

叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨根际微生物数量 时空变化及其与根际土壤环境因子的关系

林 宁, 韦良焕, 蔡吉祥, 张文河, 王 晶^①

(喀什大学化学与环境科学学院 新疆生物类固废资源化工程技术研究中心, 新疆 喀什 844006)

摘要: 以叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨(*Populus euphratica* Oliv.)为研究对象,对不同河段、土层和季节的根际细菌、放线菌和真菌数量进行比较,对根际土壤环境因子特征进行分析,并对根际土壤环境因子与根际微生物数量进行 Pearson 相关性分析。结果表明:3个河段的根际细菌、放线菌和真菌数量的均值分别为 49.50×10^6 、 8.32×10^6 和 4.52×10^6 cfu · g⁻¹,3种根际微生物数量的变异系数均在 25%以上;并且,3种根际微生物数量在中游与上游和中下游间存在极显著($P < 0.01$)差异,但在上游与中下游间无显著差异。夏季3个河段及秋季上游和中游的3种根际微生物数量均随着土层深度增加而增大。比较而言,秋季各河段的根际细菌、放线菌和真菌数量高于夏季相应河段,并且,2个季节的根际微生物数量均表现为细菌最多、真菌最少,夏季和秋季的根际细菌数量分别占相应季节根际微生物总数的 89.7%和 72.4%。土壤环境因子检测结果显示:上游、中游和中下游的根际土壤总盐含量在夏季分别为 0.870 5、3.718 6 和 2.672 2 g · kg⁻¹,在秋季分别为 3.436 7、2.966 2 和 4.591 5 g · kg⁻¹,属于轻度盐渍化土壤,且根际土壤阳离子主要为 K⁺和 Na⁺,阴离子主要为 Cl⁻和 SO₄²⁻;除 pH 值外,其余 9 个土壤环境因子的变异系数多在 20%以上。相关性分析结果表明:根际细菌数量与根际土壤含水率和 CO₃²⁻含量分别呈极显著正相关和极显著负相关;根际放线菌和真菌数量与根际土壤总盐含量和 CO₃²⁻含量呈极显著负相关,与根际土壤 Ca²⁺含量呈显著($P < 0.05$)负相关,与根际土壤 HCO₃⁻含量、含水率和 pH 值呈极显著正相关,与根际土壤 Cl⁻含量呈显著正相关,此外,根际放线菌数量还与根际土壤 K⁺和 Na⁺的总含量呈显著正相关。研究结果显示:叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨根际微生物数量分布极不均匀,具有明显的垂直分布特征和季节变化特征,而且其分布受到根际土壤环境因子的影响,其中,根际土壤放线菌和真菌数量受影响较大。

关键词: 叶尔羌河流域; 胡杨; 根际微生物; 时空变化; 根际土壤环境因子; 相关性分析

中图分类号: S154.3 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2023)02-0082-10

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2023.02.10

Temporal and spatial variation of numbers of rhizosphere microorganisms of *Populus euphratica* in desert riparian forest of Yarkant River Basin and their relationships with rhizosphere soil environmental factors LIN Ning, WEI Lianghuan, CAI Jixiang, ZHANG Wenhe, WANG Jing^①
(Xinjiang Biomass Solid Waste Resources Technology and Engineering Center, College of Chemistry and Environmental Science, Kashi University, Kashi 844006, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2023, 32(2): 82-91

Abstract: Taking *Populus euphratica* Oliv. in desert riparian forest of Yarkant River Basin as research object, the numbers of rhizosphere bacteria, actinomycetes, and fungi of different reaches, soil layers, and seasons were compared, the characteristics of rhizosphere soil environmental factors were analyzed,

收稿日期: 2022-08-29

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2019D01A03)

作者简介: 林 宁(1986—),男,四川德阳人,硕士,讲师,主要从事环境污染分析方面的研究工作。

^①通信作者 E-mail: 54521151@qq.com

引用格式: 林 宁, 韦良焕, 蔡吉祥, 等. 叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨根际微生物数量时空变化及其与根际土壤环境因子的关系[J]. 植物资源与环境学报, 2023, 32(2): 82-91.

and the Pearson correlation analysis was performed between rhizosphere soil environmental factors and numbers of rhizosphere microorganisms. The results show that the means of numbers of rhizosphere bacteria, actinomycetes, and fungi are 49.50×10^6 , 8.32×10^6 , and 4.52×10^6 cfu \cdot g $^{-1}$, respectively, the coefficients of variation of numbers of three types of rhizosphere microorganisms are all greater than 25%; in addition, there are extremely significant ($P < 0.01$) differences in numbers of three types of rhizosphere microorganisms between middle reach and upper and lower-middle reaches, but there is no significant difference between upper reach and lower-middle reach. Numbers of three types of rhizosphere microorganisms in three reaches in summer and those in upper and middle reaches in autumn all increase with the increase of soil layer depth. In comparison, numbers of rhizosphere bacteria, actinomycetes, and fungi in each reach in autumn are larger than those in corresponding reach in summer, in addition, numbers of rhizosphere microorganisms in the two seasons all show that bacteria are the most and fungi are the least, and numbers of rhizosphere bacteria in summer and autumn account for 89.7% and 72.4% of the total numbers of rhizosphere microorganisms in corresponding seasons, respectively. The test results of soil environmental factors show that the total salinities of rhizosphere soil in upper, middle, and lower-middle reaches in summer are 0.870 5, 3.718 6, and 2.672 2 g \cdot kg $^{-1}$, respectively, and those in autumn are 3.436 7, 2.966 2, and 4.591 5 g \cdot kg $^{-1}$, respectively, which belongs to mild salinization soil. The cations in the rhizosphere soil are mainly K $^{+}$ and Na $^{+}$, and the anions are mainly Cl $^{-}$ and SO $_4^{2-}$; except pH value, the coefficients of variation of the other nine soil environmental factors are mostly greater than 20%. The correlation analysis result shows that number of rhizosphere bacteria shows an extremely significant positive correlation and an extremely significant negative correlation with rhizosphere soil water content and CO $_3^{2-}$ content, respectively; numbers of rhizosphere actinomycetes and fungi show extremely significant negative correlations with rhizosphere soil total salinity and CO $_3^{2-}$ content, a significant ($P < 0.05$) negative correlation with rhizosphere soil Ca $^{2+}$ content, extremely significant positive correlations with rhizosphere soil HCO $_3^{-}$ content, water content, and pH value, and a significant positive correlation with rhizosphere soil Cl $^{-}$ content, in addition, number of rhizosphere actinomycetes shows a significant positive correlation with the total content of K $^{+}$ and Na $^{+}$ in rhizosphere soil. It is suggested that the distribution of numbers of rhizosphere microorganisms of *P. euphratica* in desert riparian forest of Yarkant River Basin is extremely uneven, which has evident vertical distribution pattern and seasonal variation characteristics, and its distribution is affected by rhizosphere soil environmental factors, in which, numbers of rhizosphere actinomycetes and fungi are greatly affected.

Key words: Yarkant River Basin; *Populus euphratica* Oliv.; rhizosphere microorganism; temporal and spatial variation; rhizosphere soil environmental factor; correlation analysis

土壤是微生物活动的重要场所,其理化性质影响着土壤微生物群落的分布状况^[1-2]。土壤微生物群落的结构组成与植物及生境具有明显的相关性,能预测土壤生态系统的改变,可用于评价土壤的健康状况^[3-5]。根际既是土壤微生物活动的旺盛区域,也是连接植物与土壤环境的重要纽带^[6]。根际微生物能够促进植物根系生长,提升土壤养分转化效率,增强植物根系对养分和水分的吸收^[7]。相关研究表明:土壤酸碱度、含水率和理化性质与土壤微生物群落的结构、组成和功能密切相关^[8-10]。

胡杨(*Populus euphratica* Oliv.)是叶尔羌河流域荒漠河岸林的主要建群树种,是维护叶尔羌河流域生态平衡和生态功能的重要植物^[11-12]。近年来,叶尔羌河流域的胡杨林面积逐年减小,并出现斑块化和生物多样性减少等问题^[11-16],因此,对叶尔羌河流域的

胡杨林开展保护措施迫在眉睫。迄今为止,已有学者对胡杨的生理特征、根际微生物数量、垂直分布和季节性变化,及土壤环境因子对胡杨根际微生物数量的影响进行了研究,发现胡杨根际细菌和放线菌数量与土壤特性无显著相关性,而其根际真菌数量受土壤特性影响显著^[17],根际细菌、真菌和放线菌的根际正效应显著^[18],同时,其根际微生物数量存在一定的垂直分布和季节动态变化特征^[19-21]。叶尔羌河流域荒漠河岸林生长在盐渍化土壤中,林内胡杨在长期的适应和进化过程中形成了对区域盐渍化土壤的独特适应特征,因此,开展叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨根际微生物研究有助于深入了解其与根际微生物的相互作用。

鉴于此,笔者以叶尔羌河流域荒漠河岸林内的胡杨为研究对象,对不同河段(上游、中游和中下游)、

土层(0~20、20~40和40~60 cm)及季节(夏季和秋季)的胡杨根际微生物(包括根际细菌、真菌和放线菌)数量进行比较,对根际土壤环境因子特征进行分析,并对根际土壤环境因子与根际微生物数量间的关系进行 Pearson 相关性分析,以期明确叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨根际微生物数量的时空变化特征及其根际土壤环境影响因子,为该区域胡杨林的利用和保护提供参考依据。

1 研究地概况和研究方法

1.1 研究地概况

叶尔羌河位于新疆维吾尔自治区的西南部,塔里木盆地西侧边缘,东面与塔克拉玛干沙漠相邻,西面与布古里沙漠和托乎拉克沙漠相连,南面以喀喇昆仑山为屏障,北面一直延伸到天山南麓,并与阿克苏地区毗连,具体地理位置为东经 $74^{\circ}28' \sim 80^{\circ}54'$ 、北纬 $34^{\circ}50' \sim 40^{\circ}31'$,全长 1 097 km,多年平均径流量 $6.63 \times 10^{10} \text{ m}^3$,河水主要靠降水和冰川融雪补给^[11]。叶尔羌河流域属于典型的干旱性大陆气候区,区内降水量少,蒸发量多,空气干燥,日照时间长,日温差大^[16]。流域内多处分布着不同水平的盐渍化土壤,由于排水系统不完善和蒸发强烈等原因,目前中度盐渍化耕地面积已达到 $6.67 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占该区域耕地面积的 20%^[16]。受独特的地理位置和特殊的气候环境影响,区内的自然生态环境十分脆弱,天然植被极为宝贵,分布着荒漠地带特有的河岸走廊式落叶阔叶林,即荒漠河岸林,但植被逐年减少^[22]。

1.2 研究方法

1.2.1 样点设置 在叶尔羌河流域上游、中游和中下游的荒漠河岸林内选取胡杨生长状况良好的区域各设置 1 个样地。其中,上游样地位于泽普县,具体地理位置为东经 $76^{\circ}58'40''$ 、北纬 $38^{\circ}02'44''$,海拔 1 412 m;中游样地位于莎车县,具体地理位置为东经 $77^{\circ}22'21''$ 、北纬 $38^{\circ}23'13''$,海拔 1 202 m;中下游样地位于麦盖提县,具体地理位置为东经 $77^{\circ}35'41''$ 、北纬 $38^{\circ}53'32''$,海拔 1 176 m。样地面积均为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 。每个样地设置 3 个面积 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的样方。

1.2.2 样品采集 分别于 2021 年夏季(6 月)和秋季(9 月)采集样品。在每个样方内随机选取胸径 20~30 cm、株高 15~20 m 的胡杨 6 株,采用土壤剖面取样法^[20],在距离主干 1 m 处挖取 0~60 cm 土壤,分别

将 0~20、20~40 和 40~60 cm 土层的根系及其连带土壤一同装入无菌袋中,共计 162 份样品,用于根际微生物培养。同时,采集每个土层中胡杨根系周围 1 cm 处的土壤(即根际土壤),将相同河段所有植株 3 个土层的根际土壤混匀,作为该河段的根际土壤样品,用于根际土壤环境因子测定。

1.2.3 根际微生物培养及数量统计 参照马晓梅等^[20]的方法制作用于根际微生物培养的悬浊液,并采用 10 倍稀释法对悬浊液进行稀释,稀释度分别为 10^{-1} 、 10^{-2} 、 10^{-3} 、 10^{-4} 和 10^{-5} 。取稀释度为 10^{-3} 、 10^{-4} 和 10^{-5} 的稀释液各 0.1 mL,分别涂布在牛肉膏蛋白胨琼脂培养基、改良高一号培养基和马丁氏琼脂培养基(每 300 mL 培养基加入质量体积分数 3% $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 溶液 1 mL^[23],以抑制细菌和霉菌生长)上,依次用于细菌、放线菌和真菌培养,培养温度为 $25 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在培养 3~14 d 内统计细菌、放线菌和真菌的菌落数,得到相应稀释度的微生物菌落数。将烘干至恒质量的锥形瓶质量记为 m_1 ,向其中加入 100 mL 悬浊液并于 $(105 \pm 5) \text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下烘干至恒质量,记为 m_2 , m_2 减去 m_1 的差值为根际土壤干质量。根据许光辉等^[23]的方法计算根际微生物数量,计算公式为微生物数量 = 平均菌落数 \times 稀释倍数 / 根际土壤干质量。

1.2.4 根际土壤环境因子测定 按水土比 2.5 : 1.0 配制根际土壤溶液,采用 pH S-3C 酸度计(雷磁-上海仪电科学仪器有限公司)测定 pH 值,采用烘干法^{[24]22-24}测定含水率,采用残渣烘干法^{[24]187-188}测定总盐含量,采用双指示剂中和滴定法^{[24]193-195}测定 CO_3^{2-} 和 HCO_3^{-} 含量,采用硝酸银滴定法^{[24]195-196}测定 Cl^{-} 含量,采用 EDTA 络合滴定法^{[24]196-199}测定 SO_4^{2-} 含量,采用 EDTA 滴定法^{[24]189-191}测定 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量,采用火焰光度法^{[24]192-193}测定 K^{+} 和 Na^{+} 的总含量。每个指标重复取样测定 3 次。

1.3 数据处理和统计分析

使用 EXCEL 2010 软件整理数据,使用 SPSS 11.0 软件进行统计分析、绘图和 Pearson 相关性分析。

2 结果和分析

2.1 不同河段胡杨根际微生物数量差异

叶尔羌河流域不同河段荒漠河岸林胡杨根际微生物数量统计结果见表 1。结果显示:3 个河段中,根际细菌占有绝对优势,在上游、中游和中下游的数量

分别为 55.21×10^6 、 40.31×10^6 和 52.98×10^6 $\text{cfu} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均值为 49.50×10^6 $\text{cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ 。从3个河段根际微生物数量的均值看,根际放线菌和真菌的数量(分别为 8.32×10^6 和 4.52×10^6 $\text{cfu} \cdot \text{g}^{-1}$)明显低于根际细菌,根际细菌数量约为根际放线菌数量的6倍、根际真菌数量的11倍。从变异系数看,3个河段的根际细菌、放线菌和真菌数量的变异系数较大,均在25%以上,并且,同一河段的根际细菌、放线菌和真菌数量的变异系数差异极大,3个河段根际细菌数量的变异系数均低于根际放线菌和真菌,且在上游根际真菌数量的变异系数最大,而在中游和中下游根际放线菌数量的变异系数最大。

表1 叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨根际微生物数量
Table 1 Numbers of rhizosphere microorganisms of *Populus euphratica* Oliv. in desert riparian forest of Yarkand River Basin

统计量 ¹⁾ Statistic ¹⁾	上游根际微生物数量/($\text{cfu} \cdot \text{g}^{-1}$) Numbers of rhizosphere microorganisms in upper reach		
	细菌 Bacterium	放线菌 Actinomycete	真菌 Fungus
λ_{\max}	85.30×10^6	35.70×10^6	25.50×10^6
λ_{\min}	17.30×10^6	0.44×10^6	0.20×10^6
\bar{X}	55.21×10^6	10.35×10^6	6.45×10^6
SD	15.01×10^6	9.22×10^6	7.37×10^6
$CV/\%$	27.17	89.07	114.26
统计量 ¹⁾ Statistic ¹⁾	中游根际微生物数量/($\text{cfu} \cdot \text{g}^{-1}$) Numbers of rhizosphere microorganisms in middle reach		
	细菌 Bacterium	放线菌 Actinomycete	真菌 Fungus
λ_{\max}	61.30×10^6	18.40×10^6	8.90×10^6
λ_{\min}	10.30×10^6	0.06×10^6	0.03×10^6
\bar{X}	40.31×10^6	3.65×10^6	1.57×10^6
SD	11.85×10^6	5.24×10^6	2.21×10^6
$CV/\%$	29.40	143.63	140.44
统计量 ¹⁾ Statistic ¹⁾	中下游根际微生物数量/($\text{cfu} \cdot \text{g}^{-1}$) Numbers of rhizosphere microorganisms in lower-middle reach		
	细菌 Bacterium	放线菌 Actinomycete	真菌 Fungus
λ_{\max}	81.00×10^6	21.90×10^6	20.40×10^6
λ_{\min}	21.10×10^6	2.80×10^6	0.48×10^6
\bar{X}	52.98×10^6	10.95×10^6	5.53×10^6
SD	13.51×10^6	5.17×10^6	4.81×10^6
$CV/\%$	25.49	47.25	86.90

¹⁾ λ_{\max} : 最大值 Maximum; λ_{\min} : 最小值 Minimum; \bar{X} : 均值 Mean; SD : 标准差 Standard deviation; CV : 变异系数 Coefficient of variation.

F 检验结果显示:上游与中游间根际细菌、放线菌和真菌数量的 F 值分别为 32.835、21.579 和 21.715,明显高于 $F_{0.01}$ 的数值(6.88),说明胡杨根际微生物数量在上游与中游间存在极显著差异;上游与中下游间根际细菌、放线菌和真菌数量的 F 值分别

为 0.664、0.173 和 0.591,明显低于 $F_{0.05}$ 的数值(3.93),说明胡杨根际微生物数量在上游与中下游间无显著差异;中游与中下游间根际细菌、放线菌和真菌数量的 F 值分别为 26.852、53.115 和 30.256,明显高于 $F_{0.01}$ 的数值,说明胡杨根际微生物数量在中游与中下游间存在极显著差异。

2.2 胡杨根际微生物数量垂直分布特征

2.2.1 夏季垂直分布特征

统计结果(图1-A,C,E)显示:在夏季,相同河段的根际细菌、放线菌和真菌数量均随着土层深度增加而增大,3种根际微生物的数量在上游、中游和中下游的40~60 cm土层中均达到最大。从不同河段看,除40~60 cm土层的根际细菌数量表现为在上游最高、中下游居中、中游最低外,其余土层的根际细菌、放线菌和真菌数量均表现为在中下游最高、上游居中、中游最低。

从不同土层间根际微生物数量的差异显著性分析结果看,在上游,40~60 cm土层的根际细菌数量显著($P < 0.05$)高于0~20和20~40 cm土层,而后2个土层间的根际细菌数量无显著差异;在中游,40~60 cm土层的根际细菌数量显著高于0~20 cm土层,而这2个土层与20~40 cm土层间的根际细菌数量无显著差异;在中下游,20~40与40~60 cm土层间的根际细菌数量无显著差异,但这2个土层的根际细菌数量显著高于0~20 cm土层。在上游和中游,根际放线菌数量在3个土层两两之间差异显著;在中下游,20~40与40~60 cm土层间的根际放线菌数量无显著差异,但这2个土层的根际放线菌数量显著高于0~20 cm土层。不论在上游、中游,还是中下游,根际真菌数量在3个土层两两之间差异显著。

从不同河段间根际微生物数量的差异显著性分析结果看,3个土层的根际放线菌和真菌数量在3个河段两两之间差异显著。上游0~20和20~40 cm土层的根际细菌数量与中游和中下游相应土层的根际细菌数量间无显著差异,但中游这2个土层的根际细菌数量显著低于中下游;中游40~60 cm土层的根际细菌数量显著低于上游和中下游该土层的根际细菌数量,而上游与中下游间该土层的根际细菌数量无显著差异。

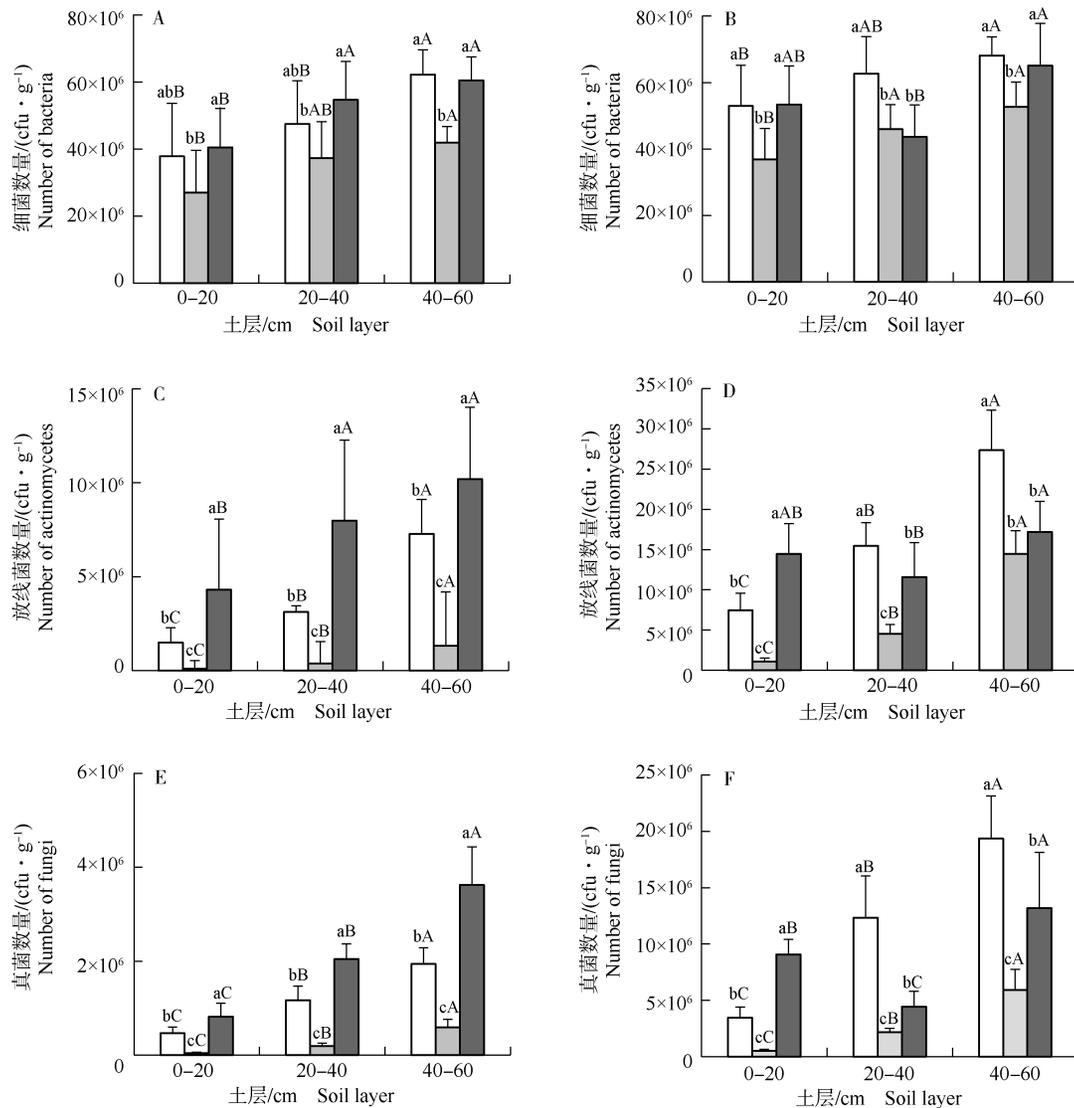
2.2.2 秋季垂直分布特征

统计结果(图1-B,D,F)显示:在秋季,相同河段的根际细菌、放线菌和真菌数量均在40~60 cm土层最大,3种根际微生物数量在上游和中游随着土层深度增加而增大,在中下游表现

为40~60 cm 土层最高、0~20 cm 土层居中、20~40 cm 土层最低。从不同河段看,0~20 cm 土层的根际细菌、放线菌和真菌数量均表现为在中下游最高、上游居中、中游最低;20~40 cm 土层的根际细菌数量表现为在上游最高、中游居中、中下游最低,该土层的根际放线菌和真菌数量表现为在上游最高、中下游居

中、中游最低;40~60 cm 土层的根际细菌、放线菌和真菌数量均表现为在上游最高、中下游居中、中游最低。

从不同土层间根际微生物数量的差异显著性分析结果看,在上游,40~60 cm 土层的根际细菌数量显著高于0~20 cm 土层,而20~40 cm 土层的根际细菌



□: 上游 Upper reach; ▨: 中游 Middle reach; ▩: 中下游 Lower-middle reach. 同一土层的不同小写字母表示在不同河段间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases of the same soil layer indicate the significant ($P < 0.05$) difference among different reaches; 同一河段的不同大写字母表示在不同土层间差异显著 ($P < 0.05$) Different uppercases of the same reach indicate the significant ($P < 0.05$) difference among different soil layers.

A: 夏季细菌数量垂直分布 Vertical distribution of number of bacteria in summer; B: 秋季细菌数量垂直分布 Vertical distribution of number of bacteria in autumn; C: 夏季放线菌数量垂直分布 Vertical distribution of number of actinomycetes in summer; D: 秋季放线菌数量垂直分布 Vertical distribution of number of actinomycetes in autumn; E: 夏季真菌数量垂直分布 Vertical distribution of number of fungi in summer; F: 秋季真菌数量垂直分布 Vertical distribution of number of fungi in autumn.

图1 叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨根际微生物数量的垂直分布特征

Fig. 1 Vertical distribution characteristics of numbers of rhizosphere microorganisms of *Populus euphratica* Oliv. in desert riparian forest of Yarkand River Basin

数量与这2个土层间无显著差异;在中游,0~20 cm土层的根际细菌数量显著低于20~40和40~60 cm土层,而后2个土层间的根际细菌数量无显著差异;在中下游,40~60 cm土层的根际细菌数量显著高于20~40 cm土层,而0~20 cm土层的根际细菌数量与这2个土层间无显著差异。在上游和中游,根际放线菌数量在3个土层两两之间差异显著;在中下游,40~60 cm土层的根际放线菌数量显著高于20~40 cm土层,而0~20 cm土层的根际放线菌数量与这2个土层间无显著差异。在上游、中游和中下游,根际真菌数量在3个土层两两之间差异显著。

从不同河段间根际微生物数量的差异显著性分析结果看,中游0~20和40~60 cm土层的根际细菌数量显著低于上游和中下游相应土层的根际细菌数量,但上游与中下游间同一土层的根际细菌数量无显著差异;上游20~40 cm土层的根际细菌数量显著高于中游和中下游该土层的根际细菌数量,但中游与中下游间该土层的根际细菌数量无显著差异。0~20和20~40 cm土层的根际放线菌数量在3个河段两两之间均存在显著差异;上游40~60 cm土层的根际放线菌数量显著高于中游和中下游该土层的根际放线菌数量,但中游与中下游间该土层的根际放线菌数量无显著差异。0~20、20~40和40~60 cm土层的根际真菌数量在3个河段两两之间均存在显著差异。

2.3 胡杨根际微生物数量季节变化特征

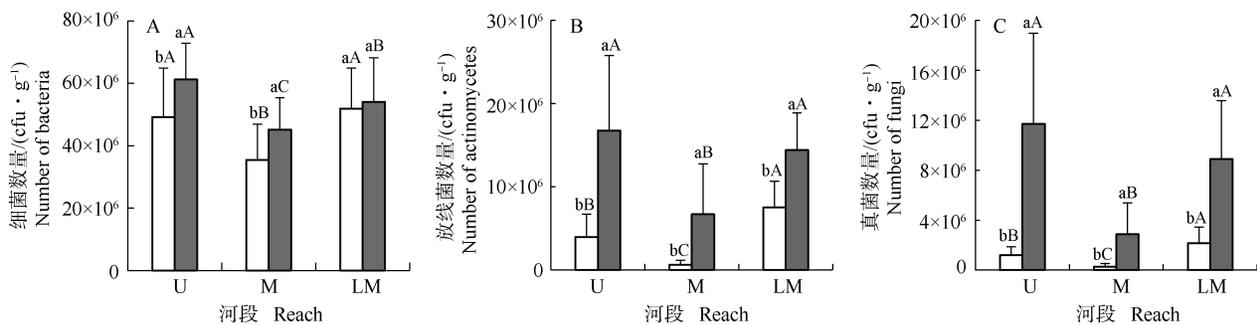
对夏季和秋季叶尔羌河流域上游、中游和中下游

荒漠河岸林胡杨根际微生物数量进行统计分析,结果见图2。结果显示:叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨根际微生物数量存在明显的季节差异,表现为秋季各河段的根际细菌、放线菌和真菌数量高于夏季相应河段。夏季和秋季的3种根际微生物数量均表现为细菌最多、放线菌居中、真菌最少,其中,夏季的根际细菌、放线菌和真菌数量分别占该季节根际微生物总数的89.7%、7.9%和2.4%,秋季的根际细菌、放线菌和真菌数量分别占该季节根际微生物总数的72.4%、17.0%和10.6%。

统计结果显示:在夏季,上游和中下游的根际细菌数量显著($P<0.05$)低于秋季,但中下游的根际细菌数量与秋季间的差异不显著;3个河段的根际放线菌和真菌数量均显著低于秋季。从相同季节不同河段间胡杨根际微生物数量看,在夏季,中游的根际细菌数量显著低于上游和中下游,而上游与中下游间的根际细菌数量无显著差异;根际放线菌和真菌数量在3个河段两两之间均存在显著差异。在秋季,根际细菌数量在3个河段两两之间存在显著差异;中游的根际放线菌和真菌数量显著低于上游和中下游,但上游与中下游间的根际放线菌和真菌数量无显著差异。

2.4 胡杨根际土壤环境因子特征及其对根际微生物数量的影响

2.4.1 根际土壤环境因子特征 叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨根际土壤环境因子的统计结果(表2)显示:上游、中游和中下游根际土壤总盐含量在夏季分



□: 夏季 Summer; ■: 秋季 Autumn. U: 上游 Upper reach; M: 中游 Middle reach; LM: 中下游 Lower-middle reach. 同一河段的不同小写字母表示在夏季和秋季间差异显著($P<0.05$) Different lowercases of the same reach indicate the significant ($P<0.05$) difference between summer and autumn; 同一季节的不同大写字母表示在不同河段间差异显著($P<0.05$) Different uppercases of the same season indicate the significant ($P<0.05$) difference among different reaches.

A: 细菌数量季节变化 Seasonal variation of number of bacteria; B: 放线菌数量季节变化 Seasonal variation of number of actinomycetes; C: 真菌数量季节变化 Seasonal variation of number of fungi.

图2 叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨根际微生物数量的季节变化特征

Fig. 2 Seasonal variation characteristics of numbers of rhizosphere microorganisms of *Populus euphratica* Oliv. in desert riparian forest of Yarkand River Basin

别为 0.870 5、3.718 6 和 2.672 2 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在秋季分别为 3.436 7、2.966 2 和 4.591 5 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 属于轻度盐渍化土壤, 且根际土壤阳离子主要为 K^+ 和 Na^+ , 阴离子主要为 Cl^- 和 SO_4^{2-} 。在夏季和秋季 3 个河段的 10 个根际土壤环境因子中, pH 值的变异系数最小, 为 1.33%~6.40%; 除秋季中游和夏季中下游根际土壤含水率的变异系数低于 20% 外, 夏季和秋季 3 个河段其余 9 个指标的变异系数均高于 20%。值得注意的是, 在夏季 3 个河段根际土壤中未检测到 CO_3^{2-} , 但秋

季 3 个河段根际土壤 CO_3^{2-} 含量的变异系数均很高, 都在 160% 以上。F 检验结果显示: 上游根际土壤总盐含量在夏季和秋季间存在极显著 ($P < 0.01$) 差异, K^+ 和 Na^+ 的总含量在春季和秋季间存在显著 ($P < 0.05$) 差异; 中下游根际土壤 HCO_3^- 含量在春季和秋季间存在极显著差异, Mg^{2+} 含量在春季和秋季间存在显著差异; 上游和中下游根际土壤 Ca^{2+} 含量在春季和秋季间分别存在极显著和显著差异; 夏季 3 个河段的根际土壤 Cl^- 含量和含水率在春季和秋季间均存在极

表 2 叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨根际土壤环境因子特征¹⁾

Table 2 Characteristics of rhizosphere soil environmental factors of *Populus euphratica* Oliv. in desert riparian forest of Yarkand River Basin¹⁾

统计量 Statistic	上游的根际土壤环境因子 Rhizosphere soil environmental factors in upper reach									
	TS	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+-Na^+	WC	pH
夏季 Summer										
\bar{X}	0.870 5	—	0.022 8	0.023 0	0.015 8	0.162 7	0.040 9	0.605 3	24.501 2	7.75
SD	0.388 8	—	0.005 5	0.009 4	0.013 1	0.047 2	0.032 2	0.317 6	5.294 1	0.15
CV/%	44.66	—	24.25	40.88	83.04	29.04	78.85	52.47	21.61	1.95
秋季 Autumn										
\bar{X}	3.436 7	0.000 8	0.016 6	0.088 9	0.012 6	0.785 6	0.198 7	2.489 0	13.550 4	7.81
SD	2.479 4	0.001 5	0.009 8	0.042 8	0.013 1	0.556 8	0.296 5	2.180 1	9.318 8	0.18
CV/%	72.15	182.48	59.06	48.15	104.26	70.87	149.22	87.59	68.77	2.34
F	9.409 **	2.703	2.696	20.357 **	0.275	11.185 **	2.519	6.579 *	9.395 **	0.474
统计量 Statistic	中游的根际土壤环境因子 Rhizosphere soil environmental factors in middle reach									
	TS	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+-Na^+	WC	pH
夏季 Summer										
\bar{X}	3.718 6	—	0.015 8	0.026 5	0.024 9	0.331 1	0.168 8	3.152 2	8.236 3	7.75
SD	2.761 8	—	0.004 0	0.036 1	0.012 3	0.422 8	0.149 7	2.404 9	3.417 6	0.15
CV/%	74.27	—	25.51	136.39	49.45	127.68	88.72	76.29	41.49	1.97
秋季 Autumn										
\bar{X}	2.966 2	0.004 5	0.010 2	0.099 9	0.070 7	0.314 4	0.101 4	2.367 1	22.025 6	7.59
SD	1.671 3	0.009 6	0.007 4	0.036 1	0.083 2	0.179 9	0.054 9	1.789 1	4.192 4	0.28
CV/%	56.34	213.17	72.39	36.13	117.72	57.20	54.19	75.58	19.03	3.68
F	0.489	1.981	3.945	18.649 **	2.667	0.012	1.606	0.618	58.493 **	2.143
统计量 Statistic	中下游的根际土壤环境因子 Rhizosphere soil environmental factors in lower-middle reach									
	TS	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+-Na^+	WC	pH
夏季 Summer										
\bar{X}	2.672 2	—	0.021 6	0.030 3	0.041 1	0.264 4	0.102 5	2.212 1	33.152 1	7.76
SD	1.278 3	—	0.004 4	0.011 7	0.020 4	0.098 2	0.031 8	1.193 3	4.479 1	0.10
CV/%	47.84	—	20.27	38.54	49.63	37.15	31.07	53.94	13.51	1.33
秋季 Autumn										
\bar{X}	4.591 5	0.000 9	0.011 8	0.103 7	0.029 4	0.490 0	0.406 7	3.551 7	13.160 0	8.01
SD	3.968 0	0.001 5	0.003 1	0.044 2	0.027 2	0.226 4	0.421 7	3.511 6	7.773 2	0.51
CV/%	86.42	162.50	25.97	42.63	92.39	46.20	103.69	98.87	59.07	6.40
F	1.908	3.408	30.799 **	23.163 **	1.069	7.518 *	4.656 *	1.174	44.694 **	1.953

¹⁾ TS: 总盐含量 Total salinity ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); CO_3^{2-} : CO_3^{2-} 含量 CO_3^{2-} content ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); HCO_3^- : HCO_3^- 含量 HCO_3^- content ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); Cl^- : Cl^- 含量 Cl^- content ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); SO_4^{2-} : SO_4^{2-} 含量 SO_4^{2-} content ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); Ca^{2+} : Ca^{2+} 含量 Ca^{2+} content ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); Mg^{2+} : Mg^{2+} 含量 Mg^{2+} content ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); K^+-Na^+ : K^+ 和 Na^+ 的总含量 Total content of K^+ and Na^+ ; WC: 含水率 Water content (%); pH: pH 值 pH value. \bar{X} : 均值 Mean; SD: 标准差 Standard deviation; CV: 变异系数 Coefficient of variation; F: F 值 F value. —: 未检出 Undetected. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

显著差异。

不同河段间根际土壤环境因子的 F 检验结果 (表 3) 显示: 在夏季, 根际土壤总盐含量和 HCO_3^- 含量在上游与中游间及中游与中下游间存在极显著差异, SO_4^{2-} 含量和 Ca^{2+} 含量在上游和中下游间分别存在极显著和显著差异, Mg^{2+} 含量在上游与中游和中下游间

分别存在显著和极显著差异, K^+ 和 Na^+ 的总含量在上游与中游和中下游间存在极显著差异, 含水率在 3 个河段两两之间存在极显著差异。在秋季, 根际土壤 Ca^{2+} 含量在上游和中游间存在显著差异, Mg^{2+} 含量在中游和中下游间存在显著差异, 含水率在上游和中游间及中游和中下游间分别存在显著和极显著差异。

表 3 叶尔羌河流域荒漠河岸林不同河段间胡杨根际土壤环境因子的 F 检验¹⁾

Table 3 F test of rhizosphere soil environmental factors of *Populus euphratica* Oliv. in different reaches of desert riparian forest of Yarkand River Basin¹⁾

根际土壤环境因子 Rhizosphere soil environmental factor	夏季不同河段间的 F 值 F values between different reaches in summer			秋季不同河段间的 F 值 F values between different reaches in autumn		
	U-M	U-ML	M-ML	U-M	U-ML	M-ML
总盐含量 Total salinity	9.385 **	1.064	16.365 **	0.223	0.548	1.282
CO_3^{2-} 含量 CO_3^{2-} content	—	—	—	1.284	0.014	0.874
HCO_3^- 含量 HCO_3^- content	9.551 **	0.252	8.748 **	2.470	2.032	0.339
Cl^- 含量 Cl^- content	0.078	2.161	0.094	0.351	0.521	0.039
SO_4^{2-} 含量 SO_4^{2-} content	2.299	9.804 **	4.173	4.285	2.808	2.001
Ca^{2+} 含量 Ca^{2+} content	1.411	7.847 *	0.212	5.835 *	2.176	3.318
Mg^{2+} 含量 Mg^{2+} content	6.273 *	16.628 **	1.686	0.937	1.465	4.638 *
K^+ 和 Na^+ 的总含量 Total content of K^+ and Na^+	9.921 **	15.239 **	1.104	0.017	0.595	0.813
含水率 Water content	59.962 **	14.006 **	176.015 **	6.191 *	0.009	9.069 **
pH 值 pH value	0.004	0.016	0.039	3.707	1.178	4.468

¹⁾ U: 上游 Upper reach; M: 中游 Middle reach; ML: 中下游 Lower-middle reach. —: 未检出 Undetected. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

2.4.2 根际微生物数量与根际土壤环境因子的关系
相关性分析结果 (表 4) 显示: 根际细菌数量与根际土壤含水率呈极显著正相关, 与根际土壤 CO_3^{2-} 含量

呈极显著负相关, 与其余 8 个土壤环境因子均无显著相关性。根际放线菌和真菌数量与根际土壤总盐含量和 CO_3^{2-} 含量呈极显著负相关, 与根际土壤 Ca^{2+} 含量呈显著负相关, 与根际土壤 HCO_3^- 含量、pH 值和含水率呈极显著正相关, 与根际土壤 Cl^- 含量呈显著正相关。另外, 根际放线菌数量还与根际土壤 K^+ 和 Na^+ 的总含量呈显著正相关。

表 4 叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨根际土壤环境因子与根际微生物数量的相关系数¹⁾

Table 4 Correlation coefficients between rhizosphere soil environmental factors and rhizosphere microorganisms of *Populus euphratica* Oliv. in desert riparian forest of Yarkand River Basin¹⁾

根际土壤环境因子 Rhizosphere soil environmental factor	与根际微生物数量的相关系数 Correlation coefficients with numbers of rhizosphere microorganisms		
	细菌 Bacterium	放线菌 Actinomycete	真菌 Fungus
总盐含量 Total salinity	-0.25	-0.474 **	-0.489 **
CO_3^{2-} 含量 CO_3^{2-} content	-0.41 **	-0.458 **	-0.453 **
HCO_3^- 含量 HCO_3^- content	0.27	0.39 **	0.39 **
Cl^- 含量 Cl^- content	0.11	0.28 *	0.33 *
SO_4^{2-} 含量 SO_4^{2-} content	-0.19	-0.18	-0.16
Ca^{2+} 含量 Ca^{2+} content	-0.19	-0.284 *	-0.292 *
Mg^{2+} 含量 Mg^{2+} content	-0.21	-0.19	-0.23
K^+ 和 Na^+ 的总含量 Total content of K^+ and Na^+	0.11	0.28 *	0.23
含水率 Water content	0.39 **	0.67 **	0.70 **
pH 值 pH value	0.11	0.43 **	0.47 **

¹⁾ *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

3 讨论和结论

叶尔羌河流域是典型的荒漠生态系统, 胡杨为该流域典型的建群种植物, 对于维持其生态系统功能具有重要作用。了解胡杨根际微生物群落的动态分布特征对于认识叶尔羌河流域荒漠生态系统的特殊功能具有重要意义^[25-26]。在叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨根际微生物组成中, 根际细菌占有明显优势, 平均数量为 $49.50 \times 10^6 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$, 其次为根际放线菌 (平均数量为 $8.32 \times 10^6 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$), 根际真菌最少 (平均数量为 $4.52 \times 10^6 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$), 与塔里木河流域的胡杨根际微生物组成^[17,27] 存在一定差异, 推测造成差异的

原因可能是叶尔羌河流域与塔里木河流域在地域和根际土壤环境上存在差异。分析结果显示:叶尔羌河流域上游、中游和中下游胡杨根际细菌、放线菌和真菌数量的变异系数均在25%以上,说明该流域3个河段胡杨的根际细菌、放线菌和真菌数量存在极大差异。对不同河段间的微生物数量进行 F 检验,结果表明:叶尔羌河流域胡杨根际微生物数量在中游与上游间以及中游与中下游间差异极显著,但在上游与中下游间差异不显著,说明该流域不同河段间的胡杨根际微生物数量多存在较大差异。

垂直分布结果显示:夏季时,叶尔羌河流域荒漠河岸林3个河段胡杨根际细菌、放线菌和真菌数量均随土层深度增加而增大;秋季时,该流域3个河段的根际细菌、放线菌和真菌数量则表现为在上游和中游随土层深度增加而增大,在中下游表现为40~60 cm土层最高、20~40 cm土层最低。该结果与杨玉海等^[17]和马晓梅等^[20]的相关研究结果存在明显差异,这可能与研究采集土壤的土层深度不同及不同河流的生态环境差异等有关。相关研究结果^[17,19,28]显示:植物根际微生物数量存在明显的季节性变化。本研究中,叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨根际微生物数量也存在明显的季节性变化,表现为秋季各河段根际细菌、放线菌和真菌数量均高于夏季相应河段;并且,3种根际微生物数量的季节变化存在不同程度差异,比较而言,根际放线菌和真菌数量的季节差异更明显。夏季和秋季的根际微生物数量均表现为细菌最多、真菌最少,其中,夏季的根际细菌、放线菌和真菌数量分别占夏季根际微生物总数的89.7%、7.9%和2.4%,秋季的3种根际微生物数量分别占秋季根际微生物总数的72.4%、17.0%和10.6%,进一步说明根际细菌在叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨根际微生物中占据优势地位,由此推测根际细菌可能对该流域胡杨根际土壤活性起到主要作用,具体情况有待后续深入研究。

叶尔羌河流域荒漠河岸林上游、中游和中下游胡杨根际土壤总盐含量在夏季分别为0.870 5、3.718 6和2.672 2 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,在秋季分别为3.436 7、2.966 2和4.591 5 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,属于轻度盐渍化土壤,且根际土壤的阳离子主要为 K^+ 和 Na^+ ,阴离子主要为 Cl^- 和 SO_4^{2-} ,这一研究结果与南疆土壤含盐量^[29-30]相近,这主要是因为研究区地处干旱区,气候干燥,降雨量少,蒸发量大,土壤盐分呈现表聚现象。对比发现,上游和中

下游根际土壤的总盐含量均表现为夏季低于秋季,而中游根际土壤的总盐含量则表现为夏季高于秋季,这可能是因为叶尔羌河流域上游和中下游的植被覆盖度明显高于中游,在夏季植物生长旺盛期2个河段的植被能够从土壤中吸收更多的盐离子。从各根际土壤环境因子的变异系数看,除pH值外,春季和秋季3个河段其余9个根际土壤环境因子的变异系数均较高,说明叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨生长环境中的土壤异质性较大,可能会对根际微生物数量造成一定的影响。

研究发现,土壤微生物数量会随着盐分浓度的提高而降低^[31-32]。相关性分析结果表明:根际细菌、放线菌和真菌数量与根际土壤含水率和pH值多呈极显著正相关,而3种根际微生物数量与根际土壤总盐含量呈负相关,且根际放线菌和真菌数量与根际土壤总盐含量的相关性极显著。然而,3种根际微生物数量与根际土壤不同盐基离子含量的相关性并不一致,例如:根际细菌、放线菌和真菌数量与根际土壤 CO_3^{2-} 含量呈极显著负相关;根际放线菌和真菌数量与根际土壤 HCO_3^- 含量呈极显著正相关,与根际土壤 Cl^- 含量呈显著正相关,与根际土壤 Ca^{2+} 含量呈显著负相关;根际放线菌数量还与根际土壤 K^+ 和 Na^+ 的总含量呈显著正相关。总体来看,叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨根际放线菌和真菌数量受根际土壤环境因子影响较大,多个根际土壤环境因子能够影响胡杨根际放线菌和真菌的数量,而根际细菌数量仅受根际土壤含水率和 CO_3^{2-} 含量的影响较大。然而,相关研究结果表明植物的根际微生物数量不仅受到根际土壤环境因子的影响,还受到根际分泌物等其他因子的影响^[33-34],因此,关于叶尔羌河流域胡杨根际微生物数量的其他影响因子有待后续研究。

综上所述,叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨根际微生物数量分布极不均匀,具有明显的垂直分布特征和季节变化特征,而且其分布受到根际土壤环境因子的影响,其中,放线菌和真菌数量受影响较大。

参考文献:

- [1] SINSABAUGH R L, FOLLSTAD SHAH J J. Ecoenzymatic stoichiometry and ecological theory [J]. *The Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2012, 43: 313-343.
- [2] VAN HORN D J, VAN HORN M L, BARRETT J E, et al. Factors controlling soil microbial biomass and bacterial diversity and community composition in a cold desert ecosystem: role of

- geographic scale[J]. *PLoS ONE*, 2013, 8(6): e66103.
- [3] CHAPARRO J M, SHEFLIN A M, MANTER D K, et al. Manipulating the soil microbiome to increase soil health and plant fertility[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48: 489-499.
- [4] 戴雅婷, 侯向阳, 闫志坚, 等. 库布齐沙地两种植被恢复类型根际土壤微生物和土壤化学性质比较研究[J]. *生态学报*, 2016, 36(20): 6353-6364.
- [5] SCHIMEL J P, SCHAEFFER S M. Microbial control over carbon cycling in soil[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2012, 3: 348.
- [6] 池振明, 王祥红, 李 静. 现代微生物生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 187-188.
- [7] 李 岩, 杨晓东, 秦 璐, 等. 两种盐生植物根际土壤细菌多样性和群落结构[J]. *生态学报*, 2018, 38(9): 3118-3131.
- [8] 李媛媛, 徐婷婷, 艾 喆, 等. 半干旱区锦鸡儿属植物根际土壤真菌群落多样性及驱动因素[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(12): 4289-4297.
- [9] 赵 娇, 谢慧君, 张 建. 黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析[J]. *环境科学*, 2020, 41(3): 1449-1455.
- [10] 梁田雨. 浑善达克沙地榆根际土壤微生物时空分布格局及功能预测[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019: 6-13.
- [11] 王 晶, 殷 飞, 林 宁. 叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨叶片和凋落叶的生态化学计量特征[J]. *植物资源与环境学报*, 2021, 30(5): 42-49.
- [12] 王彦涛. 叶尔羌河流域植物区系及植被研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2010: 29-46.
- [13] 李志军, 刘建平, 于 军, 等. 胡杨、灰叶胡杨生物生态学特性调查[J]. *西北植物学报*, 2003, 23(7): 1292-1296.
- [14] 冯 起, 司建华, 李建林, 等. 胡杨根系分布特征与根系吸水模型建立[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(7): 765-772.
- [15] 李华林, 白林燕, 冯建中, 等. 新疆叶尔羌河流域胡杨林时空格局特征[J]. *生态学报*, 2019, 39(14): 5080-5094.
- [16] 李 金, 徐海量, 王勇辉, 等. 叶尔羌河下游河岸胡杨种群长势与植物多样性对淹灌的响应评估[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(7): 859-866.
- [17] 杨玉海, 陈亚宁, 李卫红, 等. 干旱区胡杨根际微生物数量及其影响因子[J]. *干旱区研究*, 2010, 27(5): 719-725.
- [18] 刘 慧. 内蒙古西部胡杨土壤微生物及典型菌株代谢产物的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009: 32-38.
- [19] 马晓梅, 尹林克. 荒漠河岸林植物根际和非根际微生物的季节性变化[J]. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(5): 165-171.
- [20] 马晓梅, 尹林克, 陈 理. 塔里木河干流胡杨和柽柳根际土壤微生物及其垂直分布[J]. *干旱区研究*, 2008, 25(2): 183-189.
- [21] 马晓梅. 塔里木荒漠河岸林主要建群植物根际微生物分布特点[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2007: 8-35.
- [22] 秦宗江. 叶尔羌河流域规划概述[J]. *水利规划与设计*, 2009(3): 3-5.
- [23] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 53-109.
- [24] 鲍士坦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [25] 任 敏. 塔里木盆地微生物群落结构及其在碳氮元素循环中的作用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018: 5-7.
- [26] 张东东. 极旱荒漠植物土壤微生物群落结构及功能多样性季节动态研究[D]. 保定: 河北大学, 2021: 1-2.
- [27] 程冬梅, 唐雅丽, 张坤迪, 等. 新疆天然胡杨林地区根际微生物的种群分析[J]. *生态科学*, 2013, 32(6): 711-717.
- [28] 韩艳洁. 内蒙古大青山几种乔木树种根际微生物数量和动态分布[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(9): 185-188.
- [29] 纪 刚. 南疆绿洲-荒漠过渡带土壤盐碱化分析[J]. *安徽农业通报*, 2017, 23(7): 81-85.
- [30] 刘洪波, 丁邦新, 白云岗, 等. 典型干旱区绿洲春季土壤盐分空间分布特征分析[J]. *土壤通报*, 2021, 52(2): 279-285.
- [31] 王 飞. 盐分对土壤微生物多样性及土壤有机物转化的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2011: 21-47.
- [32] 李 岩, 杨晓东, 秦 璐, 等. 两种盐生植物根际土壤细菌多样性和群落结构[J]. *生态学报*, 2018, 38(9): 3118-3131.
- [33] 孙建波, 畅文军, 李文彬, 等. 香蕉不同生育期根际微生物生物量及土壤酶活性的变化研究[J]. *生态环境学报*, 2012, 31(6): 1169-1174.
- [34] 李媛媛. 半干旱区锦鸡儿属植物根际土壤微生物群落结构及多样性研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2022: 25-29.

(责任编辑: 佟金凤)