

# 滩涂水产养殖池复垦种稻短期内 土壤特性变化及水稻产量表现

张 蛟<sup>1</sup> 陈澎军<sup>2</sup> 陈 艳<sup>3</sup> 韩继军<sup>2</sup> 崔士友<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>江苏沿江地区农业科学研究所, 226012, 江苏南通; <sup>2</sup>江苏省地质局/自然资源部滨海盐碱地生态改良与可持续利用工程技术创新中心, 210007, 江苏南京; <sup>3</sup>如东县自然资源和规划局, 226400, 江苏如东)

**摘 要** 为探明滩涂水产养殖复垦区种稻短期内土壤特性变化及水稻产量表现, 选择复垦区荒地(0Y)作为对照, 设置种稻1年(1Y)、2年(2Y)和3年(3Y)处理田块。结果表明, 与0Y田块相比, 种稻后在0~20cm土层中, 电导率(EC)、pH、孔隙度、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、速效钾和土壤水溶性有机碳(WSOC)/土壤有机碳(SOC)均有降低趋势, 容重、SOC、总氮、WSOC和C/N均有增加趋势; 在20~40cm土层中, EC、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、SOC、总氮、WSOC、WSOC/SOC和C/N均与在0~20cm中有相似的变化趋势。随种植年限增加, 0~20cm土层中, SOC、WSOC、有效磷和C/N均有增加趋势, 速效钾和WSOC/SOC均有降低趋势; 同时, 1Y、2Y和3Y田块SOC含量相比0Y田块分别提高了32.18%、34.67%和111.03%, WSOC含量相比0Y分别提高了15.90%、11.82%和22.72%, 且3Y田块显著高于1Y和2Y田块。种植年限2Y和3Y田块水稻产量相比1Y田块分别增加了26.33%和42.89% ( $P<0.05$ )。相关性分析表明, 水稻产量与穗粒数呈极显著正相关 ( $P<0.01$ )。因此得出, 滩涂养殖复垦区种稻短期内可以改善土壤质量, 特别是有机碳和水溶性有机碳含量。同时, 滩涂水稻产量提高主要是穗粒数增加引起的。

**关键词** 海水养殖池; 滩涂种稻; 水稻; 滩涂复垦; 土壤改良

我国海岸线蜿蜒曲折, 沿岸滩涂资源丰富, 北起辽宁, 南至广西, 沿海地区均有分布, 海岸线总长达4000km<sup>[1-2]</sup>。新中国成立后, 我国滩涂开发迅速发展, 各沿海省份对滩涂资源进行了大规模的开发利用, 由单一地扩大耕地逐步向水产养殖、港口码头建设、观光旅游等多元化、综合性发展<sup>[3-4]</sup>。自20世纪80年代开始, 沿海地区掀起了围海晒盐、滩涂围垦和滩涂养殖的热潮, 一方面解决了人口众多、土地资源不足的问题, 另一方面也推动了经济的快速发展<sup>[5]</sup>。随着海水养殖业的快速发展和人们生活水平的不断提高, 消费者对海水养殖产品的需求不仅是质量上的高要求, 而且表现出由季节性需求转变成了常年需求, 与耕地、盐田等土地类型的经济收益相比明显偏高, 这也导致了海水养殖面积的增加。以江苏沿海滩涂养殖面积变化为例, 1985年滩涂养殖池面积为208.72km<sup>2</sup>, 到2010年养殖池面积达到了1267.95km<sup>2</sup>, 年变化率为16.92%<sup>[5-6]</sup>。但养殖池面积的不断扩张势必会导致自然滨海湿地的萎缩甚至消失、生态系统多样性丧失、濒危物

种栖息地受损、水质污染等生态环境问题<sup>[5]</sup>。

随着2017年农业部印发了《养殖水域滩涂规划编制工作规范》和《养殖水域滩涂规划编制大纲》, 要求合理布局水产养殖生产, 划定禁养区、限养区和养殖区<sup>[7]</sup>。2018年, 全国上下陆续制定了各地养殖水域滩涂规划(2018-2030年), 水产养殖面积将面临大规模缩减, 特别是一些粗放的、尾水排放污染严重的养殖方式会受到限制, 如何调整滩涂养殖区域和养殖区复垦利用是当前沿海滩涂有效开发利用过程中迫切需要解决的关键问题之一。水稻由于其特殊的栽培方式, 常常会作为沿海滩涂盐碱地改良的首选粮食作物<sup>[8-10]</sup>。同时, 通过围垦熟化利用开发沿海滩涂盐碱地, 实现非耕地产粮特别是盐碱地耐盐水稻种植产粮是增加国家粮食总产量的重要途径之一<sup>[1,11]</sup>。笔者前期在新围垦滩涂地区的试验研究<sup>[9,12]</sup>也发现, 种植水稻可以显著降低新围垦滩涂土壤盐分含量, 稳定土壤盐分变化, 提高土壤有机碳、活性有机碳及碳库管理指数, 进而改善沿海滩涂稻田土壤质量, 提高土壤肥力。

作者简介: 张蛟, 研究方向为滩涂土壤资源开发与利用, E-mail: zhangjiao0609@126.com

崔士友为通信作者, 研究方向为盐碱地改良与耐盐作物筛选, E-mail: cuisy198@163.com

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目“提高盐胁迫下滩涂水稻穗粒数的技术研究”[CX(20)3118]; 南通市科技计划项目“沿海滩涂稻麦周年高产高效技术集成与应用”(MS22021040)

收稿日期: 2022-02-19; 修回日期: 2022-05-30; 网络出版日期: 2023-02-14

然而,沿海滩涂海水养殖复垦区种植水稻对滩涂土壤特性变化及种植年限变化对复垦区水稻产量的影响还鲜有报道。因此,本研究以江苏南通沿海滩涂水产养殖池复垦种稻区为研究对象,开展研究滩涂水产养殖复垦区种稻短期内土壤盐分、质地、养分、碳库等土壤特性变化规律及滩涂水稻产量变化特征,为沿海滩涂水产养殖复垦区土地利用与评价提供科技支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地点为江苏省南通市通州湾江海联动开发示范区核心区北侧国土资源部海岸带—南通野外基地试验田(121°25'8" E, 32°16'16" N)。该地区属亚热带海洋性季风气候区,气候四季分明,冬季寒冷少雨,夏季炎热多雨。该区年均气温约 15.1℃,全年无霜期约 225d,年均日照约 2136h,年均降水量 1042mm,降水量年内分配不均,汛期(6~9月)降水量相对集中,约占全年总降水量的 55%~80%。试验区为江苏沿海滩涂围垦区,前期为水产养殖鱼虾等的池塘,2016 年国土部盐碱地快速改良项目落户通州湾示范区后,将项目区原地推平进行复垦改良,逐步开展种植耐盐碱水稻或田菁等盐碱地改良先锋作物。试验区整体上地下水位较高,地下水埋深 0.95~1.60m,土质以沙壤土或轻沙土为主,土壤类型为滨海盐土,盐离子组成主要以 Na<sup>+</sup>和 Cl<sup>-</sup>为主。试验区种植水稻前,均按照加水→旋耕→静止→放水进行淡水或微咸水洗盐 3~5 次,每次洗田周期为 5~7d,截至插秧期使表层土壤水分饱和和下盐分维持在 3g/kg 以下。水稻后茬作物以种植大麦或小麦为主,且水稻与小麦收获后秸秆均全部还田到土壤中。

### 1.2 试验设计与采样

2019 年 6 月,选择试验区典型的养殖复垦区水稻种植田块,分别选择 2017 年开始种植水稻田块(3 年田块,3Y)、2018 年开始种植水稻田块(2Y)和 2019 年开始种植水稻田块(1Y),并以邻近养殖复垦进行土地平整后的滩涂荒地作为对照田块(CK, 0Y),对照田块有部分碱蓬、田菁或芦苇等野生耐盐或盐生作物生长。种植水稻品种均为扬农稻 1 号,机插秧行距 30cm,穴距 15cm,每穴 4 株。水稻移栽前,基肥施用有机肥 22.5~30.0t/hm<sup>2</sup>,黑魔粒复合肥(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=16:7:7)

750kg/hm<sup>2</sup>;分蘖肥为移栽后 7 和 12d 分 2 次均施用尿素约 150kg/hm<sup>2</sup>;穗肥分 2 次施用,倒 4 叶期施尿素 180kg/hm<sup>2</sup>,倒 2 叶期施尿素 112.5kg/hm<sup>2</sup>。其中有机肥由猪粪、牛粪及菌渣复混发酵而成。整个生育期始终保持淡水层,在返青活棵期,每天换一次淡水,日浸夜露。分蘖期 3~5d 换一次淡水,保持 10~15cm 的淡水层。拔节至灌浆后期 7~10d 更换一次淡水,保持 10~15cm 的淡水层。

10 月底,水稻收获期在不同水稻种植年限田块内采用 5 点取样法测产,每个样点 9.0m<sup>2</sup>左右。测产前测量株高,选 1 行测定连续 10 穴的穗数,取其中 5 穴植株样品带回室内测定穗粒数、实粒数及结实率等,随后收割样方并运回进行人工脱粒,脱粒后选择饱满的籽粒测定千粒重和样方产量,测籽粒含水量,折算为籽粒含水量为 14.5%的样方产量。水稻收获后,在每个收获样方内分为 0~20cm 和 20~40cm 土层采集土样,并对邻近对照田块分样方相同方式采集土样,每个样方内进行多点采样混合后将混合样带回实验室。土壤样品分为 2 份,一份用于新鲜样品测定,另一份风干处理后待用。其中,新鲜土壤分别测定土壤水分和水溶性有机碳;风干土壤磨细过筛后,用于测定土壤盐分、pH、有机碳和全氮等理化指标。

### 1.3 测定项目与方法

分别采用环刀法、pH 计法(土水比 1:5)、电导率法(土水比 1:5)和烘干法测定土壤容重、pH、电导率(EC)和土壤质量含水量;采用比重计法测定土壤颗粒组成(过 2mm 筛土样);分别采用重铬酸钾外加热法、凯氏消煮法、碳酸氢钠浸提钼蓝比色法、碱解扩散法和乙酸铵浸提—火焰光度法测定土壤有机碳、全氮、有效磷、碱解氮、有效钾,上述测定方法均参照《土壤农业化学分析方法》<sup>[13]</sup>。采用 1.0mol/L KCl 溶液提取,然后用连续流动自动分析仪<sup>[14]</sup>测定硝态氮和铵态氮含量。

土壤水溶性有机碳(WSOC)含量的测定<sup>[15]</sup>如下,称取 20g 新鲜土样,按照水土比 2:1 进行浸提,在 25℃下振荡 0.5h(100 转/min),离心 10min(8000 转/min),然后通过 0.45μm 滤膜过滤到塑料瓶中。然后用有机碳分析仪(TOC-V<sub>CPH</sub>, 岛津公司)测定滤液中的有机碳含量。

### 1.4 数据处理

利用 Microsoft Excel 2010 和 DPS 7.05 软件进行数据分析与作图,采取随机区组单因素方差分析

（One-way ANOVA）和最小显著差异法（LSD）比较不同数据组间的差异，用 Pearson 相关系数评价不同因子间的相关关系。

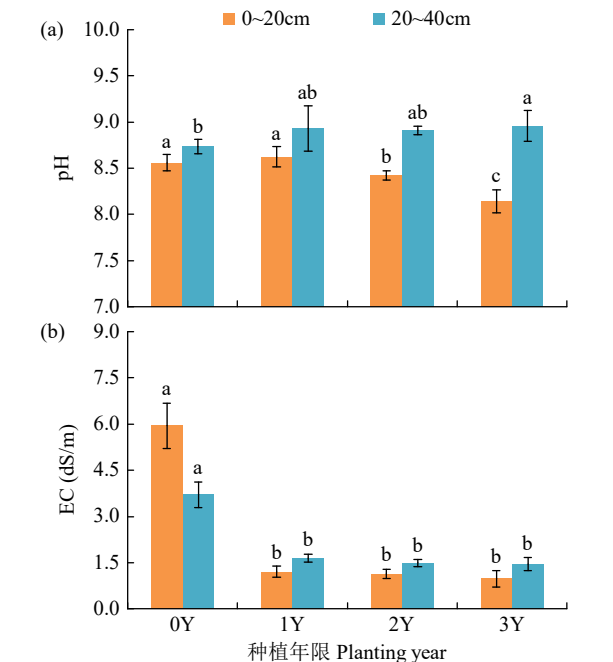
2 结果与分析

2.1 滩涂水产养殖复垦区种植水稻对土壤 pH 和 EC 的影响

由图 1a 可见，沿海滩涂养殖复垦区种植水稻后，与未种植水稻田块（0Y）相比，第 1 年种植水稻（1Y）0~20cm 土层 pH 没有明显变化，第 2 年和第 3 年种植水稻（2Y 和 3Y）0~20cm 土层 pH 均显著降低（ $P<0.05$ ），且随着种植年限增加 pH 呈现一定降低趋势；种植水稻后 20~40cm 土层随种植年限变化土壤 pH 没有明显的差异性。由图 1b 可知，与 0Y 相比，种植水稻后 0~20cm 和 20~40cm 土层 EC 均显著降低（ $P<0.05$ ），1Y、2Y 和 3Y 稻田 0~20cm 土层 EC 分别降低了 79.77%、80.82% 和 83.48%，20~40cm 土层 EC 分别降低了 55.45%、59.86%和 60.64%，且随着种植年限增加 0~40cm 土层 EC 均没有显著的变化趋势。同时，种植水稻改变了 EC 在土壤中的垂直分布规律，表现为 0Y 田块土壤 EC 在 0~20cm 明显高于 20~40cm，但种植水稻后不同种植年限稻田 EC 均表现为 0~20cm 土层均不同程度低于 20~40cm 土层。

2.2 滩涂水产养殖复垦区种植水稻对土壤容重、孔隙度及质地的影响

由表 1 可知，滩涂水产养殖复垦区种植水稻对土壤容重和孔隙度具有显著影响。与 0Y 相比，种



不同小写字母表示同一土层深度差异显著（ $P<0.05$ ），下同  
Different lowercase letters indicate that the same depth of the soil layer is significantly different at the 5% level, the same below

图 1 滩涂水产养殖复垦区种植水稻对土壤 pH 和 EC 的影响  
Fig.1 Effects of rice planting on soil pH and EC in tidal flat aquaculture reclamation area

植水稻表层土壤容重显著增加了 4.40%以上，土壤孔隙度显著降低了 4.15%以上（ $P<0.05$ ），且随着种植水稻年限的增加，土壤容重和孔隙度没有明显的变化。同时，种植水稻短期内没有改变土壤质地性质，与 0Y 相比，1Y、2Y 和 3Y 稻田表层土壤的砂粒、粉粒和黏粒含量均没有明显的差异性（ $P>0.05$ ），土壤质地均属于轻粉质壤土。

表 1 滩涂水产养殖复垦区种稻对耕层土壤容重、孔隙度及质地的影响					
Table 1 Effects of rice planting on surface soil bulk density, porosity and texture in tidal flat aquaculture reclamation area					
处理 Treatment	容重 Bulk density (g/cm³)	孔隙度 Porosity (%)	土壤颗粒组成 Soil particle composition (%)		
			砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay
0Y	1.36±0.02b	48.62±0.88a	9.14±0.50a	80.65±0.29a	10.22±0.59a
1Y	1.42±0.01a	46.60±0.55b	9.74±1.55a	79.08±1.11a	11.19±0.64a
2Y	1.43±0.02a	45.89±0.84b	9.69±1.00a	79.10±2.14a	11.21±1.22a
3Y	1.43±0.02a	45.92±0.61b	9.30±1.37a	79.60±1.70a	11.10±0.99a

同列数据不同小写字母代表有显著差异（ $P<0.05$ ），下同  
Different lowercase letters in the same column represent significant differences at the 5% level, the same below

2.3 滩涂水产养殖复垦区种植水稻对土壤氮、磷、钾含量的影响

由表 2 可知，与 0Y 相比，1Y、2Y 和 3Y 稻田表层 0~20cm 土壤总氮含量均有不同程度增加，分别增加了 4.52%、5.16%和 12.58%，而稻田 20~40cm 土层均没有明显的差异。滩涂水产养殖复垦区种植

水稻后 0~20cm 和 20~40cm 土壤铵态氮含量均显著降低（ $P<0.05$ ），1Y、2Y 和 3Y 稻田 0~20cm 土层分别降低了 19.75%、26.79%和 24.05%，20~40cm 土层分别降低了 39.11%、44.38%和 43.52%。种植水稻后 0~20cm 和 20~40cm 土壤硝态氮含量均一定程度降低，1Y、2Y 和 3Y 稻田 0~20cm 土层降低了

11.18%、19.44%和 12.69%，20~40cm 土层降低了 9.37%、11.32%和 4.86%。种植水稻后 0~20cm 土壤速效钾含量显著降低 ( $P<0.05$ )，而 1Y、2Y 和 3Y 稻田土壤分别降低了 25.70%、45.06%和 42.01%；2Y 和 3Y 种植水稻田块 20~40cm 土层速

效钾含量显著低于 0Y 田块，且 0~40cm 土壤速效钾含量均表现为种植水稻 2 年趋于稳定。另外，短期内（1Y 和 2Y）种植水稻对 0~40cm 土壤有效磷含量均没有显著影响，但 3Y 种植田块有效磷含量显著增加 ( $P<0.05$ )。

表 2 滩涂水产养殖复垦区种植水稻对氮、磷、钾含量的影响

Table 2 Effects of rice planting on N, P and K contents in tidal flat aquaculture reclamation area

土层 Soil layer	处理 Treatment	总氮 Total N (g/kg)	铵态氮 Ammonium N (mg/kg)	硝态氮 Nitrate N (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)	有效磷 Available P (mg/kg)
0~20cm	0Y	0.62±0.03b	19.57±3.47a	2.95±0.19a	661.13±41.06a	11.37±2.76b
	1Y	0.65±0.03ab	15.70±3.01b	2.62±0.25ab	491.25±39.82b	10.90±1.77b
	2Y	0.65±0.04ab	14.32±1.15b	2.38±0.36b	363.24±24.36c	11.75±2.17b
	3Y	0.70±0.04a	14.86±1.83b	2.58±0.11b	383.42±25.66c	20.43±2.79a
20~40cm	0Y	0.58±0.04a	28.50±1.06a	2.73±0.10a	598.85±34.65a	6.45±1.18b
	1Y	0.57±0.05a	17.36±3.17b	2.47±0.13ab	600.37±62.49a	7.77±1.00b
	2Y	0.59±0.03a	15.85±0.85b	2.42±0.10ab	510.88±42.89b	7.78±1.26b
	3Y	0.55±0.06a	16.10±2.32b	2.59±0.19b	504.67±52.76b	14.57±3.11a

## 2.4 滩涂水产养殖复垦区种植水稻对土壤有机碳及水溶性有机碳的影响

由图 2 可知，滩涂水产养殖复垦区种植水稻后，短期内 0~20cm 土层土壤有机碳（soil organic carbon, SOC）含量均显著提高 ( $P<0.05$ )。1Y、2Y 和 3Y 田块在 0~20cm 土层 SOC 含量分别为 3.84、3.91 和 6.12g/kg，与 0Y 相比分别提高了 32.18%、34.67%和 111.03%；20~40cm 与 0~20cm

土层 SOC 变化具有相似的增加趋势，但 20~40cm SOC 含量增加幅度较为缓慢。同时，滩涂水产养殖池发展水稻种植后，短期内 0~40cm 土层土壤水溶性有机碳（water-soluble soil organic carbon, WSOC）含量均显著提高 ( $P<0.05$ )。与 0Y 相比，1Y、2Y 和 3Y 在 0~20cm 土层 WSOC 含量分别增加了 15.90%、11.82%和 22.72%，在 20~40cm 土层 WSOC 含量分别增加了 23.19%、18.96%和 23.08%。不同种植年限之间，在 0~20cm 土层 3Y 田块 WSOC 含量显著高于 1Y 和 2Y 田块 ( $P<0.05$ )，在 20~40cm 土层 1Y、2Y 和 3Y 田块的 WSOC 含量没有明显差异 ( $P>0.05$ )。

由图 3 可知，在滩涂水产养殖复垦区，0~20cm 和 20~40cm 土层 C/N 变化幅度分别为 4.92~8.78 和 4.43~5.87。种植水稻后，在 0~20cm 土层土壤的 C/N 有显著提高，且随着种植年限的增加，土壤 C/N 有一定的增加趋势；在 20~40cm 土层 C/N 与 0~20cm 土层有相似的增加规律，但变化幅度较为缓慢些。在滩涂水产养殖复垦区 0~40cm 土层中，WSOC/SOC 均在 0.68%~1.24%，且种植水稻后 WSOC/SOC 在 0~20cm 呈现显著降低的趋势，在 20~40cm 土层 WSOC/SOC 没有明显的变化差异 ( $P>0.05$ )。

## 2.5 滩涂水产养殖复垦区种稻年限对水稻产量及其构成因素的影响

从表 3 可知，滩涂水产养殖复垦区种植水稻后，随着种植年限的增加，滩涂水稻产量显著增加，2Y 和 3Y 水稻产量相比 1Y 产量（5224.2kg/hm<sup>2</sup>）分别

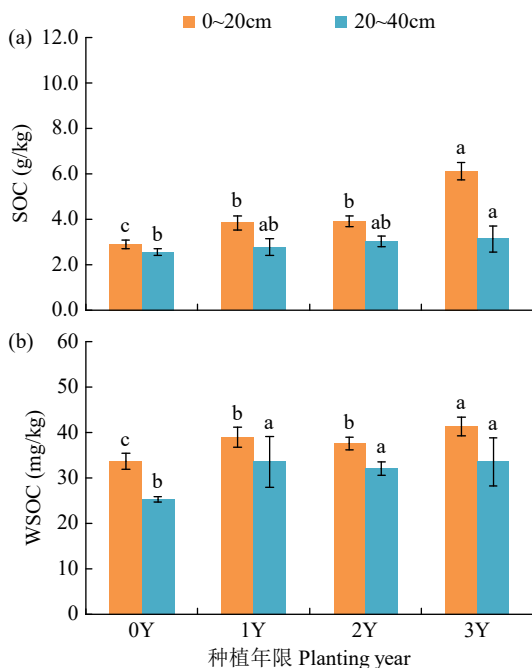


图 2 滩涂水产养殖复垦区种植水稻对土壤有机碳及水溶性有机碳的影响

Fig.2 Effects of rice planting on SOC and WSOC in reclamation area of tidal flat aquaculture

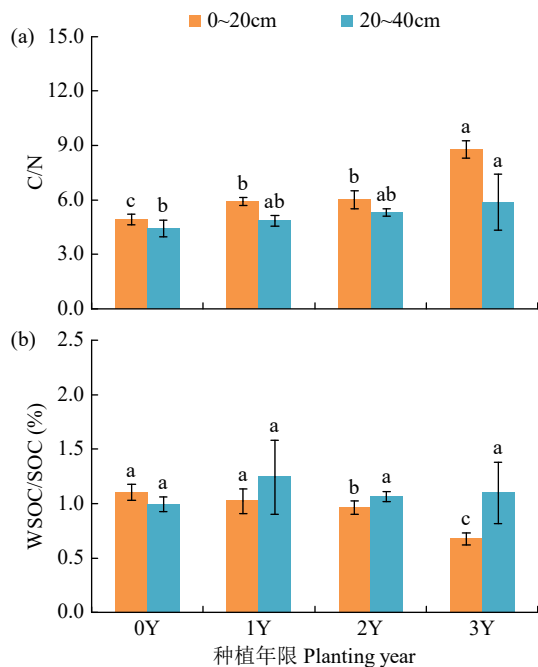


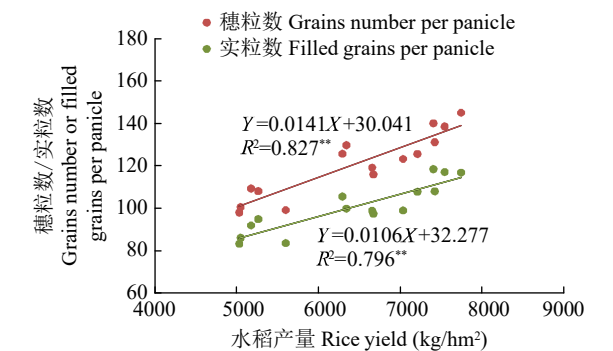
图3 滩涂水产养殖复垦区种植水稻对土壤 C/N 及 WSOC/SOC 的影响  
Fig.3 Effects of rice planting on soil C/N and WSOC/SOC in tidal flat aquaculture reclamation area

增加了 26.33%和 42.89% ( $P<0.05$ )。就水稻产量构成因素而言,滩涂水稻穗粒数与产量变化规律一致,随着种植年限的增加穗粒数显著增加,2Y 和 3Y 田块的穗粒数相比 1Y 田块 (103.0) 分别增加了 19.19%和 32.13% ( $P<0.05$ )。同时,相关性分析 (图 4) 表明,水稻产量与穗粒数 ( $R^2=0.827$ )、

表 3 滩涂水产养殖复垦区不同种植年限水稻产量及其构成因素  
Table 3 Comparison of rice yield and its components in different planting years of tidal flat aquaculture reclamation area

指标 Index	种植年限 Planting year		
	1Y	2Y	3Y
穗数 Number of panicles ( $\times 10^5/\text{hm}^2$ )	31.0 $\pm$ 0.6a	31.3 $\pm$ 1.7a	32.3 $\pm$ 1.5a
穗粒数 Grains number per panicle	103.0 $\pm$ 5.3c	122.8 $\pm$ 5.4b	136.1 $\pm$ 7.7a
结实率 Seed setting rate (%)	84.9 $\pm$ 1.6a	82.3 $\pm$ 1.9a	83.6 $\pm$ 2.0a
千粒重 1000-grain weight (g)	21.3 $\pm$ 0.6b	22.0 $\pm$ 0.8ab	23.1 $\pm$ 0.7a
实际产量 Actual yield (kg/hm <sup>2</sup> )	5224.2 $\pm$ 231.1c	6599.5 $\pm$ 299.4b	7464.7 $\pm$ 196.0a
理论产量 Theoretical yield (kg/hm <sup>2</sup> )	5800.6 $\pm$ 275.6c	6907.3 $\pm$ 335.6b	8481.2 $\pm$ 717.8a

实粒数 ( $R^2=0.796$ ) 均呈极显著正相关 ( $P<0.01$ )。水稻千粒重随着种植年限的增加也呈现一定的增加趋势,2Y 和 3Y 田块相比 1Y 田块 (21.3g) 分别增加了 3.61%和 8.38%,且 3Y 田块相比 1Y 田块千粒重表现为显著增加 ( $P<0.05$ );不同种植年限间滩涂水稻的穗数和结实率均没有明显的差异性。由此可见,就产量构成因素而言,说明随着滩涂水稻种植年限的增加,水稻产量提高主要是穗粒数和千粒重增加引起的,特别是穗粒数的增加。



“\*\*” 表示相关性达极显著水平 ( $P<0.01$ )  
“\*\*” indicates extremely significant correlation at  $P<0.01$  level  
图 4 滩涂水产养殖复垦区种稻水稻产量与穗粒数的相关性  
Fig.4 Correlations between rice yield and grains number per panicle in rice cultivation of tidal flat aquaculture reclamation area

### 3 讨论

#### 3.1 滩涂水产养殖复垦区种植水稻对土壤理化特性的影响

研究<sup>[9,16-20]</sup>表明,通过生物覆盖(如秸秆)、植被种植(如耐盐作物、盐生作物、水稻等)等途径可以进行盐碱地土壤改良,通过利用植物生长或生物覆盖改善表层土壤结构,减少土壤中水分的蒸发,充分利用降雨加速盐分淋洗、延缓或防止积盐返盐现象。水稻基于其特殊的水田栽培方式,常常被作为改良滩涂盐碱地的重要途径<sup>[10,12]</sup>。董起广等<sup>[20]</sup>在沿黄地区盐碱地上的研究表明,水稻种植短期内可以有效降低土壤 pH 和 EC,但盐碱土稻田土壤机械组成没有发生明显的改变。张蛟等<sup>[9,12]</sup>在沿海滩涂新围垦地区的研究表明,沿海滩涂盐碱地种植水稻后耕层土壤盐分显著降低,同时种植水稻可以改变土壤盐分的垂直分布规律。本研究在滩涂水产养殖复垦区也发现,种植水稻后耕层土壤 pH 和 EC 均显著降低,同时种稻后土壤容重显著增加,孔隙度显著降低,但土壤质地如黏粒、砂粒、粉粒



含量等没有显著的变化,这与前人<sup>[9,12,20]</sup>的研究结果相似。出现这些结果的可能原因主要有以下 2 点,首先是滩涂水产养殖复垦区种稻过程中,水稻生长期田间管理需要不断补充淡水资源或微咸水资源进行灌溉,以保障水稻的正常生长需求;同时灌溉过程不仅可以起到洗盐和稀释表层土壤盐分浓度的作用,也可以起到控盐压盐的作用,进而使土壤耕层盐分降低<sup>[9,12,21]</sup>;其次滩涂养殖复垦区种稻短期内土壤机械组成没有明显的变化,是由于土壤质地改变需要一个长期的过程,本研究区域中水稻种植年限较短,还不足以使土壤机械组成发生质的变化<sup>[20]</sup>。

水稻种植不仅可以改变土壤物理性质,也会改变土壤化学或养分性质<sup>[12,22-23]</sup>。本研究也发现,滩涂水产养殖复垦区种稻后,耕层土壤总氮、SOC、WSOC 和 C/N 均显著增加或呈增加趋势,且随种植年限增加,SOC、WSOC、C/N 和有效磷等肥力指标均呈增加趋势,这与张蛟等<sup>[12]</sup>和霍朝晨等<sup>[23]</sup>的研究结果相似。同时,土壤中可溶性碳与有机碳的比值可反映土壤微生物量的活性,本研究中滩涂水产养殖复垦区荒地和稻田土壤的 WSOC/SOC 变化范围均在 0.68%~1.24%,这与前人<sup>[24-25]</sup>的研究报道一致。出现这些结果主要原因可能是:一方面从滩涂复垦区荒地转变为滩涂稻田,土地利用方式变化改变了地面植被组成结构和生物多样性,从而影响了生态系统的有机碳含量、组成及稳定性<sup>[26]</sup>;另一方面,由于滩涂地区盐分高、养分少的原因,滩涂地区种植水稻前 2 年较常规水稻种植管理(如耕作、施肥等)需要额外施入 22.5~30.0t/hm<sup>2</sup> 有机肥补充土壤养分,外源有机碳的输入以及水稻生长过程中作物根系分泌物和作物残渣根系枯叶等进入土壤增加了 SOC 和 WSOC 含量<sup>[27-28]</sup>;另外,种植水稻过程中通过淡水或微咸水洗盐、灌溉等,使滩涂水稻种植区耕层土壤盐分逐渐降低,这在一定程度上促进了滩涂土壤有机碳和活性有机碳的积累<sup>[12,28-29]</sup>。但需要注意的是,本研究中随着水稻种植年限增加,耕层土壤全氮、铵态氮和硝态氮含量均没有显著变化(表 2),原因可能是,水稻生长过程中需从土壤中吸取大量的铵态氮或硝态氮,水稻施肥管理主要以速效的尿素及复合肥为主,由于滩涂土壤养分本身比较匮乏,人为肥料补充仅仅可以满足水稻的生长而无法在土壤中形成积累。此

外,水稻种植需要大量的淡水资源,但滩涂地区淡水资源不足且时空分布不均极大地限制了滩涂大面积快速发展水稻种植,然而滩涂地区拥有十分丰富的微咸水和咸水资源<sup>[9,21]</sup>。因此,如何合理利用微咸水资源灌溉技术,并配合以一系列水肥管理和品种管理技术进行优化品种和栽培技术(如适当施用缓控释肥或绿肥种植的补充到滩涂土壤),进而发展滩涂水稻高产栽培和潜在稻田,将有助于盐碱地土壤的持续改良,使滩涂水稻实现增产增效,保障国家粮食安全。

### 3.2 滩涂水产养殖复垦区种稻利用的水稻产量及其构成因素表现特征

在耕地资源日益趋紧情况下,将沿海大面积不长植物的盐碱地和滩涂等非耕地转变成为耕地进行产粮,这对保障粮食安全意义重大<sup>[11]</sup>。盐碱地种植水稻是改良盐碱地的重要途径<sup>[9,12,21]</sup>。但研究<sup>[9,30-32]</sup>表明,盐逆境对水稻产量有明显的不利影响,但造成产量下降的原因却有所差异。如杨福等<sup>[30]</sup>在吉林盐碱地种稻的研究表明,盐碱环境对水稻单位面积的有效穗数影响不显著,但盐碱环境使水稻每穗实粒数显著减少,千粒重减轻,从而降低了水稻的产量。周根友等<sup>[31]</sup>利用盐池设施研究了盐胁迫对不同品种水稻产量的影响,结果表明盐逆境下水稻单位面积穗数略有下降,穗粒数和千粒重则表现为显著下降,其中穗粒数下降幅度达 49.1%,是盐逆境下水稻减产的主导因素。在盆栽模拟不同盐分水平下种稻的研究<sup>[32]</sup>表明,中盐(0.15%)和高盐(0.30%)处理的产量降幅分别为 23.7%和 56.7%,且中盐下的穗数、穗粒数和千粒重分别下降 6.4%、14.8%和 4.8%,高盐下则分别下降 18.8%、36.0%和 11.0%,其得出穗粒数是盐逆境下水稻减产的主导原因。本研究也表明,滩涂水产养殖复垦区种植水稻过程中,随着种植年限的增加,单位面积穗数没有明显的增加,但穗粒数和千粒重均有所增加,进而提高了滩涂水稻产量;同时,水稻穗粒数与产量变化规律一致,且水稻产量与穗粒数和实粒数均呈极显著正相关(表 3 和图 4),因此我们得出滩涂水产复垦区种稻生产中的水稻产量提高主要是穗粒数增加引起的,这与前人<sup>[30-32]</sup>的大部分报道一致。基于这些研究可以推测,盐逆境对水稻产量的影响主要发生在孕穗期,这一时期主要影响穗粒数。拔节孕穗期是水稻生长发育的关键时期,此时水稻进入幼穗

分化期,盐胁迫对穗分化产生不利的影响,穗长缩短,穗粒数减少<sup>[33]</sup>。在滩涂水稻生产上要注重孕穗期水肥及盐分调控,如在孕穗期使用生长调节剂或叶面肥,从茎叶吸收补充营养物质来缓解因盐胁迫影响根部吸收土壤养分的不足,或者探索适宜滩涂水稻的水肥盐管理措施,尽量增加水稻的颖花数和促进穗粒数的形成,进而减轻盐胁迫对水稻产量的不利影响。

## 4 结论

综上可知,滩涂养殖复垦区种稻短期内有利于降低耕层土壤盐分,提高土壤有机碳和水溶性有机碳含量,进而改善了滩涂土壤质量和提高了土壤肥力;但需注意滩涂土壤全氮、速效氮含量等随着种植年限增加没有明显的变化,还均处于较低的水平。滩涂复垦区水稻产量提高主要是穗粒数增加引起的,随着种植年限的增加,穗粒数与水稻产量变化规律一致。今后滩涂水稻种植过程中需要探索适宜滩涂特色的水肥盐协同管理措施,特别要注重水稻孕穗期的水肥盐调控,如使用生长调节剂或叶面肥,从茎叶吸收补充营养来缓解盐胁迫下根部吸收养分的不足,尽量增加水稻的颖花数和促进穗粒数的形成;或者利用合理的还田、轮作措施(如水稻—绿肥轮作),增加土壤碳氮储量,进而减轻盐胁迫对水稻产量的不利影响。

### 参考文献

- [1] Li X, Chang S X, Salifu K F. Soil texture and layering effects on water and salt dynamics in the presence of a water table: a review. *Environmental Reviews*, 2014, 22(1): 41-50.
- [2] Duan H, Zhang H, Huang Q, et al. Characterization and environmental impact analysis of sea land reclamation activities in China. *Ocean and Coastal Management*, 2016, 130: 128-137.
- [3] 崔士友, 张蛟, 翟彩娇, 等. 江苏沿海滩涂快速改良与高效利用研究进展. *农学学报*, 2017, 7(3): 42-46.
- [4] 张勇, 徐国华, 渠慎春, 等. 沿海滩涂开发利用模式与创新途径. *江苏农业科学*, 2018, 46(12): 266-271.
- [5] 姚云长, 任春颖, 王宗明, 等. 1985 年和 2010 年中国沿海盐田和养殖池遥感监测. *湿地科学*, 2016, 14(6): 874-882.
- [6] 农业部渔业局. 中国渔业年鉴(2010). 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [7] 张卫. 农业部印发《养殖水域滩涂规划编制工作规范》. *中国食品*, 2017(2): 171.
- [8] 张梅, 王宇, 赵兰坡, 等. 苏打盐碱土种稻改良的水资源高效利用田间试验研究. *灌溉排水学报*, 2014, 33(1): 132-134.
- [9] 张蛟, 翟彩娇, 崔士友. 微咸水灌溉滩涂稻田盐分动态及其水稻产量表现. *江苏农业学报*, 2018, 34(4): 799-803.
- [10] 严凯, 蒋玉兰, 唐纪元, 等. 盐碱地条件下施氮量和栽插密度对水稻产量和品质的影响. *中国土壤与肥料*, 2018(2): 67-74.
- [11] 向栋良. 基于供需平衡的 2050 年中国粮食安全研究. *地球与*

环境: 农业科学, 2020, 10(8): 590-601.

- [12] 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. *中国土壤与肥料*, 2020(3): 07-112.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [14] Kachurina O M, Zhang H, Raun W R, et al. Simultaneous determination of soil aluminum, ammonium and nitrate-nitrogen using 1 M potassium chloride extraction. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2000, 31(7/8): 893-903.
- [15] Wu J S, Jiang P K, Chang S X, et al. Dissolved soil organic carbon and nitrogen were affected by conversion of native forests to plantations in subtropical China. *Canadian Journal of Soil Science*, 2010, 90(1): 27-36.
- [16] 张蛟, 崔士友, 冯芝祥. 种植碱蓬和秸秆覆盖对沿海滩涂极重度盐土盐分动态与脱盐效果的影响. *应用生态学报*, 2018, 29(5): 1686-1694.
- [17] 张蛟, 崔士友. 秸秆和植被覆盖对滩涂围垦区土壤盐分和肥力性质的影响. *中国土壤与肥料*, 2018(3): 128-135.
- [18] 张蛟, 崔士友. 盐生植物和秸秆覆盖对滩涂极重度盐土养分和降盐效果的影响. *南方农业学报*, 2018, 49(1): 56-61.
- [19] 张蛟, 崔士友, 冯芝祥, 等. 气候因子和地表覆盖对沿海滩涂土壤盐分动态的影响. *中国生态农业学报*, 2018, 26(2): 294-302.
- [20] 董起广, 何振嘉, 高红贝, 等. 沿黄地区盐碱地种植水稻土壤理化性质的比较. *植物资源与环境学报*, 2017, 26(2): 110-112.
- [21] 王相平, 杨劲松, 姚荣江, 等. 苏北滩涂水稻微咸水灌溉模式及土壤盐分动态变化. *农业工程学报*, 2014, 30(7): 54-63.
- [22] 王秋菊, 宫秀杰, 曹旭, 等. 三江平原草甸土不同种稻年限土壤理化性质演变特征. *中国土壤与肥料*, 2020(5): 10-16.
- [23] 霍朝晨, 赵铎, 何水清, 等. 盐碱土旱田改水田后其理化性质与微生物多样性差异. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2020, 32(1): 60-66.
- [24] Jandl R, Sollins P. Water-extractable soil carbon in relation to the belowground carbon cycle. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, 25(2): 196-201.
- [25] 任天志. 持续农业中的土壤生物指标研究. *中国农业科学*, 2000, 33(1): 71-78.
- [26] 张仕吉, 项文化, 孙伟军, 等. 湘中丘陵区不同土地利用方式土壤水溶性有机碳含量. *生态学杂志*, 2014, 33(8): 2065-2071.
- [27] 刘春增, 常单娜, 李本银, 等. 种植翻压紫云英配施化肥对稻田土壤活性有机碳氮的影响. *土壤学报*, 2017, 54(3): 657-669.
- [28] 许梦璐, 吴炜, 颜铮明, 等. 滨海滩涂不同土地利用类型土壤活性有机碳含量与垂直分布. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(4): 167-175.
- [29] Su Y Z, Liu T N, Wang X F, et al. Salinity effects on soil organic carbon and its labile fractions, and nematode communities in irrigated farmlands in an arid region, northwestern China. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2016, 8(1): 46-53.
- [30] 杨福, 梁正伟, 王志春, 等. 水稻耐盐碱品种(系)筛选试验与省区域试验产量性状的比较. *吉林农业大学学报*, 2007, 29(6): 596-600.
- [31] 周根友, 翟彩娇, 邓先亮, 等. 盐逆境对水稻产量、光合特性及品质的影响. *中国水稻科学*, 2018, 32(2): 146-154.
- [32] 韦还和, 葛佳琳, 张徐彬, 等. 盐胁迫下粳稻品种南粳 9108 分蘖特性及其与群体生产力的关系. *作物学报*, 2020, 46(8): 1238-1247.
- [33] 崔士友, 张洋, 翟彩娇, 等. 复垦滩涂微咸水灌溉下粳稻产量和品质的表现. *作物杂志*, 2022(1): 137-141.

## Short-Term Changes of Soil Characteristics and Rice Yield of Reclaimed Rice in Tidal Flat Aquaculture Ponds

Zhang Jiao<sup>1</sup>, Chen Pengjun<sup>2</sup>, Chen Yan<sup>3</sup>, Han Jijun<sup>2</sup>, Cui Shiyu<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Jiangsu Yanjiang Institute of Agricultural Sciences, Nantong 226012, Jiangsu, China;

<sup>2</sup>Jiangsu Geological Bureau/Coastal Saline-Alkali Land Ecological Rehabilitation and Sustainable Utilization Technology Innovation Center, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210007, Jiangsu, China;

<sup>3</sup>Rudong County Natural Resources and Planning Bureau, Rudong 226400, Jiangsu, China)

**Abstracts** To investigate the effects of rice cultivation on the short-term changes of soil characteristics and rice yield performance in the reclamation area of tidal flat aquaculture, a field experiment including 0 year's field derived from the adjacent reclaimed land (CK, 0Y), one year's field (1Y), two years' field (2Y) and three years' field (3Y) for planting rice were conducted in the reclamation area of tidal flat aquaculture. The results showed that in the 0-20cm surface layer, soil EC, pH, porosity,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , available K and water-soluble soil organic carbon (WSOC)/soil organic carbon (SOC) showed the decreasing trend, while soil bulk density, SOC, total nitrogen, WSOC and C/N showed the increasing trend. In the 20-40cm soil layer, EC,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , SOC, total nitrogen, WSOC, WSOC/SOC and C/N showed similar trends as in the 0-20cm soil layer. In 0-20cm soil layer, SOC, WSOC, available P and C/N increased, while available K and WSOC/SOC decreased with the increase of planting years. Meanwhile, compared with those in 0Y plots, the SOC concentration in 1Y, 2Y and 3Y plots were increased by 32.18%, 34.67% and 111.03%, the WSOC concentration were increased by 15.90%, 11.82% and 22.72%, respectively. And 3Y plots were significantly higher than those in 1Y and 2Y plots. Rice yield in 2Y and 3Y plots increased by 26.33% and 42.89% compared with 1Y plots ( $P < 0.05$ ). Correlation analysis showed that rice yield was significantly positively correlated with grain number per panicle ( $P < 0.01$ ). Therefore, we concluded that cultivation of reclaimed rice in the short term could improve the soil quality, especially the contents of organic carbon and water-soluble organic carbon. Meanwhile, the increase of grain number per panicle was the main reason for the increase of rice yield in tidal flat.

**Key words** Mariculture pond; Rice cultivation in tidal flats; Rice; Reclamation of tidal flats; Soil improvement