

围垦时间和利用方式对浙东海涂 土壤有机碳和磷素的影响

伍少福¹, 石其伟², 顾昊男¹, 章明奎^{3*}

(1.绍兴市粮油作物技术推广中心, 浙江 绍兴 312000; 2.绍兴市柯桥区农业水产技术推广站, 浙江 绍兴 312030; 3.浙江大学 环境与资源学院, 杭州 310058)

摘要:【目的】研究围垦海涂土壤有机碳和磷素变化特点, 为科学施肥提供理论基础和依据。【方法】在浙江东部的浙北-杭州湾和浙南-乐清湾滨海平原选择不同利用方式的代表性海涂土壤(蔬菜地、果园和水田), 以荒地作为对照(CK), 分析了土壤有机碳和磷素组成与围垦时间和利用方式的关系。【结果】随着围垦时间的增加, 海涂土壤pH值下降, 土壤有机碳(TOC)、全磷(TOP)和有效磷量增加。围垦50 a后, 浙北-杭州湾和浙南-乐清湾土壤pH值分别下降1.72~2.36和1.14~2.24, 有机碳量分别增加126.46%~294.97%和130.37%~266.14%, 全磷量分别增加17.66%~100.00%和39.31%~87.20%。土壤pH值从高到低表现形式为: 荒地>水田>果园>蔬菜地; 有机碳: 水田>果园>蔬菜地>荒地; 土壤全磷和有效磷: 荒地<水田<果园<蔬菜地。海涂围垦利用明显增加了土壤各形态的有机碳。随着围垦利用时间的增加, 游离态颗粒有机碳占有机碳的比值(fPOC/TOC)先明显下降后缓慢增加的变化特点, 闭蓄态颗粒有机碳占有机碳的比值(oPOC/TOC)逐渐增加, 而矿物结合态有机碳占有机碳的比值(MOC/TOC)先明显增加后又呈现缓慢下降。MOC/TOC比例: 水田>果园>蔬菜地, 表明水田环境更易形成相对稳定的有机碳(MOC)。颗粒态有机碳的占比(包括fPOC/TOC和oPOC/TOC)均为乐清湾低于杭州湾, 而MOC/TOC表现为乐清湾高于杭州湾。TOC与所有形态有机碳之间均存在极显著相关性, 但TOP与各形态磷均无相关性。【结论】海涂围垦后土壤有机碳量、磷素量和形态组成可发生持续变化, pH值呈下降趋势, 有机碳和磷素逐渐积累, 利用方式可影响海涂土壤有机碳和磷素的积累速度, 种植水稻有利于有机碳固定, 种植蔬菜将增强磷素积累。

关键词: 海涂; 碳库; 磷积累; 形态组成; 围垦时间; 利用方式; 变化规律

中图分类号: S158.5

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023026

OSID:



伍少福, 石其伟, 顾昊男, 等. 围垦时间和利用方式对浙东海涂土壤有机碳和磷素的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(10): 105-113.

WU Shaofu, SHI Qiwei, GU Haonan, et al. Effect of Reclaiming Duration and Land Usage on Organic Carbon and Phosphorus in Coastal Saline Soils in Eastern Zhejiang Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(10): 105-113.

0 引言

【研究意义】海涂是沿海地区位于潮间带干湿交替区域由泥沙覆盖的海滩地, 是我国东部地区耕地资源的重要来源^[1]。海涂围垦出露地表后成土环境发生了很大的变化, 可发生脱盐、脱钙、有机碳积累、氧化与还原等多种成土过程。同时, 海涂的开发利用改变了地表物质和水热平衡, 这些变化可改变土壤性状如团聚体及其有机碳(TOC)的演变过程。由于海涂土壤发育于海相沉积物, 含有不同量的碳酸钙, 其土

壤钾素较为丰富, 但有机碳、氮素和磷素一般较低^[2], 是发展农业的主要限制因素之一, 因此研究海涂土壤有机碳、氮素和磷素量及形态的演变有助于改善耕地质量状况。

【研究进展】土壤有机碳是土壤的重要组成部分, 是土壤形成基础肥力的保障。土壤氮、磷、钾等大量元素是植物生长的重要营养元素, 科学了解土壤有机碳及养分的形态变化及它们之间的关系可以为科学施肥提供依据。土壤中氮素积累一般与有机碳同步, 随着有机碳的积累土壤氮素也逐渐增加; 同时, 有机碳的积累也可显著促进土壤结构的形成, 改善土壤物理性状^[3]。因此, 增加土壤有机碳库储量有利于提升海涂土壤质量。近年来, 国内外多数研究表明农田土壤有机碳和氮磷等养分受土壤形成、种植年限、施肥措施、水分管理、土地利用方式等影响^[4-9], 但

收稿日期: 2023-01-29 修回日期: 2023-06-13 网络出版日期: 2023-10-17
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41977001); 绍兴市科技局项目(2023A12005)

作者简介: 伍少福(1981-), 男, 高级农艺师, 主要从事土壤环境质量研究。E-mail: sf_wu@163.com

通信作者: 章明奎(1964-), 男, 教授, 主要从事土壤肥料研究。

E-mail: mkzhang@zju.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

以往的研究较多关注土壤有机碳和全磷（TOP）的变化，缺乏对其形态变化的认识。

【切入点】土壤中有有机碳和磷素形态组成较为复杂，不同组分的有机碳和磷素具有不同的生态功能。土壤有机碳中的粗颗粒态有机碳（cfPOC）和细颗粒态有机碳（ffPOC）是土壤有机碳的非保护性部分，主要由分解或未分解的动植物残体组成，具有易矿化分解、移动性强、生物有效性高、响应速度快等特点，是短期环境变化的敏感性指标。矿物结合态有机碳（MOC）是有机质分解的最终产物，是土壤有机碳的主要成分，其通过各种键合反应与黏粒矿物紧密结合并稳定在矿物表面，是受化学性保护的惰性或稳定性碳库，可以反映出土壤长期固碳的巨大潜能^[10]。同时，土壤中磷素也以不同形态存在，主要有有机态和无机态，土壤中的有机磷需要经过矿化成无机磷后才能被植物吸收利用，不同形态的无机磷植物有效性存在很大差异，土壤中磷的存在形态和比例决定了土壤磷素的供应能力^[11]。因此，评估土壤有机碳和磷的变化不仅要考虑储量，还要考虑其组成和赋存形态^[12-13]，但至今对海涂土壤有机碳和磷形态的演变规律及影响因素了解甚少，在一定程度影响了对海涂围垦后土壤质量演变的认识。

【拟解决的关键问题】浙江省海涂资源丰富，新中国成立以来围涂 16.5 万 hm^2 ，占全国海涂资源的 18.6%，分布有不同时期围垦的海涂^[14]。本研究在浙

江东部的浙北-杭州湾和浙南-乐清湾滨海平原选择不同利用方式的代表性海涂土壤（蔬菜地、果园和水田），以荒地作为对照，系统分析了土壤有机碳及其组分和磷素及其形态，探讨了土壤有机碳、磷素组成与围垦时间和利用方式的关系，以期科学管理海涂土壤提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤采集与制备

研究区海涂土地利用方式有荒地、蔬菜地（种植蔬菜）、果园和水田等 4 类，其中荒地主要分布于未围垦和围垦时间较短（5~15 a）的海涂中，而水田和果园主要分布于围垦时间较长（15 a 以上）的海涂中。考虑到浙北和浙南海涂土壤质地有较大的差异及围垦时间的不同，研究以象山港为分界线，把浙东海涂平原分为浙北-杭州湾和浙南-乐清湾 2 个部分，于 2020 年 12 月分别按围垦时间（0、5~15、15~50 a 和 >50 a）和利用方式（荒地、蔬菜地、果园和水田）采集表土样（0~20 cm），其中围垦时间 0 a 指没有围垦的海涂，作为对照。根据围垦时间与利用方式组合，分别把浙北和浙南海涂平原分为 9 个类别采样单元（表 1），每个单元各选择 10 个采样田块（重复样），每一田块中采用“S”型布点法采集 6 个样品并经充分混合后成为一个分析样。样品风干、剔除其中石块及植物残体等杂质后过 2 mm 和 0.15 mm 土筛用于分析。

表 1 围垦时间和利用方式对海涂酸碱度、有机碳量、黏粒和磷素的影响

Table 1 Effects of reclamation time and land use patterns on the acidity and alkalinity, total organic carbon, clay and phosphorus of the soil

围垦时间/a	利用方式	土壤类型	pH	TOC/(g kg^{-1})	黏粒/(g kg^{-1})	TOP/(mg kg^{-1})	有效磷/(mg kg^{-1})
浙南-乐清湾							
0	荒地	盐土	8.27 $\pm$ 0.12a	5.73 $\pm$ 1.11e	344 $\pm$ 21ab	547 $\pm$ 42ef	5.25 $\pm$ 2.24e
5~15	蔬菜地	盐土	8.19 $\pm$ 0.08a	4.45 $\pm$ 0.65f	324 $\pm$ 24b	587 $\pm$ 54e	7.25 $\pm$ 3.21e
	荒地	盐土	8.23 $\pm$ 0.11a	4.88 $\pm$ 0.32ef	352 $\pm$ 20ab	527 $\pm$ 37f	5.57 $\pm$ 2.43e
15~50	蔬菜地	潮土	7.36 $\pm$ 0.07c	11.53 $\pm$ 2.14d	367 $\pm$ 32a	716 $\pm$ 46cd	14.64 $\pm$ 3.43d
	果园	潮土	7.83 $\pm$ 0.11b	11.68 $\pm$ 1.45d	336 $\pm$ 24ab	664 $\pm$ 28d	19.65 $\pm$ 4.22c
	水田	水稻土	7.94 $\pm$ 0.06b	17.20 $\pm$ 1.87b	326 $\pm$ 23b	567 $\pm$ 31ef	13.65 $\pm$ 4.24d
>50	蔬菜	水稻土	6.03 $\pm$ 0.05f	13.20 $\pm$ 1.21cd	337 $\pm$ 19ab	1024 $\pm$ 97a	39.24 $\pm$ 7.56a
	果园	水稻土	7.04 $\pm$ 0.06e	14.00 $\pm$ 2.13c	358 $\pm$ 42a	812 $\pm$ 54b	28.54 $\pm$ 5.33b
	水田	水稻土	7.13 $\pm$ 0.04d	20.98 $\pm$ 2.21a	327 $\pm$ 33b	762 $\pm$ 38bc	17.65 $\pm$ 4.76cd
浙北-杭州湾							
0	荒地	盐土	8.15 $\pm$ 0.14a	3.18 $\pm$ 0.74e	117 $\pm$ 11ab	487 $\pm$ 25de	3.87 $\pm$ 1.65d
5~15	蔬菜地	盐土	7.32 $\pm$ 0.08c	2.70 $\pm$ 0.32e	121 $\pm$ 10a	493 $\pm$ 32de	5.54 $\pm$ 2.43d
	荒地	盐土	8.25 $\pm$ 0.12a	3.31 $\pm$ 0.54de	115 $\pm$ 8ab	463 $\pm$ 24e	4.89 $\pm$ 2.21d
15~50	蔬菜地	潮土	6.14 $\pm$ 0.15f	4.79 $\pm$ 1.02d	109 $\pm$ 9b	578 $\pm$ 41c	12.71 $\pm$ 3.12c
	果园	潮土	6.77 $\pm$ 0.04d	5.88 $\pm$ 0.65c	121 $\pm$ 10a	522 $\pm$ 37cd	18.52 $\pm$ 3.87b
	水田	水稻土	7.45 $\pm$ 0.05b	10.23 $\pm$ 1.45a	106 $\pm$ 8b	512 $\pm$ 41cd	10.68 $\pm$ 3.54c
>50	蔬菜地	潮土	5.79 $\pm$ 0.12g	7.20 $\pm$ 1.21b	122 $\pm$ 9ab	974 $\pm$ 71a	47.65 $\pm$ 11.43a
	果园	潮土	5.94 $\pm$ 0.06g	7.62 $\pm$ 1.32b	103 $\pm$ 10b	643 $\pm$ 54b	17.42 $\pm$ 6.54b
	水田	水稻土	6.43 $\pm$ 0.06e	12.56 $\pm$ 1.89a	127 $\pm$ 11a	573 $\pm$ 37c	14.54 $\pm$ 4.56bc

注 同列统计值后英文字母不同者差异显著（ $p<0.05$ ），浙南-乐清湾与浙北-杭州湾分组统计。下同。

1.2 测试方法

土壤有机碳分组参照 Six 等^[10]提出的筛分与密度浮选相结合的方法分离。其操作步骤简述如下: 先用筛分法把土壤有机碳分为粗游离态颗粒有机碳 (cfPOC, 250~2 000 μm)、微团聚体内颗粒有机碳 (mPOC, 53~250 μm) 和矿物结合态有机碳 (MOC, <53 μm) 等 3 个部分。然后, 采用密度浮选法进一步把微团聚体内颗粒有机碳 (mPOC) 分为细游离态颗粒有机碳 (ffPOC) 和闭蓄态颗粒有机碳 (oPOC)。分离的各组分烘干至恒质量, 用重铬酸钾氧化法测定。把粗游离态颗粒有机碳 (cfPOC)、细游离态颗粒有机碳 (ffPOC) 总称为游离态颗粒有机碳 (fPOC)。

土壤磷形态分析测定采用 Hedley 等提出的方法^[15]。土壤颗粒组成、速效磷 (Olsen-P) 和 pH 分别采用比重计法、钼锑抗比色法和电位法测定^[16]。

1.3 数据处理

数据采用 Excel 2003 进行分析和作图。采用 SPSS 21.0 进行方差分析和 Pearson 相关性分析, 其中处理间差异采用 Duncan 多重比较法。

2 结果与分析

2.1 土壤酸碱度、有机碳量、黏粒和磷素的变化

表 1 为围垦时间和利用方式对海涂土壤酸碱度、有机碳量、黏粒和磷素的变化情况, 由表 1 可知, 浙北-杭州湾和浙南-乐清湾海涂土壤酸碱度、有机碳量、黏粒和含磷量存在一定的差异, 乐清湾主要为黏涂, 杭州湾为砂涂, 前者黏粒量平均约为后者的 3 倍。相应地, 相似围垦时间和利用方式的乐清湾海涂土壤有机碳、全磷高于杭州湾海涂, 前者的 pH 值略高于后者, 但二者的有效磷较为接近。

随着围垦时间的增加, 浙北-杭州湾和浙南-乐清湾海涂土壤 pH 值下降 (浙北-杭州湾和浙南-乐清湾土壤分别下降 1.72~2.36 和 1.14~2.24), 土壤有机碳、全磷和有效磷量增加。围垦 15 a 后, 土壤 pH 值显著低于未围垦的荒地, 而有机碳、全磷和有效磷量明显高于未围垦的荒地。围垦 50 a 后, 浙南-乐清湾蔬菜地、果园和水田土壤有机碳量分别比 CK (围垦前) 增加 130.37%、144.33% 和 266.14%, 全磷量分别比 CK 增加 87.20%、48.45% 和 39.31%; 浙北-杭州湾蔬菜地、果园和水田土壤有机碳量分别比 CK 增加 126.46%、139.62% 和 294.97%, 全磷量分别比 CK 增加 100.00%、32.03% 和 17.66%。

利用方式对土壤有关性状的影响更为明显, 土壤 pH 值一般是: 荒地>水田>果园>蔬菜地, 土壤有机碳量一般是: 水田>果园>蔬菜地>荒地, 土壤全磷和有效磷量呈现荒地<水田<果园<蔬菜地, 恰好与 pH 值

的变化相反, 说明围垦后土壤养分的提高比较显著。围垦 50 a 后, 浙南-乐清湾水田和果园土壤 pH 值分别比蔬菜地高出 1.10 和 1.01, 水田土壤有机碳量分别比蔬菜地和果园高出 58.94% 和 49.86%, 蔬菜地土壤全磷分别比水田和果园高出 34.38% 和 26.11%; 浙北-杭州湾水田和果园土壤 pH 值分别比蔬菜地高出 0.64 和 0.15, 水田土壤有机碳量分别比蔬菜地和果园高出 74.44% 和 64.83%, 蔬菜地土壤全磷量分别比水田和果园高出 69.98% 和 51.48%。这表明人类活动对土壤理化性质改变有着较大的影响。结果还表明, 土壤全磷和有效磷积累主要取决于土壤利用方式。

2.2 土壤有机碳组分的变化

在利用初期 (5~15 a), 因围垦活动对土壤的搅动, 与围垦前比较土壤有机碳、fPOC 显著下降, 而 oPOC、MOC 变化不同地区表现不一致, 其中浙南-乐清湾变化不明显, 而浙北-杭州湾的 MOC 明显提高, 表明耕作活动促进了 fPOC 向 MOC 转变 (表 2)。利用 15~50 a 和 50 a 后, 土壤有机碳随时间呈显著提高, 各组分有机碳 (包括 fPOC、oPOC 和 MOC) 也呈现增加, 且基本表现水田>果园>蔬菜地, 表明海涂围垦利用后明显增加了各形态的有机碳。围垦 50 a 后浙南-乐清湾蔬菜地、果园和水田土壤 fPOC 分别比围垦前增加 110.56%、114.60% 和 190.06%, MOC 分别比围垦前增加 145.61%、174.06% 和 358.58%; 浙北-杭州湾蔬菜地、果园和水田土壤 fPOC 分别比围垦前增加 98.36%、101.64% 和 216.39%, MOC 分别比围垦前增加 208.57%、254.28% 和 548.57%。

表 2 结果还表明, 研究土壤有机碳主要以 fPOC 和 MOC 为主, 其中 fPOC 占 41.18%~76.56%, MOC 占 21.88%~54.61%, 而 oPOC 仅占 1.56%~4.23%。利用方式和围垦时间对海涂土壤有机碳各组分比例的影响有所差异, 随着围垦利用时间的增加, fPOC/TOC 呈现先明显下降后又能缓慢增加的变化特点, oPOC/TOC 呈现逐渐增加, 而 MOC/TOC 呈现先明显增加后又呈现缓慢下降的变化特点。fPOC/TOC、oPOC/TOC 比例蔬菜地>果园>水田, 但 MOC/TOC 比例: 水田>果园>蔬菜地。围垦 50 a 后浙南-乐清湾和浙北-杭州湾水田、果园和蔬菜地土壤的 MOC/TOC 分别为 52.26%、46.78%、44.47% 和 36.14%、32.50%、30.05%, 表明水田环境更易形成相对稳定的有机碳 (MOC)。不同土壤中的表现有一定的差异, 总体上, 颗粒态有机碳的占比 (包括 fPOC/TOC 和 oPOC/TOC) 均是浙南-乐清湾低于浙北-杭州湾, 而 MOC/TOC 却是浙南-乐清湾高于浙北-杭州湾, 可能与两地土壤质地有关。

表 2 围垦时间和利用方式对海涂土壤有机碳组分的影响

Table 2 Effect of reclamation time and landuse patterns on organic carbon content of the soil

围垦时间/a	利用方式	fPOC/(g kg ⁻¹)	oPOC/(g kg ⁻¹)	MOC/(g kg ⁻¹)	fPOC/TOC/%	oPOC/TOC/%	MOC/TOC/%
浙南-乐清湾							
0	荒地	3.22 ±0.28d	0.12 ±0.02d	2.39 ±0.28c	56.23 ±5.33a	2.01 ±0.22c	41.76 ±4.65b
5~15	蔬菜地	1.97 ±0.22f	0.14 ±0.03d	2.34 ±0.25c	44.28 ±5.14b	3.23 ±0.31b	52.49 ±5.12a
	荒地	2.51 ±0.18e	0.12 ±0.02d	2.25 ±0.32c	51.39 ±5.69ab	2.45 ±0.28c	46.16 ±5.24b
15~50	蔬菜地	5.38 ±0.35c	0.38 ±0.04c	5.77 ±0.46b	46.62 ±3.65b	3.28 ±0.34b	50.10 ±6.25ab
	果园	5.10 ±0.41c	0.43 ±0.05c	6.15 ±0.74b	43.62 ±4.58b	3.65 ±0.34b	52.73 ±4.98a
	水田	7.09 ±0.56b	0.72 ±0.08a	9.39 ±0.87a	41.18 ±5.64b	4.21 ±0.41a	54.61 ±6.32a
>50	蔬菜地	6.78 ±0.47b	0.56 ±0.06b	5.87 ±0.63b	51.30 ±5.23ab	4.23 ±0.37a	44.47 ±5.32b
	果园	6.91 ±0.38b	0.54 ±0.05b	6.55 ±0.78b	49.35 ±5.23ab	3.87 ±0.28ab	46.78 ±6.63b
	水田	9.34 ±0.77a	0.68 ±0.04a	10.96 ±1.89a	44.51 ±3.89b	3.23 ±0.45b	52.26 ±6.87ab
浙北-杭州湾							
0	荒地	2.44 ±0.27e	0.05 ±0.02d	0.70 ±0.08g	76.56 ±6.89a	1.56 ±0.21c	21.88 ±4.21c
5~15	蔬菜地	1.71 ±0.18f	0.07 ±0.03d	0.92 ±0.17f	63.30 ±5.89b	2.64 ±0.35b	34.06 ±3.54ab
	荒地	2.26 ±0.19e	0.07 ±0.02d	0.98 ±0.11f	68.20 ±6.22ab	2.20 ±0.17bc	29.60 ±3.32b
15~50	蔬菜地	3.12 ±0.21d	0.14 ±0.02c	1.52 ±0.23e	65.22 ±6.14b	2.97 ±0.28ab	31.81 ±3.25ab
	果园	3.69 ±0.32d	0.16 ±0.02bc	2.03 ±0.24c	62.75 ±5.69b	2.64 ±0.33b	34.61 ±3.45ab
	水田	6.06 ±0.41b	0.33 ±0.04a	3.84 ±0.41b	59.26 ±4.89b	3.27 ±0.42a	37.47 ±4.52a
>50	蔬菜地	4.84 ±0.25c	0.20 ±0.03b	2.16 ±0.27d	67.20 ±5.47b	2.75 ±0.34ab	30.05 ±2.87b
	果园	4.92 ±0.34c	0.22 ±0.03b	2.48 ±0.31c	64.58 ±5.32b	2.92 ±0.21ab	32.50 ±3.67ab
	水田	7.72 ±0.54a	0.31 ±0.04a	4.54 ±0.35a	61.43 ±4.55b	2.43 ±0.32b	36.14 ±4.21a

2.3 土壤磷组分的变化

除残余态磷和 HCl-P 外,其余形态的磷均随着围垦时间的增加而增加(表 3),其量表现为荒地<水田<果园<蔬菜地。不同利用方式之间 H₂O-P 和 NaHCO₃-IP 的差异(表 3)比土壤有效磷(表 1)的差异更为显著。与未围垦的荒地比较,随着围垦时间的增加,H₂O-P、NaHCO₃-IP、NaHCO₃-OP、NaOH-IP

和 NaOH-OP 的增幅大于全磷的变化(表 3),但小于有效磷的增幅(表 1)。围垦后,浙南-乐清湾和浙北-杭州湾海涂土壤全磷、有效磷、H₂O-P、NaHCO₃-IP、NaHCO₃-OP、NaOH-IP 和 NaOH-OP 平均增幅分别为 29.32%和 22.13%、248.07%和 326.20%、235.48%和 408.58%、199.58%和 427.07%、280.79%和 146.04%、105.02%和 242.76%、248.51%和 350.74%。

表 3 围垦时间和利用方式对海涂土壤不同形态磷量的影响

Table 3 Effect of reclamation time and landuse patterns on different forms of phosphorus content in the soil

mg/kg

围垦时间/a	利用方式	H ₂ O-P	NaHCO ₃ -IP	NaHCO ₃ -OP	NaOH-IP	NaOH-OP	HCl-P	残余态磷
浙南-乐清湾								
0	荒地	0.93 ±0.22ef	2.95 ±0.31f	6.13 ±0.54e	76.69 ±8.66g	18.49 ±2.28f	157.99 ±13.65cd	283.82 ±27.61ab
5~15	蔬菜地	1.17 ±0.31de	3.58 ±0.41e	6.28 ±0.71e	84.35 ±8.75fg	19.25 ±3.14f	181.24 ±15.65b	291.12 ±25.88ab
	荒地	0.79 ±0.24f	2.74 ±0.34f	6.06 ±0.59e	80.26 ±9.65fg	18.66 ±2.32f	149.84 ±14.32d	268.65 ±22.89b
15~50	蔬菜地	1.58 ±0.42d	4.37 ±0.39d	17.11 ±1.24d	129.38 ±11.24d	40.45 ±5.46e	204.72 ±19.65ab	318.39 ±25.32a
	果园	1.20 ±0.37de	3.85 ±0.41e	21.38 ±3.21c	116.33 ±10.2e	41.30 ±5.65e	176.19 ±11.32bc	303.75 ±24.65a
	水田	1.08 ±0.38de	3.80 ±0.45e	23.87 ±2.87c	91.00 ±8.65f	75.13 ±8.65c	94.49 ±8.65e	277.63 ±27.51b
>50	蔬菜地	11.67 ±1.12a	23.96 ±3.25a	42.39 ±3.65a	353.69 ±23.54a	126.16 ±10.21a	193.36 ±20.14b	272.77 ±24.35b
	果园	5.03 ±0.47b	18.19 ±1.02b	29.64 ±3.12b	237.67 ±18.54b	59.76 ±6.78d	239.32 ±25.62a	222.39 ±26.54c
	水田	2.44 ±0.52c	10.21 ±1.21c	40.01 ±3.22a	165.13 ±12.32c	134.80 ±8.65b	172.52 ±14.56bc	236.91 ±23.55c
浙北-杭州湾								
0	荒地	0.83 ±0.31e	2.29 ±0.37e	4.77 ±0.38e	28.68 ±4.23e	10.42 ±1.32f	242.79 ±22.68ab	197.21 ±20.87b
5~15	蔬菜地	0.94 ±0.28e	2.51 ±0.41e	3.35 ±0.34f	21.94 ±3.11f	9.22 ±1.22f	232.97 ±20.13ab	222.07 ±22.32ab
	荒地	0.74 ±0.24e	2.04 ±0.32e	3.38 ±0.52f	35.47 ±4.32e	7.73 ±1.32g	220.24 ±17.54b	193.41 ±17.65b
15~50	蔬菜地	2.49 ±0.64c	6.53 ±0.63d	7.40 ±0.93d	75.66 ±6.54cd	24.57 ±3.14e	233.37 ±28.66ab	227.99 ±21.33ab
	果园	2.04 ±0.52c	11.17 ±0.87b	8.04 ±0.96cd	67.08 ±8.14d	32.57 ±2.65d	216.76 ±17.65b	184.34 ±17.65b
	水田	1.69 ±0.34d	6.86 ±0.54d	10.14 ±1.54c	83.05 ±7.65c	43.37 ±5.47c	174.08 ±13.58c	192.82 ±16.54b
>50	蔬菜地	19.58 ±2.54a	45.29 ±4.25a	25.71 ±2.24a	259.86 ±16.58a	102.66 ±9.45a	276.96 ±32.45a	243.94 ±16.54a
	果园	3.60 ±0.47b	9.90 ±1.02c	19.42 ±2.08b	155.41 ±11.24b	74.20 ±6.38b	159.35 ±21.25c	221.11 ±17.65ab
	水田	2.69 ±0.52c	12.26 ±1.14b	16.45 ±2.11b	87.96 ±10.21c	81.42 ±5.65b	158.53 ±11.25c	213.69 ±19.87b

表 4 是围垦时间和利用方式对土壤不同形态磷组成比例的影响,由表 4 可知,海涂土壤磷素主要以残余态磷和 HCl-P(碳酸盐结合态)为主,随着围垦时间的增加,残余态磷和 HCl-P 的比例呈下降的趋

势,而其他形态磷的比例均呈现增加。在围垦时间相同的土壤中,H₂O-P、NaHCO₃-IP、NaHCO₃-OP、NaOH-IP 和 NaOH-OP 占全磷的比例一般是以蔬菜地最高,其次为果园,水田较低。从表 4 结果还可以看

出，随着围垦时间的增加，土壤脱钙程度加深，pH 和 NaOH-IP 的比例呈现增加。土壤中 NaHCO₃-OP 和值有所下降，土壤中 HCl-P 比例逐渐下降。同时，随 NaOH-OP 分别为与有机质结合的速效磷和缓效磷，其比例一般随土壤有机质量的增加而增加。

表 4 围垦时间和利用方式对海涂土壤不同形态磷组成的影响

围垦时间/a	利用方式	H ₂ O-P	NaHCO ₃ -IP	NaHCO ₃ -OP	NaOH-IP	NaOH-OP	HCl-P	残余态磷
浙南-乐清湾								
0	荒地	0.17 ±0.04de	0.54 ±0.07c	1.12 ±0.19e	14.02 ±1.74e	3.38 ±0.45d	28.88 ±2.87a	51.89 ±6.87a
5~15	蔬菜地	0.20 ±0.05d	0.61 ±0.07c	1.07 ±0.22e	14.37 ±2.21e	3.28 ±0.54d	30.88 ±3.24a	49.60 ±6.12a
	荒地	0.15 ±0.03e	0.52 ±0.03c	1.15 ±0.21e	15.23 ±1.24de	3.54 ±0.45d	28.43 ±3.14a	50.98 ±7.54a
15~50	蔬菜地	0.22 ±0.04d	0.61 ±0.04c	2.39 ±0.31d	18.07 ±1.52c	5.65 ±0.78c	28.59 ±2.45a	44.47 ±6.02a
	果园	0.18 ±0.02de	0.58 ±0.07c	3.22 ±0.23c	17.52 ±2.03c	6.22 ±1.02c	26.54 ±3.08b	45.75 ±5.33a
	水田	0.19 ±0.04de	0.67 ±0.05c	4.21 ±0.28b	16.05 ±2.18cd	13.25 ±1.77b	16.67 ±1.65d	48.97 ±3.89a
>50	蔬菜地	1.14 ±0.22a	2.34 ±0.18a	4.14 ±0.34b	34.54 ±3.54a	12.32 ±2.14b	18.88 ±2.54cd	26.64 ±3.56c
	果园	0.62 ±0.07b	2.24 ±0.23a	3.65 ±0.28c	29.27 ±3.28a	7.36 ±1.01c	29.47 ±3.12ab	27.39 ±3.45bc
	水田	0.32 ±0.08c	1.34 ±0.21b	5.25 ±0.44a	21.67 ±1.77b	17.69 ±1.33a	22.64 ±3.54c	31.09 ±4.21b
浙北-杭州湾								
0	荒地	0.17 ±0.05 d	0.47 ±0.07e	0.98 ±0.11d	5.89 ±0.39f	2.14 ±0.45f	49.86 ±4.89a	40.50 ±5.11ab
5~15	蔬菜地	0.19 ±0.03 d	0.51 ±0.11e	0.68 ±0.08e	4.45 ±0.54g	1.87 ±0.28g	47.26 ±5.02a	45.05 ±4.56a
	荒地	0.16 ±0.02 d	0.44 ±0.08e	0.73 ±0.06e	7.66 ±0.88e	1.67 ±0.32g	47.57 ±5.32a	41.77 ±5.02ab
15~50	蔬菜地	0.43 ±0.07 bc	1.13 ±0.28d	1.28 ±0.21c	13.09 ±0.89d	4.25 ±1.21e	40.38 ±4.21b	39.45 ±4.25ab
	果园	0.39 ±0.08c	2.14 ±0.34b	1.54 ±0.24bc	12.85 ±1.14d	6.24 ±0.87d	41.53 ±3.89b	35.32 ±4.21b
	水田	0.33 ±0.06c	1.34 ±0.22cd	1.98 ±0.32b	16.22 ±2.54c	8.47 ±1.14c	34.00 ±4.22c	37.66 ±2.87b
>50	蔬菜地	2.01 ±0.34a	4.65 ±0.32a	2.64 ±0.42a	26.68 ±3.66a	10.54 ±2.07bc	28.44 ±4.21cd	25.05 ±3.23c
	果园	0.56 ±0.14bc	1.54 ±0.24c	3.02 ±0.28a	24.17 ±3.21b	11.54 ±2.14b	24.78 ±3.54d	34.39 ±2.87b
	水田	0.47 ±0.12bc	2.14 ±0.41b	2.87 ±0.31a	15.35 ±2.12c	14.21 ±1.24a	27.67 ±4.21cd	37.29 ±3.56b

2.4 土壤有机碳与磷的关系

图 1 结果表明浙南-杭州湾、浙北-乐清湾 TOC : TOP 变化范围分别为 7.58%~30.33%、5.91%~21.92%，

随着围垦时间的增长，两地均呈先减后升的趋势，围垦初期蔬菜地和荒地差异不明显，围垦后期均是水田>果园>蔬菜地。

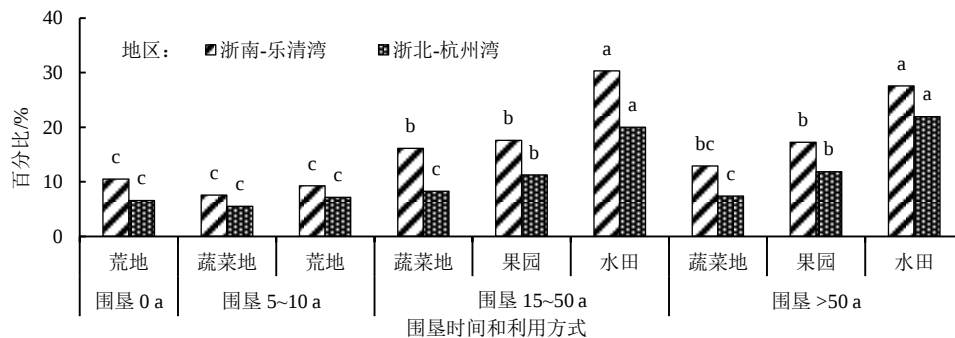


图 1 围垦时间和利用方式对海涂土壤 TOC : TOP 的影响

Fig.1 Effect of reclamation time and landuse patterns on TOC : TOP of the soil

表 5 海涂土壤不同形态碳和磷组成的相关性

碳和磷形态	TOC	fPOC	oPOC	MOC	H ₂ O-P	NaHCO ₃ -IP	NaHCO ₃ -OP	NaOH-IP	NaOH-OP	HCl-P	残余态磷	TOP
TOC	1											
fPOC	0.955**	1										
oPOC	0.967**	0.885**	1									
MOC	0.976**	0.868**	.968**	1								
H ₂ O-P	0.119	0.243	0.142	0.015	1							
NaHCO ₃ -IP	0.201	0.345	0.194	0.077	0.974**	1						
NaHCO ₃ -OP	0.837**	0.834**	0.849**	0.786**	0.537*	0.565*	1					
NaOH-IP	0.500*	0.555*	0.551*	0.422	0.787**	0.777**	0.857**	1				
NaOH-OP	0.787**	0.853**	0.742**	0.692**	0.603**	0.646**	0.927**	0.787**	1			
HCl-P	-0.466	-0.345	-0.497*	-0.526*	0.378	0.383	-0.136	0.142	-0.178	1		
残余态磷	0.249	0.068	0.313	0.367	0.03	-0.07	0.247	0.254	0.113	-0.346	1	
TOP	0.196	0.201	0.098	0.187	0.236	0.338	0.128	0.07	0.151	0.184	0.082	1

注 *和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关。

各形态有机碳、磷之间多存在相关关系(表5)。TOC 与所有形态有机碳之间均存在极显著关系,但 TOP 与各形态磷均无相关性,说明总碳与各组分关系密切相关。fPOC、oPOC 和 MOC 之间均存在极显著关系, $\text{H}_2\text{O-P}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-IP}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-OP}$ 、 NaOH-IP 之间情况与之类似,均存在显著或极显著关系,但与 HCl-P 、残余态磷和 TOP 无相关性。各形态有机碳与 $\text{H}_2\text{O-P}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-IP}$ 、 HCl-P 、残余态磷和 TOP 不存在相关性。除 MOC 与 NaOH-IP 外,各形态有机碳与 $\text{NaHCO}_3\text{-OP}$ 、 NaOH-IP 和 NaOH-OP 均存在显著或极显著关系。所有形态 $\text{H}_2\text{O-P}$ 、残余态磷、TOP 和所有形态碳的相关性都不显著。

3 讨论

土地利用是人为因素影响土壤最直接的活动,能够长期持续改变土壤结构、养分特征以及土壤微生物的代谢活动,使得土壤物理、化学及生物特性发生改变。不同利用方式的农田地表覆盖物、种植制度及人为干扰程度不同,容易造成耕层土壤结构和碳氮磷等养分的差异。海涂围垦是沿海地区开拓土地资源和缓解人地矛盾的重要措施,土壤环境也因此发生剧烈变化^[17]。不同利用方式对土壤理化性质的影响结果不一致。张晶等^[18]认为随着围垦年限的增加,垦区土壤 pH 值下降,土壤养分呈增加趋势,垦区围垦年限对土壤 pH 值、有机碳与速效养分之间的相关性存在一定影响,其中 10 a 围垦期是 pH 值与有机碳、速效磷之间相关性变化的转折点。解雪峰等^[19]认为土壤 pH 值在围垦后经历了短暂上升后波动下降,土壤养分随围垦年限的增加呈现出“迅速累积-逐渐消耗-再次累积”的过程,而金雯晖等^[20]认为滨海盐土随着围垦年限的增长,土壤碳储量与总氮量随之增加、pH 值与 EC 随之降低,围垦 3 a 以上表层土壤有机碳可增加 0.24% 左右;围垦时间大于 52 a,有机碳自 0.1% 增加到 1.6%。本研究表明,土壤 pH 值荒地>水田>果园>蔬菜地,土壤全磷和有效磷量荒地<水田<果园<蔬菜地,二者刚好相反,这可能由于蔬菜地施肥量较高,导致土壤 pH 值下降最为明显而磷等积累相对较高^[21]。土壤有机碳量水田>果园>蔬菜地>荒地,水田环境有利于土壤有机碳的积累,可能原因是水田常年淹水,铁锰氧化物在缺氧条件下被还原形成 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Mn}(\text{OH})_2$,使水田 pH 值升高,促进有机碳从土壤矿物上解吸,进而增加有机碳量,因此水田有机碳量最高^[22]。

土壤中的有机碳具非均质性,不同形态的有机碳稳定性不同。游离态颗粒有机碳(fPOC)和闭蓄态颗粒有机碳(oPOC)主要来源于分解或未分解的动

植物残体^[23-24],是土壤中活性有机碳的主要组分;闭蓄态颗粒有机碳(oPOC)分布在团聚体内部^[25],受团聚体物理性保护,可阻碍微生物的分解^[23];而矿物结合态有机碳(MOC)是与土壤细颗粒的有机碳体,稳定性高,是土壤有机碳固存的主要形态^[26]。从农田肥力角度考虑,活性有机碳量高有利于矿化和提高养分供给水平,但从农田固碳角度考虑,稳定性有机碳量高则有利于土壤有机碳的固定^[27]。本研究表明,海涂开发利用 15~50 a 和 50 a 后,土壤各组分 fPOC、oPOC 和 MOC 呈现增加,表明海涂围垦利用可促进土壤中各形态有机碳的积累。fPOC/TOC 和 oPOC/TOC 均是浙南-乐清湾低于浙北-杭州湾,而 MOC/TOC 却是浙南-乐清湾高于浙北-杭州湾,表明黏质土壤具有丰富的黏土矿物,更易形成稳定态的有机碳。而随着围垦利用时间的增加,fPOC/TOC 先明显下降后能缓慢增加,oPOC/TOC 呈现逐渐增加,而 MOC/TOC 呈先明显增加后又呈缓慢下降的变化特点,表明当有机碳积累较高时,新积累的有机碳更易向 fPOC 和 oPOC 转变,以非稳定态形式存在于土壤中。

海涂土壤中磷主要以钙结合态的无机磷为主,在近海碱性环境下,土壤吸附外源磷后,易形成大量钙磷(Ca-P)并累积在土壤中^[28],因此,海涂自然土壤磷素较低,一般不能满足农作物生长的需求,海涂围垦种植农作物时需要施用磷肥来提高土壤中的有效磷。本研究显示海涂土壤多种形态的磷随着围垦时间的增加而增加可能与长期施用磷肥有关。磷肥引入的磷素进入土壤后将与土壤中的铁、钙、黏粒等组分发生化学作用,涉及的作用机理包括沉淀-溶解、吸附-解吸等^[29]。有研究表明^[30-33],随着土壤磷素的增加,土壤对磷的固定作用逐渐下降,所以随着围垦时间的增加,土壤中有效性较高的磷形态 $\text{H}_2\text{O-P}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-IP}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-OP}$ 、 NaOH-IP 和 NaOH-OP 的增幅远高于全磷的增幅。土壤中氧化铁、碳酸钙、黏粒矿物类型对土壤磷的固定有很大的影响^[34-35]。海涂土壤含有较高的碳酸钙,磷与土壤中碳酸钙作用可形成 HCl-P ,因此本研究土壤中 HCl-P 的比例较高。 $\text{H}_2\text{O-P}$ 和 $\text{NaHCO}_3\text{-IP}$ 是与土壤组分弱结合态磷,其具有较高的有效性和短期内被作物吸收^[36],随着土壤磷积累的增加,土壤磷饱和度增加,土壤中对磷有强吸附或固定作用的反应点位逐渐减少,土壤释放磷的潜力增加。所以,土壤中 $\text{H}_2\text{O-P}$ 和 $\text{NaHCO}_3\text{-IP}$ 均是随土壤磷积累的增加而明显增加。但 $\text{H}_2\text{O-P}$ 的增加可能加重土壤磷的淋失,需重视过量施用磷肥增加农田面源污染的风险^[37]。

土壤碳磷比(TOC:TOP)通常被认为是土壤磷元素矿化能力的指标,可以反映从生态系统中吸收固

持磷的潜在能力^[38]。本研究表明浙南-杭州湾、浙北-乐清湾 TOC:TOP 变化范围分别为 7.58%~30.33%、5.91%~21.92%，随着围垦时间的增长，两地均呈先减后升的趋势，围垦初期蔬菜地和荒地差异不明显，围垦后期均是水田>果园>蔬菜地。说明水田耕层土壤具有较强的固磷潜力。可能原因是水田长期淹水，土壤温度较低、通气透水性较差，处于强还原状态，微生物活性降低，土壤 C、P 矿化速率慢，而有机碳来源丰富，造成水田 TOC:TOP 较高，而蔬菜地土壤通气性好，微生物和土壤酶活性高，磷矿化作用强，造成蔬菜地 TOC:TOP 较低。同时各形态有机碳、磷之间多存在相关关系。TOC 与所有形态有机碳之间均存在极显著关系，但 TOP 与各形态磷相关性不明显。同时除 MOC 与 NaOH-IP 外，各形态有机碳与 NaHCO₃-OP、NaOH-IP 和 NaOH-OP 均存在显著或极显著关系，各形态有机碳与 H₂O-P、NaHCO₃-IP、HCl-P、残余态磷和 TOP 不存在相关性，说明多数可取态磷组分主要受有机碳积累的影响。土壤有机碳促进了土壤中难溶态磷酸盐向缓效态磷库和活性态磷库的转化，提高了有效磷源占无机磷总量的比例，从而提高了土壤磷素有效性^[39]。因此可通过合理的措施培肥土壤特别是增加土壤有机碳水平，从而有效地促进土壤累积态磷的活化利用^[17]。

4 结 论

1) 海涂围垦后长期施用肥料，导致土壤 pH 值下降，有机碳、全磷和有效磷量增加，但其变化因利用方式不同均有所差异。

2) 土壤中各形态的有机碳随有机碳的积累而增加，随着围垦利用时间的增加，fPOC/TOC 呈先明显下降后又能缓慢增加的变化特点，oPOC/TOC 呈逐渐增加，而 MOC/TOC 呈先明显增加后又呈缓慢下降的变化特点。水田环境更易形成相对稳定的有机碳（MOC）。

3) 土壤全磷和有效磷积累受利用方式影响明显，并随围垦利用时间发生变化；除残留态磷和 HCl-P 外的其余形态磷均表现随着围垦时间的增加而增加；残余态磷和 HCl-P 的比例呈现随着围垦时间下降的趋势。

4) 各形态有机碳、磷之间多存在相关关系。TOC 与所有形态有机碳之间均存在极显著相关性，但 TOP 与各形态磷均无相关性，说明总碳与其组分关系密切相关。

（作者声明本文无实际或潜在利益冲突）

参考文献：

[1] 尚辉, 颜安, 韩瑞, 等. 微生物改良基质对新围垦海涂盐土改良的初

步研究[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 120-126.

SHANG Hui, YAN An, HAN Rui, et al. Preliminary study on the effect of microbial amendment on saline soils in a coastal reclaimed area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(8): 120-126.

[2] LIU L P, LONG X H, SHAO H B, et al. Ameliorants improve saline-alkaline soils on a large scale in Northern Jiangsu Province, China[J]. Ecological Engineering, 2015, 81: 328-334.

[3] 肖质秋, 虞娜, 安晶, 等. 土壤压实及有机质对其影响的研究进展[J]. 土壤通报, 2019, 50(5): 1 253-1 260.

XIAO Zhiqiu, YU Na, AN Jing, et al. Soil compaction and the role of soil organic matter in soil compressibility and resilience: A review[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(5): 1 253-1 260.

[4] 毛霞丽, 邱志腾, 张爽, 等. 不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系[J]. 环境科学, 2020, 41(6): 2 842-2 851.

MAO Xiali, QIU Zhiteng, ZHANG Shuang, et al. Response of aggregate distribution to input straw and their linkages to organic carbon mineralization in soils developed from five different parent materials[J]. Environmental Science, 2020, 41(6): 2 842-2 851.

[5] 王兴, 钟泽坤, 张欣怡, 等. 长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2 416-2 424.

WANG Xing, ZHONG Zekun, ZHANG Xinyi, et al. Relationship between the composition of soil aggregates and the distribution of organic carbon under long-term abandoned restoration[J]. Environmental Science, 2020, 41(5): 2 416-2 424.

[6] 李彩霞, 陈津赛, 付媛媛, 等. 施氮和灌溉管理对麦田土壤团聚体组成及有机碳的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(12): 59-64, 80.

LI Caixia, CHEN Jinsai, FU Yuanyuan, et al. Effects of nitrogen fertilization and irrigation on soil aggregation and soil organic carbon in winter wheat field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(12): 59-64, 80.

[7] WANG G Y, SU T, HAN H L, et al. Effects of long-term fertilization on soil microbial community structure, labile organic carbon and nitrogen and enzyme activity in paddy field and upland[J]. Meteorological and Environmental Research, 2019, 10(5): 105-111.

[8] 靳苗苗, 胡正锬, 朱柏菁, 等. 环境胁迫对不同水分管理措施下稻田土壤功能稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(11): 3 795-3 803.

JIN Miaomiao, HU Zhengkun, ZHU Baijing, et al. Effects of environmental stresses on soil functional stability under different water management measures in a paddy field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(11): 3 795-3 803.

[9] 朱芸, 傅庆林, 郭彬, 等. 滨海地区不同土地利用方式土壤颗粒组成及分形维数特征[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(1): 130-137.

ZHU Yun, FU Qinglin, GUO Bin, et al. Particle composition and fractal dimension vary with land management for soils in coastal regions[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(1): 130-137.

[10] 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): 1 367-1 377.

[11] 贾志航, 吕明露, 张鑫, 等. 不同种植年限苹果园土壤磷状况和无机磷组分特征[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 308-312, 320.

JIA Zhihang, LYU Minglu, ZHANG Xin, et al. Phosphorus status and inorganic phosphorus fractions in apple orchards soil with different planting years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(5): 308-312, 320.

[12] SHI J Y, WU Q H, ZHENG C Q, et al. The interaction between particulate organic matter and copper, zinc in paddy soil[J]. Environmental Pollution, 2018, 243: 1 394-1 402.

[13] 武均, 蔡立群, 张仁陟, 等. 耕作措施对旱作农田土壤颗粒态有机碳的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(5): 728-736.

- WU Jun, CAI Liquan, ZHANG Renzhi, et al. Distribution of soil particulate organic carbon fractions as affected by tillage practices in dry farmland of the Loess Plateau of central Gansu Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(5): 728-736.
- [14] 傅庆林, 董炳荣, 王建红, 等. 浙江省海涂农业综合开发现代科技示范园区建设研究[J]. 土壤通报, 2001, 32(S1): 156-161.
- FU Qinglin, DONG Bingrong, WANG Jianhong, et al. Construction of the modern technique demonstration region for comprehensive agricultural development in the seaside of Zhenjiang Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32(S1): 156-161.
- [15] HEDLEY M J, STEWART J W B, CHAUHAN B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46(5): 970-976.
- [16] 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.
- [17] 王超, 熊凡, 卢瑛, 等. 利用方式对珠江三角洲耕层土壤团聚体分布及碳氮磷化学计量特征的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(3): 494-501.
- WANG Chao, XIONG Fan, LU Ying, et al. Effect of land use on topsoil aggregate distribution and stoichiometric characteristics of C, N, and P in the Pearl River Delta[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(3): 494-501.
- [18] 张晶, 濮励杰, 朱明, 等. 如东县不同年限滩涂围垦区土壤 pH 与养分相关性研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(2): 225-230.
- ZHANG Jing, PU Lijie, ZHU Ming, et al. Correlation between soil pH and nutrients of tidal-flat reclamation with different years in Rudong County[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(2): 225-230.
- [19] 解雪峰, 濮励杰, 王琪琪, 等. 滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系[J]. 环境科学, 2018, 39(3): 1 404-1 412.
- XIE Xuefeng, PU Lijie, WANG Qiqi, et al. Response of soil enzyme activities and their relationships with physicochemical properties to different aged coastal reclamation areas, Eastern China[J]. Environmental Science, 2018, 39(3): 1 404-1 412.
- [20] 金雯晖, 杨劲松, 王相平. 滩涂土壤有机碳空间分布与围垦年限相关性分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 89-94, 294.
- JIN Wenhui, YANG Jinsong, WANG Xiangping. Spatial distribution of organic carbon in coastal saline soil and its correlation with reclamation age[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(5): 89-94, 294.
- [21] 余世鹏, 杨劲松, 崔世禹, 等. 滩涂围垦区不同连作年限蔬菜大棚土壤质量特征[J]. 中国土壤与肥料, 2015(4): 8-14.
- YU Shipeng, YANG Jinsong, CUI Shiyu, et al. Soil quality dynamics in the vegetable greenhouse with different continuous cropping years in the coastal reclamation region[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2015(4): 8-14.
- [22] 吴月颖, 吉恒宽, 吴蔚东, 等. 海南北部滨海区不同土地利用模式下土壤 DOM 粒径分布与光谱特性[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(5): 654-665.
- WU Yueying, JI Hengkuan, WU Weidong, et al. Size fractionation and optical properties of DOM under different land use types in the coastal area of Northern Hainan Island[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(5): 654-665.
- [23] 刘寒, 汤洁, 王静静, 等. 吉林西部盐碱稻田土壤有机碳及活性组分时空分布特征[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(9): 44-53.
- LIU Qian, TANG Jie, WANG Jingjing, et al. Spatial distribution characteristics of soil organic carbon and active components in saline-alkali paddy fields in Western Jilin[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(9): 44-53.
- [24] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(14): 2 099-2 103.
- [25] PAN G X, LI L Q, WU L S, et al. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils[J]. Global Change Biology, 2004, 10(1): 79-92.
- [26] 盛浩, 周萍, 袁红, 等. 亚热带不同稻田土壤微生物生物量碳的剖面分布特征[J]. 环境科学, 2013, 34(4): 1 576-1 582.
- SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, et al. Profile of soil microbial biomass carbon in different types of subtropical paddy soils[J]. Environmental Science, 2013, 34(4): 1 576-1 582.
- [27] 王虎, 王旭东, 田宵鸿. 秸秆还田对土壤有机碳不同活性组分储量及分配的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3 491-3 498.
- WANG Hu, WANG Xudong, TIAN Xiaohong. Effect of straw-returning on the storage and distribution of different active fractions of soil organic carbon[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(12): 3 491-3 498.
- [28] 潘国浩, 刘洋, 张莹莹, 等. 滨海滩涂原生草滩及围垦农田土壤碳、氮、磷化学计量学特征及其随盐度的变化[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(8): 273-278.
- PAN Guohao, LIU Yang, ZHANG Yingying, et al. Stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in primordial grassland and reclaimed farmlands of coastal tidal flats and their variation with soil salinity[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(8): 273-278.
- [29] 邵兴华, 张建忠, 毛勇, 等. 氧化还原条件下红壤磷吸附与解吸特性及需磷量探讨[J]. 土壤, 2010, 42(2): 207-212.
- SHAO Xinghua, ZHANG Jianzhong, MAO Yong, et al. Study on adsorption and desorption characteristics of soils and phosphorus requirement under oxidized and reduced conditions[J]. Soils, 2010, 42(2): 207-212.
- [30] 夏运生, 李阳红, 史静, 等. 滇池宝象河流域土壤磷的累积及吸附特征研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(2): 325-333.
- XIA Yunsheng, LI Yanghong, SHI Jing, et al. Accumulation and sorption characteristics of soil phosphorus in the Baixiang River watershed in Dianchi Lake[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(2): 325-333.
- [31] 杨芳, 何园球, 李成亮, 等. 不同施肥条件下红壤旱地磷素形态及有效性分析[J]. 土壤学报, 2006, 43(5): 793-799.
- YANG Fang, HE Yuanqiu, LI Chengliang, et al. Effect of fertilization on phosphorus forms and its availability in upland red soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(5): 793-799.
- [32] 李中阳, 徐明岗, 李菊梅, 等. 长期施用化肥有机肥下我国典型土壤无机磷的变化特征[J]. 土壤通报, 2010, 41(6): 1 434-1 439.
- LI Zhongyang, XU Minggang, LI Jumei, et al. Changes of inorganic phosphorus in typical soils of China under long-term combined application of chemical and organic fertilizer[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(6): 1 434-1 439.
- [33] 朱强, 安然, 胡红青, 等. 三峡库区消落带土壤对磷的吸附和淹水下磷的形态变化[J]. 土壤学报, 2012, 49(6): 1 128-1 135.
- ZHU Qiang, AN Ran, HU Hongqing, et al. Adsorption and transformation of phosphorus in soils of the tidal zone of the Three Gorges Reservoir region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(6): 1 128-1 135.
- [34] 王新民, 侯彦林. 有机物料对石灰性土壤磷素形态转化及吸附特性的影响研究[J]. 环境科学学报, 2004, 24(3): 440-443.
- WANG Xinmin, HOU Yanlin. Effects of organic matter addition on the characteristics of phosphate adsorption and forms of phosphorus in a calcareous soil[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2004, 24(3): 440-443.
- [35] 王振华, 朱波, 何敏, 等. 紫色土泥沙沉积物对磷的吸附-解吸动力学特征[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(1): 154-160.
- WANG Zhenhua, ZHU Bo, HE Min, et al. Characteristics of phosphorus adsorption and desorption kinetics of sediments from purple

- soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(1): 154-160.
- [36] 张林, 吴宁, 吴彦, 等. 土壤磷素形态及其分级方法研究进展[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(7): 1 775-1 782.
- ZHANG Lin, WU Ning, WU Yan, et al. Soil phosphorus form and fractionation scheme: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7): 1 775-1 782.
- [37] 李学平, 石孝均, 刘萍, 等. 紫色土磷素流失的环境风险评估-土壤磷的“临界值”[J]. *土壤通报*, 2011, 42(5): 1 153-1 158.
- LI Xueping, SHI Xiaojun, LIU Ping, et al. Environmental risk assessment about purple soil phosphorus loss-its phosphorus “change-point”[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(5): 1 153-1 158.
- [38] JIAO F, WEN Z M, AN S S, et al. Successional changes in soil stoichiometry after land abandonment in Loess Plateau, China[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 58: 249-254.
- [39] 路鹏, 李文海, 牛金璨, 等. 不同有机碳水平下(土楼)土磷的有效性及无机磷形态转化[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(1): 111-122.
- LU Peng, LI Wenhai, NIU Jincan, et al. Phosphorus availability and transformation of inorganic phosphorus forms under different organic carbon levels in a tier soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(1): 111-122.

Effect of Reclaiming Duration and Land Usage on Organic Carbon and Phosphorus in Coastal Saline Soils in Eastern Zhejiang Province

WU Shaofu¹, SHI Qiwei², GU Haonan¹, ZHANG Mingkui^{3*}

(1. Shaoxing Grain and Oil Crop Technology Extension Center, Shaoxing 312000, China;

2. Keqiao District Agricultural and Fishery Technology Extension Station of Shaoxing, Shaoxing 312030, China;

3. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: 【Objective】 Reclaiming the saline coastal soils in eastern China is crucial for ensuring food security. Given the significance of soil carbon in soil quality, this paper investigates the change in soil organic carbon and phosphorus in the soil following initiation of reclamation. 【Method】 The experiment was conducted in the northern regions of Hangzhou Bay and Yueqing Bay in eastern Zhejiang province. Soil samples were collected from vegetable fields, orchards, and paddy fields to measure their organic carbon, phosphorus, and other soil properties, from which we analyzed the relationship between soil organic carbon, phosphorus composition, reclamation duration, and land usage. A non-reclaimed soil was taken as the control. 【Result】 As reclamation time elapsed, soil pH decreased while total organic carbon (TOC), total phosphorus (TOP), and available phosphorus increased. Fifty years of reclamation led to a reduction in soil pH in Hangzhou Bay and Yueqing Bay by 1.72 to 2.36 and 1.14 to 2.24, respectively. This was accompanied by significant increases in organic carbon and TOP by 126.46% to 294.97% and 130.37% to 266.14%, and available phosphorus by 17.66% to 100.00% and 39.31% to 87.20%, respectively. The decrease in soil pH among different land usages was ranked in the order of wasteland > paddy field > orchard > vegetable field; the increase in soil organic carbon followed the order of paddy field > orchard > vegetable field > wasteland; and the increase in TOP and available phosphorus followed the order of wasteland < paddy field < orchard < vegetable land. Reclamation also significantly increased different forms of soil organic carbon. Over time, the ratio of free particulate organic carbon to organic carbon (fPOC/TOC) in micro-aggregates decreased initially and then gradually increased, while the ratio of occluded particulate organic carbon to organic carbon (oPOC/TOC) increased gradually. The ratio of mineral-associated organic carbon to organic carbon (MOC/TOC) initially increased significantly and then decreased slowly. Land usage had a notable impact on the MOC/TOC ratio, with paddy fields showing the highest influence, followed by orchards and vegetable fields. The impact of land usage on TOP and available phosphorus was more significant than reclamation time. Except for residual phosphorus and HCl-P, other forms of phosphorus increased with reclamation time. It was also found that with the increase in reclamation time, the fraction of residual phosphorus and HCl-P decreased, while the fraction of phosphorus in other forms increased. TOC and organic carbon in different forms exhibited a strong correlation, but no correlation was found between TOP and phosphorus. 【Conclusion】 Reclamation of the coastal saline soils results in continuous changes in composition and content of organic carbon and phosphorus, characterized by decreasing pH, increasing organic carbon and phosphorus. Land usage has a more substantial impact on the change in organic carbon and phosphorus than reclamation history. Growing rice promotes organic carbon sequestration, whereas vegetable cultivation enhances phosphorus accumulation.

Key words: coastal saline; carbon pool; phosphorus accumulation; chemical forms; reclamation time; landuse patterns; change rule

责任编辑: 赵宇龙