后，不再明显地积累碳[23]，这应该与人工固沙林造林树种随生态水文环境变化而发生的演替变化有关。固沙造林后，灌木植物对深层土壤水分的过度消耗以及沙化土地表层结皮发育导致的水分浅层化，使得人工营造的花棒、梭梭等深根系灌木衰败，从而引起固沙林地上植被生物量的降低[12]。

土壤碳库是植被碳库的 2~3 倍，巨大的储量导致了土壤碳储量的任何微小波动都比陆地生态系统其它碳库更容易影响陆地生态系统碳循环以及大气  $\text{CO}_2$  [24]。本研究发现，石羊河中游沙漠化逆转不同恢复阶段土壤有机碳储量均富集在地表 0~20 cm 地层，流动沙丘 0~1 m 有机碳密度达到  $0.67 \text{ kg/m}^2$ ，造林恢复 25 年固定沙丘平均有机碳密度达到  $1.88 \text{ kg/m}^2$ ，尽管有了显著的增长，但只占到全国平均土壤有机碳密度  $9.15 \text{ kg/m}^2$  的 1/5，更不到全球森林生态系统土壤碳密度的 1/20 [25] [26]。另外，石羊河流域中游沙化土地 0~1 m 土壤有机碳储量随沙漠化逆转过程持续增加，造林恢复 15 年前阶段与流动沙丘无显著差异，造林恢复 25 年阶段仅占到地带性植被区的 73.4%。在石羊河中游，固沙造林对土壤碳储量的影响规律与其他区域造林项目对土壤碳储量影响研究结果不同，多数研究认为造林后土壤碳储量通常是最初下降，然后才开始积累[9]。Paul 等发现[27]，在造林后初始 5 年，土壤碳下降约 3.64%，之后会逐渐增加，约 30 年后，土壤表面 30 cm 的碳量通常高于最初的农业土壤。造林后土壤碳变化也受造林前土地利用方式的影响，Guo 等发现从草地到人工林的土地利用变化，土壤碳储量下降 10%，而从农田到人工林的土地利用变化，土壤碳储量增加 18% [2]。

本研究发现，造林恢复 25 年沙地生态系统的平均固碳速率仅达到  $0.53 \text{ Mg/hm}^2\cdot\text{a}$ ，但远低于草原生态系统的固碳速率  $0.30\sim 2.47 \text{ Mg/hm}^2\cdot\text{a}$  以及我国人工林的平均固碳速率  $1.41 \text{ Mg/hm}^2\cdot\text{a}$  [22]。同时，固沙造林降低了沙化土地土壤有机碳所占比例，但是土壤有机碳储量所占比例依然在 87.5% 以上，土壤依然是沙漠化逆转不同恢复阶段的主要碳库。这与前期不同生态区域或生态系统研究结论相一致[28] [29] [30]。Hughes 等研究发现森林土壤有机碳储量所占比例仅为 51%，而草原土壤有机碳储量则达到 94% [28]；而 Jaramillo 等研究发现森林土壤有机碳储量所占比例仅为 37%~54%，草原土壤有机碳储量则达到 90% [29]；李玉强等研究发现科尔沁沙地土壤有机碳所占比例为 86%~93% [30]。显然，干旱沙区土壤有机碳库所占比例更高于半干旱与半湿润沙漠地区，特别是森林、草原等区域，这与干旱区降水少，植被生产力低密切相关。

陆地生态系统碳储量受植被、气候、土壤属性以及土地利用方式的变化等多种自然因素和人文因素的综合影响[24]。本研究发现，影响石羊河中游沙漠化逆转不同恢复阶段固沙植被、土壤和生态系统碳储量的主要因子有植被生物量、土壤有机质、全氮、容重和沙粒含量等。植被的物种组成在某种程度上控制着土壤有机碳分解的速度，从而影响土壤有机碳密度的高低[31]。通过人为干预进行植被恢复可以充分利用土壤—植物复合系统的功能改善局部环境，促进生物物种多样性的形成，随着植被恢复的进程，植被覆盖度增加，植物生长产生的枯枝落叶和根系腐解物在土壤中积累、矿化[32]。Li 等在沙坡头的研究发现，固沙造林恢复半个世纪后，使该区域的生态环境得到了改善，沙面的固定为许多动植物的繁衍创造了条件，植被区地表隐花植物结皮经过 50 年的拓殖和演变，其主要组成中含有真菌类达 9 种，苔藓 5 种，藻类 24 种[33]。土壤 pH 值、温度、湿度、粘粒含量、土壤 C/N、微生物量等因素均影响土壤有机碳含量及其在土壤中的稳定性。当土壤氮素增加时，可以促进微生物的活动，提高土壤有机质的分解速率，从而降低土壤有机碳含量[34]。土壤中的有机碳量随粉粒和粘粒含量的增加而增加，粘粒含量和有机碳含量呈显著的正相关性。强酸性土壤环境能抑制微生物的活动而使有机碳分解速率减小，高温、高湿条件使土壤有机碳矿化分解速率加快，累积量减少[35]。土壤侵蚀对沙化土地土壤碳库有重要影响，并进

而影响到陆地生态系统碳库以及全球碳循环[26] [36]。风力侵蚀作用可以引起大规模的土壤有机碳的空间重分布和 CO<sub>2</sub> 释放, 对土壤有机碳库的演变具有重要影响[26] [37]。合理的固沙造林快速恢复了固沙植被, 有效降低了风速, 控制了土壤风蚀[38], 这也是本研究中沙化土地碳储量增加的重要原因之一, 但是不同固沙造林技术措施及风蚀程度对碳固定的影响及其机制还有待进一步研究。

## 6. 结论

石羊河流域中游固沙造林恢复 25 年初步实现了沙漠化逆转, 不同恢复阶段固沙植被、土壤和生态系统有机碳储量较流动沙丘均有显著提高, 特别以地上植被和表层 0~5 cm 土壤有机碳储量提高最为明显。其中, 固沙植被碳储量随沙漠化逆转过程先增加后降低, 25 年平均固碳速率仅达到 0.05 Mg/hm<sup>2</sup>·a; 0~1 m 土壤和生态系统有机碳储量均随沙漠化逆转过程持续增加, 25 年平均固碳速率分别达到 0.48 Mg/hm<sup>2</sup>·a 和 0.53 Mg/hm<sup>2</sup>·a。土壤是沙漠化逆转不同恢复阶段的主要碳库, 土壤有机碳储量占系统有机碳储量的比例均在 87.5% 以上。与地带性植被相比, 造林恢复 25 年沙化土地地下植被和深层土壤碳储量仍存在较大的增长潜力。尽管沙漠化逆转过程不同恢复阶段沙地生态系统碳库和固碳速率远低于森林、湿地和草原等生态系统, 但固沙造林依然是干旱地区固定大气 CO<sub>2</sub> 于沙地植被和土壤中的有效途径。

## 基金项目

自然科学基金项目(31660232, GSDC201505); 中国博士后科学基金项目(2012T50162); 国家科技惠民计划项目(2013GS620202)和国家科技支撑计划(2012BAD16B0203)资助。

## 参考文献 (References)

- [1] IPCC (2002) The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. In: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Cambridge University Press, Cambridge, 185-237.
- [2] Guo, L.B. and Gifford, R.M. (2002) Soil Carbon Stocks and Land Use Change: A Meta Analysis. *Global Change Biology*, **8**, 345-360. <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x>
- [3] Lal, R. (2004) Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*, **304**, 1623-1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
- [4] Lal, R. (2003) Offsetting Global CO<sub>2</sub> Emissions by Restoration of Degraded Soils and Intensification of World Agriculture and Forestry. *Land Degradation & Development*, **14**, 309-322. <https://doi.org/10.1002/ldr.562>
- [5] Smith, P., Powlson, D., Glendining, M., et al. (1997) Potential for Carbon Sequestration in European Soils: Preliminary Estimates for Five Scenarios Using Results from Long-Term Experiments. *Global Change Biology*, **3**, 67-79. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1997.00055.x>
- [6] Paustian, K., Six, J., Elliott, E.T., et al. (2000) Management Options for Reducing CO<sub>2</sub> Emissions from Agricultural Soils. *Biogeochemistry*, **48**, 147-163. <https://doi.org/10.1023/A:1006271331703>
- [7] Lal, R. (2005) Forest Soils and Carbon Sequestration. *Forest Ecology and Management*, **220**, 242-258. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.015>
- [8] Michael, L.W., Christina, M.L. and Gerard, K. (2011) What Is the Impact of Afforestation on the Carbon Stocks of Irish Mineral Soils? *Forest Ecology and Management*, **262**, 1589-1596. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.07.007>
- [9] 史军, 刘纪远, 高志强, 等. 造林对陆地碳汇影响的研究进展[J]. 地理科学进展, 2004, 23(2): 58-67.
- [10] Vesterdal, L., Ritter, E. and Gundersen, P. (2002) Change in Soil Organic Carbon Following Afforestation of Former Arable Land. *Forest Ecology and Management*, **169**, 137-147. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00304-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00304-3)
- [11] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳储量[J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(1): 72-80.
- [12] 李新荣, 王涛. 沙地生态系统研究[M]//李文华, 主编. 生态学研究展望. 北京: 气象出版社, 2004: 625-649.
- [13] Wang, T. (2004) Progress in Sandy Desertification Research of China. *Journal of Geographical Sciences*, **14**, 387-400. <https://doi.org/10.1007/BF02837482>
- [14] 国家林业局. 中国荒漠化和沙化状况公报[EB/OL]. <http://www.forestry.gov.cn/main/65/content-835177.html>, 2015-12-29.

- [15] Duan, Z.H., Xiao, H.L., Dong, Z.B., *et al.* (2001) Estimate of Total CO<sub>2</sub> Output from Desertified Sandy Land in China. *Atmospheric Environment*, **35**, 5915-5921. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00406-X](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00406-X)
- [16] 吴冬秀, 韦文珊, 张淑敏. 陆地生态系统生物观测规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007: 46-75.
- [17] 李怒云. 林业碳汇计量[M]. 北京: 中国林业出版社, 2009.
- [18] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J]. 植物学报, 2001, 43(9): 967-973.
- [19] Silver, W.L., Ostertag, R. and Lugo, A.E. (2000) The Potential for Carbon Sequestration through Reforestation of Abandoned Tropical Agricultural and Pasture Lands. *Restoration Ecology*, **8**, 394-407. <https://doi.org/10.1046/j.1526-100x.2000.80054.x>
- [20] Laclau, P. (2003) Biomass and Carbon Sequestration of Ponderosa Pine Plantations and Native Cypress Forests in Northwest Patagonia. *Forest Ecology and Management*, **180**, 317-333. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00580-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00580-7)
- [21] 李家永, 袁小华. 红壤丘陵区不同土地资源利用方式下有机碳储量的比较研究[J]. 资源科学, 2001, 23(5): 73-76.
- [22] 王效科, 刘魏魏, 逯非, 等. 陆地生态系统固碳 166 问[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 10-33.
- [23] Alexeyev, V., Birdsey, R. and Stakanov, V. (1995) Carbon in Vegetation of Russian Forests: Methods to Estimate Storage and Geographical Distribution. *Water Air & Soil Pollution*, **82**, 271-282.
- [24] 李甜甜, 季宏兵, 孙媛媛, 等. 我国土壤有机碳储量及影响因素研究进展[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2007, 28(1): 92-97.
- [25] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 35-43.
- [26] 胡云锋, 王绍强, 杨风亭. 风蚀作用下的土壤碳库变化及在中国的初步估算[J]. 地理研究, 2004, 23(6): 760-768.
- [27] Paul, K.I., Polglase, P.J. and Nyakuengama, J.G. (2002) Change in Soil Carbon Following Afforestation. *Forest Ecology and Management*, **168**, 241-257. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00740-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00740-X)
- [28] Hughes, R.F., Kauffman, J.B. and Cummings, D.L. (2002) Dynamics of Aboveground and Soil Carbon and Nitrogen Stocks and Cycling of Available Nitrogen along a Land-Use Gradient in Rondônia, Brazil. *Ecosystems*, **5**, 244-259. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0069-1>
- [29] Jaramillo, V.J., Kauffman, J.B., Lylian, R.R., *et al.* (2003) Biomass, Carbon, and Nitrogen Pools in Mexican Tropical dry Forest Landscapes. *Ecosystems*, **6**, 609-629. <https://doi.org/10.1007/s10021-002-0195-4>
- [30] 李玉强, 赵哈林, 移小勇, 等. 沙漠化过程中科尔沁沙地植物-土壤系统碳氮储量动态[J]. 环境科学, 2006, 27(4): 635-640.
- [31] 宫占元, 刘春梅, 王艳杰. 土壤有机碳库及其控制因子的研究进展[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2006, 18(3): 10-12.
- [32] 曹丽花, 赵世伟. 土壤有机碳库的影响因素及调控措施研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(3): 177-182.
- [33] Li, X.R., Zhou, H.Y., Wang, X.P., *et al.* (2003) The Effects of Sand Stabilization and Revegetation on Cryptogam Species Diversity and Soil Fertility in the Tengger Desert, Northern China. *Plant and Soil*, **251**, 237-245. <https://doi.org/10.1023/A:1023023702248>
- [34] Liao, L.P., Gao, H. and Wang, S.L. (2000) The Effect of Nitrogen Addition on Soil Nutrient Leaching and the Decomposition of Chinese Fir Leaf Litter. *Acta Phytocologica Sinica*, **24**, 34-39.
- [35] Nichols, J.D. (1984) Relation of Organic Carbon to Soil Properties and Climate in the Southern Great Plain. *Soil Science Society of America Journal*, **48**, 1382-1384. <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800060037x>
- [36] Lal, R. (2003) Soil Erosion and the Global Carbon Budget. *Environment International*, **29**, 437-450. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00192-7](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00192-7)
- [37] 王绍强, 刘纪远, 于贵瑞. 中国陆地土壤有机碳蓄积量估算误差分析[J]. 应用生态学报, 2003, 14(5): 797-802.
- [38] 王继和, 马全林, 刘虎俊, 等. 干旱区沙漠化土地逆转植被的防风固沙效益研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(6): 903-909.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2163-3967，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[ag@hanspub.org](mailto:ag@hanspub.org)