

DOI: 10.5846/stxb202110142899

陈萍, 夏江宝, 王善龙, 李栋, 高芳磊, 赵万里, 马金昭. 黄河三角洲滨海滩涂不同密度柽柳林的土壤盐碱与养分特征. 生态学报, 2022, 42(24): 10180-10190.

Chen P, Xia J B, Wang S L, Li D, Gao F L, Zhao W L, Ma J Z. Variations in soil salinity and nutrient contents of *Tamarix chinensis* with different densities on the beach of the Yellow River Delta. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(24): 10180-10190.

黄河三角洲滨海滩涂不同密度柽柳林的土壤盐碱与养分特征

陈 萍^{1,2}, 夏江宝^{2,*}, 王善龙³, 李 栋⁴, 高芳磊², 赵万里², 马金昭²

1 山东农业大学林学院, 泰山森林生态系统国家定位观测研究站, 泰安 271018

2 滨州学院, 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 滨州 256603

3 东平县林业保护发展中心, 泰安 271504

4 滨州市城乡水务发展服务中心, 滨州 256603

摘要:为探讨黄河三角洲滨海滩涂不同密度柽柳林的土壤盐碱和养分特征,明确不同密度柽柳林的“盐谷”及“肥岛”效应,以黄河三角洲山东省滨州市北海新区滨海滩涂的低密度(1100 株/hm²)、中密度(4100 株/hm²)和高密度(7100 株/hm²)柽柳林为研究对象,测定分析不同密度柽柳林及柽柳植株周边不同位置的土壤 pH、电导率、速效氮、速效磷、速效钾、有机碳等指标。结果表明:(1)土壤电导率随林分密度增大表现为逐渐减小,在中、高密度柽柳林,土壤电导率分别比低密度降低 28.39%、55.74%;随距离柽柳植株远近不同,中、高密度柽柳林土壤电导率表现为根部<冠幅中心<冠幅边缘<株间空地,即中、高密度柽柳林出现“盐谷”效应,而低密度林分未出现。(2)土壤速效氮、速效磷和有机碳含量随林分密度增大表现出先增大后减小,在中、高密度柽柳林,柽柳植株周边不同位置的速效氮、速效磷和有机碳含量存在显著差异($P<0.05$),表现为根部>冠幅中心>冠幅边缘>株间空地,而低密度柽柳林差异不显著($P>0.05$);即中、高密度柽柳林出现“肥岛”效应,而低密度林分未出现。(3)中密度柽柳林在养分含量、养分富集率方面高于高密度,在盐分富集率方面低于高密度,具有更强的“肥岛”、“盐谷”效应。(4)不同密度柽柳林以及柽柳植株周边不同位置的土壤 pH 差异均不显著($P>0.05$)。林分密度显著影响土壤盐分及养分含量,中密度柽柳林具有显著提高土壤肥力的作用,高密度次之,而低密度较差。不同密度柽柳林的降盐作用表现为中、高密度较好,低密度较差。基于柽柳林改良土壤盐碱与养分的作用,建议黄河三角洲滨海滩涂柽柳合理的初植密度为 4100 株/hm²。

关键词:密度;土壤盐分;土壤养分;“肥岛”效应;柽柳;黄河三角洲

Variations in soil salinity and nutrient contents of *Tamarix chinensis* with different densities on the beach of the Yellow River Delta

CHEN Ping^{1,2}, XIA Jiangbao^{2,*}, WANG Shanlong³, LI Dong⁴, GAO Fanglei², ZHAO Wanli², MA Jinzhao²

1 College of Forestry, Shandong Agricultural University, Taishan Forest Ecosystem Research Station, Taian 271018, China

2 Binzhou University, Shandong Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou 256603, China

3 Dongping County Forestry Protection and Development Center, Taian 271504, China

4 Binzhou City Urban and Rural Water Development Service Center, Binzhou 256603, China

Abstract: This study aimed to explore the soil salinity and nutrient characteristics of different densities of *Tamarix chinensis* on the beaches of the Yellow River Delta, and to clarify the “salt valley” and “fertile island” effects of *T. chinensis* with

基金项目:国家自然科学基金重点项目-山东省联合基金项目(U2006215);山东省农业科技资金(林业科技创新)课题(2019LY006);泰山学者工程专项(TSQN201909152)

收稿日期:2021-10-14; 网络出版日期:2022-07-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiajb@163.com

different densities. This paper took the low-density (1100 trees/hm^2), medium-density (4100 trees/hm^2) and high-density (7100 trees/hm^2) *T. chinensis* near Binzhou Port in Shandong Province as the research object. Soil pH, electrical conductivity, available nitrogen, available phosphorus, available potassium and other indicators of *T. chinensis* of different densities and different locations around the plants were measured and analyzed. The results showed that: (1) the soil electrical conductivity gradually decreased with the increase of density. In medium and high density *T. chinensis* forests, the soil electrical conductivity was reduced by 28.39% and 55.74% respectively compared with low density; Varying with the distance from the *T. chinensis*, the soil electrical conductivity of medium and high density *T. chinensis* showed the root < canopy center < canopy brim < interspaces. That is, the “salt valley” effect appeared in the medium and high density *T. chinensis*, but the low-density *T. chinensis* effect did not appear. (2) The contents of soil available nitrogen, available phosphorus and soil organic carbon first increased and then decreased with the increase of forest density. In medium and high density *T. chinensis*, there were significant differences in the contents of available nitrogen, available phosphorus and soil organic carbon at different positions of the *T. chinensis* ($P < 0.05$), which was expressed as root < canopy center < canopy brim < interspaces, while there was no significant difference in low-density *T. chinensis* ($P > 0.05$). The medium and high density *T. chinensis* had a “fertile island” effect, but the low-density *T. chinensis* did not appear. (3) Medium-density *T. chinensis* was higher than high-density in terms of nutrient content and nutrient enrichment rate, and lower than high-density in terms of salt enrichment rate. It had stronger “fertile island” and “salt valley” effects. (4) There was no significant difference in soil pH between different densities of *T. chinensis* and different positions around the plants ($P > 0.05$). Forest density significantly affected soil salinity and nutrient content. Medium-density *T. chinensis* had a better effect on improving soil fertility, followed by high-density, and low-density was worse. The salt reduction effect of *T. chinensis* with different densities was better in medium and high densities, and worse in low densities. Based on the effect of *T. chinensis* on improving soil salinity and nutrients, it is suggested that the reasonable initial planting density of *T. chinensis* on the beaches of the Yellow River Delta was 4100 trees/hm^2 .

Key Words: density; soil salinity; soil nutrient; fertilizer island effect; *Tamarix chinensis*; Yellow River Delta

林分密度是影响林木生长的重要因子,不仅对环境资源分配和种内竞争起到非常重要的作用,而且对土壤理化性质和养分循环等有显著影响^[1-2]。密度和植物-土壤反馈有关,植物对密度具有依赖性^[3-4],Carson等^[4]发现 125 种植物中有 40%表现出密度依赖性死亡。适宜的林分密度可以改善土壤结构,提高生物产量。研究表明,莱州湾南岸滩涂中密度(3600 株/hm^2)柽柳林改良土壤、修复植被的效果相对最佳^[5]。柽柳生长能对土壤状况产生影响,而改善的立地土壤环境又有利于柽柳生长、更新和扩散,从而土壤与柽柳之间形成了正反馈作用机制,易出现“肥岛”效应^[6]。“肥岛”是指土壤养分在生物与非生物过程作用下富集于灌木周围,表现为土壤养分含量由冠内向冠外逐渐递减的现象。“肥岛”效应和植被的生长发展相互促进,对改善柽柳灌丛下的土壤肥力以及植物的更新和扩散具有重要意义^[7-8]。土壤盐碱状况是衡量盐碱土理化性质的基础,也是土壤肥力的重要影响因素之一^[9]。因黄河三角洲泥质海岸带地下水位浅且矿化度高,降雨量少、蒸发量大和海水入侵等因素影响,导致滨海滩涂地带土壤盐渍化严重,植物不易在中重度盐碱区生存,利用耐盐植物进行生态修复可以有效改善滨海盐渍土壤的结构,抑制土壤盐碱化;另一方面生态环境的改善能为其它植物的定居和生长繁衍提供必要条件,对盐碱地的改良与植被恢复具有重要意义^[10-11]。柽柳是泌盐植物,具有富集土壤盐分、改良土壤等作用,柽柳能通过吸收土壤盐分调节自身渗透压,从而适应高盐度环境下的生长生存。种植柽柳后冠下土壤的含盐量低于周围土壤的现象称为“盐谷”效应。“盐谷”效应的出现表明柽柳林对土壤盐分有迁移、疏导作用。但也有研究发现,柽柳林并未对林下草本群落表现出明显的“肥岛”、“盐谷”效应^[12]。位于黄河三角洲区域的山东省滨州市泥质海岸带滨州港林场分布着大面积柽柳天然群落,对改善区域生态环境状况和维护海岸带生态系统稳定发挥着重要作用。目前对黄河三角洲柽柳的研究主要集中在滨

海湿地怪柳种群空间分布格局^[13-15]、怪柳群落的土壤环境特征^[16-18]、怪柳林生长动态对密度结构的响应特征^[10]、不同密度怪柳林地土壤调蓄水功能^[19]以及怪柳林湿地肥岛效应研究^[6]等方面。但关于滨海滩涂不同怪柳林分密度条件下是否存在“盐谷”、“肥岛”效应以及怪柳林土壤养分、盐分富集作用强度的差异尚不清楚,导致该区域怪柳林分密度调控以及怪柳林生态保护和抚育提升管理存在一定困难。因此,探明黄河三角洲滨海滩涂不同密度怪柳林的土壤盐碱和养分特征,明确何种密度下土壤降盐抑碱和改善土壤养分效果好,对怪柳林分密度调整、管护和土壤改良等都具有一定指导意义。

本研究以 3 种不同林分密度的怪柳林为研究对象,测定分析不同密度怪柳林及怪柳植株周边不同位置的土壤盐碱状况、养分特征等指标,探讨不同密度怪柳林是否具有明显的“盐谷”、“肥岛”效应,明确不同密度怪柳林对土壤的改良作用,研究结果可为泥质海岸带滨海滩涂怪柳灌丛的生态保护以及低效怪柳林的密度调控管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于渤海湾西南岸的山东省滨州市北海新区黄河三角洲东南部的滨州港林场(38°9′51″—38°10′44″N, 118°2′15″—118°4′32″E),研究区总面积达 5.58 km²。该区域为暖温带半湿润地区,大陆性季风气候,年平均气温为 12.6℃,年平均无霜期为 203 d,年平均日照时间为 2850 h,年平均降水量 543.2 mm,年平均蒸发量 1806 mm,降水集中在 6—9 月,占年降水量的 75%。研究区地下水位浅、矿化度高;地貌属于滨海缓平低地,地形低洼平缓,海拔为 0.5—1.0 m,坡度为 0.1‰—0.2‰;滩涂土壤为冲积性黄土母质,以粉砂和淤泥质粉砂为主,沙粘相间,易于压实,通气透水性差;滩涂主要分布有怪柳和芦苇(*Phragmites australis*)、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、鹅绒藤(*Cynanchum chinense*)等植物。该怪柳群落是自然演替形成,主要由盐地碱蓬逐步过渡到怪柳群落,盐地碱蓬的生长起到了降盐改土作用,增加了土壤有机质含量,为怪柳群落生长创造了条件。该区域地貌类型为滨海滩涂地带,土壤来源于黄河沉积物携大量泥沙淤海造陆形成的,即为冲积性黄土母质在海浸母质上沉淀而成。

1.2 样品采集与处理

野外采样时间为 2019 年 8 月,在山东省滨州市北海新区的滨州港林场,选取林龄为 5 a 的怪柳林地作为采样地,根据前期课题组对该区域的调查,针对怪柳生长密度情况,以低密度(1100 株/hm²)、中密度(4100 株/hm²)、高密度(7100 株/hm²)三种林分密度的怪柳林为研究对象,采样点布设见图 1,其中低、中、高密度怪柳林面积分别为 1.25 km²、1.60 km²、1.17 km²。每种密度怪柳林各设置 3 个 20 m×20 m 的标准地(低密度怪柳林采样点分别为 L1、L2、L3;中密度怪柳林采样点分别为 M1、M2、M3;高密度怪柳林采样点分别为 H1、H2、H3),共 9 个样地,调查样地的生境条件基本一致(坡向、坡度、海拔等),在每块样地内沿对角线设置 3 个 5 m×5 m 的灌木小样方,分别记录样方内每株怪柳株高、冠幅、盖度等指标,并根据株高、冠幅等指标在样方内选择长势均匀、生长良好的 3 株怪柳标准木,即每

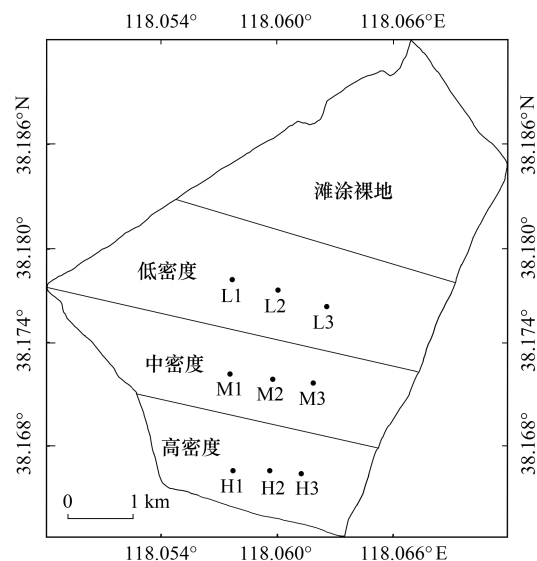


图 1 不同密度怪柳林采样点位图

Fig. 1 Schematic map of sampling sites of *Tamarix chinensis* under different density shrubs

L: 低密度怪柳林采样点 Sampling sites of low-density *T. chinensis*; M: 中密度怪柳林采样点 Sampling sites of medium-density *T. chinensis*; H: 高密度怪柳林采样点 Sampling sites of high-density *T. chinensis*

个密度下选择 9 株标准木,不同密度怪柳的形态特征见表 1。

在每个样方中,以怪柳灌丛为圆心,在怪柳主根部位、冠幅中心(根部与灌丛边缘之间的中心)、冠幅边缘(灌丛冠幅在地表垂直投影的位置)和株间空地(灌丛之间的裸地)共 4 个不同位置(图 2),分别取不同方位(东、西、南、北) 0—20 cm 土壤深度的 4 个土样,每 4 个不同方位的土样均匀混合后作为一个样株位置的土壤样品,装入自封袋带回实验室,经自然风干后去除植物残体和石块,测定其土壤盐碱及养分指标。怪柳周边各位置 9 (3×3) 个土样,共 36 (4×3×3) 个土样。

表 1 不同密度怪柳林的基本参数

Table 1 Basic parameters of *Tamarix chinensis* under different density shrubs

密度 Density	平均树高 Mean tree height/cm	东西冠幅 East-west crown/cm	南北冠幅 North-south crown/cm	基径 Base diameter/cm	盖度 Coverage/%
低密度 Low density	155.23±8.03	150.33±9.00	155.38±10.02	3.83±1.55	52.37±5.01
中密度 Medium density	170.48±10.35	183.27±14.52	193.25±14.20	4.34±1.38	80.48±4.22
高密度 High density	185.00±15.21	170.30±13.05	180.19±11.05	3.90±1.70	90.49±6.19

1.3 土壤样品的测定

采用电位法测定土壤 pH(水土比 5:1 浸提);采用电导率仪(HANNA, HI8733)测定土壤浸提液(水土比 5:1)电导率;采用碱解扩散法测定土壤速效氮含量;采用钼锑抗比色法测定土壤样品的速效磷含量;采用醋酸铵-火焰光度计法测定土壤速效钾含量;采用 TOC 分析仪(V_{Series} SSM-5000A)测定土壤有机碳含量。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 和 SPSS 22.0 软件对土壤盐碱及养分指标等进行统计分析,采用 Origin 2018 软件作图。运用单因素(one-way ANOVA)和 Duncan 法进行方差分析($\alpha=0.05$),比较怪柳根部、冠幅中心、冠幅边缘、株间空地之间土壤盐碱和养分含量差异,以及不同密度怪柳土壤盐碱和养分含量及其富集率的差异。图表中数据为 9 次重复的平均值±标准差,各指标相关性采用 Pearson 相关分析。

富集率可以用来表示土壤养分、盐分富集程度^[20]。 $E_A=A/D$,表示怪柳根部养分、盐分富集状况; $E_B=B/D$,表示怪柳冠幅中心养分、盐分富集状况; $E_C=C/D$,反映怪柳冠幅边缘土壤养分、盐分富集状况。其中 A、B、C、D 分别表示根部、冠幅中心、冠幅边缘、株间空地的土壤养分或盐分含量。

2 结果与分析

2.1 不同密度怪柳林及其怪柳植株周边不同位置的土壤盐碱含量

由图 3 可知,相同密度怪柳林植株周边不同位置的土壤电导率差异显著($P<0.05$)。低密度下,怪柳林根部土壤电导率显著高于冠幅中心、冠幅边缘和株间空地,与根部相比,3 个位置分别降低 54.30%、33.82%、22.71%;中密度下,怪柳林土壤电导率表现为根部<冠幅中心<冠幅边缘<株间空地,与株间空地相比,分别降低 63.02%、52.10%、34.26%;高密度下,怪柳林根部土壤电导率与冠幅中心、冠幅边缘相比差异不显著($P>0.05$)。中、高密度怪柳林的土壤电导率整体表现出“根部和冠幅中心小、冠幅边缘大、株间空地更大”的特点。

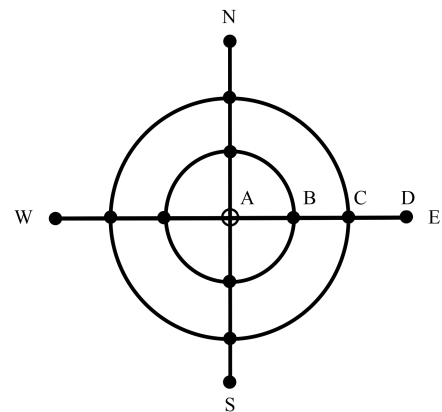


图 2 怪柳土壤采样示意图

Fig.2 Schematic diagram of *Tamarix chinensis* soil sampling

A: 怪柳根部 Root of *T. chinensis*; B: 冠幅中心 Canopy center; C: 冠幅边缘 Canopy brim; D: 株间空地 Interspaces

植株周边相同位置不同密度柽柳林的土壤电导率差异显著 ($P < 0.05$)。从根部来看,中、高密度柽柳林土壤电导率显著低于低密度,与低密度相比,根部土壤电导率分别降低 69.45%、75.04%;从冠幅中心来看,低、中密度柽柳林土壤电导率差异不显著 ($P > 0.05$),但显著高于高密度;从冠幅边缘来看,低、中密度柽柳林土壤电导率显著高于高密度,与高密度相比,分别增加 119.82%、80.28%;从株间空地来看,低密度柽柳林土壤电导率和中密度相比差异不显著 ($P > 0.05$),电导率均值大小表现为中密度 > 低密度 > 高密度。不同密度柽柳林地土壤电导率均值表现为低密度 > 中密度 > 高密度,中、高密度柽柳林土壤电导率分别比低密度降低 28.39%、55.74%。

由图 3 可知,相同密度柽柳林植株周边不同位置的土壤 pH 差异不显著 ($P > 0.05$),高密度柽柳林土壤 pH 出现根部和冠幅边缘的土壤 pH 高于株间空地的现象,而低、中密度柽柳林的土壤 pH 表现出根部和冠幅边缘低于株间空地。

植株周边相同位置不同密度柽柳林土壤 pH 差异也不显著 ($P > 0.05$),不同密度柽柳林土壤 pH 均值表现为中密度 > 高密度 > 低密度。

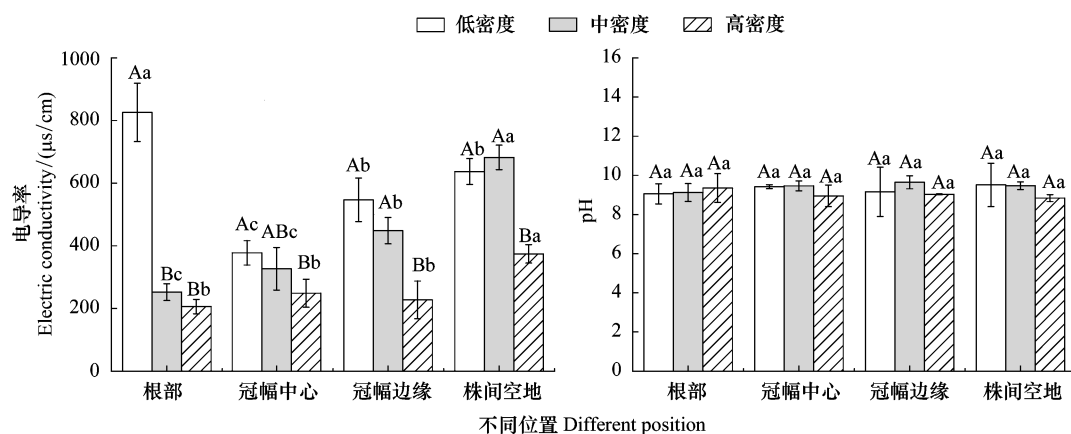


图 3 不同密度柽柳林及其柽柳植株周边不同位置的土壤电导率和 pH 含量

Fig.3 Soil electrical conductivity and pH content in different densities of *Tamarix chinensis* and different positions

不同大写字母者表示不同密度柽柳林植株周边相同位置差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示相同密度柽柳林植株周边不同位置差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 不同密度柽柳林的土壤养分含量

由图 4 可知,植株周边相同位置不同密度柽柳林土壤速效氮含量差异显著 ($P < 0.05$)。从根部来看,中、高密度柽柳林土壤速效氮含量显著高于低密度,与低密度相比,分别增加 88.59%、65.04%;从冠幅中心来看,不同密度柽柳林土壤速效氮含量差异显著 ($P < 0.05$),表现为中密度 > 高密度 > 低密度,与低密度相比,中、高密度分别增加 109.59%、46.36%;从冠幅边缘来看,中、高密度柽柳林土壤速效氮含量差异不显著 ($P > 0.05$),但显著高于低密度;从株间空地来看,低、中密度柽柳林土壤速效氮含量显著高于高密度,与高密度相比,分别增加 42.04%、18.03%。不同密度柽柳林地土壤速效氮含量均值表现为中密度 > 高密度 > 低密度,中、高密度柽柳林土壤速效氮含量分别比低密度增加 49.80%、25.83%。

由图 4 可知,植株周边相同位置不同密度柽柳林土壤速效磷含量差异显著 ($P < 0.05$),且均表现为中密度 > 高密度 > 低密度。不同密度柽柳林土壤速效磷含量均值表现为中密度 > 高密度 > 低密度,中、高密度柽柳林土壤速效磷含量分别比低密度增加 120.05%、58.48%。

由图 4 可知,植株周边相同位置不同密度柽柳林土壤速效钾含量差异显著 ($P < 0.05$)。从根部来看,中、高密度柽柳林土壤速效钾含量显著高于低密度,与低密度相比,分别增加 23.49%、40.44%;从冠幅中心来看,中、高密度柽柳林土壤速效钾含量差异不显著 ($P > 0.05$),但均显著高于低密度;从冠幅边缘来看,不同密度柽

柳林土壤速效钾含量差异显著 ($P<0.05$), 表现为高密度>中密度>低密度; 从株间空地来看, 中、高密度柽柳林土壤速效钾含量显著高于低密度, 分别比低密度增加 89.31%、67.77%。不同密度柽柳林土壤速效钾含量均值表现为中密度>高密度>低密度, 与低密度相比, 中、高密度分别增加 58.90%、65.34%。

由图 4 可知, 从根部来看, 不同密度柽柳林土壤有机碳含量差异显著 ($P<0.05$), 表现为中密度>高密度>低密度; 从冠幅中心来看, 中、高密度柽柳林土壤有机碳含量高于低密度, 与低密度相比, 分别增加 38.96%、16.78%; 从冠幅边缘和株间空地来看, 不同密度柽柳林土壤有机碳含量差异不显著 ($P>0.05$)。不同密度柽柳林土壤有机碳含量表现为中密度>高密度>低密度, 与低密度相比, 分别增加 65.05%、22.80%。

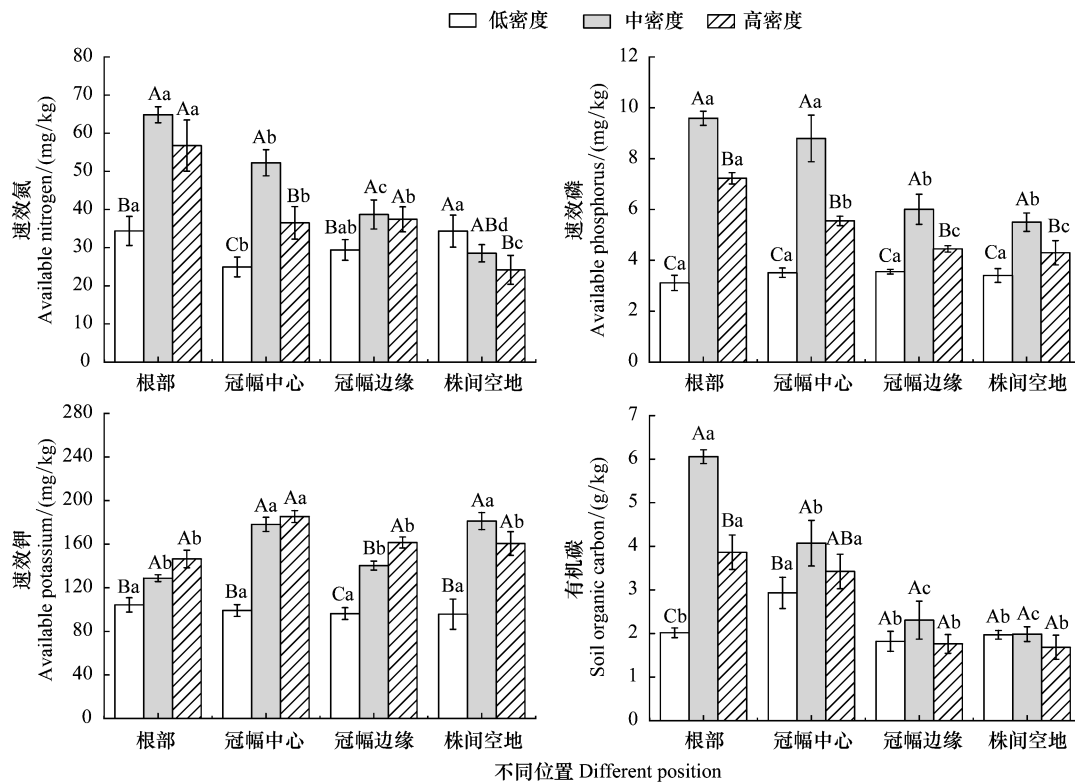


图 4 不同密度柽柳林及其柽柳植株周边不同位置的土壤养分含量

Fig.4 Soil nutrient content in different densities of *Tamarix chinensis* and different positions

2.3 不同密度柽柳林植株周边不同位置的土壤养分差异

由图 4 可知, 低密度下, 柽柳林根部速效氮、有机碳含量和冠幅边缘、株间空地差异不显著 ($P>0.05$), 但均高于冠幅中心; 柽柳林根部速效磷、速效钾含量与冠幅中心、冠幅边缘、株间空地均差异不显著 ($P>0.05$)。

中密度下, 柽柳植株周边不同位置的土壤速效氮含量差异显著 ($P<0.05$), 表现为根部>冠幅中心>冠幅边缘>株间空地, 与株间空地相比, 3 个位置分别增加 127.36%、83.22%、35.64%; 柽柳林根部速效磷含量显著高于冠幅边缘和株间空地, 与冠幅中心差异不显著 ($P>0.05$), 表现为根部>冠幅中心>冠幅边缘>株间空地; 柽柳林根部速效钾含量显著低于冠幅中心和株间空地, 与冠幅边缘相比差异不显著 ($P>0.05$); 不同位置柽柳林有机碳含量差异显著 ($P<0.05$), 表现为根部>冠幅中心>冠幅边缘>株间空地。

高密度下, 柽柳植株周边不同位置的土壤速效氮含量差异显著 ($P<0.05$), 表现为根部>冠幅中心>冠幅边缘>株间空地, 与株间空地相比, 3 个位置分别增加 134.78%、54.79%、50.97%; 柽柳林根部速效磷含量表现为根部>冠幅中心>株间空地>冠幅边缘; 柽柳林根部速效钾含量与冠幅边缘、株间空地差异不显著 ($P>0.05$); 不同位置柽柳林有机碳含量差异显著 ($P<0.05$), 表现为根部>冠幅中心>冠幅边缘>株间空地。

2.4 不同密度怪柳林及其怪柳植株周边不同位置的土壤盐碱及养分的富集率差异

由表 2 可知,从根部来看,低、中密度怪柳林土壤 pH 富集率显著低于高密度,与高密度相比,分别降低 8.65%、7.69%;不同密度怪柳林土壤电导率富集率差异显著 ($P<0.05$),表现为低密度>高密度>中密度;中、高密度怪柳林土壤速效氮富集率显著高于低密度,分别比低密度增加 1.27 倍、1.35 倍;中、高密度怪柳林土壤速效磷富集率显著高于低密度,与低密度相比,分别增加 0.82 倍、1.06 倍;不同密度怪柳林土壤速效钾富集率差异显著 ($P<0.05$),表现为低密度>高密度>中密度;不同密度怪柳林有机碳富集率差异显著 ($P<0.05$),表现为中密度>高密度>低密度。

从冠幅中心来看,土壤 pH 富集率差异不显著 ($P>0.05$);低、高密度怪柳林土壤电导率富集率显著高于中密度,与中密度相比,分别增加 31.11%、35.56%;土壤速效氮富集率差异显著 ($P<0.05$),具体表现为中密度>高密度>低密度;中密度怪柳林土壤速效磷富集率显著高于低密度,但与高密度差异不显著 ($P>0.05$);低、中密度怪柳林土壤速效钾富集率显著低于高密度,与高密度相比,分别降低 9.56%、14.78%;中、高密度怪柳林有机碳富集率显著高于低密度,表现为中密度>高密度>低密度。

从冠幅边缘来看,中密度怪柳林土壤 pH 富集率显著高于低密度,但与高密度相比差异不显著 ($P>0.05$);中、高密度怪柳林电导率富集率显著低于低密度,与低密度相比,分别降低 23.25%、20.93%;中、高密度怪柳林土壤速效氮富集率显著高于低密度,表现为高密度>中密度>低密度;土壤速效磷富集率差异不显著 ($P>0.05$);低、高密度怪柳林土壤速效钾含量显著高于中密度,与中密度相比,分别增加 29.87%、31.17%;中、高密度怪柳林有机碳富集率显著高于低密度,表现为中密度>高密度>低密度。

表 2 不同密度怪柳林及其怪柳植株周边不同位置的土壤盐碱和养分富集率

Table 2 Soil salinity and nutrient enrichment rates in different densities of *Tamarix chinensis* and different positions

土壤指标 Soil index	富集率 Enrichment rate	低密度 Low density	中密度 Medium density	高密度 High density
pH	E_A	0.95±0.03b	0.96±0.04b	1.04±0.02a
	E_B	0.99±0.03a	1.00±0.02a	1.01±0.03a
	E_C	0.96±0.01b	1.02±0.02a	1.03±0.03a
电导率 Electric conductivity	E_A	1.30±0.09a	0.37±0.02c	0.55±0.08b
	E_B	0.59±0.04a	0.45±0.09b	0.61±0.09a
	E_C	0.86±0.02a	0.66±0.04b	0.68±0.04b
速效氮 Available nitrogen	E_A	1.00±0.01b	2.27±0.28a	2.35±0.13a
	E_B	0.73±0.01c	1.83±0.08a	1.54±0.03b
	E_C	0.85±0.03b	1.36±0.17a	1.51±0.04a
速效磷 Available phosphorus	E_A	0.88±0.05b	1.60±0.37a	1.81±0.29a
	E_B	0.99±0.05b	1.47±0.32a	1.25±0.13ab
	E_C	0.96±0.03a	1.05±0.10a	1.03±0.13a
速效钾 Available potassium	E_A	1.09±0.03a	0.71±0.10c	0.91±0.11b
	E_B	1.04±0.01b	0.98±0.03b	1.15±0.04a
	E_C	1.00±0.04a	0.77±0.12b	1.01±0.08a
有机碳 Soil organic carbon	E_A	1.02±0.07c	3.06±0.15a	2.30±0.17b
	E_B	1.49±0.14b	2.06±0.15a	2.04±0.13a
	E_C	0.92±0.09b	1.16±0.09a	1.05±0.05ab

同行不同字母表示不同密度差异显著 ($P<0.05$); E_A : 根部富集率; E_B : 冠幅中心富集率; E_C : 冠幅边缘富集率

2.5 不同密度怪柳林植株周边不同位置土壤盐碱含量与养分的相关性分析

由表 3 可知,在怪柳根部,林分密度和电导率呈极显著负相关 ($P<0.01$),与速效钾呈极显著正相关 ($P<0.01$),与速效氮呈显著正相关 ($P<0.05$),与速效磷、有机碳相关性不显著。电导率和速效氮、速效磷、速效钾、有机碳呈极显著负相关 ($P<0.01$),表明土壤盐分与养分关系密切。速效氮和速效磷、有机碳呈极显著正

相关($P<0.01$),速效磷和有机碳呈极显著正相关($P<0.01$)。

在冠幅中心,林分密度与电导率呈极显著负相关($P<0.01$),与速效钾呈极显著正相关($P<0.01$),与其他指标相关性不显著。电导率和速效钾呈显著负相关($P<0.05$)。速效氮和速效磷、有机碳呈极显著正相关($P<0.01$),速效磷和速效钾、有机碳呈显著正相关($P<0.05$)。

在冠幅边缘,林分密度和电导率呈极显著负相关($P<0.01$),与速效钾含量呈极显著正相关($P<0.01$),与其他指标相关性不显著。速效氮和速效磷、速效钾呈显著正相关($P<0.05$)。

在株间空地,林分密度和电导率、速效氮呈显著负相关($P<0.05$),与速效钾呈显著正相关($P<0.05$),速效磷和速效钾呈显著正相关($P<0.05$)。

在柽柳根部、冠幅中心、冠幅边缘和株间空地,各土壤因子具有一定的相关性,但林分密度与速效磷、有机碳无显著相关性,与电导率呈极显著性负相关($P<0.01$),与速效钾呈极显著正相关($P<0.01$)。

表 3 柽柳植株周边不同位置土壤养分指标与盐碱指标相关系数矩阵

Table 3 Correlation coefficient matrix of soil nutrient index and salinity index at different positions around *Tamarix chinensis*

位置 Positions	指标 Index	FD	pH	E_c	AN	AP	AK	SOC
根部 Root	FD	1						
	pH	0.259	1					
	E_c	-0.894 **	-0.150	1				
	AN	0.696 *	0.306	-0.883 **	1			
	AP	0.638	0.036	-0.890 **	0.945 **	1		
	AK	0.892 **	0.070	-0.820 **	0.626	0.647	1	
	SOC	0.465	0.002	-0.790 **	0.880 **	0.967 **	0.504	1
冠幅中心 Canopy center	FD	1						
	pH	-0.471	1					
	E_c	-0.932 **	0.455	1				
	AN	0.426	0.112	-0.257	1			
	AP	0.389	0.087	-0.210	0.986 **	1		
	AK	0.892 **	-0.375	-0.725 *	0.714 *	0.708 *	1	
	SOC	0.384	0.384	-0.461	0.825 **	0.796 *	0.545	1
冠幅边缘 Canopy brim	FD	1						
	pH	-0.035	1					
	E_c	-0.807 **	-0.099	1				
	AN	0.661	-0.132	-0.368	1			
	AP	0.424	0.430	-0.210	0.744 *	1		
	AK	0.964 **	-0.017	-0.755 *	0.730 *	0.545	1	
	SOC	-0.253	0.239	0.252	0.463	0.504	-0.137	1
株间空地 Interspaces	FD	1						
	pH	-0.460	1					
	E_c	-0.760 *	0.454	1				
	AN	-0.811 *	0.599	0.552	1			
	AP	0.358	0.053	0.314	-0.357	1		
	AK	0.719 *	-0.053	-0.196	-0.518	0.790 *	1	
	SOC	-0.278	0.182	0.534	-0.181	0.441	0.027	1

FD: 林分密度 Forest density; EC: 电导率 Electric conductivity; AN: 速效氮 Available nitrogen; AP: 速效磷 Available phosphorus; AK: 速效钾 Available potassium; SOC: 有机碳 Soil organic carbon; * 表示在 $P<0.05$ 水平上相关性显著; ** 表示在 $P<0.01$ 相关性显著

3 讨论

3.1 不同密度柽柳林的土壤“盐谷”效应

土壤含盐量是影响黄河三角洲莱州湾湿地柽柳灌丛分布的主导因素^[14],土壤盐分分布与地下水、植物种类、植物根系和根分泌物等因素有关^[21-22]。柽柳林分密度和土壤电导率呈极显著负相关($P<0.01$) (表3),随林分密度增大,柽柳林土壤电导率显著降低。低密度柽柳林土壤电导率最大,可能是因为低密度柽柳林相邻的植株距离较远,林分郁闭度较低,导致地表蒸发作用增强,从而使得土壤盐分整体增大。而对滨海湿地不同密度柽柳林土壤调蓄水功能研究发现^[19],土壤含盐量均值大小表现为低密度>高密度>中密度,与本研究低密度>中密度>高密度的结果不一致,可能是因为本研究中中密度林分由于其靠近盐池和海水养殖池,及盐水侧渗等因素,使其电导率值高于高密度。

随着距离柽柳植株根部越远,中、高密度柽柳林土壤电导率逐渐增加,表现为根部<冠幅中心<冠幅边缘<株间空地。柽柳冠下盐分含量低于冠外的现象,表明中、高密度柽柳林出现了“盐谷”效应,这与徐梦辰^[6]对黄河三角洲湿地柽柳研究发现的柽柳冠下垂直深度0—10 cm、水平距离0—150 cm处形成了一个典型的“盐谷”区域的研究结果一致。柽柳冠下的这种“盐谷”效应形成,可能是由于柽柳为泌盐植物,可通过根系较强的吸收作用将大量盐分储存于体内^[5];其次,植物荫蔽作用以及柽柳发达根系的穿插作用等有助于土壤脱盐^[23-24],所以柽柳冠下土壤含盐量小于株间空地,出现了“盐谷”效应。从富集率来看(表2),中、高密度柽柳林电导率富集率均小于1,说明中、高密度柽柳林对土壤盐分具有降低、迁移和疏导作用。

不同密度柽柳林土壤pH差异不显著($P>0.05$),说明在黄河三角洲滨海滩涂研究区,密度对土壤pH并无显著影响。随着距离柽柳植株根部越远,低、中密度柽柳林土壤的pH表现出由根部向株间空地逐渐增加,但无显著差异($P>0.05$)。柽柳根部pH较低可能与根部微生物呼吸作用产生CO₂、根系分泌有机酸等有关^[8,12],这与李从娟等^[8]对荒漠灌木梭梭研究发现梭梭主根中心形成了一种高养分、低盐和低pH值的研究结果一致。从富集率来看(表2),低、中密度柽柳林土壤pH富集率更低,但差异不显著($P>0.05$)。

3.2 不同密度柽柳林的土壤“肥岛”效应

土壤养分是土壤肥力的重要物质基础,是植物进行生命活动的基本保证^[25-26]。董聿森等^[5]研究发现,林分密度对黄河三角洲莱州湾柽柳林的土壤铵态氮、硝态氮、速效钾、速效磷影响显著,并提出中密度可以提高土壤肥力,这与本文研究表明的随林分密度增大,柽柳林土壤养分含量表现为先增加后减小的结论一致,说明林分密度可以显著影响土壤养分含量。土壤养分在中密度最高,主要是因为随着林分密度的增大,凋落物增加,同时较多的柽柳根系降低了土壤的紧实程度,土壤孔隙度增大,微生物运动活跃,土壤养分开始表现出增加的趋势^[27]。但林分郁闭增加到一定值时,柽柳获取的光照资源减少,种间竞争激烈,凋落物分解速率和养分归还量下降,柽柳生长空间有限,导致柽柳生长受到一定限制,这时土壤养分随着林分密度增加而降低,所以中密度柽柳林土壤养分含量高于高密度。随着距离柽柳植株根部越远,中、高密度柽柳林土壤速效氮、速效磷含量表现为逐渐减小,即土壤养分含量由冠外向冠内汇集,这与干旱区河岸-荒漠过渡带梭梭(*Haloxylon ammodendron*)与胡杨(*Populus euphratica*)冠下“肥岛”效应^[28]、南疆绿洲-荒漠过渡带胡杨“肥岛”的养分特征^[29]研究结果一致。而低密度柽柳林植株周边不同位置的土壤养分含量差异不显著($P>0.05$),表明中、高密度柽柳林出现“肥岛”效应,而低密度柽柳林未出现“肥岛”效应。低密度柽柳林未出现“肥岛”效应,主要是因为低密度柽柳林地表植被覆盖度低,冠幅较小(表1),使空气中的大气沉降颗粒、土壤表层风蚀物质和枯枝落叶等不易富集在冠下,所以导致其产生的养分在不易土壤中聚集^[30-31];同时受海风吹蚀等影响,易将枯落物等吹散,使土壤养分不易在冠下聚集^[32]。

中、高密度柽柳林养分富集率大于1(表2),表明中、高密度柽柳林对土壤养分具有富集作用,且中密度柽柳林养分富集率均大于高密度,说明中密度的“肥岛”效应强于高密度,即中密度柽柳林富集土壤养分的能力最高。不同密度柽柳林土壤养分富集率差异的原因可能与柽柳所处的分布位置、土壤环境、柽柳形态特征

以及冠下有无低矮植物、生物量的空间格局等有关^[11,33-35]。中密度怪柳林生长较好,怪柳基径和冠幅生长最大(表1),具有适宜的多枝半球状冠幅,能使枯枝落叶等富集在冠下,易导致养分在土壤中聚集较高^[31];其次,土壤微生物数量、酶活性和土壤养分关系密切,中密度林分条件下,林下植被物种多样性较高^[36-37],土壤变得疏松透气,有利于土壤中微生物和其他动物的活动,进一步促进“肥岛”的发育^[21],所以中密度怪柳林“肥岛”效应强于高密度。不同密度怪柳林植株周边不同位置对土壤养分具有富集作用(表2),其中土壤养分富集率表现为根部>冠幅中心>冠幅边缘,说明怪柳根部“肥岛”效应最强,冠幅中心次之,冠幅边缘最差,这与黑河中游荒漠绿洲人工梭梭土壤养分特征^[38]、北疆荒漠植被梭梭立地土壤养分“肥岛”特征^[30]的研究结果一致。主要是因为随着到距离怪柳植株根部越远,其根系生物量逐渐减少^[39],植物的吸收累积作用减弱,所以富集率逐渐减小。

4 结论

林分密度可显著影响怪柳林土壤盐分及养分含量。随林分密度增大,怪柳林土壤电导率显著降低,土壤速效氮、速效磷、速效钾、有机碳含量表现出先增大后减小。随距离怪柳植株根部越远,中、高密度怪柳林土壤电导率逐渐增加,即中密度、高密度怪柳林出现“盐谷”效应,低密度怪柳林未出现“盐谷”效应。不同密度怪柳林降盐作用表现为中、高密度较好,低密度较差。在中、高密度怪柳林,怪柳植株周边不同位置的土壤养分存在显著差异($P<0.05$),低密度差异不显著($P>0.05$),即中密度、高密度怪柳林出现“肥岛”效应,低密度怪柳林未出现“肥岛”效应。中密度怪柳林在土壤养分含量、富集率方面高于高密度,具有更强的“肥岛”和“盐谷”效应。

中密度怪柳林具有较好的提高土壤肥力作用,高密度次之,而低密度较差,不同密度怪柳林的降盐作用表现为中、高密度较好,低密度较差。从改善土壤养分和降盐抑碱的角度,建议黄河三角洲滨海滩涂怪柳合理的初植密度为 4100 株/hm²。

参考文献 (References):

- [1] 赵连春, 赵成章, 陈静, 王继伟, 李群. 秦王川湿地不同密度怪柳枝-叶性状及其光合特性. 生态学报, 2018, 38(5): 1722-1730.
- [2] 魏强, 凌雷, 柴春山, 张广忠, 闫沛斌, 陶继新, 薛睿. 甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质. 生态学报, 2012, 32(15): 4700-4713.
- [3] Comita L S, Queenborough S A, Murphy S J, Eck J L, Xu K Y, Krishnadas M, Beckman N, Zhu Y. Testing predictions of the Janzen-Connell hypothesis: a meta-analysis of experimental evidence for distance-and density-dependent seed and seedling survival. Journal of Ecology, 2014, 102(4): 845-856.
- [4] Carson W P, Anderson J T, Leigh Jr E G, Schnitzer S A. Challenges associated with testing and falsifying the Janzen-Connell hypothesis: a review and critique. Trop Forest Community Ecology, 2008; 210-241.
- [5] 董聿森, 夏江宝, 陆兆华, 刘京涛, 宋爱云, 房颖. 莱州湾南岸高、中和低密度怪柳林地土壤理化特征. 湿地科学, 2019, 17(4): 470-477.
- [6] 徐梦辰. 黄河三角洲湿地怪柳种群分布格局及其肥岛效应研究[D]. 聊城: 聊城大学, 2016.
- [7] Fuhlendorf S D, Engle D M. Restoring heterogeneity on rangelands: ecosystem management based on evolutionary grazing patterns. BioScience, 2001, 51(8): 625-632.
- [8] 李从娟, 马健, 李彦, 李惠. 梭梭和白梭梭主根周围土壤养分的梯度分布. 中国沙漠, 2011, 31(5): 1174-1180.
- [9] 孙佳, 夏江宝, 苏丽, 赵西梅, 陈印平, 岳喜元, 李传荣. 黄河三角洲盐碱地不同植被模式的土壤改良效应. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1323-1332.
- [10] 夏江宝, 陆兆华, 孔雪华, 刘京涛, 韩瑞东, 朱金方. 黄河三角洲湿地怪柳林生长动态对密度结构的响应特征. 湿地科学, 2012, 10(3): 332-338.
- [11] 孙佳, 夏江宝, 董波涛, 高芳磊, 陈萍, 赵万里, 李传荣. 黄河三角洲滨海滩涂不同密度怪柳林的根系形态及生长特征. 生态学报, 2021, 41(10): 3775-3783.
- [12] Zhou D Y, Guo W H, Li M Y, Eller F, Zhang C Y, Wu P, Yi S J, Yang S R, Du N, Yu X N, Guo X. No fertile island effects or salt island effects of *Tamarix chinensis* on understory herbaceous communities were found in the coastal area of Laizhou Bay, China. Wetlands, 2020, 40(6): 2679-2689.

- [13] Jiang Z M, Chen Y X, Bao Y. Population genetic structure of *Tamarix chinensis* in the Yellow River Delta, China. *Plant Systematics and Evolution*, 2012, 298(1): 147-153.
- [14] 夏江宝, 赵西梅, 刘俊华, 赵自国, 刘庆, 陈印平. 黄河三角洲莱州湾湿地柽柳种群分布特征及其影响因素. *生态学报*, 2016, 36(15): 4801-4808.
- [15] Zhu Z, Zhang L Y, Gao L X, Tang S Q, Zhao Y, Yang J. Local habitat condition rather than geographic distance determines the genetic structure of *Tamarix chinensis* populations in Yellow River Delta, China. *Tree Genetics & Genomes*, 2016, 12(1): 1-9.
- [16] Rong Q Q, Liu J T, Cai Y P, Lu Z H, Zhao Z Z, Yue W C, Xia J B. "Fertile island" effects of *Tamarix chinensis* Lour. on soil N and P stoichiometry in the coastal wetland of Laizhou Bay, China. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(3): 864-877.
- [17] Sun L K, Liu W Q, Liu G X, Chen T, Zhang W, Wu X K, Zhang G S, Zhang Y H, Li L, Zhang B G, Zhang B L, Wang B, Yang R Q. Temporal and spatial variations in the stable carbon isotope composition and carbon and nitrogen contents in current-season twigs of *Tamarix chinensis* Lour. and their relationships to environmental factors in the Laizhou Bay wetland in China. *Ecological Engineering*, 2016, 90: 417-426.
- [18] Jiao S Y, Li J R, Li Y Q, Jia J W, Xu Z Y. Soil C, N, and P distribution as affected by plant communities in the Yellow River Delta, China. *Plos One*, 2019, 14(12): e0226887.
- [19] 夏江宝, 孔雪华, 陆兆华, 刘京涛, 韩瑞东, 朱金方. 滨海湿地不同密度柽柳林土壤调蓄水功能. *水科学进展*, 2012, 23(5): 628-634.
- [20] Li X Y, Liu L Y, Gao S Y, Ma Y J, Yang Z P. Stemflow in three shrubs and its effect on soil water enhancement in semiarid loess region of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(10): 1501-1507.
- [21] 许婕, 陈永金, 刘加珍. 盐生植物灌丛对土壤养分和盐分空间分布的影响及其机制研究进展. *安徽农业科学*, 2020, 48(1): 19-23, 69.
- [22] 苏丽, 董波涛, 孙佳, 赵西梅, 吴春红, 夏江宝. 地下水位对黄河三角洲柽柳根系生长的影响. *生态学报*, 2021, 41(10): 3794-3804.
- [23] 何玉惠, 刘新平, 谢忠奎. 红砂灌丛对土壤盐分和养分的富集作用. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(3): 115-119.
- [24] 陈阳, 王贺, 张福锁, 郝金标, 何奕昆. 新疆荒漠盐碱生境柽柳盐分分泌特点及其影响因子. *生态学报*, 2010, 30(2): 511-518.
- [25] Zhang X, Xing Y J, Wang Q G, Yan G Y, Wang M, Liu G C, Wang H L, Huang B B, Zhang J H. Effects of long-term nitrogen addition and decreased precipitation on the fine root morphology and anatomy of the main tree species in a temperate forest. *Forest Ecology and Management*, 2020, 455: 117664.
- [26] Cao Y F, Su Y G, Huang G, Li Y. Soil texture modulates the intensity of fertile islands through affecting the distribution of shrub fine roots. *Journal of Arid Environments*, 2021, 189: 104503.
- [27] 周树平, 梁坤南, 杜健, 李碧均, 周再知, 黄桂华. 不同密度柚木人工林林下植被及土壤理化性质的研究. *植物研究*, 2017, 37(2): 200-210.
- [28] 郭小龙, 王明力, 赵来朋, 杨建军. 干旱区梭梭与胡杨冠下“肥岛”效应. *西南农业学报*, 2020, 33(5): 1035-1041.
- [29] 查向浩, 林宁, 王晶, 张文河, 李有文. 南疆绿洲-荒漠过渡带“肥岛”的养分特征分析. *西南农业学报*, 2017, 30(7): 1625-1628.
- [30] 刘耘华, 杨玉玲, 盛建东, 张瑾. 北疆荒漠植被梭梭立地土壤养分“肥岛”特征研究. *土壤学报*, 2010, 47(3): 545-554.
- [31] 瞿王龙, 杨小鹏, 张存涛, 魏冰. 干旱、半干旱地区天然草原灌木及其肥岛效应研究进展. *草业学报*, 2015, 24(4): 201-207.
- [32] 张立华, 陈小兵. 盐碱地柽柳“盐岛”和“肥岛”效应及其碳氮磷生态化学计量学特征. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 653-658.
- [33] Ding J Y, Eldridge D J. The fertile island effect varies with aridity and plant patch type across an extensive continental gradient. *Plant and Soil*, 2021, 459(1/2): 173-183.
- [34] Stock W D, Dlamini T S, Cowling R M. Plant induced fertile islands as possible indicators of desertification in a succulent desert ecosystem in northern Namaqualand, South Africa. *Plant Ecology*, 1999, 142(1/2): 161-167.
- [35] Wezel A, Rajot J L, Herbrig C. Influence of shrubs on soil characteristics and their function in Sahelian agro-ecosystems in semi-arid Niger. *Journal of Arid Environments*, 2000, 44(4): 383-398.
- [36] 舒韦维, 卢立华, 李华, 农友, 何日明, 陈海, 黄彪. 林分密度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响. *生态学报*, 2021, 41(11): 4521-4530.
- [37] 王媚臻, 毕浩杰, 金锁, 刘佳, 刘宇航, 王宇, 齐锦秋, 郝建锋. 林分密度对云顶山柏木人工林林下物种多样性和土壤理化性质的影响. *生态学报*, 2019, 39(3): 981-988.
- [38] 孙特生, 李文彦, 刘继亮. 黑河中游荒漠绿洲人工梭梭土壤养分特征. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(5): 179-185.
- [39] 杨淑宝. 林分密度对杉木人工林根系养分积累与分配的影响. *亚热带农业研究*, 2021, 17(2): 84-89.