

# 不同暖季型草坪草品种对盐碱地土壤理化性质和微生物群落的影响

姚祥<sup>1</sup>, 李晓慧<sup>1</sup>, 沈泽宇<sup>1</sup>, 邹景文<sup>2</sup>, 隋德宗<sup>2</sup>, 陈静波<sup>1,①</sup>, 郭海林<sup>1,①</sup>

[1. 江苏省中国科学院植物研究所(南京中山植物园) 江苏省植物资源研究与利用重点实验室, 江苏 南京 210014;

2. 江苏省林业科学研究院, 江苏 南京 211153]

**摘要:** 在江苏盐碱地中种植暖季型草坪草狗牙根[*Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.]品种‘阳江’(‘Yangjiang’)和杂交结缕草(*Zoysia sinica* × *Z. matrella*)品种‘苏植3号’(‘Suzhi No. 3’),探索这2个品种对盐碱地的植株地下部生物量以及土壤理化性质和微生物群落的影响。结果表明:‘阳江’和‘苏植3号’种植样地的植株地下部生物量和土壤有机质含量均显著高于对照样地;土壤的pH值和电导率均显著低于对照样地。细菌群落结构和真菌群落结构与对照样地均有显著差异,‘阳江’和‘苏植3号’种植样地的细菌Shannon-Wiener多样性指数均显著高于对照样地;固氮细菌、丛枝菌根真菌和粪腐生真菌的相对丰富度均显著高于对照样地。总体上看,‘阳江’和‘苏植3号’种植样地土壤中功能细菌类群关系较近,二者与对照样地的关系均较远;而3种样地土壤中功能真菌类群关系均较远。‘阳江’和‘苏植3号’种植样地的植株地下部生物量和土壤理化性质明显影响土壤中细菌多样性,植株地下部生物量以及土壤的pH值和电导率明显影响土壤中部分功能细菌的丰富度,植株地下部生物量和土壤pH值明显影响土壤中部分功能真菌的丰富度。综合分析认为,在江苏滨海盐碱地中种植‘阳江’和‘苏植3号’对盐碱地的植株地下部生物量以及土壤理化性质和微生物群落有明显的积极影响,在盐碱地生态修复中具有重要作用。

**关键词:** ‘阳江’; ‘苏植3号’; 暖季型草坪草; 盐碱地; 土壤理化性质; 微生物群落

中图分类号: Q948.12<sup>+</sup>2.3; S156.4; S543<sup>+</sup>.9 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2024)01-0059-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2024.01.06

**Effects of different warm-season turfgrass cultivars on soil physicochemical property and microbial community of saline-alkali land** YAO Xiang<sup>1</sup>, LI Xiaohui<sup>1</sup>, SHEN Zeyu<sup>1</sup>, ZOU Jingwen<sup>2</sup>, SUI Dezong<sup>2</sup>, CHEN Jingbo<sup>1,①</sup>, GUO Hailin<sup>1,①</sup> [1. Jiangsu Key Laboratory for the Research and Utilization of Plant Resources, Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences (Nanjing Botanical Garden Mem. Sun Yat-Sen), Nanjing 210014, China; 2. Jiangsu Academy of Forestry, Nanjing 211153, China], *J. Plant Resour. & Environ.*, 2024, 33(1): 59-66

**Abstract:** Warm-season turfgrass namely cultivar ‘Yangjiang’ of *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers. and cultivar ‘Suzhi No. 3’ of *Zoysia sinica* × *Z. matrella* were planted in saline-alkali land in Jiangsu, and the effects of these two cultivars on under-ground biomass of plant and soil physicochemical property and microbial community of soil of saline-alkali land were explored. The results show that under-ground biomass of plant and organic matter content in soil of plots planted with ‘Yangjiang’ and ‘Suzhi No. 3’ are both significantly higher than those of the control plot; soil pH value and electric conductivity are both significantly lower than those of the control plot. There are significant differences in both bacterial community structure and fungal community structure compared with the control plot, and the Shannon-

收稿日期: 2023-05-08

基金项目: 中央财政林业科技推广示范资金项目(苏[2021]TG02); 国家自然科学基金面上项目(31572155; 32002081); 江苏省自然科学基金青年科学基金项目(BK20200285)

作者简介: 姚祥(1988—),男,安徽蚌埠人,博士,助理研究员,主要从事草坪微生物方面的研究。

①通信作者 E-mail: chenjb19@163.com; ghlmg@sina.com

引用格式: 姚祥, 李晓慧, 沈泽宇, 等. 不同暖季型草坪草品种对盐碱地土壤理化性质和微生物群落的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2024, 33(1): 59-66.

Wiener diversity index of bacteria in plots planted with 'Yangjiang' and 'Suzhi No. 3' are both significantly higher than that of the control plot; relative abundance of nitrogen fixation bacteria, arbuscular mycorrhizal fungi, and dung saprotroph fungi are all significantly higher than those of the control plot. In general, the relationships of functional bacterial groups in soil between plots planted with 'Yangjiang' and 'Suzhi No. 3' are relatively close, and the relationships between them and the control plot are both relatively far; while the relationships of functional fungal groups in soil among three kinds of plots are all relatively far. The soil bacterial diversity in plots planted with 'Yangjiang' and 'Suzhi No. 3' are obviously affected by under-ground biomass of plant and soil physicochemical property, the abundance of some functional bacteria in soil are obviously affected by under-ground biomass of plant and soil pH value and electric conductivity, the abundance of some functional fungi in soil are obviously affected by under-ground biomass of plant and soil pH value. The comprehensive analysis indicates that planting 'Yangjiang' and 'Suzhi No. 3' in coastal saline-alkali land in Jiangsu has an evident positive impact on under-ground biomass of plant and physicochemical property and microbial community of soil of saline-alkali land, and has an important role in ecological remediation of saline-alkali land.

**Key words:** 'Yangjiang'; 'Suzhi No. 3'; warm-season turfgrass; saline-alkali soil; soil physicochemical property; microbial community

土壤盐渍化问题引起了学者广泛关注。据中国第2次土壤普查资料,中国盐渍土面积  $3.47 \times 10^7$   $\text{hm}^2$ ,相当于耕地面积的  $1/3$ <sup>[1]</sup>。江苏沿海滩涂总面积  $6.53 \times 10^5$   $\text{hm}^2$ 左右,约占中国滩涂总面积的  $1/4$ <sup>[1]</sup>。盐碱地是重要的后备土地资源,但由于沿海滩涂盐碱含量高,重度盐碱地含盐量高达  $0.7\% \sim 1.0\%$ ,土壤养分匮乏,一般植物很难生长<sup>[2]</sup>。通过生物措施改良盐碱地是目前盐碱地改良和利用的发展战略。关于植被对盐碱地土壤理化性质和土壤微生物影响的研究较多,有研究结果表明种植耐盐植物可显著改善土壤理化性质和土壤酶活性<sup>[3]</sup>,不同植物根际的微生物群落结构不同<sup>[4]</sup>,无植被覆盖盐碱地土壤真菌和放线菌丰富度低于有植被覆盖盐碱地土壤,且不同植物覆盖土壤的微生物群落存在差异<sup>[5]</sup>。

草坪草因其强适应性,在盐碱地绿化中得到广泛应用。早期关于冷季型草坪草在盐碱地中适应性评价的研究较多。例如:李发明<sup>[6]</sup>在甘肃河西盐碱地区进行了毛稈羊茅 [*Festuca rubra* subsp. *arctica* (Hackel) Govoruchin] 的种植研究,发现该种表现出强适应性;王海生等<sup>[7]</sup>在山东东营盐碱地区进行了多年生黑麦草 (*Lolium perenne* Linn.)、高羊茅 (*Festuca elata* Keng ex E. B. Alexeev) 和草地早熟禾 (*Poa pratensis* Linn.) 3 种草的 40 个品种的适应性研究,发现这 3 种草均有少数品种表现良好;刘金荣等<sup>[8]</sup>在甘肃张掖高寒盐碱地区进行了 21 种冷季型草坪草的适应性研究,发现草地早熟禾表现最好;汤巧香<sup>[9]</sup>在天津盐碱地区进行了冷季型草坪草 6 属 11 种 122 个品种的适应性研究,发现草地早熟禾、高羊茅和多年生

黑麦草具有良好适应性。此外,部分暖季型草坪草也具有强耐盐性,为天然的盐生植物,如大穗结缕草 (*Zoysia macrostachya* Franch. et Sav.)<sup>[10]</sup> 和海雀稗 (*Paspalum vaginatum* Sw.)<sup>[11]</sup> 等。已有研究结果表明:海雀稗品种 'P006'、沟叶结缕草 [*Zoysia matrella* (Linn.) Merr.] 品种 'Z014' 和结缕草 (*Zoysia japonica* Steud.) 品种 'Z080' 等在江苏如东沿海滩涂重度盐碱地上表现良好<sup>[12]</sup>。海雀稗、狗牙根 [*Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.] 和结缕草等在美国盐碱地区应用广泛<sup>[13]</sup>。Zong 等<sup>[14]</sup> 在中国南海礁沙上进行了海雀稗、巴哈雀稗 (*P. notatum* Flügge)、狗牙根、细叶结缕草 [*Zoysia pacifica* (Goudswaard) M. Hotta et S. Kuroki] 和钝叶草 (*Stenotaphrum helferi* Munro ex Hook. f.) 的适应性研究,发现狗牙根表现最好,且狗牙根根际细菌物种丰富度显著高于其他 4 种草。但关于暖季型草坪草对盐碱地土壤理化性质和微生物群落影响的研究尚不全面,不利于盐碱地土壤的进一步改良。

目前,在江苏及周边地区广泛应用的暖季型草坪草主要为从美国引进的 Tif 系列杂交狗牙根<sup>[15-16]</sup>。这些草坪草虽品质良好,但是耐盐性较差,在重度盐碱地上需换土才能成功建植<sup>[17]</sup>。针对以上情况,本项目组从 2000 年开始进行耐盐草坪草新品种选育,建立了暖季型草坪草耐盐评价体系<sup>[18-19]</sup>,选育出狗牙根品种 '阳江' ('Yangjiang')、杂交结缕草 (*Z. japonica*  $\times$  *Z. tenuifolia*) 品种 '苏植 1 号' ('Suzhi No. 1') 和杂交结缕草 (*Z. sinica*  $\times$  *Z. matrella*) 品种 '苏植 3 号' ('Suzhi No. 3') 等一系列坪用价值高、耐盐性强、耐粗放管理的草坪草新品种<sup>[17]</sup>。选育的耐盐草

坪草新品种和盐碱地草坪相关技术体系已在江苏的盐城大丰、盐城东台、南通如东以及山东潍坊等盐碱地区的草坪生态修复建设中得到大面积应用。基于以上研究,本研究分析了在江苏盐城盐碱地中种植优质耐盐新品种‘阳江’和‘苏植 3 号’对盐碱地土壤理化性质和土壤微生物群落的影响,以期为暖季型草坪草在盐碱地生态修复中的应用提供科学依据。

## 1 研究地概况和研究方法

### 1.1 研究地概况

研究地位于江苏省盐城市大丰麋鹿国家级自然保护区江苏省林业科学院沿海造林试验站内,地理坐标为东经 120°49′~120°52′、北纬 33°00′~33°20′,海拔 2~3 m。该地区属亚热带与暖温带过渡地带,具有海洋性气候和季风性气候,年平均气温 13.7 °C~14.5 °C,年平均降水量 980~1 100 mm,降水集中在 6 月至 9 月。研究区土壤粉沙质,盐渍化,0~15 cm 土层土壤的平均盐度为 1.4%,主要植物有棒头草 (*Polypogon fugax* Nees ex Steud.)、马齿苋 (*Portulaca oleracea* Linn.)、碱蓬 [*Suaeda glauca* (Bunge) Bunge] 和盐角草 (*Salicornia europaea* Linn.) 等。

### 1.2 材料

供试材料为江苏省中国科学院植物研究所自主选育的暖季型多年生草坪草新品种‘阳江’和‘苏植 3 号’,二者均通过匍匐茎繁殖,选当年生草种在试验区种植。

### 1.3 方法

1.3.1 试验设计 于 2021 年 6 月,在试验区内对‘阳江’和‘苏植 3 号’进行盐碱地生态修复示范种植,以原生境草地(以棒头草为主)为对照,示范地和对照地的水肥管理措施相同。每个草种示范地面积 2 000 m<sup>2</sup>,包含 4 个区域,每个区域约 500 m<sup>2</sup>。对照地 4 块,每块面积 120 m<sup>2</sup>。草种植 1 年后,在各示范地和对照地内随机选取 1 个面积 2 m×2 m 的样地,即每个草种和对照均 4 次重复。在各样地内随机选取 3 个点,3 个点内植株地下部生物量的均值即为该样地植株地下部生物量,另随机取 3 个点土壤样本混为 1 个样本用于后续土壤理化性质和微生物群落分析。

1.3.2 植株地下部生物量和土壤理化指标测定 去除地表植物体和枯枝落叶,使用口径 5 cm 的不锈钢土钻采集 0~15 cm 土层土壤,土钻内径面积(19.625

cm<sup>2</sup>)即为土壤取样面积,洗去土壤后获得植株地下部,于 80 °C 烘干至恒质量,使用千分之一电子天平称量植株地下部干质量,并根据公式“植株地下部生物量=土钻中植株地下部干质量/土钻内径面积”计算植株地下部生物量。同样使用土钻采集 0~10 cm 土层土壤,过筛(孔径 2 mm)去除枯枝落叶等杂质后进行土壤理化性质和微生物群落分析。采用重铬酸钾氧化法<sup>[20]</sup>测定土壤有机质含量;使用雷磁 PHS-3C pH 计(上海仪电科学仪器股份有限公司)测量土壤 pH 值;使用 FieldScout EC110 便携式电导率仪(美国 Spectrum Technologies 公司)测量土壤电导率。

1.3.3 土壤微生物 DNA 提取及测序 每个土壤样本取 0.5 g,使用天根土壤 DNA 提取试剂盒[天根生化科技(北京)有限公司]提取 DNA,使用 NanoDrop 2000 分光光度计(美国 Bio-Rad Laboratories 公司)检测 DNA 质量,然后使用稀释后的基因组 DNA (1 ng·μL<sup>-1</sup>)进行 PCR 扩增。使用引物 F515(5′-GTGCCAGCMGCCGCGTAA-3′)和 R806(5′-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3′)扩增细菌 16S rRNA V4 区基因<sup>[21]</sup>,使用引物 ITS5-1737F(5′-GGAAGTAAAGTCGTAACAAGG-3′)和 ITS2-2043R(5′-GCTGCGTCTTCATCGATGC-3′)扩增真菌 ITS1 区基因<sup>[22]</sup>,然后使用质量体积分数 2% 琼脂糖凝胶电泳检测 PCR 产物,最后使用 MinElute 凝胶回收试剂盒(德国 Qiagen 公司)回收目的条带。回收产物委托诺禾致源生物科技有限公司进行扩增子测序。

1.3.4 土壤微生物生物信息学分析 使用 fastp 软件对得到的 raw tag 进行质控,得到高质量 clean tag,之后使用 Vsearch 软件将 clean tag 与数据库比对去除嵌合体<sup>[23]</sup>,最终得到有效数据(effective tag)。使用 QIIME2 软件对得到的 effective tag 降噪并过滤掉丰富度小于 5 的序列,从而获得最终的扩增子序列变异(ASV)以及特征表。使用 Silva138.1 数据库注释 16S rRNA V4 区域<sup>[24]</sup>,使用 UNITEv8.2 数据库注释 ITS1 区域<sup>[25]</sup>,从而得到每个 ASV 的物种信息<sup>[26]</sup>;每个 ASV 比对到的该物种序列数即为该物种的丰富度,每个物种的序列数与该样本中所有物种总序列数的比值为该物种的相对丰富度。使用 FAPROTAX 软件预测细菌功能<sup>[27]</sup>,使用 FunGuild 软件预测真菌功能<sup>[28-29]</sup>;使用 R 4.0.3 软件计算各样本在某个分类上的 Z 值,计算公式为 Z 值=(某一样本在该分类上的相对丰富度-所有样本在该分类上的平均相对丰富

度)/所有样本在该分类上的标准差,并进行聚类分析,细菌和真菌均展示前30个注释功能。原始数据上传至NCBI中的SRA数据库(<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>),BioProject号为PRJNA962702。

#### 1.4 数据处理和分析

使用SPSS 16.0软件对植株地下部生物量以及土壤的有机质含量、pH值、电导率以及细菌和真菌的Shannon-Wiener多样性指数进行方差齐性检验(Levene检验,  $P > 0.05$ )后进行单因素方差分析,检验组间差异显著性。使用QIIME2软件中的Anosim函数分析草坪草种植样地土壤中细菌和真菌群落结构与对照样地间的差异显著性<sup>[30]</sup>;使用QIIME2软件计算细菌和真菌的Shannon-Wiener多样性指数以及组间差异显著的功能细菌和真菌(固氮细菌、丛枝菌根真菌和粪腐生菌)的相对丰富度。对组间差异显著的功能细菌和功能真菌相对丰富度的组间差异显著性进行非参数wilcox秩和检验。使用R 4.0.3软件对

细菌和真菌多样性以及功能菌丰富度与植株地下部生物量和土壤理化指标间进行Pearson相关性分析。

## 2 结果和分析

### 2.1 植株地下部生物量和土壤理化指标的比较

不同暖季型草坪草品种种植样地的植株地下部生物量和土壤理化指标见表1。结果显示:‘阳江’和‘苏植3号’种植样地植株地下部生物量分别为206.847和265.669  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,均显著高于对照样地(39.204  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ );‘阳江’和‘苏植3号’种植样地土壤有机质含量分别为12.122和10.378  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,均显著高于对照样地(8.418  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ );‘阳江’和‘苏植3号’种植样地土壤pH值分别为pH 8.15和pH 8.18,均显著低于对照样地(pH 8.56);‘阳江’和‘苏植3号’种植样地土壤电导率分别为13.04和14.33  $\mu\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ ,均显著低于对照样地(93.53  $\mu\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ )。

表1 不同暖季型草坪草品种种植样地的植株地下部生物量和土壤理化指标<sup>1)</sup>

Table 1 Under-ground biomass of plant and soil physicochemical indexes of plots planted with different warm-season turfgrass cultivars<sup>1)</sup>

材料 Material	植株地下部生物量/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$ Under-ground biomass of plant	土壤有机质含量/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$ Organic matter content in soil	土壤pH值 Soil pH value	土壤电导率/ $(\mu\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$ Soil electric conductivity
对照 The control	39.204±2.842c	8.418±0.413b	8.56±0.08a	93.53±5.47a
阳江 Yangjiang	206.847±23.982b	12.122±0.694a	8.15±0.05b	13.04±1.06b
苏植3号 Suzhi No. 3	265.669±16.963a	10.378±0.640a	8.18±0.03b	14.33±0.87b

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ) Different lowercases in the same column indicate the significant ( $P < 0.05$ ) differences.

### 2.2 土壤细菌和真菌群落结构的比较

Anosim分析结果显示:‘阳江’和‘苏植3号’种植样地土壤中细菌群落结构与对照样地差异显著, $P$ 值分别为0.030和0.035;‘阳江’和‘苏植3号’种植样地土壤中真菌群落结构与对照样地也差异显著, $P$ 值分别为0.030和0.026。

结果(表2)显示:‘阳江’和‘苏植3号’种植样地土壤中细菌的Shannon-Wiener多样性指数分别为10.473和10.433,均显著高于对照样地(9.848);‘阳江’和‘苏植3号’种植样地土壤中真菌的Shannon-Wiener指数分别为5.250和5.133,均高于对照样地(4.744),但差异不显著。‘阳江’和‘苏植3号’种植

表2 不同暖季型草坪草品种种植样地土壤的微生物多样性和功能微生物相对丰富度<sup>1)</sup>

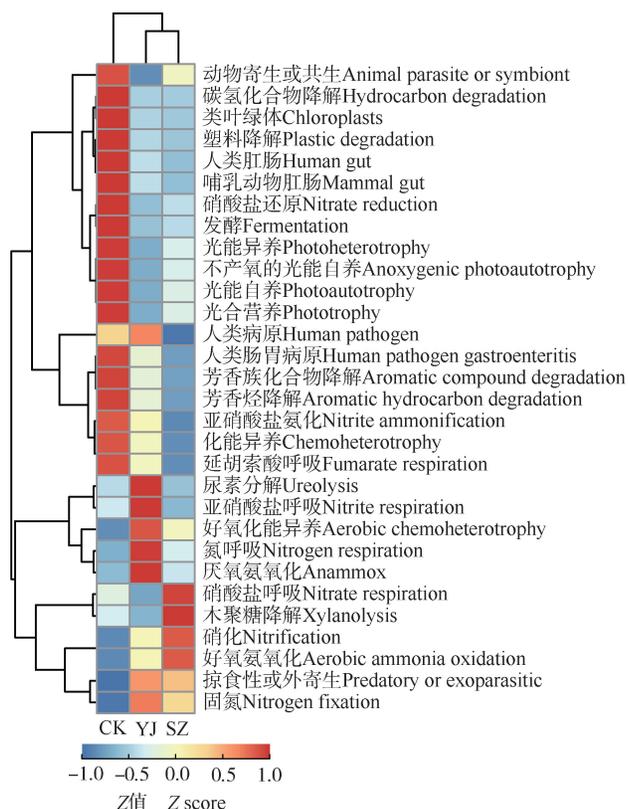
Table 2 Microbial diversity and relative abundance of functional microbiology in soil of plots planted with different warm-season turfgrass cultivars<sup>1)</sup>

材料 Material	Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index		相对丰富度 Relative abundance		
	细菌 Bacterium	真菌 Fungus	固氮细菌 Nitrogen fixation bacterium	丛枝菌根真菌 Arbuscular mycorrhizal fungus	粪腐生真菌 Dung saprotroph fungus
对照 The control	9.848±0.244b	4.744±0.399a	0.000 90±0.000 30b	0.000 52±0.000 04b	0.000 30±0.000 17b
阳江 Yangjiang	10.473±0.030a	5.250±0.270a	0.003 10±0.000 44a	0.007 34±0.003 71a	0.013 91±0.006 88a
苏植3号 Suzhi No. 3	10.433±0.008a	5.133±0.437a	0.002 50±0.000 65a	0.011 91±0.004 90a	0.007 18±0.002 43a

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ) Different lowercases in the same column indicate the significant ( $P < 0.05$ ) differences.

样地土壤中固氮细菌的相对丰富度分别为 0.003 10 和 0.002 50, 均显著高于对照样地(0.000 90); ‘阳江’和‘苏植 3 号’种植样地土壤中丛枝菌根真菌的相对丰富度分别为 0.007 34 和 0.011 91, 均显著高于对照样地(0.000 52); ‘阳江’和‘苏植 3 号’种植样地土壤中粪腐生真菌的相对丰富度分别为 0.013 91 和 0.007 18, 均显著高于对照样地(0.000 30)。

结果(图 1 和图 2)还显示: 总体上看, ‘阳江’和‘苏植 3 号’种植样地土壤中相同功能细菌类群的丰富度较为接近, 二者与对照样地土壤中相同功能细菌类群的丰富度差异均较大, 说明‘阳江’和‘苏植 3 号’种植样地土壤中功能细菌类群关系较近, 二者与对照样地的关系均较远; 对照样地以及‘阳江’和‘苏植 3 号’种植样地间土壤中相同功能真菌类群的丰富度差异均较大, 说明 3 种样地土壤中功能真菌类群关系均较远。



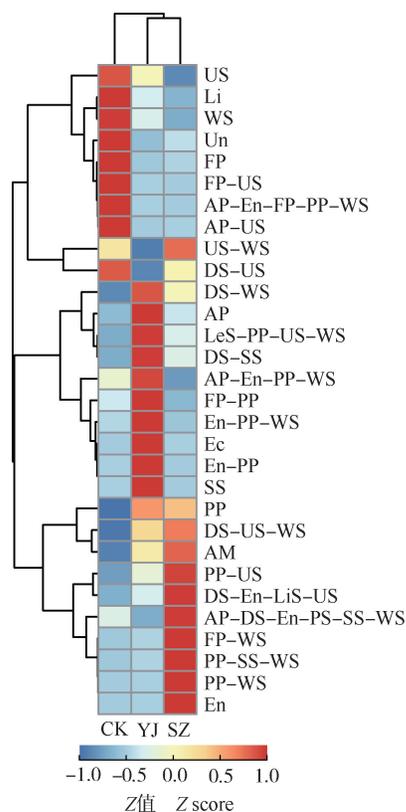
CK: 对照 The control; YJ: ‘阳江’ ‘Yangjiang’; SZ: ‘苏植 3 号’ ‘Suzhi No. 3’.

图 1 不同暖季型草坪草品种种植样地土壤中细菌功能类群的聚类热图

Fig. 1 Clustering heatmap of functional groups of bacteria in soil of plots planted with different warm-season turfgrass cultivars

### 2.3 微生物多样性和功能微生物丰富度与植株地下部生物量和土壤理化指标的相关性分析

结果(表 3)显示: 细菌 Shannon-Wiener 多样性指数与植株地下部生物量和土壤有机质含量呈显著正相关, 与土壤 pH 值和土壤电导率呈极显著负相关, 相关系数分别为 0.671、0.662、-0.830 和 -0.789; 固氮细菌相对丰富度与植株地下部生物量呈极显著正相关, 与土壤 pH 值和土壤电导率呈显著负相关, 相关系数分别为 0.734、-0.621 和 -0.705; 丛枝菌根真菌相对丰富度与植株地下部生物量呈显著正相关, 相关系数为 0.653; 粪腐生真菌相对丰富度与土壤 pH 值呈显著负相关, 相关系数为 -0.616。说明植株地下部生物量和土壤理化性质明显影响细菌多样性, 植株



CK: 对照 The control; YJ: ‘阳江’ ‘Yangjiang’; SZ: ‘苏植 3 号’ ‘Suzhi No. 3’. US: 未定义腐生 Undefined saprotroph; Li: 地衣型 Lichenized; WS: 木腐生 Wood saprotroph; Un: 未指定功能 Unassigned; FP: 寄生真菌 Fungal parasite; AP: 动物病原 Animal pathogen; En: 内生 Endophyte; PP: 植物病原 Plant pathogen; DS: 粪腐生 Dung saprotroph; LeS: 叶腐生 Leaf saprotroph; SS: 土壤腐生 Soil saprotroph; Ec: 外生菌根 Ectomycorrhizal; AM: 丛枝菌根 Arbuscular mycorrhizal; LiS: 凋落物腐生 Litter saprotroph; PS: 植物腐生 Plant saprotroph.

图 2 不同暖季型草坪草品种种植样地土壤中真菌功能类群的聚类热图

Fig. 2 Clustering heatmap of functional groups of fungi in soil of plots planted with different warm-season turfgrass cultivars

表3 暖季型草坪草种植样地土壤中微生物多样性和功能微生物丰富度与植株地下部生物量和土壤理化指标的相关性分析

Table 3 Correlation analysis on microbial diversity and functional microbial abundance with under-ground biomass of plant and soil physicochemical indexes of plots planted with warm-season turfgrass

指标 <sup>1)</sup> Index <sup>1)</sup>	相关系数 <sup>2)</sup> Correlation coefficient <sup>2)</sup>			
	植株地下部生物量 Under-ground biomass of plant	土壤有机质含量 Organic matter content in soil	土壤 pH 值 Soil pH value	土壤电导率 Soil electric conductivity
S1	0.671 *	0.662 *	-0.830 **	-0.789 **
S2	0.422	0.428	-0.424	-0.257
A1	0.734 **	0.472	-0.621 *	-0.705 *
A2	0.653 *	0.415	-0.525	-0.554
A3	0.376	0.552	-0.616 *	-0.510

<sup>1)</sup> S1: 细菌 Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index of bacteria; S2: 真菌 Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index of fungi; A1: 固氮细菌相对丰富度 Relative abundance of nitrogen fixation bacteria; A2: 丛枝菌根真菌相对丰富度 Relative abundance of arbuscular mycorrhizal fungi; A3: 粪腐生真菌相对丰富度 Relative abundance of dung saprotroph fungi.

<sup>2)</sup> \* :  $P < 0.05$ ; \*\* :  $P < 0.01$ .

地下部生物量以及土壤的 pH 值和电导率明显影响部分功能细菌的丰富度,植株地下部生物量和土壤 pH 值明显影响部分功能真菌的丰富度。

### 3 讨论和结论

#### 3.1 暖季型草坪草地下部生物量及其对土壤有机质含量的影响

‘阳江’和‘苏植3号’为优良的暖季型草坪草品种,具有发达的地下茎和根系系统,在0~30 cm土层内盘根错节形成根结皮,具有非常强的水土保持能力<sup>[31-32]</sup>。本研究,‘阳江’和‘苏植3号’种植样地的植株地下部生物量均显著高于对照样地,且土壤有机质含量也显著高于对照样地。沿海滩涂地区盐碱含量高,养分匮乏,有机质含量偏低,土壤肥力低,一般绿化植物很难生长<sup>[33]</sup>。本项目组前期研究结果表明‘阳江’和‘苏植3号’可在重度盐碱地区种植并生长良好<sup>[17]</sup>,植株地下部生物量和土壤有机质含量的增加有利于土壤养分的增加,为植物生长提供需要的养分,增加土壤肥力,促进团粒结构的形成以及土壤微生物的生长<sup>[33-34]</sup>。本研究进一步证明了‘阳江’和‘苏植3号’具有较强的耐盐性以及高的生长密度,在江苏滨海盐碱地种植这2个品种有利于增加盐碱地土壤肥力,在盐碱地生态修复中具有重要作用。

#### 3.2 暖季型草坪草对土壤 pH 值和电导率的影响

比较2种暖季型草坪草种植样地和对照样地土

壤的 pH 值和电导率发现,‘阳江’和‘苏植3号’种植样地土壤的 pH 值和电导率均显著低于对照样地,对照样地土壤电导率为草坪草种植样地的6倍以上。土壤 pH 值降低可能是由‘阳江’和‘苏植3号’根系分泌物所致<sup>[35]</sup>,也可能是因为草坪草对土壤的覆盖抑制了碱性阳离子上移,具体原因还有待进一步深入研究。‘阳江’和‘苏植3号’均具有双细胞的盐腺,为泌盐植物,在盐碱地种植后,这2种草均会通过根系从土壤中吸收大量盐离子<sup>[36]</sup>,同时‘阳江’和‘苏植3号’具有超强的地面覆盖能力,成坪后会显著抑制盐碱地土壤返盐<sup>[37]</sup>,而土壤电导率与土壤盐度存在正相关关系<sup>[38-39]</sup>,土壤电导率的降低也伴随着土壤盐度的降低。因此,在盐碱地种植‘阳江’和‘苏植3号’后既降低了土壤 pH 值,又降低了土壤盐度,盐碱地土壤得到改良。

#### 3.3 暖季型草坪草对土壤微生物群落的影响

植物根系与土壤细菌互作会影响土壤细菌多样性<sup>[40]</sup>;植被类型不同还会影响土壤固氮细菌群落组成及丰富度<sup>[41]</sup>。相关研究结果<sup>[42-43]</sup>显示:植物的生物量和养分含量等与根际细菌群落多样性和组成呈显著相关。本研究中,‘阳江’和‘苏植3号’种植样地土壤中细菌群落结构与对照样地差异显著,其中,细菌 Shannon-Wiener 多样性指数和固氮细菌相对丰富度均显著高于对照样地;且细菌 Shannon-Wiener 多样性指数和固氮细菌相对丰富度与植株地下部生物量呈显著或极显著正相关。因此,推测造成以上差异的原因与植物物种和生物量不同有关。此外,有研究发现土壤的 pH 值和电导率也会影响土壤细菌群落<sup>[44-45]</sup>;土壤电导率与土壤盐度紧密相关,而土壤盐度与细菌多样性呈负相关<sup>[46-47]</sup>。相关性分析结果显示:细菌 Shannon-Wiener 多样性指数和固氮细菌相对丰富度与土壤 pH 值分别呈极显著和显著负相关,与土壤电导率也分别呈极显著和显著负相关。说明细菌多样性和固氮细菌丰富度的增加还可能是因为土壤的 pH 值和电导率降低。土壤细菌多样性的增加有利于调节植物生长发育、抑制病原菌和加速土壤中营养元素矿化,在加速土壤中能量转化和物质循环方面有重要的作用<sup>[48]</sup>。而土壤中固氮细菌不仅可以固定空气中的氮气,还可以产生植物激素促进植物生长<sup>[49]</sup>。因此,种植‘阳江’和‘苏植3号’可以改变样地土壤理化性质,进而增加土壤细菌多样性和固氮细菌丰富度,有利于增加土壤肥力和调节植物生长发育。

‘阳江’和‘苏植3号’种植样地土壤中真菌 Shannon-Wiener 多样性指数与对照样地差异不显著,但从枝菌根真菌和粪腐生真菌的相对丰富度显著高于对照样地,且丛枝菌根真菌相对丰富度与植株地下部生物量呈显著正相关,粪腐生真菌相对丰富度与土壤 pH 值呈显著负相关。这可能是因为丛枝菌根真菌与植物互利共生,丛枝菌根真菌从植物体中获得糖类养分供自身生长,也会帮助植物吸收土壤中的氮、磷等矿质营养<sup>[50-51]</sup>。同时也反映出丛枝菌根真菌丰富度的增加可能与植株地下部生物量增加有关,粪腐生真菌丰富度的增加可能与土壤 pH 值的降低有关。

种植其他耐盐植物也可改善盐碱地土壤理化性质或增加微生物多样性。例如:种植苜蓿 (*Medicago sativa* Linn.)、向日葵 (*Helianthus annuus* Linn.)、玉米 (*Zea mays* Linn.) 和多年生黑麦草可以降低盐碱地土壤的 pH 值和盐度,增加土壤有机质含量,其中种植玉米还可以增加土壤真菌多样性<sup>[52]</sup>; 种植费菜 (*Phedimus aizoon* Linn.) 和蒲公英 (*Taraxacum mongolicum* Hand.-Mazz.) 可以提高盐碱地土壤中细菌多样性<sup>[53]</sup>。与这些耐盐植物相比,暖季型草坪草的种植还可美化环境。江苏海岸线长,滨海盐碱地面积大,有着巨大的绿化需求,种植暖季型草坪草对该地区的滨海盐碱地具有重要意义。

综上所述,在江苏滨海盐碱地中种植‘阳江’和‘苏植3号’后显著增加了土壤有机质含量,降低了土壤的 pH、电导率和盐度,增加了细菌多样性和固氮细菌丰富度以及丛枝菌根真菌和粪腐生真菌的丰富度。因此,在江苏滨海盐碱地中种植这 2 个品种有利于增加土壤肥力和土壤细菌多样性,提高重要功能细菌和真菌的丰富度,且有利于美化环境,在盐碱地生态修复中具有重要作用。

#### 参考文献:

- [1] 左青松, 赵建明, 王宣山. 江苏沿海中度盐碱地油菜种植技术与施肥分析[J]. 中国农技推广, 2019, 35(增刊1): 94-95.
- [2] 张蛟, 冯芝祥, 崔世友, 等. 滩涂垦区不同盐分水平土壤的盐分动态及土壤因子变化[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(4): 836-842.
- [3] 沈响, 韩冷, 曹佳倩, 等. 4种水生植物修复对盐碱土壤理化性质、酶活性和微生物群落组成的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(23): 199-205.
- [4] 杜滢鑫, 谢宝明, 蔡洪生, 等. 大庆盐碱地九种植物根际土壤微生物群落结构及功能多样性[J]. 生态学报, 2016, 36(3): 740-747.
- [5] 范富, 张庆国, 马玉露, 等. 不同植物条件下盐碱地土壤微生物研究[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2017, 32(4): 336-341.
- [6] 李发明. 毛稗紫羊茅草坪草在河西盐碱地种植研究[J]. 草业科学, 1995, 12(2): 71-72.
- [7] 王海生, 夏宁, 段作亮. 盐碱地地区冷季型草坪草引种适应性研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2000, 24(增刊): 84-86.
- [8] 刘金荣, 谢晓蓉. 高寒盐碱地区冷季型草坪草引种适应性研究[J]. 草业科学, 2002, 19(6): 54-56.
- [9] 汤巧香. 天津盐碱地区冷季型草坪草的评价与筛选研究[J]. 四川草原, 2004(4): 49-52.
- [10] 赵丽萍, 姚志刚, 谢文军, 等. 盐生植物大穗结缕草种子萌发特性及其对盐旱胁迫的响应[J]. 北方园艺, 2017(19): 98-103.
- [11] GOAD D M, BAXTER I, KELLOGG E A, et al. Hybridization, polyploidy and clonality influence geographic patterns of diversity and salt tolerance in the model halophyte seashore paspalum (*Paspalum vaginatum*) [J]. Molecular Ecology, 2021, 30(1): 148-161.
- [12] 宗俊勤, 陈静波, 於朝广, 等. 部分暖季型草坪草品种(系)在沿海滩涂的生长适应性及其对土壤盐度的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2010, 19(3): 48-54.
- [13] CARROW R N, DUNCAN R R. Best Management Practices for Saline and Sodic Turfgrass Soils: Assessment and Reclamation [M]. Boca Raton: CRC Press, 2011: 158-192.
- [14] ZONG J, LI L, YAO X, et al. Performance of five typical warm-season turfgrasses and their influence on soil bacterial community under a simulated tropical coral island environment [J]. Land Degradation and Development, 2021, 32(14): 3920-3929.
- [15] 张婷婷. 杂交狗牙根(*C. dactylon* × *C. transvaalensis*) 离体匍匐茎贮藏保鲜关键技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008: 1-13.
- [16] 卫宏健, 杨文, 丁杰, 等. 控释肥对草坪质量与土壤性质的影响[J]. 草学, 2022(5): 45-52, 60.
- [17] 陈静波, 阎君, 姜燕琴, 等. 暖季型草坪草优良选系和品种抗盐性的初步评价[J]. 草业学报, 2009, 18(5): 107-114.
- [18] 陈静波, 阎君, 郭海林, 等. 暖季型草坪草大规模种质资源抗盐性评价指标的选择[J]. 草业科学, 2008, 25(4): 95-99.
- [19] 陈静波, 褚晓晴, 李珊, 等. 盐水平灌溉对 7 属 11 种暖季型草坪草生长的影响及抗盐性差异[J]. 草业科学, 2012, 29(8): 1185-1192.
- [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: 106-108.
- [21] CAPORASO J G, LAUBER C L, WALTERS W A, et al. Global patterns of 16S rRNA diversity at a depth of millions of sequences per sample[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(Suppl. 1): 4516-4522.
- [22] WHITE T J, BRUNS T, LEE S, et al. Amplification and Direct

- Sequencing of Fungal Ribosomal RNA Genes for Phylogenetics [M]. New York: Academic Press, 1990: 315-322.
- [23] HAAS B J, GEVERS D, EARL A M, et al. Chimeric 16S rRNA sequence formation and detection in Sanger and 454-pyrosequenced PCR amplicons[J]. Genome Research, 2011, 21: 494-504.
- [24] QUAIST C, PRUESSE E, YILMAZ P, et al. The SILVA ribosomal RNA gene database project: improved data processing and web-based tools[J]. Nucleic Acids Research, 2013, 41: 590-596.
- [25] NILSSON R H, LARSSON K-H, TAYLOR A F S, et al. The UNITE database for molecular identification of fungi: handling dark taxa and parallel taxonomic classifications [J]. Nucleic Acids Research, 2019, 47: 259-264.
- [26] KÖLJALG U, NILSSON R H, ABARENKOV K, et al. Towards a unified paradigm for sequence-based identification of fungi [J]. Molecular Ecology, 2013, 22: 5271-5277.
- [27] LOUCA S, PARFREY L W, DOEBELI M. Decoupling function and taxonomy in the global ocean microbiome[J]. Science, 2016, 353(6305): 1272-1277.
- [28] TEDERSOO L, BAHRAM M, PÖLME S, et al. Global diversity and geography of soil fungi [J]. Science, 2014, 346(6213): 1256688.
- [29] NGUYEN N H, SONG Z, BATES S T, et al. FUNGuild: an open annotation tool for parsing fungal community datasets by ecological guild[J]. Fungal Ecology, 2016, 20: 241-248.
- [30] GUO Z, WANG L, JIANG Z, et al. Comparison studies of epiphytic microbial communities on four macroalgae and their rocky substrates[J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, 176: 113435.
- [31] 王清奎, 张志国, 荆延德. 优良固土护坡植物——狗牙根的建立与管理技术[J]. 福建水土保持, 2001(3): 32-33.
- [32] 周在敏. 优良的水土保持植物——结缕草栽培技术要点[J]. 中国水土保持, 2000(1): 38.
- [33] 贺启珅, 陈大岭, 李邵宇, 等. 阴山北麓不同恢复年限弃耕地植物群落生物量与土壤养分变化[J]. 中国草地学报, 2022, 44(10): 30-37.
- [34] 宋春雨, 张兴义, 刘晓冰, 等. 土壤有机质对土壤肥力与作物生产力的影响[J]. 农业系统科学与综合研究, 2008, 24(3): 357-362.
- [35] GUYONNET J P, GUILLEMET M, DUBOST A, et al. Plant nutrient resource use strategies shape active rhizosphere microbiota through root exudation [J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 1662.
- [36] MARCUM K B, ANDERSON S J, ENGELKE M C. Salt gland ion secretion: a salinity tolerance mechanism among five zoysiagrass species[J]. Crop Science, 1998, 38: 806-810.
- [37] ZHANG J, ZHANG Z, CHEN J, et al. Estimating soil salinity with different fractional vegetation cover using remote sensing[J]. Land Degradation and Development, 2021, 32(2): 597-612.
- [38] 刘广明, 杨劲松. 土壤含盐量与土壤电导率及水分含量关系的试验研究[J]. 土壤通报, 2001, 32(专辑): 85-87.
- [39] 陈玲, 李民赞, 赵勇. 便携式土壤电导率测试仪改进设计及实验[J]. 农机化研究, 2009, 31(7): 175-177.
- [40] DELGADO-BAQUERIZO M, REICH P B, KHACHANE A N, et al. It is elemental: soil nutrient stoichiometry drives bacterial diversity [J]. Environmental Microbiology, 2017, 19(3): 1176-1188.
- [41] LIANG Y, PAN F, HE X, et al. Effect of vegetation types on soil arbuscular mycorrhizal fungi and nitrogen-fixing bacterial communities in a karst region [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23: 18482-18491.
- [42] KAVAMURA V N, ROBINSON R J, HUGHES D, et al. Wheat dwarfing influences selection of the rhizosphere microbiome [J]. Scientific Reports, 2020, 10: 1452.
- [43] SOUSA R M S, MENDES L W, ANTUNES J E L, et al. Diversity and structure of bacterial community in rhizosphere of lima bean [J]. Applied Soil Ecology, 2020, 150: 103490.
- [44] LAUBER C L, STRICKLAND M S, BRADFORD M A, et al. The influence of soil properties on the structure of bacterial and fungal communities across land-use types [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40: 2407-2415.
- [45] ZHAO S, LIU J J, BANERJEE S, et al. Soil pH is equally important as salinity in shaping bacterial communities in saline soils under halophytic vegetation [J]. Scientific Reports, 2018, 8: 4550.
- [46] JI M, KONG W, YUE L, et al. Salinity reduces bacterial diversity, but increases network complexity in Tibetan Plateau lakes[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2019, 95(12): fiz190.
- [47] YUE H, ZHAO L, YANG D, et al. Comparative analysis of the endophytic bacterial diversity of *Populus euphratica* Oliv. in environments of different salinity intensities [J]. Microbiology Spectrum, 2022, 10(3): 00500-22.
- [48] 陈秀蓉, 南志标. 细菌多样性及其在农业生态系统中的作用[J]. 草业科学, 2002, 19(9): 34-38.
- [49] 张美琴, 马建华, 赵月英, 等. 植物联合固氮菌及其促生作用研究进展[J]. 内蒙古农业科技, 2007(4): 80-83.
- [50] LANFRANCO L, BONFANTE P, GENRE A. The mutualistic interaction between plants and arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Microbiology Spectrum, 2016, 4(6): FUNK-0012-2016.
- [51] 陈保冬, 于萌, 郝志鹏, 等. 丛枝菌根真菌应用技术研究进展[J]. 应用生态学报, 2019, 30(3): 1035-1046.
- [52] LI F, GUO Y, WANG Z, et al. Influence of different phytoremediation on soil microbial diversity and community composition in saline-alkaline land [J]. International Journal of Phytoremediation, 2022, 24(5): 507-517.
- [53] LIU Y, SUN J, DAI X, et al. Response of soil bacterial community structure and function under two salt-tolerant plants in a coastal saline soil area of eastern Hebei Province of China [J]. International Journal of Phytoremediation, 2022, 24(8): 842-854.

(责任编辑:郭严冬)