

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.02.020

路迅, 李建国, 潘霞, 等. 滨海垦区表层盐渍土理化性质和盐分离子动态特征. 土壤, 2024, 56(2): 398–405.

滨海垦区表层盐渍土理化性质和盐分离子动态特征^①

路迅, 李建国*, 潘霞, 岳亚朋, 王松林, 左希爱, 徐璐

(江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院, 江苏徐州 221116)

摘要: 江苏沿海地区拥有面积广阔的围垦区, 对围垦区盐渍土理化性质变化规律的研究有助于把握滨海围垦区土壤质量变化规律和特征。本研究通过采集 32 个江苏省盐城市不同围垦年限的土壤表层样品, 对滨海垦区表层盐渍土理化性质、盐分离子含量、钠吸附比(SAR)、电导率(EC)等土壤质量关键指标进行分析, 结果表明: ①在百年以上的围垦过程中, 滨海垦区表层盐渍土的 C/N 和 pH 均呈现出先上升后下降的趋势, 拐点在围垦后 20 a 左右, 其中土壤 C/N 远低于我国传统耕地的平均水平; 总有机碳(SOC)和全氮(TN)含量在围垦过程中整体呈现上升趋势; ②EC 和 SAR 呈快速降低的趋势, 围垦至 40 a 左右时, 土壤质量基本达到传统耕地的土壤质量水平, 盐分离子普遍降至 1 g/kg 左右; NO_3^- 与 NO_2^- 均为土壤中的重要氮素形态, NO_3^- 含量呈现先稳定后显著下降趋势, 在围垦至 100 a 以上时显著下降; NO_2^- 在围垦至 20 a 左右时显著上升, 围垦至 40 a 左右时显著下降; 百年围垦过程中, 盐渍土盐分组成由氯化物盐土转变为氯化物硫酸盐土; ③滨海盐渍土中理化性质与围垦年限对盐分离子演化存在复杂的关系, 土壤围垦年限、pH-EC 和 SOC-TN 含量 3 组组分的共同作用对盐分离子变化贡献度最大。

关键词: 滨海垦区; 围垦年限; 土壤理化性质; 盐分离子

中图分类号: S151.9; S156 **文献标志码:** A

Characteristics of Physicochemical Properties and Salt Ion Evolution of Surface Saline Soils in Coastal Reclamation Areas

LU Xun, LI Jianguo*, PAN Xia, YUE Yapeng, WANG Songlin, ZUO Xia, XU Lu

(School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: Coastal of Jiangsu has vast reclaimed regions. Exploring evolution dynamics of saline soil properties following reclamation can benefit to understanding characteristics of soil quality variations in coastal reclamation zones. In this study, 32 surface soil samples were collected from different reclamation zones in Yancheng City, Jiangsu Province to analyze the main soil quality indicators, including physicochemical properties, salt ion content, sodium adsorption ratio (SAR), and electrical conductivity (EC), etc. The results showed that: 1) In the hundred-year scale, indicators of coastal soil C/N and pH initially increased then declined, with a turning point of around the 20th year after reclamation. C/N ratio was significantly lower than the mean of traditional cultivated lands of China. Soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) contents generally increased over the reclamation time; 2) Both EC and SAR were in a rapid decreasing trend. Soil quality overall reached soil quality level of traditional cultivated lands of China in the 40th year after reclamation and soil salt content generally decreased to about 1 g/kg. Soil NO_3^- and NO_2^- were the two main nitrogen forms in all soils. Soil NO_3^- content kept stable initially and then decreased significantly when it was reclaimed for over 100 years. However, soil NO_2^- content increased within 20 years after reclamation and then declined significantly in 40 years reclamation. Notably, coastal saline soils transformed from chlorinated salt soils to a combination of chlorides and sulfates ones over hundred-years of reclamation; 3) Complex relationships were found among salt ions evolution, soil physicochemical properties variations and reclamation time following reclamation. The combined contributions of reclamation time, pH-EC factor and total SOC-TN factor was greatest to the evolution of salt ions in the reclaimed soils.

Key words: Coastal reclamation area; Reclamation time; Soil physicochemical properties; Salt ions

①基金项目: 国家自然科学基金项目(42271287, 42371053)、江苏省海洋科技创新项目(JSZRHYKJ202212)、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开放基金项目(HYCX202306)和江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX23_2904)资助。

* 通讯作者(ljianguo531@126.com)

作者简介: 路迅(1998—), 男, 河北廊坊人, 硕士研究生, 主要从事滨海盐渍土改良研究。E-mail: 13292628207@163.com

土壤盐渍化严重制约粮食生产,一直是人们广泛关注的土壤生态问题。2021年12月5日的世界土壤日主题是“防治土壤盐渍化,提高土壤生产力”,说明土壤盐渍化仍是人类生存发展面临的全球性问题与挑战^[1-2]。我国盐渍土总面积为 $3.69 \times 10^7 \text{ hm}^2$,而滨海盐渍土是主要盐渍土类型之一^[3]。因此,对我国滨海地区盐渍化土壤的围垦,有利于缓解人地矛盾。滨海盐渍土具有盐分含量高、土壤肥力水平低、土壤耕性差等特征^[4]。随着围垦年限的增加,土壤盐分及盐分离子、土壤理化性质、土壤结构等会呈现一定变化规律。因此,了解滨海地区不同围垦年限下土壤表层盐分及其离子、全氮、有机碳、pH等变化规律及其影响因素,可以更好地了解滨海盐渍土的演化过程和围垦工程的效果,同时为查明我国滨海盐碱地围垦过程中不同围垦时期土壤理化性质提供相应理论依据,对解决我国人地矛盾问题具有重要意义。

随着围垦时间的增加,表层土壤结构、理化性质、营养元素等会发生相应变化^[5]。Sun等^[6]研究发现,随着围垦时间的增加,土壤盐分、电导率和土壤粒径等呈下降趋势,而有机质等呈现上升趋势。周聪等^[7]以上海市崇明东滩为例研究表明,随着围垦年限增加,有机碳含量显著增加,pH、 SO_4^{2-} 、EC随围垦年限增加而降低。许艳等^[8]研究发现,滨海滩涂在围垦后随着土壤的不断脱盐,逐渐向耕地土壤转变,其土壤盐分和pH先上升后下降,土壤肥力不断提高。黄子晨等^[9]以浙东滨海围垦区为例,研究表明,未围垦的土壤pH高于围垦土壤,并且随着围垦年限的增加,pH呈下降趋势;0~10 cm土层的电导率在围垦年限增加过程中呈先增加,后减小,再增加的趋势; Na^+ 、 Mg^{2+} 的含量变化趋势与电导率变化趋势基本一致,在围垦至31 a时显著高于围垦初期;然而, Ca^{2+} 含量随围垦年限的增加没有显著变化。李鹏等^[10]研究了60 a尺度下滨海地区围垦现状,结果表明,土壤总体盐分下降,且田间脱盐效果较好,且围垦至20~60 a土壤次生盐碱化风险提高。张明等^[11]从百年尺度下研究了江苏滨海滩涂围垦区盐分及其盐基离子变化,结果表明,随着围垦年限的增加,盐分及其各盐分离子含量降低,围垦到60 a左右时,基本完成脱盐过程。Xu等^[12]研究开垦后时间和土地利用轨迹对土壤理化性质的影响,结果表明开垦后29 a时间里,土壤电导率、钠吸附比等迅速下降,有机质、总氮、碱性水解氮等迅速增加。Xie等^[13]研究发现,随着围垦年限增加,土壤盐分显著降低,土壤养分显著增加,且土壤盐渍化指标与土壤理化性质密切相关,并得出

长期开垦可以从根本上降低盐碱化程度。已有文献对不同围垦年限下滨海盐渍土理化性质变化、盐分及其盐基离子变化、盐分迁移和转化进行大量研究,但前人对于从百年尺度下滨海盐渍土演化特征的研究缺乏精确描绘,鲜有学者关注滨海垦区表层盐渍土理化性质演化规律、盐分离子演化过程中主要因素贡献度以及盐分离子中 NO_3^- 和 NO_2^- 含量对氮素转化综合研究。

本文以江苏省盐城市为研究区,运用单因素方差分析、Pearson相关分析等对不同围垦年限下滨海盐渍土理化性质、盐分离子及盐分离子中 NO_3^- 和 NO_2^- 含量对氮素转化影响、盐分组成变化、电导率、钠吸附比等进行分析,探讨了围垦过程中滨海盐渍土理化性质、各盐分离子变化特征及其影响因素,对于深入了解滨海地区盐分离子变化及组成、土壤质量变化规律以及揭示长期围垦条件下对土壤管理效应的影响具有重要意义。

1 材料与方法

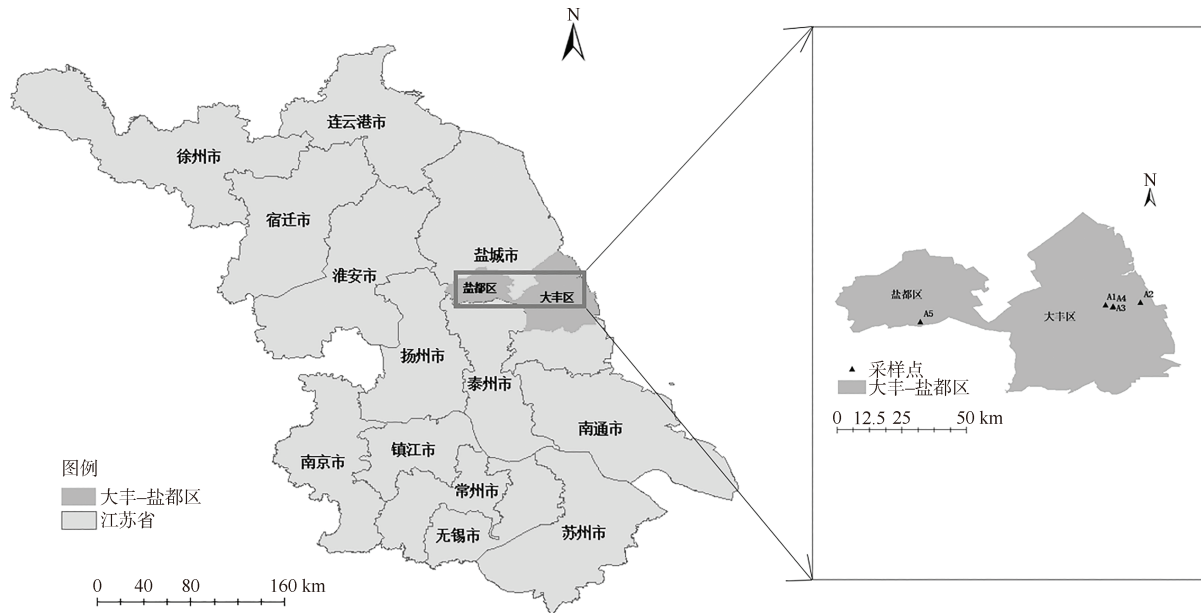
1.1 研究区概况

研究区位于江苏省盐城市大丰区和盐都区,位于 $32^\circ 56' \text{N} \sim 33^\circ 36' \text{N}$ 、 $119^\circ 40' \text{E} \sim 120^\circ 13' \text{E}$,大丰区海拔为1.8~4.5 m,盐都区海拔为1.5~2.2 m,全境为平原地貌,天然河网对水的调蓄能力有限,汛期降水形成的径流很快排泄入海,本地径流利用率很低。非汛期水源紧缺,每年5月中旬至6月下旬正值灌溉期,缺水较严重。两区位于江苏省盐城市中部地区,均属亚热带季风气候,冬季受欧亚大陆冷气团影响,盛行偏北风且多寒冷天气;夏季受太平洋副热带高压影响,盛行偏南风且多炎热天气,空气温暖而湿润,雨水丰沛。

1.2 采样与测定

本次采样于2021年4月23日和4月24日两天完成,以向当地农户调查为基础,确定地块的围垦年限,并通过《大丰县志》《大丰市志》《盐城市盐都区志》等资料进行确认。之后对样地进行随机取样,每个围垦年限下取5~10个样品,共计32个样品(图1)。样品采集时,用GPS进行定位,用采样器均匀采集地表0~20 cm土壤,同时去除部分石块、肉眼可见的植物残体等。

土样取回后放置于阴凉通风处,并进行初步捏碎处理,待充分风干检出肉眼可见的草根、动植物残体等,磨碎,过2 mm、0.149 mm孔筛后装入密封袋内备用。



(A1: 围垦 0 a 采样地, 土地利用方式为湿地; A2: 围垦 20 a 左右采样地, 土地利用方式为野草; A3: 围垦 40 a 左右采样地, 土地利用方式为小麦-水稻轮作; A4: 围垦 60 a 左右采样地, 土地利用方式为油菜花、小麦-水稻轮作; A5: 围垦 100 a 以上采样地, 土地利用方式为小麦-水稻轮作)

图 1 研究区域和采样点位置

Fig.1 Location of study area and sampling sites

土壤盐离子测定制备土水质量比为 1 : 5 的浸提液, 振荡 5 min 后过滤得上层清液, 随即用电导率仪测定电导率, 再用离子色谱仪测定 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_2^- 、 NO_3^- 各离子含量; 制备土水质量比为 1 : 2.5 的浸提液测土壤 pH; 土壤中 SOC、TN 将过 0.149 mm 孔筛的土样用元素分析仪测定。

钠吸附比(SAR)的计算公式为:

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

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

1.3 数据处理

土壤理化性质、盐离子、EC、SAR、 Cl^-/SO_4^{2-} 值随围垦年限变化显著性分析通过 SPSS 27 进行单因素方差分析, R 软件完成绘图; 运用 Pearson 相关系数进行围垦年限、土壤理化性质与各盐离子间相关性分析; 运用 varpart 函数实现方差分解分析 (Variance partitioning analysis, VPA), 评价盐离子演化影响因素, 数据处理采用 Excel 2010 完成。

2 结果与分析

2.1 不同围垦年限滨海垦区表层土壤理化性质

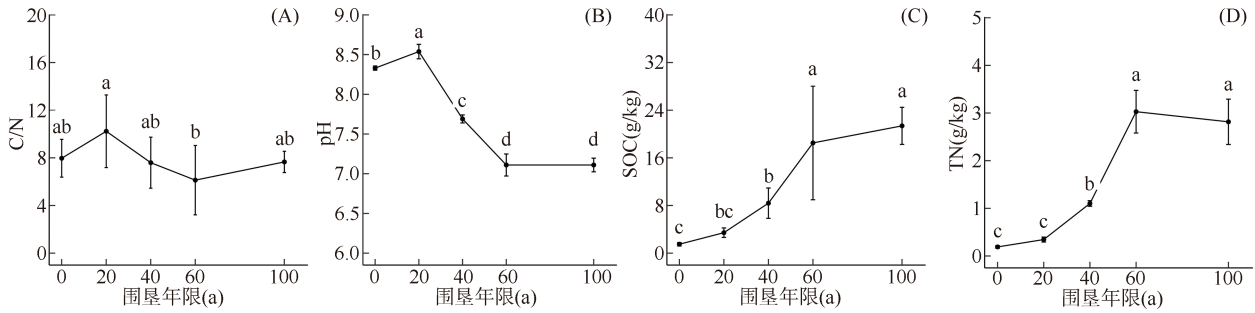
C/N 通常用来反映土壤有机质的状况, 本研究中

C/N 总体呈现先上升后下降趋势(图 2A), 在围垦至 20 a 左右时, C/N 较未围垦时有所增加, 但围垦至 60 a 左右时较 20 a 左右时显著下降, 后趋于稳定。土壤 pH 在围垦至 20 a 左右时较未围垦时显著上升(图 2B), 但围垦 20 a 左右至 40 a 左右及 40 a 左右至 60 a 左右时均显著下降, 后趋于稳定且接近中性。

SOC 和 TN 含量随围垦年限增加均出现上升趋势, 大致可分为 3 个时期(图 2C、2D)。第一个时期, SOC 和 TN 从 0 a 围垦至 20 a 左右均无显著性增加; 第二个时期, SOC 从 20 a 左右围垦至 40 a 左右无显著性增加, 而 TN 显著性增加, 从 40 a 左右围垦至 60 a 左右 SOC 和 TN 含量均显著增加; 第三个时期, 从围垦 60 a 左右至围垦 100 a 以上时, SOC 含量和 TN 含量总体趋于稳定。

2.2 不同围垦年限滨海垦区表层土壤各盐离子动态特征

由图 3 可以发现, 未围垦滨海表层盐渍土盐离子含量处于较高水平, 其中 Na^+ 、 Cl^- 平均含量处于最高水平(图 3A、3E)。随着围垦年限增加, 大部分离子呈现下降趋势, Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 在围垦 40 a 间呈现显著下降趋势, 40 a 后趋于稳定(图 3A、3C、3E、3H); K^+ 在围垦至 20 a 左右时显著下降, 40 a 左右至 60 a 左右显著升高, 但 60 a 左右至 100 a 以上时又呈现显著下降趋势(图 3B); Ca^{2+} 总体呈现



(图中小写字母不同表示不同围垦年限间差异达 $P < 0.05$ 显著水平，下同)

图 2 滨海垦区表层土壤理化性质随围垦年限的变化特征

Fig.2 Changes of physicochemical properties of surface soils following reclamation

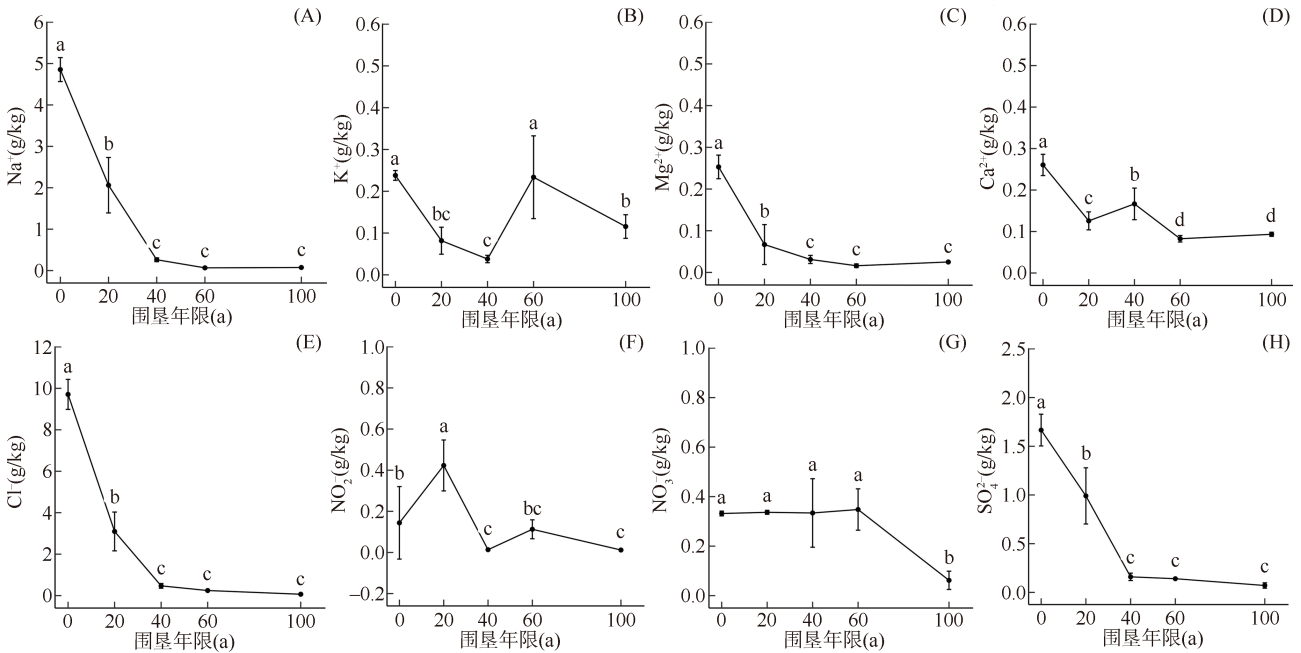


图 3 表层土壤盐离子随围垦年限的变化特征

Fig. 3 Changes of salt ions variations of surface soils following reclamation

缓慢下降趋势，但围垦 20 a 左右至 40 a 左右时显著增加，围垦 40 a 左右至 60 a 左右时显著下降后趋于稳定(图 3D); NO_2^- 围垦至 20 a 左右时呈现显著上升，但围垦至 40 a 左右时显著下降，后趋于稳定(图 3F); NO_3^- 围垦至 60 a 左右时，一直呈现稳定趋势，但围垦至 100 a 以上时显著下降(图 3G)。

2.3 不同围垦年限滨海垦区盐渍土盐分组成动态特征

根据土壤盐渍化类型划分标准^[14]，对研究区采样点进行分析。如表 1，硫酸盐盐土：盐碱土中盐分大部分为硫酸盐；氯化物硫酸盐土：盐碱土中盐分以硫酸盐为主，氯化物次之；硫酸盐氯化物盐土：盐碱土中盐分以氯化物为主，硫酸盐次之；氯化物盐土：盐碱土中盐分大部分为氯化物。 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 值随围垦年限变化如图 4 所示， $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 值整体随围垦年限增加

呈现显著下降趋势，从未围垦到围垦至 100 a 以上时盐渍土类型经历了氯化物盐土-硫酸盐氯化物盐土-硫酸盐氯化物盐土的转变。

表 1 土壤盐分组成划分($\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$)

盐分组成	硫酸盐盐土	氯化物硫酸盐土	硫酸盐氯化物盐土	氯化物盐土
$\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$	<0.5	0.5 ~ 1	1 ~ 4	≥ 4

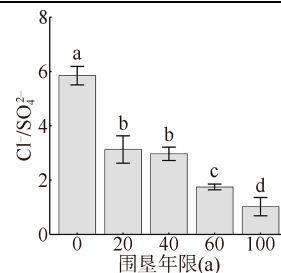


图 4 表层土壤盐分组成随围垦年限变化特征

Fig. 4 Changes of soil $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ ratio of surface soils following reclamation

显著正相关关系；C/N 与 pH 呈显著的正相关关系，与 TN 呈显著的负相关关系；pH 与除 K^+ 外其他盐分离子均呈显著正相关关系，但 pH 与 TN、SOC、RY 呈显著负相关关系；TN 与 SOC 呈显著正相关关系；EC 除与 K^+ 、 NO_2^- 呈较为显著正相关关系，与其他离子均呈显著正相关关系。离子间相关性分析显示(图 6)， K^+ 与除 NO_2^- 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 外其他离子有显著或较为显著正相关关系；除 K^+ 外，其余各盐分离子间除 Mg^{2+} 与 NO_3^- 、 NO_2^- ， Ca^{2+} 与 NO_2^- 外，其余各盐分离子间均呈现显著或较为显著正相关关系。

由图 6 可知，除 K^+ 外，其他大部分盐分离子均与 SOC、TN、RY 呈显著负相关关系，与 pH、EC 呈显著正相关关系。于是对不同影响因素进行分组后(图 7)，深入讨论土壤表层盐分离子变化影响因素。单因素 RY 对盐分离子变化的贡献度为 0.133 4，表明单因素 RY 对盐分离子变化有较大的影响。SOC-TN 对盐分离子变化的贡献度为 0.140 1，说明 SOC-TN 含量增加对盐分离子含量降低具有一定促进作用，其对盐分离子变化的影响大于单因素 RY。pH-EC 对盐分离子变化的贡献度为 0.057 8，表明土壤的 pH 和 EC 降低对盐分离子含量降低具有较显著的影响。RY 与 SOC-TN 的综合贡献度、RY 与 pH-EC 的联合贡献度最小(小于 0 时按 0 处理)，pH-EC 与 SOC-TN 含量的联合贡献度为 0.074 3，说明土壤 pH-EC 与 SOC-TN 含量的共同作用对盐分离子变化具有较明显促进作用。3 个组分的总体贡献度为 0.459 0，说 RY、SOC-TN 以及 pH-EC 这 3 组因素对盐分离子变化具有显著的影响。

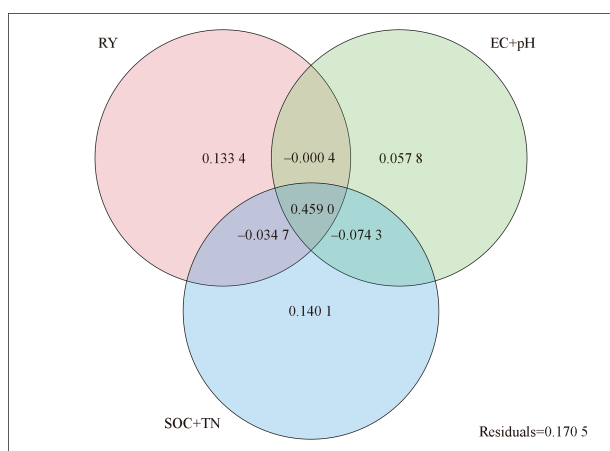


图 7 不同组分对盐分离子变化贡献度

Fig. 7 Contributions of different influencing factors to evolution of salt ions

3 讨论

3.1 土壤理化性质随围垦年限变化

本研究结果表明，随着滨海表层土壤围垦年限的

增加，C/N 呈现出先上升后下降的趋势。然而，在土地围垦年限达到 100 a 以上时，C/N 具有微小的上升趋势。总体而言，滨海围垦对土壤 C/N 的影响相对较小，C/N 的变化幅度较为微弱，其主要原因可能是 SOC 和 TN 通常有强耦合关系^[16]，这与 Cong 等^[17]在温带地区农田土壤随着时间增加 C/N 变化较小的结果类似。本研究中也得出土壤 C/N 与围垦年限间显著性不强的结论(图 6)，这与谢雪峰等^[18]对滩涂围垦区研究中 C/N 在围垦至 61 a 时显著下降趋势结果略有不同。同时本研究中 C/N 与其他大多数土壤理化性质没有显著性关系(图 6)，这与 Ge 等^[19]研究结果相似。本研究中土壤 C/N 平均值远低于全国平均水平的 12.0^[20]，表明围垦过程中土壤有机质供肥状况较差^[21]。说明该研究区应进行有效的农业管理措施，采取免耕措施^[22-24]、氮肥总量控制^[25]或秸秆还田配施氮肥^[26]来调节土壤 C/N。随着围垦年限的增加，pH 在围垦初期有短暂上升现象(图 2B)，这与前人张明等^[11]研究得出的结论略有不同，原因可能是脱盐过程中可溶性 Ca^{2+} 淋失，碳酸钙发生部分水解所致^[27]。TN 含量在一定时期内随着围垦时间的增加而增加，这一结果也得到 Zhang 等^[28]研究的印证，其主要原因在很大程度上取决于滨海盐渍土围垦后施用氮肥等农业活动^[29]；另一方面可能与盐分含量降低有关^[30]。盐分降低后有利于植物与微生物生长，大量的植物和土壤微生物死亡后，这些物质的分解会释放出氮元素(无机)，进而导致 TN 含量在一段时期内增加。SOC 随着围垦年限增加而增加，围垦 60 a 后趋于稳定，这与 Zhang 等^[28]研究结果一致。其中，油菜花的种植可能是 SOC 含量在围垦 40 a 左右至围垦 60 a 左右时显著增长的主要原因，因为油菜花的大量叶片落入土壤中，增加了土壤有机质含量，从而增加土壤微生物数量，对滨海盐渍土的改良起到了重要作用。围垦 60 a 后 SOC 和 TN 含量趋于稳定的主要原因可能是围垦后的数十年内，土壤中的有机质输入和分解达到了一个相对稳定的平衡(特别是农艺措施在一定时期内相对稳定的情况下)。

3.2 盐分及其离子随围垦年限变化

随着围垦年限增加，各盐分离子大致呈现下降趋势， Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 在围垦前 40 a 左右时呈现显著下降趋势，后趋于稳定。可能是围垦初期由于土壤结构不稳定、通透性较差等因素，水分和盐分易在表层积累，因此离子含量高。围垦后一旦海水供应中断，土壤的脱盐就很快^[5]。且由开始时 Na^+ 、 Cl^- 占盐分离子含量较高到围垦后期 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 占盐分离子

子含量较高,这一结论与 Yin 等^[31]结论相似,主要原因是随着围垦年限的增加,滨海盐渍土中的 Na^+ 和 Cl^- 开始逐渐被稀释和冲洗,取而代之的是 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 。围垦初期,地下水位高,水分和盐分易在表层积累,因此离子含量高。随着时间的推移和耕作层逐渐加深,部分离子可能会向下迁移,逐渐向更深的土层分布,导致土壤表层离子浓度下降,结构得到改善,通透性得到提高,离子含量会逐渐降低。土壤 K^+ 的变化幅度较大,主要原因可能是围垦初期由于土壤中的速效钾被大量淋失,导致 K^+ 含量下降^[32],后期土壤结构得到改善,有机质和养分含量逐渐增加,使得 K^+ 的流失和固定得到减缓。

NO_3^- 与 NO_2^- 是土壤中的重要氮素形态,它们的含量变化可以反映土壤的氮素循环过程及其与周围环境的相互作用。其中, NO_2^- 几乎作为所有氮转化的中间体,是理解土壤氮循环的关键物质^[33]。本研究中,在围垦 20 a 左右 NO_2^- 含量显著升高,而后显著下降并趋于稳定。原因可能是围垦初期土壤中的水分较多,环境还原性较强,有利于 NO_2^- 的积累。围垦后土壤中水分的逐渐减少,逐渐发展为氧化性环境,也会促使 NO_2^- 的转化和损失。 NO_3^- 的含量在围垦至 60 a 左右时呈现稳定趋势,围垦至 100 a 以上呈现下降趋势。原因可能是围垦初期,因为土地中原来的氮素和有机质被暴露在土壤表层,同时围垦后施加的有机肥和化肥也会导致 NO_3^- 的快速积累,维持在一个相对稳定的状态。随着围垦时间的延长,土壤中的氮素开始被植物充分利用, NO_3^- 的含量就会逐渐下降。

滨海盐渍土围垦过程伴随着盐分离子含量的相对变化,本研究选择 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 作为滨海盐渍土阴离子相对含量变化指标,主要因为 Cl^- 、 SO_4^{2-} 在阴离子中占比较高,并且他们的比值可以反映盐渍土的盐分类型。本研究中随着围垦年限增加,盐分组成也在发生着变化,主要原因是 Cl^- 含量下降较快,而 SO_4^{2-} 含量相对稳定,从而导致 Cl^- 与 SO_4^{2-} 比值随围垦年限增加显著性降低,盐分组成由氯化物盐土向硫酸盐盐土转化。

盐胁迫影响植物的生长发育,对于作物生长会产生不利影响^[34]。耕地作物与植被随着围垦年限的增加,大量的作物与植物残体、根系等会不断地输入有机物质到土壤中,从而增加土壤有机质含量。加之农业生产中,逐渐开始使用有机肥料等,这些有机物质的不断输入,都会使土壤有机质含量逐渐增加,从而使 EC 逐渐降低。SAR 是围垦过程中反映土壤盐渍化程度的重要指标。SAR 的值越大,说明 Na^+ 所占

阳离子比例越大, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 所占比例越小,对作物产生的伤害性越大^[35]。本研究中,随着围垦年限增加, SAR 显著降低,60 a 左右趋于稳定。随着围垦年限增加,土壤中阳离子如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 相对含量占比可能会增加,这些离子会置换出 Na^+ ,从而导致土壤中的 SAR 下降。围垦后土壤有机质含量增加、土壤结构的改变,如土壤颗粒大小、孔隙度等的变化,这些改变可能会影响土壤颗粒表面的钠吸附情况,从而导致 SAR 的下降,直至趋于稳定。

3.3 RY、SOC-TN、pH-EC 之间的交互作用

单因素 RY 在盐分离子变化中的贡献度达 0.133 4,与 EC、pH 及除 K^+ 外其他离子均呈现显著负相关关系。RY 与 SOC-TN 呈显著正相关关系,这与张文敏等^[36]研究结果类似。研究结果说明 RY 是土壤理化性质及其盐分离子变化的重要因素之一。SOC-TN 含量在盐分离子变化中的贡献度相对较高,且与大部分盐分离子呈显著负相关关系,说明 SOC 和 TN 等土壤养分对土壤盐分离子的降低具有重要作用。SOC 和 TN 含量的增加,尤其是 SOC 含量增加能够改善土壤结构,提高土壤保水能力和离子交换能力,从而减少盐分离子的累积和迁移。pH-EC 对盐分离子变化的贡献度较高,表明土壤 pH-EC 对盐分离子的迁移起着重要调节作用。高 pH 和 EC 可能导致土壤中盐分离子的累积,加剧盐分离子变化的程度。RY、SOC-TN 以及 pH-EC 之间存在交互作用,且贡献度最高,进一步说明不同因素之间的复杂关系对盐分离子变化的影响,使得表层土壤盐分离子变化受多个因素共同调控。

4 结论

在滨海垦区百年的围垦过程中,滨海盐渍土呈现出脱盐、脱碱的整体趋势,且养分如 SOC、TN 等总体呈现逐渐增加趋势。其中,盐分离子经历了以初期以 Na^+ 、 Cl^- 为主,转变为后期以 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 为主。同时,围垦对盐分和钠离子吸附比具有明显调控作用。随着围垦年限增加,土壤盐分显著下降,围垦至 40 a 左右时,基本达到轻盐渍化水平。围垦初期土壤中水分较多、土壤结构紧密,有利于 NO_2^- 的积累,随土壤被围垦,土壤环境逐渐氧化,导致 NO_2^- 含量下降;围垦至 60 a 左右, NO_3^- 维持在一个相对稳定的水平,后呈现下降趋势,这表明围垦前期的农艺措施相对合理,但围垦到一百年后土壤氮素相对缺乏,需要更加有效地管理和补充氮素。RY 增加、SOC-TN 含量增加及 pH-EC 降低对盐渍土盐分离子含量降低具有促进作用。

参考文献:

- [1] Hassani A, Azapagic A, Shokri N. Global predictions of primary soil salinization under changing climate in the 21st century[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 6663.
- [2] Vineis P, Khan A. Climate change-induced salinity threatens health[J]. *Science*, 2012, 338(6110): 1028–1029.
- [3] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望[J]. *土壤学报*, 2022, 59(1): 10–27.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Sun Y G, Li X Z, Mander Ü, et al. Effect of reclamation time and land use on soil properties in Changjiang River Estuary, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2011, 21(4): 403–416.
- [7] 周聪, 饶旭东, 薛梦琪, 等. 围垦年限及施氮对滨海湿地 CH₄ 好氧氧化过程的影响[J]. *土壤*, 2023, 55(1): 72–78.
- [8] 许艳, 濮励杰. 江苏海岸带滩涂围垦区土地利用类型变化研究——以江苏省如东县为例[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(4): 643–652.
- [9] 黄子晨, 张小平, 卞方圆, 等. 浙东滨海围垦区土壤碳含量的时间变化特征及其影响因子[J]. *土壤通报*, 2020, 51(6): 1409–1415.
- [10] 李鹏, 濮励杰, 朱明, 等. 江苏沿海不同时期滩涂围垦区土壤剖面盐分特征分析——以江苏省如东县为例[J]. *资源科学*, 2013, 35(4): 764–772.
- [11] 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.
- [12] Xu Y, Pu L J, Zhang R S, et al. Effects of agricultural reclamation on soil physicochemical properties in the mid-eastern coastal area of China[J]. *Land*, 2021, 10(2): 142.
- [13] Xie X F, Pu L J, Zhu M, et al. Linkage between soil salinization indicators and physicochemical properties in a long-term intensive agricultural coastal reclamation area, Eastern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(11): 3699–3707.
- [14] 王遵亲. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [15] 毛任钊, 田魁祥, 松本聪, 等. 盐渍土盐分指标及其与化学组成的关系[J]. *土壤*, 1997, 29(6): 326–330.
- [16] 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.
- [17] Cong R H, Wang X J, Xu M G, et al. Dynamics of soil carbon to nitrogen ratio changes under long-term fertilizer addition in wheat-corn double cropping systems of China[J]. *European Journal of Soil Science*, 2012, 63(3): 341–350.
- [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.
- [19] Ge B M, Yang R P, Yang L, et al. Changes in soil macrofaunal communities along soil age gradient under centuries of cultivation after coastal reclamation[J]. *CATENA*, 2021, 200: 105170.
- [20] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1): 139–151.
- [21] 朱凤武, 徐彩瑶, 濮励杰, 等. 苏北滩涂围垦区土壤碳氮磷含量及其生态化学计量特征[J]. *中国土地科学*, 2017, 31(12): 77–83.
- [22] Liu M Y, Ussiri D A N, Lal R. Soil organic carbon and nitrogen fractions under different land uses and tillage practices[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2016, 47(12): 1528–1541.
- [23] Mazzoncini M, Antichi D, Di Bene C, et al. Soil carbon and nitrogen changes after 28 years of no-tillage management under Mediterranean conditions[J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 77: 156–165.
- [24] Mazzoncini M, Sapkota T B, Bärberi P, et al. Long-term effect of tillage, nitrogen fertilization and cover crops on soil organic carbon and total nitrogen content[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 114(2): 165–174.
- [25] Yang Y C, Zhang M, Zheng L, et al. Controlled release urea improved nitrogen use efficiency, yield, and quality of wheat[J]. *Agronomy Journal*, 2011, 103(2): 479–485.
- [26] 侯贤清, 李荣, 吴鹏年, 等. 秸秆还田配施氮肥对土壤碳氮含量与玉米生长的影响[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(9): 238–246.
- [27] 陈巍, 陈邦本, 沈其荣. 滨海盐土脱盐过程中 pH 变化及碱化问题研究[J]. *土壤学报*, 2000, 37(4): 521–528.
- [28] Zhang H, Wu P B, Yin A J, et al. Organic carbon and total nitrogen dynamics of reclaimed soils following intensive agricultural use in Eastern China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 235: 193–203.
- [29] Tan J L, Kang Y H. Changes in soil properties under the influences of cropping and drip irrigation during the reclamation of severe salt-affected soils[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2009, 8(10): 1228–1237.
- [30] 孙瀚, 屈杰, 王晓雯, 等. 黄河三角洲盐渍土有机氮组成及氮有效性对土壤含盐量的响应[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(8): 1397–1404.
- [31] Yin A J, Zhang M, Gao C, et al. Salinity evolution of coastal soils following reclamation and intensive usage, Eastern China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(18): 1281.
- [32] 潘宏, 严少华, 张振华, 等. 轻质滨海盐土围垦利用初期土壤环境的化学变化[J]. *江苏农业科学*, 1996, 24(5): 47–50.
- [33] Lewicka-Szczebak D, Jansen-Willems A, Müller C, et al. Nitrite isotope characteristics and associated soil N transformations[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 5008.
- [34] 苏媛, 田长彦, 买文选, 等. 滴灌条件下西北干旱区农田生物排盐研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2023, 60(4): 925–938.
- [35] 迟春明, 王志春. 松嫩平原苏打盐渍土钠吸附比的间接推算[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(6): 198–202.
- [36] 张文敏, 吴明, 邵学新, 等. 杭州湾南岸不同围垦年限农田土壤有机碳及其活性组分变化[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(2): 226–231.