

刘 冲,洪立洲,郁 凯,等. 利于苏北沿海滩涂土壤有机碳固定的绿肥粉垄耦合种植模式研究[J]. 江苏农业科学,2024,52(5):216-221.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.05.032

# 利于苏北沿海滩涂土壤有机碳固定的绿肥粉垄耦合种植模式研究

刘 冲<sup>1</sup>,洪立洲<sup>1</sup>,郁 凯<sup>1</sup>,董 静<sup>1</sup>,陈环宇<sup>1</sup>,彭 昊<sup>2</sup>,卢明海<sup>3</sup>,邢锦城<sup>1</sup>

(1. 江苏沿海地区农业科学研究所,江苏盐城 224002; 2. 江苏省沿海开发集团有限公司,江苏南京 210000;

3. 盐城市农业水利发展投资集团有限公司,江苏盐城 224002)

**摘要:**为探索利于苏北沿海滩涂土壤有机碳固定的绿肥粉垄耦合种植模式,在苏北沿海滩涂设置:裸地+常规深耕(15 cm)(对照)、裸地+粉垄(20 cm)、裸地+粉垄(30 cm)、裸地+粉垄(40 cm)、种植苕子+常规深耕翻压(15 cm)、种植苕子+粉垄翻压(20 cm)、种植苕子+粉垄翻压(30 cm)、种植苕子+粉垄翻压(40 cm) 8 种植模式试验,研究对比 8 种模式土壤有机碳固定表现以及下季玉米产量。结果表明:粉垄耕作降低了沿海滩涂土壤容重,提高了土壤>2.00 mm、>0.25~2.00 mm 粒级土壤团聚体质量百分数,降低了 0.05~0.25 mm、<0.05 mm 粒级团聚体质量百分数。粉垄耕作可使沿海滩涂土壤物理结构,尤其是大团聚体结构得以有效改善。绿肥粉垄耦合模式下,土壤养分及可溶性有机碳、活性有机碳含量显著提高,土壤碳库指数、碳库活度指数和碳库管理指数显著上升,土壤>2.00 mm、>0.25~2.00 mm 粒级土壤团聚体质量百分数提高,0.05~0.25 mm、<0.05 mm 粒级团聚体质量百分数降低,且各粒级团聚体中有机碳含量、>2.00 mm、>0.25~2.00 mm 团聚体中有机碳贡献率显著提高,玉米产量显著增加,其中,种植苕子+粉垄翻压(30 cm)模式可较大程度地结合绿肥提供有机碳,粉垄耕作改善土壤物理结构的优势,最有利于滩涂土壤有机碳的积累、固定以及玉米产量的增加,从而达到改善沿海滩涂土壤碳封存、提高滩涂土壤耕地质量、实现沿海滩涂地区增产增收的目的。该模式操作简单、见效快,可在苏北沿海滩涂区域推广使用。

**关键词:**沿海滩涂;绿肥;粉垄;有机碳固定

**中图分类号:**S152.4;S158.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)05-0216-06

江苏省沿海滩涂资源丰富,海岸线近 1 000 km,苏北沿海地区拥有我国 1/4 以上的滩涂面积<sup>[1]</sup>。

但沿海滩涂土壤具有高盐分、低养分、高矿化度等特点,且土壤板结、质地较差,难以维持一般作物正常生长发育。维护和提高沿海滩涂土壤质量对保障粮食生产,实现农业可持续发展具有重大意义。

土壤有机碳的动态平衡是反映土壤质地、农作物产量以及经济效益的重要指标<sup>[2]</sup>。我国绿肥种植具有悠久历史。绿肥翻压还田后腐解、释放养分可成为优质有机肥源,可有效提高有机质输入土壤的速率<sup>[3]</sup>。因此,在苏北沿海滩涂地区种植绿肥具

收稿日期:2023-04-06

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(21)3169];江苏省沿海集团科技“揭榜挂帅”项目(编号:2022YHTDJB014)。

作者简介:刘 冲(1984—),男,江苏盐城人,硕士,副研究员,从事耐盐植物栽培利用研究。E-mail:cellbio@163.com。

通信作者:邢锦城,硕士,副研究员,从事土壤肥料与盐土农业工程相关研究。E-mail:sdauxxx@163.com。

high yielding pole type native pea (*Pisum sativum* L.) variety *Dentami* of Sikkim, India [J]. Current Research in Microbial Sciences, 2021, 2: 100068.

[66]王丹丹,王清明. 丁香假单胞菌的分子生物学研究进展[J]. 西北农业学报, 2017, 26(4): 487-496.

[67]Sotelo J P, Oddino C, Giordano D F, et al. Effect of *Thymus vulgaris* essential oil on soybeans seeds infected with *Pseudomonas syringae* [J]. Physiological and Molecular Plant Pathology, 2021, 116: 101735.

[68]Bernal M P, Alburquerque J A, Moral R. Composting of animal

manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(22): 5444-5453.

[69]周爱松,王凤春,刘向东,等. 禽畜粪便与板栗废弃物不同配比混合堆肥的理化特征研究[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(15): 117-120.

[70]Wang P, Changa C M, Watson M E, et al. Maturity indices for composted dairy and pig manures [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(5): 767-776.

[71]萨日娜,陈立新,王 娟,等. 不同有机堆肥对番茄产量、品质和土壤性状的影响[J]. 北方园艺, 2020(22): 42-47.

有培肥滩涂土壤、改善沿海生态环境的重要作用。

粉垄耕作是一种新型农田深旋耕技术。该技术利用专用机械垂直螺旋型钻头,将土壤旋磨粉碎并自然悬浮成垄。该技术一方面简化了耕地作业的程序,在不打乱土层的情况下打破犁底层,一次作业同时完成深松、深耕与整地,另一方面可有效改善土壤耕层结构、团粒结构以及促进作物生长<sup>[3]</sup>。绿肥粉垄耦合是通过粉垄技术将绿肥翻压还田,进一步全耕层切割粉碎土壤,深耕深松,使土壤膨松成垄的种植模式。该模式可耦合绿肥固氮、固碳特性及粉垄耕作促进土壤物理结构及有机碳的扭转效应,从而使耕作层土壤的各级活性物质得到有效运移,其潜在利用机制得到有效激发,利用有效的线性变化规律进一步有效提升耕地质量<sup>[4]</sup>。

苏北沿海滩涂土壤养分低、质地差,绿肥粉垄耦合模式一方面可以通过绿肥翻压增加土壤养分,另一方面,苏北沿海滩涂土壤水盐运动较复杂,粉垄耕作可通过改变土壤耕层结构、团粒结构,进一步调控滩涂土壤水、盐、肥等要素的时空分布,在土壤耕作层建立一个低盐环境,改善土壤碳封存,供作物进行正常的生命活动。目前,有关绿肥粉垄耦合模式的研究还不多。因此,本试验以绿肥为作物,对绿肥翻压+粉垄耕作等种植模式进行了研究,从土壤有机碳积累和固定角度进行评价,以期为利于苏北沿海滩涂土壤有机碳固定的种植模式推广提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试绿肥为豆科野豌豆属的苕子。粉垄机械使用立式螺旋形旋削刀具入土,一次性全耕层切割粉碎土壤,深耕深松,使之膨松成垄。

### 1.2 试验地点及试验设计

试验地点位于江苏省沿海滩涂农业工程技术研究中心(地理位置 32°59'N, 120°49'E)。供试土壤为轻质沙壤。土壤盐分含量为 0.2%~0.3%。试验共设置 8 个种植模式: A(裸地+常规深耕 15 cm, 对照)、B(裸地+粉垄 20 cm)、C(裸地+粉垄 30 cm)、D(裸地+粉垄 40 cm)、E(种植苕子+常规深耕翻压 15 cm)、F(种植苕子+粉垄翻压 20 cm)、G(种植苕子+粉垄翻压 30 cm)、H(种植苕子+粉垄翻压 40 cm)。每个模式重复 3 次,小区设计为 72 m<sup>2</sup>(9 m×8 m),试验小区随机区组排列。

绿肥(苕子)在 2021 年 12 月上旬播种。采用

条播方式,苕子播种量为 4 kg/667 m<sup>2</sup>。2022 年 5 月 26 日将绿肥(苕子)进行粉垄翻压,下季种植玉米。2022 年 11 月 28 日采用“S”形五点取样方法采集每个试验小区土壤样品,土壤深度为 0~20 cm。为防止土壤样品被搅动及挤压,土壤样品在采集后直接分成直径 5 cm 左右的土块,并剔除植物残渣,以用于各项指标的测定。

### 1.3 土壤测定项目和方法

土壤容重采用环刀法测定;有机质含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定;碱解氮含量采用碱解-扩散法测定;速效磷含量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;有效钾含量采用醋酸铵浸提-原子吸收分光光度法测定<sup>[5]</sup>。

土壤水稳性团聚体测定:采用湿筛法。采集土壤样品,依据纹理筛成长约 2 cm 的土块。称取 50 g 土壤样品至土壤团粒分析仪,土壤粒级分为 4 个层次: > 2.00 mm、> 0.25~2.00 mm、0.05~0.25 mm、< 0.05 mm<sup>[6]</sup>。

土壤可溶性有机碳含量采用总有机碳分析仪测定;土壤活性有机碳(LOC)含量采用 KMnO<sub>4</sub> 氧化法<sup>[7]</sup>测定。团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献率计算采用白怡婧等的方法<sup>[8]</sup>。碳库管理指数(CPMI)、碳库指数(CPI)、碳库活度指数(AI)、碳库活度(A)计算公式采用张蛟等的方法<sup>[2]</sup>。

### 1.4 数据分析

运用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 17.0 软件进行数据处理、统计及相关性分析。Duncan's 法多重比较( $\alpha=0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同种植模式下沿海滩涂土壤基本理化性状及养分变化

从表 1 可以看出,不同种植模式下,沿海滩涂土壤基本理化性状及养分变化趋势不一致。粉垄(B、C、D)模式下,土壤容重低于 A 模式,绿肥粉垄耦合模式(F、G、H)下土壤容重继续降低,G 模式的土壤容重比 A 模式下降 9.6%。B、C、D 模式下,土壤养分含量较 A 模式变化不显著,F、G、H 模式提高了土壤养分含量,G 模式的土壤有机质含量、碱解氮含量、速效磷含量比 A 模式分别提高 25.5%、10.5%、8.7%。由此说明,粉垄耕作可使沿海滩涂土壤容重下降,而绿肥粉垄耦合可进一步提高土壤养分含量。这与杨雪等的研究结果<sup>[9]</sup>较为一致。

表 1 不同种植模式下沿海滩涂土壤基本理化性状及养分变化

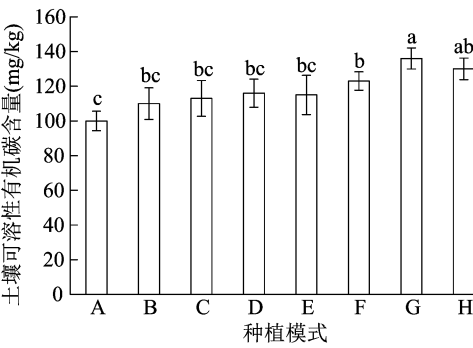
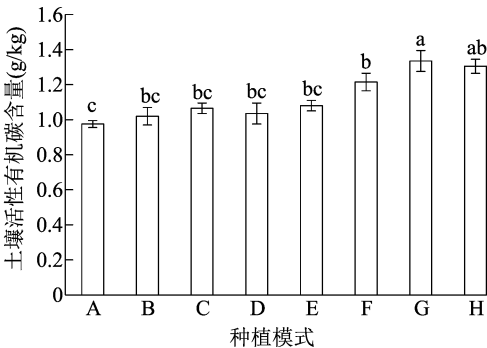
模式	土壤容重 (g/cm <sup>3</sup> )	有机质含量 (%)	碱解氮含量 (mg/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	有效钾含量 (mg/kg)
A	1.46a	1.53c	85.9c	10.3c	97.5b
B	1.43ab	1.52c	85.6c	10.2c	98.2b
C	1.39b	1.50c	86.3bc	10.6c	97.9b
D	1.38b	1.53c	86.1bc	9.9c	98.9ab
E	1.39b	1.76bc	91.9b	10.6bc	98.6ab
F	1.35bc	1.88b	93.6ab	10.9b	98.9ab
G	1.32c	1.92a	94.9a	11.2a	99.3a
H	1.31c	1.92a	94.1ab	11.0ab	98.7ab

注：同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。下表同。

2.2 不同种植模式下沿海滩涂土壤可溶性有机碳及土壤活性有机碳含量变化

由图 1 可知,A 模式下土壤养分含量最低。粉垄(B、C、D)模式下,土壤可溶性有机碳含量及土壤活性有机碳含量较 A 模式有所提高,但差异不显著。绿肥粉垄耦合(F、G、H)模式下土壤有机碳含

量显著提升,以土壤活性有机碳含量为例,F、G、H 模式比 A 模式分别提高 24.6%、36.9%、33.8%。这主要是由于绿肥含有新鲜的有机碳,翻压还田后,大量养分及活性有机碳促进了土壤原有有机碳转变成易被作物吸收利用的活性有机碳。而粉垄耕作又对土壤有机碳的转变具有促进作用<sup>[10]</sup>。



柱上不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。 下图同  
图1 不同种植模式下沿海滩涂土壤可溶性有机碳及土壤活性有机碳含量变化

2.3 不同种植模式下沿海滩涂土壤碳库管理指数变化

由表 2 可知,不同种植模式下,沿海滩涂土壤 CPMI 变化趋势不一致。粉垄(B、C、D)模式下,CPI、AI 和 CPMI 较 A 模式有所提高,但变化不显著。绿肥粉垄耦合(F、G、H)模式下,土壤 CPI、AI 和 CPMI 较 A 模式提高幅度加大。G、H 模式下,CPI 比 A 模式均提高 25.4%,CPMI 比 A 模式分别提高 38.8%、35.7%。这充分说明了沿海滩涂绿肥粉垄耦合模式有利于改善滩涂土壤质量,提高土壤肥力。

2.4 不同种植模式下沿海滩涂土壤水稳性团聚体组成变化

由图 2 可知,粉垄(B、C、D)模式提高了土壤 > 2.00 mm、>0.25 ~2.00 mm 粒级土壤团聚体质量

表 2 不同种植模式下沿海滩涂土壤碳库管理指数变化

模式	非活性 有机碳 (g/kg)	碳库指数 (CPI)	碳库活度 (AI)	碳库活度 指数 (A)	碳库管理 指数 (CPMI)
A	7.899c	1.000b	0.123a	1.000a	100.000c
B	7.796c	1.012b	0.130a	1.065a	107.848bc
C	8.215bc	1.045b	0.129a	1.049a	109.675bc
D	7.839c	1.025b	0.132ab	1.073a	110.037bc
E	7.960bc	1.019b	0.135b	1.098ab	111.907bc
F	9.689b	1.228ab	0.135b	1.102ab	124.871b
G	9.801a	1.254a	0.136b	1.105b	138.750a
H	9.831a	1.254a	0.132ab	1.081ab	135.689a

百分数,降低了 0.05 ~0.25 mm、<0.05 mm 粒级的团聚体质量百分数。绿肥粉垄耦合(F、G、H)模式下土壤 >2.00 mm、>0.25 ~2.00 mm 粒级土壤团聚

体质量百分数提高,0.05~0.25 mm、<0.05 mm 粒级的团聚体质量百分数降低。F、G、H 模式下,>2.00 mm 粒级土壤团聚体质量百分数比 A 模式

分别提高 85.4%、122.5%、119.1%,<0.05 mm 粒级土壤团聚体质量百分数比 A 模式分别降低 20.6%、31.8%、29.9%。

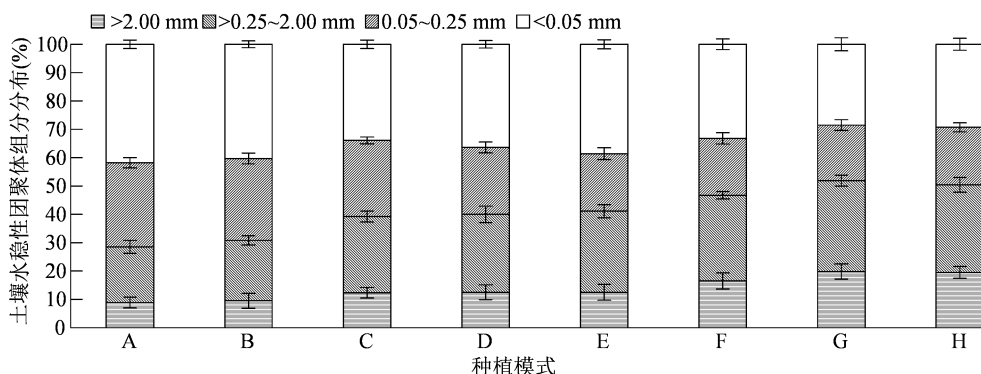


图2 不同种植模式下沿海滩涂土壤水稳性团聚体组成变化

## 2.5 不同种植模式下沿海滩涂土壤水稳性团聚体中有机碳分布变化

由图 3 可知,各种种植模式下土壤有机碳在不同粒径团聚体中的分布存在差异。粉垄(B、C、D)模式下团聚体中有机碳含量较 A 模式变化不明显。绿肥粉垄耦合(F、G、H)模式下团聚体中有机碳含

量提高。不同粒径团聚体中均以 G 模式下的有机碳含量最高。与 A 模式相比,G 模式下>2.00 mm、>0.25~2.00 mm、0.05~0.25 mm、<0.05 mm 团聚体有机碳含量分别提高了 26.5%、36.8%、15.9%、18.9%。可见,绿肥粉垄耦合能明显增加各粒径团聚体有机碳含量,尤其是大团聚体中有机碳含量。

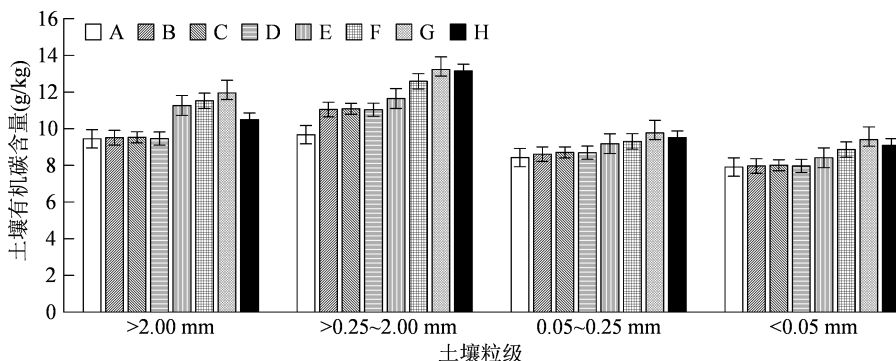


图3 不同种植模式下沿海滩涂土壤水稳性团聚体中有机碳含量分布变化

## 2.6 不同种植模式下各粒级水稳性团聚体中有机碳贡献率变化

由图 4 可知,不同种植模式下不同粒径团聚体的有机碳贡献率差异较大。粉垄(B、C、D)模式下,>2.00 mm 团聚体中有机碳贡献率较 A 模式变化不明显,>0.25~2.00 mm 团聚体中有机碳贡献率有所提高,有机碳贡献率可分别达到 26.7%、34.3%、34.2%。绿肥粉垄耦合(F、G、H)模式下,>2.00 mm、>0.25~2.00 mm 团聚体中有机碳贡献率均提高,尤其是 G 模式下,>2.00 mm、>0.25~2.00 mm 团聚体中有机碳贡献率可达到 18.8%、38.1%。可见,绿肥粉垄耦合种植模式有利于提高

大团聚体中,尤其是>0.25~2.00 mm 团聚体中的有机碳贡献率,其中以 G 模式增幅最大。

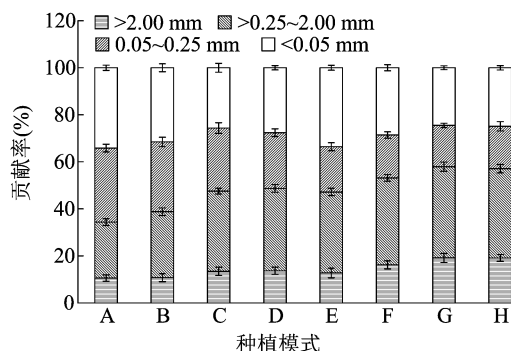


图4 不同种植模式下各粒级水稳性团聚体中有机碳贡献率变化

## 2.7 不同种植模式下玉米产量变化

由图 5 可知,不同种植模式下玉米产量存在差异。粉垄(B、C、D)模式下玉米产量较 A 模式呈上升趋势,绿肥粉垄耦合(F、G、H)模式下玉米产量显著增加。与 A 模式相比,F、G、H 模式下玉米产量分别增加 15.6%、19.2%、17.8%。由此可见,粉垄耕作可以通过改善土壤耕层状况以及土壤的透水透气能力,从而为玉米的生长提供良好的环境。而绿肥粉垄耦合模式又给玉米的生长发育提供了养分,从而实现作物的增产增收,而绿肥粉垄耦合模式中以粉垄 30 cm (G 模式)增产效应较好。

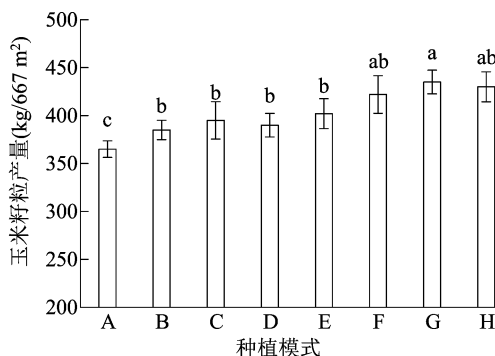


图5 不同种植模式下玉米产量变化

## 3 讨论与结论

苏北沿海滩涂资源丰富,总面积约为  $6.87 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,占我国滩涂总面积的 1/4,且每年仍以几米至几十米的速度淤涨。但滩涂土壤盐分高,养分低,尤其是土壤物理结构差、有机质含量低、养分供应不足,不能满足作物的正常生长<sup>[11]</sup>。

土壤有机碳是土壤碳库的主要组分,约占陆地碳总量的 70%。有机碳的活性组分,如活性有机碳、微生物量碳等与土壤有效养分、物理性状等密切相关,可以敏感地反映出土壤有机碳的有效性,是评价土壤质量的重要指标<sup>[12-13]</sup>。研究表明,绿肥还田能够显著增加土壤碳的存储,尤其是土壤碳库的活性组分。这主要是因为绿肥翻压还田后腐解,释放大量有机物成为优质有机肥源,土壤有机养分库容增加,速效养分吸纳能力得以提高。因此,种植绿肥并翻压成为作物高产、稳产和农业可持续发展的重要措施<sup>[14-15]</sup>。

粉垄耕作既不破坏土层,还可提高作物吸收利用土壤养分的效率。有研究表明,粉垄耕作可显著改善土壤理化性质及养分水平。粉垄耕作后,土壤通透性增强,养分含量增加,土壤物理结构改善,土

壤团聚体含量与稳定性得以提高<sup>[16-17]</sup>。本研究中,粉垄耕作降低了沿海滩涂土壤容重,提高了土壤  $>2.00 \text{ mm}$ 、 $>0.25 \sim 2.00 \text{ mm}$  粒级土壤团聚体质量百分数,降低了  $0.05 \sim 0.25 \text{ mm}$ 、 $<0.05 \text{ mm}$  粒级的团聚体质量百分数,提高了下季玉米产量。土壤学将粒径  $0.25 \sim 10 \text{ mm}$  的团聚体称为大团聚体,含量越高,说明土壤团聚性越好; $<0.25 \text{ mm}$  的团聚体称为微团聚体,这一级别团聚体机械稳定性较差,在土壤中所占比例越高,说明土壤愈分散<sup>[18]</sup>。本研究可以说明,粉垄耕作可使沿海滩涂土壤物理结构,尤其是大团聚体结构得以有效改善。

绿肥粉垄耦合模式采用粉垄机械切割土壤,并同步实现绿肥粉碎还田,提高了土壤养分,改善了土壤物理环境<sup>[19]</sup>。本研究中,绿肥粉垄耦合模式下土壤容重显著降低,土壤养分含量显著提升,尤其是土壤有机碳含量。种植苕子+粉垄翻压(30 cm)模式下,土壤活性有机碳含量提高了 36.9%。研究表明,土壤活性有机碳与 CPMI、CPI、AI 密切相关。CPMI、CPI、AI 既可以准确反映土壤碳封存总量的运移,还可以系统地反映土壤碳封存组成部分及结构的激发机制<sup>[2, 20-22]</sup>。本研究中,绿肥粉垄耦合(F、G、H)模式下,沿海滩涂 CPI、AI 和 CPMI 显著提高。种植苕子+粉垄翻压(30 cm) G 模式下,CPMI 比 A 模式提高 38.8%。

土壤有机碳的固定是重要的固碳措施,而土壤团聚过程是土壤固碳最重要的途径,因此土壤团聚体和有机碳关系极为密切。土壤团聚体是由矿物颗粒和有机物质结合形成,具有不同尺度的多孔结构,对土壤有机碳具有保护作用,与土壤的抗蚀能力和固碳容量密切相关。研究表明,表土中约 90% 有机碳位于团聚体内,有机碳含量的提高可增强土壤结构稳定性,非常有利于土壤团聚体结构的形成<sup>[23-24]</sup>。本研究中,绿肥粉垄耦合(F、G、H)模式下土壤  $>2.00 \text{ mm}$ 、 $>0.25 \sim 2.00 \text{ mm}$  粒级土壤团聚体质量百分数提高, $0.05 \sim 0.25 \text{ mm}$ 、 $<0.05 \text{ mm}$  粒级的团聚体质量百分数降低,且各粒级团聚体中有机碳含量提高, $>2.00 \text{ mm}$ 、 $>0.25 \sim 2.00 \text{ mm}$  团聚体中有机碳贡献率也提高。其中,种植苕子+粉垄翻压(30 cm)(G)模式下  $>2.00 \text{ mm}$  粒级土壤团聚体质量百分数比 A 模式提高 85.3%、 $<0.05 \text{ mm}$  粒级土壤团聚体质量百分数比 A 模式降低 19.3%; $>2.00 \text{ mm}$ 、 $>0.25 \sim 2.00 \text{ mm}$ 、 $0.05 \sim 0.25 \text{ mm}$ 、 $<0.05 \text{ mm}$  团聚体有机碳含量分别提高了 26.5%、36.8%、

15.9%、18.9%。 $>2.00\text{ mm}$ 、 $>0.25\sim2.00\text{ mm}$  团聚体中有机碳贡献率达到 18.8%、38.1%。

由此可见,苏北沿海滩涂绿肥粉垄耦合模式有利于土壤有机碳固定,分析其原因,主要是因为粉垄耕作通过调控滩涂土壤水、盐、肥等要素的时空分布,提高了土壤大团聚体比例,改善了土壤物理结构,有助于优化沿海滩涂土壤的碳纵向迁移过程。而绿肥的种植及还田将土壤新的碳储量进行更新和积累,增加了土壤的有机碳含量,提高了土壤有机碳库存,这是有机资源对土壤碳的直接作用<sup>[25]</sup>。而绿肥粉垄耦合模式将以上效应进一步优化,土壤 $>2.00\text{ mm}$ 、 $>0.25\sim2.00\text{ mm}$  粒级土壤团聚体质量百分数提高,大团聚体中有机碳含量及有机碳贡献率亦提高,且绿肥粉垄耦合模式中以种植苕子+粉垄翻压(30 cm)模式效果最好。

种植模式的推广必然离不开经济效益的评价。本研究中,粉垄耕作可提高玉米产量,而绿肥粉垄耦合模式使玉米产量显著提高,绿肥粉垄耦合 G 模式下玉米产量较 A 模式增加 19.2%,极大地提高了作物经济效益。这是由于绿肥翻压提供养分,粉垄耕作通过改善滩涂土壤的物理结构状态,建立适宜的生存环境,促进玉米对养分的吸收利用,从而实现增产、增收的目的,这与石伟业等在水稻上的研究结果<sup>[26]</sup>较为一致。

绿肥粉垄耦合-种植苕子+粉垄翻压(30 cm)模式可较大程度地结合绿肥提供有机碳,粉垄耕作改善土壤物理结构的优势,有利于苏北沿海滩涂土壤有机碳的积累、固定以及玉米产量的增加,从而达到改善沿海滩涂土壤碳封存,提高滩涂土壤耕地质量,实现沿海滩涂地区增产增收的目的。该模式操作简单、见效快,可在苏北沿海滩涂区域上推广使用。

#### 参考文献:

- [1]李雪盈,濮励杰,许艳,等.江苏沿海典型滩涂围垦区土壤有机碳时空异质性[J].土壤,2020,52(2):365-371.
- [2]张蛟,崔士友,胡帅栋,等.水稻种植对沿海滩涂土壤有机碳及碳库管理指数的影响[J].中国土壤与肥料,2020(3):107-112.
- [3]苏港,王怡针,吴锡冬,等.还田时期对绿肥用油菜腐解与养分释放规律的影响[J].中国土壤与肥料,2022(12):192-199.
- [4]郑佳舜,胡钧铭,韦燕燕,等.绿肥粉垄耦合对稻田耕层土壤团粒结构特征的影响[J].南方农业学报,2020,51(11):2653-2664.
- [5]朱小梅,王建红,温祝桂,等.不同绿肥品种提升滩涂生地土壤养分及酶活性效应的比较[J].江苏农业科学,2019,47(12):307-310.
- [6]Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. Soil

- Science Society of America Journal,1998,62(5):1367-1377.
- [7]郑佳舜,胡钧铭,韦燕燕,等.绿肥还田对粉垄稻田土壤活性有机碳的影响[J].土壤,2021,53(2):368-374.
- [8]白怡婧,刘彦伶,李渝,等.长期不同轮作模式对黄壤团聚体组成及有机碳的影响[J].土壤,2021,53(1):161-167.
- [9]杨雪,逢焕成,李铁冰,等.深旋松耕作法对华北缺水土壤壤质黏潮土物理性状及作物生长的影响[J].中国农业科学,2013,46(16):3401-3412.
- [10]于维水,王碧胜,王士超,等.长期不同施肥下我国4种典型土壤活性有机碳及碳库管理指数的变化特征[J].中国土壤与肥料,2018(2):29-34.
- [11]朱小梅,洪立洲,邢锦城,等.不同绿肥轮作模式对沿海滩涂土壤的改良效应[J].江苏农业学报,2022,38(6):1510-1516.
- [12]胡雪纯,解文艳,马晓楠,等.长期秸秆还田对旱地玉米土壤有机碳及碳库管理指数的影响[J].中国农学通报,2022,38(34):8-13.
- [13]李金垚,潘雯,王佳,等.黔中石漠化地区水土保持措施对土壤有机碳的影响[J].水土保持学报,2022,36(5):38-43.
- [14]唐红琴,李忠义,曾成城,等.不同绿肥种类和还田量对柑橘园土壤养分的动态影响[J].江苏农业科学,2021,49(16):214-219.
- [15]胡启良,杨滨娟,刘宁,等.绿肥混播下不同施氮量对水稻产量、土壤碳氮和微生物群落的影响[J].华中农业大学学报,2022,41(6):16-26.
- [16]任晓月,陈彦云,梁新华.粉垄耕作对宁夏银北盐碱地土壤养分及玉米产量的影响[J].西南农业学报,2022,35(5):1063-1068.
- [17]张宇,蒋代华,黄金兰,等.粉垄耕作对赤红壤团聚体粒级分布和稳定性的影响[J].生态杂志,2021,40(12):3922-3932.
- [18]张钦,于恩江,林海波,等.连续种植不同绿肥作物耕层的土壤团聚体特征[J].西南农业学报,2019,32(1):148-153.
- [19]郑佳舜,胡钧铭,韦翔华,等.绿肥压青对粉垄稻田土壤微生物量碳和有机碳累积矿化量的影响[J].中国生态农业学报,2021,29(4):691-703.
- [20]杨滨娟,黄国勤,兰延,等.施氮和冬种绿肥对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响[J].应用生态学报,2014,25(10):2907-2913.
- [21]王改玲,李立科,郝明德.长期施肥和秸秆覆盖土壤活性有机质及碳库管理指数变化[J].植物营养与肥料学报,2017,23(1):20-26.
- [22]王雨晴,和江鹏,乔赵崇,等.碳水耦合作用对土壤活性有机碳组分及碳库管理指数的影响[J].江苏农业科学,2022,50(5):199-204.
- [23]张家春,刘盈盈,贺红早,等.土壤团聚体与有机碳固定关系研究进展[J].福建农业学报,2016,31(3):319-325.
- [24]王富华,黄容,高明,等.生物质炭与秸秆配施对紫色土团聚体中有机碳含量的影响[J].土壤学报,2019,56(4):929-939.
- [25]Das B, Chakraborty D, Singh V K, et al. Effect of integrated nutrient management practice on soil aggregate properties, its stability and aggregate-associated carbon content in an intensive rice-wheat system[J]. Soil and Tillage Research,2014,136:9-18.
- [26]石伟业,何文寿,李惠霞,等.粉垄耕作对土壤理化性质和水稻生长及产量的影响[J].江苏农业科学,2023,51(1):232-238.