

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.01.015

引用格式:陈施洋,车亚娟,李晶晶.黄河三角洲土壤盐碱化对团聚体稳定性的影响[J].草地学报,2026,34(1):154–162

CHEN Shi-yang, CHE Ya-juan, LI Jing-jing. Effects of Soil Salinization on Aggregate Stability in the Yellow River Delta[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(1):154–162

黄河三角洲土壤盐碱化对团聚体稳定性的影响

陈施洋^{1,2}, 车亚娟^{1,2}, 李晶晶^{1,2*}

(1. 青岛农业大学草业学院, 山东 青岛 266109; 2. 山东省耐盐碱草木种质创新重点实验室, 山东 青岛 266109)

摘要:为探究黄河三角洲滨海盐碱地不同盐碱梯度下土壤团聚体的理化性质、稳定性及其关系,本研究采用野外采样与室内分析相结合的方法,测定了不同盐碱梯度下土壤团聚体的养分含量、粒径分布及稳定性指标。结果表明:重度盐碱梯度下,<0.25 mm团聚体中碳氮比、铵态氮和速效磷含量显著降低($P<0.05$);1~2 mm团聚体中硝态氮和铵态氮含量也显著下降($P<0.05$)。团聚体几何平均直径和平均重量直径在重度盐碱条件下显著低于中度盐碱条件($P<0.05$),而1~2 mm团聚体比例随盐碱梯度上升而增加。相关分析表明,含盐量与各粒径团聚体全碳、全氮极显著负相关($P<0.01$),与碳氮比极显著正相关($P<0.01$);高盐碱条件下,速效磷、铵态氮、硝态氮及团聚体稳定性指标均与盐分呈显著负相关($P<0.01$)。综上所述,盐碱程度显著影响土壤团聚体的理化特性与结构稳定性,高盐碱条件可能导致团聚体养分流失和结构劣化。

关键词:黄河三角洲;盐碱土;土壤团聚体;稳定性;土壤理化性质

中图分类号:S156.4+3

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)01-0154-09

Effects of Soil Salinization on Aggregate Stability in the Yellow River Delta

CHEN Shi-yang^{1,2}, CHE Ya-juan^{1,2}, LI Jing-jing^{1,2*}

(1. College of Grassland Science, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong Province 266109, China; 2. Shandong Key Laboratory for Germplasm Innovation of Saline-alkaline Tolerant Grasses and Trees, Qingdao, Shandong Province 266109, China)

Abstract: To investigate the physicochemical properties and stability of soil aggregates and their relationships under different saline-alkali gradients in the coastal saline-alkali land of the Yellow River Delta, this study combined field sampling with laboratory analysis to determine the nutrient content, particle size distribution, and stability indicators of soil aggregates across varying gradients. The results showed that under severe saline-alkali conditions, the carbon-to-nitrogen ratio, ammonium nitrogen, and available phosphorus content in <0.25 mm aggregates significantly decreased ($P<0.05$). Similarly, nitrate nitrogen and ammonium nitrogen content in 1-2 mm aggregates were also significantly lower under high salinity stress ($P<0.05$). The geometric mean diameter and mean weight diameter of aggregates significantly reduced in severe saline-alkali conditions compared to moderate conditions ($P<0.05$), while the proportion of 1-2 mm aggregates increased with increasing salinity. Correlation analysis revealed that salinity was significantly negatively correlated with total carbon and total nitrogen across all aggregate sizes ($P<0.01$), and significantly positively correlated with the carbon-to-nitrogen ratio ($P<0.01$). Under high saline-alkali conditions, available phosphorus, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, and aggregate stability indicators were all significantly negatively correlated with salt content ($P<0.01$). In conclusion, the degree of saline-alkali stress significantly influenced the physicochemical properties and structural stability of soil aggregates, with high salinity potentially leading to nutrient loss and structural degradation.

Key words: Yellow River Delta; Saline-alkaline soil; Soil aggregates; Stability; Soil physicochemical properties

收稿日期:2025-02-18;修回日期:2025-06-06

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2022QC045);国家重点研发计划(2022YFD1300802);国家牧草产业技术体系(CSRS-34-19)和山东省高校“青年创新团队计划”(2022KJ166)资助

作者简介:陈施洋(2000-),男,汉族,江苏泰州人,硕士研究生,主要从事草地生态与土壤微生物相关研究,E-mail: csy20242152009@163.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: lijingjing@qau.edu.cn

土壤盐碱化已成为世界性难题,全球范围内超过4.24亿 hm^2 表层土(0~30 cm)和8.33亿 hm^2 深层土(30~100 cm)受到盐碱化的影响^[1]。山东省黄河三角洲是我国土壤盐碱化较为严重的滨海区域^[2],并且每年以 $1.3\times 10^3\sim 2.0\times 10^3\text{ hm}^2$ 速度扩大^[3-4]。黄河三角洲地区土壤盐碱化严重制约了土壤资源高效利用和农业可持续发展^[5],所以盐碱地的合理开发利用对保障我国耕地和粮食安全、严守国家耕地红线等具有重大意义^[6]。盐碱土主要特征是盐分含量和pH值高、有机质含量低^[5],具有较差的物理结构^[7]。而且其中大量的 Na^+ 会占据土壤颗粒表面的大量阳离子交换位点,降低土壤团聚体的稳定性^[8]。此外,盐碱化土壤较高的pH值导致黏土颗粒表面负电荷增加,加剧了颗粒间的排斥作用^[9]。土壤的理化性质是衡量土壤肥力的重要指标^[10],也是土壤质量评价的基础^[11]。因此,探究不同盐碱程度下土壤团聚体理化性质和稳定性的变化,可为滨海盐碱地的改良利用奠定基础。

土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,其含量和稳定性是衡量土壤质量与健康状况的核心指标^[12-13]。Tisdall等^[14]以0.25 mm为界,将直径>0.25 mm的团聚体定义为大团聚体(Macroaggregates),<0.25 mm的为微团聚体(Microaggregates),这一分类标准成为研究土壤结构的重要依据。团聚体的形成过程涉及物理、化学及生物作用的协同机制^[15],例如黏粒定向凝聚、有机质与矿物颗粒的黏结,以及微生物分泌的胶结物质和植物根系的缠绕作用,最终通过多级团聚形成不同粒径的复合结构。土壤团聚体的含量、粒径分布(如大团聚体与微团聚体的比例)和微观形态直接影响土壤理化性质及生态功能^[16]。其中,团聚体稳定性是评价土壤质量的关键参数,常用平均重量直径(Mean weight diameter, MWD)和几何平均直径(Geometric Mean Diameter, GMD)作为综合指标:MWD反映各级团聚体的整体稳定性,GMD描述粒级分布特征,二者数值越大,表明土壤结构越稳定^[17]。研究表明,盐碱地改良措施,例如降低pH和电导率、提升养分含量可通过促进大团聚体形成、减少微团聚体比例,显著增强团聚体稳定性^[18]。

本研究以黄河三角洲滨海盐碱地为研究对象,系统对比不同盐碱梯度下土壤团聚体稳定性特征,以及土壤理化性质、团聚体稳定性与盐碱度的相关性,为科学合理保护与利用滨海盐碱地提供实践依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于山东省东营市黄河三角洲农业高新技术产业示范区(37.3°N, 118.7°E;海拔为6.7 m)。该地区属于暖温带大陆性季风气候,年平均气温约12.8℃,年平均降水量约555.9 mm,其中夏季降水量占年降水量的65%。土壤类型为滨海盐碱土,盐碱梯度为轻度到重度。天然植被主要以翅碱蓬(*Suaeda heteroptera*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、藜(*Chenopodium album*)、芦苇(*Phragmites australis*)、白茅(*Imperata cylindrical*)和茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)等耐盐植物为主。

1.2 试验设计与样品采集

2023年4月,依据植被类型和土壤含盐量的高低确定取样地点。根据植被类型随机选取4个样地来表示4个盐碱梯度处理,每个处理设3次重复,共12个取样点(4个盐碱梯度×3次重复)。根据土壤盐渍化程度划分依据^[19]:1.0~3.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为盐渍化土壤,3.0~5.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为中度盐土,5.0~10.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为重度盐土,>10.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为极重度盐土,从而划分本试验的4个盐碱梯度分别为:轻度盐碱样地S1(植被类型以猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)为主,含盐量约为1.65 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$);中度盐碱样地S2(植被类型以芦苇(*Phragmites australis*)为主,含盐量约为3.18 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和S3(植被类型以芦苇(*Phragmites australis*)为主,含盐量约为4.54 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$);重度盐碱样地S4(地上无植被生长,含盐量约为6.57 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。采用“S”形5点取样法采集0~20 cm处的土壤,将5个点的土壤混合起来作为一次取样,共计采集12份土壤样品(4个盐碱梯度×3次重复)。将土壤样品带回实验室,去除石砾和植物根系等杂质后在室温(26℃)下自然风干。

1.3 土壤团聚体理化性质测定

土壤含盐量采用5:1水土质量比法测定^[19];土壤酸碱度(pH)和电导率采用1:5土水比电极法利用Thermo Scientific仪器测定^[20]。土壤全碳(TC)、全氮(TN)与碳氮比(C/N)采用全自动碳氮元素分析仪测定^[21];土壤铵态氮(NH_4^+-N)和硝态氮(NO_3^--N)采用2 mol·L⁻¹ KCl溶液浸提法,并使用连续流动分析仪(SAEL-AA3)进行测定^[20];土壤速

效磷(AP)采用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 溶液浸提-钼锑抗比色法,并使用分光光度计在 880 nm 波长处进行比色测定^[19]。

1.4 土壤团聚体筛分及稳定性计算

采用干筛法进行土壤团聚体的筛分^[22],避免湿筛对团聚体内微生物的冲刷。称取 200 g 土样放入筛孔从大到小依次为 2 mm、1 mm、0.5 mm、0.25 mm 的套筛中,频率为 2 分钟内上下 50 次,振幅大约为 3 cm,筛分得到 $<0.25 \text{ mm}$ 、 $0.25 \sim 0.5 \text{ mm}$ 、 $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ 和 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 四个团聚体组分。将套筛上的各粒径团聚体分别称重,计算各粒径团聚体的百分含量。

(1)各粒径团聚体重量百分比(P_i)计算公式如下^[23]:

$$P_i = \frac{m_i}{200} \times 100\%$$

式中: P_i 为*i*粒径团聚体重量占土壤样品干重的比例, m_i 为*i*粒径土壤团聚体重量。

(2)土壤团聚体稳定性的分析采用土壤团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)两个指标,指标数值越大,团聚体稳定性越强,平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)的计算公式如下^[24]。

$$MWD = \sum_{i=1}^n x_i \times w_i$$

$$GMD = \exp \frac{\sum_{i=1}^n w_i \times \ln x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

式中, w_i 为不同土壤粒径团聚体占总团聚体的比例; x_i 为土壤粒径的平均直径, n 为团聚体的粒径区间数。

1.5 数据分析

所有数据采用 Microsoft Excel 2019 进行整理,采用 Levene 检验验证了所有数据的方差齐性。运用 SPSS27.0 对不同盐碱梯度下的团聚体理化性质、百分含量、平均重量直径和几何平均直径进行单因素方差分析(ANOVA),采用最小显著差异法(LSD)进行多重比较并检验试验数据的差异显著性水平。采用 Origin 2024 软件绘制柱状图、箱线图及相关性分析。

2 结果与分析

2.1 土壤基本概况

不同盐碱梯度下的土壤基本概况如表 1 所示。四个盐碱梯度下,土壤电导率和含盐量随盐碱程度的增加而显著增加($P < 0.05$);土壤 pH 值在 S1 和 S3 梯度显著高于 S2 和 S4 梯度($P < 0.05$)。

表 1 不同盐碱梯度下土壤理化性质基况

Table 1 Soil physicochemical properties under different saline alkali gradients

盐碱梯度 Saline alkali gradient	电导率 Soil conductivity/($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)	酸碱度 Soil pH	含盐量 Salt content/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
S1	0.73 ± 0.09^d	8.13 ± 0.04^a	1.65 ± 0.05^d
S2	1.20 ± 0.11^c	7.92 ± 0.02^b	3.18 ± 0.13^c
S3	1.88 ± 0.21^b	8.07 ± 0.06^a	4.54 ± 0.53^b
S4	2.90 ± 0.11^a	7.80 ± 0.05^c	6.57 ± 0.30^a

注:S1表示轻度盐碱,S2与S3表示中度盐碱,S4表示重度盐碱;表中数据以“平均值±标准差”表示;不同小写字母表示不同盐碱梯度之间差异显著($P < 0.05$)

Note: S1 represents mild saline-alkali conditions, S2 and S3 represent moderate saline-alkali conditions, and S4 represents moderately severe saline-alkali conditions. Data in the table are presented as “Means ± standard deviation”. Different lowercase letters indicate significant difference between different saline alkali gradient ($P < 0.05$)

2.2 土壤盐碱化对团聚体理化性质的影响

2.2.1 土壤团聚体总碳(TC)含量变化 同一盐碱梯度内,各粒径团聚体的 TC 含量无显著差异(图 1a)。而在不同梯度间, $<0.25 \text{ mm}$ 团聚体中 S3 梯度的 TC 含量显著高于 S1;在 $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ 团聚体中,S4 的 TC 含量显著高于 S1 和 S2(图 1a, $P < 0.05$)。

2.2.2 土壤团聚体总氮(TN)与碳氮比(C/N)含量变化 TN 含量:在 S1 梯度下, $<0.25 \text{ mm}$ 团聚体的 TN 显著低于其他粒径;在 $0.25 \sim 0.5 \text{ mm}$ 团聚体

中,S2 和 S4 的 TN 显著高于 S1;在 $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ 团聚体中,S4 的 TN 显著高于 S3;在 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 团聚体中,S4 的 TN 显著高于 S1 和 S3(图 1b, $P < 0.05$)。C/N 比值:S1 梯度下, $<0.25 \text{ mm}$ 团聚体的 C/N 显著高于其他粒径;在 $0.25 \sim 0.5 \text{ mm}$ 和 $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ 团聚体中,S3 的 C/N 均显著高于 S2(图 1c, $P < 0.05$)。

2.2.3 土壤团聚体硝态氮(NO_3^- -N)与铵态氮(NH_4^+ -N)含量变化 NO_3^- -N: S1 梯度下, $<0.25 \text{ mm}$ 团聚体的 NO_3^- -N 显著低于其他粒径;S3 与 S4 梯度下,

0.5~1 mm 和 1~2 mm 团聚体的 NO_3^- -N 显著高于 <0.25 mm 团聚体(图 1d, $P<0.05$)。整体上,各粒径团聚体中 S2 梯度的 NO_3^- -N 含量均显著高于其他梯度。 NH_4^+ -N: S2 梯度下, <0.25 mm 和 0.5~1 mm 团聚体的 NH_4^+ -N 显著高于 0.25~0.5 mm 和 1~2 mm 团聚体; S3 梯度下, 1~2 mm 团聚体的 NH_4^+ -N 显著高于 <0.25 mm 团聚体; S4 梯度下, 0.5~1 mm 团聚体的 NH_4^+ -N 显著高于 <0.25 mm 和 1~2 mm 团聚体。各粒径团聚体中, S4 的 NH_4^+ -N 含量均显著低于 S2 和 S3 (图 1e,

$P<0.05$)。

2.2.4 土壤团聚体速效磷(AP)含量变化 S1 梯度下, 1~2 mm 团聚体的 AP 显著高于 <0.25 mm 团聚体; S2 梯度下, <0.25 mm 团聚体的 AP 显著低于其他粒径; S3 梯度下, 0.25~0.5 mm 团聚体的 AP 显著高于 <0.25 mm 和 1~2 mm 团聚体; S4 梯度下, 0.5~1 mm 和 1~2 mm 团聚体的 AP 显著高于 <0.25 mm 和 0.25~0.5 mm 团聚体(图 1f, $P<0.05$)。整体上, 各粒径团聚体中 S2 梯度的 AP 含量均显著高于其他三个梯度。

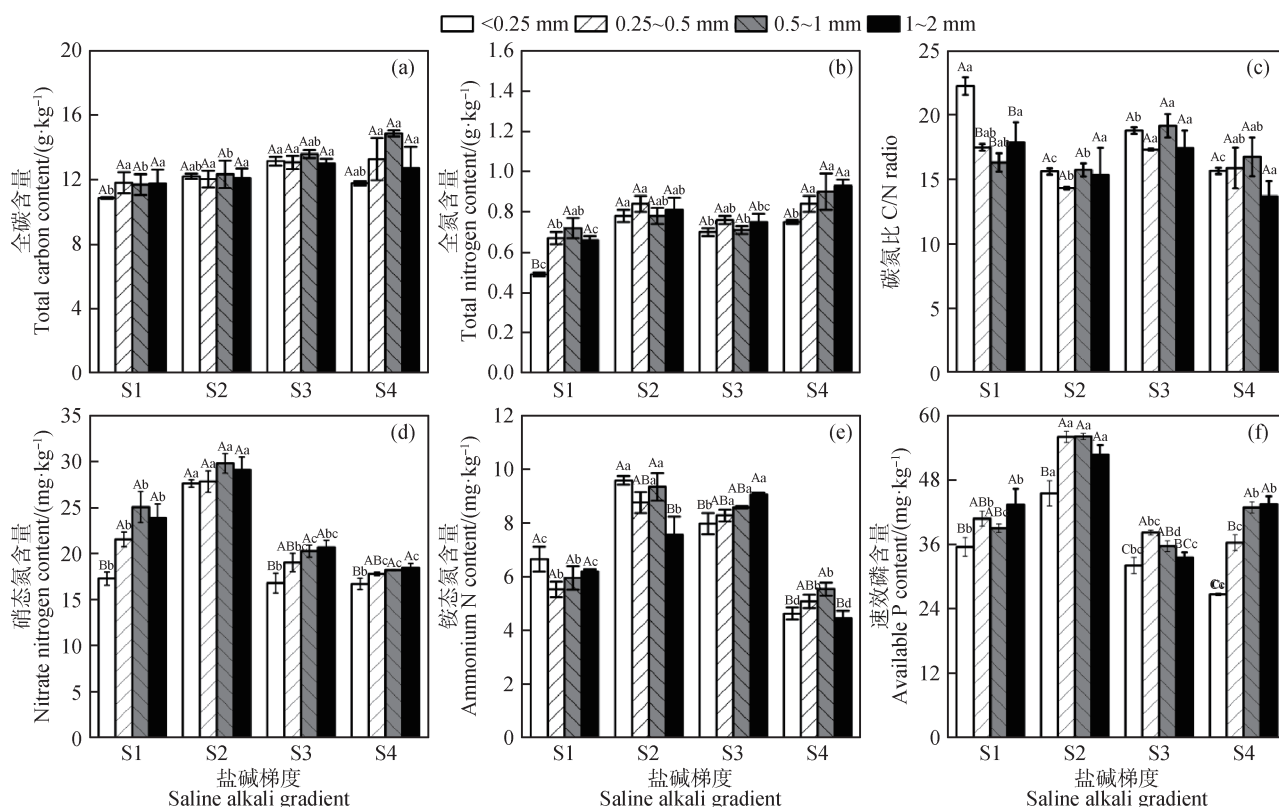


图1 土壤盐碱化对团聚体全碳(a)、全氮(b)、碳氮比(c)、硝态氮(d)、铵态氮(e)和速效磷(f)含量的影响

Fig. 1 Effects of soil salinization on the total carbon (a), total nitrogen (b), carbon/nitrogen ratio (c), nitrate nitrogen (d), ammonia nitrogen (e), and available phosphorus (f) content of aggregates

注: S1 表示轻度盐碱, S2 与 S3 表示中度盐碱, S4 表示重度盐碱; 不同大写字母表示同一盐碱梯度下不同粒径之间差异显著, 不同小写字母表示同一粒径下不同盐碱梯度之间差异显著 ($P<0.05$), 下同

Note: S1 represents mild saline-alkali conditions, S2 and S3 represent moderate saline-alkali conditions, and S4 represents moderately severe saline-alkali conditions. Uppercase letters indicate significant differences between different grain sizes under the same salinity gradient, and lower-case letters indicate differences between different salinity gradient under the same particle size ($P<0.05$), the same as below

2.3 土壤盐碱化对团聚体稳定性和组分含量的影响

土壤团聚体的 MWD 和 GMD 随着盐碱程度的增加呈先增大后减小的趋势, 且 S4 梯度均显著低于 S2 和 S3 梯度(图 2a-b, $P<0.05$)。此外, 不同盐碱梯度下土壤团聚体的粒径分布也发生变化, S1 和 S4 梯度下, 0.25~0.5 mm 团聚体的含量显著低于其它三个

团聚体的含量; S2 和 S3 梯度下, 1~2 mm 团聚体的含量均显著高于其它三个团聚体的含量; <0.25 mm 团聚体的含量在 S2 梯度下显著低于 S1 和 S4; 0.25~0.5 mm 团聚体的含量在 S3 和 S4 梯度显著低于 S1 和 S2 梯度; 0.5~1 mm 团聚体的含量在 S4 梯度下显著低于 S1; 1~2 mm 团聚体的含量在 S1 梯度下显著低于其它三个梯度(图 2c, $P<0.05$)。

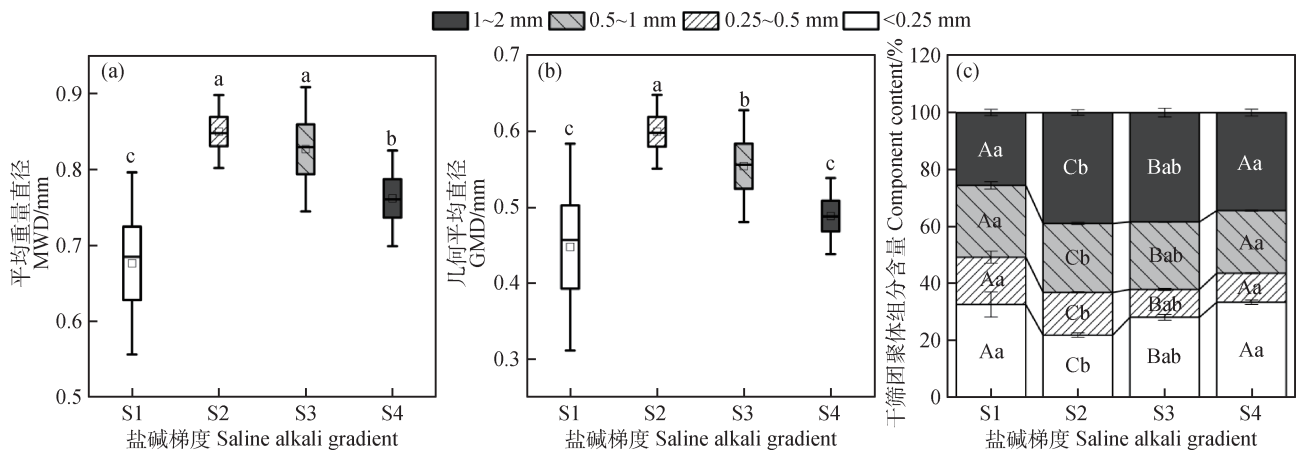


图2 土壤盐碱化对团聚体平均重量直径(a)、几何平均直径(b)和团聚体组分含量(c)的影响

Fig. 2 Effects of soil salinization on the mean weight diameter (a), geometric mean diameter (b), and component content (c) of aggregates

2.4 土壤团聚体理化性质和稳定性与含盐量的关系

随着盐碱程度的递增,不同粒径土壤团聚体的养分含量与土壤含盐量间差异极显著(图3, $P < 0.01$)。各粒径土壤团聚体的TC和TN含量均与土壤含盐量呈极显著负相关(图3a, b, $P < 0.01$);而各粒径团聚体的C/N与含盐量呈极显著正相关(图3c, $P < 0.01$)。土壤团聚体速效养分含量随含盐量的增加呈先增加后降低的趋势。各粒径土壤团聚体

的AP、 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N含量均在S1梯度下与土壤含盐量呈极显著正相关,而在S3和S4梯度下与土壤含盐量呈极显著负相关(图3d, 3e, 3f, $P < 0.01$)。

此外,土壤团聚体稳定性随含盐量的增加呈先增加后降低的趋势。土壤团聚体的GMD和MWD均在S1梯度下与土壤含盐量呈极显著正相关($P < 0.01$);而在S3和S4梯度下与土壤含盐量呈极显著负相关(图4, $P < 0.01$)。

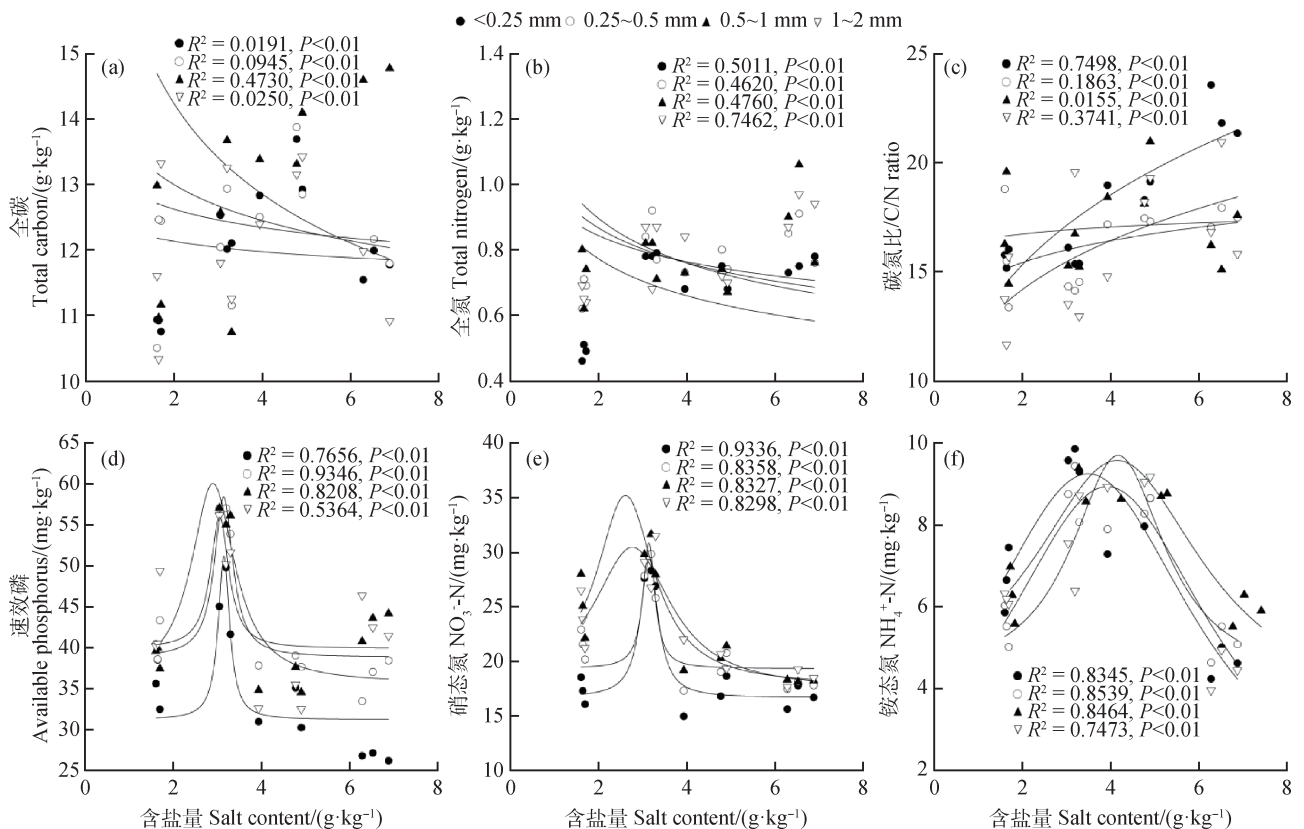


图3 土壤团聚体理化性质与土壤含盐量之间的相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis between soil physicochemical properties and soil salt content

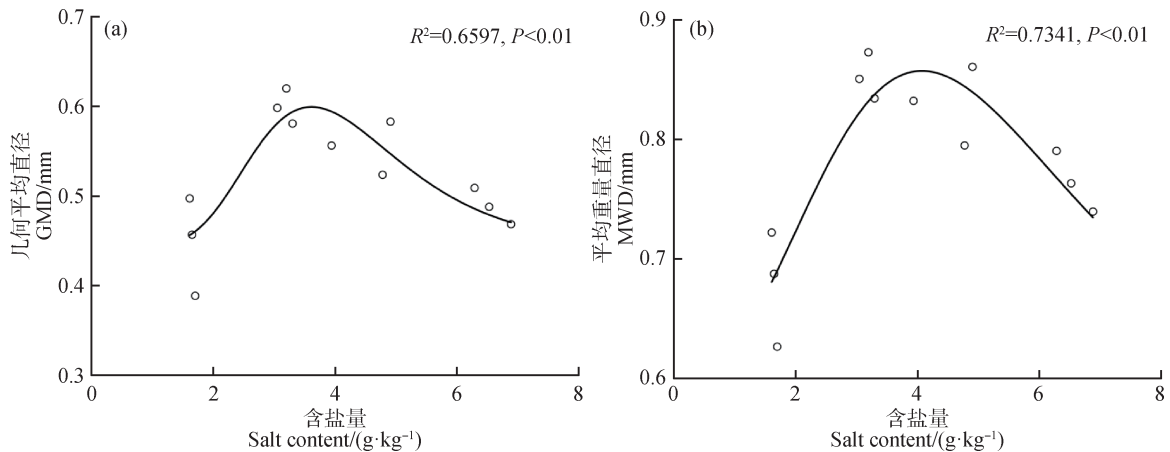


图4 土壤团聚体几何平均直径(a)和平均重量直径(b)与土壤含盐量的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis between geometric mean diameter (a) and mean weight diameter (b) of soil aggregates and soil salt content

3 讨论

土壤盐分含量和pH的影响,滨海地区土壤养分含量通常较低^[25-26],盐碱土壤中高浓度 Na^+ 会占据其阳离子交换位点,排斥 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子的交换作用,导致土壤团聚体结构破坏^[8]。本研究结果表明,土壤团聚体的TC、TN、C/N、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、AP含量均随土壤盐碱程度的递增而发生变化,且不同粒径间理化性质的变化也存在差异。总体而言,不同盐碱梯度对土壤团聚体全氮、速效氮和速效磷含量的影响具有显著差异。S1梯度下, $<0.25\text{ mm}$ 的土壤团聚体TN和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量显著低于大团聚体,但其C/N较高,可能是因为盐分抑制了微生物驱动的有机质矿化过程,而S3和S4梯度下C/N显著降低,表明土壤中有机碳含量相对较高,而氮的含量相对较低,这可能是因为盐碱抑制植物残体和土壤碳的分解速率,导致小团聚体C/N增高^[27]。在S3和S4梯度下, $0.5\sim 1\text{ mm}$ 和 $1\sim 2\text{ mm}$ 粒径的土壤团聚体中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量显著高于 $<0.25\text{ mm}$ 的团聚体,表明大团聚体是 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的主要载体^[28]。这可能是由于在盐碱环境中大粒径的土壤团聚体会通过物理截留减少土壤养分的流失^[29],且大团聚体的多孔性可以减缓盐分对硝态氮的淋失^[30],对氮素具有显著的物理保护作用^[31]。S2梯度下,土壤团聚体的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量显著高于其他盐碱梯度, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著高于轻度与重度盐碱梯度,这是因为适度的盐分胁迫能够促进 Ca^{2+} 与 Na^+ 之间的离子交换,增强土壤胶体的絮凝作用,进而有助于形成结构稳定的团聚体;此类团聚体对有机质具有保护效应,并可促进养分的积累与保持^[32-33];

而小团聚体($<0.25\text{ mm}$)的AP含量显著低于其他粒径的团聚体,这一方面可能与小团聚体的物理保护作用较弱有关,另一方面可能是在中度盐碱环境中,部分微生物通过自身的适应策略对一定程度的盐碱度具有耐受性,其活性相对较高,从而加速了磷的矿化和流失^[31]。S4梯度下, $0.5\sim 1\text{ mm}$ 团聚体的AP含量最高,这可能是由于高盐碱梯度通过改变土壤团聚体的pH值和盐分含量,影响磷素的吸附过程,从而提高大团聚体中磷的含量^[34]。此外,相关分析结果表明,土壤团聚体TC、TN与含盐量呈极显著负相关($P<0.01$),土壤团聚体AP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在高盐碱梯度下与土壤含盐量呈极显著负相关($P<0.01$),说明土壤含盐量的变化会显著影响土壤养分的变化,尤其是土壤速效养分的变化^[35]。

土壤团聚体的大小、数量、比例和微观形态被认为能够有效反映土壤结构的稳定性^[36]。本研究结果发现,中度盐碱梯度下,土壤大团聚体($1\sim 2\text{ mm}$)的含量显著高于其它三个团聚体的含量,而 $0.25\sim 0.5\text{ mm}$ 团聚体的含量在重度盐碱梯度下显著低于轻度盐碱梯度。研究表明,重度盐渍土中 $0.25\sim 2\text{ mm}$ 和 $0.053\sim 0.25\text{ mm}$ 团聚体所占比例显著低于轻度和中度盐渍土^[37],这与本研究结果一致。相关研究表明,盐碱土壤中大团聚体比例较低且随盐分积累显著降低^[38-39]。本研究中大团聚体($1\sim 2\text{ mm}$)的含量随盐碱程度的增加而增加,与前人研究结果不一致。这是因为中度的盐碱环境能够促进部分耐盐微生物的活性,这些微生物分泌的胞外多糖和有机酸有助于大团聚体的形成;另一方面,低浓度盐分可能通过促进 Ca^{2+} 与 Na^+ 的离子交

换增强团聚效应,而当盐分超过一定阈值后, Na^+ 主导的分散作用占据优势,反而导致团聚体结构崩解^[40]。土壤团聚体的几何平均直径(GMD)和平均重量直径(MWD)随盐碱化程度的加剧呈先上升后下降的趋势,且在重度盐碱梯度下均显著低于中度盐碱梯度。相关分析进一步表明,两者在高盐碱梯度下均与土壤含盐量呈极显著负相关($P<0.01$),与前人研究结果一致^[41-42]。造成这一现象的原因可能包括:一方面,盐碱地中积累的 Na^+ 因其较强的分散性,削弱了土壤颗粒间的粘结力,导致大团聚体破碎为较小团聚体^[43],大团聚体比例下降,从而降低团聚体稳定性^[44];另一方面,盐碱环境可能减弱有机质的胶结能力,间接影响团聚体的稳定性^[45]。然而,在中度盐碱梯度下团聚体稳定性显著提高,该结果与前人研究存在差异,其原因可能在于该条件下大团聚体含量显著高于其他粒径团聚体,而大团聚体的形成对维持土壤结构稳定性具有积极作用^[39]。

4 结论

本研究探讨了黄河三角洲地区土壤盐碱化对团聚体理化性质及稳定性的影响。结果表明,盐碱化程度显著影响团聚体的理化性质与稳定性,且不同粒径团聚体响应各异。速效养分对盐碱化响应尤为敏感,小团聚体中碳氮比、铵态氮和速效磷在重度盐碱下显著降低;大团聚体中硝态氮和铵态氮也呈相同趋势。团聚体稳定性指标(GMD和MWD)在重度盐碱下显著低于中度盐碱,且两者在高盐碱条件下均与含盐量极显著负相关,说明盐碱化对团聚体稳定性和养分保持具有明显的抑制作用。本研究表明盐碱化通过多重途径影响团聚体特性,其机制较为复杂,未来需结合团聚体内微生物分布与动态变化,深入解析相关过程,以期为滨海盐碱土的健康管理和土壤质量提升提供科学依据。

参考文献

- [1] FAO. Global map of salt-affected soils [M]. 1st edition, Rome: FAO, 2021:11
- [2] 王俊栋,孙志刚,杨婷,等. CYGNSS土壤盐分反演方法研究:以黄河三角洲为例[J]. 遥感学报, 2023, 27(2):351-362
WANG J D, SUN Z G, YANG T, et al. Research on CYGNSS soil salinity inversion method: a case study of the Yellow River Delta [J]. Journal of Remote Sensing, 2023, 27(2):351-362
- [3] 王洁. 碳基改良剂对黄河三角洲耕地盐渍障碍的缓解作用 [D]. 烟台:中国科学院大学(中国科学院烟台海岸带研究所), 2020:2
WANG J. Mitigation effects of carbon-based amendments on salinity barriers of cropland in the Yellow River Delta [D]. University of Chinese Academy of Sciences (Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences), 2020
- [4] 孙若钧. 林草复合系统对黄河三角洲滨海盐渍土改良效应研究 [D]. 泰安:山东农业大学, 2020:1
SUN R J. Research on the effect of forest-grass composite system on the improvement of coastal saline soil in the Yellow River Delta [D]. Shandong Agricultural University, 2020:1
- [5] 李传福,朱桃川,明玉飞,等. 有机肥与脱硫石膏对黄河三角洲盐碱地土壤团聚体及其有机碳组分的影响[J]. 生态环境学报, 2023, 32(5):878-888
LI C F, ZHU T C, MING Y F, et al. Effects of organic fertilizer and desulfurization gypsum on soil aggregates and their organic carbon fractions in saline and alkaline soils of the Yellow River Delta [J]. Journal of Ecology and Environment, 2023, 32(5):878-888
- [6] 徐成龙,董奕岑,卢家磊,等. 我国滨海盐碱地土壤改良及资源化利用研究进展[J]. 世界林业研究, 2020, 33(6):68-73
XU C L, DONG Y C, LU J L, et al. Research progress on soil improvement and resource utilization of coastal saline soils in China [J]. World Forestry Research, 2020, 33(6): 68-73
- [7] BAI Y C, XUE W J, YAN Y Y, et al. The challenge of improving coastal mudflat soil: Formation and stability of organo-mineral complexes [J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(4):1074-1080
- [8] DAI H C, CHEN Y Q, LIU K C, et al. Water-stable aggregates and carbon accumulation in barren sandy soil depend on organic amendment method: A three-year field study [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 212:393-400
- [9] HAYNES R J, BEARE M H. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1997, 29(11-12):1647-1653
- [10] 刘西刚,王勇辉,焦黎. 夏尔希里自然保护区草地表层土壤理化性质与海拔高度的关系[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(6):773-780
LIU X G, WANG Y H, JIAO L. Relationship between physicochemical properties of grassland surface soil and altitude in Xiaerxili Nature Reserve [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(6): 773-780
- [11] 马国飞,满苏尔·沙比提,靳万贵. 天山南坡台兰河上游草地土壤理化性质与海拔的关系研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(3): 597-603
MA G F, MANSUR·SABIT, JIN W G, et al. Study on the relationship between soil physicochemical properties and altitude in grassland upstream of the Tai Lan River on the southern slope of Tianshan Mountain [J]. Soil Bulletin, 2017, 48(3):

- 597-603
- [12] 李林芝,马源,张小燕,等. 不同退化程度高寒草甸土壤团聚体及其有机碳分布特征[J]. 草地学报,2023,31(1):210-219
LI L Z, MA Y, ZHANG X Y, et al. Characteristics of soil aggregates and organic carbon distribution in alpine meadows with different degradation levels [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(01): 210-219
- [13] 朱思洁,张波,付芳伟,等. 藏东南林线过渡带不同植被类型对土壤团聚体稳定性的影响[J]. 草地学报,2025,33(1): 98-106
ZHU S J, ZHANG B, FU F W, et al. Effects of different vegetation types on soil aggregate stability in the timberline ecotone of southeastern Tibet[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(1): 98-106
- [14] TISDALL J M, OADES J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. Journal of Soil Science, 1982, 33(2): 141-163
- [15] 王秀颖,高晓飞,刘和平,等. 土壤水稳性大团聚体测定方法综述[J]. 中国水土保持科学,2011,9(03):106-113
WANG X Y, GAO X F, LIU H P, et al. Review of methods for determining soil water stability of macroaggregates [J]. China Soil and Water Conservation Science, 2011, 9(03): 106-113
- [16] ZHANG B Y, ZHANG Z H, BAI X L, et al. Long-term rice cultivation enhances root development and yields by improving the structural properties of soil aggregates in saline-alkaline environments [J]. Environmental Technology & Innovation, 2024, 36:103848
- [17] NIMMO J R, DEASON J A, IZBICKI J A, et al. Evaluation of unsaturated zone water fluxes in heterogeneous alluvium at a Mojave Basin site [J]. Water Resources Research, 2002, 38(10):1215
- [18] 赵哲萱,冉成,孟祥宇,等. 秸秆还田对苏打盐碱稻区土壤团聚体分布及有机碳含量的影响[J]. 吉林农业大学学报,2023, 45(5):582-591
ZHAO Z X, RAN C, MENG X Y, et al. Effects of straw return on soil aggregate distribution and organic carbon content in soda saline rice area [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2023, 45(5):582-591
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京:中国农业出版社, 2000:25-173
BAO S D. Soil agrochemical analysis [M]. 3rd edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 25-173
- [20] 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, 2000:30-40
LU R K. Methods of soil agrochemical analysis [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000:30-40
- [21] 刘凡,刘大为,马宗虎,等. 元素分析仪和全自动凯氏定氮仪法测定有机肥总氮含量对比研究[J]. 中国沼气,2022,40(1): 51-55
LIU F, LIU D W, MA Z H, et al. Comparative study on the determination of total nitrogen content in organic fertilizers by elemental analyzer and fully automatic Kjeldahl nitrogen determination [J]. China Biogas, 2022, 40(1): 51-55
- [22] YANG C, LIU N, ZHANG Y J. Soil aggregates regulate the impact of soil bacterial and fungal communities on soil respiration [J]. Geoderma, 2019, 337:444-452
- [23] 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. Impacts of rice paddy fallow on soil aggregate composition and stability in the Yellow River Delta [J]. Journal of Applied Ecology, 2024, 35(3):705-712
- [24] 杨金翰,田小明,胡晨阳,等. 氮肥配施调理剂对土壤团聚体和有机碳及苜蓿产量的影响[J]. 草地学报,2025,33(1): 147-156
YANG J H, TIAN X M, HU C Y, et al. Effects of nitrogen fertilizer combined with conditioners on soil aggregates, organic carbon and naked oat yield [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(1): 147-156
- [25] 贺志雄,赵秀芳,李娅莉,等. 我国滨海盐碱地生态绿化的重要性[J]. 环境卫生工程,2014,22(5):1-4
HE Z X, ZHAO X F, LI Y L, et al. Importance of ecological greening of coastal saline land in China [J]. Environmental Health Engineering, 2014, 22(5):1-4
- [26] 朱建峰,崔振荣,吴春红,等. 我国盐碱地绿化研究进展与展望[J]. 世界林业研究,2018,31(4):70-75
ZHU J F, CUI Z R, WU C H, et al. Progress and prospect of research on greening saline and alkaline land in China [J]. World Forestry Research, 2018, 31(4):70-75
- [27] YANG C, SUN J. Soil salinity drives the distribution patterns and ecological functions of fungi in saline-alkali land in the Yellow River Delta, China [J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11:594284
- [28] 孙天聪,李世清,邵明安. 长期施肥对褐土有机碳和氮素在团聚体中分布的影响[J]. 中国农业科学,2005(9):1841-1848
SUN T C, LI S Q, SHAO M A. Effects of long-term fertilization on the distribution of organic carbon and nitrogen in aggregates of brown soil [J]. Chinese Agricultural Science, 2005(9): 1841-1848
- [29] 张瑞,王鸿飞,吴怡慧,等. 化肥与有机肥配施对设施土壤团聚体稳定性及其有机碳、全氮含量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2023(2):1-9
ZHANG R, WANG H F, WU Y H, et al. Effects of chemical fertilizers and organic fertilizers on the stability of soil aggregates and their organic carbon and total nitrogen contents [J]. China Soil and Fertilizer, 2023(2):1-9
- [30] 金梦野,黄娟,侯嫔,等. 三种环境材料及其复合施用对盐碱化土壤的改良效果研究[J]. 农业环境科学学报,2020,39(1): 118-124
JIN M Y, HUANG J, HOU P, et al. Study on the amelioration effect of three environmental materials and their composite application on salinized soil [J]. Journal of Agricultural Environ-

- mental Science, 2020, 39(1): 118-124
- [31] YANG W, SONG X S, HE Y B, et al. Distribution of soil organic carbon density fractions in aggregates as influenced by salts and microbial community[J]. Land, 2023, 12(11): 2024
- [32] 吕珂彦, 陈志君, 李越, 等. 褐煤有机肥与脱硫石膏联合施用对盐碱土改良和向日葵产量的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(11): 77-86
- LV K Y, CHEN Z J, LI Y, et al. Effects of combined application of lignite organic fertilizer and desulfurization gypsum on saline soil improvement and sunflower yield [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2023, 39(11): 77-86
- [33] 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. Progress in the study of soil aggregates and their organic carbon under salinization [J]. Journal of Applied Ecology, 2021, 32(1): 369-376
- [34] 杨易, 黄立华, 肖扬, 等. 苏打盐碱化稻田土壤氮素矿化和硝化特征及其影响因子[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(10): 1816-1827
- YANG Y, HUANG L H, XIAO Y, et al. Characteristics of nitrogen mineralization and nitrification in soda-saline paddy soils and their influencing factors[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2022, 28(10): 1816-1827
- [35] MAHAJAN G R, DAS B, MORJKAR S, et al. Comparison of soil quality indexing methods for salt-affected soils of Indian coastal region [J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(21): 1-19
- [36] WANG X, CAMMERAAT E L H, CERLI C, et al. Soil aggregation and the stabilization of organic carbon as affected by erosion and deposition [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 72: 55-65
- [37] 王会, 何伟, 段福建, 等. 秸秆还田对盐渍土团聚体稳定性及碳氮含量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 124-131
- WANG H, HE W, DUAN F, et al. Effects of straw return on the stability of saline soil aggregates and carbon and nitrogen content [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2019, 35(4): 124-131
- [38] LI S C, ZHOU H H, CHEN C L, et al. Rhamnolipids amendment improves soil properties and enhances microecological functions in the saline-alkali soil [J]. Environmental Engineering Research, 2023, 28(4): 220234
- [39] 董心亮, 王金涛, 田柳, 等. 盐渍化土壤团聚体和微生物与有机质关系研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(3): 364-372
- DONG X L, WANG J T, TIAN L, et al. Progress of research on the relationship between aggregates and microorganisms and organic matter in salinized soils [J]. Chinese Journal of Ecological Agriculture (in English), 2023, 31(3): 364-372
- [40] 白小龙, 王彬, 刘云鹏, 等. 改良物料配施提升河套灌区盐碱土团聚体稳定性、有机碳含量及玉米产量[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(11): 2082-2092
- BAI X L, WANG B, LIU Y P, et al. Improvement of soil aggregate stability, organic carbon content and corn yield in saline-alkaline soils of Hetao Irrigation Area [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2024, 30(11): 2082-2092
- [41] MA L, WANG Q, SHEN S T. Response of soil aggregate stability and distribution of organic carbon to alpine grassland degradation in Northwest Sichuan [J]. Geoderma Regional, 2020, 22: e00309
- [42] LI W L, LI J S, WU Y J, et al. Soil organic matter and bulk density: driving factors in the vegetation-mediated restoration of coastal saline lands in north China [J]. Agronomy, 2024, 14(9): 2007
- [43] 陈红星, 李法虎, 郝仕玲, 等. 土壤含水率与土壤碱度对土壤抗剪强度的影响[J]. 农业工程学报, 2007(2): 21-25
- CHEN H X, LI F H, HAO S L, et al. Effects of soil water content and soil alkalinity on soil shear strength [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2007(2): 21-25
- [44] 胡尧, 李懿, 侯雨乐. 不同土地利用方式对岷江流域土壤团聚体稳定性及有机碳的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 22-29
- HU Y, LI Y, HOU Y L. Effects of different land utilization on soil aggregate stability and organic carbon in Minjiang River Basin [J]. Research on Soil and Water Conservation, 2018, 25(4): 22-29
- [45] DAI W, FENG G, HUANG Y B, et al. Influence of cover crops on soil aggregate stability, size distribution and related factors in a no-till field [J]. Soil and Tillage Research, 2024, 244: 106197

(责任编辑 彭露茜)