

DOI: 10.11766/trxb201908240243

刘星, 吴华勇, 杨升, 卢翔, 王金旺, 陈秋夏. 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.

LIU Xing, WU Huayong, YANG Sheng, LU Xiang, WANG Jinwang, CHEN Qiuxia. 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.

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^{*}

刘 星¹, 吴华勇², 杨 升¹, 卢 翔¹, 王金旺¹, 陈秋夏^{1†}

(1. 浙江省亚热带作物研究所林业与生态研究室, 浙江温州 325005; 2. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘 要: 以温州宋埠围垦区的滨海潮滩盐土为研究对象, 种植泌盐乔木——怪柳 (*Tamarix chinensis*)、拒盐灌木——厚叶石斑木 (*Rhaphiolepis umbellata*) 和拒盐乔木——白榆 (*Ulmus pumila*), 分析植树 2 a 后各树种根际土壤团聚体形成及养分分布特征。与裸地相比, 怪柳、厚叶石斑木和白榆根际土壤 pH 分别下降 0.14、0.43、0.39, 电导率分别下降 80%、70%、72%。裸地土壤粒径均小于 0.053 mm, 各树种根际土壤形成的微团聚体 (0.25~0.053 mm) 占土壤总质量的 5.0%~5.9%, 大团聚体 (2~0.25 mm) 占比小于 1%。相比粉+黏团聚体 (<0.053 mm), 微团聚体中有机碳和游离铁含量分别呈现上升和下降趋势, 表明微团聚体形成可能是一个脱铁富碳过程。与裸地相比, 各树种根际土壤全氮和碱解氮显著增加, 而速效钾含量显著下降。各树种根际土壤全氮和碱解氮含量以白榆最高 (分别为 1.20 g·kg⁻¹ 和 42.6 mg·kg⁻¹), 且微团聚体中全氮和碱解氮显著高于粉+黏团聚体。综上所述, 植树 2 a 后, 各树种根际土壤盐碱度显著下降, 且形成团聚体, 表明怪柳、厚叶石斑木和白榆适宜作为浙南围垦区的改良树种。其中, 白榆根际形成的团聚体数量多, 富集碳、氮养分效果好, 为首选树种。

关键词: 盐土改良; 耐盐植物; 根际; 土壤团聚体; 土壤养分; 白榆

中图分类号: S156.4⁺2 文献标志码: A

Formation of Soil Aggregates and Distribution of Soil Nutrients in Rhizosphere of Salt-tolerant Trees in Coastal Polder Reclamation

LIU Xing¹, WU Huayong², YANG Sheng¹, LU Xiang¹, WANG Jinwang¹, CHEN Qiuxia^{1†}

(1. Department of Forestry and Ecology, Institute of Subtropical Crops of Zhejiang Province, Wenzhou, Zhejiang 325005, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

^{*} 浙江省农业科学院青年科技人才培养项目 (2018R26R08E02)、温州市林业四新推广示范项目 (ZJSF-DY20180728WZC) 和国家重点研发计划项目课题 (2018YFC1801806) 资助 Supported by the Youth Science and Technology Talent Development Project of Zhejiang Academy of Agricultural Sciences (No. 2018R26R08E02), the Four New Extension Demonstration Projects of Wenzhou Forestry Bureau (No. ZJSF-DY20180728WZC), and the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFC1801806)

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

作者简介: 刘 星 (1989—), 男, 浙江人, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事滨海生态环境研究。E-mail: liuxingzy1989@163.com

收稿日期: 2019-08-24; 收到修改稿日期: 2020-03-24; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2020-04-21

Abstract: 【Objective】 This study is oriented to explore effects of salt-tolerant trees different in species ameliorating coastal saline-alkali soils for screening trees suitable for establishment of shelterbelts and ecological greening in coastal areas. 【Method】 Three different species of trees, i.e. *Tamarix chinensis* (salt-secreting arbor), *Rhaphiolepis umbellata* (salt-rejecting shrub), and *Ulmus pumila* (salt-rejecting arbor) were planted in a tract of mudflat of saline-alkali soil in the Songbu Polder on the coast of Wenzhou. Two years after the trees were established, soil samples were collected from the rhizospheres of the trees for analysis of particle size distribution of soil aggregates and key physicochemical properties of the aggregates by particle size, including soil organic carbon (SOC), dithionite-citrate-bicarborate-extractable Fe (hydro) oxides (DCB-Fe), total nitrogen (TN), alkali-hydrolyzable nitrogen (AN), available phosphorus (AP), and readily available potassium (AK). 【Result】 Compared with the soil in the bare-land (CK), the soil in the rhizosphere of *T. chinensis*, *R. umbellata*, and *U. pumila* was 0.14, 0.43 and 0.39 lower in pH and 80%, 70% and 72% lower in electrical conductivity (EC), respectively. The soil particle size of CK was <0.053 mm, while soil aggregates were formed in the rhizosphere of the trees with the content of soil micro-aggregates (0.25-0.053 mm) being 5.0%–5.9%, and the content of macro-aggregates (2-0.25 mm) being much lower, accounting for less than 1% of the total of soil aggregates. The content of SOC increased significantly in the rhizosphere soils, but the content of DCB-Fe decreased significantly ($P<0.05$), especially in micro-aggregates, which suggests that soil aggregation was coupled with Fe removal and C accumulation. Soil nutrients, including TN, AN and AP were elevated in content within the rhizospheres of all three species. The content of TN ($1.20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) and AN ($42.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) in the rhizosphere soil of *U. pumila* was 15.4% and 23.8%, respectively, higher than those in CK. The content of AN ($85.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) in micro-aggregates was the highest among the aggregate fractions in the rhizosphere of *U. pumila*. Interestingly, much higher AP contents in silt-clay aggregates ($16.4\text{--}19.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) than those in micro-aggregates ($10.4\text{--}11.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) were detected in the *T. chinensis* and *R. umbellata* plantations, whereas no difference was observed in *U. pumila* rhizosphere soil ($P>0.05$). After establishment of the trees, AK decreased significantly or by 4.5%–11.5% in rhizosphere soils as compared that in CK ($P<0.05$). For all the rhizosphere soils, the content of AK varied in the range of $115.0\text{--}216.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in micro-aggregates, which was significantly lower than those in silt-clay aggregates ($303.0\text{--}342.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). 【Conclusion】 Cultivations of the salt-tolerant trees can ameliorate saline-alkali soils by reducing salinity and improving soil structure and soil fertility. *T. chinensis*, *R. umbellata*, and *U. pumila* could all be used as effective pioneer trees for mudflat reclamation projects. Among these species, *U. pumila* appeared to be the most effective thanks to its high capability of carbon and nitrogen enrichment in the rhizosphere soil.

Key words: Saline-alkali soil amelioration; Salt-tolerant plants; Rhizosphere; Soil aggregate; Soil nutrients; *Ulmus pumila*

对于临海国家和城市, 开发利用盐碱土已成为获得新土地的重要途径^[1-2]。我国滨海盐土总面积达 $5\times 10^6 \text{ hm}^2$, 北起鸭绿江口, 南至钦州湾, 还包括海南岛和台湾岛沿海等, 性质低劣, 多数难以直接利用^[1]。目前, 滨海盐碱地的改良利用主要集中在江苏^[3]、山东^[4]、河北^[5]、天津^[6]等地, 对于浙江, 特别是浙南地区关注较少。浙南滨海淤泥质盐碱土壤质地黏重、易板结、渗透性极差、脱盐周期漫长, 其改良利用和生态绿化难度极大。

土壤团聚体是土壤结构的基本单元, 决定土壤持水、透气、抗蚀和保肥等性能^[7]。近年来有研究表明团聚体的形成是盐碱土改良的重要步骤, 可以有效促进盐碱土的盐分淋洗和肥力提升^[8]。如 Zhang 等^[9]发现, 种植棉花可有效促进新疆玛纳斯河流域

盐碱土有机碳库的积累, 维持土壤团聚结构的稳定。连续 3 a 的棉花秸秆还田使山东滨海盐化潮土 (含盐量为 $2.99\sim 3.94 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 0~10 cm 土层大于 5 mm 的团聚体数量提高 13.4%, 籽棉和皮棉分别提高 14.6%和 19.0%^[4]。同时添加有机肥和接种微生物对青海柴达木盐碱土 (电导率为 $3.50 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$) 中大团聚体 (>0.25 mm) 的形成促进效果最好, 且微生物呼吸强度和酶活性显著提高^[10]。Luo 等^[11]报道, 相比于农家有机肥和砂子, 脱硫石膏对东北松嫩平原苏打盐碱土壤团聚结构形成、降盐和培肥效果最佳。但目前尚无浙南滨海淤泥质盐碱土壤团聚体特征研究的相关报道。

近年来, 课题组选取 10 余种耐盐乔灌木, 种植在温州宋埠、瓯飞、瓯江口等围垦区, 其中桤柳

(*Tamarix chinensis* Lour.)、厚叶石斑木(*Rhaphiolepis umbellata* (Thunb.) Makino) 和白榆(*Ulmus pumila* L.) 长势良好, 存活率大于 93.3%。根际是植物-土壤-微生物进行物质交换的活跃界面和独特微生态环境, 植物光合作用固定的碳, 约 20%以根系分泌物形式进入根际, 作为碳源或信号分子影响微生物种类、数量和分布, 从而影响根际微区土壤的结构和功能^[12]。由于根系特征、分泌物类型和功能的不同, 不同植物对根际土壤的团聚作用和养分循环影响不同。因此, 本研究聚焦温州围垦区的滨海潮滩盐土, 探究泌盐乔木——怪柳、拒盐灌木——厚叶石斑木、拒盐乔木——白榆根际土壤团聚体的形成特点及其氮、磷、钾养分元素的分布特征, 旨在筛选适合的耐盐树种, 为浙江滨海围垦区绿化和生态环境建设提供科学理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于浙江省温州市平阳县飞云江河口的宋埠围垦区(120°40'16.17"E, 27°39'49.44"N)。2005年开始围垦, 面积为 854 hm², 主要是工业用地(324.4 hm²), 其中农林用地 76 hm², 用于绿化和保护林构建。该地区属于中亚热带海洋性季风气候, 年均气温 17.9℃, 有效积温 5 687℃, 无霜期 276 d, 降水量 1 700 mm, 主要集中在春、夏两季。2015年 1 月, 于农林用地区域布点采样, 共 32 个取样点。土壤类型为滨海潮滩盐土, 母质为浅海沉积物, 黏土矿物类型以伊利石为主, 包含高岭石、蒙脱石和绿泥石。土壤质地为粉质黏壤土(USDA 制), 容重 1.56±0.13 g·cm⁻³, pH 8.12±0.56, 平均含盐量 4.1±3.2 g·kg⁻¹, 有机质 11.27±4.66 g·kg⁻¹。

1.2 试验设计

2016 年 1 月, 选定围垦区内地形平整、盐分含量基本一致的重盐碱区域作为样地, 进行野外试验布置。面积为 1 440 m² (30 m×48 m), 平均含盐量为 (7.7±0.6) g·kg⁻¹, 属于重度盐化土^[13]。按照质量比 2:1 铺撒有机肥(浙江顶农有机肥, pH: 5.5~8.5, 有机质大于 450 g·kg⁻¹, 氮、磷、钾大于 50 g·kg⁻¹, 含水量小于 300 g·kg⁻¹) 和稻壳(纤维素: 半纤维素: 木质素: 灰分含量比值约为 5:1:2:1), 施用量

为 19.5 t·hm⁻²。利用旋耕机破碎土壤, 深翻, 混匀, 深度为 20~30 cm, 整平。如图 1 所示, 试验区划分成面积为 30 m×12 m 的 4 个区块, 其中设对照裸地区块 1 个, 其余 3 个区块混合种植怪柳、厚叶石斑木和白榆的 2 年生幼苗, 每个区块分别种植 1 排怪柳、厚叶石斑木和白榆, 间隔 1 m, 各 30 株。

1.3 样品采集分析

2017 年 11 月, 按 10 m×12 m 的规格将每个试验区块分为 3 个小区。采集土样时, 已植树约 2 a, 距最后 1 次降雨 10~15 d, 地表基本无积水, 部分地表出现干裂。裸地土壤取样: 裸地零星分布芦苇。取样时, 避开芦苇, 每个小区分别按照 5 点取样法, 用土钻采取深度为 10~20 cm 区间的土壤样品, 获得混合土样 0.5 kg, 3 个小区共 1.5 kg。根际土壤取样方法为: 每个小区选取生长良好, 且冠幅和株高基本一致的怪柳、厚叶石斑木和白榆各 3 株作为重复。首先移除土壤表层的枯枝落叶, 之后用不锈钢铲从植株基部开始挖去上层覆土, 沿侧根找到须根部分(大部分位于土层 10~20 cm), 剪下分枝, 轻轻抖动去除非根际土壤, 仍然黏附在根上的土壤, 用毛刷收集至封口袋中, 视为根际土壤^[14]。每个区块每个树种获得混合根际土样约 0.5 kg, 3 个区块共 1.5 kg, 带回实验室, 自然风干。剔除可见的石砾、根系和其他杂质, 过 2 mm 筛后, 按四分法将土样分成四份, 一份用于土壤理化性质分析, 三份用于团聚体分离测定。

土壤团聚体的分级采用湿筛法^[15]。具体步骤如下: 土样放置于孔径为 2 mm 的不锈钢筛上, 室温下蒸馏水浸泡 10 min, 然后分别通过 0.25 mm 和 0.053 mm 的不锈钢筛, 竖直上下振荡 50 次, 获得水稳定性的 0.2~0.25 mm 大团聚体, 0.25~0.053 mm 微团聚体和小于 0.053 mm 粉+黏团聚体。将各级筛层中的土粒转移至烧杯中, 冷冻干燥后备用, 同时称重计算各粒径团聚体的比例。土壤 pH 和电导率(Electric Conductivity, EC)分别采用 pH 计(METTLER TOLEDO, 瑞士)和电导仪 DDS-307(雷磁, 上海)测定, 称取土壤 2 g, 水土比 5:1。土壤有机碳和全氮采用 Vario MAX-CN 元素分析仪(Elementar, 德国)测定。碱解氮、有效磷、速效钾、游离氧化铁和土壤质地分别采用碱解扩散法、碳酸

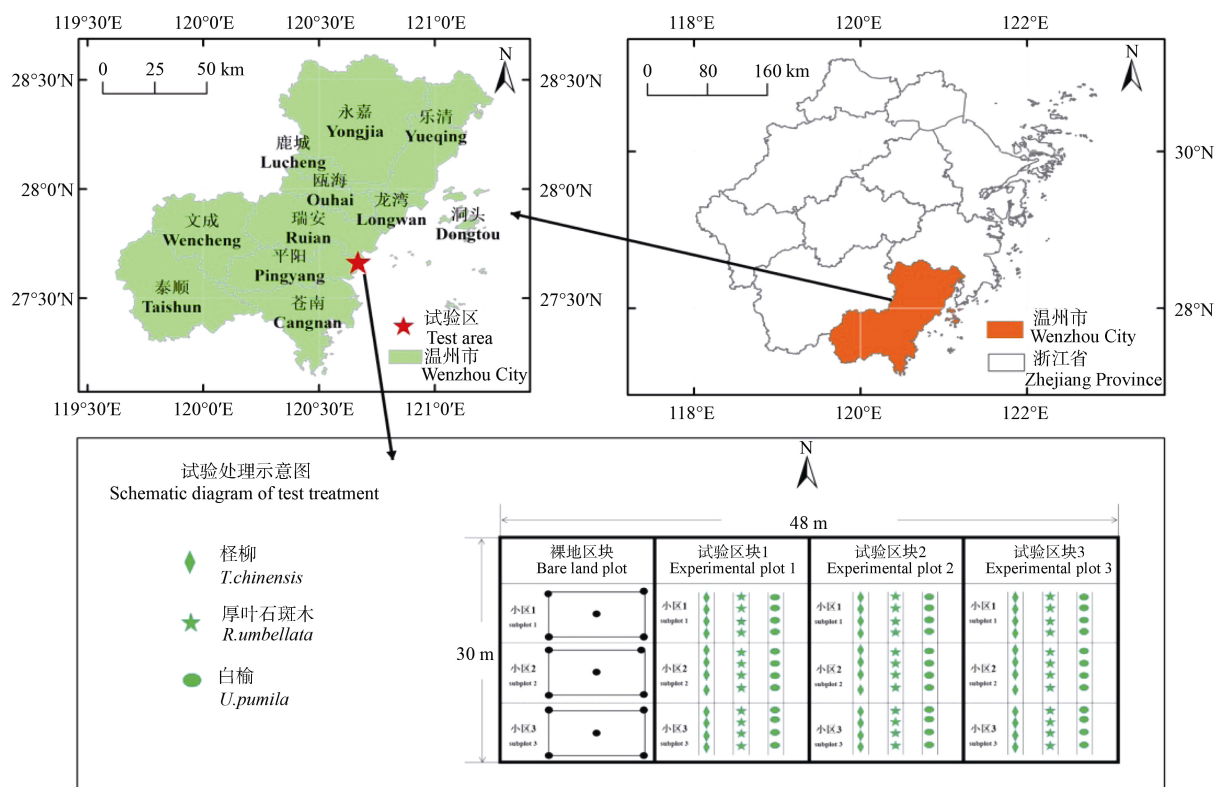


图 1 研究区地理位置及试验处理示意图

Fig. 1 Location of the Songbu polder reclamation and layout of the experiment with three treatments

氢钠浸提-钼锑抗比色法、乙酸铵交换-火焰光度法、连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-重碳酸钠 (Dithionite-citrate-bicarbonate, DCB) 提取-火焰原子吸收光谱法和吸管法测定^[16]。采用紫外-可见分光光度计 (翱艺, 上海) 获得土壤可溶性有机质 (Dissolved organic matter, DOM) 200~800 nm 光谱信息, 用 250 nm 和 365 nm 处吸光度值之比 (E_2/E_3) 表征 DOM 分子量的大小^[17]。

1.4 数据处理

数据采用 IBM Statistics SPSS13.0 进行分析统计, 邓肯 (Duncan) 单因素方差分析检验处理间差异显著性水平 ($P < 0.05$), 绘图采用 Origin 8.6 软件。

2 结果

2.1 不同耐盐树种根际土壤 EC 和 pH 变化

如图 2 所示, 与裸地土壤相比, 桉柳、厚叶石斑木和白榆根际土壤 pH 分别下降 0.14、0.43 和 0.39 个单位。厚叶石斑木和白榆根际土壤 pH 分别为 8.62

和 8.66, 显著低于桉柳 (8.91) ($P < 0.05$), 表明厚叶石斑木和白榆对围垦区土壤 pH 的改良效果好于桉柳。根际土壤的 EC 为 337~479 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 显著低于裸地土壤 (1 645 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) ($P < 0.05$)。不同树种根际土壤的 EC 变化程度与 pH 不同, 桉柳降盐效果最好, 其根际土壤 EC 为 337 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 降幅高达 80%。厚叶石斑木和白榆根际土壤 EC 降幅为 70%~72%, 二者无显著差异。

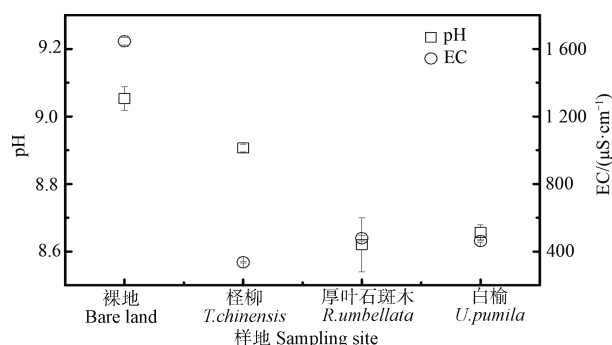


图 2 不同耐盐树种根际土壤的 pH 和电导率 (EC)

Fig. 2 Means of soil pH and electric conductivity (EC) in rhizosphere soils of the salt-tolerant trees

2.2 不同耐盐树种根际土壤团聚体的组成差异

试验区土壤由粉粒和黏粒组成（分别为 $625\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $375\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ），裸地土壤粒径均小于 0.053 mm ，而柞柳、厚叶石斑木和白榆根际土壤 $0.25\sim 0.053\text{ mm}$ 微团聚体和 $2\sim 0.25\text{ mm}$ 大团聚体含量分别提高至 $50\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $58\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $59\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和

$8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ （表 1），表明种植耐盐树种可有效促进土壤较大团聚体的形成。因植树年限有限（2 a），根际形成的团聚体有限，特别是大团聚体仅获得 10 g 左右，未达到土壤理化性质分析的需求。因此，下面主要分析粉+黏团聚体和微团聚体的理化性质。

表 1 不同耐盐树种根际土壤团聚体粒径分布

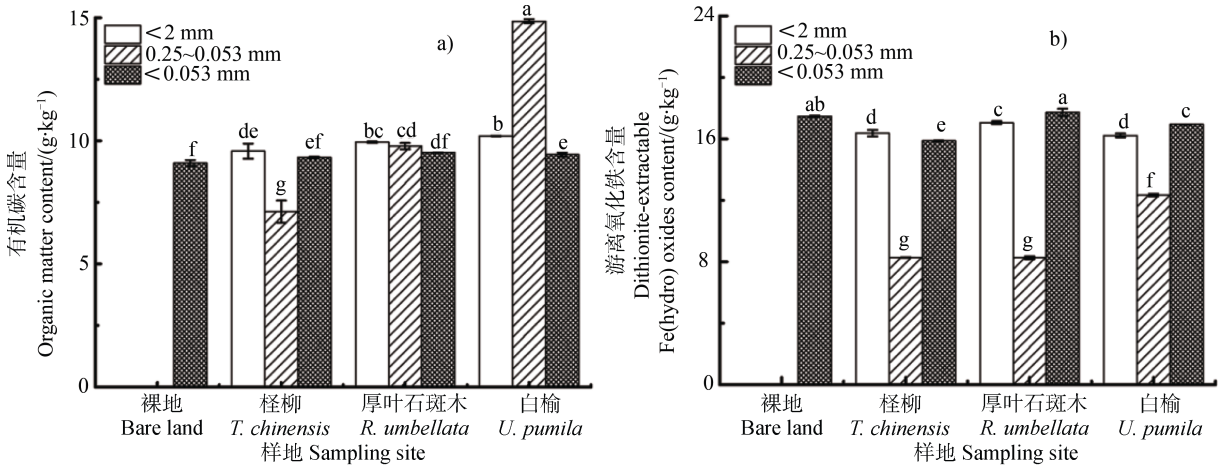
Table 1 Fractionation of soil aggregates in rhizosphere soils of the salt-tolerant trees/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

	2~0.25 mm 大团聚体	0.25~0.053 mm 微团聚体	<0.053 mm 粉+黏团聚体
	macro-aggregate	0.25-0.053 mm micro-aggregate	<0.053 mm silt-clay aggregate
裸地 Bare land	0	0	1 000
柞柳 <i>T. chinensis</i>	8	50	942
厚叶石斑木 <i>R. umbellata</i>	9	58	933
白榆 <i>U. pumila</i>	7	59	934

2.3 不同耐盐树种根际土壤有机碳和游离氧化铁含量的变化

如图 3a) 所示，柞柳、厚叶石斑木和白榆根际土壤有机碳含量分别为 $9.58\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $9.94\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $10.20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，均显著高于裸地土壤（ $9.09\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）（ $P<0.05$ ）。白榆微团聚体中的有机碳含量显著高于粉+黏团聚体，柞柳呈现相反趋势，厚叶石斑木根际两种团聚体中有机碳含量无显著差异。各树种根际微团聚体的有机碳含量以白榆最高（ $14.86\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ），

厚叶石斑木次之（ $9.78\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ），柞柳最低（ $7.13\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ），三者之间均达到显著差异（ $P<0.05$ ）。相比裸地土壤（ $17.47\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ），各树种根际土壤游离氧化铁含量均有所降低，其降低程度由低至高依次为厚叶石斑木（ $17.06\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）、柞柳（ $16.37\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）和白榆（ $16.22\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）（图 3b)）。不同粒径团聚体间的游离氧化铁含量差异显著，微团聚体中（ $8.26\sim 12.34\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）显著低于粉+黏团聚体（ $15.87\sim 17.72\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）（ $P<0.05$ ）。就微团聚体中的氧化铁含



注：不同字母表示不同根际土壤不同粒径间在 0.05 水平差异显著。下同。 Note: Different letters indicate significant difference ($P=0.05$) between aggregates fractions in rhizosphere of the salt-tolerant trees. The same below.

图 3 不同耐盐树种根际不同粒径土壤颗粒的有机碳 (a)) 和 (b)) 游离氧化铁含量

Fig. 3 Contents of organic carbon (a)) and dithionite-extractable Fe (hydro) oxides (b)) in soil aggregates of rhizosphere soil relative to particle size and salt-tolerant tree

量而言, 白榆最高 ($12.34 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 厚叶石斑木 ($8.28 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和柃柳 ($8.26 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 两者无显著差异 ($P>0.05$)。

2.4 土壤养分在根际土壤的分布特征

由图 4a) 可知, 与裸地相比, 耐盐树种根际土壤全氮含量均有所增加, 其中, 白榆和厚叶石斑木根际土壤全氮含量分别为 $1.20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.17 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 显著高于裸地的 $1.04 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($P<0.05$)。白榆根际土壤微团聚体的全氮含量为 $1.51 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 显著高于粉+黏团聚体的 $1.19 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而厚叶石斑木和柃柳根际土壤呈现相反的趋势, 特别是柃柳, 微团聚体的全氮含量仅 $0.88 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 显著低于粉+黏团聚体 ($1.13 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。由图 4b) 可知, 与裸地相比 ($34.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 白榆根际土壤碱解氮含量为 $42.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 增幅 23.8%; 柃柳和厚叶石斑木根际碱解氮含量分别为 $36.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $37.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变化不显著 ($P>0.05$)。白榆根际微团聚体的碱解氮含

量最高, 为 $85.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是裸地的 2.49 倍, 显著高于粉+黏团聚体 ($44.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); 而柃柳和厚叶石斑木根际的微团聚体和粉+黏团聚体中的碱解氮含量均无显著差异 ($P>0.05$)。

由图 4c) 可知, 与裸地土壤 ($15.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 相比, 厚叶石斑木根际土壤有效磷含量显著增加, 为 $18.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而柃柳和白榆根际土壤有效磷变化不显著。厚叶石斑木和柃柳微团聚体中的有效磷含量 ($10.4\sim 11.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 显著低于粉+黏团聚体 ($16.4\sim 19.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 白榆根际不同粒径团聚体之间有效磷含量无显著差异 ($P>0.05$)。就微团聚体中的有效磷含量而言, 白榆 ($16.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 显著高于柃柳 ($10.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和厚叶石斑木 ($11.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。由图 4d) 可知, 与裸地土壤 ($426 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 相比, 各耐盐树种根际土壤速效钾的含量显著降低, 且微团聚体中的速效钾含量 ($115.0\sim 216.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 显著低于粉+黏团聚体 ($303.3\sim 342.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。就 DOM

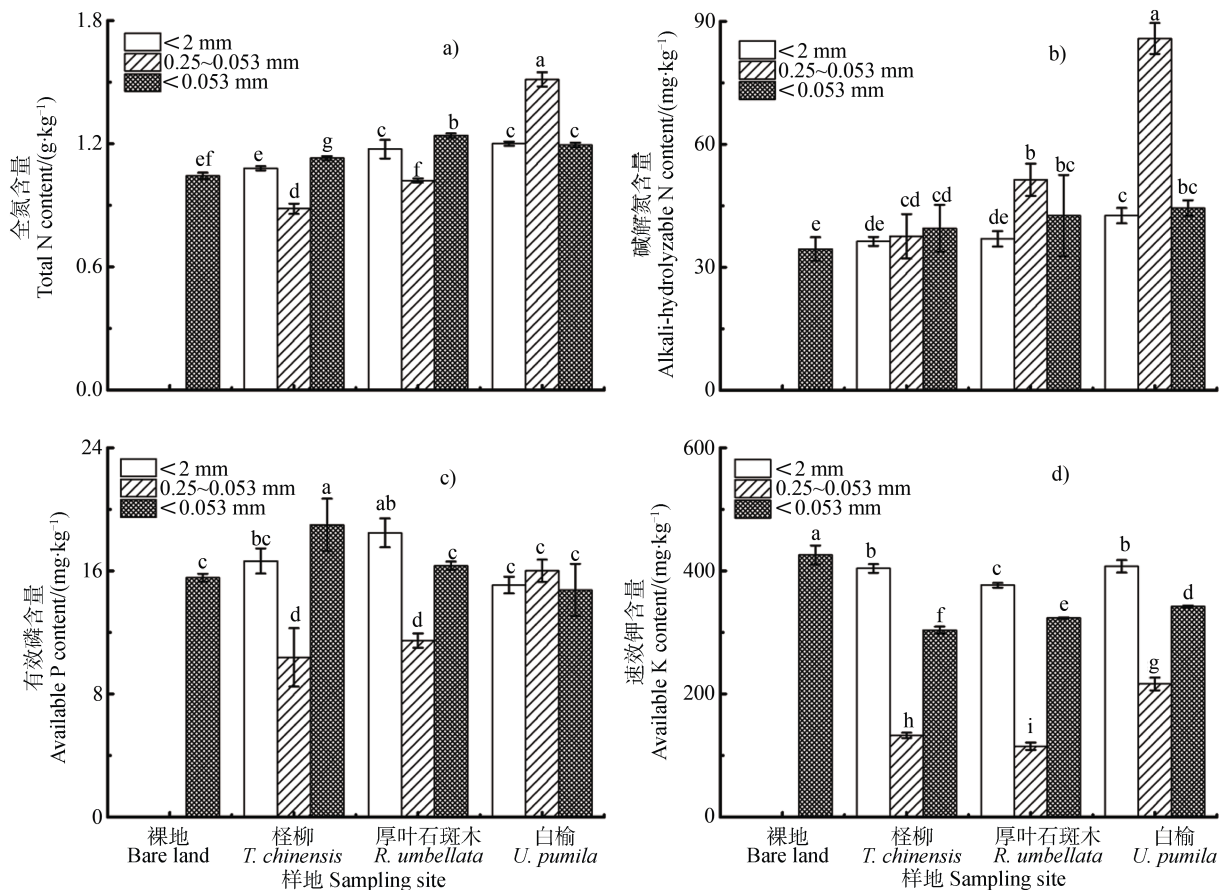


图 4 不同耐盐树种根际不同粒径土壤全氮 (a)、碱解氮 (b)、有效磷 (c) 和速效钾 (d) 含量

Fig. 4 Contents of total nitrogen (a), alkali-hydrolyzable nitrogen (b), available phosphate (c), and available potassium (d) of soil aggregates of rhizosphere soil relative to particle size and salt-tolerant tree

表 2 不同耐盐树种根际可溶性有机质 E_2/E_3 比值Table 2 Mean (\pm STD) of E_2/E_3 values of dissolved organic matter (DOM) in the rhizosphere relative to salt-tolerant tree

	<2 mm 根际土壤 <2 mm rhizosphere soil	0.25~0.053 mm 微团聚体 0.25-0.053 mm micro-aggregate	<0.053 mm 粉+黏团聚体 <0.053 mm silt-clay aggregate
裸地 Bare land			5.0 \pm 0.16e
怪柳 <i>T. chinensis</i>	4.9 \pm 0.09e	6.2 \pm 0.23c	4.9 \pm 0.08e
厚叶石斑木 <i>R. umbellata</i>	5.6 \pm 0.14d	7.3 \pm 0.08b	4.2 \pm 0.11h
白榆 <i>U. pumila</i>	6.3 \pm 0.11c	7.8 \pm 0.28a	4.6 \pm 0.08f

的 E_2/E_3 而言 (表 2), 白榆和厚叶石斑木根际分别为 6.3 和 5.6, 显著高于裸地土壤 (5.0) ($P<0.05$); 且各树种根际土壤微团聚体 (6.2~7.8) 显著高于粉+黏团聚体 (4.2~4.9), 其中白榆最高 (7.8), 厚叶石斑木次之 (7.3), 怪柳最小 (6.2)。

3 讨 论

3.1 耐盐树种对围垦区土壤理化性质和结构的影响

土壤盐分和 pH 是制约滨海地区生态环境建设的重要限制因子^[1-2], 种植耐盐树种能显著降低围垦区土壤的 pH 和 EC (图 2), 表明怪柳、厚叶石斑木和白榆均适宜作为浙南海涂围垦区的绿化树种。因根系特征、分泌物类型和耐盐机制的不同, 不同植物的降盐碱效果差异显著^[6]。怪柳属于泌盐植物, 吸盐能力强于拒盐植物——厚叶石斑木和白榆, 怪柳根际土壤的 EC 降幅高达 80%, 为 337 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 属非盐化土^[13]。就 pH 而言, 怪柳、厚叶石斑木和白榆根际土壤分别下降 0.14、0.43 和 0.39 个单位, 表明厚叶石斑木和白榆对围垦区土壤 pH 的改良效果好于怪柳。

围垦区的土壤质地黏重, 结构差, 无明显的团粒结构。植物在生长过程中, 根系通过缠绕, 释放分泌物作为胶结物质或调控微生物的群落结构, 以及影响根际的干湿交替来促进团聚体的形成^[18]。如表 1 所示, 裸地土壤粒径均为小于 0.053 mm 粉+黏团聚体, 而怪柳、厚叶石斑木和白榆根际土壤形成了粒径 0.25~0.053 mm 微团聚体和粒径 2~0.25 mm 大团聚体。一般地, 有机碳是土壤团聚体的主要胶结物质^[19]。一些研究结果也发现, 在盐碱地中, 例如山东滨海盐碱土^[4]、松嫩平原苏打盐碱

土^[11]、新疆玛纳斯河流域盐碱土^[9]和青海柴达木盐碱土^[10], 有机碳的输入促进土壤团聚结构的形成。南方红壤有机质含量低, 黏粒和游离氧化铁含量高, 章明奎和何振立^[20]发现黏粒的内聚力和氧化铁的胶结作用主导红壤团聚体的形成。Zhang 等^[21]对新开垦的低肥力红壤性水稻土的研究也发现了类似结果, 植稻前的红壤中铁铝氧化物对团聚体的形成和稳定起主要作用, 但植稻后随着水稻种植年限的延长, 土壤中有有机胶结物质逐步积累, 铁铝氧化物含量则逐渐降低, 有机碳的团聚体作用加强。而在水稻-玉米轮作的水稻原土和各粒级团聚体中, Huang 等^[22]报道, 无定型铁与有机碳含量成正比, 两者发生共沉淀和吸附作用, 抑制有机碳矿化速率。本研究中, 各耐盐植物根际土壤有机碳含量均显著高于裸地, 其中白榆根际微团聚体的碳含量增幅高达 63.5% (图 3a))。同时, 本研究还发现, 与粉+黏团聚体相比, 微团聚体中游离氧化铁含量显著下降, 降幅高达 27.8%~49.3%。推测浙南海滨淤泥质盐碱土中的团聚体形成也是一个脱铁富碳的过程。因此, 盐碱地造林配施有机肥料可增强土壤颗粒的团聚作用, 促进团聚体尤其是较大团聚体的形成。但怪柳微团聚体中的碳含量显著降低, 可能是因为怪柳微团聚体中富集的营养处于物理保护, 相比粉粒和黏粒表面化学结合 (钙键结合或氧化物结合) 的稳定态有机碳, 其易被微生物分解、利用和转化^[7]。章征程等^[23]对河套黄灌区碱化盐土、龟裂碱土、硫酸盐-氯化物盐土、硫酸盐盐土和草甸碱土的研究也发现了类似结果, 小于 0.01 mm 小团聚体的有机碳以化学保护为主, 分解慢, 显著高于 0.25~0.053 mm 微团聚体。 E_2/E_3 结果也证实这一点, 各树种根际土壤微团聚体 DOM 的 E_2/E_3 为 6.2~7.8, 显著高于粉+黏团聚体 (4.2~4.9)。 E_2/E_3 值越大, 表示有机质

分子量越小, 更容易被微生物利用^[17], 表明微团聚体中的微生物活性强。土壤微生物可通过黏附、物理缠绕、分泌有机物等方式影响土壤有机质的分异, 进而促进土壤团聚结构的形成和稳定^[24]。

3.2 不同耐盐树种根际土壤养分的分布特征

土壤微生物是土壤养分转化和转运的调节器, 不同微生物的组成比例决定土壤养分转化过程, 根际固氮细菌和丛枝菌根可提供植物生长所需 40%~50% 的氮和 75% 的磷^[25]。根际土壤 DOM 的 E_2/E_3 呈现增加趋势 (表 2), 表明根际微生物活性强, 有利于氮含量的积累。这与本研究的结果一致, 根际土壤全氮含量显著高于裸地 (图 4a))。一般而言, 微团聚体被稳定性较强的有机质 (如腐殖质) 所稳定, 而大团聚体是由微团聚体进一步团聚形成, 除去原来的有机质, 主要是被年轻有机质 (如碳水化合物、根和菌丝) 所稳定, 因此较大团聚体对土壤肥力的意义更大^[7]。如图 4a), 白榆根际土壤微团聚体全氮和碱解氮含量均显著高于裸地, 增幅分别高达 15.4% 和 149%, 可能是由于其根际土壤富含 *Nitrospira*、*Microvirga*、*Rhizobium* 和 *Mesorhizobium* 等参与氮循环的功能细菌属, 且主要分布于微团聚体中^[26-27]。尽管与本研究的海涂围垦区气候和土壤类型差异明显, 赵云杰等^[28]也发现科尔沁沙地和浑善达克沙地的榆树林具有碳汇潜力和固氮功能。柽柳和厚叶石斑木根际固氮能力相对较弱, 固定的氮有限, 而微团聚体中微生物活性更强, 对养分利用和转化效率高^[7]。因此, 厚叶石斑木和柽柳根际微团聚体土壤碱解氮含量显著增加, 但全氮含量呈现降低趋势。

根际磷素不足可诱导植物根系分泌质子、有机酸等物质活化局部养分或刺激根系的生长以增加吸收面积, 提高磷素的空间有效性^[29]。各耐盐树种根际土壤的有效磷含量总体呈现增加趋势, 其中厚叶石斑木根际土壤有效磷含量显著高于裸地土壤 (图 4c))。但微团聚体中的有效磷显著下降, 可能是由于其有效磷生物有效性高, 被植物和微生物大量吸收、利用和转化。此外, 微团聚体中的氧化铁显著降低, 其固定的磷被释放^[30], 会进一步降低磷的含量。围垦区土壤速效钾的含量为 $426 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 根据全国第二次土壤普查养分分级标准, 远高于一级土壤标准 ($>200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。耐盐树种的种植均降低了土壤中的速效钾, 根际形成的微团聚体

中微生物活性强, 速效钾降幅大, 高达 46.9%~73.0% (图 4d))。

微生物在土壤形成和肥力积累过程中起着极为重要的作用, 一般在盐渍化土壤中, 微生物活性增高说明土壤的盐碱状况得到了改善^[31]。土壤微生物是团聚体形成最活跃的因素, 土壤团聚结构的动态变化又反馈控制土壤微生物活动和土壤有机质的分异作用^[24]。因此, 下一步十分有必要探究盐碱地中耐盐植物根际土壤团聚结构-土壤理化性质-微生物区系特征的关联和耦合机制, 可以帮助认识团聚体的形成过程, 更好地定向培育土壤肥力和生物多样性, 加快盐碱土的改良利用进程。

4 结 论

柽柳、厚叶石斑木和白榆能有效降低围垦区盐碱土的盐分, 还能促进土壤结构的形成以及养分的积累, 均适宜作为浙南海涂围垦区的绿化树种。其中, 白榆改良盐碱土的效果最好, 根际形成的微团聚体数量多, 富集碳、氮养分效果好, 为首选树种。然而植树时间有限 (2a), 根际形成的团聚体有限, 特别是 2~0.25 mm 大团聚体达不到理化性质分析的需求。此外, 白榆、柽柳和厚叶石斑木在浙南地区的适应性也需进一步观察。

参考文献 (References)

- [1] He Z X, Zhao X F, Li Y L, et al. Importance of ecological greening for coastal saline in China[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2014, 22 (5): 1—4. [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.]
- [2] Zhu J F, Cui Z R, Wu C H, et al. Research advances and prospect of saline and alkali land greening in China[J]. World Forestry Research, 2018, 31 (4): 70—75. [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.]
- [3] Gao S, Yang J S, Yao R J, et al. Effects of soil amelioration measures mitigating soil salinity and improving crop P uptake in coastal area of North Jiangsu[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (5): 1219—1229. [高珊, 杨劲松, 姚荣江, 等. 改良措施对苏北盐渍土盐碱障碍和作物磷素吸收的调控[J]. 土壤学报, 2020, 57 (5): 1219—1229.]
- [4] Qin D L, Wang S L, Liu Y H, et al. Effects of cotton stalk returning on soil physical and chemical properties and

- cotton yield in coastal saline-alkali soil[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43 (7): 1030—1042. [秦都林, 王双磊, 刘艳慧, 等. 滨海盐碱地棉花秸秆还田对土壤理化性质及棉花产量的影响[J]. *作物学报*, 2017, 43 (7): 1030—1042.]
- [5] Feng G Y, Zhang Q, Qi H, et al. Temporal and spatial variation of soil moisture and salinity and its effect on photosynthetic production of cotton in coastal saline-alkali land[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (4): 1012—1022. [冯国艺, 张谦, 祁虹, 等. 滨海盐碱地水盐时空变化特征及对棉花光合生产的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (4): 1012—1022.]
- [6] Wang L Y, Pan J, Yang Y, et al. The fertility effects of salt-tolerant herbaceous plants on coastal saline soil[J]. *Pratacultural Science*, 2014, 31 (10): 1833—1839. [王立艳, 潘洁, 杨勇, 等. 滨海盐碱地种植耐盐草本植物的肥土效果[J]. *草业科学*, 2014, 31 (10): 1833—1839.]
- [7] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79 (1): 7—31.
- [8] 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.
- [9] Zhang F H, Yang H C, Gale W J, et al. Temporal changes in soil organic carbon and aggregate-associated organic carbon after reclamation of abandoned, salinized farmland[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2017, 155 (2): 205—215.
- [10] Yang H, Chen S S, Feng Z Y, et al. Combined effects of soil microbes and organic matter on aggregate formation in saline-alkali soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36 (10): 2080—2085. [杨华, 陈莎莎, 冯哲叶, 等. 土壤微生物与有机物料对盐碱土团聚体形成的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36 (10): 2080—2085.]
- [11] Luo S S, Wang S J, Tian L, et al. Aggregate-related changes in soil microbial communities under different ameliorant applications in saline-sodic soils[J]. *Geoderma*, 2018, 329: 108—117.
- [12] Hinsinger P, Plassard C, Jaillard B. Rhizosphere: A new frontier for soil biogeochemistry[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2006, 88 (1/2/3): 210—213.
- [13] Yao R J, Yang J S, Han J J. Stochastic simulation and uncertainty assessment of spatial variation in soil salinity in coastal reclamation regions[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19 (3): 485—490. [姚荣江, 杨劲松, 韩建均. 海涂围垦区土壤盐分空间变异性随机模拟与不确定性评价[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19 (3): 485—490.]
- [14] Pu Q, Hu Y F, Li H W, et al. Characteristics of organic carbon and nitrogen in rhizosphere soil under 2 sand-fixation shrub of alpine desertified grassland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30 (2): 272—276, 282. [蒲琴, 胡玉福, 李亨伟, 等. 高寒草地 2 种固沙灌木根际土壤碳氮特征[J]. *水土保持学报*, 2016, 30 (2): 272—276, 282.]
- [15] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50 (3): 627—633.
- [16] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry [M]. 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.]
- [17] Peuravuori J, Pihlaja K. Molecular size distribution and spectroscopic properties of aquatic humic substances[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1997, 337 (2): 133—149.
- [18] Yuan Y R, Han X Z, Ding X L, et al. Distribution of aggregate-associated organic carbon and aggregate stability in rhizosphere of different plants[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43 (2): 320—324. [苑亚茹, 韩晓增, 丁雪丽, 等. 不同植物根际土壤团聚体稳定性及其结合碳分布特征[J]. *土壤通报*, 2012, 43 (2): 320—324.]
- [19] Dou S, Li K, Guan S. A review on organic matter in soil aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (2): 412—418. [窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. *土壤学报*, 2011, 48 (2): 412—418.]
- [20] Zhang M K, He Z L. Effect of parent materials on formation of soil aggregates[J]. *Tropical and Subtropical Soil Science*, 1997, 6 (3): 198—202. [章明奎, 何振立. 成土母质对土壤团聚体形成的影响[J]. *热带亚热带土壤科学*, 1997, 6 (3): 198—202.]
- [21] Zhang Z B, Zhou H, Lin H, et al. Puddling intensity, sesquioxides, and soil organic carbon impacts on crack patterns of two paddy soils[J]. *Geoderma*, 2016, 262: 155—164.
- [22] Huang X L, Jiang H, Li Y, et al. The role of poorly crystalline iron oxides in the stability of soil aggregate-associated organic carbon in a rice-wheat cropping system[J]. *Geoderma*, 2016, 279: 1—10.
- [23] Zhang Z C, Lin Q M, Li M Z, et al. Effects of cultivation on water-stable aggregates and their organic carbon and nitrogen in typical saline-alkali soil of Hetao Yellow River irrigation region[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2018, 41 (6): 1085—1092. [章征程, 林启美, 李谟志, 等. 耕作对河套黄灌区典型盐碱土水稳定性团聚体及有机碳和全氮含量的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2018, 41 (6): 1085—1092.]
- [24] Li N, Han X Z, You M Y, et al. Research review on soil aggregates and microbes[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22 (9): 1625—1632. [李娜, 韩晓增, 尤孟阳, 等. 土壤团聚体与微生物相互作用研究[J]. *生态环境学报*, 2013, 22 (9): 1625—1632.]

- [25] Oberholster T, Vikram S, Cowan D, et al. Key microbial taxa in the rhizosphere of *Sorghum* and sunflower grown in crop rotation[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 624: 530—539.
- [26] He L, Li Y Q, Li B C, et al. Effects of different vegetation types and reclamation years on soil bacterial community structure in reclaimed mine areas[J]. *Environmental Science*, 2017, 38 (2): 752—759. [贺龙, 李艳琴, 李彬春, 等. 矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响[J]. *环境科学*, 2017, 38 (2): 752—759.]
- [27] Luo G W, Friman V P, Chen H, et al. Long-term fertilization regimes drive the abundance and composition of N-cycling-related prokaryotic groups via soil particle-size differentiation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 116: 213—223.
- [28] Zhao Y J, Tian Y, Wang X. Stock and allocation of carbon and nitrogen in typical *Ulmus pumila* dominated savanna in Inner Mongolia, China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2014, 12 (6): 82—89. [赵云杰, 田赟, 王晓. 典型榆树疏林碳氮储量及其分配特征[J]. *中国水土保持科学*, 2014, 12 (6): 82—89.]
- [29] Sun B, Liao H, Su Y H, et al. Advances in key coordinative mechanisms in soil-root-microbe systems to affect nitrogen and phosphorus utilization[J]. *Soils*, 2015, 47 (2): 210—219. [孙波, 廖红, 苏彦华, 等. 土壤-根系-微生物系统中影响氮磷利用的一些关键协同机制的研究进展[J]. *土壤*, 2015, 47 (2): 210—219.]
- [30] Garland G, Bünemann E K, Oberson A, et al. Plant-mediated rhizospheric interactions in maize-pigeon pea intercropping enhance soil aggregation and organic phosphorus storage[J]. *Plant and Soil*, 2017, 415 (1/2): 37—55.
- [31] Tian P Y, Shen C, Zhao H, et al. Enzyme activities and microbial communities in rhizospheres of plants in salinized soil in North Yinchuan[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 57 (1): 217—226. [田平雅, 沈聪, 赵辉, 等. 银北盐碱区植物根际土壤酶活性及微生物群落特征研究[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (1): 217—226.]

(责任编辑: 陈荣府)