

DOI: 10.5846/stxb202108172276

许婕, 刘加珍, 张天举, 马笑丹, 付丽, 张亚茹, 李苗, 马玉芹, 陈永金. 黄河口湿地柽柳灌丛土壤盐渍化特征. 生态学报, 2022, 42(17): 7118-7127.
Xu J, Liu J Z, Zhang T J, Ma X D, Fu L, Zhang Y R, Li M, Ma Y Q, Chen Y J. Soil salinization characteristics under the crown of *Tamarix chinensis* in the wetland of the Yellow River Estuary. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(17): 7118-7127.

黄河口湿地柽柳灌丛土壤盐渍化特征

许 婕^{1,2}, 刘加珍¹, 张天举^{3,4}, 马笑丹¹, 付 丽¹, 张亚茹¹, 李 苗¹, 马玉芹²,
陈永金^{1,*}

1 聊城大学地理与环境学院, 聊城 252059

2 长春理工大学化学与环境工程学院, 长春 130022

3 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011

4 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 为探究黄河三角洲湿地柽柳灌丛下土壤的盐渍化特征, 在黄河三角洲国家级自然保护区($37^{\circ}35'—12'N, 118^{\circ}33'—119^{\circ}20'E$)黄河入海口附近, 根据长势基本一致的原则分别在碱蓬群落、柽柳群落和芦苇群落各选3株柽柳, 采集柽柳灌丛下土壤样品, 分析土壤盐分和盐碱化参数的空间分布以及距基茎不同距离处研究对象(土壤总盐(TS)、电导率(EC)、pH、交换性钠百分率(ESP))和环境因子(Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-})之间的关系。结果表明:(1)研究区土壤为弱碱化盐土, 离子含量由高到低依次为 $\text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{HCO}_3^- > \text{K}^+$ 。除 pH 在土壤表层数值最低外, 表层土壤 TS、EC、ESP 和盐分离子大于深层土壤, 显示表聚性。(2)土壤盐分和盐碱化参数空间分布总体为: 在柽柳基茎周围形成“盐谷”、“碱谷”效应, Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 表现为“盐谷”, K^+ 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 表现为“盐岛”。(3)在整个土壤剖面中, 与 TS、EC 相关性最强的阴阳离子为 Mg^{2+} 、 Cl^- , 从灌丛中心到灌丛间裸地 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 与 TS、EC 的相关性逐渐减弱, Mg^{2+} 、 Cl^- 与 TS、EC 的相关性逐渐增强。 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 与 pH 表现为较强的负相关性; 与 ESP 相关性最强的阴离子为 HCO_3^- , 与之相关性最强的阳离子为 Na^+ 和 K^+ , 并且 Na^+ 和 K^+ 与 ESP 的相关性表现出从灌丛中心向外逐渐增强。(4)土壤盐渍化主要受控于 Na^+ , 从灌丛下到灌丛间裸地 Cl^- 对盐渍化程度的影响逐渐增加, SO_4^{2-} 的影响逐渐降低。

关键词: 土壤盐渍化; 冗余分析; 柽柳; 黄河三角洲

Soil salinization characteristics under the crown of *Tamarix chinensis* in the wetland of the Yellow River Estuary

XU Jie^{1,2}, LIU Jiazen¹, ZHANG Tianju^{3,4}, MA Xiaodan¹, FU Li¹, ZHANG Yaru¹, LI Miao¹, MA Yuqin², CHEN Yongjin^{1,*}

1 School of Geography and Environment, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China

2 School of Chemistry and Environment Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China

3 State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Halophytes play a critical role in the revolution of estuarine wetlands. *Tamarix chinensis* is a typical halophyte with salt resistance and barren tolerance. To explore the influence of *Tamarix chinensis* on salinization, A survey plot was set at the estuary of the Yellow River in the National Nature Reserve ($37^{\circ}35'—38^{\circ}12'N, 118^{\circ}33'—119^{\circ}20'E$), which covered 3 vegetation communities: *Suaeda salsa* (L.) Pall community, *Tamarix chinensis* community and *Phragmites*

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAC15B02); 国家自然科学基金项目(40871239); 聊城大学自然基金项目(318011407); 聊城大学社科平台项目(321021915)

收稿日期: 2021-08-17; 采用日期: 2021-12-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenyongjin@lcu.edu.cn

communis community. In each community, 3 sample *Tamarix chinensis* shrubs with similar age, height and crown width were chosen, 16 soil profiles were evenly arranged in the four directions of East, West, North and south, under each sample *Tamarix chinensis* crown. 5 soil profiles in each direction were 0.5, 1.0, 1.5, 2 and 2.5 m away from *Tamarix chinensis* basal stem respectively. In addition, one more soil profile was set next to basal stem lying at the center of the shrub. At each soil profile, soil samples are collected in layers according to the depth of 0—5, 5—10, 10—20, 20—30 and 30—50 cm. Total salinity (TS), electrical conductivity (EC), hydrogen ion concentration (pH), exchangeable sodium percentage (ESP), Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- and SO_4^{2-} were tested and analyzed in laboratory. One-way ANOVA and multiple comparison (LSD) were applied to analyze soil salt content and salinization parameters between different layers. Kriging interpolation method was applied to analyze the salt distribution characteristics of soil profile. The results show that: (1) the soil in the study area was weakly alkaline saline soil, and the order of ion content from high to low was $\text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{HCO}_3^- > \text{K}^+$. TS, EC, ESP and salt ions in the surface layer were greater than those in the deep layers, with the exception pH, which was the lowest in the surface layer, indicating surface aggregation. (2) The spatial distribution of soil salinity and salinization parameters is as follows: the of “Salt Valley” and “Alkali Valley” effects formed around the *Tamarix* basal stem, Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- formed “Salt Valley”, and K^+ , SO_4^{2-} , Ca^{2+} formed “Salt Island”. (3) Taking all the soil profiles as a whole, the anion and cation with the strongest correlation with TS and EC were Cl^- and Mg^{2+} , respectively. The correlation between Ca^{2+} , SO_4^{2-} and TS and EC from shrub center to outside edge of the shrub was gradually weakened, and the correlation between Mg^{2+} , Cl^- and TS and EC enhanced gradually. Ca^{2+} and SO_4^{2-} showed strongly negative correlation with pH. Of all the anions, HCO_3^- -expressed very significant correlation with ESP. Similarly, Na^+ and K^+ were the two anions expressing very significant correlation were Na^+ and K^+ . Furthermore, the correlation between Na^+ and K^+ and ESP increased gradually from shrub center to outside. (4) Soil salinization was mainly controlled by Na^+ , the influence of Cl^- on the degree of salinization gradually increased and the influence of SO_4^{2-} gradually decreased from shrub center to outside.

Key Words: soil salinity; redundancy analysis; *Tamarix chinensis*; Yellow River Delta

土壤盐渍化问题在世界普遍存在,主要表现为易溶性盐分不断积聚在土壤表层,并且盐渍化面积在不断增加,严重制约着农业生产和经济的发展^[1—2]。我国盐碱地多分布于我国西北干旱、半干旱区,东北、华北平原及沿海地区^[3],占全国可利用土地面积的4.88%^[4],盐碱地的改良开发可在一定程度上缓解我国的人地紧张及粮食安全问题。目前,盐碱地的治理主要有物理、化学和生物改良三种方法,其中生物改良方法生态环保且最具可持续性。环境对植物具有决定性影响,但植物并非完全被动受制于环境,盐生植物的生理特征对土壤理化性质的空间分布也会产生影响^[5],从而具有改良盐碱地效果。不少学者对植物改良盐碱地的效应进行了研究,荆为民等研究证实新疆盐碱地9种盐生植物具有较好的脱盐效果,且土壤表层脱盐率较高^[6];景宇鹏等研究了内蒙古河套灌区5种植物均能有效降低土壤的碱化度、全盐和pH^[7];黄丽萍等发现种植盐生植物可有效抑制天津盐渍土地区土壤盐分,但土壤pH值有所升高^[8];何玉惠等证实黄土高原西部荒漠草原区土壤盐分富集于红砂(*Reaumuria soongorica*)灌丛下^[9];张立华等对黄河三角洲盐碱地柽柳灌丛下土壤盐分分布及迁移特征也做过分析研究^[10]。但多数研究以内陆干旱、半干旱地区为对象,对滨海湿地土壤盐渍化的研究相对较少。

黄河三角洲湿地是我国最年轻且最广阔的湿地,位于农业大省山东省境内,作为重要的后备土地资源具有较大的开发利用潜力。受沉积环境、成土母质、水文气候等因素的影响,盐渍土广布,次生盐渍土面积约占30%^[11]。柽柳(*Tamarix chinensis*)作为泌盐盐生植物,能在盐胁迫环境下生长且广布于此。为了探究湿地土壤盐渍化特征以及植物对土壤盐渍化的改良适应机制,本文以柽柳灌丛下土壤为对象,用克里金插值法对土壤剖面理化性质进行空间插值,利用冗余分析法分析距柽柳基茎不同距离的盐碱化参数与盐分离子的关系,以期为黄河三角洲湿地资源开发利用与生态保护提供科学参考。

1 研究区概况

黄河三角洲湿地位于北纬37°35'—38°12',东经118°33'—119°20'^[12]。研究区在山东省东营市垦利区境

内,海拔较低,地势平坦,为典型的河口冲积平原。该区域属于暖温带大陆性季风气候,年均气温为11.7—12.6℃,年均降水量为530—630mm,降水集中在夏季,年均蒸发量为1900—2400mm。研究地主要有滨海盐土、盐化潮土和潮土3种土壤类型,自西向东潜水埋深较在1.16—1.71m之间,矿化度由10g/L左右增值30g/L左右^[13],易引起盐渍化。天然植被多为盐地碱蓬(*Suaeda salsa* (L.) Pall.)、柽柳、芦苇(*Phragmites communis*)、中华补血草(*Limonium sinense* (Girard) Kuntze)等盐生植物。

2 研究方法

2.1 样品采集

在黄河三角洲国家级自然保护区黄河入海口附近,根据不同群落柽柳灌丛长势基本一致的原则分别在碱蓬群落、柽柳群落和芦苇群落里各选取3株长势基本一致(株高2m,冠幅3m×3m)且周围5m内无其他大型灌木干扰的柽柳灌丛为代表。以每一柽柳灌丛基茎为中心,在柽柳灌丛根部及距主干0.5、1.0、1.5、2.0、2.5m处,按东、西、南、北四个方位设置土壤剖面,每个剖面按照0—5cm、5—10cm、10—20cm、20—30cm、30—50cm的分层进行取样(图1),共采集土壤样品945个。

2.2 实验分析

野外采集的土样经自然风干后去除植物残体和石块,磨细过18目孔筛后进行室内分析。制备5:1的水土比浸提液,采用S—2C数字酸度计仪测定土壤pH,采用DDSJ—308A电导率仪测定土壤溶液电导率(EC);采用火焰光度法测定土壤溶液K⁺与Na⁺,采用EDTA络合滴定法测定土壤溶液Mg²⁺和Ca²⁺;用AgNO₃滴定法测定土壤溶液Cl⁻,使用双指示剂滴定法测定土壤溶液CO₃²⁻和HCO₃⁻,用EDTA间接滴定法测定土壤溶液SO₄²⁻(参考)。碱化度计算公式为:

$$\text{ESP} = 100(-0.0126 + 0.01475\text{SAR}) / [1 + (-0.0126 + 0.01475\text{SAR})]$$

其中钠吸附比 SAR=Na⁺/[(Ca²⁺+Mg²⁺)/2]^{1/2}^[14]。

2.3 数据处理

数据统计分析采用Excel 2019和SPSS 23.0软件。对不同土层间的土壤盐分含量以及盐碱化参数进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和多重比较(LSD)。土壤盐分的剖面分布特征采用Surfer 16.0软件的Kriging模块进行空间插值。以土壤总盐(TS)、电导率(EC)、酸碱度(pH)、交换性钠百分率(ESP)为研究对象,Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、HCO₃⁻、SO₄²⁻(CO₃²⁻在实验中未检测到不考虑)为环境因子,采用国际通用软件Canoco 5.0先对距柽柳基茎不同距离的研究对象进行去趋势对应分析(DCA),结果表明各排序轴中梯度最长小于3适合线性模型,所以选择冗余分析(RDA)进行排序作图,结果用双序图表示。

3 结果分析

3.1 土壤盐渍化特征

3.1.1 土壤全盐量与盐碱化参数

土壤TS和EC是土壤盐化程度的重要指标。研究区域柽柳灌丛土壤TS的平均含量为16.49g/kg,按照我国现行盐渍土分类标准^[15](7 g/kg)属盐土。国内外学者研究发现,土壤盐化特征明显时EC通常大于4 ms/cm^[16—17],柽柳灌丛土壤EC值为4.15ms/cm,土壤具有盐化趋势。pH、ESP可以表征土壤碱化程度^[18]。研究区域土壤pH为7.79,ESP为6.10%介于5%—10%之间为弱碱化土。可见,研究区土壤为弱碱化盐土。

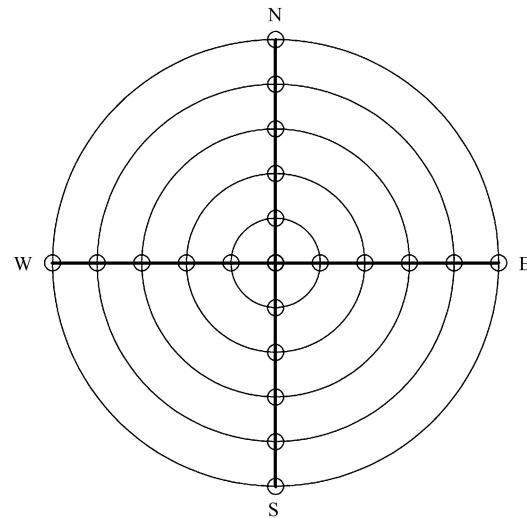


图1 柽柳冠下土壤采样点分布示意图

Fig.1 Distribution of soil sampling points under *Tamarix* canopy

土壤 TS 与盐碱化参数在不同土层之间存在差异:TS 含量随土壤深度增加而递减,在 0—10 cm 土层显著高于其他土层($P<0.05$);EC 在 0—10 cm 土层显著高于 20—50 cm($P<0.05$);pH 在 0—5 cm 土层显著低于其他土层($P<0.05$);ESP 在不同土层分布较为均匀,除 30—50 cm 土层外,其余土层间无显著性差异($P>0.05$) (图 2)。

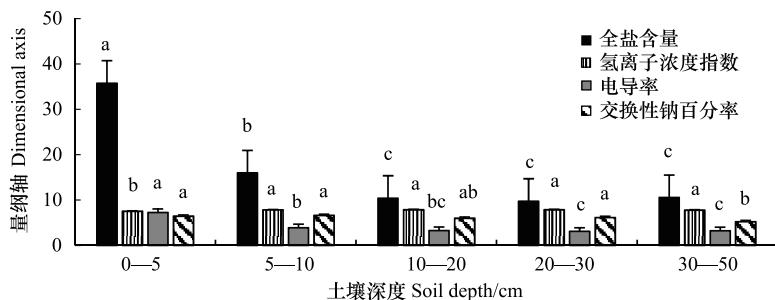


图 2 不同土层总盐与盐碱化参数

Fig.2 Total salt and salinization parameters in different soil layers

相同指标、不同土层无相同小写字母表示差异性显著($P<0.05$)

3.1.2 土壤盐分离子

土壤盐分离子的含量如图 3 所示。 K^+ 平均含量为 0.07 g/kg; Ca^{2+} 为 0.61 g/kg; Mg^{2+} 为 0.53 g/kg; Na^+ 为 3.71 g/kg; HCO_3^- 为 0.21 g/kg; SO_4^{2-} 为 0.83 g/kg; Cl^- 为 6.01 g/kg。各离子含量由大到小依次为 $Cl^->Na^+>SO_4^{2-}>Ca^{2+}>Mg^{2+}>HCO_3^->K^+$ 。不同土层盐分离子含量不同, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 含量在 0—5 cm 土层均显著高于其他土层($P<0.05$), HCO_3^- 含量在 30—50 cm 土层显著低于其他土层($P<0.05$),且其他土层间无显著性差异($P>0.05$), Na^+ 和 K^+ 均在 0—10 cm 土层显著高于其他土层($P<0.05$)。

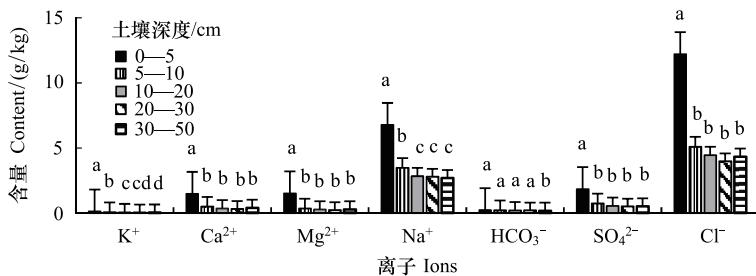


图 3 不同土层盐分离子含量

Fig.3 Salt ion content in different soil layers

相同指标、不同土层无相同小写字母表示差异性显著($P<0.05$)

3.2 土壤盐渍化的剖面空间分布特征

3.2.1 土壤全盐量与盐碱化参数的剖面空间分布特征

距灌丛中心的距离为 x 轴,距地表的距离为 y 轴,作土壤剖面图(图 4)。纵向看,土壤 TS、EC 具有表聚性;pH 的分布特征与之相反,在土壤表层数值最低;ESP 表层较高,但总体分布较为均匀。横向看,柽柳冠下土壤各指标均低于灌丛间裸地,在柽柳基茎周围形成“盐谷”、“碱谷”效应;TS、EC 在 0—10 cm 土层,半径 150 cm 的范围内形成“盐谷”;pH 在 0—5 cm,半径 50 cm 的范围内形成“碱谷”;ESP 则在半径 50 cm 范围内均存在“碱谷”效应,但在 0—20 cm 土层表现得更为强烈。

3.2.2 土壤盐分离子的剖面空间分布特征

纵向看,各盐分离子均聚集在土壤表层。横向看,不同盐分离子具有不同的区划特征, Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 在柽

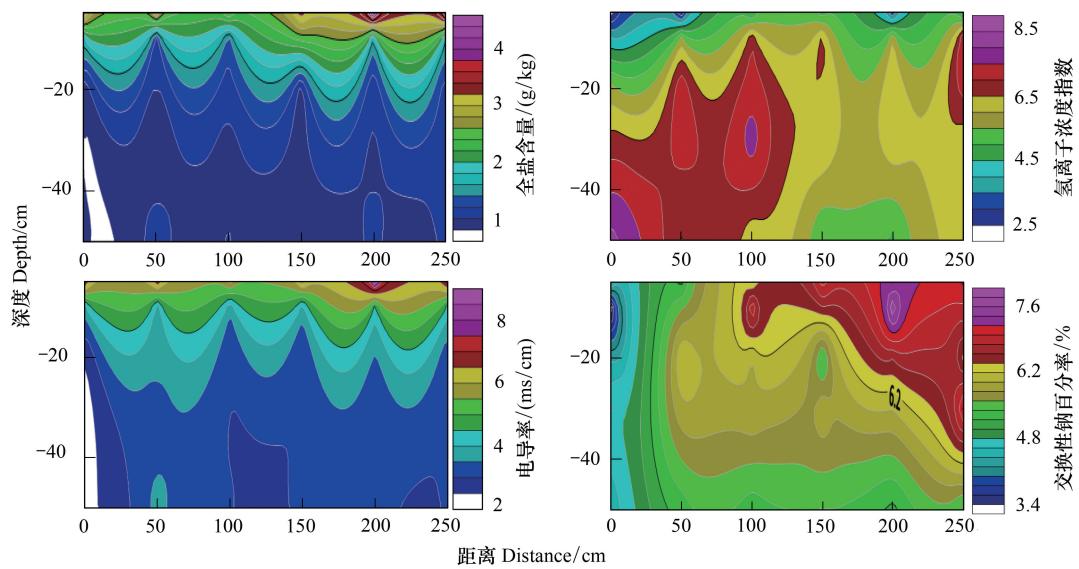


图 4 土壤总盐与盐碱化参数剖面分布图

Fig.4 Distribution profiles of total salt and salinization parameters

柳冠下土壤的含量均低于灌丛外的裸地,在柽柳基茎周围形成“盐谷”;而 K^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 在基茎周围土壤的含量较高,形成“盐岛”; HCO_3^- 在表层整体较高,无明显的区划特征; Na^+ 在0—20 cm土层、 Mg^{2+} 在0—10 cm土层,半径150 cm内存在“盐谷”效应; Cl^- 的“盐谷”效应表现在0—5 cm土层,半径100 cm范围内; K^+ 则在0—10 cm土层,半径70 cm范围内表现为“盐岛”效应; Ca^{2+} 在0—10 cm土层、0—50 cm半径范围, SO_4^{2-} 在0—20 cm土层、半径100 cm范围内存在“盐岛”效应(图5)。

3.3 土壤盐渍化特征的冗余分析

3.3.1 RDA分析可信度

为了更直观的反映土壤盐碱化参数与盐分离子之间的关系,将TS、EC、pH和ESP作为研究对象, K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 作为环境因子,对距柽柳灌丛中心不同距离土壤的盐渍化特征进行了RDA分析,分析结果如表1所示。不同距离环境因子前两个排序轴的相关系数均为0,研究对象前两个排序轴的相关系数绝对值在0.01—0.05之间,表明这两个排序轴近乎完全垂直^[19]。前两个排序轴共解释了67%—87%的土壤盐渍化特征和81.9%—95.6%的盐碱化参数与盐分离子的关系,并且研究对象、环境因子与第一、第二排序轴的相关性分别在0.94和0.87以上,说明能够很好的反映出研究对象与环境因子之间的线性关系,RDA排序结果是可信的。

3.3.2 土壤盐分离子间及其与盐碱化参数的RDA分析

因根部土壤样品数少于环境因子数,故只做距灌丛中心50 cm、100 cm、150 cm、200 cm、250 cm和整个土壤剖面的二维排序图,如图6所示。图中将研究对象用虚线实心箭头表示,环境因子用实线空心箭头表示。箭头连线之间的夹角(余弦值)代表它们之间的相关性,锐角表示二者呈正相关,夹角越小相关性越高,钝角反之;箭头连线长度表示环境因子对研究对象的影响程度,连线越长,影响程度越大^[20—21]。

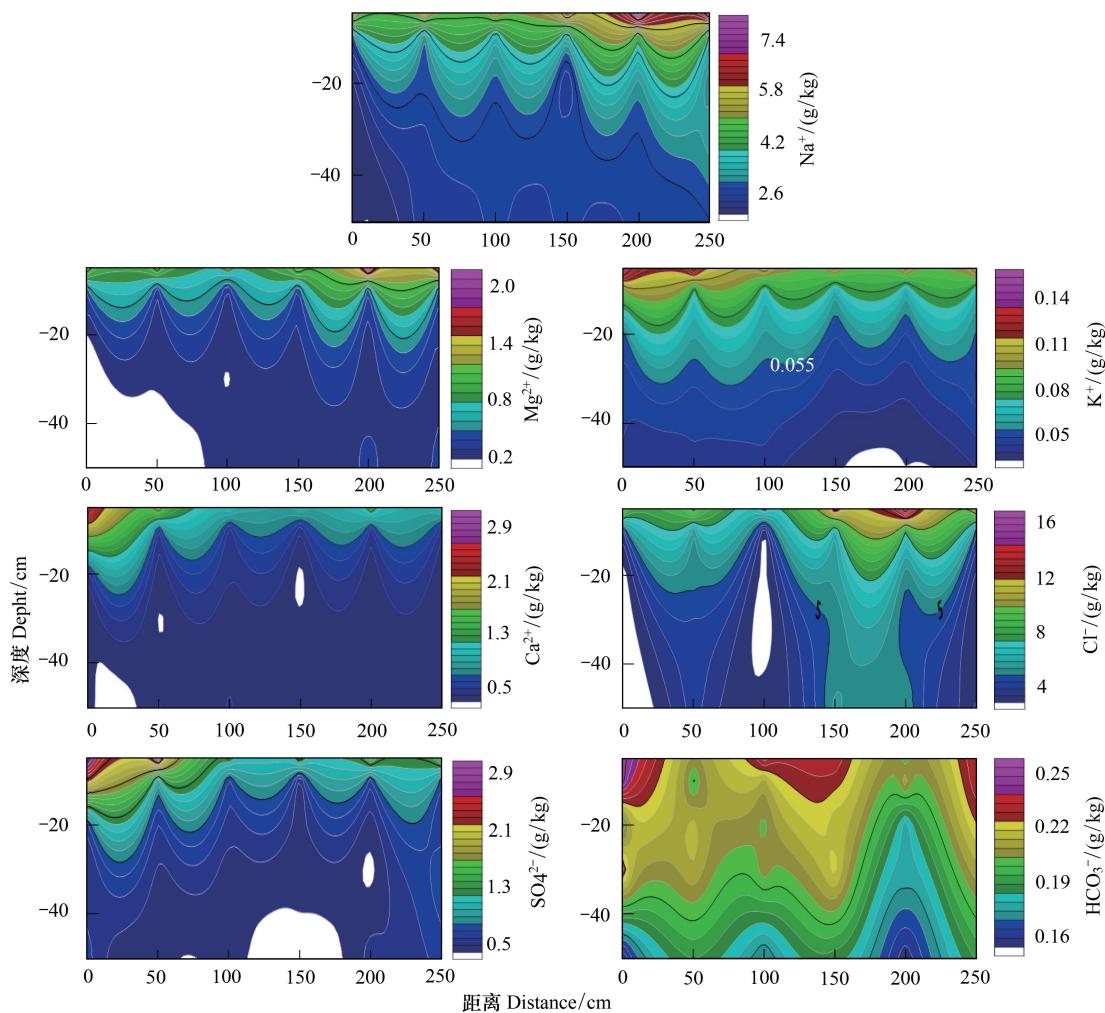


图5 土壤盐分离子剖面分布图
Fig.5 Profile distribution of soil salt ions

表1 中文冗余分析(RDA)统计结果分析

Table 1 Analysis of RDA statistical results

统计项目	50		100		150		200		250		0—250	
	SPX1	SPX2	SPX1	SPX2	SPX1	SPX2	SPX1	SPX2	SPX1	SPX2	SPX1	SPX2
特征值 Eigenvalues	0.51	0.27	0.55	0.32	0.43	0.24	0.62	0.23	0.55	0.26	0.49	0.22
对研究对象的累积解释量/%												
Cumulative percentage variance of subjects	51.2	78.0	54.9	87.0	42.8	67.0	62.0	85.0	55.0	81.3	48.9	70.9
研究对象-环境因子关系累积解												
释量/%	61.8	94.2	59.7	94.6	52.4	81.9	65.3	89.5	63.4	93.7	66	95.6
Cumulative percentage variance of subjects-environment relation												
研究对象-环境因子排序轴相关性												
Correlation coefficient between subjects-environment data	0.96	0.98	0.98	0.97	0.96	0.94	0.99	0.95	0.98	0.94	0.94	0.87
研究对象前两轴相关性	0.02		-0.02		0.01		-0.01		0.05		0.04	
First two axis correlation of subjects												

SPX1:土壤属性排序轴1 Soil attribute sorting axis 1; SPX2:土壤属性排序轴2 Soil attribute sorting axis 2

从研究对象与盐分离子之间的关联程度来看,在整个土壤剖面中,在整个土壤剖面中,所有离子均与 TS、

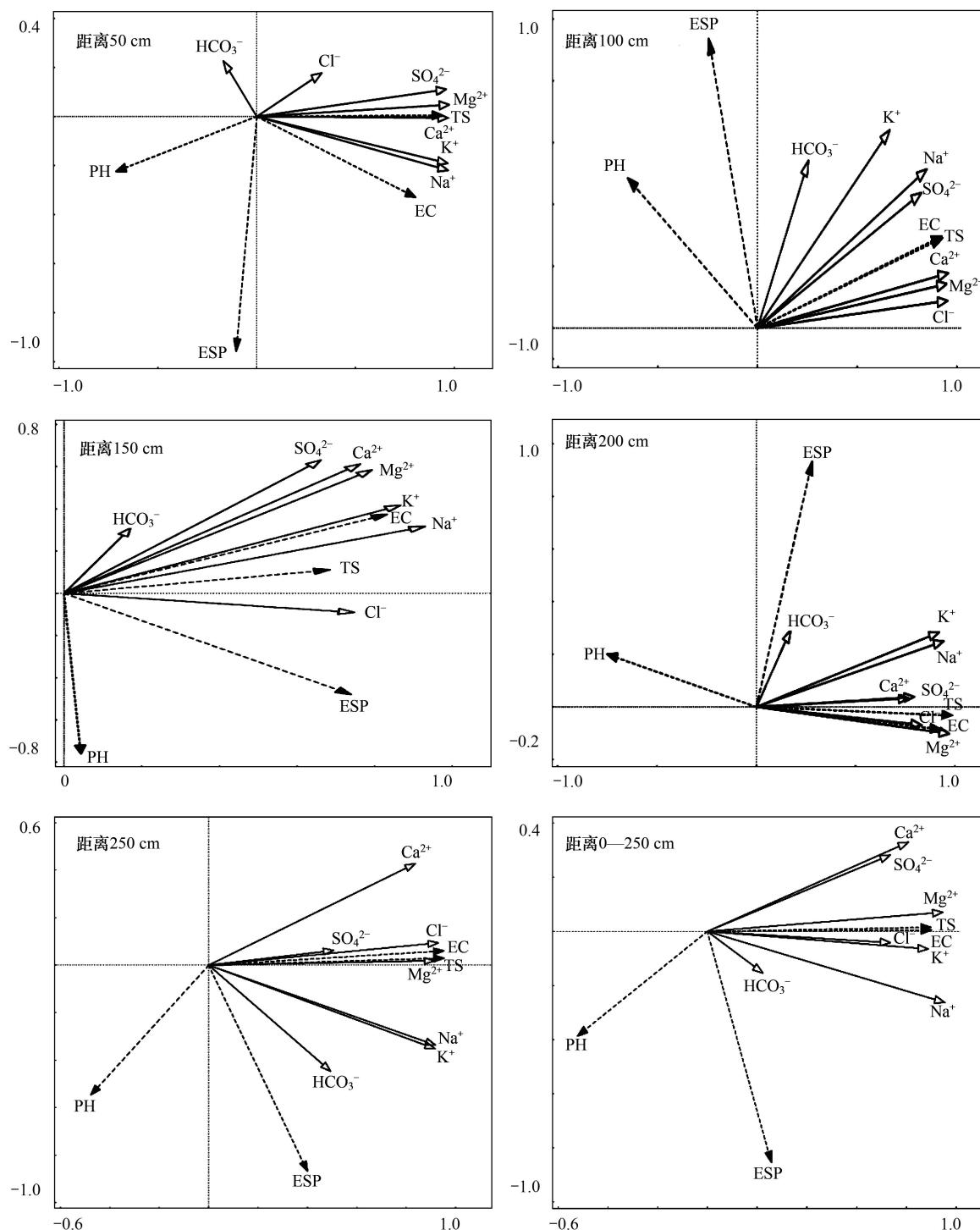


图6 不同距离土壤盐分的中文冗余分析(RDA)二维排序图

Fig.6 Two dimensional ordination diagram of redundancy analysis (RDA) of soil salts at different distances

EC 表现出较好的相关性,与 TS、EC 相关性最强的阴阳离子为 Mg^{2+} 、 Cl^- 。从灌丛中心到灌丛间裸地与 TS、EC 相关性较强的离子由 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 向 Mg^{2+} 、 Cl^- 转变。 Na^+ 和 K^+ 在不同距离与 TS、EC 的相关性较稳定。 HCO_3^- 较其他离子与 TS、EC 相关性始终较弱。在全剖面中与 pH 相关性最强的阴阳离子分别为 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} ,且呈负相关,在 50cm 处与之呈负相关的还有 Cl^- 。与 ESP 相关性最强的离子为 HCO_3^- ,在 50cm 处二者呈负相关,其余距离表现为正相关,与之相关性最强的阳离子为 Na^+ 、 K^+ 次之,并且随距基茎距离的增大相关性逐渐增强。

从盐分离子箭头连线之间的关联程度来看, K^+ 和 Na^+ , Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Mg^{2+} 和 Cl^- 的箭头连线夹角始终较小, 说明该离子间的相关性较强, 其中 Mg^{2+} 和 Cl^- 的箭头连线夹角随距基茎距离的增加逐渐变小, 相关性逐渐增强。

从不同距离处离子对土壤盐渍化的影响程度来看, Na^+ 箭头连线最长, 表明土壤盐渍化主要受控于 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 K^+ 对土壤盐渍化的影响程度都较大, 在不同距离处的变化较小。对盐渍化影响程度最大的阴离子为 Cl^- 和 SO_4^{2-} , SO_4^{2-} 的箭头长度随与灌丛中心距离的增加而逐渐变短, Cl^- 与之相反, 说明从灌丛下到裸地 Cl^- 对盐渍化程度的影响逐渐增加, SO_4^{2-} 的影响逐渐降低。 HCO_3^- 的箭头长度始终最短, 表明 HCO_3^- 对土壤盐渍化的影响程度最小, 这可能与 HCO_3^- 在土壤中的含量较少有关。

4 讨论

盐碱土是各种盐土、碱土以及不同程度盐化、碱化土壤的总称^[22]。该区域土壤盐分离子中 Cl^- 和 Na^+ 含量最高, 为 TS 的主控因子, 主要与研究区临近渤海, 海水长期侧渗加之人采地下水导致地下水位降低海水倒灌有关^[23]。在海陆风和太阳辐射双重作用下, 地下水中的盐分随毛管水上升到地表并不断积聚, 土壤盐分普遍表现为表聚性。应当控制或减少钠盐、氯盐的投入, 加强地下水开采的控制管理并采取措施防止海水侵渍加剧^[24]。

4.1 盐碱谷机制及适应策略

土壤空间异质性是生物与土壤相互作用的一个特征表现^[25-26]。本研究中柽柳冠下土壤 TS、EC、pH 和 ESP 均低于灌丛间裸地, 形成“盐谷”、“碱谷”效应。在灌丛下形成低盐区, 一方面是由于柽柳对土壤盐分的吸收作用, 降低土壤盐含量; 另一方面柽柳多枝、半球状的形态易于汇集雨水形成树干径流作用, 在柽柳发达根系的穿插作用下, 有利于柽柳分泌的盐分以及灌丛下土壤盐分淋溶至深层土壤或地下水中, 这种形态还可以增强遮蔽作用, 植物蒸腾代替水分蒸发, 在灌丛下形成低温、湿润的环境, 减轻土壤返盐^[5,27-28]。但盐生植物对盐分的吸收转移具有周期性, 吸收的盐分除部分转化为有机物被植物利用外, 其余贮存在植物体内的盐分以凋落物的形式归还土壤形成生物积盐。在研究区内, 地表还生长有真盐盐生植物碱蓬, 但其肉质化的叶片易腐烂分解, 大量释放贮存于体内的盐分, 因此可以对其进行适度收割, 实现盐分转移, 同时覆盖秸秆缓解地表蒸发积盐和填补养分的转移^[29-30]。柽柳灌丛下以及土壤表层形成 pH 低值区, 主要由于柽柳和地表其他小型盐生植物的根系能够分泌有机酸、根系土壤中微生物的呼吸作用以及微生物对植物残体的分解作用产生酸可中和碱性土壤^[31]。ESP 也表现为在灌丛下形成低值区, 说明柽柳能有效的缓解土壤返碱。为适应盐碱化环境, 土壤养分也具有空间异质性, 表现为柽柳灌丛下土壤养分高于株间裸地, 形成“肥岛”效应^[32]。柽柳捕获的地上凋落物和根系脱落物在小型动物和微生物的分解作用下, 提高了柽柳灌丛下土壤养分含量, 改善土壤理化性质^[33]。这为灌丛下其他盐生植物生长提供良好的生长环境, 从而加强了柽柳灌丛下“肥岛”、“盐谷”的强度和范围, “肥岛”效应与“盐谷”效应相互促进, 促使黄河口湿地土壤向高养分、低盐分, 低 pH 值推进。

4.2 土壤盐分离子的空间分布差异

土壤盐分的空间分布特征还表现为离子间的差异性, 这与离子的迁移特性和柽柳对离子的选择性吸收有关。由于受海潮周期性涨落的影响, 盐分离子在蒸发表聚的同时, 也伴随潮水冲洗作用, 由于 Na^+ 和 Cl^- 在土壤中易随水迁移扩散, 所以在空间分布图中 Na^+ 和 Cl^- 相较其他离子的表聚范围可达更深土层。在冗余分析中, 从灌丛下到灌丛间裸地 Cl^- 对土壤盐渍化程度的影响逐渐增加, SO_4^{2-} 的影响逐渐降低, 这与从灌丛下到裸地 Cl^- 含量逐渐升高, SO_4^{2-} 含量逐渐降低有关。 Cl^- 和 SO_4^{2-} 区划特征的差异性一方面是因为在盐胁迫影响下柽柳选择性吸收 Cl^- , 当根系吸收转移量高于离子向根际的输入量时, 表现为柽柳根部离子亏缺^[34]; 另一方面 Cl^- 较 SO_4^{2-} 易迁移, 随蒸发大量聚集在裸露地表, 加之在树干径流强烈的冲洗作用下, 硫酸盐类较氯化物的淋溶速度慢^[35], 所以在基茎周围 Cl^- 表现为“盐谷”, SO_4^{2-} 表现为“盐岛”。同样在盐胁迫环境下柽柳吸收大量

Na^+ ,植物体内 Na^+ 含量过高会抑制根系对其他阳离子的吸收^[36-37],当根系吸收速率小于离子运移速率时, Ca^{2+} 、 K^+ 在柽柳基茎周围形成“盐岛”,而 Mg^{2+} 表现为“盐谷”,这可能与 Mg^{2+} 是叶绿素的重要组成成分,参与植物的光合作用和多种生理代谢过程,在植物生长发育过程中发挥重要作用^[38]。为了防止单一离子的毒害,柽柳通过较强的光合作用吸收 Mg^{2+} 形成“盐谷”,从而提高柽柳耐盐力。张天举等对黄河三角洲湿地不同季节土壤盐渍化特征进行了分析,发现 Mg^{2+} 含量在夏季和秋季表现出极强的变异性^[39],这或许是夏秋两季柽柳枝叶茂密光合作用强的缘故,该区域柽柳灌丛下 Mg^{2+} 的季节性空间分布特征还有待进一步研究。

4.3 展望

冗余分析是一种直接梯度分析方法,能从统计学的角度反映研究对象与环境因子间的相互关系^[40],本研究将冗余分析法和克里金插值法相结合,能较好的反映柽柳灌丛下土壤的盐渍化特征,但缺少对植物体盐分与土壤盐分间相互关系的分析。近年来不少学者对土壤-植物-凋落物间的养分及生态化学计量进行了研究^[41-42],但对三者间盐分循环过程的研究较为少见,可以从植物不同器官、不同季节动态的角度来分析土壤-植物-凋落物间盐分的生物地球化学循环过程,探讨盐生植物改良盐碱地的机制,为湿地生态系统的保护提供参考依据。

5 结论

(1) 研究区土壤 TS 的平均含量为 16.49 g/kg、EC 为 4.15 ms/cm、pH 为 7.79、ESP 为 6.10 %,为弱碱化盐土,具有盐化趋势。离子含量由高到低依次为 $\text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{HCO}_3^- > \text{K}^+$ 。土壤盐分与盐碱化参数在不同土层之间存在差异,TS、EC 和 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 表层含量高于其他土层;pH 值与之相反,ESP 和 HCO_3^- 在 30—50 cm 土层低于其他土层。

(2) 除 pH 在土壤表层数值最低外,TS、EC、ESP 和盐分离子均具有表聚性,柽柳冠下土壤总盐和盐碱化参数值低于灌丛间裸地,在柽柳冠下形成“盐谷”、“碱谷”效应,有效防止灌丛下土壤的次生盐渍化;不同离子具有不同的区划特征, Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 在柽柳基茎周围形成“盐谷”, K^+ 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 形成“盐岛”。

(3) RDA 排序结果可信,能较好地反映出研究对象与环境因子之间的线性关系。在整个土壤剖面中,所有离子均与 TS、EC 表现出较好的相关性,与 TS、EC 的相关性最强的阴阳离子为 Mg^{2+} 、 Cl^- 。从柽柳冠下到灌丛间裸地与 TS、EC 相关性较强的离子由 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 向 Mg^{2+} 、 Cl^- 转变。 Na^+ 和 K^+ 在不同距离与 TS、EC 的相关性较稳定。 HCO_3^- 较其他离子与 TS、EC 相关性始终较弱。 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 与 pH 表现为较强的负相关性;与 ESP 相关性最强的阴离子为 HCO_3^- ,与之相关性最强的阳离子为 Na^+ 和 K^+ ,并且相关性随距基茎距离的增大而增强。盐分离子 K^+ 和 Na^+ , Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 间的相关性较强。

4) 土壤盐渍化主要受控于 Na^+ ,从柽柳冠下到灌丛间裸地 Cl^- 对盐渍化程度的影响逐渐增加, SO_4^{2-} 的影响逐渐降低; HCO_3^- 对土壤盐渍化的影响程度最小。

参考文献(References):

- [1] 王佳丽, 黄贤金, 钟太洋, 陈志刚. 盐碱地可持续利用研究综述. 地理学报, 2011, 66(5): 673-684.
- [2] Farooq M, Hussain M, Wakeel A, Siddique K H M. Salt stress in maize: effects, resistance mechanisms, and management. A review. Agronomy for Sustainable Development, 2015, 35(2): 461-481.
- [3] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望. 土壤学报, 2008, 45(5): 837-845.
- [4] 吴雪梅, 塔西甫拉提·特依拜, 姜红涛, 陶兰花, 张飞, 买买提·沙吾提. 基于 CCA 方法的于田绿洲土壤盐分特征研究. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1568-1575.
- [5] 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, 69-69.
- [6] 荆卫民, 宫江平, 刘秉寿, 王喜勇, 张正, 曾焕斌, 侯振安. 9 种盐生植物对克拉玛依盐碱地绿化脱盐效果研究. 绿洲农业科学与工程, 2019, 5(2): 46-50.
- [7] 景宇鹏, 林春野, 赵沛义, 李秀萍, 赵强, 刘宇杰, 刘梅, 妥德宝, 王丽君, 杨晓. 5 种植物改良河套灌区盐渍化土壤的效果研究. 土壤与

- 作物, 2020, 9(2): 114-125.
- [8] 黄丽萍, 王立艳, 杨勇, 肖辉, 程文娟, 潘洁. 四种耐盐植物根际土壤盐分迁移特征研究. 天津农业科学, 2014, 20(6): 73-76.
- [9] 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.
- [10] 张立华, 陈沛海, 李健, 陈小兵, 冯亚. 黄河三角洲柽柳植株周围土壤盐分离子的分布. 生态学报, 2016, 36(18): 5741-5749.
- [11] 范晓梅, 刘高焕, 唐志鹏, 束龙仓. 黄河三角洲土壤盐渍化影响因素分析. 水土保持学报, 2010, 24(1): 139-144.
- [12] 陈永金, 刘加珍, 靖淑慧, 张天举, 张娟娟. 黄河三角洲湿地柽柳冠下“肥岛/谷”现象研究. 聊城大学学报: 自然科学版, 2018, 31(1): 56-64.
- [13] 吕真真, 杨劲松, 刘广明, 李金彪, 刘洪强, 李兵. 黄河三角洲土壤盐渍化与地下水特征关系研究. 土壤学报, 2017, 54(6): 1377-1385.
- [14] 金梦野, 黄娟, 侯嫔, 黄占斌. 三种环境材料及其复合施用对盐碱化土壤的改良效果研究. 农业环境科学学报, 2020, 39(1): 118-124.
- [15] 王遵亲. 中国盐渍土. 北京: 科学出版社, 1993.
- [16] 赵庆庆, 白军红, 高永超, 王磊磊, 郑立稳, 王加宁, 张树岩. 黄河三角洲湿地土壤盐离子沿水盐梯度的变化特征. 农业环境科学学报, 2019, 38(3): 641-649.
- [17] Rath K M, Rousk J. Salt effects on the soil microbial decomposer community and their role in organic carbon cycling: a review. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 81: 108-123.
- [18] 郁敏, 孔范龙, 李悦, 于雪. 胶州湾滨海湿地土壤的盐渍化特征. 水土保持通报, 2016, 36(6): 288-292.
- [19] 于文婧, 孙丹峰, 曲葳. 基于冗余分析的宁夏平罗耕地土壤盐渍化特征研究. 中国农业大学学报, 2015, 20(5): 103-110.
- [20] 张莹, 刘畅, 宋昂, 靳振江, 李强. 基于典范对应分析的会仙岩溶湿地土壤理化性质与土壤酶活性关系研究. 中国岩溶, 2016, 35(1): 11-18.
- [21] Bodaghabadi M B, Faskhodi A A, Salehi M H, Hosseiniard S J, Heydari M. Soil suitability analysis and evaluation of pistachio orchard farming, using canonical multivariate analysis. Scientia Horticulturae, 2019, 246: 528-534.
- [22] 温祝桂, 朱小梅, 陈亚华, 董静, 刘冲, 赵宝泉, 邢锦城, 丁海荣, 刘兴华. 国内盐碱土改良技术及其对土壤微生物群落影响研究进展. 陕西农业科学, 2016, 62(5): 68-71.
- [23] 张效龙, 孙永福, 刘敦武. 黄河三角洲地区地下水分析. 海洋地质动态, 2005, 21(6): 26-28.
- [24] 张天举, 陈永金, 刘加珍. 黄河口湿地不同植物群落土壤盐分与养分分布特征. 土壤, 2020, 52(1): 180-187.
- [25] 高露, 张圣微, 赵鸿彬, 高文龙, 杜银龙, 林汐. 退化草原土壤理化性质空间异质性及其对土壤水分的影响. 干旱区研究, 2020, 37(3): 607-617.
- [26] Xu W, Bezemert T M, Berendse F. Soil heterogeneity and plant species diversity in experimental grassland communities: contrasting effects of soil nutrients and pH at different spatial scales. Plant and Soil, 2019, 442(1): 497-509.
- [27] 郁慧萍. 油松中龄林的小气候效应研究. 山西林业科技, 2020, 49(1): 40-42.
- [28] Allegrezza M, Corti G, Cocco S, Pesaresi S, Chirico G B, Saracino A, Bonanomi G. Microclimate buffering and fertility island formation during *Juniperus communis* ontogenesis modulate competition-facilitation balance. Journal of Vegetation Science, 2016, 27(3): 616-627.
- [29] 张爱琴, 庞秋颖, 阎秀峰. 碱蓬属植物耐盐机理研究进展. 生态学报, 2013, 33(12): 3575-3583.
- [30] 葛云, 程知言, 胡建, 孙丰瑞, 杨晋炜. 不同秸秆利用方式下江苏滨海盐碱地盐碱障碍调控. 江苏农业科学, 2018, 46(2): 223-227.
- [31] 吴林坤, 林向民, 林文雄. 根系分泌物介导下植物-土壤-微生物互作关系研究进展与展望. 植物生态学报, 2014, 38(3): 298-310.
- [32] 许婕, 陈永金, 刘加珍, 陈曦, 吴昊杰. 黄河口湿地柽柳灌丛对土壤养分分布的影响. 人民黄河, 2021, 43(10): 102-108.
- [33] 范媛媛, 李懿, 李启迪. 不同林龄油松土壤微生物、酶活性和养分特征. 水土保持研究, 2019, 26(6): 58-64.
- [34] 陈德明, 俞仁培. 土壤—作物系统中的盐分迁移与分布特征. 土壤通报, 1995, 26(1): 3-5.
- [35] 牛东玲, 彭宏春, 王启基, 尔切江, 李晓明, 扬慧青, 仓生海, 郑迎林. 柴达木盆地弃耕地盐渍状况的主分量分析. 草业学报, 2001, 10(2): 39-46.
- [36] Grieve C M, Shannon M C. Ion accumulation and distribution in shoot components of salt-stressed Eucalyptus clones. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1999, 124(5): 559-563.
- [37] 海霞, 刘景辉, 杨彦明, 赵洲, 陈晓晶, 贾硕. 盐胁迫对燕麦幼苗 Na^+ 、 K^+ 吸收和离子积累的影响. 麦类作物学报, 2019, 39(5): 613-620.
- [38] 李丽, 张欣欣. 植物 Mg^{2+} 转运体在镁胁迫下调控 Mg^{2+} 转运的分子机制研究进展. 基因组学与应用生物学, 2020, 38(10): 4695-4699.
- [39] 张天举, 陈永金, 刘加珍. 基于典范对应分析的滨海湿地土壤季节性盐渍化特征. 生态学报, 2019, 39(9): 3322-3332.
- [40] Šmilauer P, Lepš J. Multivariate Analysis of Ecological Data using CANOCO 5. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [41] Yu M F, Tao Y X, Liu W Z, Xing W, Liu G H, Wang L, Ma L. C, N, and P stoichiometry and their interaction with different plant communities and soils in subtropical riparian wetlands. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(1): 1024-1034.
- [42] 马寰菲, 解梦怡, 胡汗, 郭垚鑫, 任成杰, 赵发珠. 秦岭不同海拔森林土壤-植物-凋落物化学计量特征对土壤氮组分的影响. 生态学杂志, 2020, 39(3): 749-757.