

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.007; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.007.

路迅, 勾泽清, 王涛, 等. 不同围垦年限滨海垦区盐渍土碳库及团聚体稳定性变化特征[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 111-121, 139.

Lu Xun, Gou Zeqing, Wang Tao, et al. Characteristics of changes in carbon pools and aggregate stability of coastal reclaimed saline-alkali soil[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 110-121, 139.

## 不同围垦年限滨海垦区盐渍土碳库及 团聚体稳定性变化特征

路迅, 勾泽清, 王涛, 董天望, 朱倩倩, 左希爱, 徐璐, 李建国

(江苏师范大学 地理测绘与城乡规划学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** [目的]探究滨海盐渍土随着围垦年限增加变化特征,为滨海盐渍土治理提供理论依据。[方法]选取江苏省盐城市大丰区不同围垦时期田地,以围垦 0 a ( $Y_1$ )、20 a 左右 ( $Y_2$ )、40 a 左右 ( $Y_3$ )、60 a 左右 ( $Y_4$ )、100 a 左右 ( $Y_5$ ) 下滨海表层 (0—20 cm)、亚表层 (20—40 cm) 盐渍土中各有机碳组分、碳库指标、团聚体稳定性指标为研究对象,研究了其随不同围垦时期变化特征及影响因素。[结果] (1) 表层土壤中各活性有机碳组分及亚表层土壤 HLOC (高活性有机碳)、LOC (活性有机碳) 基本呈现先增加后降低趋势,拐点在  $Y_4$  处,其中亚表层土壤中 MLOC (中活性有机碳) 未随围垦年限增加而出现显著性变化, LLOC (低活性有机碳) 呈现先增加后稳定趋势,拐点在  $Y_3$  处。 (2) 随着围垦年限增加,表层土壤  $R_{0.25}$  ( $>0.25$  mm 团聚体含量)、GWD (几何平均直径) 与亚表层土壤 MWD (平均重量直径) 呈现先上升后降低趋势,表层土壤 MWD 呈现先上升后稳定趋势,拐点均在  $Y_4$  处;亚表层土壤  $R_{0.25}$ 、GWD 呈现下降—增加—下降趋势,拐点分别在  $Y_2$ 、 $Y_4$  处。 (3) 相关性分析表明,表层土壤中,RY (围垦年限) 对团聚体稳定性指标均起到重要促进作用,除  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{Ca}^{2+}$  外其他离子,EC (电导率), SAR (钠吸附比), UW (容重), pH 值均对团聚体稳定性起到重要阻碍作用;亚表层土壤中, UW, 除  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{Ca}^{2+}$  外其他离子, EC, SAR 是破坏团聚体稳定性的主要因素。 (4) 除亚表层土壤中 A (碳库活度), AI (碳库活度指数), 团聚体稳定性指标是促进表层和亚表层土壤碳库增加的主要影响因素,除  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{Ca}^{2+}$  外其他离子, EC, UW 是阻碍碳库增加主要影响因素。[结论] 围垦活动降低了土滨海盐渍土表层和亚表层壤盐分离子含量,提高了大团聚体含量、团聚体稳定性、不同活性有机碳组分含量、碳库相关指标,但大于 60 a 围垦需注意土地退化。

**关键词:** 滨海盐渍土; 围垦年限; 团聚体; 碳库

中图分类号: S151.9; S156

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)02-0111-11

## Characteristics of changes in carbon pools and aggregate stability of coastal reclaimed saline-alkali soil

Lu Xun, Gou Zeqing, Wang Tao, Dong Tianwang, Zhu Qianqian, Zuo Xiai, Xu Lu, Li Jianguo  
(School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to explore the characteristics of changes in coastal saline soil with increasing years of reclamation, and to provide theoretical basis for the treatment of coastal saline soil. [Methods] Field plots in different reclamation periods in Dafeng District, Yancheng City, Jiangsu Province were selected. Organic carbon components, carbon pool indicators, and aggregate stability indicators in coastal surface (0—20 cm) and sub-surface (20—40 cm) saline soils reclaimed for 0 years ( $Y_1$ ), around 20 years ( $Y_2$ ), around 40 years ( $Y_3$ ), around 60 years ( $Y_4$ ), and around 100 years ( $Y_5$ ) were investigated to

收稿日期: 2024-04-10

修回日期: 2024-05-10

接受日期: 2024-05-21

资助项目: 国家自然科学基金 (42271287, 42371053); 江苏省碳达峰与碳中和技术创新专项资金 (BE2023855); 江苏师范大学研究生科研与实践创新计划项目 (2024XKT0148)

第一作者: 路迅 (1998—), 男, 河北廊坊人, 硕士研究生, 研究方向为滨海盐渍土改良。E-mail: 2358587540@qq.com

通信作者: 李建国 (1986—), 男, 江苏宿迁人, 博士, 副教授, 主要从事滨海盐渍土改良研究。E-mail: lijiaunguo531@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

explore their characteristics and influencing factors under different reclamation periods. **[Results]** (1) Various active organic carbon components in the surface soil and HLOC (highly labile organic carbon) in the subsoil generally showed an increasing and then decreasing trend, with a turning point at  $Y_4$ . Among them, in the subsoil, MLOC (moderately labile organic carbon) did not show significant changes with increasing reclamation years, while LLOC (low labile organic carbon) showed an increasing and then stable trend, with a turning point at  $Y_3$ . (2) With the increase in reclamation years, the surface soil  $R_{0.25}$  ( $>0.25$  mm aggregate content) and GWD (geometric mean diameter), as well as the subsurface soil MWD (mean weight diameter), exhibited a trend of first rising and then declining, with a turning point at  $Y_4$ . The surface soil MWD showed a trend of rising initially and then stabilizing, with its turning point also at  $Y_4$ . The subsurface soil  $R_{0.25}$  and GWD showed a decrease-increase-decrease trend, with turning points at  $Y_2$  and  $Y_4$ , respectively. (3) Correlation analysis showed that in the surface soil, RY (reclamation years) played an important promoting role in aggregate stability indicators, while other ions except  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{Ca}^{2+}$ , EC (electrical conductivity), SAR (sodium adsorption ratio), UW (bulk density), and pH value played important hindering roles in aggregate stability. In the subsoil, UW, other ions except  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{Ca}^{2+}$ , EC, and SAR were the main factors affecting aggregate stability. (4) Except for A (carbon storage activity) and AI (carbon pool activity index) in the subsoil, aggregate stability indicators were the main influencing factors promoting the increase of carbon pools in both surface and subsoil, while other ions except  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{Ca}^{2+}$ , EC, and UW were the main influencing factors hindering the increase of carbon pools. **[Conclusion]** Reclamation activities reduced the content of soil salt ions in the surface and subsoil of coastal saline soil, increased the content of large aggregates, aggregate stability, content of different active organic carbon components, and carbon pool-related indicators. However, caution should be exercised regarding land degradation after reclamation for more than 60 years.

**Keywords:** coastal saline-alkali soil; reclamation period; aggregates; carbon pools

江苏省有着丰富的沿海滩涂资源,其滩涂面积约占我国滩涂面积的  $1/4$ <sup>[1]</sup>。而滩涂土壤又是典型的滨海盐渍土,滨海盐渍土是我国宝贵的后备土地资源,其有效利用事关国家粮食安全。滨海盐渍土围垦具有增加人类生存空间,提供丰富资源的巨大潜力<sup>[2]</sup>。盐渍土具有盐分含量高、结构差、透气性差、持水性低等特点<sup>[3]</sup>。随着围垦时间的增加,滨海盐渍土中团聚体的结构和功能得到改善,从而对整个滩涂生态系统的稳定性产生影响,也进一步影响到人类对滨海垦区碳库的管理。如何在围垦中保持良好土壤结构、进行有效的碳库管理,都是围垦过程中亟待解决的难题。因此,从时间尺度上把握围垦对土壤结构、土壤碳库的主要影响因素及变化规律,对围垦工程产生的效益、耕地质量变化、生态安全等具有重要意义。

有机碳通常作为一个敏感性指标来评价土地利用变化和土地管理对土壤质量的影响<sup>[4]</sup>。Blair 等<sup>[5]</sup>将 SOC 划分为活性碳库和非活性碳库,并由此提出了碳库指数(CPI)和碳库管理指数(CPMI)的计算方法。活性有机碳库相关指标是总有机碳库变化的早期指标,比总有机碳库对环境变化更加敏感<sup>[6-7]</sup>。近

年来,大量学者对滨海表层盐渍土碳库变化、团聚体稳定性与土壤碳库之间关系进行研究,主要以碳库指数(CPI)、碳库活度(A)、碳库活度指数(AI)和碳库管理指数(CPMI)等指标反映不同背景下土壤碳库的状况<sup>[8-9]</sup>。而关于长期围垦活动对滨海盐渍土结构稳定性和碳库的影响,以及这种影响是否具有持续性和稳定性鲜有报道。长期围垦过程中,亚表层土壤的理化性质和碳库特性在长期围垦过程中可能发生显著变化,这些变化对土壤肥力保持、结构稳定性有重要意义,目前的研究多聚焦于表层土壤层面的结构稳定性和碳库特征,而对于多层次(如表层和亚表层)研究不足。因此,从百年尺度下对滨海盐渍土表层、亚表层土壤理化性质、结构稳定性、碳库管理及其影响因素分析缺乏精确描绘。

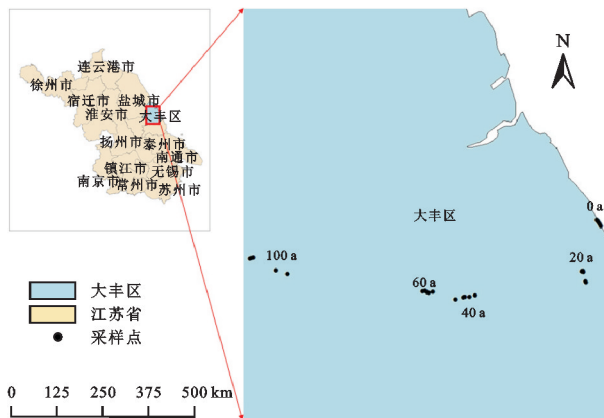
本研究以江苏省盐城市大丰区不同围垦时间下表层、亚表层土壤为例,对滨海盐渍土碳库随围垦时间变化特征及其与团聚体稳定性、土壤理化性质、盐离子等主要影响因子间综合分析,探讨围垦条件下滨海盐渍土表层、亚表层碳库变化的主要影响因子,对精确描绘从百年尺度围垦过程中土壤结构稳定性

及碳库变化驱动因素有重要意义,也为滨海盐渍土改良及农业可持续发展提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

大丰区,位于江苏省东部,盐城市东南,介于北纬 $32^{\circ}56'$ — $33^{\circ}36'$ ,东经 $120^{\circ}13'$ — $120^{\circ}56'$ (图1),海岸线长112 km,大丰区属于亚热带与暖温带的过渡地带,适宜喜温作物的生长。常年平均气温 $14.4^{\circ}\text{C}$ ,无霜期203.8 d,常年降水量1 066.7 mm,日照2 214.4 h。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2019)1822号的标准地图制作,底图未做修改,下同。围垦0 a采样地,土地利用方式为滩涂;围垦20 a左右采样地,土地利用方式为油菜花;围垦40 a左右采样地,土地利用方式为小麦-水稻轮作;围垦60 a左右采样地,土地利用方式为小麦-水稻轮作;围垦100 a左右采样地,土地利用方式为小麦-水稻轮作。

图1 研究区概况

Fig. 1 Overview map of the study area

### 1.2 采样方案

本次研究通过当地农户调查和查阅《大丰县志》《大丰市志》等资料确认围垦年限,并于2022年4月8日完成采样,每个围垦年限下取5个样品,样品深度为地表表层(0—20 cm)土样和亚表层(20—40 cm),共计50个样品,样品采集时,记录采样点经纬度,用采样器均匀采集地表表层(0—20 cm)和亚表层(20—40 cm)土壤,所有土样带回实验室后自然风干,部分原土进行团聚体筛分,部分土样过2,0.149 mm筛孔后装入密封袋内备用。

### 1.3 数据与方法

土壤容重采用环刀法测定;土壤有机碳、全氮用元素分析仪测定;土壤盐分离子测定制备水土比为5:1的浸提液,用电导率仪测定电导率,用pH计测土壤pH值,再用离子色谱仪测定 $\text{K}^+$ , $\text{Na}^+$ , $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Cl}^-$ , $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{NO}_3^-$ 各离子含量;用 $\text{KMnO}_4$ 氧化法<sup>[10]</sup>测定土壤中的活性有机碳:称取含C约15 mg土壤样品于离心管中,分别加入25 ml浓度为

33,167,333 mmol/L的 $\text{KMnO}_4$ ,在振荡器下以250 r/min振荡1 h,然后在4 000 r/min下离心5 min,将上清液用去离子水以1:250稀释,在分光光度计565 nm下测定稀释样品的吸光度,计算出 $\text{KMnO}_4$ 浓度的变化,根据 $\text{KMnO}_4$ 消耗量得出3种活性有机碳的含量,33 mmol/L的 $\text{KMnO}_4$ 测得的活性碳含量记为 $C_1$ (HLOC),167 mmol/L的 $\text{KMnO}_4$ 测得的活性碳减去33 mmol/L的 $\text{KMnO}_4$ 测得的活性碳后记为 $C_2$ (MLOC),333 mmol/L的 $\text{KMnO}_4$ 测得的活性碳减去167 mmol/L的 $\text{KMnO}_4$ 测得的活性碳后记为 $C_3$ (LLOC),SOC含量减去 $C_1$ , $C_2$ 和 $C_3$ 后记为 $C_4$ (NLOC)。其中 $C_1$ 为高活性碳组分, $C_2$ 为中活性碳组分, $C_3$ 为低活性碳组分, $C_4$ 为非活性碳组分(氧化过程中1 mmol/L的 $\text{KMnO}_4$ 消耗9 mg碳)。并由此计算出碳库指数(CPI)、碳库活度(A)、碳库活度指数(AI)、碳库管理指数(CPMI);水稳性团聚体参照李建国等<sup>[11]</sup>的湿筛法改进后分级。

### 1.4 指标计算

钠吸附比计算公式为:

$$\text{SAR} = \frac{C_{\text{Na}^+}}{\sqrt{(C_{\text{Ca}^{2+}} + C_{\text{Mg}^{2+}})/2}} \quad (1)$$

式中: $C_{\text{Na}^+}$ , $C_{\text{Ca}^{2+}}$ , $C_{\text{Mg}^{2+}}$ 分别为浸提液中 $\text{Na}^+$ , $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ 的浓度(g/kg)。

碳库相关指标计算公式<sup>[12]</sup>:

$$\text{LOC} = \frac{V \times 25 \times 250 \times 9}{m \times 1000} \quad (2)$$

$$\text{CPI} = \frac{M_1}{M_2} \quad (3)$$

$$A = \frac{\text{LOC}}{\text{NLOC}} \quad (4)$$

$$\text{AI} = \frac{L_1}{L_2} \quad (5)$$

$$\text{CPMI} = \text{CPI} \times \text{AI} \times 100 \quad (6)$$

式中:LOC为活性有机碳含量(g/kg);CPI为碳库指数;A为碳库活度;AI为碳库活度指数;CPMI为碳库管理指数; $m$ 为土壤质量(g); $V$ 为高锰酸钾浓度变化值(mmol/L);NLOC为非活性有机碳含量(g/kg); $L_1$ 为样品碳库活度; $L_2$ 为参考土壤碳库活度; $M_1$ 样品总有机碳含量(g/kg); $M_2$ 参考土壤总有机碳含量(g/kg)。

团聚体稳定性相关计算公式<sup>[13]</sup>:

$$W_i = \frac{W_{zi}}{M_i} \times 100\% \quad (7)$$

$$R_{0.25} = \frac{M_{r>0.25}}{M_i} \quad (8)$$

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n (X_i W_i) \quad (9)$$

$$\text{GMD}=\exp\left[\frac{\sum_{i=1}^nW_{zi}\ln X_i}{\sum_{i=1}^nW_{zi}}\right]\tag{10}$$

式中： $W_{zi}$ 为各个粒径团聚体质量； $z_i$ 为各级团聚体，组分的编号分别指 $>2\text{ mm}$ ， $0.25\sim2\text{ mm}$ ， $0.25\sim0.053\text{ mm}$ 和 $<0.053\text{ mm}$ 团聚体。 $M_i$ 为团聚体的总重量； $M_{r>0.25}$ 为粒径 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体的重量； $X_i$ 为任一级别范围内团聚体的平均直径(mm)； $W_i$ 为对应于等级的团聚体质量百分含量(%)。

### 1.5 数据分析

采用 Excel 2016 整理数据，采用 SPSS 27 软件进行显著性分析、单因素 ANOVA 检验，使用 Origin 2024 软件绘制相关图表，R 软件进行 Mantel 相关分析、Pearson 相关分析及图绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同围垦年限下土壤理化性质变化特征

表层土壤理化性质见表 1。土壤 pH 值随围垦

表 1 表层土壤随围垦年限变化特征

Table 1 Characteristics of surface soil changes with the duration of reclamation

理化性质	0 a	20 a	40 a	60 a	100 a
pH 值	8.59±0.06a	8.47±0.17ab	8.24±0.17b	8.33±0.10ab	8.30±0.27b
EC/( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	10018.00±6443.88a	1559.80±479.41b	947.26±542.86b	394.40±96.75b	342.80±177.93b
UW/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	1.60±0.09a	1.46±0.05b	1.34±0.11bc	1.14±0.09d	1.28±0.12cd
SOC/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	6.87±1.35c	7.00±1.18c	10.93±1.54b	14.34±1.27a	10.08±3.32b
TN/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	0.59±0.29c	0.71±0.16bc	0.94±0.18abc	1.11±0.10a	1.02±0.34ab
C/N	17.54±12.97a	9.95±0.72a	11.91±1.65a	13.13±1.92a	10.49±3.27a

表 2 亚表层土壤随围垦年限变化特征

Table 2 Characteristics of subsoil changes with the duration of reclamation

理化性质	0 a	20 a	40 a	60 a	100 a
pH 值	8.40±0.09a	8.34±0.48a	8.59±0.05a	8.53±0.11a	8.51±0.26a
EC/( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	7628.00±3414.04a	1489.40±380.94b	510.00±221.66b	373.00±31.67b	307.64±134.04b
UW/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	1.45±0.07b	1.62±0.05a	1.53±0.05ab	1.43±0.09b	1.47±0.05b
SOC/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	6.20±0.35b	7.18±1.73b	10.80±1.53a	12.09±1.70a	11.69±2.83a
TN/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	0.34±0.28c	0.66±0.10b	0.75±0.23b	1.10±0.17a	0.84±0.17ab
C/N	48.32±44.63a	10.83±1.93b	16.03±5.66b	11.06±0.63b	14.07±3.26b

### 2.2 不同围垦年限下土壤盐分离子变化特征

表层土壤中盐分离子含量变化趋势(图 2)，随着围垦年限的增加，表层土壤中的  $\text{Na}^+$ ， $\text{K}^+$ ， $\text{Mg}^{2+}$ ， $\text{Cl}^-$ ， $\text{SO}_4^{2-}$  含量在围垦至 20 a 左右时显著降低，后趋于稳定； $\text{Ca}^{2+}$  含量随围垦年限增加变化较小； $\text{NO}_3^-$  含量在围垦至 40 a 左右时显著上升，后显著下降并趋于稳定。亚表层土壤中盐分离子含量变化趋势(图 3)， $\text{Na}^+$ ， $\text{Mg}^{2+}$ ， $\text{Ca}^{2+}$ ， $\text{Cl}^-$ ， $\text{SO}_4^{2-}$  含量在围垦至 20 a 左右时显著降低，后趋于稳定； $\text{K}^+$  含量随围垦年限增加呈现降低趋势； $\text{NO}_3^-$  在围垦至 20 a 左右呈现显著增

年限的增加呈现先降低后略微升高的趋势，从 0 a 至 40 a 左右下降，在 60 a 和 100 a 时略有上升，但不显著；土壤 EC 在 0 a 时最高，围垦至 20 a 左右时 EC 值显著降低，后趋于稳定；土壤 UW 随着围垦年限增加而逐渐降低，土壤变得更加疏松，有利于提高土壤的通气性和水分保持能力；土壤 SOC 和 TN 含量是评价土壤肥力的重要指标，土壤 SOC 和 TN 均呈现先增加后降低趋势，围垦至 60 a 左右达到最大值，围垦至 100 a 左右时较 60 a 左右 SOC 呈现显著下降趋势、TN 呈现下降趋势但不显著，且土壤的 C/N 在不同围垦年限下变化不显著。

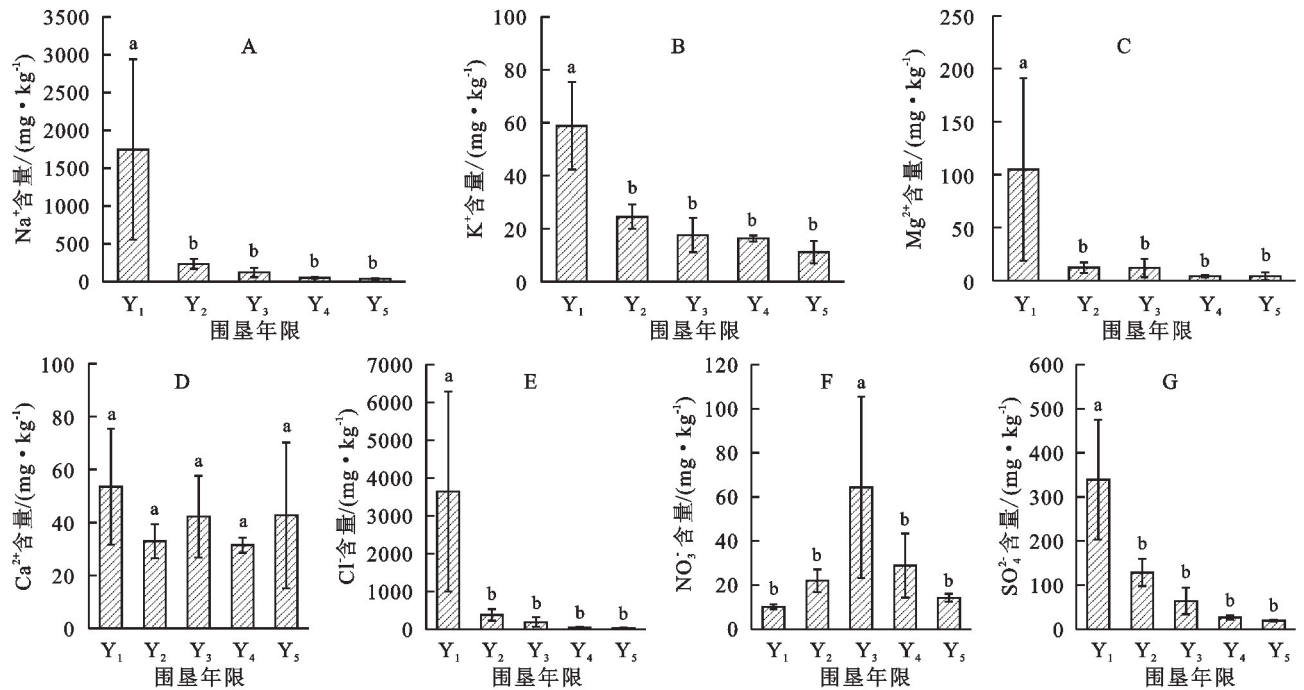
亚表层土壤理化性质见表 2。土壤 pH 值在不同围垦年限下变化不显著；土壤 EC 变化趋势与表层土壤呈现相同变化趋势；UW 呈现先上升后下降趋势，拐点在 20 a 左右；SOC 和 TN 含量均呈现先上升后稳定趋势，SOC 含量变化拐点在围垦至 40 a 左右，TN 含量变化拐点在围垦至 60 a 左右；而 C/N 在围垦 20 a 左右较 0 a 呈现显著降低趋势，后趋于稳定。

加趋势，后趋于稳定。

### 2.3 不同围垦时间下土壤活性有机碳组分含量变化

不同围垦时间下土壤活性有机碳组分含量变化如图 4 所示。不同土层下 LOC 及除亚表层 MLOC 外，不同组分活性有机碳随围垦年限变化显著。其中，表层土壤中，LOC 及其活性有机碳组分基本呈现先上升后下降趋势，拐点在  $Y_4$  处(图 4A—D)。亚表层土壤中，LOC(图 4E)和 HLOC(图 4F)呈现先上升后下降趋势，拐点在  $Y_4$  处，MLOC(图 4G)未随围垦年限增加而出现显著性变化；LLOC(图 4H)在围垦至  $Y_3$  时显著增加，后趋于稳定。





注: Y<sub>1</sub>, Y<sub>2</sub>, Y<sub>3</sub>, Y<sub>4</sub>, Y<sub>5</sub> 分别代表围垦 0 a, 20 a 左右, 40 a 左右, 60 a 左右, 100 a 左右, 下同。

图2 表层(0—20 cm)土壤盐分离子随围垦年限变化特征

Fig. 2 Characteristics of surface soil salinity ion changes with the duration of reclamation

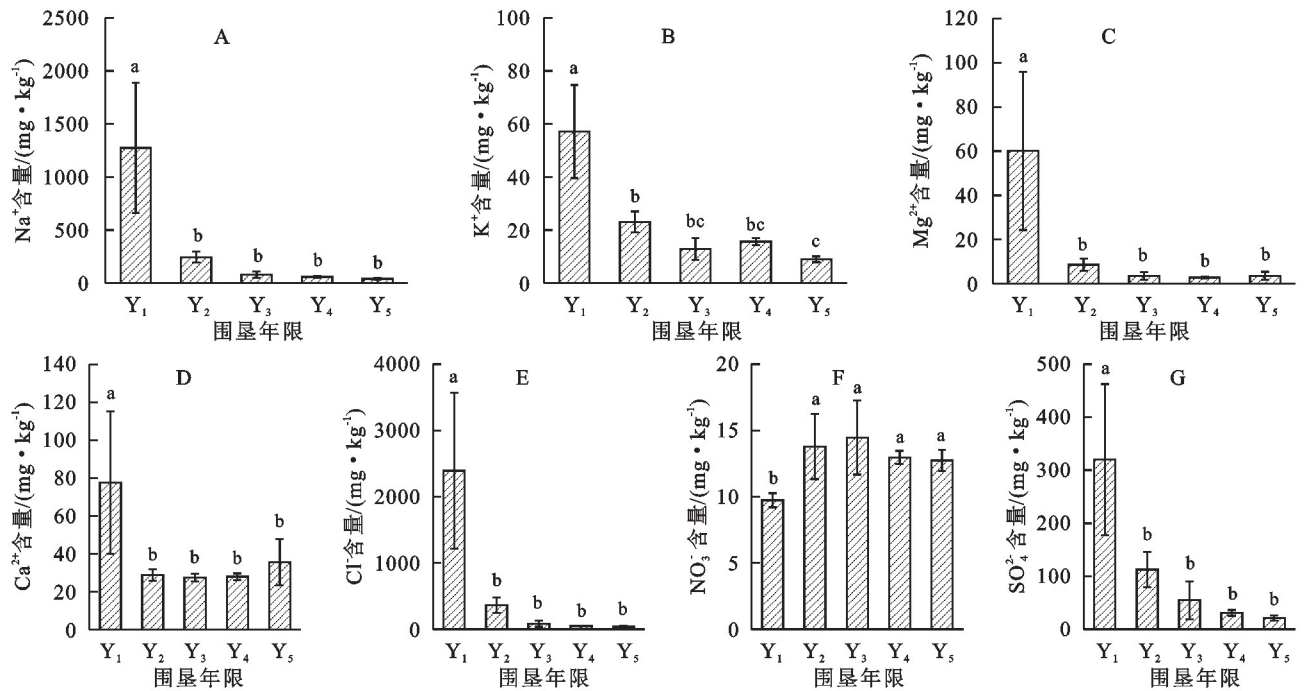


图3 亚表层(20—40 cm)土壤盐分离子随围垦年限变化特征

Fig. 3 Characteristics of subsoil salinity ion changes with the duration of reclamation

## 2.4 不同围垦时间下土壤团聚体稳定性和碳库管理特征

2.4.1 不同围垦时间下土壤团聚体稳定性 表层土壤中(图 5A—C),  $R_{0.25}$  随围垦年限增加呈现先增加后降低趋势, 拐点在 Y<sub>4</sub> 处; MWD 随围垦年限增加呈现先增加后稳定趋势; GWD 在围垦 Y<sub>1</sub>—Y<sub>2</sub> 时未呈现显著增加趋势, 后呈现先增加后降低趋势, 拐点仍在 Y<sub>4</sub> 处。亚表层土壤中(图 5D—F),  $R_{0.25}$  与 GWD 随围垦年限增加均

呈现降低—增加—降低趋势, 拐点分别在 Y<sub>2</sub> 和 Y<sub>4</sub> 处; MWD 呈现先上升后下降趋势, 拐点在 Y<sub>4</sub> 处。

2.4.2 不同围垦时间下土壤碳库管理特征 以 Y<sub>1</sub> 作为参考, 算出其他围垦年限下碳库管理特征的变化如图 6 所示。表层土壤中, CPI 呈现先增加后趋于稳定趋势(图 6A), A, AI, CPMI 均呈现先增加后降低趋势(图 6B—D)。亚表层土壤中, CPI, CPMI 呈现先增加后趋于平稳趋势(图 6E, 6H), A, AI 呈现先平稳后下降趋势(图 6F, 6G)。

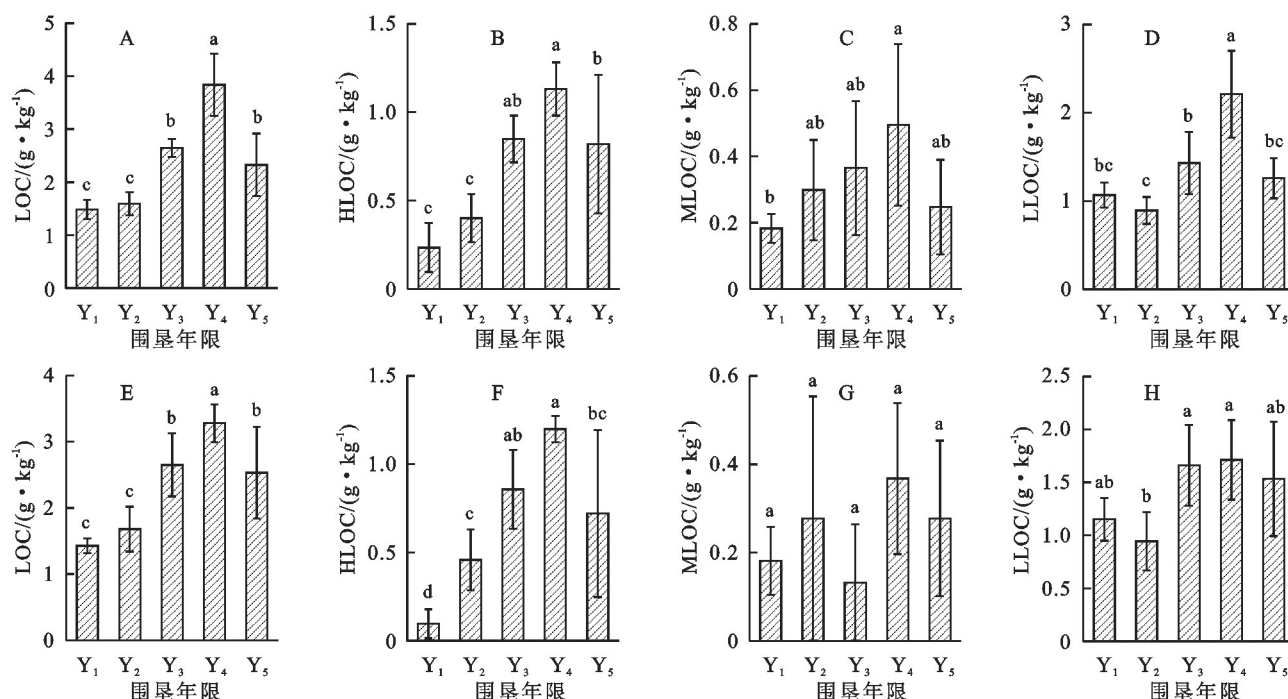


图 4 不同围垦年限下表层(A-D)、亚表层(E-H)土壤活性有机碳组分含量变化

Fig. 4 Changes in the content of labile organic carbon components in the surface (A-D) and subsurface (E-H) soil at different reclamation durations

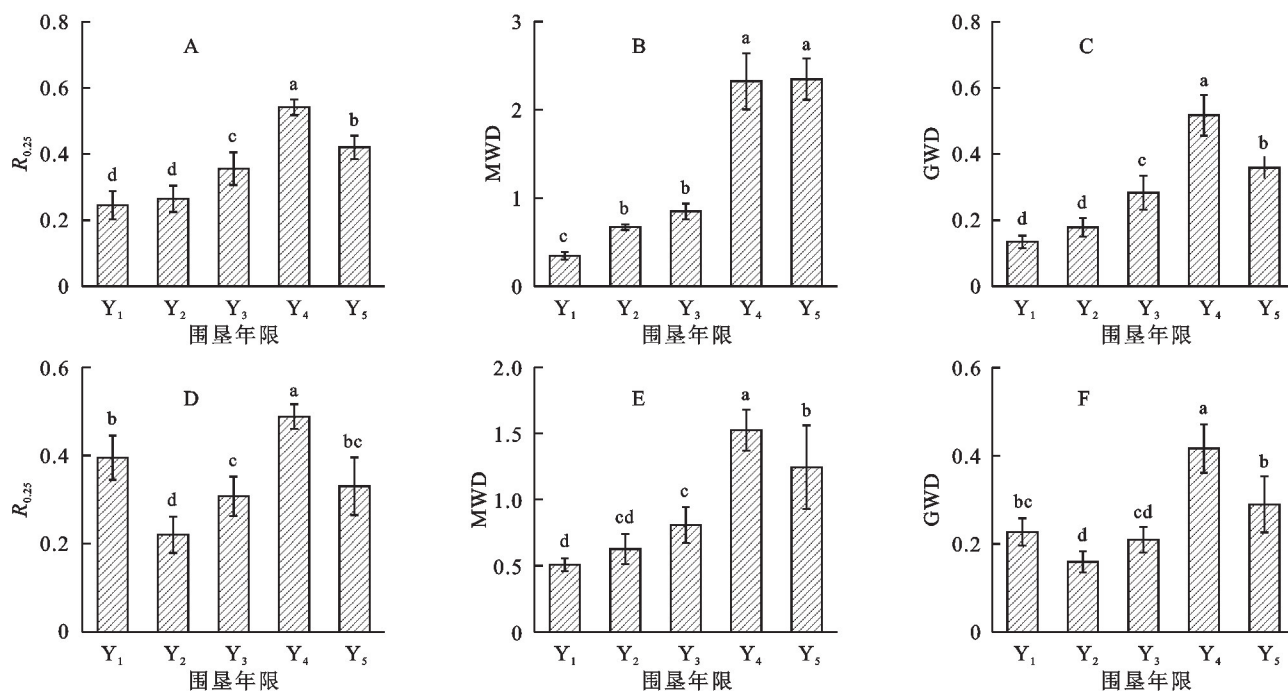


图 5 不同围垦年限下土壤表层(A-C)、亚表层(D-F)团聚体稳定性变化特征

Fig. 5 Characteristics of aggregate stability changes in the topsoil (A-C) and subsoil (D-F) with different reclamation durations

## 2.5 土壤团聚体稳定性和碳库变化特征影响因子分析

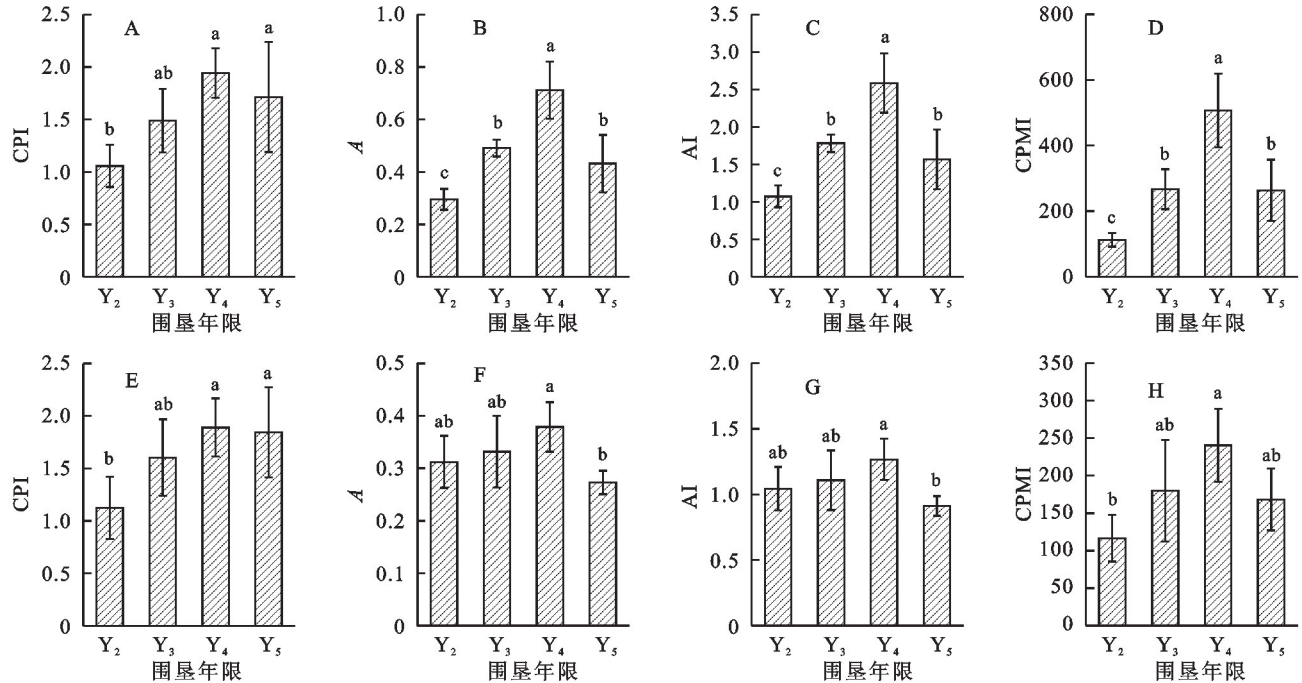
2.5.1 土壤团聚体稳定性变化特征分析 由 Mantel 相关分析和聚类分析表明,表层土壤中(图 7A,8A)围垦年限对团聚体稳定性起到重要促进作用; $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ , EC, SAR, UW 是破坏团聚体稳定性主要因素。亚表层土壤中(图 7B,8B),RY

不是  $R_{0.25}$  形成的重要因素, UW 是  $R_{0.25}$  形成的主要阻碍因素,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ , EC, SAR 是破坏团聚体稳定性主要因素。

2.5.2 土壤碳库变化特征分析 由 Mantel 相关分析和聚类分析表明,表层土壤(图 9A,10A)中  $R_{0.25}$ , MWD, GWD 对土壤碳库相关指标均有显著促进作

用,且 RY 对 CPI 具有显著促进作用; $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , EC, SAR, UW 对土壤碳库相关指标均有显著阻碍作用,且  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  对 CPI 具有显著阻碍作用。亚表层土壤中(图 9B, 10B),各因素对 A, AI 影响较小,  $R_{0.25}$ ,

MWD, GWD 均对 CPI 和 CPMI 具有显著促进作用, RY 对 CPI 具有显著促进作用; $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , pH 值, EC, SAR, UW 对 CPI 具有显著阻碍作用, UW 对 CPMI 具有显著阻碍作用。



注:由于碳库管理特征以未围垦年限  $Y_1$  作为参照,故表中只呈现  $Y_2$ — $Y_5$  年限变化趋势。

图 6 土壤表层(A—D)、亚表层(E—H)碳库管理特征随围垦年限变化特征

Fig. 6 Characteristics of carbon stock management in the topsoil (A—D) and subsoil (E—H) as affected by the duration of reclamation

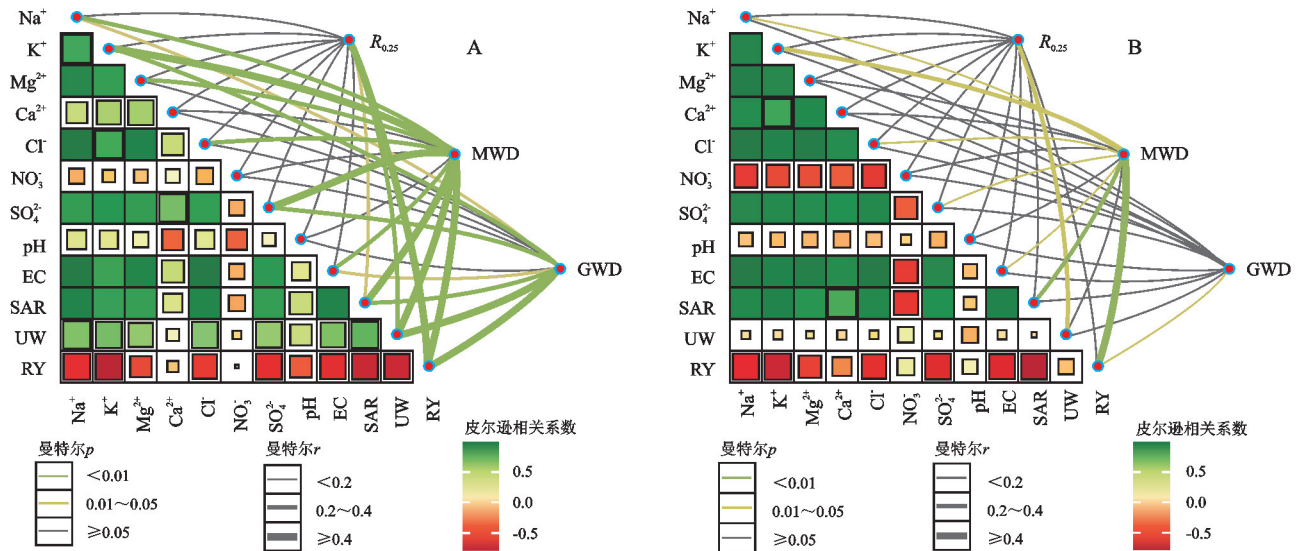


图 7 不同围垦年限下表层(A)、亚表层(B)团聚体稳定性指标影响因素 Mantel 分析

Fig. 7 Mantel analysis of factors influencing aggregate stability indices in the topsoil (A) and subsoil (B) under different reclamation durations

### 3 讨论

#### 3.1 不同围垦年限土壤理化性质及盐分离子变化特征

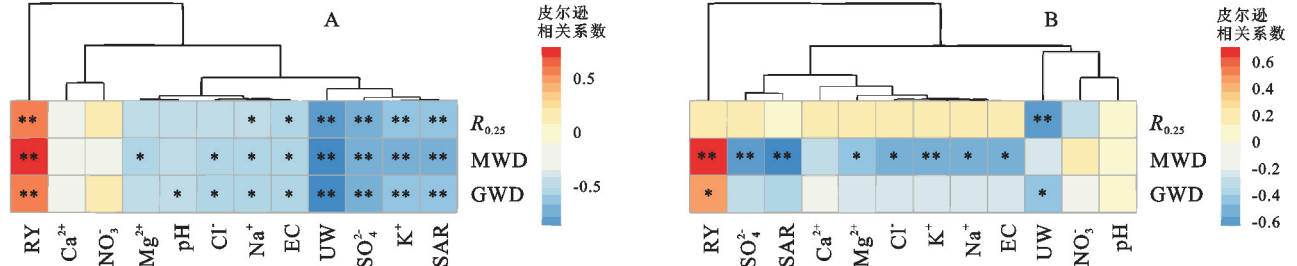
大量研究表明,随着围垦年限增加土壤 pH 值、EC 及主要盐分离子呈现下降趋势, SOC, TN 等呈现

显著增加趋势<sup>[14-16]</sup>。本研究中也呈现类似的规律,主要原因是围垦后受自然淋溶、人为改良的影响(农业过程中随着灌溉和排水措施进行、耕作等)及有机物的积累(围垦初期种植油菜花大量叶片凋落、有机肥施用等),尤其在围垦初期土地从滩涂转变为农业用



地后变化最为明显。亚表层土壤理化性质随围垦时间增加大致与表层土壤呈现相似变化,但 UW 在围垦至 20 a 左右较 0 a 时呈现显著增加趋势,主要原因可能是围垦后经过一段时间的耕作、机械碾压以及重

复的灌溉和排水等农业活动,导致土壤颗粒紧密排列,从而增加 UW。C/N 随着围垦时间增加变化不显著主要原因是 SOC 和 TN 通常有强耦合关系<sup>[17]</sup>,这与解雪峰等<sup>[18]</sup>研究结果不同。



注: \* 表示显著性水平在  $p < 0.05$  下显著; \*\* 表示显著性水平在  $p < 0.01$  下显著,下同。

图 8 不同围垦年限下表层(A)、亚表层(B)团聚体稳定性指标影响因素聚类热图

Fig. 8 Cluster heatmap of factors influencing aggregate stability indices in the topsoil (A) and subsoil (B) under different reclamation durations

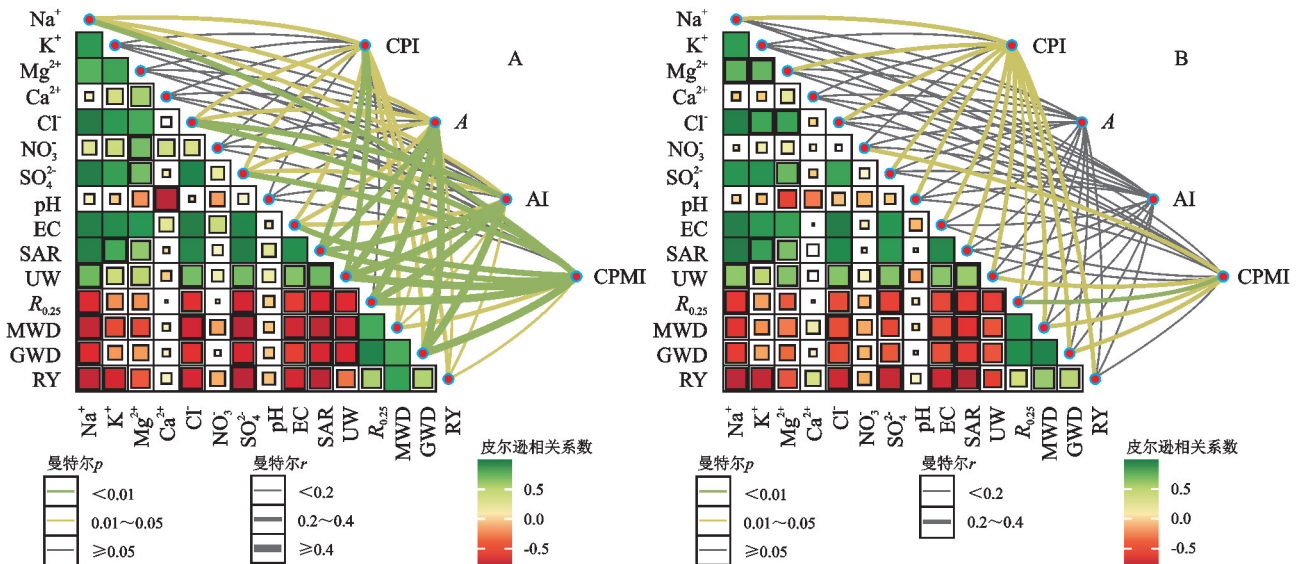


图 9 不同围垦年限下表层(A)、亚表层(B)碳库指标影响因素 Mantel 分析

Fig. 9 Mantel analysis of factors influencing carbon pool indices in the topsoil (A) and subsoil (B) under different reclamation durations

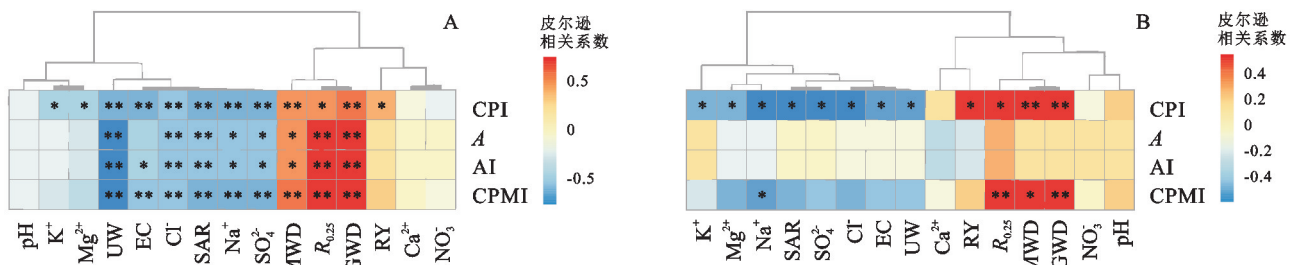


图 10 不同围垦年限下表层(A)、亚表层(B)碳库指标影响因素聚类热图

Fig. 10 Cluster heatmap of factors influencing carbon pool indices in the topsoil (A) and subsoil (B) under different reclamation durations

表层与亚表层盐分离子如  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  的含量在围垦至 20 a 左右时都显著降低,可能是由于农业过程中灌溉导致可溶性盐分被淋洗;表层土壤中的  $\text{K}^+$  含量随围垦年限的增加而趋于稳定,在亚表层土壤中,  $\text{K}^+$  含量呈现持续降低的趋势,可能随着土壤肥力的

逐渐消耗,土壤肥力可能逐渐降低,从而导致了  $\text{K}^+$  含量的持续下降;在表层和亚表层土壤中,  $\text{Ca}^{2+}$  的含量都显示出相对较小的变化,可能是因为  $\text{Ca}^{2+}$  主要以难溶的矿物形式存在,如碳酸钙,这使得它不易被水淋洗出土壤,从而在围垦过程中保持相对稳定的含量;在围垦至 20 a



左右时,亚表层土壤中  $\text{NO}_3^-$  的含量显示出显著增加的趋势,而在表层土壤中,则是在 40 a 左右显著上升后趋于稳定,反映了土壤层间氮素的迁移和转化过程,以

及与围垦活动(如施肥)相关的氮素添加,随着时间的增加,这些添加的氮素被作物吸收或通过微生物作用转化,最终导致了  $\text{NO}_3^-$  含量的稳定。

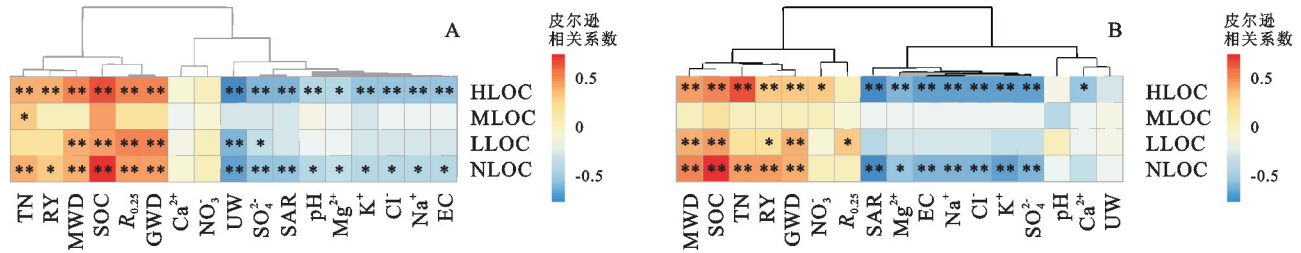


图 11 土壤表层、亚表层活性有机碳组分影响因素聚类热图

Fig. 11 Cluster heatmap of factors affecting the components of active organic carbon in soil surface layer and subsoil layer

### 3.2 不同围垦时间下土壤团聚体稳定性变化特征及影响因素

以往研究表明,盐分及其部分一价盐分离子( $\text{Na}^+$ 和 $\text{Cl}^-$ 等),UW,pH值对团聚体稳定性产生阻碍作用,SOC,TN及部分二价离子(尤其是 $\text{Ca}^{2+}$ )对团聚体稳定性起到积极作用<sup>[19-21]</sup>。本研究也得出类似结论,表层、亚表层土壤团聚体稳定性与除 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{NO}_3^-$ 外的其他盐分离子,pH值,EC,SAR呈现负相关关系(图8A),主要反映了高盐度环境会降低土壤团聚体的稳定性。

表层土壤中,围垦至 $Y_4$ 左右时均增大了团聚体稳定性,这与曹立悦等<sup>[22]</sup>研究结果类似。主要原因是围垦过程中,大量有机肥、作物秸秆、枯枝败叶等外源有机物质的输入促进植被生长,产生的大量根系胶结物质对团聚体形成和稳定性起到重要作用<sup>[23]</sup>。

亚表层土壤中, $R_{0.25}$ 仅与UW有显著性负相关关系,可能是由于土壤围垦过程和农业管理活动(农机具等)导致了亚表层土壤的压实,从而影响了土壤的容重,从而对 $R_{0.25}$ 产生影响;其次,可能是农艺管理主要在地表进行,比较容易改变土壤状况(例如温度、通气性等),增加凋落物的分解速率<sup>[24]</sup>,对深层土壤的影响相对较弱,且土壤动物和微生物在地表将有机物质分解,因此,亚表层土壤有机碳含量始终保持较低状态,因此胶结作用明显低于表层。UW对亚表层土壤较表层土壤团聚体稳定性影响减弱(图7B),主要原因可能为随着围垦年限增加,盐分及其离子含量降低,有利于植被生长,植被的根系可以促进亚表层土壤的结构稳定性。而亚表层土壤相对疏松的土体结构增加了水分与土壤中盐分接触的表面积,促进了水分对土壤中盐分的淋洗作用,有助于将大部分盐分随水分流失,从而减轻土壤盐渍化的程度<sup>[25]</sup>。因此,滨海盐渍土围垦工程从表层土壤改良的同时也应从土壤亚表层着手改良,如采取深翻还田、农业轮作等措施,促进植被根系向深层生长,改善深层土壤通气导水能力,从而提高滨海盐渍土改良效率。

### 3.3 不同围垦时间下土壤有机碳组分和碳库变化特征影响因素

活性有机碳在土壤碳库中的含量相对较少,但对外界变化的响应敏感,能直接参与土壤生物转化过程。土壤NLOC越少,土壤LOC的可激活率越高,在土壤碳库应用上具有更大的应用尺度<sup>[26]</sup>。

本研究中,表层土壤各活性有机碳组分含量随围垦年限增加基本呈现先上升后稳定或先上升后下降趋势(图4A—D),原因可能是随着围垦年限的增加,施用有机物质、改良剂等可以改善土壤结构<sup>[27]</sup>,且地表植被可以通过凋落物的输入和根系的分泌物质等方式向土壤输送营养物质,土壤质量逐渐改善。围垦至 $Y_4$ 后,土壤中各种有机碳可能已经达到了一种相对稳定的状态,使高活性有机碳的比例趋于稳定。本研究中,外界因素对HLOC和NLOC影响最大、对MLOC影响最小(图11A),除 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{NO}_3^-$ 外,HLOC和NLOC与其他盐分离子及pH值,UW,SAR等呈现显著负相关关系,与RY,SOC,TN,团聚体稳定性指标呈现显著正相关关系,而MLOC仅与SOC,TN呈现显著正相关关系。由此可知,随着围垦年限增加,有机碳逐步累积、土壤结构稳定、pH值降低、盐分及其离子含量降低对HLOC和NLOC产生有利影响。SOC大量积累,pH值降低,土壤微生物群落活跃度增加,分解和转化有机物的速率加快,从而导致HLOC和NLOC含量上升;SOC和TN是土壤中MLOC的重要来源,SOC和TN增加有利于MLOC积累。团聚体稳定性与各碳库指标呈现显著正相关关系,说明大团聚体含量及团聚体稳定性是土壤碳库的重要调控因素,这在李映雪等<sup>[10]</sup>的研究中得到印证。随着围垦年限的增加,植被和微生物物种多样性也随之增加。植被结构和物种多样性对土壤微环境的改善有重要贡献<sup>[28]</sup>,尤其对土壤结构稳定性有着重要作用。较大且稳定的团聚体能够提供更多的保护性微环境,减缓有机碳的分解速率,有利于有机碳的积累和稳定,从而促进碳库相关指标增长。盐分及其主要离子

( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  等)可能通过影响团聚体稳定性和微生物活性,进而影响有机碳的分解速率和稳定性。

亚表层土壤中,开始围垦时,土壤经过人工干预后(深耕、翻耕等农艺措施),导致 HLOC 含量占比相对增加,后趋于稳定,达到平衡状态。其中,外界因素对 HLOC 和 NLOC 影响最大(图 11B),对 MLOC 没有显著性影响,pH 值对各活性有机碳组分均不显著,主要原因是土壤 pH 值对微生物活性影响较大,在一定程度上控制碳的周转速率<sup>[10]</sup>,而亚表层土壤通气性较低、微生物含量处于较低状态<sup>[29]</sup>,因此 pH 值对亚表层土壤影响并不显著。LLOC 与团聚体稳定性、SOC 呈现显著相关性,该研究结果与表层土壤中研究结果一致,主要原因是 LLOC 包括颗粒有机碳、糖、脂类等有机化合物及部分复杂化合物,与团聚体的形成和稳定密切相关<sup>[30-31]</sup>。在围垦初期,施加有机肥料等措施可能会促进土壤有机碳的积累,并提高土壤的 CPI 和 CPMI。然而,随着时间的推移,土壤中的有机碳可能会达到一个相对稳定的水平,导致 CPI 和 CPMI 趋于平稳。随着围垦时间增加,有机碳的积累速率减缓,使得 A 和 AI 逐渐下降。亚表层土壤中盐离子对碳库指标影响明显小于表层,其主要原因亚表层受盐离子影响小于表层土壤。

## 4 结论

(1) 随着围垦年限增加,土壤团聚体稳定性呈现先增加后降低趋势(拐点在 60 a 左右)。通过 Pearson, Mantel 分析,在滨海盐渍土中,UW,除  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{NO}_3^-$  外其他离子,pH 值,SAR,EC 是表层土壤团聚体稳定性的主要阻碍因素;UW,除  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{NO}_3^-$  外其他离子,SAR,EC 是亚表层土壤团聚体稳定性的主要阻碍因素。

(2) 表层土壤中,CPI 呈现先增加后趋于稳定趋势,A, AI,CPMI 均呈现先增加后降低趋势;亚表层土壤中,CPI,CPMI 呈现先增加后趋于平稳趋势,A, AI 呈现先平稳后下降趋势;拐点均在 60 a 左右。土壤团聚体的稳定性对表层和亚表层土壤的碳库相关指标具有促进作用,UW,除  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{NO}_3^-$  外其他离子,SAR,EC 是影响表层、亚表层土壤碳库的主要阻碍因素。

(3) 围垦过程中除对表层土壤改良外,还需着重改良土壤亚表层,如采取深翻还田、农业轮作等措施促进亚表层土壤结构稳定和有机碳积累、降低盐分及其离子含量,以提高土壤质量和改良效率。除此之外,还要注意在围垦 60 a 后需要采取合理施用有机肥料和化肥、添加有机物质、合理灌溉等措施,防止围垦后期土地退化。

## 参考文献 (References):

- [1] Liu R, Pu L, Zhu M, et al. Coastal resource-environmental carrying capacity assessment: a comprehensive and trade-off analysis of the case study in Jiangsu coastal zone, eastern China[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2020,186:105092.
- [2] Li L J, Li G S, Du J Q, et al. Effects of tidal flat reclamation on the stability of coastal wetland ecosystem services: a case study in Jiangsu Coast, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022,145:109697.
- [3] 黄晶,孔亚丽,徐青山,等.盐渍土壤特征及改良措施研究进展[J].*土壤*,2022,54(1):18-23.  
Huang J, Kong Y L, Xu Q S, et al. Progresses for characteristics and amelioration measures of saline soil [J]. *Soils*, 2022,54(1):18-23.
- [4] Cui J, Liu C, Li Z L, et al. Long-term changes in topsoil chemical properties under centuries of cultivation after reclamation of coastal wetlands in the Yangtze Estuary, China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2012,123:50-60.
- [5] Blair G J, Lefroy R, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995,46(7):1459.
- [6] Ottoy S, De Vos B, Sindayihebura A, et al. Assessing soil organic carbon stocks under current and potential forest cover using digital soil mapping and spatial generalisation[J]. *Ecological Indicators*, 2017,77:139-150.
- [7] Yu P J, Han K X, Li Q, et al. Soil organic carbon fractions are affected by different land uses in an agro-pastoral transitional zone in Northeastern China[J]. *Ecological Indicators*, 2017,73:331-337.
- [8] Jiang X, Xu D P, Rong J J, et al. Landslide and aspect effects on artificial soil organic carbon fractions and the carbon pool management index on road-cut slopes in an alpine region[J]. *Catena*, 2021,199:105094.
- [9] Yuan J Y, Liang Y L, Zhuo M C, et al. Soil nitrogen and carbon storages and carbon pool management index under sustainable conservation tillage strategy[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2023,10:1082624.
- [10] 李映雪,臧真凤,张瑜,等.退耕还草对土壤碳库活度及团聚体活性有机碳组分分布的影响[J].*水土保持研究*,2023,30(5):241-249.  
Li Y X, Zang Z F, Zhang Y, et al. Changes in soil carbon pool activity and distribution of labile organic carbon composition in soil aggregates following conversion of farmland to grassland on the Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(5):241-249.
- [11] 李建国,赵宴青,袁冯伟,等.滨海滩涂围垦对土壤团聚体分布及其有机碳富集的影响:以江苏省如东县垦区为例[J].*土壤通报*,2018,49(3):552-559.  
Li J G, Zhao Y Q, Yuan F W, et al. The impact of

- reclamation on soil aggregates and organic carbon enrichment in coastal areas: a case study in Rudong County, Jiangsu Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018,49(3):552-559.
- [12] 朱长伟,陈琛,牛润芝,等.不同轮耕模式对豫北农田土壤固碳及碳库管理指数的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(4):671-682.  
Zhu C W, Chen C, Niu R Z, et al. Effects of tillage rotation modes on soil carbon sequestration and carbon pool management index of farmland in northern Henan[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022,30(4):671-682.
- [13] 杨卫君,惠超,陈雨欣,等.生物质炭施用下灌溉农田土壤团聚体稳定性及分型特征[J].水土保持学报,2022,36(6):323-329.  
Yang W J, Hui C, Chen Y X, et al. Stability and fractal features of soil aggregate in irrigated farmland under biochar application[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(6):323-329.
- [14] 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):1404-1412.  
Xie X F, Pu L J, Wang Q Q, et al. Response of soil enzyme activities and their relationships with physico-chemical properties to different aged coastal reclamation areas, eastern China[J]. Environmental Science, 2018,39(3):1404-1412.
- [15] 胡琴,陈为峰,宋希亮,等.开垦年限对黄河三角洲盐碱地土壤质量的影响[J].土壤学报,2020,57(4):824-833.  
Hu Q, Chen W F, Song X L, et al. Effects of reclamation/cultivation on soil quality of saline-alkali soils in the Yellow River Delta[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020,57(4):824-833.
- [16] 张明,高超,尹爱经,等.滩涂区不同围垦年限土壤总盐及盐基离子含量变化规律[J].农业工程学报,2018,34(1):118-126.  
Zhang M, Gao C, Yin A J, et al. Variation in soil total salt and base ions content of tidal-flat reclamation with different years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018,34(1):118-126.
- [17] McGill W B, Cole C V. Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter[J]. Geoderma, 1981,26(4):267-286.
- [18] 解雪峰,濮励杰,朱明,等.基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价[J].环境科学,2019,40(12):5484-5492.  
Xie X F, Pu L J, Zhu M, et al. Assessment of soil quality in coastal tidal flat reclamation areas based on MDS-TOPSIS model[J]. Environmental Science, 2019,40(12):5484-5492.
- [19] 毕言鹏,郑春莲,党凯红,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.  
Bi Y P, Zheng C L, Dang H K, et al. Effects of saline-water furrow irrigation on the stability of soil water-stable aggregates in cotton field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022,33(4):1055-1062.
- [20] 卢国伟,王琦璇,杨继松,等.黄河三角洲稻田退耕还湿对土壤团聚体组成及稳定性的影响[J].应用生态学报,2024,35(3):705-712.  
Lu G W, Wang Q X, Yang J S, et al. Effect of returning farmland to humidity on the composition and stability of soil aggregates in the Yellow River Delta[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024,35(3):705-712.
- [21] 魏守才,谢文军,夏江宝,等.盐渍化条件下土壤团聚体及其有机碳研究进展[J].应用生态学报,2021,32(1):369-376.  
Wei S C, Xie W J, Xia J B, et al. Research progress on soil aggregates and associated organic carbon in salinized soils[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021,32(1):369-376.
- [22] 曹立悦,李玉霖,詹瑾,等.开垦对科尔沁沙地土壤团聚体分布及稳定性的影响[J].中国沙漠,2021,41(2):212-220.  
Cao L Y, Li Y L, Zhan J, et al. Effects of tillage on distribution and stability of soil aggregates in Horqin Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 2021,41(2):212-220.
- [23] 何冰,李廷亮,栗丽,等.复垦土壤水稳性团聚体碳氮分布对施肥的响应[J].天津农业科学,2019,25(3):43-49.  
He B, Li T L, Li L, et al. Response of carbon and nitrogen distribution of water-stable aggregates to fertilization in reclaimed soil[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2019,25(3):43-49.
- [24] 王洋,刘景双,王全英.冻融作用对土壤团聚体及有机碳组分的影响[J].生态环境学报,2013,22(7):1269-1274.  
Wang Y, Liu J S, Wang Q Y. The Effects of freeze-thaw processes on soil aggregates and organic carbon[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013,22(7):1269-1274.
- [25] 张宏媛,逢焕成,宋佳坤,等.亚表层有机培肥调控盐渍土孔隙结构与水盐运移机制[J].农业机械学报,2022,53(2):355-364.  
Zhang H Y, Pang H C, Song J S, et al. Effects of pore structure and water-salt movement for saline soil under sub-surface organic amendment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(2):355-364.
- [26] 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.  
Zheng J S, Hu J M, Wei Y Y, et al. Effects of green manure returning on soil labile organic carbon in paddy field under smash ridging[J]. Soils, 2021,53(2):368-374.



- [25] 韩瑞芸,陈哲,杨世琦.秸秆还田对土壤氮磷及水土的影响研究[J].中国农学通报,2016,32(9):148-154.  
Han R Y, Chen Z, Yang S Q. Effect of straw-returning on nitrogen and phosphorus and water of soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(9): 148-154.
- [26] 姜超强,郑青松,祖朝龙.秸秆还田对土壤钾素的影响及其替代钾肥效应研究进展[J].生态学杂志,2015,34(4):1158-1165.  
Jiang C Q, Zheng Q S, Zu C L. Research progress on effects of straw returning on soil potassium and its substitute for potassium fertilizer[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(4): 1158-1165.
- [27] 刘威.连续秸秆还田对土壤结构性、养分和有机碳组分的影响[D].武汉:华中农业大学,2015.  
Liu W. Effect of continuous straw incorporation on soil structure, nutrient and organic carbon fraction[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.
- [28] Morales V L, Parlange J Y, Steenhuis T S. Are preferential flow paths perpetuated by microbial activity in the soil matrix: a review[J]. Journal of Hydrology, 2010, 393(1/2): 29-36.
- [29] Ge S Q, Pan Y Z, Zheng L W, et al. Effects of organic matter components and incubation on the cement-based stabilization/solidification characteristics of lead-contaminated soil[J]. Chemosphere, 2020, 260: 127646.

~~~~~  
(上接第 110 页)

- [29] 闫峰陵,李朝霞,史志华,等.红壤团聚体特征与坡面侵蚀定量关系[J].农业工程学报,2009,25(3):37-41.  
Yan F L, Li Z X, Shi Z H, et al. Quantitative relationship between aggregate characteristics of red soil and slope erosion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(3): 37-41.
- [30] 温磊磊,郑粉莉,杨青森,等.雨型对东北黑土区坡耕地土壤侵蚀影响的试验研究[J].水利学报,2012,43(9): 1084-1091.  
Wen L L, Zheng F L, Yang Q S, et al. Effects of rainfall patterns on hillslope farmland erosion in black soil region of Northeast China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(9): 1084-1091.

~~~~~  
(上接第 121 页)

- [27] 刘新梅,田剑,张昊,等.改良剂对复垦土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J].水土保持学报,2021,35(1): 326-333,355.  
Liu X M, Tian J, Zhang H, et al. Effects of amendment on aggregates composition and organic carbon content in reclaimed soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 326-333, 355.
- [28] Bai Y F, Cotrufo M F. Grassland soil carbon sequestration: current understanding, challenges, and solutions[J]. Science, 2022, 377(6606): 603-608.
- [29] 矫丽娜,李志洪,殷程程,等.高量秸秆不同深度还田对黑土有机质组成和酶活性的影响[J].土壤学报,2015, 52(3): 665-672.
- Jiao L N, Li Z H, Yin C C, et al. Effect of incorporation of crop straw on composition of soil organic matter and enzyme activity in black soil relative to depth and rate of the incorporation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(3): 665-672.
- [30] Segoli M, De Gryze S, Dou F, et al. AggModel: a soil organic matter model with measurable pools for use in incubation studies [J]. Ecological Modelling, 2013, 263: 1-9.
- [31] Six J, Callewaert P, Lenders S, et al. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(6): 1981-1987.

~~~~~  
(上接第 130 页)

- [27] Wang R, Min J, Kronzucker H J, et al. N and P runoff losses in China's vegetable production systems: Loss characteristics, impact, and management practices[J]. The Science of the Total Environment, 2019, 663: 971-979.
- [28] 李馨欣,王小燕,蔡崇法,等.紫色土水分和壤中流对降雨强度的响应[J].水土保持学报,2017,31(5): 25-31.  
Li X X, Wang X Y, Cai C F, et al. Response of soil water content and subsurface flow to rainfall intensity in purple soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(5): 25-31.
- [29] Ziadat F M, Taimeh A Y. Effect of rainfall intensity, slope, land use and antecedent soil moisture on soil erosion in an arid environment[J]. Land Degradation & Development, 2013, 24(6): 582-590.
- [30] Zhang R R, Li M, Yuan X, et al. Influence of rainfall intensity and slope on suspended solids and phosphorus losses in runoff[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019, 26(33): 33963-33975.