

DOI: 10.11766/trxb202008310491

李珊, 杨越超, 姚媛媛, 刘燕, 张淑刚, 张衍鹏. 不同土地利用方式对山东滨海盐碱土理化性质的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 1012–1024.

LI Shan, YANG Yuechao, YAO Yuanyuan, LIU Yan, ZHANG Shugang, ZHANG Yanpeng. Effects of Different Land-use Types on Physical and Chemical Properties of Coastal Saline-alkali Soils in Shandong Province[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(4): 1012–1024.

不同土地利用方式对山东滨海盐碱土理化性质的影响*

李珊, 杨越超[†], 姚媛媛, 刘燕, 张淑刚, 张衍鹏

(山东农业大学资源与环境学院, 土肥资源高效利用国家工程研究中心, 山东泰安 271018)

摘要: 山东滨海盐碱土壤盐分高、养分低、结构差等问题严重影响了该地区的农业发展, 因此有效开发和利用该地区土地对其农业增产增收至关重要。以东营市垦利区四种土地利用方式(荒地、草地、耕地、林地)为研究对象, 探讨不同土地利用方式对滨海盐碱土基本理化性质、团聚体稳定性的影响。结果表明: (1) 土壤的电导率(EC)和水溶性 K^+ 、 Na^+ 含量均表现为荒地>耕地>草地>林地, 且荒地的 EC 和 Na^+ 含量显著高于其他样地; (2) 土壤的全氮(N)和总有机碳含量(SOC)表现为林地>草地>耕地>荒地, 各土壤 0.25~2 mm 粒级的水稳性团聚体的 SOC 最高; (3) 林地的机械稳定性平均质量直径(MWD)和 > 0.25 mm 的机械稳定性团聚体含量($R_{0.25}$)显著低于其他样地; (4) 荒地的水稳性平均质量直径(WMWD)和 > 0.25 mm 的水稳性团聚体含量($WR_{0.25}$)显著低于其他样地; (5) 团聚体破坏率(PAD)依次表现为荒地>耕地>草地>林地。扫描电镜(SEM)结果显示草地、耕地和林地中>2 mm 水稳性团聚体的表面和内部有较明显的颗粒、孔隙及黏结物质。Pearson 相关分析表明, 机械组成与 MWD、 $R_{0.25}$ 存在显著相关性; PAD 与水溶性 Na^+ 含量、0.25~2 mm 组分水稳性团聚体 SOC 存在极显著相关性。不同土地利用方式对土壤的物理、化学和力学性质有不同的影响。草地和林地土地利用方式对滨海盐碱土壤理化性质的改良效果均显著, 林地具有更高的碳储量及团聚体水稳性, 但机械稳定性较低。研究结果可为滨海盐碱地区土地利用的合理规划与可持续发展提供参考。

关键词: 滨海盐碱土; 土地利用类型; 有机质; 团聚体稳定性

中图分类号: S153 文献标志码: A

Effects of Different Land-use Types on Physical and Chemical Properties of Coastal Saline-alkali Soils in Shandong Province

LI Shan, YANG Yuechao[†], YAO Yuanyuan, LIU Yan, ZHANG Shugang, ZHANG Yanpeng

(College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, National Engineering Research Center for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Taian, Shandong 271018, China)

Abstract: 【Objective】The problems of high salinity, low nutrient and poor soil structure in the coastal saline-alkali area of

* 山东省科技创新重大专项(2019JZZY010716), 泰山领军人才工程项目(LJNY202017)和山东省重点研发计划(2017CXGC0306)资助 Supported by the Major Science and Technology Innovation Project of Shandong Province (No. 2019JZZY010716), the Taishan Leading Talents Project (No. LJNY202017) and the Key Research and Development Program of Shandong Province (No. 2017CXGC0306)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: yangyuechao2010@163.com

作者简介: 李珊(1997—), 女, 山东淄博人, 硕士研究生, 主要从事盐碱土团聚体形成及改良研究。E-mail: 15054591900@163.com

收稿日期: 2020-08-31; 收到修改稿日期: 2021-01-13; 网络首发日期(www.cnki.net): 2021-07-06

Shandong province seriously affect the development of agricultural production. Therefore, the effective development and utilization of the soils in this region are of great importance to its agricultural production and income. 【Method】 In this study, the four land-use types (wasteland, grassland, cultivated land and forest land) in Kenli County of Dongying City were taken as the research objects, and the effects of different land-use types on the basic physical and chemical properties and aggregate stability of coastal saline-alkali soils were evaluated. 【Result】 The results showed that (i) the electrical conductivity (EC) and water-soluble K^+ and Na^+ contents in wasteland > cultivated land > grassland > forest land, with EC and Na^+ content of wasteland being significantly higher than those from other sampling plots; (ii) the total nitrogen (N) and total organic carbon content (SOC) of the soils in forest land > grassland > cultivated land > wasteland, with SOC in the 0.25–2 mm water-stable aggregates being the highest; (iii) the mechanical stability mean weight diameter (MWD) and the mechanical stability aggregate content of > 0.25 mm particle diameter ($R_{0.25}$) were significantly lower in forest land than those of other sampling plots; (iv) the water stability mean weight diameter (WMWD) and the water stability aggregate content of > 0.25 mm particle size ($WR_{0.25}$) in wasteland were significantly lower than those in other sampling plots; and (v) the percentage of aggregate destruction (PAD) in wasteland > cultivated land > grassland > forest land. Additionally, results of the surface and internal scanning electron microscopy (SEM) of the 2 mm water-stable aggregates in grassland, cultivated land and forest land showed relatively obvious particles, pores, and adhesive materials. Furthermore, the Pearson correlation analysis showed that mechanical composition was significantly correlated with MWD and $R_{0.25}$ while PAD was significantly correlated with soil water soluble Na^+ content and SOC of 0.25–2 mm water-stable aggregate soil. 【Conclusion】 Different land-use types have different effects on soil physical, chemical, and mechanical properties. The grassland and forest land use types have significant ameliorating effects on the physical and chemical properties of coastal saline soil while forest land use has higher carbon reserves and aggregate water stability, but lower mechanical stability. The results of this study can provide references for the rational planning and sustainable development of land use in the coastal saline-alkali area.

Key words: Coastal saline-alkali soil; Land-use type; Organic matter; Aggregate stability

山东省盐碱地分布比较广泛,总面积高达 5 927 km²,根据所处地域分布可划分为黄淮海平原盐碱土和滨海盐碱土^[1]。河流沉积物经海水浸渍作用形成滨海盐碱土,山东的滨海盐碱土主要分布在黄河三角洲地区,面积已达 265 万 hm²,且以 $1.3 \times 10^3 \sim 2.0 \times 10^3 \text{ hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 速度递增^[2-3]。该类土壤含盐高、养分低、土壤结构差^[4],高浓度盐抑制作物正常生长,严重制约了黄河三角洲地区的农业生产^[5]。黄河三角洲作为东部沿海后备土地资源最多的地区,其发展高效生态经济自“十五”规划以来一直被列入国家计划和规划纲要,并成为“渤海粮仓”农业科技示范工程的重要部分^[6]。而且在《山东省“十三五”科技创新规划》中,针对土壤盐碱化问题,“盐碱地绿色开发”被列为重大科技创新工程。因此,合理地开发利用滨海盐碱地对缓解黄河三角洲地区农用地短缺等问题、促进其农业经济发展具有重要意义^[7]。

通过植被恢复的方式改良盐碱土壤,可改善土壤质量并提高土壤肥力的自我维持能力^[8]。不同的土地利用方式可以通过不同的植被类型、人为干预

来影响土壤地表凋落物含量、微生物丰度等土壤环境,是影响盐碱地等生态退化地区生态恢复和土壤质量的关键因素^[9-10]。Bhardwaj 等^[11]研究发现在贫瘠的盐碱土地上支持植物覆盖,可通过添加根和凋落物生物量来增强碳 C 的积累(土壤有机碳总储量可增加 4%~70%)并加快缓解含盐量;许明祥等^[12]研究发现土地利用类型变化是土壤氮素和有机质变异的主要来源,并对土壤水稳性团聚体、渗透性等土壤动态质量指标的变异性起主导作用。因此,研究盐碱区不同土地利用方式下的土壤理化性质,有助于了解该区土地利用方式变化对土壤质量及生产力的影响,从而为实现其土地利用的合理规划和可持续发展提供依据^[13]。现阶段,山东滨海盐碱地区不同土地利用方式对土壤性质的研究主要集中在水盐、养分特性及碳库研究^[14-16]。刘兴华等^[17]研究了黄河三角洲滩涂、湿地和旱地土壤团聚体有机质组分的变化规律,发现植被生长可以增加湿地土壤中的活性碳库,而耕作可使旱地碳库更趋稳定;He 等^[18]研究发现黄河三角洲地区土地利用从天然湿

地转变为耕地后改变了土壤特性,尤其是土壤养分相关特性和土壤盐分,并进一步改变了土壤细菌群落结构及丰度。但是,目前针对山东滨海盐碱土在不同土地利用方式下的团聚体稳定性、微形态以及理化性质间的相互关系研究较少,而且缺少具体的土地利用方式规划建议。

基于此,本研究选取东营市垦利区荒地、草地、耕地和林地四种土地利用方式的样地为研究对象,通过对不同地块土壤基本理化性质与团聚体的比较及相关性分析,来研究不同土地利用方式对滨海盐碱土理化性质的影响,以期为滨海盐碱地区土地利用方式的合理规划与可持续发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

山东省东营市垦利区(37°24′~38°10′N, 118°15′~119°19′E)位于黄河下游入海口附近,属暖温带季风大陆性气候,冬季干冷,夏季湿热,四季分明。年平均气温 12.1℃,年降水量 556 mm,70%的降水集中在夏季 7—8 月。该地区土壤主要为盐化潮土,成土母质以海相沉积物和黄河冲积母质为主。由于海水浸渍及次生盐渍化的影响,研究区土壤肥力低、排水不畅,严重制约了农业经济的高效发展。

1.2 样品采集

2018 年 11 月在研究区对天然草地(37°35′37.14″N, 118°36′5.22″E, 图 1)、耕地(37°35′37.15″N, 118°39′28.28″E, 图 1)、人工林地(37°36′47.00″N, 118°37′30.68″E, 图 1)、无植被覆盖的荒地(37°35′37.14″N, 118°36′5.23″E, 图 1)四种土地利用方式的耕层(0~20 cm)土壤进行取样。其中,天然草地生长的植被为马绊草(*Aeluropus litoralis*),耕地生长的植被为玉米(*Zea mays*)且植株矮小,人工林地生长的植被为旱柳(*Salix matsudana*)。每个样地设置九个 3 m×3 m 的样方,利用土钻进行梅花型五点取样。每三个样方混匀并作为一组重复,共三组重复。样品带回实验室后风干,并去除植物根系和碎石,一部分过筛用于基本理化性质的分析,另一部分用于团聚体稳定性的测定。

1.3 测定方法

土壤基本理化性质测定方法^[19]:土壤质地采用过筛和吸管法测定;土壤可溶性盐含量采用烘干残渣重量法测定;土壤容重采用环刀法测定;土壤 pH 和 EC 分别按照 2.5:1 和 5:1 的水土比测定;水溶性 K⁺、Na⁺含量采用火焰光度计法测定;土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定;土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化—外加热法测定;风干后的土壤依次经过 2 mm 和 0.25 mm 的网筛来计算土壤机械稳定性。土壤水稳定性根据 Cambardella 和 Elliott^[20-21]的湿筛

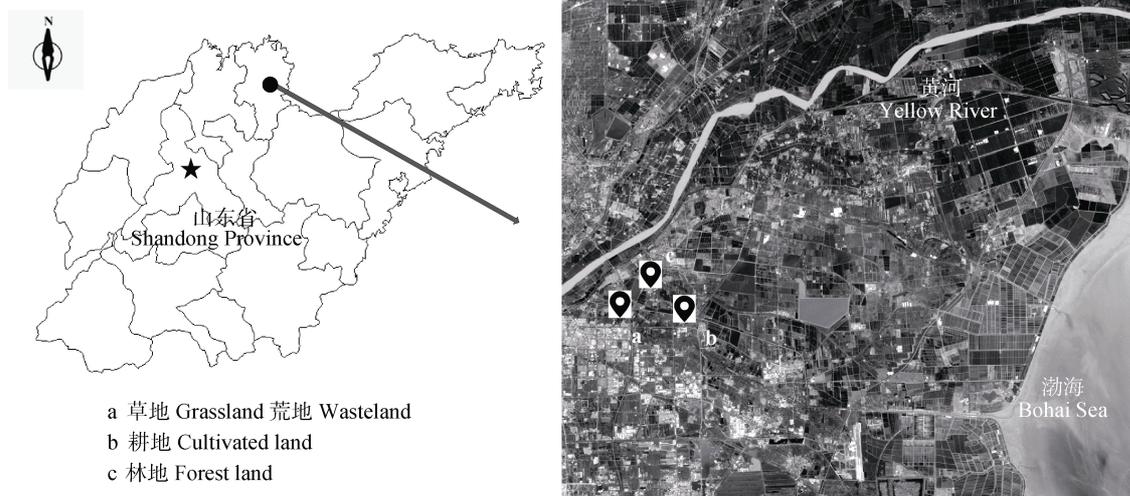


图 1 研究区及取样点

Fig. 1 Research area and sampling points

法：土壤平铺在 2 mm 筛面上，在水中浸泡 5 min 后，以 25 次·min⁻¹ 的振动频率在水中振动，振幅为 3 cm，依次经过 2 mm、0.25 mm 和 0.053 mm 网筛。对得到的 > 2 mm 水稳性团聚体进行表面和断面（用手轻轻掰开）的扫描电镜（SEM）以及 X 射线能谱（EDS）表征分析。

粒径 > 0.25 mm 的机械稳定性、水稳定性团聚体含量（ $R_{0.25}$ 、 $WR_{0.25}$ ），团聚体破坏率（PAD），机械稳定性、水稳定性平均质量直径（MWD、WMWD）的计算公式为：

$$WR_{0.25} = \sum_{i=1}^n W_i \quad (1)$$

$$PAD = (R_{0.25} - WR_{0.25}) / R_{0.25} \times 100\% \quad (2)$$

$$WMWD = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{R}_i W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (3)$$

式中， W_i 为第 i 粒级团聚体质量所占的百分含量（%）； $R_{0.25}$ 为粒径 > 0.25 mm 的机械稳定性团聚体含量； $WR_{0.25}$ 为粒径 > 0.25 mm 的水稳性团聚体含量； \bar{R}_i 为某级团聚体的平均直径（mm）。

1.4 数据分析

使用 SAS V8 统计软件进行数据的差异显著性检验（LSD 法），使用 SPSS 25.0 软件皮尔逊（Pearson）法进行相关性分析，使用 Microsoft Excel 2016 Excel 软件进行作图。

2 结 果

2.1 不同土地利用方式对山东滨海盐碱土壤质地和容重的影响

林地的机械组成与荒地、草地和耕地差异显著（ $P < 0.05$ ）（表 1），质地为壤质砂土。其中，林地的黏粒、粉粒和砂粒含量分别为其他样地的 32%~62%、20%~33% 和 154%~266%。荒地、草地和耕地的机械组成无显著差异（ $P > 0.05$ ），与耕地存在显著差异（ $P < 0.05$ ），但三者质地均为粉（砂）壤土。草地的容重最低，显著低于荒地和耕地（ $P < 0.05$ ），较荒地降低了 10.39%。

2.2 不同土地利用方式对山东滨海盐碱土壤 pH、EC 和水溶性钾钠的影响

四种土地利用方式土壤的 pH 差异显著（ $P < 0.05$ ），具体表现为：草地 > 林地 > 耕地 > 荒地（表 2）。荒地的 EC 为 3.87 mS·cm⁻¹，显著高于其他样地（ $P < 0.05$ ），分别是耕地、草地、林地的 5.16 倍、15.78 倍和 28.99 倍，且耕地显著高于草地和林地（ $P < 0.05$ ）。荒地的水溶性 K⁺ 含量最高，分别为草地和林地的 1.27 倍和 1.81 倍，且林地最低；水溶性 Na⁺ 含量的表现与水溶性 K⁺ 含量及 EC 结果一致，均为：荒地 > 耕地 > 草地 > 林地。其中，荒地的水溶性 Na⁺ 含量为 922.63 mg·kg⁻¹，分别是草地、耕地和林地的 4.55 倍、2.55 倍和 11.37 倍。以上结果表明，林地、草地和耕地土壤的盐度相较于荒地均显著降低，具体表现为：荒地 > 耕地 > 草地 > 林地。

表 1 四种土地利用方式土壤的机械组成、质地和容重

Table 1 The mechanical composition, texture and bulk density of soils in four land-use types

土地利用方式 Land-use types	黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand	质地 Texture	容重 Bulk density / (g·cm ⁻³)
	(< 0.002 mm)	(0.05~0.002mm)	(> 0.05 mm)		
-----/%-----					
荒地 Wasteland	3.65 ± 0.68 b	59.36 ± 4.36 a	36.99 ± 5.03 c	粉（砂）壤土	1.54 ± 0.02 a
草地 Grassland	4.19 ± 0.06 b	63.82 ± 0.54 a	31.98 ± 0.51 c	粉（砂）壤土	1.38 ± 0.08 b
耕地 Cultivated land	7.00 ± 0.48 a	37.84 ± 3.89 b	55.16 ± 4.13 b	粉（砂）壤土	1.53 ± 0.00 a
林地 Forest land	2.26 ± 0.03 c	12.54 ± 1.08 c	85.20 ± 1.04 a	壤质砂土	1.49 ± 0.05 ab

注：同列不同小写字母表示不同土地利用方式间差异显著（ $P < 0.05$ ）。下同。Note: Different lowercase letters in the same column indicate a significant difference between different land-use types at $P < 0.05$. The same as below.

表 2 四种土地利用方式土壤的 pH、EC 和水溶性钾钠、全氮、总有机碳含量

Table 2 The pH, EC, water-soluble K⁺ and Na⁺ contents, total nitrogen content, the total organic carbon content of soils in four land-use types

土地利用方式 Land-use types	pH	电导率 EC / (mS·cm ⁻¹)	水溶性钾 Soluble K ⁺ / (mg·kg ⁻¹)	水溶性钠 Soluble Na ⁺ / (mg·kg ⁻¹)	全氮 Total N / (g·kg ⁻¹)	总有机碳 Total organic carbon / (g·kg ⁻¹)
荒地 Wasteland	7.50±0.09 d	3.87±0.26 a	26.23±2.33 a	922.63±65.49 a	0.11±0.01 b	3.03±0.13 c
草地 Grassland	8.87±0.04 a	0.25±0.04 c	20.59±1.18 a	202.97±33.11 c	0.16±0.01 a	3.68±0.10 b
耕地 Cultivated land	8.12±0.04 c	0.75±0.10 b	24.45±0.72 a	361.63±29.96 b	0.16±0.01 a	3.16±0.09 c
林地 Forest land	8.38±0.02 b	0.13±0.01 c	14.49±1.31 b	81.13±3.19 c	0.17±0.01 a	4.09±0.11 a

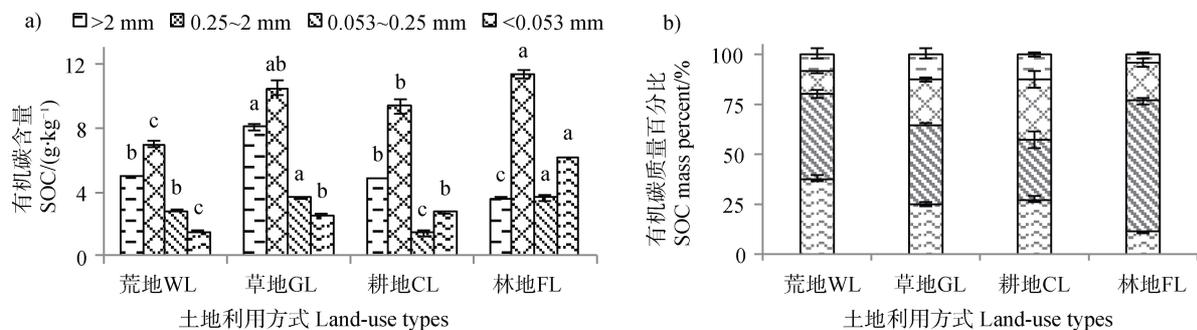
2.3 不同土地利用方式对山东滨海盐碱土壤全氮和有机碳含量的影响

林地的全氮含量最高,为荒地的 1.55 倍,但与草地、耕地无显著差异(表 2)。林地和草地的总有机碳含量均显著高于荒地和耕地 ($P<0.05$),且林地 ($4.09 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)最高,是其他三种样地的 1.11~1.35 倍。四种土地利用方式土壤的总有机碳含量和全氮含量表现一致,依次为:林地>草地>耕地>荒地。不同土地利用方式土壤的四个粒级水稳性团聚体中,0.25~2 mm 组分的有机碳含量均为最高,为 $6.96\sim 11.32 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;草地、耕地、林地 0.25~2 mm、<0.053 mm 组分的有机碳含量均显著高于荒地 ($P<0.05$),且林地最高(图 2a)。土壤中的有机碳主要集中在 <0.25 mm 的组分中,占总有机碳质量的 57%~80%;>2 mm 组分的有机碳质量在四个粒径团聚体中占比最低,为 4%~13%(图 2b)。综合来看,草地和林地土壤的碳、氮储量均显著高于荒地,0.25~2 mm 组分土壤的有机碳含量较高但在总土壤有机

碳中占比不高。

2.4 不同土地利用方式对山东滨海盐碱土壤团聚体的影响

林地土壤的三个粒径大小的机械稳定性团聚体含量均与其他样地存在显著差异 ($P<0.05$)(图 3a)。在>2 mm 组分中,耕地含量最高(36.94%),为林地的 2.05 倍;0.25~2 mm 组分中,荒地含量最高(23.53%),为林地的 3.40 倍;<0.25 mm 组分中,林地含量最高(74.88%),为其他样地的 1.63 倍~1.72 倍,因此林地的 MWD 和 $R_{0.25}$ 均显著低于其他样地 ($P<0.05$),但其他样地间的 MWD 无显著差异(表 3)。经过湿筛,林地得到的>2 mm 组分为 5.13%,0.25~2 mm 组分为 7.59%,0.053~0.25 mm 组分达到了 79.63%,是其他土壤的 1.39 倍~2.27 倍,<0.053 mm 组分仅为 7.65%(图 3b)。同时,林地的 WMWD 和 $WR_{0.25}$ 与草地、林地无显著差异。草地得到的>2 mm、0.25~2 mm、0.053~0.25 mm、<0.053 mm 组分分别为 6.51%、8.91%、44.97%和



注: WL, 荒地; GL, 草地; CL, 耕地; FL, 林地。不同小写字母表示不同土地利用方式间差异显著 ($P<0.05$)。下同。 Note: WL, wasteland; GL, grassland; CL, cultivated land; FL, forest land. Different lowercase letters indicate a significant difference between different land-use types at $P<0.05$. The same as below.

图 2 四种土地利用方式下土壤有机碳分布

Fig. 2 The organic carbon distribution of soils in four land-use types

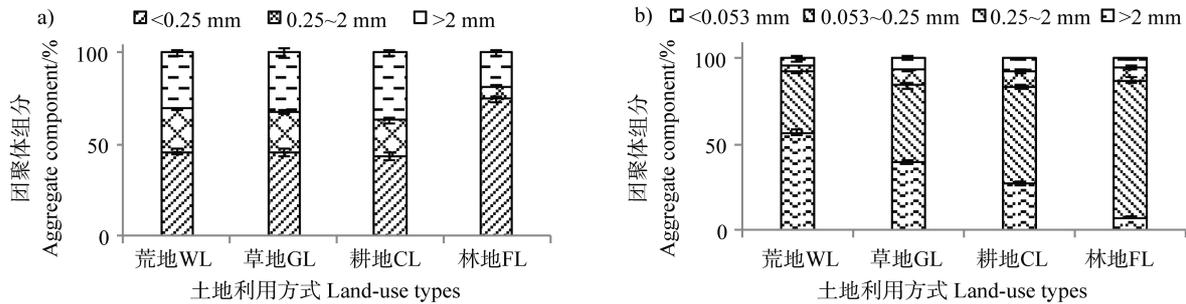


图 3 四种土地利用方式土壤的机械稳定性和水稳定性

Fig. 3 The mechanical stability and water stability of soils in four land-use types

表 3 四种土地利用方式土壤的 MWD、 $R_{0.25}$ 、WMWD、 $WR_{0.25}$ 和 PADTable 3 The MWD, $R_{0.25}$, WMWD, $WR_{0.25}$ and PAD of soils in four land-use types

土地利用方式 Land-use types	MWD/mm	$R_{0.25}$ /%	WMWD/mm	$WR_{0.25}$ /%	PAD/%
荒地 Wasteland	0.99±0.04 a	53.95±1.32 a	0.21±0.03 b	7.92±1.18 b	85.40±1.80 a
草地 Grassland	1.01±0.07 a	54.48±2.11 a	0.32±0.02 a	15.42±0.78 a	71.72±0.34 b
耕地 Cultivated land	1.07±0.04 a	56.50±1.74 a	0.34±0.02 a	15.99±1.24 a	71.55±2.89 b
林地 Forest land	0.63±0.04 b	25.12±1.85 b	0.31±0.02 a	12.72±1.3 a	49.55±1.51 c

注：MWD，机械稳定性平均质量直径； $R_{0.25}$ ，粒径>0.25 mm 的机械稳定性团聚体含量；WMWD，水稳性平均质量直径； $WR_{0.25}$ ，粒径>0.25 mm 的水稳性团聚体含量；PAD，团聚体破坏率。Note: MWD, mechanical stability mean weight diameter; $R_{0.25}$, particle diameter > 0.25 mm mechanical stability aggregate content; WMWD, water stability mean weight diameter; $WR_{0.25}$, particle diameter > 0.25 mm water stability aggregate content; PAD, percent of aggregate destruction.

39.61%，耕地分别为 7.22%、8.77%、57.09% 和 26.92%。荒地土壤经过湿筛后，其 WMWD 和 $WR_{0.25}$ 均显著低于其他样地 ($P<0.05$)，其 PAD 为 85.40%，显著高于其他土壤 ($P<0.05$)，是草地和耕地的 1.19 倍、林地的 1.72 倍。以上结果表明，林地土壤团聚体的水稳性最好，明显优于荒地土壤，草地和耕地土壤没有显著差异。

利用 SEM 观测四种土地利用方式土壤 > 2 mm 水稳性团聚体的表面形态，结果表明各类土壤的团聚体形貌存在明显差异。荒地的团聚体表面无明显的颗粒及孔隙，较为光滑；草地和林地的团聚体均包裹了植物根系且表面能够看到明显的颗粒及孔隙，但草地的颗粒排列更紧密且直径较小，林地的颗粒具有明显的凸起且颗粒间的黏结物更多；耕地的团聚体表面的颗粒大小不一且较粗糙，粒间孔隙不够明显，颗粒缝隙间有许多黏粒附着（图 4a~图 4d）。荒地团聚体内部的断面较表面粗糙了很多，能够看到大小不一的颗粒，但孔隙不

多；草地团聚体内部的颗粒仍然排列紧密，且能明显看到颗粒间的黏结物质；耕地团聚体内部的颗粒排列较表面疏松且孔隙更明显，颗粒表面粗糙，附着较多的小颗粒；林地团聚体内部的颗粒形态与表面相近，但颗粒间的黏结物变少，且孔隙更加清晰（图 4e~图 4h）。四种土地利用类型 > 2 mm 水稳性团聚体表面（图 5a~图 5d）和断面（图 5e~图 5h）中，O 含量最高，占总分析元素（C、O、Na、Mg、Al、Si、Ca）的 50% 左右。其中，荒地、草地和耕地团聚体断面的 O 含量与表面相比略有下降，而林地的 O 含量从 47.1% 提高至 62.8%。Si 含量仅次于 O，占总分析元素的 14%~25%。其中，荒地和草地团聚体断面的 Si 含量较表面高出了约 10%，而林地断面的 Si 含量较表面发生了下降。团聚体表面 C 含量占总分析元素的 10% 以上，且不同土地类型间差距不大；而断面 C 含量差距较大，荒地、草地的 C 含量较表面明显降低，已不足 10%。

2.5 土壤各理化性质指标的相互关系

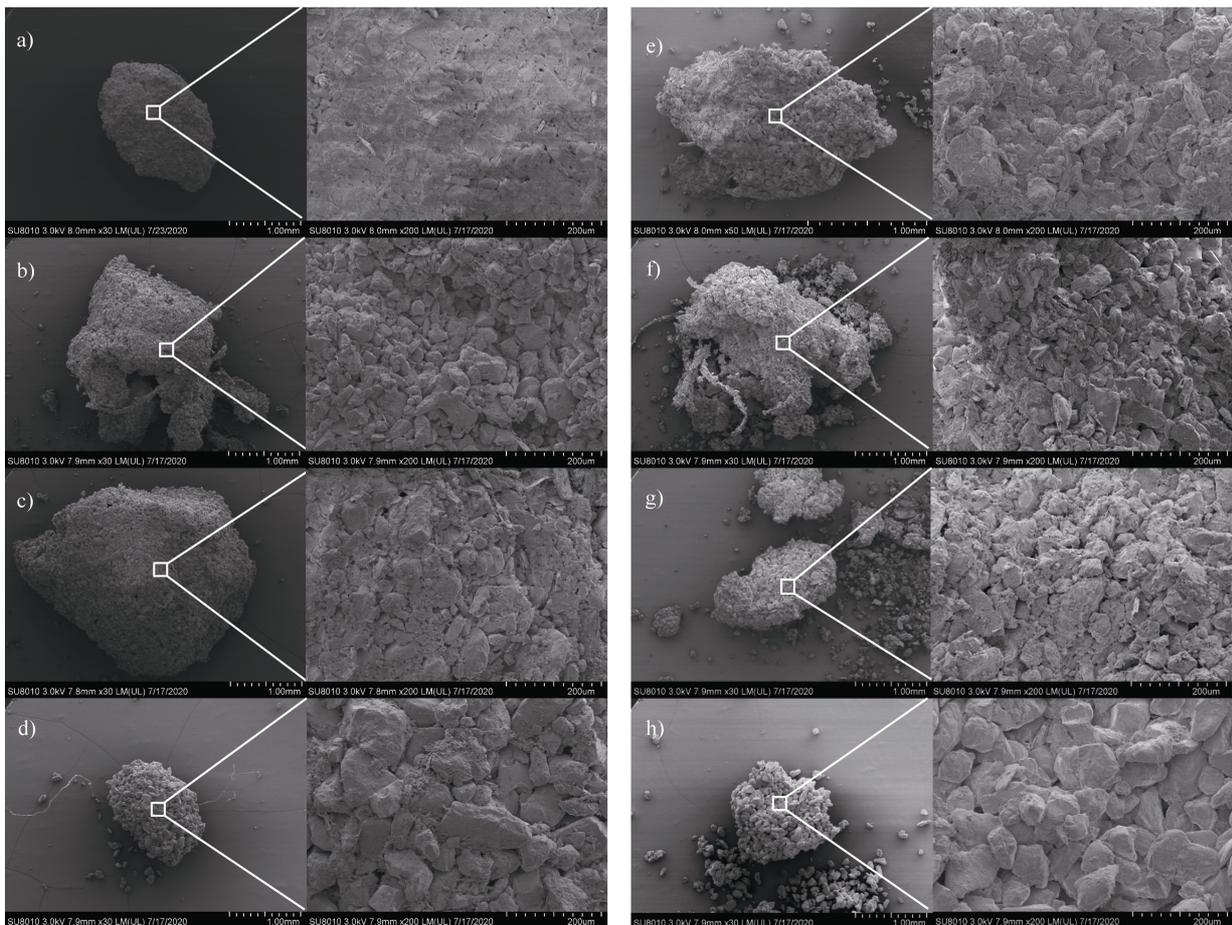
四种土地利用方式土壤的理化性质各指标间存在不同程度的相关性。水溶性 Na^+ 含量与 pH、EC、水溶性 K^+ 含量、总有机碳含量、全 N 含量均呈极显著相关性 ($P < 0.01$), 与 WMWD、 $\text{WR}_{0.25}$ 显著负相关 ($P < 0.05$); 总有机碳含量与 MWD、 $R_{0.25}$ 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与 WMWD、 $\text{WR}_{0.25}$ 无相关性; PAD 与 EC、水溶性 K^+ 含量、水溶性 Na^+ 含量、MWD、 $R_{0.25}$ 之间呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 与总有机碳含量呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$), 与 $\text{WR}_{0.25}$ 无显著相关性 (表 4)。砂粒与 MWD、 $R_{0.25}$ 呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$), 粉砂粒与 MWD、 $R_{0.25}$ 的相关性为极显著正相关 ($P < 0.01$), 黏粒与 MWD 的相关性呈极显著正相关 ($P < 0.01$) 且与 $R_{0.25}$ 呈显著正相关 ($P < 0.05$)。以上结果表明, 水稳性大团聚体虽受

有机质保护但也受机械组成等条件限制。土壤的 PAD 与 0.25~2 mm 和 > 0.25 mm 组分水稳性团聚体有机碳含量的相关性分析中发现, PAD 与 0.25~2 mm 组分相关性极显著 ($P < 0.01$), 与 > 0.25 mm 组分无显著相关性 (图 6a、图 6b)。

3 讨论

3.1 土地利用方式对山东滨海盐碱土壤基本理化性质的影响

在盐碱地中, 土地利用方式可以通过改变土壤机械组成来影响土壤的通气、透水、保肥性能, 从而改善土壤结构^[22]。本研究中, 林地含有大量的砂粒 (85.20%), 是其他样地的 1.54 倍~2.66 倍 (表 1)。这可能是由于林地植被覆盖度较低, 粉粒、黏粒易



注: a 和 e, 荒地; b 和 f, 草地; c 和 g, 耕地; d 和 h, 林地。下同。Note: a and e, wasteland; b and f, grassland; c and g, cultivated land; d and h, forest land. The same as below.

图 4 > 2 mm 水稳性团聚体的表面 (a~d) 和断面 (e~h) 扫描电镜 (SEM)

Fig. 4 Scanning electron microscopy (SEM) of > 2 mm water-stable aggregates on the surface (a~d) and section (e~h)

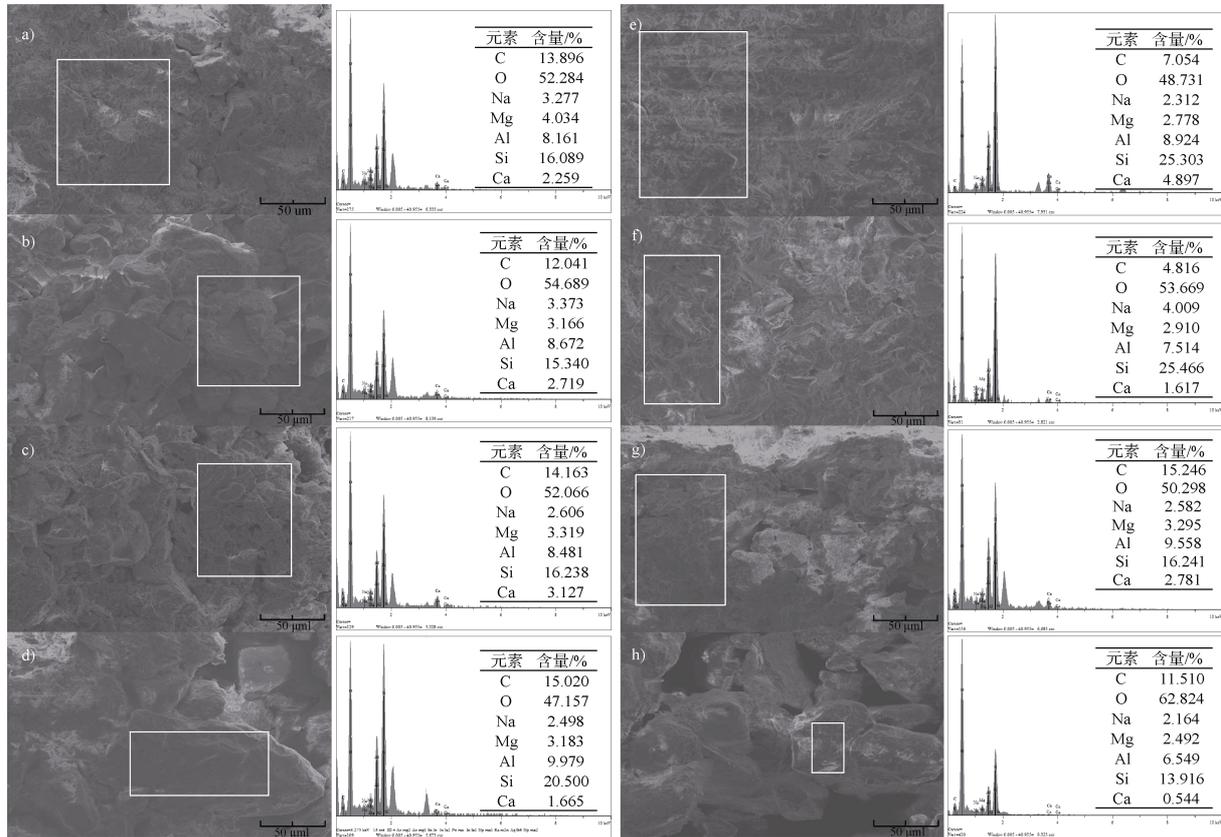


图 5 > 2 mm 水稳性团聚体的表面 (a~d) 和断面 (e~h) X 射线能谱分析 (EDS)

Fig. 5 X-ray energy dispersive spectrometer (EDS) of > 2 mm water-stable aggregates on the surface (a~d) and section (e~h)

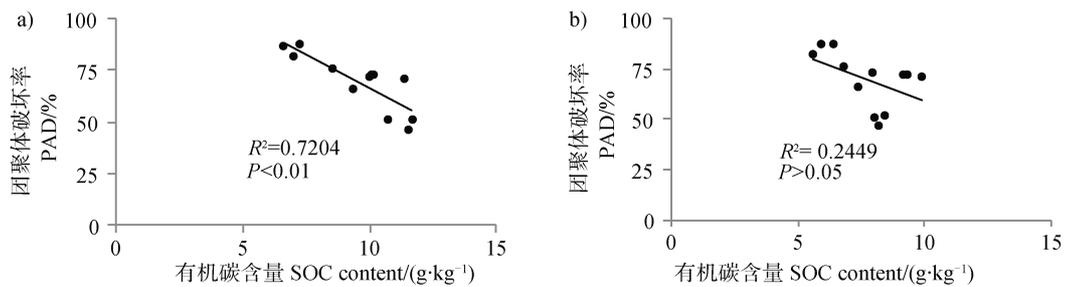


图 6 四种土地利用方式土壤的团聚体破坏率与 0.25~2 mm (a) 和 > 0.25 mm (b) 水稳性团聚体有机碳含量的线性回归分析

Fig. 6 The linear regression analysis of PAD with the organic carbon content of 0.25~2 mm (a) and > 0.25 mm (b) water-stable aggregate soils in four land-use types

随雨水流失, 剩下了颗粒较大的砂粒。该研究结果与解璐晗^[23]在黄河三角洲地区发现在不同土层下林地的砂粒含量显著高于耕地和草地结果一致。砂粒占比高的土壤具有良好的通气、排水能力, 但保肥性较差, 而粉粒及黏粒与有机质的紧密结合可以减少土壤有机质的分解^[24]。草地根系纵横且覆盖度高, 能够良好地保护粉粒和黏粒, 为此在林地中种植草地可以有效调节粉粒和黏粒含量, 从而增强其保肥

能力。Xia 等^[8]研究也进一步证实, 在采用生物措施对盐碱地进行改良时, 建议优先采用树-灌木-草混合模式, 其次是树-草-草混合模式, 应尽量避免纯森林模式。盐碱土中高浓度盐抑制作物生长, 且 Na^+ 对土壤的分散作用能够引起土壤物理性质恶化。草地、耕地和林地的 EC、 Na^+ 含量显著低于荒地 (表 2), 这是由于土壤种植植物能够增加土壤孔隙, 抑制盐分从深层土壤或地下水的迁移^[25]。该结

果与张鹏锐等^[26]研究发现东营盐碱地区草地、棉田、柽柳地的含盐量明显低于荒地结果一致。草地和林地的全 N、SOC 均显著高于荒地,而耕地的 SOC 未显著提高(表 2)。这是因为植物凋落物分解后的腐殖质以及根系分泌物能够提供 N 源和 C 源^[27],而耕地中生长的植物几乎都被收获,只有少部分植物体残留在土壤中,且耕作会加快有机质的分解转化、淋溶和迁移^[28]。综合分析发现,草地和林地均能有效降低土壤盐分,提高土壤碳、氮储量,具有良好的生产潜能。但在该研究区进行土地利用规划时需注意将林地与草地复合种植以保护土壤黏粒,而耕地需增施有机肥以提高土壤碳储量从而改善土壤结构。

3.2 土地利用方式对山东滨海盐碱土壤团聚体的影响

高盐(Na^+)能够导致盐碱地土壤黏重,对植物健康的影响通常又会导致土壤有机碳储量的减少^[29],而有机质是影响土壤团聚体水稳定性的关键因素^[30]。从表 3 可以看出,四种利用方式的土壤经过湿筛,其平均质量直径和 $> 0.25 \text{ mm}$ 组分均明显减小,这与刘兴华等^[17]研究结果一致;但由于林地的有机碳含量显著高于其他样地,且 $R_{0.25}$ 较低,因此其 PAD 显著低于荒地、草地和耕地。图 2b 中,林地 $< 0.053 \text{ mm}$ 组分的有机碳质量百分比最小($> 2 \text{ mm}$ 和 $0.25 \sim 2 \text{ mm}$ 组分汇总为 $> 0.25 \text{ mm}$ 组分), $0.053 \sim 0.25 \text{ mm}$ 组分最高,与李涵诗等^[31]研究结果一致。产生该现象的原因是有机物在降解过程中的迁移次序为:粗砂 \rightarrow 细砂 \rightarrow 粗粉 \rightarrow 黏土 \rightarrow 细粉^[32],而林地中砂粒的含量高,且土壤中含有的枯枝落叶残体 C/N 较高,分解速率较慢,因而林地中 $0.053 \sim 0.25 \text{ mm}$ 组分的有机碳含量较高。良好的团聚体结构有利于土壤的通气以及盐碱地中水溶性盐的排出。草地和林地的团聚体存在明显的微孔隙,而荒地团聚体表面看不到明显的颗粒及孔隙且内部孔隙也较少(图 4),因而草地和林地的 EC、 Na^+ 含量显著低于荒地(表 2)。土壤中存在大量的矿物以及有机物,且研究表明土壤团聚体的形成与稳定与土壤有机碳及铁铝氧化物的胶结作用密切相关^[33]。因此本研究中各土壤团聚体($> 2 \text{ mm}$)表面和内部的 O、Si、Al、C 含量较高(图 5),该现象与 Arai 等^[34]研究结果一致。结合图 2a 和图 5,有机碳对荒地和草地团聚体表面的胶结作用要强于内部,内部

可能以无机胶结作用及“有机质-氧化物”络合作用为主;张玉兰等^[35]研究表明土壤腐殖质中脂肪族化合物增加有利于土壤团聚体的形成,结合林地团聚体断面 O 含量较高这一现象,说明其内部的脂肪族、羧酸碳组分可能较高。因此,在施用土壤调理剂时应注意选择富含脂肪族、羧酸碳组分等有机物以及富含铁铝氧化物的矿物肥料,从而更有效地提高土壤碳储量。但这类有机物及其矿物肥料提高土壤碳储量的机制还需进一步研究。

3.3 土壤基本理化性质与团聚体的相互影响

土壤结构能够影响土壤中水分、气体、养分的储存和运输,而提高团聚体的水稳性是促进盐碱地形成良好土壤结构的关键^[36]。结合表 4 数据,推断影响四种土地利用方式下滨海盐碱土机械稳定性的可能是机械组成,其中砂粒的影响最大且随着砂粒含量增加机械稳定性降低。四种土地利用方式土壤的 MWD 和 $R_{0.25}$ 与总有机碳呈极显著负相关,与石宗琳等^[37]研究结果一致,但李程程等^[38]、谢钧宇等^[39]研究表示总有机碳与团聚体机械稳定性没有相关性,因此土壤团聚体的机械稳定性可能受有机质含量影响较少。 Na^+ 对土壤具有强烈的分散作用^[40],因此 PAD 与 Na^+ 之间呈极显著正相关;而 PAD 与总有机碳之间呈极显著负相关关系,这是由于土壤团聚体形成过程中有机质是主要的胶结物质^[41],能够提高团聚体稳定性^[42-44]。但是, PAD 与 $0.25 \sim 2 \text{ mm}$ 水稳性团聚体有机碳含量的 R^2 远高于 $> 0.25 \text{ mm}$ 组分,且四种土地利用方式土壤 $0.25 \sim 2 \text{ mm}$ 水稳性团聚体有机碳含量均高于 $> 2 \text{ mm}$ 组分,由此得出能够保护团聚体的有机胶结物质主要集中在 $0.25 \sim 2 \text{ mm}$ 团聚体中。林地的 MWMD 和 $\text{WR}_{0.25}$ 并不高于草地和林地,这是由于林地中砂粒多、黏粒少,难以通过菌丝、根系的缠绕以及分泌物的黏结作用形成大量的大团聚体^[45]。综合而言,草地和林地主要通过增加土壤($0.25 \sim 2 \text{ mm}$ 组分)有机质、减少土壤盐分来提高团聚体的水稳性,以此来减少团聚体的破坏率。虽然耕地土壤的有机碳含量较低、含盐量较高,但其 MWMD 和 $\text{WR}_{0.25}$ 与草地相近,与其较好的机械稳定性和人为耕作有关。因此,提高山东滨海盐碱土中水稳性 $0.25 \sim 2 \text{ mm}$ 组分的占比及有机质含量,有利于提高 $\text{WR}_{0.25}$,但值得注意的是,该过程还受机械组成限制。

表 4 土壤理化性质间的相关系数

Table 4 The correlation coefficients between soil physical and chemical properties

指标 Indicators	BD	pH	EC	K ⁺	Na ⁺	Total N	TOC	MWD	R _{0.25}	WMWD	WR _{0.25}	PAD
BD	1.000											
pH	-0.559	1.000										
EC	0.377	-0.870**	1.000									
K ⁺	0.357	-0.558	0.679*	1.000								
Na ⁺	0.410	-0.841**	0.982**	0.788**	1.000							
Total N	-0.443	0.646*	-0.834**	-0.673*	-0.850**	1.000						
TOC	-0.422	0.644*	-0.713**	-0.899**	-0.811**	0.643*	1.000					
MWD	0.137	-0.140	0.322	0.823**	0.475	-0.421	-0.786**	1.000				
R _{0.25}	0.084	-0.165	0.381	0.832**	0.525	-0.451	-0.787**	0.992**	1.000			
WMWD	-0.077	0.672*	-0.775**	-0.253	-0.687*	0.591*	0.217	0.028	-0.062	1.000		
WR _{0.25}	-0.133	0.708**	-0.731**	-0.138	-0.619*	0.560	0.119	0.213	0.137	0.965**	1.000	
PAD	0.106	-0.517	0.734**	0.813**	0.803**	-0.684*	-0.769**	0.784**	0.838**	-0.592*	-0.421	1.000
Sand	0.181	0.050	-0.429	-0.630*	-0.519	0.484	0.568	-0.776**	-0.829**	0.294	0.090	-0.830**
Silt	-0.202	0.048	0.448	0.602*	0.526	-0.493	-0.537	0.734**	0.793**	-0.332	-0.130	0.820**
Clay	0.189	-0.031	-0.079	0.529	0.085	-0.057	-0.538	0.732**	0.676*	0.347	0.429	0.384

注: BD, 容重; EC, 电导率; K⁺, 水溶性钾离子含量; Na⁺, 水溶性钠离子含量; Total N, 全氮含量; TOC, 总土壤有机碳含量; MWD, 平均质量直径; R_{0.25}, 粒径>0.25 mm 的机械稳定性团聚体含量; WMWD, 水稳性平均质量直径; WR_{0.25}, 粒径>0.25 mm 的水稳性团聚体含量; PAD, 团聚体破坏率; Sand, 砂粒含量; Silt, 粉粒含量; Clay, 黏粒含量。*, 在 0.05 水平上显著相关; **, 在 0.01 水平上显著相关。Note: BD, bulk density; EC, electrical conductivity; K⁺, water-soluble potassium content; Na⁺, water-soluble sodium content; Total N, total nitrogen content; TOC, total soil organic carbon content; MWD, mean mass diameter; R_{0.25}, >0.25 mm mechanical stability aggregate content; WMWD, mean mass diameter of water stability; WR_{0.25}, >0.25 mm water stability aggregate content; PAD, percent of aggregate destruction; Sand, sand content; Silt, silt content; Clay, clay content. * means significant correlation at 5% level; ** means significant correlation at 1% level.

综上所述, 为了提高山东滨海盐碱地区的土壤质量及农业经济发展, 除进行人工洗盐外最重要的途径之一是增加土壤碳储量。该过程可以通过对耕地增施富含脂肪族化合物等 C/N 高的有机物以及富含铁铝氧化物的矿物肥料进行固碳来实现, 即“人工增碳”。对荒地进行治理时, 可先进行少量泥沙的添加以增加土壤通气、排水能力, 然后进行林草复合模式种植以“天然增碳”。

4 结 论

黄河三角洲滨海盐碱地区草地、耕地和林地的盐分相比于荒地显著降低, 总有机碳含量、团聚体

水稳性有所提高。荒地无植被覆盖, 土壤可溶性盐含量达到了 19.78 g·kg⁻¹, 是其他样地的 7.17 倍~17.20 倍, PAD 高达 85.40%, 团聚体水稳性差; 草地中穿梭的草根以及植物残渣能够增加土壤孔隙、养分和黏结物质, 增强了土壤透水、排盐能力及团聚体水稳性; 耕地因翻耕、施肥、种植、灌溉等人工操作, 其团聚体水稳性与草地基本一致, 但总有机碳含量不高; 林地中的枯枝落叶显著提高了土壤中的有机碳含量及黏结物质, 从而加速盐分淋洗并提高团聚体水稳性, 但其砂粒含量较高, R_{0.25} 仅为 25.12%。综合来说, 草地和林地对滨海盐碱土壤理化性质的改良效果均为显著, 具有较高的碳储量及生产潜力。在实际规划与治理中, 要注意对耕地增

施富含脂肪族化合物等有机物及铁铝矿物肥,并对荒地实施林草复合种植模式。

参考文献 (References)

- [1] Dong H Y, Zhu Z L, Li X H, et al. Analysis on distribution, utilization status and governance effect of saline-alkali soil in Shandong Province[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2017, 49 (5): 134—139. [董红云, 朱振林, 李新华, 等. 山东省盐碱地分布、改良利用现状与治理成效潜力分析[J]. *山东农业科学*, 2017, 49 (5): 134—139.]
- [2] Wang J. The effect of carbon based materials on amending the salt-affected soil of the Yellow River Delta. [D]. Beijing : University of Chinese Academy of Sciences, 2020. [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].北京:中国科学院大学, 2020.]
- [3] Sun R J. Effect of silvopastoral system on the improvement of coastal saline soil in the Yellow River Delta[D]. Taian , Shandong : Shandong Agricultural University, 2020. [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].山东泰安: 山东农业大学, 2020.]
- [4] Liu X, Wu H Y, Yang S, et al. Formation of soil aggregates and distribution of soil nutrients in rhizosphere of salt-tolerant trees in coastal polder reclamation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (5): 1270—1279. [刘星, 吴华勇, 杨升, 等. 海涂围垦区不同耐盐树种根际土壤团聚体形成及养分分布特征[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (5): 1270—1279.]
- [5] Yao R J, Yang J S. Analysis on salinity characteristics and profile types of saline soils in the Yellow River Delta[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21 (11): 106—112. [姚荣江, 杨劲松. 黄河三角洲地区土壤盐渍化特征及其剖面类型分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2007, 21 (11): 106—112.]
- [6] Liu L J, Li Y T, Liu Z X, et al. Construction and demonstration of ecocycle symbiosis model based on saline-alkali land improvement—Setting the Yellow River Delta area as an example[J]. *Shandong Land and Resources*, 2019, 35 (8): 59—63. [刘立军, 李玉涛, 刘泽鑫, 等. 基于盐碱地改良的生态循环共生模式构建与示范——以黄河三角洲地区为例[J]. *山东国土资源*, 2019, 35 (8): 59—63.]
- [7] Xie X F, Pu L J, Wang Q Q, et al. Response of soil physicochemical properties and enzyme activities to long-term reclamation of coastal saline soil, Eastern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607/608: 1419—1427.
- [8] Xia J B, Ren J Y, Zhang S Y, et al. Forest and grass composite patterns improve the soil quality in the coastal saline-alkali land of the Yellow River Delta, China[J]. *Geoderma*, 2019, 349: 25—35.
- [9] Qi Y B, Chen T, Pu J, et al. Response of soil physical, chemical and microbial biomass properties to land use changes in fixed desertified land[J]. *Catena*, 2018, 160: 339—344.
- [10] Zhang X, Zhao W W, Wang L X, et al. Relationship between soil water content and soil particle size on typical slopes of the Loess Plateau during a drought year[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 648: 943—954.
- [11] Bhardwaj A K, Mishra V K, Singh A K, et al. Soil salinity and land use-land cover interactions with soil carbon in a salt-affected irrigation canal command of indo-gangetic plain[J]. *Catena*, 2019, 180: 392—400.
- [12] Xu M X, Liu G B, Zhao Y G. Effects of land use and environmental factors on the variability of soil quality indicators in hilly Loess Plateau region of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22 (2): 409—417. [许明祥, 刘国彬, 赵允格. 黄土丘陵区土地利用及环境因子对土壤质量指标变异性的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22 (2): 409—417.]
- [13] Zhang Y Y, Gu F, Liu Q, et al. Effects of land use type on soil nutrient elements in the agro-pastoral ecotone of North China: A case study in Zhangbei County[J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37 (7): 1239—1248. [张怡颖, 谷丰, 刘泉, 等. 华北农牧交错带不同土地利用类型的土壤养分特征——以张北县为例[J]. *草业科学*, 2020, 37 (7): 1239—1248.]
- [14] An D Y. Field hyperspectral estimation and remote sensing inversion of salinity content of coastal saline soils in the Yellow River Delta[D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2016. [安德玉. 黄河三角洲滨海盐渍土盐分含量野外高光谱估测与遥感反演[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2016.]
- [15] Ding C X, Li Y Q, Dong Z, et al. Effects of different land use modes on physical and chemical properties of saline-alkali soil in Yellow River Delta[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11 (2): 84—89. [丁晨曦, 李永强, 董智, 等. 不同土地利用方式对黄河三角洲盐碱地土壤理化性质的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11 (2): 84—89.]
- [16] Li H. Effects of land use and its change on soil physical and chemical properties in typical areas of the Yellow River Delta[D]. Shandong : Shandong Agricultural University, 2017. [李慧. 黄河三角洲典型地区土地利用及其变化对土壤理化性质的影响[D]. 山东: 山东农业大学, 2017.]
- [17] Liu X H, Zhang H B, Li Y, et al. Variation of organic matter in soil aggregates with the succession of tidal flatland from barren land-saltmarsh-upland in the Yellow River Delta[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (2): 374—385. [刘兴华, 章海波, 李远, 等. 黄河三角洲滩

- 涂—湿地—旱地土壤团聚体有机质组分变化规律[J]. 土壤学报, 2019, 56 (2): 374—385.]
- [18] He H, Miao Y J, Gan Y D, et al. Soil bacterial community response to long-term land use conversion in Yellow River Delta[J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 156: 103709.
- [19] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.]
- [20] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57 (4): 1071—1076.
- [21] Shao H Y, Li Z Y, Liu D, et al. Effects of manure application rates on the soil carbon fractions and aggregate stability[J]. *Environmental Science*, 2019, 40 (10): 4691—4699. [邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 等. 有机肥施用量对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响[J]. 环境科学, 2019, 40 (10): 4691—4699.]
- [22] Tian J Q, Zhou Z Y, Bao B, et al. Variations of soil particle size distribution with land-use types and influences on soil organic carbon and nitrogen[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32 (3): 601—610. [田佳倩, 周志勇, 包彬, 等. 农牧交错区草地利用方式导致的土壤颗粒组分变化及其对土壤碳氮含量的影响[J]. 植物生态学报, 2008, 32 (3): 601—610.]
- [23] Xie L H. Soil carbon pool structure and nutrient characteristics in different land use patterns in the Yellow River Delta[D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2017. [解璐晗. 黄河三角洲不同土地利用方式土壤碳库结构和养分特性[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2017.]
- [24] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for c-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2012, 241: 155—176.
- [25] Xie W J, Chen Q F, Wu L F, et al. Coastal saline soil aggregate formation and salt distribution are affected by straw and nitrogen application: A 4-year field study[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 198: 104535.
- [26] Zhang P R, Li X L, Cui D J, et al. Characteristics of water and salt under different land use in heavy coastal saline-alkaline land[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29 (2): 117—121, 203. [张鹏锐, 李旭霖, 崔德杰, 等. 滨海重盐碱地不同土地利用方式的水盐特征[J]. 水土保持学报, 2015, 29 (2): 117—121, 203.]
- [27] Yan L J, Wang H Y, Li G, et al. Effects of four typical vegetations on soil nutrient and enzymes activities in loess hilly region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33 (5): 190—196, 204. [闫丽娟, 王海燕, 李广, 等. 黄土丘陵区 4 种典型植被对土壤养分及酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33 (5): 190—196, 204.]
- [28] Chen Z, Lü C H, Fan L, et al. Effects of land use change on soil organic carbon: A review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31 (18): 5358—5371. [陈朝, 吕昌河, 范兰, 等. 土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展[J]. 生态学报, 2011, 31 (18): 5358—5371.]
- [29] Cong P F, Ouyang Z, Hou R X, et al. Effects of application of microbial fertilizer on aggregation and aggregate-associated carbon in saline soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 168: 33—41.
- [30] El-Shakweer M H A, El-Sayad E A, Ewees M S A. Soil and plant analysis as a guide for interpretation of the improvement efficiency of organic conditioners added to different soils in Egypt[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1998, 29 (11/12/13/14): 2067—2088.
- [31] Li H S, Mao Y L, Zou S Q. Distribution of $\delta^{13}\text{C}$ -labeled wood residue carbon in soil aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (4): 1038—1046. [李涵诗, 毛艳玲, 邹双全. $\delta^{13}\text{C}$ 标记林木残体碳在土壤团聚体中的分布[J]. 土壤学报, 2017, 54 (4): 1038—1046.]
- [32] Liu Q M, Wang S J, Piao H C, et al. The dynamics rules of soil organic matter of turnover ecosystems traced by stable carbon isotopes[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2002, 23 (4): 89—92. [刘启明, 王世杰, 朴河春, 等. 稳定碳同位素示踪农林生态转换系统中土壤有机质的迁移和赋存规律[J]. 环境科学, 2002, 23 (4): 89—92.]
- [33] Liao C L, Li L N, Xie L H, et al. Effect of increased or decreased application of organic manure on aggregates stability and soil cement in red paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58 (4): 978—988. [廖超林, 黎丽娜, 谢丽华, 等. 增减施有机肥对红壤性水稻土团聚体稳定性及胶结物的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58 (4): 978—988.]
- [34] Arai M, Uramoto G I, Asano M, et al. An improved method to identify osmium-stained organic matter within soil aggregate structure by electron microscopy and synchrotron X-ray micro-computed tomography[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 191: 275—281.
- [35] Zhang Y L, Sun C X, Chen Z H, et al. Analysis of soil humus and components after 26 years' fertilization by infrared spectroscopy method[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30 (5): 1210—1213. [张玉兰, 孙彩霞, 陈振华, 等. 红外光谱法测定肥料施用 26 年土壤的腐殖质组分特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30 (5): 1210—1213.]
- [36] Yue F X, Li J W, Qiao X X, et al. Effects of biochar application on soil aggregates stability and organic carbon and total nitrogen distribution in the hilly area of western Henan Province, China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33 (6): 265—272. [悦飞雪,

- 李继伟, 乔鑫鑫, 等. 生物炭对豫西丘陵区农田土壤团聚体稳定性及碳、氮分布的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33 (6): 265—272.]
- [37] Shi Z L, Wang J X, Liang H X, et al. Status and evolution of soil aggregates in apple orchards different in age in Weibei[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (2): 387—399. [石宗琳, 王加旭, 梁化学, 等. 渭北不同园龄苹果园土壤团聚体状况及演变趋势研究[J]. 土壤学报, 2017, 54 (2): 387—399.]
- [38] Li C C, Zeng Q C, Jia P L, et al. Characteristics of soil aggregate stability and corrosion resistance longitude change in the Loess P[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40 (6): 2039—2048. [李程程, 曾全超, 贾培龙, 等. 黄土高原土壤团聚体稳定性及抗蚀性能力经度变化特征[J]. 生态学报, 2020, 40 (6): 2039—2048.]
- [39] Xie J Y, Cao H B, Meng H S, et al. Effects of different fertilization regimes and fertilization ages on size distribution and stability of soil aggregates[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34 (3): 274—281, 290. [谢钧宇, 曹寒冰, 孟会生, 等. 不同施肥措施及施肥年限下土壤团聚体的大小分布及其稳定性[J]. 水土保持学报, 2020, 34 (3): 274—281, 290.]
- [40] Liu M L, Wang C, Wang F Y, et al. Maize (*Zea mays*) growth and nutrient uptake following integrated improvement of vermicompost and humic acid fertilizer on coastal saline soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 142: 147—154.
- [41] Jia C J, Liu H Y, Lu Y, et al. Effects of land use patterns on soil organic carbon and aggregate fractions[J]. *Tropical Geography*, 2014, 34 (5): 681—689. [贾重建, 刘红宜, 卢瑛, 等. 土地利用方式对土壤有机碳和团聚体组分特征的影响[J]. 热带地理, 2014, 34 (5): 681—689.]
- [42] Haydu-Houdeshell C A, Graham R C, Hendrix P F, et al. Soil aggregate stability under chaparral species in southern California[J]. *Geoderma*, 2018, 310: 201—208.
- [43] Li S, Yang Y C, Li Y C, et al. Remediation of saline-sodic soil using organic and inorganic amendments: Physical, chemical, and enzyme activity properties[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20 (3): 1454—1467.
- [44] Roldán A, Albaladejo J, Thornes J B. Aggregate stability changes in a semiarid soil after treatment with different organic amendments[J]. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1996, 10 (2): 139—148.
- [45] Zhao F W, Wang N, Su X M, et al. Effects of main plant roots on soil organic matter and aggregates in loess hilly region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33 (5): 105—113. [赵富王, 王宁, 苏雪萌, 等. 黄土丘陵区主要植物根系对土壤有机质和团聚体的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33 (5): 105—113.]

(责任编辑: 檀满枝)