

刘冲,洪立洲,郁凯,等. 江苏沿海滩涂绿肥种植模式对土壤水稳性团聚体及有机碳含量的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(12):180-186.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.12.025

# 江苏沿海滩涂绿肥种植模式对土壤水稳性团聚体及有机碳含量的影响

刘冲,洪立洲,郁凯,董静,陈环宇,邢锦城

(江苏沿海地区农业科学研究所,江苏盐城 224002)

**摘要:**为了研究江苏沿海滩涂绿肥种植对土壤水稳性团聚体及有机碳含量的影响,采用田间试验种植黑麦草、苕子,分析滩涂土壤理化性质、水稳性团聚体、有机碳养分结构及酶活性的变化。结果表明,在沿海滩涂上种植黑麦草、苕子,可降低土壤容重及土壤水溶性总盐的含量,提高土壤有机质、碱解氮的含量,且随着生长期的延长效果更加明显。种植绿肥提高了沿海滩涂土壤各土层(0~10、10~20 cm) >2.00 mm 粒级土壤团聚体质量百分数;绿肥生长期越长,团聚体质量百分数提高的幅度越大。种植绿肥提高了滩涂地区 >0.25~2.00 mm 粒级的土壤团聚体质量百分数,而降低了 >0.05~0.25 mm、≤0.05 mm 粒级土壤团聚体的质量百分数,且在 ≤0.05 mm 粒级上效果尤为明显。种植绿肥后,各土层(0~10、10~20 cm)土壤微生物生物量碳含量、可溶性有机碳含量随着生长期的延长而明显提高;土壤中蛋白酶活性、土壤蔗糖酶活性随着生长期的延长而明显提高,且以 10~20 cm 土层的酶活性提高幅度较大,种植黑麦草后土壤酶活性的提高幅度大于苕子;土壤中蛋白酶活性与土壤蔗糖酶活性间存在显著相关性,这 2 种酶的活性与土壤团聚体平均质量直径亦存在显著相关性( $P < 0.05$ )。由此表明,种植绿肥黑麦草、苕子,可明显改善江苏沿海滩涂土壤质地,可促进滩涂土壤团聚体的形成,提高团聚体的稳定性,并改善土壤团聚体组分,增加有机碳在土壤团聚体中的储存。

**关键词:**滩涂;绿肥;水稳性团聚体;有机碳;土壤理化性质;酶活性

**中图分类号:**S154.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)12-0180-07

土壤盐渍化是限制农业生产力发展的主要因子之一。我国海岸线绵长,盐碱地总面积达 217.09 万  $\text{hm}^2$ 。江苏是沿海滩涂面积最大的省份,约占全

国滩涂总面积的 1/4,且每年还以 0.13 万  $\text{hm}^2$  的速度向东淤进,这一广袤的滩涂资源是我国东部地区最具潜力、最有价值的土地后备资源<sup>[1-2]</sup>。

绿肥是我国传统的有机肥源,其种植及利用有着悠久的历史。种植绿肥具有多种生态环境效益,可增加土壤有机质来源,培肥耕地地力,促进土壤碳氮固存和微生物代谢<sup>[3]</sup>。研究表明,在滩涂上种植绿肥可明显改善滩涂土壤质地及养分结构<sup>[2]</sup>。提高滩涂土壤利用效率的关键措施包括:(1)降低土壤盐分含量;(2)通过增加有机质,使土壤团聚体

收稿日期:2022-08-23

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(21)3169];江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金(编号:BE2022304)。

作者简介:刘冲(1984—),男,江苏盐城人,硕士,副研究员,主要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,主要从事土壤肥料与盐土农业工程相关研究。E-mail:sdauxxx@163.com。

土壤总氮含量的实验研究[J]. 地理与地理信息科学,2005,21(1):19-22.

[14] 龚绍琦,王鑫,沈润平,等. 滨海盐土重金属含量高光谱遥感研究[J]. 遥感技术与应用,2010,25(2):169-177.

[15] 谢军,潘涛,陈洁梅,等. 血糖近红外光谱分析的 Savitzky-Golay 平滑模式与偏最小二乘法因子数的联合优选[J]. 分析化学,2010,38(3):342-346.

[16] Holland J H. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence[M]. Cambridge: the MIT Press,1992.

[17] 成颢,吴晓华,陈德钊. 基于迭代初始化遗传算法的光谱波段

选择及其在感液多组分测定中的应用[J]. 光谱学与光谱分析,2006,26(10):1923-1927.

[18] 于雷,洪永胜,耿雷,等. 基于偏最小二乘回归的土壤有机质含量高光谱估算[J]. 农业工程学报,2015,31(14):103-109.

[19] Kooistra L, Wehrens R, Leuven R S E W, et al. Possibilities of visible-near-infrared spectroscopy for the assessment of soil contamination in river floodplains[J]. Analytica Chimica Acta, 2001,446(1/2):97-105.

[20] Williams P, Manley M, Antoniszyn J. Near infrared technology: getting the best out of light[M]. Stellenbosch: African Sun Media under the Sun Press imprint,2019.

快速形成,从而提高土壤肥力<sup>[4]</sup>。土壤物理结构的重要组成部分是水稳性团聚体,稳定的水稳性团聚体可有效保护土壤碳的稳定<sup>[5]</sup>。另外,土壤有机碳还充当着“结合剂”的作用,可有效改善土壤团聚体的形成和稳定<sup>[6]</sup>。

目前,有关绿肥的研究大多集中在绿肥轮作制度及栽培利用方式等方面。本研究通过田间试验,从绿肥种植对江苏沿海滩涂土壤水稳性团聚体及有机碳含量的影响等方面进行研究,以期为沿海滩涂土壤的高效利用提供理论依据与技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试绿肥:苕子,豆科野豌豆属;黑麦草,禾本科黑麦草属。

### 1.2 试验地点及试验设计

试验地位于江苏省沿海滩涂农业工程技术研究中心(32°59'N、120°49'E)。供试土壤为轻质沙壤。共设置 3 个处理:对照(裸地)、种植苕子、种植黑麦草。每个处理重复 3 次,小区面积 72 m<sup>2</sup>,随机区组排列。

绿肥在 2021 年 12 月 1 日条播,苕子、黑麦草播种量分别为 4.0、1.5 kg/667 m<sup>2</sup>。2022 年 5 月 26 日收获绿肥地上部分。分别于 2022 年 2 月 2 日(生长期 60 d)、2022 年 4 月 2 日(生长期 120 d)、2022 年 5 月 27 日(生长期 175 d)采集土壤样品。采用“S”形五点取样方法采集土壤样品,每个试验小区分别采集 2 个土壤层次(0~10、10~20 cm)的样品。为了防止被搅动及挤压,采集后直接将土壤样品分成直径约 5 cm 的土块,并剔除植物残渣。

### 1.3 土壤测定项目和方法

土壤容重采用环刀法测定;水溶性盐离子总量采用残渣烘干-质量法测定;有机质含量采用重铬酸钾氧化外加加热法测定;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>[2]</sup>。

采用湿筛法测定土壤水稳性团聚体<sup>[7]</sup>。采集土壤样品,依纹理掰成约 2 cm 的土块。称取 50 g 土壤样品至土壤团粒分析仪上测定,土壤粒级分为 4 个层次,分别为 >2.00、≥0.25~2.00、>0.05~0.25、≤0.05 mm。平均质量直径(MWD, mm)、>0.25 mm 水稳性团聚体含量( $R_{0.25}$ )采用吴宪等的

方法<sup>[8]</sup>测定。土壤可溶性有机碳含量采用总有机碳分析仪测定;土壤微生物生物量碳含量采用三氯甲烷熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>浸提法测定<sup>[9]</sup>。土壤蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定;土壤中性蛋白酶活性采用茚三酮比色法<sup>[10]</sup>测定。

### 1.4 数据分析

运用 Microsoft Excel 2010、SPSS17.0 软件进行数据处理、统计及相关性分析。采用 Duncan's 法进行数据的多重比较( $\alpha=0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 绿肥种植对沿海滩涂土壤基本理化性状及养分的影响

由图 1 可知,种植苕子和黑麦草后,0~10、10~20 cm 土层的土壤容重均小于对照;0~10 cm 土层的土壤容重下降幅度略大于 10~20 cm 土层。由表 1 可知,种植绿肥可降低土壤水溶性总盐含量,提高土壤养分,且随着生长期的延长效果更加明显。与对照相比,绿肥生长 175 d,种植黑麦草可使土壤水溶性总盐含量下降 9.5%,土壤有机质、碱解氮含量分别提高 12.2%、7.0%;种植苕子可使土壤水溶性总盐含量下降 9.5%,土壤有机质、碱解氮含量分别提高 11.5%、4.4%。由此可见,种植绿肥后土壤理化性质得到改善。这主要是由于绿肥种植增加了土壤有机物的投入,而土壤有机物尤其是有机碳的积累有利于土壤团聚体的形成,从而降低土壤容重,提高土壤养分含量<sup>[11]</sup>。

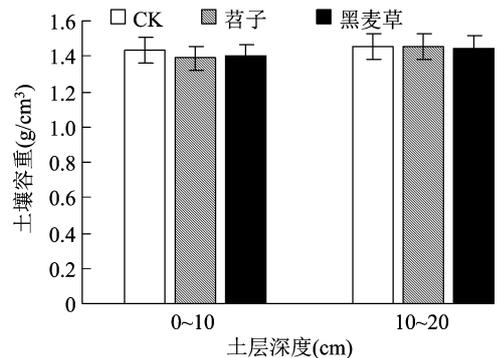


图1 绿肥种植对沿海滩涂土壤容重的影响

### 2.2 绿肥种植对沿海滩涂土壤水稳性团聚体组成的影响

由图 2 可知,沿海滩涂土壤种植绿肥后,相比于对照处理,0~10、10~20 cm 土层 >2.00 mm 粒级的土壤团聚体质量百分数均明显提高,且绿肥生长期越长,质量百分数越大。0~10 cm 土层种植黑麦

表1 绿肥种植对沿海滩涂土壤基本养分的影响

生育期(d)	绿肥品种	土壤水溶性总盐含量(g/kg)	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)
60	对照	2.1a	1.52a	85.6a	10.1a	96.9a
	黑麦草	2.0a	1.53a	86.2a	10.3a	96.2ab
	苕子	2.0a	1.53a	86.9ab	10.4a	96.9a
120	对照	2.1a	1.54a	86.1a	10.2a	96.9a
	黑麦草	1.9a	1.69ab	88.9b	12.3ab	95.4b
	苕子	1.9a	1.59ab	88.1b	12.6ab	96.2ab
175	对照	2.1a	1.56ab	86.3a	10.3a	97.2a
	黑麦草	1.9a	1.75b	92.3c	12.1ab	96.8a
	苕子	1.9a	1.74b	90.1bc	12.9b	97.0a

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

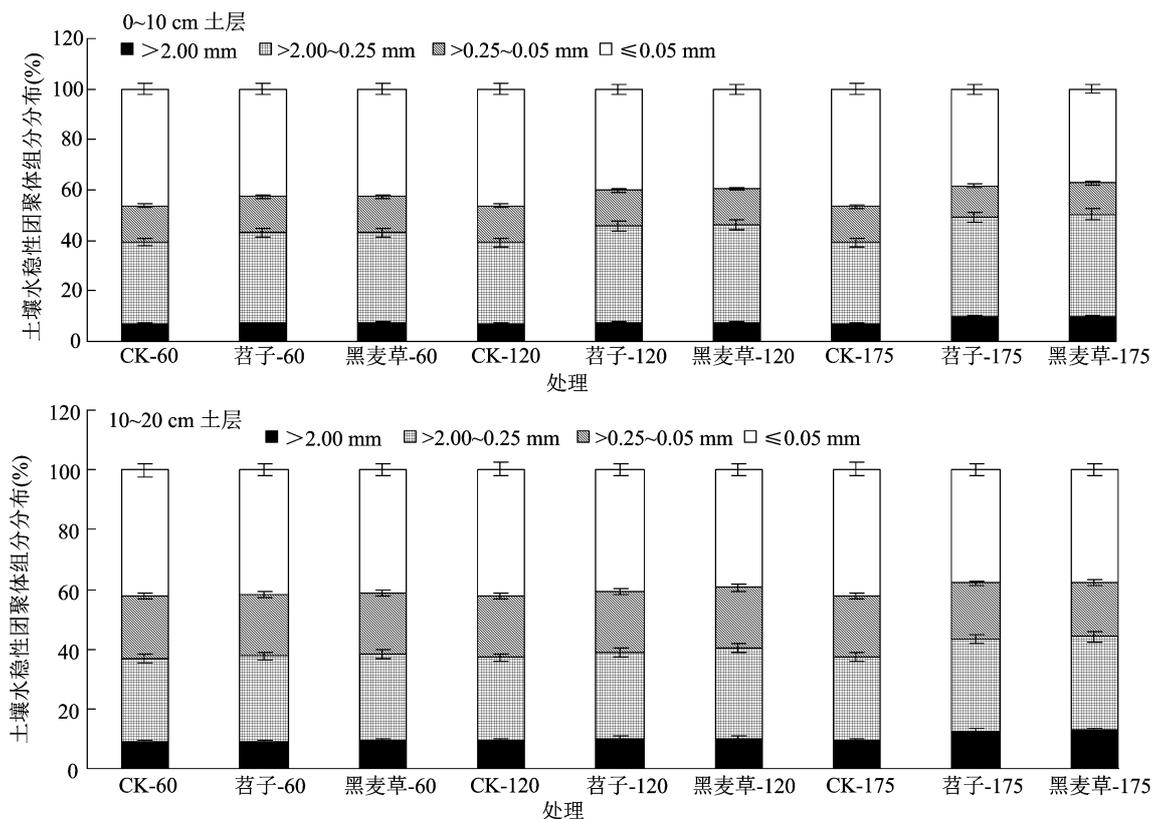


图2 绿肥种植对沿海滩涂土壤水稳性团聚体组成的影响

草 60、120、175 d, >2.00 mm 粒级的土壤团聚体质量百分数分别比对照增加 2.8%、7.1%、39.4%; 10~20 cm 土层种植苕子 60、120、175 d, >2.00 mm 粒级土壤团聚体质量百分数分别比对照增加 2.1%、9.6%、32.6%。

种植绿肥提高了滩涂土壤 >0.25~2.00 mm 粒级的团聚体质量百分数,而降低了 >0.05~0.25 mm 及 ≤0.05 mm 粒级的团聚体质量百分数,且以 ≤0.05 mm 粒级的团聚体尤为显著。0~

10 cm 土层种植黑麦草 60、120、175 d, ≤0.05 mm 粒级的团聚体质量百分数比对照分别降低 8.1%、14.7%、19.7%。10~20 cm 土层种植苕子 60、120、175 d, ≤0.05 mm 粒级的团聚体质量百分数比对照分别降低 1.7%、4.0%、10.1%。

2.3 绿肥种植对沿海滩涂土壤水稳性团聚体稳定性的影响

土壤水稳性团聚体平均质量直径、>0.25 mm 水稳性团聚体含量是表征土壤团聚体大小分布状

况的重要参数,其值越大,土壤团聚度越高,结构稳定性和抗蚀能力越强<sup>[12]</sup>。由图3可知,在滩涂上种植绿肥可明显提高MWD、 $R_{0.25}$ 值,有效提高土壤团聚体稳定性。生长期175 d,10~20 cm土层,种植

苕子、黑麦草可使MWD值提高19.4%、18.9%;0~10 cm土层,种植苕子、黑麦草可使 $R_{0.25}$ 值提高12.3%、11.2%。

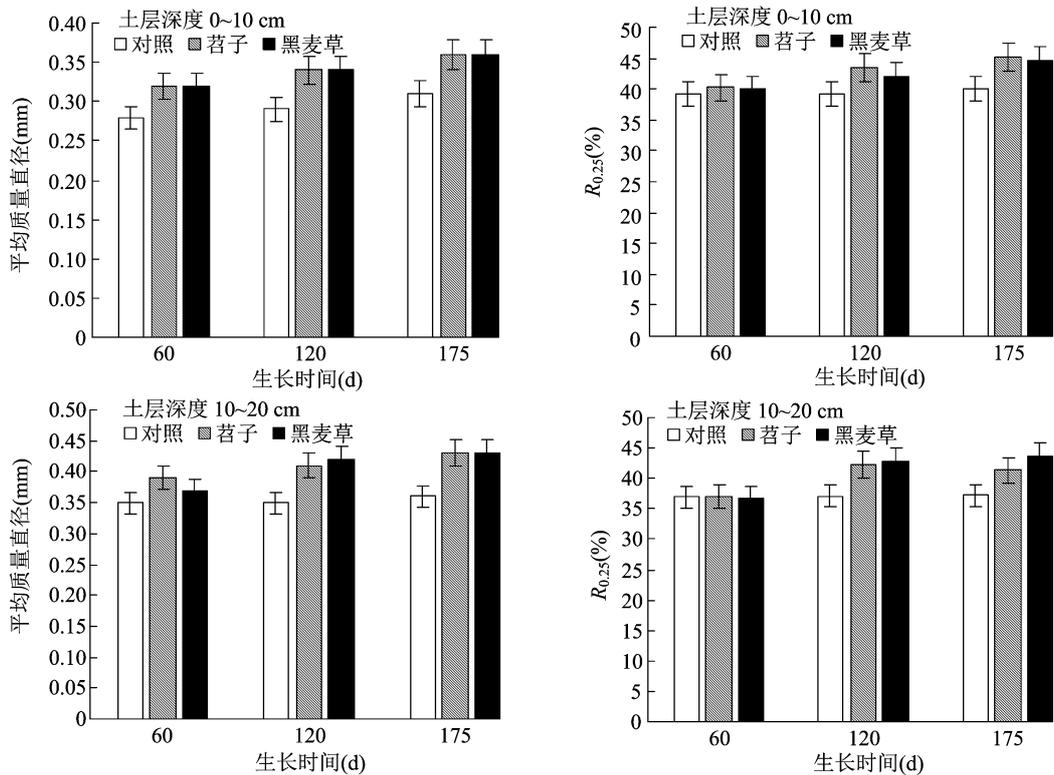


图3 绿肥种植对沿海滩涂土壤水稳性团聚体稳定性的影响

#### 2.4 绿肥种植对沿海滩涂土壤有机碳组分的影响

由图4可知,0~10 cm土层,种植苕子和黑麦草后,土壤微生物生物量碳含量、可溶性有机碳含量均随着生长期的延长而呈逐渐上升的趋势。生长期175 d,0~10 cm土层,种植苕子、黑麦草可使土壤微生物生物量碳含量分别提高49.6%、49.8%,可溶性有机碳含量分别提高25.5%、11.2%;10~20 cm土层,种植苕子、黑麦草可使土壤微生物生物量碳含量分别提高32.2%、33.4%,可溶性有机碳含量分别提高11.6%、4.2%。

#### 2.5 绿肥种植对沿海滩涂土壤酶活性的影响

土壤酶是土壤活性物质及养分迁移转换的有效驱动者。土壤酶的来源主要是土壤微生物和植物根系,可有效催化土壤养分的活化、周转及供应<sup>[13]</sup>。

由图5可知,种植苕子和黑麦草后,土壤中性蛋白酶、土壤蔗糖酶的活性随着生长期的延长而呈逐渐上升的趋势。生长期175 d,0~10 cm土层,种植

苕子、黑麦草可使土壤中性蛋白酶活性分别提高25.1%、30.5%,土壤蔗糖酶活性分别提高20.4%、34.1%;10~20 cm土层,种植苕子、黑麦草可使土壤中性蛋白酶活性分别提高51.6%、58.1%,土壤蔗糖酶活性分别提高34.1%、46.1%。种植黑麦草后土壤酶活性的提高幅度大于苕子,这主要是由于黑麦草根系发达,根际及其微生物的活动较强烈,为土壤生物创造了良好的生境<sup>[14]</sup>。

#### 2.6 土壤团聚体稳定性与有机碳组分、土壤酶活性的相关性分析

由表2可知,沿海滩涂上种植黑麦草后,土壤平均质量直径与土壤中性蛋白酶活性、土壤蔗糖酶活性存在显著相关性( $P < 0.05$ )。土壤中性蛋白酶活性与土壤蔗糖酶活性间也存在显著的相关性( $P < 0.05$ )。而土壤有机碳组分含量之间相关性不显著。由表3可知,沿海滩涂上种植苕子后,土壤团聚体稳定性与有机碳组分含量、土壤酶活性的相关性同黑麦草相似。

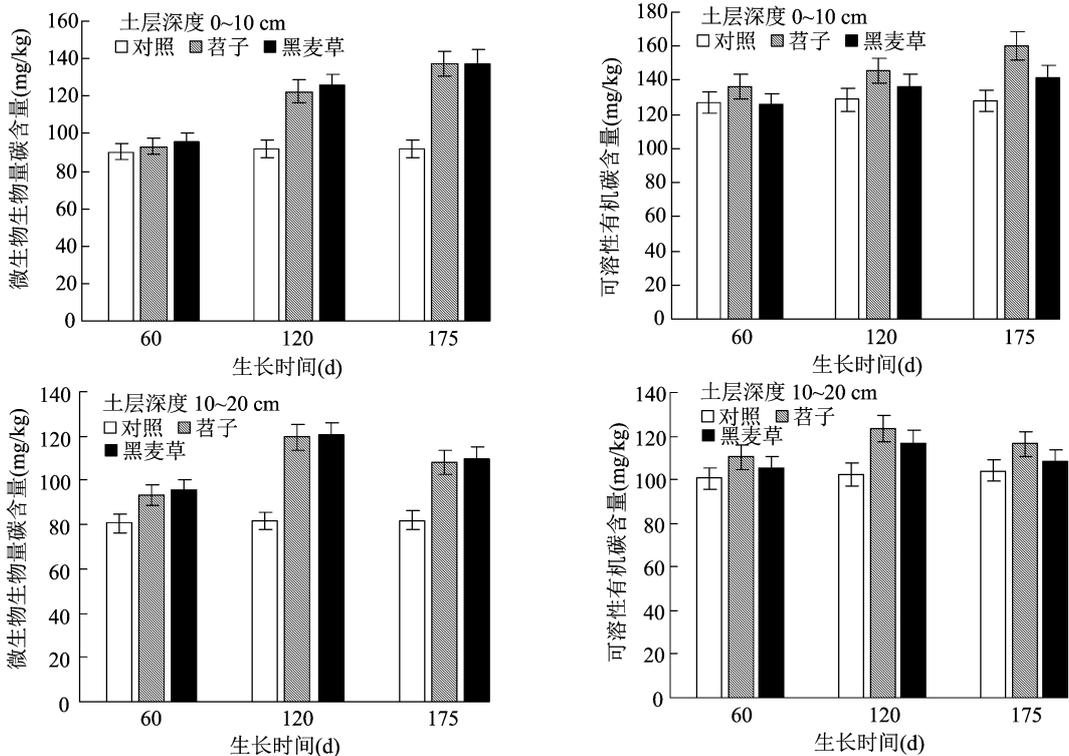


图4 绿肥种植对沿海滩涂土壤有机碳组分的影响

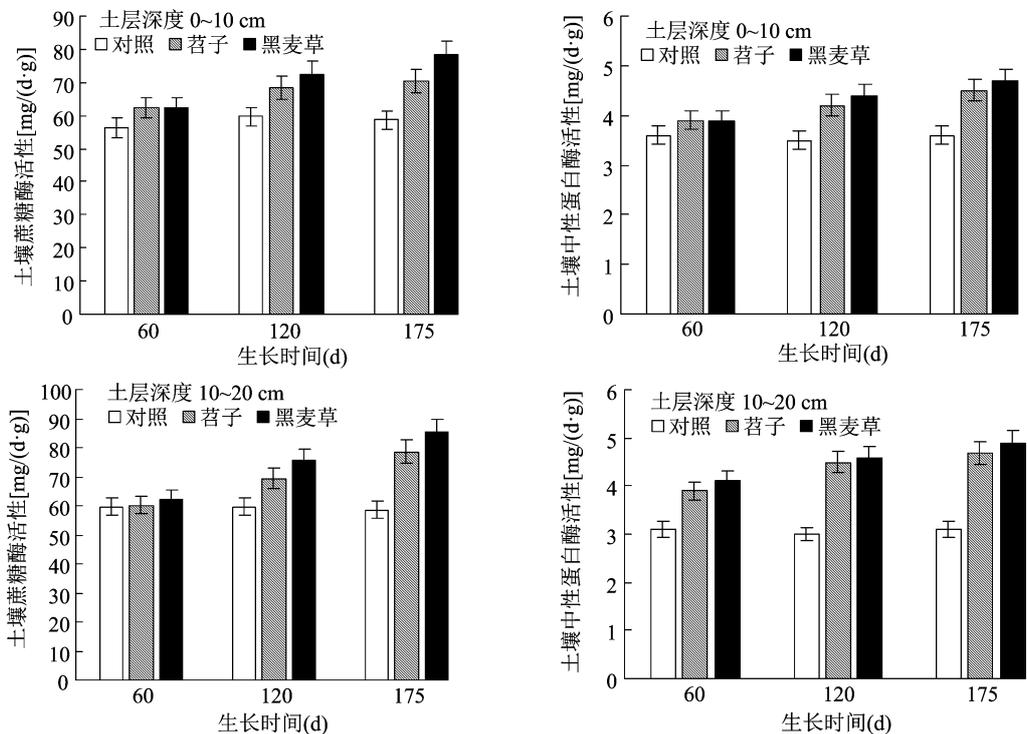


图5 绿肥种植对沿海滩涂土壤酶活性的影响

### 3 讨论

我国沿海滩涂土地资源是国家耕地重要的后备力量。滩涂土壤形成过程复杂,受到海水的影

响,土壤盐分含量高,物理结构差,不能满足植物的正常生长,严重制约当地农业的可持续发展<sup>[15]</sup>。滩涂土壤在改良过程中,土壤水稳性团聚体备受关注<sup>[16]</sup>。土壤团聚体是土壤结构的基本单元,比土粒

表 2 种植黑麦草土壤团聚体稳定性与有机碳组分含量、土壤酶活性的相关性

项目	相关系数			
	土壤可溶性有机碳含量	土壤微生物量碳含量	土壤中蛋白酶活性	土壤蔗糖酶活性
土壤平均质量直径	-0.360	0.150	0.840*	0.860*
土壤蔗糖酶活性	0.085	0.610	0.980*	
土壤中性蛋白酶活性	0.042	0.650		
土壤微生物生物量碳含量	0.700			

注：\* 表示显著相关( $P < 0.05$ )。表 3 同。

表 3 种植苕子土壤团聚体稳定性与有机碳组分含量和土壤酶活性的相关性

项目	相关系数			
	土壤可溶性有机碳含量	土壤微生物量碳含量	土壤中蛋白酶活性	土壤蔗糖酶活性
土壤平均质量直径	-0.360	0.190	0.840*	0.890*
土壤蔗糖酶活性	0.077	0.510	0.940*	
土壤中性蛋白酶活性	0.100	0.650		
土壤微生物生物量碳含量	0.710			

间的结合更强,其数量的多少能反映土壤的肥力状况。稳定的水稳性团聚结构是土壤碳的保护库。绿肥是我国农业生产中的一种重要肥源。在盐碱地上种植绿肥,是改良盐渍土壤的有效途径。研究表明,种植绿肥田菁、草木樨,可明显改善江苏沿海滩涂土壤的物理结构,降低土壤 pH 值与盐分水平,提高土壤有机质与有效氮含量<sup>[17]</sup>。本研究结果表明,种植绿肥可降低土壤容重及土壤水溶性总盐含量,提高土壤有机质、碱解氮的含量。

土壤团聚体影响土壤养分及结构的稳定性。团聚体内的毛管孔隙和各团聚体之间的大孔隙,非常有利于土壤微生物的活动及土壤养分含量的增加。大团聚体更有利于作物生长,是因为大团聚体可以更好地调节土壤通气、土壤持水、土壤养分释放、土壤养分保持之间的矛盾<sup>[18]</sup>。土壤团聚体的形成是一个非常复杂的过程,生物、物理、化学措施都可影响团聚体的形成,例如施肥、植被、耕作等<sup>[18]</sup>。研究表明,黑麦草栽培能够提高土壤水稳性  $> 0.25$  mm 团聚体的含量,能改善土壤稳定性及固碳能力<sup>[19-21]</sup>。本研究中,沿海滩涂种植苕子、黑麦草可提高 0~10、10~20 cm 土层  $> 2.00$  mm 粒级土壤团聚体的质量百分数。绿肥生长期越长,质量百分数

提高幅度越大。另外,种植绿肥后,滩涂土壤  $> 0.25 \sim 2.00$  mm 粒级土壤团聚体的质量百分数提高,  $> 0.05 \sim 0.25$ 、 $\leq 0.05$  mm 2 个粒级土壤团聚体的质量百分数下降,且以  $\leq 0.05$  mm 粒级较为显著。

本研究中,沿海滩涂种植绿肥后,土壤水稳性团聚体的  $R_{0.25}$ 、MWD 值均明显提高。这是因为种植绿肥后,植物覆盖度提高,土壤中所输入的新鲜有机质含量提高,促进了植物根系、土壤动物、微生物的活动,有效增强了它们的新陈代谢,土壤中有胶结物质含量得以提高,土壤团聚能力进一步增强。张钦等研究发现,连续种植毛叶苕子有利于耕层土壤平均质量直径的提升<sup>[22]</sup>,这与本研究结果较为一致。

土壤有机碳是土壤的重要组成部分,而团聚体对有机碳的固存能力有着显著的影响。土壤微团聚体中含有大量的黏粒和粉粒物质,可为土壤提供生源物质;同时,土壤微团聚体通过胶结物质形成大团聚体,可较好地改善土壤质量水平<sup>[23]</sup>。白璐等研究发现,种植绿肥可促进土壤团聚体的形成,提高土壤质地<sup>[24]</sup>,这与本研究结果一致。本研究发现,0~10、10~20 cm 土层种植苕子和黑麦草后,土壤微生物生物量碳含量、可溶性有机碳含量随着绿肥生长期的延长而提高。

土壤酶参与土壤物质循环和能量流动的各个环节,是土壤生态系统中最为活跃的物质,其活性直接反映了土壤微生物活性及养分循环状况。土壤环境状况(土壤养分、土壤酸碱性等)和人为因素(施肥、耕作方式等)均会对土壤酶活性产生较大影响<sup>[25]</sup>。在土壤有机碳的分解与转化过程中,蔗糖酶发挥着将土壤大分子糖类水解成小分子糖类的作用,而这些小分子糖类的活性较高。土壤中性蛋白酶可将蛋白质肽链水解,从而生产氨基酸,在土壤有机氮向植物有效态转化过程中发挥着重要作用<sup>[26]</sup>。本研究中,种植苕子和黑麦草后,土壤中性蛋白酶活性、土壤蔗糖酶活性随着生长期的延长而明显提高,且以 10~20 cm 土层的酶活性提高幅度较大。土壤中性蛋白酶活性与土壤蔗糖酶活性间存在显著相关性,与土壤团聚体平均质量直径亦存在显著相关性。这主要是因为土壤团聚体的粒径越大,新的有机质就越多,土壤酶促反应可以利用的基质就越多,从而使得土壤酶在大粒径团聚体中表现出较高的活性<sup>[27]</sup>。

## 4 结论

在沿海滩涂上种植黑麦草、苕子可降低土壤容重及土壤水溶性总盐含量,提高土壤有机质、碱解氮含量,且随着生长期的延长效果更加显著。沿海滩涂种植绿肥后,相比于对照处理,0~10、10~20 cm 土层 >2.00 mm 粒级土壤团聚体的质量百分数均明显提高,且绿肥生长期越长,质量百分数越大。种植绿肥提高了滩涂土壤 >0.25~2.00 mm 粒级土壤团聚体的质量百分数,而降低了 >0.05~0.25、≤0.05 mm 粒级土壤团聚体的质量百分数,且以 ≤0.05 mm 粒级的团聚体尤为显著。

在沿海滩涂上种植苕子和黑麦草后,0~10、10~20 cm 土层土壤微生物生物量碳含量、可溶性有机碳含量随着生长期的延长而显著提高。土壤中蛋白酶活性、土壤蔗糖酶活性随着生长期的延长而显著提高,且以 10~20 cm 土层的酶活性提高幅度较大。种植黑麦草后土壤酶活性的提高幅度大于苕子。土壤中蛋白酶活性与土壤蔗糖酶活性间存在显著的相关性,与土壤团聚体平均质量直径也存在显著相关性。

## 参考文献:

- [1] 刘冲,邢锦城,魏福友,等. 外源硝态氮对盐胁迫下马齿苋谷氨酸积累及其代谢酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(10): 130-136.
- [2] 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.
- [3] 李超,王俊,邢文超,等. 绿肥填闲种植对旱作冬小麦农田耕层土壤物理性质的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 107-113, 121.
- [4] 汤泽辉,吕铭,丁诚,等. 外源有机碳对滩涂盐碱地土壤团聚体形成的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2021, 42(2): 122-128.
- [5] 廖抒蔚,孔维凤,梁嫦娥,等. 湿地土壤水稳性团聚体结构和稳定性研究进展[J]. 湿地科学, 2021, 19(5): 623-628.
- [6] Guo X X, Liu H T, Wu S B. Humic substances developed during organic waste composting: formation mechanisms, structural properties, and agronomic functions[J]. The Science of the Total Environment, 2019, 662: 501-510.
- [7] 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.
- [8] 吴宪,张婷,王蕊,等. 化肥减量配施有机肥和秸秆对华北潮土团聚体分布及稳定性的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(5): 933-941.
- [9] Ghani A, Dexter M, Perrott K W. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(9): 1231-1243.
- [10] 杜倩,黄容,李冰,等. 生物炭还田对植烟土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(6): 1440-1450.
- [11] 吕晓茜,章明奎,严建立. 绿肥配施有机肥改良新建红壤橘园的效果研究[J]. 土壤通报, 2020, 51(1): 164-170.
- [12] 毕言鹏,郑春莲,党红凯,等. 咸水沟灌对棉田土壤水稳性团聚体稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(4): 1055-1062.
- [13] 马文明,刘超文,周青平,等. 高寒草地灌丛化对土壤团聚体生态化学计量学及酶活性的影响[J]. 草业学报, 2022, 31(1): 57-68.
- [14] 辛国荣,岳朝阳,李雪梅,等. “黑麦草—水稻”草田轮作系统的根际效应 3. 黑麦草根系对土壤生物性状的影响[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1998, 37(6): 94-96.
- [15] 尹春艳,陈小兵,刘虎,等. 不同淋洗条件下黄河三角洲盐渍土脱盐规律研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(3): 76-82.
- [16] 韩笑,余冬立,王洪德,等. 滨海土壤团聚体分布和分形维数及其影响因子研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(5): 88-92, 113.
- [17] 朱小梅,温祝桂,赵宝泉,等. 种植绿肥对滨海盐渍土养分及盐分动态变化的影响[J]. 西南农业学报, 2017, 30(8): 1894-1898.
- [18] 周玮,周运超,鲁泰安. 不同土地利用方式下石灰土土壤团聚体与土壤酶活性的关系[J]. 水土保持通报, 2011, 31(5): 59-64, 162.
- [19] 王英俊,李同川,张道勇,等. 间作白三叶对苹果/白三叶复合系统土壤团聚体及团聚体碳含量的影响[J]. 草地学报, 2013, 21(3): 485-493.
- [20] 陈曦,王改玲,刘焕焕,等. 生草覆盖对枣园土壤水稳性团聚体中两种有机碳组成的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(2): 424-431.
- [21] 酒鹃鹏,李永梅,王梦雪,等. 玉米大豆间作对坡耕地红壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(22): 219-228.
- [22] 张钦,于恩江,林海波,等. 连续种植不同绿肥作物的土壤团聚体空间分布及稳定性特征[J]. 热带作物学报, 2018, 39(9): 1708-1717.
- [23] 高菊生,徐明岗,董春华,等. 长期稻—稻—绿肥轮作对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(2): 343-349.
- [24] 白璐,蒋福祯,曹卫东,等. 麦后复种绿肥对土壤有机碳及其固持特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(4): 148-154.
- [25] 刘卉,张黎明,周清明,等. 烤烟连作下连续施用生物炭对烤烟黑胫病、干物质及产质量的影响[J]. 核农学报, 2018, 32(7): 1435-1441.
- [26] 王晟强,张喆,叶绍明. 桂南茶园土壤团聚体酶活性对植茶年限的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6532-6541.
- [27] 李委涛,李忠佩,刘明,等. 秸秆还田对瘠薄红壤水稻土团聚体内酶活性及养分分布的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20): 3886-3895.