

DOI: 10.5846/stxb201806111305

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): - .

Zhang T J, Chen Y J, Liu J Z. Characteristics of soil salinization in coastal wetlands based on canonical correspondence analysis. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): - .

基于典范对应分析的滨海湿地土壤季节性盐渍化特征

张天举, 陈永金*, 刘加珍

聊城大学 环境与规划学院, 聊城 252059

摘要:为了更好地开发利用黄河三角洲湿地土壤资源和生态环境建设,运用单因素方差分析(One-way ANOVA)和典范对应分析方法(CCA),对黄河口湿地 0—10 cm 土壤全盐量(TS)、盐分离子组成、pH、钠吸附比(SAR)、电导率(EC)的季节性变化特征及数量关系进行了分析。结果表明:该区土壤属于盐土类型,春季(5月)、夏季(8月)、秋季(10月)全盐含量均高于 17.9 g/kg,且春季、秋季的含盐量高于夏季,造成春、秋季积盐,夏季脱盐。盐分阳离子以 Na^+ 为主,阴离子以 Cl^- 为主,除 Mg^{2+} 在夏季、秋季和 Cl^- 在秋季表现出强烈的变异性外,其余离子在不同季节均表现出中等强度的变异性。春季, Cl^- 与 Na^+ 、 Mg^{2+} , SO_4^{2-} 与 K^+ ; 夏季, Cl^- 与 HCO_3^- , SO_4^{2-} 与 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} , Ca^{2+} 与 Mg^{2+} ; 秋季, Cl^- 与 SO_4^{2-} , SO_4^{2-} 与 Mg^{2+} , Ca^{2+} 与 Mg^{2+} , 均有很好的关联性。pH 值均介于 7.7—8.1 之间,各个季节受盐分离子的影响较小,分布较为均匀。SAR 介于 3.08—5.29 之间,春季受控于 HCO_3^- ; 夏季受控于 K^+ ; 秋季受各离子的影响均较小,分布较为均匀。EC 介于 7.16—13.04 mS/cm,春季受各离子的影响均较小,其空间分布较为均匀;夏季受控于 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ; 秋季受控于 Na^+ 。TS 与 Cl^- 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 在季节变化上的差异性一致,且各个季节均受控于 Cl^- 。故通过合理的措施控制或减少 Cl^- 来源是一条减轻黄河口湿地土壤盐渍化的合适途径。

关键词:黄河口湿地;土壤盐渍化;典范对应分析;季节性

Characteristics of soil salinization in coastal wetlands based on canonical correspondence analysis

ZHANG Tianju, CHEN Yongjin*, LIU Jiazhen

School of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China

Abstract: To develop and utilize wetland soil resources and ecological environment construction in the Yellow River Delta, a one-way variance analysis (ANOVA) and canonical correspondence analysis (CCA) were applied to analyse the seasonal distribution characteristics and quantitative relationships of total salt content (TS), ion composition, pH value, sodium adsorption ratio (SAR), and electrical conductivity (EC) in the surface layer (0—10 cm) of the soil profile. The results indicated that: (1) the soil of the study area belonged to the type of heavy solonchak, the mean soil salinity was more than 17.9 g/kg in spring (May), summer (August), and autumn (October) and the salt content in May and October was higher than that in August, which caused salification in spring and autumn and desalination in summer. (2) The dominate cation and anion of the soil were Na^+ and Cl^- , respectively, Mg^{2+} expressed strong variability in summer and autumn and Cl^- in autumn, the other ions showed moderate intensity variation in different seasons. (3) Correlations between Cl^- and Na^+ , Cl^- and Mg^{2+} , and SO_4^{2-} and K^+ were significant in May and Cl^- and HCO_3^- , SO_4^{2-} and Mg^{2+} , SO_4^{2-} and Ca^{2+} , Ca^{2+} and Mg^{2+} in August, and Cl^- and SO_4^{2-} , SO_4^{2-} and Mg^{2+} , and Ca^{2+} and Mg^{2+} in October. (4) pH values varied between 7.7 and 8.1 and were less influenced by ions and more uniformly distributed in all three seasons. SAR varied between 3.08 and 5.29

基金项目:国家科技支撑计划项目(2014BAC15B02);国家自然科学基金(40901276,40871239)

收稿日期:2018-06-11; 网络出版日期:2018-00-00

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

and it was strongly influenced in May and K^+ in August. It was weakly influenced by any ion and was distributed evenly in October. EC varied between 7.16 and 13.04 mS/cm and it was weakly influenced by ions in the soil and was distributed uniformly in May. However, it was significantly influenced by SO_4^{2-} , Ca^{2+} , and Mg^{2+} in August, and Na^+ in October. The seasonal variation in TS was coincident with Cl^- , Na^+ , and Mg^{2+} , and Cl^- was the major factor controlling spatial distribution of soil total salt throughout all of three seasons. Therefore, controlling or reducing the Cl^- source is an optional approach to alleviate soil salinization in the wetlands of the Yellow River Delta.

Key Words: Yellow River Estuary Wetland; soil salinization; canonical correspondence analysis; seasonality

土壤是植物生长发育的物质基础^[1],植物又对土壤理化性质产生影响^[2]。世界约有 1/3 的土壤发生盐渍化,严重影响了土地资源尤其是耕地资源的有效供给^[3-4]。改善土壤质量追求具有高效生产力的土地资源成为各国的首选。受气候、地貌、水文地质等自然因素和耕作、灌溉、田间管理等人类活动的共同影响,我国盐渍化土壤广泛分布于干旱、半干旱地区和滨海滩涂地区^[5-6]。滨海盐渍化土壤中含有大量的可溶性盐,容易引起植物的生理水分不足,抑制营养物质的吸收,影响植物发育和产量^[7-8]。

滨海河口湿地位于陆地和海洋生态系统的过渡地带^[9-12],其生态系统相对脆弱,受海侵和河流的共同影响,土壤相对贫瘠,植物群落结构相对简单。黄河三角洲河口湿地位于渤海湾与莱州湾之间,是我国面积最大、增长最快的新生河口湿地生态系统^[13]。受气候条件、土壤母质、海水以及沉积环境等影响,盐渍化土壤广布,严重影响农业生产和区域生态系统的安全^[14-16]。研究区域盐渍化问题,对于更好地预防和治理土壤盐渍化及恢复生态系统具有十分重要的意义^[17]。当前许多学者已经对黄河口湿地土壤盐渍化特征及其盐分组成等相关方面做了大量研究^[18-21],这些研究在环境因子方面,大多是只考虑了单因子(TS、pH、EC)对土壤性质的影响;在时间维度上,大多是以单一季节(春季、夏季、秋季等)为主;在分析方法上,大多是采用传统的统计分析如相关分析、因子分析、方差分析和回归分析等,当变量数据较多时,这些方法无法直观地给出多变量间的相互作用关系,数量生态学中的典范对应分析方法(Canonical correspondence analysis, CCA)^[22]能够直观地给出多变量间的相互作用关系,可以较好地反映研究对象与环境因子之间的数量关系,是判断主控因子有效的方法,弥补了常规分析方法的不足。

本文以不同季节的黄河口湿地土壤为例,基于单因素方差分析方法、典范对应分析方法,探讨了不同季节河口湿地土壤盐碱化特征与盐分离子组成及其之间的数量关系,旨在研究黄河口湿地土壤的盐分特征,揭示影响盐渍化土壤的主控盐分因子,为黄河口湿地土壤资源的开发利用和生态环境建设提供理论支持。

1 研究区概况和样品采集

1.1 研究区概况

黄河口湿地位于我国山东省东营市垦利县境内,属于温带季风性气候。四季分明,光照充足,年平均气温 11.7—12.6℃;无霜期 211 d;年均降水量 530—630 mm,70%分布在夏季,具有明显的季节性,导致地表径流和地下水补给量年内分配极不均匀;平均蒸发量为 750—2400 mm。蒸发量远大于降水量,为土壤盐分向上运移提供了有利条件。该区总体地面平坦,海拔较低,因受黄河尾间摆动,其地貌类型发育较为完整,主要有古河道遗留下来的自然堤、河漫滩地、背河洼地、缓斜平地 and 滨海低平地等^[22]。土壤以潮土和盐土为主,土壤盐渍过程先于成土过程,是在盐渍淤泥的基础上发育而成^[23]。受水埋深、矿化度及海水经常性的淹没和侧向侵渍的影响致使土壤含盐量普遍较高且空间分布不均,导致区域内的植物群落组成比较简单且具有分布集中、成片生长的特点。自然植被主要以怪柳(*Tamarix chinensis*)、碱蓬(*Suaeda salsa*)、芦苇(*Phragmites australis*)等为主。

1.2 数据来源

通过野外考察,在黄河口湿地选择地势相对平坦,能代表该区一般特征的地段作为研究区。其中,植物以

碱蓬、怪柳、芦苇为优势种。依据样点选择的代表性、典型性等原则,选取 22 个点位进行土样采集,每个样点 3 次重复,且在 0—10 cm 深度的土层取样。于 2015 年春季(5 月)、夏季(8 月)、秋季(10 月)各采样 1 次,并通过 GPS 定位,3 次采样位置保持一致,共采集土壤样品 198 个。将土壤样品带回实验室自然风干后除去枯枝、残叶等杂质,磨碎过 2 mm 筛后备用,以水土比(5:1)配制溶液,静置过滤后得到浸提液,测定离子组成含量。其中, K^+ 、 Na^+ 采用火焰光度法测定, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 采用 EDTA 络合滴定法测定, Cl^- 采用硝酸银滴定法测定, HCO_3^- 采用双指示剂滴定法测定,全盐(TS)含量采用离子加和法。 CO_3^{2-} 只在个别样品中测得且含量极低,本研究不予考虑。pH 值、电导率(EC)则分别用 PHS-2C 型数字式酸度计、DDSJ-308A 电导率仪测定,钠吸附比(SAR)采用公式计算法; $SAR = C_{Na^+} / [(C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}) / 2]^{1/2}$,其中 C_{Na^+} 、 $C_{Ca^{2+}}$ 、 $C_{Mg^{2+}}$ 分别表示溶液中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的浓度。

1.3 数据分析

用单因素方差分析不同季节土壤盐分离子及盐碱化参数的变化特征,并利用 LSD 法检验单因素下各处理间差异的显著性,显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。变异系数用于描述盐分的空间变异性。CCA 分析方法用于不同季节土壤盐碱化指标及盐分离子之间的关系研究。其中,以盐碱化指标参数 TS、pH、EC 和 SAR 为研究对象;以 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 为环境变量。单因素方差分析在 SPSS 22.0 统计软件中实现,CCA 排序分析在 Canoco for Windows 分析软件中实现。先用软件包中的 WcanoImp 程序将盐分离子和 TS、pH、EC、SAR 数据生成名为 env.dta 和 spe.dta 的文件,应用 Canoco for Windows 4.5 进行运算,将生成的数据文件 spe-env.cdw 在 Canodraw for Windows 中作图,排序结果用双序图表示^[24]。

2 结果与分析

2.1 土壤盐分离子的统计特征

各阳离子在不同季节的分布态势见图 1, Na^+ 含量在各季节中占阳离子总量的比例均在 65%以上,是研究区最为主要的阳离子;其次是 Mg^{2+} ;再次是 Ca^{2+} , K^+ 含量最小。差异显著性检验结果表明, Na^+ 含量春季显著高于夏季、秋季,而夏季、秋季差异性不显著($P > 0.05$); Mg^{2+} 含量的差异性和 Na^+ 的一致,说明二者在季节变化上可能具有较好的关联性; Ca^{2+} 含量各季节之间无显著差异性($P > 0.05$),分布较为稳定; K^+ 含量虽小,但在不同季节却表现出显著的差异性($P < 0.05$)。变异系数是反映变量离散程度的重要指标,在一定程度上揭示了变量的空间分布特性^[25-26]。在不同的季节, Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 的变异系数均介于 10%和 100%之间(图 1),表明它们在研究区均具有中等强度的变异性^[18]。随着季节的变化, Na^+ 在夏季出现变异系数的最大值,为 66.15%; K^+ 的变异系数逐渐减小,春季最大; Ca^{2+} 的变异系数逐渐增大,秋季变异最为强烈,变异系数达到 90%以上,表现出较强的空间异质性; Mg^{2+} 在夏季和秋季均表现出极强的变异性,变异系数分别为 108.24%、104.47%,说明 Mg^{2+} 在夏、秋季分布不均匀,春季其空间异质性相对较弱。

各阴离子在不同季节的分布态势见图 1, Cl^- 在各季节阴离子总量中占据绝对优势,含量比均高于 81%,是研究区最为主要的阴离子, SO_4^{2-} 次之, HCO_3^- 含量最小。差异显著性检验结果表明, Cl^- 与 Na^+ 、 Mg^{2+} 的差异性一致,说明它们的分布态势在季节变化上具有相似性。 Cl^- 含量的变异强度随春、夏、秋的季节性变化逐渐增强,秋季的变异性最强,变异系数为 66.74%; SO_4^{2-} 作为研究区土壤中另一重要的阴离子,在不同季节其含量之间并无显著差异性($P > 0.05$),且以夏季含量最低。其变异性表现为中度-强度变异,以秋季为最强,变异系数高达 166.78%; HCO_3^- 含量在各季节之间的差异性均显著($P < 0.05$),其变异性均表现为中度变异。

2.2 土壤全盐特征及盐碱化特征参数

土壤全盐量是反映土壤盐化程度的基本指标^[27]。由图 2 可知,在不同的季节,土壤 TS 含量的平均值均在 17.9 g/kg 以上,春季显著高于夏季和秋季且以夏季含量最低。差异显著性检验结果表明,夏季和秋季 TS 含量无显著差异性($P > 0.05$),这和 Cl^- 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 在季节变化上的差异性相一致,说明 TS 与 Cl^- 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 可能有较好的关联性。TS 的季节性变异系数均介于 42%和 65%之间(图 2),表明研究区土壤含盐量具有中

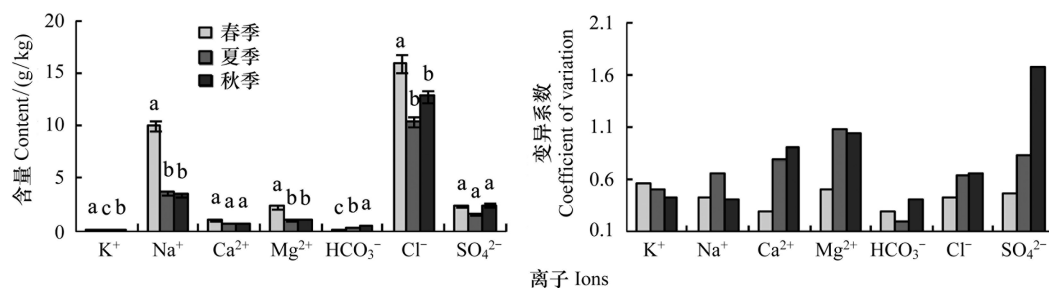


图1 土壤盐离子含量及其季节性分布特征

Fig.1 Cations and anions and their seasonal distribution

等强度的变异性,说明黄河口湿地盐渍土区土壤含盐量分布不均匀,空间异质性较强;从变异系数的季节性变化特征来看,变异系数逐渐增大,说明土壤盐分的空间异质性逐渐增强。

pH 和 SAR 是判断土壤是否发生碱化以及土壤碱化程度的重要诊断指标^[28-29]。从图 2 可知,不同季节研究区土壤 pH 总体变化不大,平均值均介于 7.7—8.1 之间。差异显著性检验结果表明,不同的季节, pH 的差异性较显著 ($P < 0.05$),其分布态势和 HCO_3^- 一致,说明 pH 的空间分布与 HCO_3^- 可能具有较大的相关性。pH 的变异系数介于 2.0%—4.3% 之间,说明 pH 的变异性较弱,空间分布均匀。不同的季节, SAR 介于 3.08—5.29 之间,其变化特征与 Cl^- 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 的分布态势相似,说明 SAR 与 Cl^- 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 可能有较好的关联性。土壤电导率 (EC) 与土壤盐分含量之间关系密切,常被用来判断土壤的盐碱化程度。在不同季节, EC 的均值变化范围为 7.16—13.04 mS/cm,在分布态势上与 Cl^- 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 相似,说明 EC 与 Cl^- 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 可能有较好的关联性。

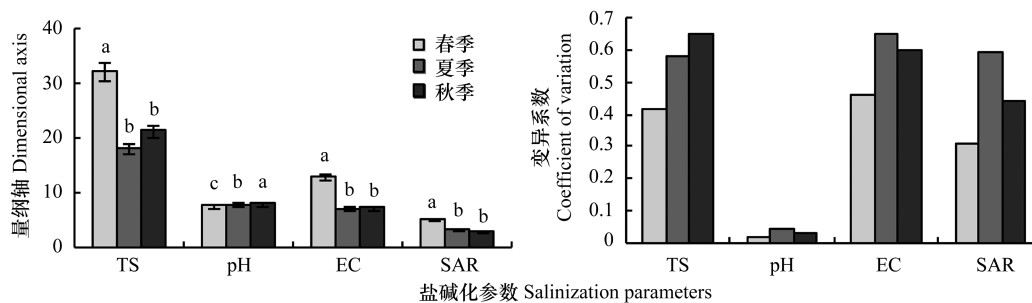


图2 TS、pH、EC、SAR 的季节性分布特征

Fig.2 Soil TS, pH, EC, SAR and their seasonal distribution

TS:全盐含量, total salt content; pH:氢离子浓度指数, hydrogen ion concentration; EC:电导率, electrical conductivity; SAR:钠吸附比, sodium adsorption ratio

2.3 土壤盐分的典范对应分析

TS、pH、SAR、EC 作为判断土壤盐碱化程度的重要指标,它们能够很好地反映土壤质量的变化情况,但上述研究结果并不能直观地反映出 TS、pH、SAR、EC 与盐分离子之间的数量关系。为了尽可能多地将盐分指标结合在一起,更好地反映黄河口湿地盐渍化土壤盐分组成之间的相互关系,本研究应用典范对应分析法 (CCA),将研究区盐渍土的表征参数 TS、EC、SAR 和 pH 作为研究对象,将土壤中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 HCO_3^- 作为环境变量,对春季 (5 月)、夏季 (8 月)、秋季 (10 月) 的土壤盐分因子之间的关系进行了深入的典范对应分析。

2.3.1 土壤盐分离子组成 CCA 分析

CCA 二维排序图能够直观地展示各环境因子之间以及研究对象与环境因子之间的关系。两个环境变量之间的夹角代表其相关性,夹角越小,相关性越大,夹角越大,相关性越小;研究对象到环境变量箭头的距离大

小决定研究对象与环境变量之间的相关性小,距离越大,关联性越小,距离越小,关联性越大^[30]。本研究以箭头表示环境变量,以三角符号表示研究对象(图3)。春季, Cl^- 与 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 与 K^+ 之间的夹角都很小,说明它们之间有很好的关联性;夏季, Cl^- 与 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 与 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 以及 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 之间均有很好的关联性;秋季, Cl^- 与 SO_4^{2-} 、 SO_4^{2-} 与 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 之间均有很好的关联性。总体来讲,不同季节盐分离子之间的关联性并不固定,这说明随着季节的变化离子间的相关性是有差异。

2.3.2 盐分离子与盐碱化参数的相关性 CCA 分析

根据研究对象与环境变量之间的关联度研究(图3)。TS 始终与 Cl^- 离子距离较近,说明 TS 的空间分布与 Cl^- 离子相似,主要受控于 Cl^- 离子。pH 则与各环境因子之间的距离均较远,说明其空间分布受环境因子的影响较小,分布较为均匀。就研究对象在各季节的受控因子而言,春季,TS 与 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 Na^+ 的距离较近,说明其空间分布主要受 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 Na^+ 的制约;夏季,TS 与 Cl^- 、 HCO_3^- 的距离较近,但是 HCO_3^- 的箭头连线较短^[31]且含量较低不足以影响 TS 的含量,说明 TS 的空间分布仍以受 Cl^- 因子的影响为主;秋季,除主要受 Cl^- 离子的制约之外,还受到 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 的制约。随着春、夏、秋的季节性变化,TS 与 Cl^- 之间的距离在减小,说明 TS 受 Cl^- 的影响程度在逐渐增强。EC 在春季与各离子之间的距离均较远,说明 EC 受各离子的影响较小,其空间分布较为均匀;夏季与 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 之间的距离较近,说明其空间分布主要受控于 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} ;秋季主要受到 Na^+ 离子的制约。SAR 在春季与 HCO_3^- 之间的距离较近,说明其空间分布受控于 HCO_3^- ;夏季与 K^+ 之间的距离较近,说明其空间分布受控于 K^+ ;秋季与各离子之间的距离均较远,说明 SAR 受各离子的影响较小。

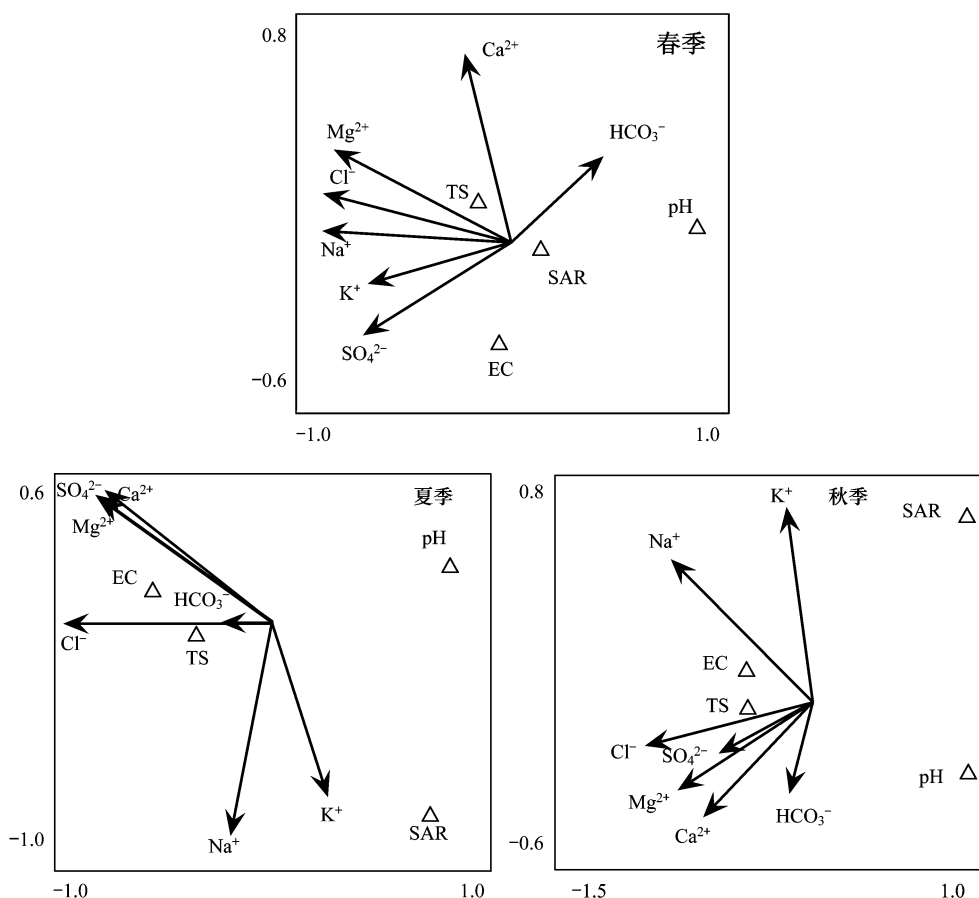


图3 不同季节土壤盐分的 CCA 二维排序图

Fig.3 Two dimensional ordination diagram of canonical correspondence analysis of salts in different seasons

2.3.3 环境因子与排序轴间的关联性

表 1 反映出不同季节 7 个环境因子与研究对象排序轴的相关性。春季,与第一排序轴的相关性(按绝对值大小)以 Cl^- 最大,其次为 Na^+ ,再次为 Mg^{2+} ,以上指标的相关系数绝对值均在 0.76 以上,其余离子与第一排序轴的相关性相对较小。与第二轴相比,环境因子与第一轴的相关性明显地高,说明排序图的第一轴基本上代表了环境因子对研究对象的影响。在第二轴上,除 Ca^{2+} 相关性达 0.5263,具有统计学意义外^[32],其余指标与第二排序轴均没有明显的相关性。上述情况说明,在春季, Cl^- 对研究对象的影响最为重要,其次是 Na^+ ,再次是 Mg^{2+} 。夏季,与第一排序轴的相关性(按绝对值大小)以 Cl^- 最大,其次为 Mg^{2+} ,再次为 SO_4^{2-} ,以上指标的相关系数绝对值均在 0.79 以上,除 Ca^{2+} 外其余离子与第一排序轴的相关性相对较小。与第一轴相比, Na^+ 、 K^+ 与第二轴的相关性明显地高,说明排序图的第二轴代表了以 Na^+ 、 K^+ 为主的环境因子对研究对象的影响。上述情况说明,在夏季,以 Cl^- 对研究对象的影响最为重要,其次是 Na^+ ,再次是 Mg^{2+} 。秋季,与第一排序轴的相关性(按绝对值大小)以 Cl^- 最大,其次为 Na^+ ,再次为 Mg^{2+} ,以上指标的相关系数绝对值均在 0.77 以上,其余离子与第一排序轴的相关性相对较小。与第二轴相比,除 K^+ 外,环境因子与第一轴的相关性明显地高,说明排序图的第一轴基本上代表了环境因子对研究对象的影响。在第二轴上,除 K^+ 相关性达 0.6193,其余指标与第二排序轴均没有明显的相关性。上述情况说明,在秋季, Cl^- 对研究对象的影响最为重要,其次是 Na^+ ,再次是 Mg^{2+} 。总体来看,无论处于何种季节,均是表现为 Cl^- 对研究对象的影响最为重要,其次是 Na^+ ,再次是 Mg^{2+} 。

表 1 环境因子与研究对象排序轴的相关系数

Table 1 Correlation coefficients for t subject investigated axes 1 and 2 and environmental variables

项目 Items	5 月 May		8 月 August		10 月 October	
	轴 1 The first species axis	轴 2 The secondary species axis	轴 1 The first species axis	轴 2 The secondary species axis	轴 1 The first species axis	轴 2 The secondary species axis
K^+	-0.6337	-0.1183	0.2538	0.6760	-0.1526	0.6193
Na^+	-0.8182	0.0297	-0.1892	-0.8281	-0.8058	0.4538
Ca^{2+}	-0.2052	0.5263	-0.7566	0.5121	-0.6338	-0.3716
Mg^{2+}	-0.7674	0.2554	-0.8080	0.4979	-0.7713	-0.2827
HCO_3^-	0.3979	0.2401	-0.2604	0.0041	-0.1308	-0.2890
Cl^-	-0.8299	0.1349	-0.9417	0.0016	-0.9463	-0.1425
SO_4^{2-}	-0.6571	-0.2621	-0.7971	0.4833	-0.5351	-0.1645

2.3.4 典范对应分析的可行性分析

在对黄河口湿地盐渍土进行研究时,从各盐分离子与土壤盐碱化参数的 CCA 排序图可以看出,研究对象(盐碱化参数)-环境变量(盐分离子)与第一个排序轴的相关系数均大于 0.94,与第二个排序轴的相关系数均在 0.80 以上,具有较高的相关性。环境因子前两个排序轴的相关系数为 0,表明前两个排序轴是完全垂直的;研究对象前两个排序轴的相关系数绝对值小于 0.03,表明这两个排序轴也近乎完全垂直^[33],且前两个排序轴的累积方差贡献率均大于 80%,说明对土壤盐碱化参数和环境因子进行的 CCA 排序结果是可信的^[34-35]。

3 讨论

3.1 盐碱化参数与盐分离子季节性特征的影响因素及盐渍化防治对策

TS、pH、SAR、EC 和盐分离子组成是研究盐渍化土壤基本的特征,也是区域盐渍化土壤改良利用的基本依据^[33]。黄河三角洲河口湿地受气候条件、土壤母质、海水以及沉积环境的影响,导致盐渍化土壤在区域内广泛分布^[14]。因此,许多研究者从物理、化学、工程、生物技术等方面对区域内的盐渍化土壤进行过不同规模的改良,取得了较好的效果,这些成果的取得也是基于对黄河口湿地水盐运移情况的准确把握。王卓然等^[36]指出黄河三角洲夏季土壤水盐含量总体较高,随着土层深度的增加含盐量呈上升趋势,且各层土壤含盐量呈

显著正相关性。安乐生等^[37]指出黄河三角洲地区盐渍化土壤的 Cl^- 含量与潜水 Cl^- 质量浓度的空间分布表现出高度的相似性和相关性。本研究表明,研究区土壤 TS 含量在不同季节均在 17.9 g/kg 以上,属于盐化状态^[38] (≥ 10.0 g/kg)。土壤 TS 含量呈“V”字形变化(图 2),春季、秋季均高于夏季,主要是因为该区域处于温带季风性气候区,春、秋两季的蒸发量大于降水量,为盐分向上运移提供了有利条件,致使盐分表聚;夏季降水量大于蒸发量,频繁的降水使土壤表层的盐分淋溶至次表层及其更深层,致使表层盐分含量下降,于是形成了土壤表层春、秋季积盐和夏季脱盐的季节性动态特征。除此之外,可能与该区的植被覆盖有关^[39],春季,尤其是初春,植物刚开始生长较小的枝叶不能有效地遮挡阳光而使地表大面积裸露,从而促使盐分向土壤表层聚集。夏季,枝叶繁茂对地表构成了有效的遮挡而减小了地表水分的蒸发加之夏季多雨,致使土壤盐分未能向表层聚集。秋季,大多植物处于生长衰退期,枝叶开始枯黄、凋落,尤其是晚秋时节,而研究区植物多为盐生植物(碱蓬、怪柳),当枝叶等凋落时,一方面增大了地表的裸露面积,另一方面盐分随凋落物再次返回土壤^[40],从而使表层土壤含盐量增加。还可能与地下水埋深有关^[41],该区域水埋深普遍较浅,在温度驱动下水分极易蒸发,“盐随水来,盐随水去”,这样在失水的同时导致土壤盐分在表层积聚。因此,防治土壤盐渍化可以运用科学的方法在春、秋季节适当的进行灌溉,防止盐分向土壤表层聚集;增加该区域的植被覆盖度或者覆盖秸秆等物质^[42]也是一种有效的降低土壤盐分表聚的合适途径;根据盐生植物的生理特性、生长周期以及使用价值等,选择恰当的方式对其进行利用。例如在夏季对碱蓬进行收割,一方面是因为碱蓬可以供人们食用(做菜、入药等),另一方面是因为碱蓬能从土壤中吸收大量的盐分^[43],收割碱蓬可以带走大量盐分,防止二次返盐;还应将地下水控制在盐分不易因蒸发而发生表聚的深度。也有研究^[44]指出利用沸石、蚯蚓粪等改良剂可以改善土壤结构,抑制返盐。pH 受季节性变化的影响较小,空间分布较均匀,这可能是受植物根系分泌物及土壤微生物的影响,有研究^[45-46]指出根际微生物呼吸作用产生 CO_2 、微生物分解植物残体分泌有机酸等都影响土壤的酸碱性。杨劲松等^[47]指出土壤溶液中较高的盐浓度会抑制碱性钠的水解,从而影响土壤的酸碱平衡,而本研究区土壤盐分时常处于高浓度状态(17.9 g/kg 以上)。因此,在该区域可能不会因盐分浓度的变化而导致 pH 在季节上有较大的差异。SAR 以夏季变异性最强,可能是因为土壤表层的 Na^+ 淋溶^[48]至次表层及其以下土层而使表层的 Na^+ 含量减小,造成空间分布不均匀。可能是受土壤母质^[49]、海水^[29]等因素的影响,导致研究区不同的离子含量不同,贡璐等^[49]研究指出不同的土壤类型各盐分离子含量不同;陈效民等^[29]研究指出海水灌溉后土壤中的 Na^+ 、 Cl^- 含量急剧增加,而其他离子含量增加不明显。阳离子以 Na^+ 为主,阴离子以 Cl^- 为主,这可能是因为 Cl^- 很少被土壤吸附,也不易从土壤中解离出来,又难以形成稳定的化合物^[50]。而对于 Na^+ ,这是因为本区域距海较近,海水长期侧侵增加了土壤中 Na^+ 的含量,海水能增大土壤的 Na^+ 含量^[29]。也可能是植物具有吸钾“拒钠”的功能,植物在 NaCl 低浓度胁迫时可以选择吸收 K^+ ^[51-52],而避免在植物体内积累 Na^+ ,这样就导致土壤中的 K^+ 大量减少,而 Na^+ 则留在土壤中。也有研究指出^[53]黄河三角洲地下水阴离子以 Cl^- 为主,阳离子以 Na^+ 为主,这也可能是导致土壤盐分不受季节性变化影响仍以 Na^+ 、 Cl^- 为主的原因。 K^+ 在不同季节差异性显著 ($P < 0.05$),可能是和植物的生长季有关^[41],春季植物处于生长阶段需要大量的营养元素、夏季植物生长出于稳定期、秋季植物枝叶开始枯黄、衰败。Hinsinger 等^[46]曾指出当向植物提供 K_2SO_4 溶液时,植物会大量吸收渗透性较强的 K^+ ,从而调节细胞的酸碱平衡。自然条件下 K^+ 来源于土壤,不同季节植物对 K^+ 的吸收量不同便导致土壤中的 K^+ 平衡被打破,加之受温度、季节性降水的影响;根据作物的生长规律,人为的施肥也会导致土壤 K^+ 失衡,进而使其在不同季节表现出较大的差异性。 Mg^{2+} 在夏、秋季表现出极强的变异性,可能是受降水、微地形、地貌的影响,Cemek 等^[54]指出土壤盐分的空间变异性与水、微地形等关系密切。该区域夏季降水较多因地形差异导致地表积水分布不均,秋季蒸发加剧因地形差异返盐程度不同,从而造成 Mg^{2+} 的空间分布不均。 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 以夏季含量最低且差异性相同,这可能是因为土壤中微溶性的 CaSO_4 溶解^[48],然后被淋洗掉。 HCO_3^- 在不同季节差异性显著 ($P < 0.05$),这可能和土壤呼吸作用及土壤含水量有关^[55],不同季节土壤的呼吸速率及含水量不同,土壤中 CO_2 的溶解量也不同,导致 HCO_3^- 含量不同。

3.2 CCA 在土壤-环境方面的应用及盐碱化参数与离子之间的关联性

典范对应分析方法(CCA)是基于对应分析发展而来的,它将对对应分析与多元回归分析相结合,在对对应分析的迭代过程中,将每次得到的排序值均与环境因子进行多元线性回归,使之能够直观反映环境因子对排序结果的影响,是研究植物分布与环境关系最有效的直接排序方法^[56-60]。随着生态学软件 Canoco for Windows 的推广,近年来,该方法在土壤-环境领域也逐步得到应用,在研究土壤性质与环境因子间定量关系方面取得了重要进展。杨思存等^[33]用该方法研究甘肃引黄灌区耕地土壤全盐量(TS)、pH 和盐分离子组成的空间分布特征及数量关系,并探讨它们之间的相互关系、影响程度以及对盐碱地类型、分布的影响;吴雪梅等^[61]用该方法分析于田绿洲 2012 年春季土壤剖面的含盐量、电导率、pH 值、矿化度、七大盐分离子的空间分布特征;解雪峰等^[7]用该方法探讨了江苏中部如东滩涂围垦区不同空间尺度景观格局对土壤盐渍化程度的影响和贡献度;韩桂红等^[62]用该方法对渭干河-库车河三角绿洲干旱区盐渍土土壤 TS、盐分离子组成、碱化度(ESP)、pH、EC 的空间分布特征进行了分析。本研究应用此方法分析了 TS、pH、SAR、EC 和盐分离子的数量关系以及离子之间的相互关系。结果表明,无论处于何种季节,土壤 TS 始终与 Cl^- 有较好的关联性,说明 TS 的空间分布主要受控于 Cl^- 。这与分析环境因子与排序轴的相关性所得结果一致,与分析盐分离子含量对全盐量贡献大小的结果也是一致的,与其他学者对黄河口湿地盐渍化土壤盐分状况的研究结果也相一致^[40]。在不同的季节, Cl^- 含量始终高于其他离子含量,对 TS 的贡献率均高于 50%,说明 Cl^- 是该区域土壤盐分的主要有效成分,对促进土壤发生盐渍化起着关键性的作用。因此,通过合适的措施控制或减少 Cl^- 的来源是一条减轻河口湿地土壤盐渍化的合适途径。在不同的季节,pH 受环境因子的影响较小,而 SAR 和 EC 则随着季节的变化受控因子在变化。不同季节盐分离子之间的关联性并不固定,它们之间存在着一定的差异性,这一方面可能和外界环境^[62](温度、湿度、饱和度、酸碱度)条件有关,另一方面可能和地貌类型、距海远近有关^[63]。以关联性较好且含量较高的 Na^+ 和 Cl^- 来看,春季表层土壤受外界环境影响最大,水分的上下迁移活动强烈,相应的 Na^+ 和 Cl^- 的同质运移活动也较为频繁^[28],表现出 Na^+ 和 Cl^- 具有较高的关联性。而夏季和秋季则没有表现出很好的关联性,其他离子之间也是类似的情况,它们之间是否存在固定的关联性尚有待于进一步深入研究。

3.3 人为因素对黄河口湿地的影响

近年来,人为因素也成为影响黄河口湿地土壤盐渍化的重要因子。受季风性气候的影响,该区域降水量年内分配极不均匀,造成淡水资源供给不足,尤其是在枯水季。因此,黄河成为淡水资源开发利用的供给站^[64]。然而,随着社会经济的发展,一方面上游用水量不断增加,导致黄河断流频次、天数增加^[65],另一方面下游地区用于生产、生活的淡水需求量也在增加,从而导致淡水资源短缺,进而影响该区域土壤盐渍化的发生。除此之外,不合理的垦荒、灌溉、粗放的经营以及人口数量的增加等^[50,66-67]都会给该区域土壤盐渍化的发生带来一定的影响。因此,要根据该区域的特点,合理开发利用水资源、改变粗放型的经营方式、禁止盲目垦荒,并可适当提高植被覆盖度以减小土壤盐渍化的发生。

3.4 典范对应分析的优越性

典范对应分析(CCA)不仅包含的信息量更大,而且结果更加直观。常规分析只能反映出 TS、pH、SAR、EC 的数量及盐分离子的组成,而典范对应分析能够通过箭头连线之间的夹角以及与三角符号间距离的远近等,在 CCA 二维排序图上直观地给出各盐分离子之间以及 TS、pH、SAR、EC 与盐分离子之间的关系,并通过各盐分离子与研究对象前两个排序轴的相关系数,来确定影响黄河口湿地土壤盐碱化的主要因子。因此,典范对应分析是一种更加科学的分析土壤盐碱化变化特征的评价方法。

4 结论

(1)研究区土壤盐分阳离子以 Na^+ 为主,阴离子以 Cl^- 为主,二者不因季节的变化而改变其占离子总量的优势地位。其中, Na^+ 占阳离子总量的比例均在 65% 以上; Cl^- 占阴离子总量的比例均高于 81%。差异显著性

检验结果表明, Cl^- 、 Na^+ 含量均是春季显著高于夏季和秋季 ($P < 0.05$), 而夏季和秋季含量无显著差异性 ($P > 0.05$)。除 Mg^{2+} 在夏季、秋季及 Cl^- 在秋季表现出强烈的变异性外, 其余离子在不同季节均表现出中等强度的变异性。

(2) 研究区土壤盐化较为严重, 春季、夏季、秋季含盐量均在 17.9 g/kg 以上, 属于盐土类型。其含量变化趋势与 Cl^- 、 Na^+ 的变化趋势一致, 呈“V”字形变化, 春季、秋季均高于夏季, 形成了春、秋季积盐和夏季脱盐的特点。pH 值均介于 $7.7\text{—}8.1$ 之间; SAR 介于 $3.08\text{—}5.29$ 之间; EC 的均值变化范围为 $7.16\text{—}13.04 \text{ mS/cm}$ 。

(3) 典范对应分析结果表明: 春季, Cl^- 与 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 与 K^+ 之间关联性较好; 夏季, Cl^- 与 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 与 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 之间关联性较好; 秋季, Cl^- 与 SO_4^{2-} 、 SO_4^{2-} 与 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 之间关联性较好。在不同的季节, 7 个环境因子与研究对象排序轴的相关性均表现为 Cl^- 对研究对象的影响最为重要, 其次是 Na^+ , 再次是 Mg^{2+} 。TS 的空间分布主要受控于 Cl^- 。pH 受盐分离子的影响较小, 空间变异较小。SAR 春季受控于 HCO_3^- ; 夏季受控于 K^+ ; 秋季受各离子的影响均较小, 分布较为均匀。EC 春季受各离子的影响均较小, 其空间分布较为均匀; 夏季受控于 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ; 秋季受控于 Na^+ 。

参考文献 (References):

- [1] 赵连春, 赵成章, 王小鹏, 文军. 秦王川湿地怪柳分布与环境因子的关系. 生态学报, 2018, 38(10): 3422-3431.
- [2] 郝翠, 梁耀元, 孟伟庆, 李洪远, 马春. 天津滨海新区自然湿地植物分布与土壤理化性质的关系. 湿地科学, 2009, 7(3): 266-272.
- [3] 郭洋, 陈波浪, 盛建东, 胡浩东, 徐财发. 几种一年生盐生植物的吸盐能力. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 269-276.
- [4] Ivits E, Cherlet M, Tóth T, Lewińska K E, Tóth G. Characterisation of productivity limitation of salt-affected lands in different climatic regions of Europe using remote sensing derived productivity indicators. Land Degradation & Development, 2013, 24(5): 438-452.
- [5] 王佳丽, 黄贤金, 钟大洋, 陈志刚. 盐碱地可持续利用研究综述. 地理学报, 2011, 66(5): 673-684.
- [6] 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.
- [7] 解雪峰, 濮励杰, 朱明, 许艳, 王小涵, 徐彩瑶, 陈新建. 基于典范对应分析的滨海滩涂围垦区景观格局与土壤盐渍化关系. 地理研究, 2017, 36(3): 495-505.
- [8] 王小鹏, 赵成章, 王继伟, 赵连春, 文军. 秦王川盐沼湿地角果碱蓬种群聚集分布格局与特征. 生态学报, 2018, 38(11): 3943-3951.
- [9] Mulder J P M, Hommes S, Horstman E M. Implementation of coastal erosion management in the Netherlands. Ocean & Coastal Management, 2011, 54(12): 888-897.
- [10] 金宇, 高吉喜, 周可新, 穆少杰. 围垦及米草入侵下江苏中部滨海湿地土地利用/覆被类型动态变化. 地理研究, 2017, 36(8): 1478-1488.
- [11] 常春艳, 赵庚星, 李晋, 王凌, 王卓然. 黄河三角洲典型生态脆弱区土壤退化遥感反演. 农业工程学报, 2015, 31(9): 127-132.
- [12] 薛莲, 李秀珍, 闫中正, 张骞, 丁文慧, 黄星. 盐度和淹水对长江口滩涂盐沼植物碳储量的影响. 生态学报, 2018, 38(9): 2995-3003.
- [13] 王红, 宫鹏, 刘高焕. 黄河三角洲多尺度土壤盐分的空间分异. 地理研究, 2006, 25(4): 649-658.
- [14] 范晓梅, 刘高焕, 刘红光. 基于 Kriging 和 Cokriging 方法的黄河三角洲土壤盐渍化评价. 资源科学, 2014, 36(2): 321-327.
- [15] 彭杰, 刘焕军, 史舟, 向红英, 迟春明. 盐渍化土壤光谱特征的区域异质性及盐分反演. 农业工程学报, 2014, 30(17): 167-174.
- [16] 彭俊, 陈洪全, 马随随, 李志文. 黄河三角洲滩涂沉积物磁性特征与沉积环境分析. 地理科学, 2014, 34(10): 1262-1269.
- [17] Scudiero E, Skaggs T H, Corwin D L. Regional scale soil salinity evaluation using Landsat 7, western San Joaquin Valley, California, USA. Geoderma Regional, 2014, 2-3: 82-90.
- [18] 邹晓霞, 王维华, 王建林, 姜德锋. 垦殖与自然条件下黄河三角洲土壤盐分的时空演化特征研究. 水土保持学报, 2017, 31(2): 309-316.
- [19] 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.
- [20] 付腾飞, 张颖, 高金尉, 陈广泉, 刘文全, 苏乔. 黄河三角洲土壤盐分时空变异特征研究. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2017, 47(10): 50-60.
- [21] 吴春生, 黄肿, 刘高焕, 刘庆生. 黄河三角洲土壤含盐量空间预测方法研究. 资源科学, 2016, 38(4): 704-713.
- [22] 姜会超, 陈海刚, 宋秀凯, 刘宁, 何健龙, 程玲, 王月霞. 莱州湾金城海域浮游动物群落结构及与环境因子的关系. 生态学报, 2015, 35(22): 7308-7319.
- [23] Jia J, Bai J H, Wang W, Zhang G L, Wang X, Zhao Q Q, Zhang S. Changes of biogenic elements in *Phragmites australis* and *Suaeda salsa* from salt marshes in Yellow River Delta, China. Chinese Geographical Science, 2018, 28(3): 411-419.
- [24] 沈会涛, 刘存歧. 白洋淀浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析. 湖泊科学, 2008, 20(1): 773-779.

- [25] 董旭光, 顾伟宗, 孟祥新, 刘焕彬. 山东省近 50 年来降水事件变化特征. 地理学报, 2014, 69(5): 661-671.
- [26] 李传华, 赵军, 师银芳, 胡秀芳. 基于变异系数的植被 NPP 人为影响定量研究——以石羊河流域为例. 生态学报, 2016, 36(13): 4034-4044.
- [27] Herrero J, Pérez-Coveta O. Soil salinity changes over 24 years in a Mediterranean irrigated district. *Geoderma*, 2005, 125(3/4): 287-308.
- [28] 赵秀芳, 杨劲松, 姚荣江. 基于典范对应分析的苏北滩涂土壤春季盐渍化特征研究. 土壤学报, 2010, 47(3): 422-428.
- [29] 陈效民, 白冰, 蔡成君. 黄河三角洲海水灌溉对土壤性质的影响研究. 水土保持学报, 2004, 18(1): 19-21.
- [30] Mench M, Bes C. Assessment of ecotoxicity of topsoils from a wood treatment site. *Pedosphere*, 2009, 19(2): 143-155.
- [31] 岳跃民, 王克林, 张伟, 陈洪松, 王敏. 基于典范对应分析的喀斯特峰丛洼地土壤——环境关系研究. 环境科学, 2008, 29(5): 1400-1405.
- [32] 郝占庆, 郭水良, 叶吉. 长白山北坡木本植物分布与环境关系的典范对应分析. 植物生态学报, 2003, 27(6): 733-741.
- [33] 杨思存, 逢焕成, 王成宝, 李玉义, 霍琳, 姜万礼. 基于典范对应分析的甘肃引黄灌区土壤盐渍化特征研究. 中国农业科学, 2014, 47(1): 100-110.
- [34] 叶琴, 周华荣, 袁蕾, 宗召磊. 土壤环境因子对乌鲁木齐地区灌木群落分布的影响. 干旱区研究, 2016, 33(5): 1119-1124.
- [35] Ter Braak C J F. Canonical community ordination. Part I: Basic theory and linear methods. *Écoscience*, 1994, 1(2): 127-140.
- [36] 王卓然, 赵庚星, 高明秀, 常春艳, 姜曙千, 贾吉超, 李晋. 黄河三角洲垦利县夏季土壤水盐空间变异及土壤盐分微域特征. 生态学报, 2016, 36(4): 1040-1049.
- [37] 安乐生, 周葆华, 赵全升, 刘贯群, 朱磊. 黄河三角洲土壤氯离子空间变异特征及其控制因素. 地理科学, 2015, 35(3): 358-364.
- [38] 陈红艳, 赵庚星, 陈敬春, 王瑞燕, 高明秀. 基于改进植被指数的黄河口区盐渍土盐分遥感反演. 农业工程学报, 2015, 31(5): 107-114.
- [39] 张蛟, 崔士友, 冯芝祥, 王奎山, 翟彩娇. 气候因子和地表覆盖对沿海滩涂土壤盐分动态的影响. 中国生态农业学报, 2018, 26(2): 294-302.
- [40] 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.
- [41] 明广辉, 田富强, 胡宏昌. 地下水埋深对膜下滴灌棉田水盐动态影响及土壤盐分累积特征. 农业工程学报, 2018, 34(5): 90-97.
- [42] 鲁天平, 史征, 刘永萍, 田云峰, 吴圣华. 深沟造林条件下秸秆覆盖对土壤养分和盐分变化的影响. 农业工程学报, 2015, 31(12): 165-172.
- [43] 弋良朋, 马健, 李彦. 荒漠盐生植物根际土壤盐分和养分特征. 生态学报, 2007, 27(9): 3565-3571.
- [44] 卢星辰, 张济世, 苗琪, 蒋曦龙, 徐黎明, 刘志鑫, 季增诚, 崔振岭. 不同改良物料及其配施组合对黄河三角洲滨海盐碱土的改良效果. 水土保持学报, 2017, 31(6): 326-332.
- [45] 何秀平, 王保栋, 谢琳萍. 柽柳对盐碱地生态环境的影响. 海洋科学, 2014, 38(1): 96-101.
- [46] Hinsinger P, Plassard C, Tang C X, Jaillard B. Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: a review. *Plant and Soil*, 2003, 248(1/2): 43-59.
- [47] 杨劲松, 姚荣江. 黄河三角洲地区土壤水盐空间变异特征研究. 地理科学, 2007, 27(3): 348-353.
- [48] 李奇霏, 孔范龙, 郝敏, 李悦. 不同淋洗水量下胶州湾养殖池塘土壤盐分淋洗规律. 生态学杂志, 2018, 37(4): 1127-1134.
- [49] 贡璐, 刘曾媛, 塔西甫拉提·特依拜. 极端干旱区绿洲土壤盐分特征及其影响因素. 干旱区研究, 2015, 32(4): 657-662.
- [50] 周丽, 王玉刚, 李彦, 黄刚. 盐碱荒地开垦年限对表层土壤盐分的影响. 干旱区地理, 2013, 36(2): 285-291.
- [51] Gupta B, Huang B R. Mechanism of salinity tolerance in plants: physiological, biochemical, and molecular characterization. *International Journal of Genomics*, 2014, 2014: 701596.
- [52] 姚世响, 陈莎莎, 徐栋生, 兰海燕. 不同盐胁迫对新疆耐盐植物藜叶片钾、钠元素含量及相关基因表达的影响. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(8): 2281-2284.
- [53] 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.
- [54] Cemek B, GÜler M, Kiliç K, Demir Y, Arslan H. Assessment of spatial variability in some soil properties as related to soil salinity and alkalinity in Bafra plain in northern Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, 124(1/3): 223-234.
- [55] Dreybrodt W, Lauckner J, Liu Z H, Svensson U, Buhmann D. The kinetics of reaction $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$, as one of the rate limiting steps for the dissolution of calcite in the system $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CaCO}_3$. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(18): 3375-3381.
- [56] 郑超超, 伊力塔, 张超, 余树全, 库伟鹏, 钱逸凡, 凌骅. 浙江江山公益林物种间关系及 CCA 排序. 生态学报, 2015, 35(22): 7511-7521.
- [57] 孟睿, 何连生, 过龙根, 席北斗, 李中强, 舒俭民, 刁晓君, 李必才. 长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析. 环境科学, 2013, 34(7): 2588-2596.
- [58] 闵梦月, 宗小香, 段一凡, 李宁, 冷欣. 清溪河(许昌段)流域生物群落特征及其与环境因子的关系. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2111-2118.

- [59] 李建茹, 李畅游, 李兴, 史小红, 李卫平, 孙标, 甄志磊. 乌梁素海浮游植物群落特征及其与环境因子的典范对应分析. 生态环境学报, 2013, 22(6): 1032-1040.
- [60] 苗静, 张克斌, 刘小丹, 李海涛. 宁夏盐池封育草地植被群落多样性及其与环境关系的典范对应分析. 生态环境学报, 2015, 24(5): 762-766.
- [61] 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.
- [62] 韩桂红, 塔西甫拉提·特依拜, 买买提沙吾提, 张飞. 基于典范对应分析的干旱区春季盐渍化特征研究. 土壤学报, 2012, 49(4): 681-687.
- [63] 胥勤勉, 袁桂邦, 孙云霞, 胡云壮, 张玉发. 不同时期古黄河三角洲土壤剖面盐渍化特征. 地理科学, 2011, 31(8): 941-946.
- [64] 汪小钦, 王钦敏, 励惠国, 刘高焕. 黄河三角洲土地利用/覆盖变化驱动力分析. 资源科学, 2007, 29(5): 175-181.
- [65] 曹剑峰, 冶雪艳, 姜纪沂, 平建华, 李升. 黄河下游悬河段断流对沿岸地下水影响评价. 资源科学, 2005, 27(5): 77-83.
- [66] Gabriel J L, Almendros P, Hontoria C, Quemada M. The role of cover crops in irrigated systems: soil salinity and salt leaching. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, 158: 200-207.
- [67] 王相平, 杨劲松, 姚荣江, 余世鹏. 苏北滩涂水稻微咸水灌溉模式及土壤盐分动态变化. 农业工程学报, 2014, 30(7): 54-63.