

黄河三角洲贝壳堤岛土壤盐分空间分异特征

董林水¹, 宋爱云¹, 孙景宽¹, 赵西梅¹, 杨红军¹, 屈凡柱¹, 李华¹, 付战勇^{1,2}

(1. 滨州学院山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 山东 滨州 256603; 2. 山东农业大学林学院, 山东 泰安 271018)

摘要: 对黄河三角洲贝壳堤岛贝壳砂基质和相邻滨海盐土的盐分特征进行调查研究, 系统分析贝壳堤岛土壤盐分的空间异质性。选择不同地下水埋深梯度下2种土壤类型进行剖面盐分特征测定, 比较研究土壤类型及地下水埋深对土壤盐分特征的影响, 并应用主成分分析法对土壤盐分特征进行综合评价。结果表明: (1) 除 Ca^{2+} 外, 贝壳砂基质剖面中其余盐分特征指标由表层至底层均呈现逐渐增高的趋势, Ca^{2+} 含量由上至下则呈现缓慢降低的趋势; (2) 贝壳砂基质剖面盐分含量与地下水埋深密切相关, 近海侧剖面(地下水埋深 1.5 m)细颗粒含量、含水量、含盐量及 pH 值均高于滩脊剖面(地下水埋深 2.5 m)对应各层次; 而各盐分离子中, 近海侧剖面各层 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 含量明显高于滩脊剖面对应各层次; 而 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 则不同, 其近海侧剖面与滩脊剖面对应各层次含量均比较接近; (3) 贝壳堤岛土壤样品盐分特征指标相关分析表明, 除 Ca^{2+} 外, 其余各指标之间多存在显著或极显著正相关关系; (4) 贝壳堤岛土壤样品盐分特征指标的主成分分析表明, 前4个主成分因子累计贡献率为 84.265%, 分别依次可以理解为土壤的盐化状况因子、土壤 Ca^{2+} 含量因子、土壤含盐量及碱化特征因子、土壤 K^+ 含量因子; 主成分得分可以很好的将各土壤样品进行分类和排序。

关键词: 黄河三角洲; 贝壳堤岛; 土壤盐分; 空间变异性; 地下水埋深

中图分类号: S153

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)06-0289-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.06.048

Spatial Variability of Soil Salinity in the Shell Ridge Island of the Yellow River Delta

DONG Linshui¹, SONG Aiyun¹, SUN Jingkuan¹, ZHAO Ximei¹,

YANG Hongjun¹, QU Fanzhu¹, LI Hua¹, FU Zhanyong^{1,2}

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Eco-environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou, Shandong 256603; 2. Forestry College, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018)

Abstract: Salinity characteristics of shell sand and adjacent ordinary saline soil was investigated in the shell ridge island of the Yellow River Delta. Spatial variability of salinity in the shell ridge was analyzed. Salinity characteristics of the profiles of two types of soil (shell sand and saline soil) with different groundwater depth were measured, the influence of soil types and groundwater depth on soil salinity was analyzed, and soil salinity characteristics was comprehensively evaluated by performing principal component analysis. The result showed that: (1) All salinity indexes, except Ca^{2+} , showed a gradual increasing trend from surface to lower layer in the shell sand profile (0—120 cm), but Ca^{2+} showed a gentle decreasing trend in the profile. (2) Content of salt ions had close relationship with groundwater depth in the shell sand profile (0—120 cm), with the fine particle content, water content, salt content, pH value in the seaward profile (groundwater depth 1.5 m) being higher than that of the chenier ridge profile (groundwater depth 2.5 m); content of salt ions showed different trends in the two types of profiles, i. e. K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} content of each layer (every 10 cm as a layer) in the seaward profile was obvious higher than the content of the same layer in the chenier ridge profile, but Ca^{2+} 、 Mg^{2+} content of each layer was similar in the two profiles. (3) Correlation analysis of soil salinity indexes showed that, all indexes, except Ca^{2+} , had significant positive correlations between each other. (4) Results of the principal component analysis showed that the cumulative contribution rate of the first four principal components reached 84.265%, which represented the saline condition, soil Ca^{2+} content, soil salt content and alkalization characteristic, and K^+ content sequentially. Principal component analysis based on the salinity

收稿日期: 2016-07-05

资助项目: 国家自然科学基金项目(41401100); 山东省科技发展计划项目(2014GSF117022); 山东省自然科学基金项目(ZR2013CQ007); 山东省高等学校科技计划项目(J16LH53); 城市与区域生态国家重点实验室开放基金项目(SKLURE2015-2-4)

第一作者: 董林水(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事恢复生态学研究。E-mail: donglinshui@163.com

通信作者: 孙景宽(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事环境生态学研究。E-mail: sunjingkuan@126.com

characteristic indexes could well classify and sort soil samples in the shell ridge island.

Keywords: the Yellow River Delta; shell ridge island; soil salinity; spatial variability; groundwater depth

黄河三角洲贝壳堤是淤泥质或粉砂质海岸所特有的一种滩脊类型,山东省滨州市境内的贝壳堤,与天津、河北的贝壳堤南北相连,组成规模宏大、国内独有的贝壳滩脊海岸,与美国圣路易斯安娜州和南美苏里南的贝壳堤并称为世界三大古贝壳堤,在世界第四纪地质和海岸地貌研究中占有极其重要的位置^[1-3]。由于贝壳砂特殊的颗粒组成和基质成份,贝壳堤岛土壤理化特征既不同于滨海盐渍土,也与普通的海岸沙滩存在差异,使得贝壳堤岛形成了滨海湿地植物群落与贝壳滩脊旱生灌丛群落交错分布的特殊格局。

土壤盐分是影响盐渍化地区植被空间分布的关键因素^[4-5];与普通滨海湿地等盐渍化区域相比,贝壳堤岛的土壤盐分空间分布特征还缺少系统研究。因此,有必要对贝壳堤岛土壤盐分空间分布特征进行系统研究,为进一步阐明植物群落空间分布格局的形成机制奠定理论基础。本文重点研究黄河三角洲滨州无棣境内的贝壳堤岛土壤盐分的空间分布特征,主要包括贝壳砂基质条件下盐分的剖面分布特征、贝壳砂基质与相邻滨海盐土盐分特征对比、基于主成分分析法的贝壳堤岛土壤主要盐分特征指标的综合数量关系。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山东省滨州市无棣县贝壳堤与湿地国家自然保护区的实验区,年均降水量为 550 mm,降雨集中在夏季的 6—9 月份^[6]。地形地貌以滨海贝壳滩脊为主,贝壳砂平均厚度约为 1.0~2.5 m,贝壳砂主要由贝壳、贝壳碎块、贝壳碎屑及中细砂等组成;而在贝壳堤岛向海侧及向陆侧边缘区则为粉砂淤泥质海岸,土壤基质为滨海盐土^[7-8]。

自然植被呈现滨海湿地群落和滩脊旱生灌丛群落交错分布的格局,典型植物种包括酸枣(*Ziziphus jujuba* Mill. var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H. F.

Chow.)、柽柳(*Tamarix chinensis* Lour.)、杠柳(*Periploca sepium* Bunge)、白刺(*Nitraria tangutorum* Bo-br.)、二色补血草(*Limonium bicolor* (Bag.) Kuntze)、芦苇(*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.)、和狗尾草(*Setaria viridis* (L.) P. Beauv.)、蒙古蒿(*Artemisia mongolica* (Fisch. ex Bess.) Nakai)、鹅绒藤(*Cynanchum chinense* R. Br.)、大穗结缕草(*Zoysia macrostachya* Franch. & Sav.)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 2015 年 8 月底在黄河三角洲贝壳岛国家级自然保护区的实验区开展外业调查,主要调查土壤盐分的剖面分布和水平分布特征。外业调查前,对贝壳堤岛地下水的化学成分进行了测定,其地下水矿化度与相关离子含量见表 1。

表 1 地下水矿化度与主要离子含量 g/L						
矿化度	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
8.32	1.98	0.25	0.61	0.74	1.03	1.67

调查样地设置见表 2。剖面盐分特征研究中,分别在滩脊顶部(地下水埋深 2.5 m)和底部(地下水埋深 1.5 m)设置 2 m×2 m 样地各 1 个,在样地内随机挖掘 1.2 m 深剖面 3 个,每 10 cm 一层进行取样,相同层次的 3 个样品混合后作为 1 个样品。水平分布特征研究中,为比较不同地下水埋深条件下,贝壳砂基质与滨海盐土 2 种类型土壤的盐分特征差异,分别在地下水埋深 0.8,1.5m 处的 2 种土壤类型中设置典型样地各 2 个,并在滩脊顶部设置贝壳砂基质样地 2 个;样地面积均为 2 m×2 m,每个样地中随机挖掘 3 个剖面,均按每 20 cm 一层取样,共计取 3 层,每个样地相同层次的 3 个样品混合后作为 1 个样品。所有土壤样品均用于土壤盐分特征的主成分分析,各土壤样品编号为样地号加土层序号,如 A—1、A1—12、C1—3 等。

表 2 样地概况

地下水埋深/m	样地编号	样地数量	土壤类型	群落优势种	位置
1.5	A	1	贝壳砂	裸地	近海侧
2.5	B	1	贝壳砂	裸地	贝壳滩脊顶部
0.8	C1、C2	2	贝壳砂	白刺、大穗结缕草	近海侧
	D1、D2	2	滨海盐土	芦苇、狗尾草	贝壳滩脊边缘泥质海岸
1.5	E1、E2	2	贝壳砂	柽柳、二色补血草	近海侧
	F1、F2	2	滨海盐土	蒙古蒿、狗尾草	贝壳滩脊边缘泥质海岸
2.5	G1、G2	2	贝壳砂	酸枣、杠柳、鹅绒藤	贝壳滩脊顶部

注:A、B样地均按每 10 cm 一层,共 12 层进行剖面取样;其余样地均为 0—60 cm,按每 20 cm 一层,共 3 层取样。

1.2.2 测定指标及方法 所有风干土样过 1 mm 土壤筛后,取样测定其理化指标,测定指标包括土壤含

水量、细颗粒百分含量(直径<1 mm 颗粒占总质量的百分比)、土壤含盐量、pH 值、Na⁺、K⁺、Ca²⁺、

Mg^{2+} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 。

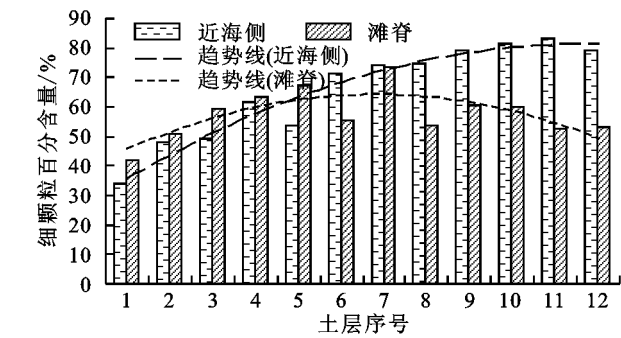
土壤含水量采用烘干法;其余指标采用5:1的水土比对土壤进行浸提,土壤可溶性盐含量采用重量法,pH值采取pH计(Sartorius PB-21)测定, K^{+} 、 Na^{+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 采用ICP Optima 8000测定; Cl^{-} 和 SO_4^{2-} 采用离子色谱仪(戴安中国,Ion Chromatography System)进行测定。

2 结果与分析

2.1 贝壳砂基质剖面盐分分布特征

2.1.1 细颗粒百分含量、含水量 贝壳堤岛滩脊核心地带土壤基质主要为贝壳砂,由于受风化分解时间、地下水位变化等环境条件的影响,不同土层深度的贝壳砂颗粒组成有所不同。本研究对比分析了近海侧(样地A)与滩脊地段(样地B)贝壳砂细颗粒百分含量及含水量的剖面变化特征。

由图1可知,近海侧剖面0—120 cm范围内,贝壳砂基质细颗粒百分含量由上至下呈逐渐增高的趋势,由表层的34.50%逐渐增高至底层的83.29%;而滩脊地段由上至下则呈现先增高后降低的趋势。近海侧剖面底层细颗粒含量较高可能与地下水位变化及表层径流冲刷导致的土壤颗粒汇集有关;而滩脊地段的地下水埋深多在2.5 m左右,剖面受地下水位影响较小,滩脊剖面细颗粒含量由上至下先增高后降低的趋势可能与水分下渗及贝壳堤不同层次的形成过程存在相关性。



注:土层深度为0—120 cm,每10 cm一层,共12层。下同。

图1 贝壳砂基质剖面细颗粒百分含量特征

由图2可知,近海侧与滩脊剖面土壤含水量变化规律也存在明显区别,近海侧剖面土壤含水量由上至下呈逐渐增高的趋势,0—40 cm范围内含水量在4.41%~5.58%之间,而50 cm以下增高趋势明显,由于水分入渗和地下水位的动态变化使得剖面下部含水量逐渐增高,底部已接近饱和含水量。滩脊剖面含水量由上至下则呈现先增加后降低的趋势,0—120 cm含水量在4.22%~10.81%之间,剖面整体均处于较低的含水量水平,说明滩脊剖面含水量主要受土壤水分入渗的影响,地下水位波动对其影响较小。

近海侧与滩脊剖面相同层次的细颗粒百分含量

及含水量在0—70 cm范围内均比较接近,而在80—120 cm范围则都相差较大。

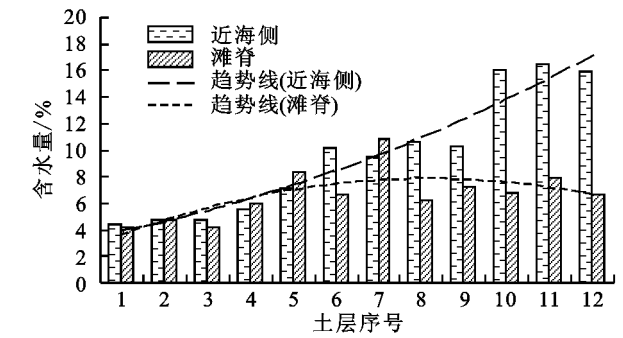


图2 贝壳砂基质剖面含水量特征

2.1.2 含盐量与pH值 由图3可以看出,近海侧贝壳砂剖面0—90 cm范围内含盐量在0.69~0.92 g/kg,100—120 cm则增高至1.13~1.74 g/kg;滩脊剖面0—120 cm含盐量由上至下则呈降低趋势,剖面含盐量范围在0.61~0.92 g/kg之间。近海侧剖面中下层(70—120 cm)土壤含盐量明显高于滩脊地段。近海侧剖面受地下水位变化和水分毛管上升作用的影响,其中下层含盐量较滩脊地段明显偏高。

由图4可以看出,近海侧剖面各层土壤pH值明显高于滩脊地段,近海侧剖面pH值由表层8.20逐渐升高至底层的9.03左右,其中40—120 cm范围内pH值多在8.5~9.03之间;而滩脊剖面0—120 cm范围内的pH值多在8.07~8.48之间,表现为由上至下缓慢升高的趋势。贝壳砂基质水分毛管上升作用微弱,但近海侧剖面各层pH值仍然明显高于滩脊地段,这可能与地下水位的动态变化存在相关性。

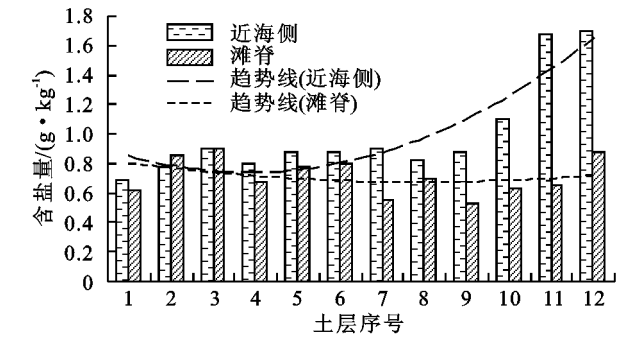


图3 贝壳砂基质剖面含盐量特征

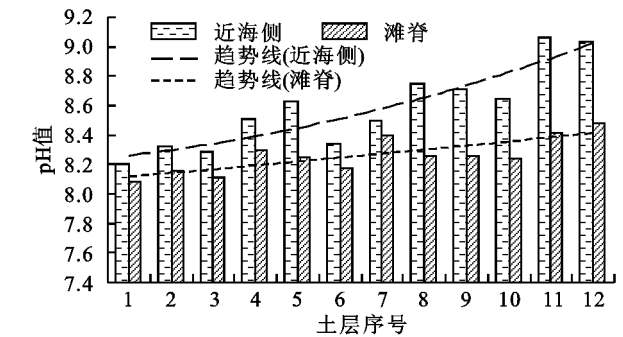


图4 贝壳砂基质剖面pH特征

2.1.3 盐离子含量 由图5和图6可以看出,贝壳

砂质环境下,近海侧剖面 Na^+ 与 K^+ 含量均显著高于滩脊地段,尤其在剖面中下部(70—120 cm)。近海侧剖面 0—70 cm 范围内 Na^+ 含量在 25.44~30.79 mg/kg,而 80—120 cm 范围内则骤然升高至 52.60~175.85 mg/kg;而滩脊剖面 Na^+ 离子含量上下层差异不明显,含量维持在 18.89~29.62 mg/kg。近海侧剖面 0—60 cm 范围内 K^+ 含量在 14.30~31.87 mg/kg,70—120 cm 范围内 K^+ 含量同样呈现骤然升高的趋势,含量范围为 67.96~95.30 mg/kg;而滩脊剖面 K^+ 含量上下层差异则不明显,均维持在 11.80~22.93mg/kg。近海侧地下水位变化及土壤水分的毛管扩散作用可能是导致近海侧剖面中下部 Na^+ 及 K^+ 含量突然升高的主要原因。

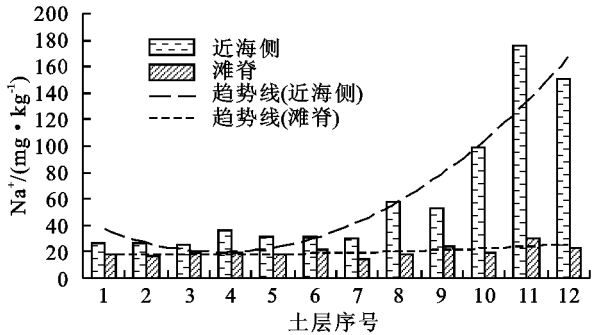


图 5 贝壳砂基质剖面 Na^+ 离子含量

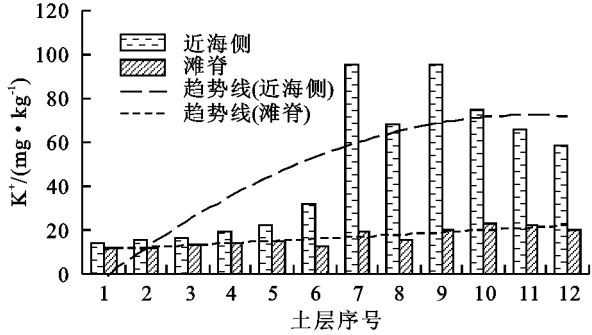


图 6 贝壳砂基质剖面 K^+ 离子含量

由图 7 可知,近海侧剖面 Mg^{2+} 含量介于 7.92~23.19 mg/kg 之间,剖面由上至下呈先增高后降低再增高的趋势。与 Na^+ 和 K^+ 有所不同,近海侧剖面各层 Mg^{2+} 含量并未明显高于滩脊剖面各层,70—100 cm 范围内滩脊剖面各层含量甚至还高于近海侧,滩脊剖面 Mg^{2+} 含量由上至下整体呈现逐渐增高的趋势。

由图 8 可知, Ca^{2+} 与其他离子剖面变化规律差异较大,近海侧与滩脊剖面各层含量均比较接近,甚至在剖面中下部(60—120 cm)滩脊地段 Ca^{2+} 含量反而高于近海侧。近海侧及滩脊剖面 Ca^{2+} 含量由上至下均呈现缓慢降低的趋势,剖面含量范围在 87.05~129.40 mg/kg。

由图 9 可知,近海侧剖面 Cl^- 含量由上至下呈明显增高趋势,0—60 cm 范围内含量介于 14.20~23.57 mg/

kg,而 70—120 cm 含量则升高至 40.69~72.65 mg/kg;滩脊剖面 Cl^- 含量则整体相对较低,由上至下呈现缓慢增高的趋势,含量范围介于 4.73~11.84 mg/kg。

由图 10 可知,近海侧剖面 SO_4^{2-} 由上至下呈先降低后升高的趋势,0—100 cm 范围内 SO_4^{2-} 含量在 27.67~47.14 mg/kg,而 110—120 cm 则突然升高至 71.16~82.20 mg/kg。滩脊剖面 SO_4^{2-} 则呈缓慢增高的趋势,剖面含量范围在 16.17~41.90 mg/kg。近海侧剖面底部 SO_4^{2-} 含量的突然升高也与地下水位的波动密切相关。

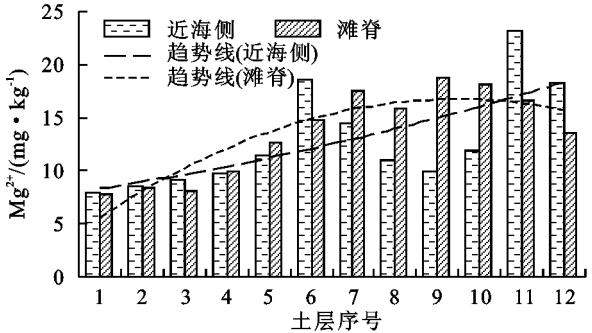


图 7 贝壳砂基质剖面 Mg^{2+} 离子含量

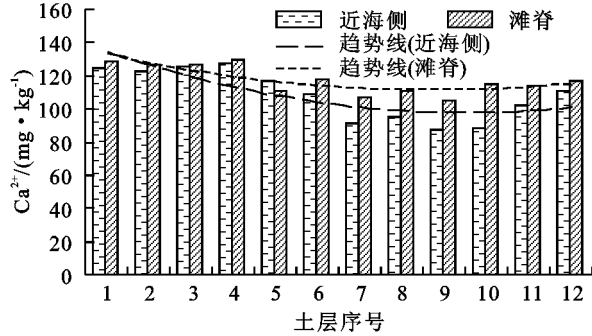


图 8 贝壳砂基质剖面 Ca^{2+} 离子含量

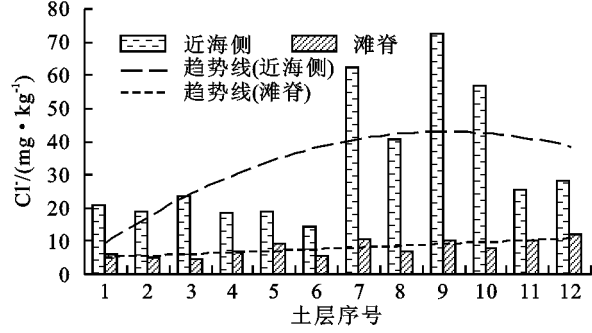


图 9 贝壳砂基质剖面 Cl^- 离子含量

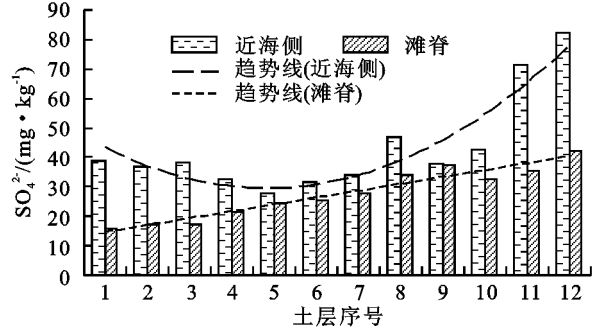


图 10 贝壳砂基质剖面 SO_4^{2-} 离子含量

2.2 贝壳堤岛土壤盐分特征指标相关性分析

为进一步分析贝壳堤岛各土壤盐分特征指标的关联关系,对本研究所有土壤样品的盐分特征指标进行相关性分析(表 3),结果表明,除 Ca^{2+} 外,其余各指

表 3 贝壳堤岛土壤盐分特征指标相关性分析

指标	含水量	含盐量	pH	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Cl^{-}	SO_4^{2-}
细颗粒百分比	0.648**	0.314*	0.389**	0.478**	−0.21	0.613**	0.513**	0.577**	0.568**
含水量		0.319*	0.418**	0.528**	−0.169	0.789**	0.569**	0.746**	0.751**
含盐量			0.454**	0.555**	0.021	0.536**	0.42**	0.409**	0.473**
pH				0.262	−0.484**	0.5**	0.446**	0.305*	0.444**
Mg^{2+}					0.154	0.648**	0.339*	0.391**	0.616**
Ca^{2+}						−0.092	−0.318**	0	0.063
Na^{+}							0.469**	0.784**	0.918**
K^{+}								0.599**	0.407**
Cl^{-}									0.848**

注: * 在 0.05 水平上显著相关; ** 为在 0.01 水平上显著相关。

相关系数绝对值 >0.7 的指标,包括含水量与 Na^{+} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} , Na^{+} 与 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} , Cl^{-} 与 SO_4^{2-} , 这些指标之间均存在较为密切的关系。

2.3 基于主成分分析的贝壳堤岛土壤盐分特征评价

应用主成分分析法对表 3 中贝壳堤岛所有土壤样品的盐分特征指标进行综合分析评价。表 4 为前 4 个主成分因子的方差贡献率和累积贡献率,可以看出前 4 个特征值所对应的方差贡献率分别为 53.58%, 15.01%, 9.42% 和 6.25%, 累积贡献率为 84.27%, 说明前 4 个主成分已经包含了原来 9 个原始变量信息中的绝大部分信息,信息损失量较小。

表 4 特征根及贡献率

因子	特征值	百分率/%	累积百分率/%
1	5.36	53.58	53.58
2	1.50	15.01	68.59
3	0.94	9.42	78.01
4	0.63	6.25	84.27

由表 5 特征向量表可知,第 1 主成分中,含水量、 Na^{+} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 、细颗粒百分含量的系数值较大,是对第 1 主成分影响较大的特征向量, Na^{+} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 是该地区土壤盐化的代表性离子,因而第 1 主成分可以理解为土壤的盐化状况;第 2 主成分中, Ca^{2+} 系数高达 0.743 9,由表 3 和图 8 可知, Ca^{2+} 与其他指标相关性较小,而且其剖面分布特征也比较特殊,其含量值受剖面水盐运移的影响相对较小,主成分分析也再一次表明 Ca^{2+} 含量及剖面运移的特殊性,因而,第 2 主成分可以理解为 Ca^{2+} 含量因子;第 3 主成分中,含盐量、pH 值及 Mg^{2+} 指标系数值相对较大,含盐量系数值明显高于其他指标值,第 3 主成分可以理解为土壤含盐量和碱化特征因子;第 4 主成分中, K^{+} 的系数为 0.750 4,显著高于其他指标系数值,因此,可以理解为土壤 K^{+} 含量因子;由表 5 可知,第 1 主成分贡献率达到了

标之间多存在显著正相关关系。其中, Ca^{2+} 与细颗粒百分含量、含水量、含盐量、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 Cl^{-} 及 SO_4^{2-} 均无显著相关关系, Ca^{2+} 与 pH 值、 K^{+} 间则均存在极显著负相关关系。

53.58%,其他主成分贡献率相对较小,说明土壤盐分离子 Na^{+} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 含量及含水量、细颗粒百分含量是贝壳堤岛各土壤样品盐分特征的主要差别所在,今后可重点进行系统研究。

表 5 特征向量表

因子	主成分			
	1	2	3	4
细颗粒百分比	0.3226	−0.093	−0.224	0.1008
含水量	0.3706	−0.009	−0.313	−0.069
含盐量	0.2682	0.0881	0.6911	0.2445
PH	0.2587	−0.438	0.368	−0.372
Mg	0.2967	0.3042	0.334	−0.008
Ca	−0.071	0.7439	0.0397	0.1524
Na	0.3989	0.1053	−0.033	−0.291
K	0.2958	−0.275	−0.042	0.7504
Cl	0.3633	0.1184	−0.334	0.139
SO_4	0.3846	0.2134	−0.109	−0.311

主成分得分可以综合反映各土壤样品盐分特征的分类和排序情况,应用最小二乘法计算贝壳堤岛各土壤样品的主成分得分值(表 6)。根据各样品主成分得分值,选择适当的得分标准对贝壳堤岛各土壤样品进行分类。第一类得分范围在 $(-1.570) \sim (-0.700)$ 之间,主要包括地下水埋深 2.5 m 和 1.5 m 的贝壳砂基质剖面(样地 A、B、E1、E2、G1、G2)表层和浅层,即主要为 0—60 cm 范围内的样品,以及地下水埋深 0.8 m 处贝壳砂基质剖面(C1、C2)表层(0—20 cm)土壤样品。第二类得分范围在 $(-0.699) \sim 0$ 之间,主要为地下水埋深 2.5 m 和 1.5 m 的贝壳砂基质剖面(A、B、G1、G2)较深层次的土壤样品;其中,地下水埋深 2.5 m 处剖面(B、G1、G2)主要为 50 cm 以下各层次,而地下水埋深 1.5 m 处剖面(A)则为 20—70 cm 范围内土壤样品。第三类为得分范围为 >0 的所有土壤样品,主要包括贝壳砂基质地下水埋深 0.8 m 处

剖面(C1、C2)20 cm 以下的土壤样品,以及贝壳砂基质地下水埋深 1.5 m 处剖面(A)的 80 cm 以下各层样品和所有滨海盐土(D1、D2、F1、F2)各层次土壤样品。

表 6 土壤样品主成分得分综合评价

序号	得分范围	样品名称及主成分得分
1	(-1.570)~(-0.700)	E1-1(-1.570)、G1-1(-1.362)、G2-1(-1.311)、G1-2(-1.304)、E1-2(-1.271)、E2-1(-1.245)、C2-1(-1.182)、B-1(-1.164)、E1-3(-0.997)、G2-2(-0.991)、B-4(-0.967)、E2-2(-0.965)、B-2(-0.881)、C1-1(-0.868)、E2-3(-0.844)、B-6(-0.843)、A-1(-0.765)、B-3(-0.733)
		A-3(-0.699)、B-10(-0.689)、A-2(-0.684)、G1-3(-0.678)、B-8(-0.666)、G2-3(-0.663)、A-5(-0.644)、B-9(-0.612)、B-7(-0.606)、A-4(-0.566)、A-6(-0.543)、B-5(-0.367)、B-11(-0.204)、B-12(-0.164)、A-7(-0.045)
2	(-0.699)~0	C2-3(0.006)、C1-2(0.143)、A-9(0.184)、C2-2(0.197)、A-8(0.643)、F2-1(0.718)、C1-3(0.725)、F2-3(0.786)、A-11(0.979)、F2-2(1.044)、D2-1(1.186)、F1-2(1.241)、D2-2(1.266)、A-10(1.341)、D1-3(1.356)、F1-3(1.720)、D1-1(1.724)、D1-2(2.371)、A-12(2.389)、F1-1(3.562)、D2-3(3.659)
3	>0	

注:样地情况及土样编号情况见表 2。

主成分得分综合评价结果表明,第一类土壤样品主要为地下水埋深较深处(2.5,1.5 m)贝壳砂基质表层或浅层土壤样品,以及地下水埋深较浅处(0.8 m)贝壳砂基质表层土壤样品,均为盐分含量很低的土壤样品;第二类相对于第一类来讲,均为贝壳砂基质条件下土壤较深层次土壤样品,第二类各土壤样品含盐量相对于第一类要高一些,而且排序靠后的样品多为土壤更深层次的样品;第三类相对于第二类,多为滨海盐土的土壤样品,以及贝壳砂基质地下水埋深更浅或土壤层次更深的土壤样品,均为土壤含盐量和盐分离子含量较高的盐碱化土壤类型,其排序同样与土壤样品含盐量密切相关。

3 讨论

3.1 贝壳堤岛土壤盐分割面分布特征

干旱地区蒸发作用强烈,盐分随水分通过毛管上升作用累积于土壤表层,干旱地区剖面盐分运移与地下水位存在密切关联,地下水位较浅的地段水盐运移及表聚作用更加强烈,因而,其剖面盐分离子含量更高^[9-12]。然而,贝壳砂基质的毛管上升作用微弱,其盐分割面分布特征还缺少系统研究。

本研究表明,贝壳砂基质条件下,近海侧(地下水埋深 1.5 m)剖面含盐量、pH 值及盐分离子含量在剖面中下部多呈现陡然升高的趋势,而且除 Ca²⁺ 及 Mg²⁺ 以外,近海侧剖面各盐分特征指标多高于滩脊剖面对应各层次,上述变化规律可能与地下水位动态变化存在一定相关性。滩脊地段因地下水位较深(地下水埋深 2.5 m),其剖面含盐量、pH 值及盐分各离子含量由上至下增高趋势不及近海侧剖面明显。与其他指标不同,近海侧及滩脊地段贝壳砂基质剖面 Ca²⁺ 含量由上至下没有呈现逐渐升高的趋势,而是表现为缓慢下降的趋势,

这种特殊的变化趋势是否与 Ca²⁺ 的剖面迁移特性及贝壳砂基质的水盐运移规律存在关联性值得今后进行深入研究。滨海盐土与贝壳砂基质的土壤水分物理特征及土壤胶体特性均存在很大差异^[13-15],本研究对比分析这 2 种土壤类型的剖面盐分特征,结果表明,除 Ca²⁺、Mg²⁺ 外,其余滨海盐土剖面各盐分特征指标均明显高于贝壳砂基质剖面各对应层次。滨海盐土由于水分的毛管上升作用,使盐分积累在表层土壤中,使得盐分含量较高;而贝壳砂基质毛管上升作用微弱,其剖面盐分含量要小得多。

一般说来,土壤可溶性盐中钠盐的溶解度大于钙镁盐类的溶解度,且可溶性盐中 Na⁺ 的活动性比 Ca²⁺ 大,所以钠离子等的淋失比例比 Ca²⁺、Mg²⁺ 大^[16];加之可能受贝壳砂的钙离子溶出影响,因而造成了贝壳堤岛 Ca²⁺ 含量特殊的剖面变化规律。

3.2 贝壳堤岛土壤盐分特征指标相关性

化学元素的离子半径、化合价、存在形态等具有相似性,在植物、土壤、沉积物等生命和非生命体中存在一定的相关性^[17-19]。针对盐渍化土壤盐分离子相关性分析的研究表明,多数盐分离子间存在密切关联。本文针对贝壳堤岛特殊土壤基质的研究表明,除 Ca²⁺ 外,其余各指标之间多存在显著或极显著相关关系。Ca²⁺ 的这种特殊变化规律可能与贝壳砂基质本身钙元素含量丰富及钙离子的溶出释放速度存在相关性。

3.3 基于主成分分析的贝壳堤岛土壤盐分特征综合评价

土壤盐分特征在剖面和水平方向上均存在较大空间变异,难以简单定量描述土壤盐分及各离子的综合分布特征,因此,不少研究者将主成分分析法应用于盐渍化土壤盐分特征的综合评价^[20-21]。本文研究

表明,主成分分析法可以很好的从整体上评价各土壤样品的盐分特征。主成分特征向量表可以将各盐分子指标变化规律进行归类分析,土壤样品主成分得分排序与样品的整体盐碱化程度存在很好的相关性。总体来讲,将主成分分析法应用于贝壳堤岛土壤盐分特征综合评价,取得了很好的评价分析效果。

4 结 论

(1)黄河三角洲贝壳堤岛雨季末期,近海侧剖面各层次细颗粒含量、含水量、含盐量及 pH 值均高于滩脊地段对应各层次;除 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 外,近海侧剖面各层盐分离子含量多明显高于滩脊剖面各对应层次。

(2)贝壳堤岛土壤样品盐分特征指标相关分析表明,除 Ca^{2+} 外,其余各指标之间存在显著正相关关系。

(3)贝壳堤岛土壤样品盐分特征指标的主成分分析表明,前 4 个主成分因子累积贡献率为 84.27%,分别依次可以理解为土壤的盐化状况、土壤 Ca^{2+} 含量因子、土壤含盐量及碱化特征因子、土壤 K^{+} 含量因子;主成分得分可以很好的将各样品进行分类、排序和综合评价。

参考文献:

[1] 田家怡,夏江宝,孙景宽,等. 黄河三角洲贝壳堤岛生态保护与恢复[M]. 北京:化学工业出版社,2011:1-3.

[2] 张淑勇,夏江宝,张光灿,等. 黄河三角洲贝壳堤岛叶底珠叶片光合作用对 CO_2 浓度及土壤水分的响应[J]. 生态学报,2014,34(8):1937-1945.

[3] 许有明,王玉海. 废黄河三角洲贝壳堤岸滩的风暴潮动力响应[J]. 海洋地质与第四纪地质,2015,35(6):25-32.

[4] 郑云云,胡泓,邵志芳. 典型滨海湿地植被演替研究进展[J]. 湿地科学与管理,2013,9(4):56-60.

[5] 赵欣胜,崔保山,孙涛,等. 黄河三角洲潮沟湿地植被空间分布对土壤环境的响应[J]. 生态环境学报,2010,19(8):1855-1861.

[6] 朱金方,刘京涛,陆兆华,等. 黄河三角洲贝壳堤岛柾柳水分利用策略初步研究[J]. 湿地科学,2015,13(6):765-771.

[7] Xia J B,Zhang S Y,Guo J,et al. Critical effects of gas

exchange parameters in *Tamarix chinensis* Lour on soil water and its relevant environmental factors on a shell ridge island in China's Yellow River Delta[J]. Ecological Engineering,2015,76(3):36-46.

[8] Zhao Y Y,Hu X M,Liu J T,et al. Vegetation pattern in shell ridge island in China's Yellow River Delta[J]. Frontiers of Earth Science,2015,9(3):567-577

[9] 卢响军,武红旗,张丽,等. 不同开垦年限土壤剖面盐分变化[J]. 水土保持学报,2011,25(6):229-232.

[10] 贾瑞亮,周金龙,周股竹,等. 干旱区高盐度潜水蒸发条件下土壤积盐规律分析[J]. 水利学报,2016,47(2):150-157.

[11] 张鹏锐,李旭霖,崔德杰,等. 滨海重盐碱地不同土地利用方式的水盐特征[J]. 水土保持学报,2015,29(2):117-121.

[12] Liu G M,Yang J S,He L D,et al. Salt dynamics in soil profiles during long-term evaporation under different groundwater conditions[J]. Plant Biosystems, 2013,147(4):1211-1218.

[13] 王艳,廉晓娟,王正祥,等. 不同改良措施对滨海盐土理化性状的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(4):236-240.

[14] 刘福汉,王遵亲. 潜水蒸发条件下不同质地剖面的土壤水盐运动[J]. 土壤学报,1993,30(2):173-181.

[15] 郭全恩,马忠明,王益权,等. 地下水埋深对土壤剖面盐分离子分异的影响[J]. 灌溉排水学报,2010,29(6):64-67.

[16] 柯丽丽,黄明勇,苏德荣,等. 海砂和电石渣对吹填土理化性状的影响及水盐动态研究[J]. 水土保持学报,2010,24(2):92-95.

[17] 刘景双,朱颜明,黄锡畴,等. 长白山岳桦林化学元素生物地球化学分析[J]. 地理科学,1998,18(5):457-462.

[18] 吕真真,刘广明,杨劲松. 新疆玛纳斯河流域土壤盐分特征研究[J]. 土壤学报,2013,50(2):289-295.

[19] 李彬,王志春,梁正伟,等. 苏打碱化土壤盐分离子与相关性分析[J]. 土壤通报,2007,38(4):653-656.

[20] 刘延锋,靳孟贵,金英春. 焉耆盆地土壤盐渍化状况的主成分分析[J]. 干旱地区农业研究,2004,22(1):165-171.

[21] 姚荣江,杨劲松. 黄河三角洲地区土壤盐渍化特征及其剖面类型分析[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(11):106-112.