DOI:10.15928/j.1674-3075.202201060009

典型滨海翅碱蓬盐沼湿地土壤理化特征研究

唐 敏[1],陶 韦[1],刘长发[1,2],刘 远[1,2],李沁蕊[1],皮 赛[1],李 霞[1]

(1. 大连海洋大学 海洋科技与环境学院,大连 116023;
2. 辽宁省高校近岸海洋环境科学与技术重点实验室,大连 116023)

摘要:研究分布翅碱蓬的典型滨海潮滩盐沼湿地不同土层土壤理化性质及C:N:P:K生态化学计量关系,了解滨海潮滩盐沼湿地翅碱蓬生长的土壤理化环境条件,为滨海潮滩湿地生态修复提供依据。2013年7-8月采集辽宁盘锦、辽宁庄河、天津、山东东营及江苏连云港5个不同纬度典型滨海翅碱蓬生长区域土壤,分析了其理化特征。结果表明,滨海湿地土壤翅碱蓬生态最适域值为含盐量(2.5~19.0)g/kg、氯离子(1.16~11.27)g/kg、pH 7.05～8.96、碱度(3.56~8.78)mmol/kg、全碳(7.70~21.73)mg/kg,全氮(0.36~0.87)mg/kg、无机氮(1.95~16.10)mg/kg、速效磷(5.26~39.98)mg/kg、速效钾(0.53~1.77)mg/kg,铵氮(1.60~8.72)mg/kg、亚硝酸盐氮(0.01~0.11)mg/kg、硝酸盐氮(1.00~2.54)mg/kg;土壤N:P平均值为(0.80±0.25),N:K为(17.77±6.08),P:K为(26.90±4.67),TC:TN为(26.50±4.67)。满足翅碱蓬生态最适域值的滨海潮间带土壤,可以依不同纬度地区土壤积温优先实施翅碱蓬生境修复。

关键词:理化性质;生态化学计量学;滨海盐沼湿地;翅碱蓬

中图分类号:X144,Q142 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2022)02-0070-07

元素土壤化学作为土壤化学中的一个研究领域,研究各元素在土壤中化学行为的共性和特性,包括其含量和分布规律、存在形态及其转化条件和机理、各元素在土壤中的化学平衡体系,为植物提供养分以及与植物互作等(Ehrenfeld, 2013)。植物通过根系从土壤中吸收水分和养分,同时也向土壤中释放其分泌物,通过凋落物分解(次瑞敏等, 2020)等过程影响土壤化学组成与性质,植物生理生态也受土壤化学组成影响。氮元素作为植物生长发育的必需元素,与结构性元素碳互作,在植物生长发育中共同制约生态系统中的关键过程(Forrester et al, 2005)。生态化学计量学研究生物系统和生态过程中多种化学元素和能量平衡(Elser, 1996)。土壤C:N:P化学计量关系驱动土壤磷的稳定性(Qaswar et al, 2019),而磷的有效性直接影响作物生产力(Williams et al, 2013)。植物N:P响应土壤N:P和土壤氮、磷有效性的变化(Di Palo & Fornara, 2017)。湖泊沉积物C:N还被用于判别湖泊沉积物中有机质的来源(钱君龙等, 1997)。滨海潮滩湿地土壤碳氮磷元素的循环过程及其生态化学计量关系还会受到潮汐过程影响(Taylor & Townsend, 2010; 牟晓杰等, 2012)。对土壤N:K、P:K生态化学计量关系的研究表明较低的N、P、K周转率有利于湿地的恢复与保护(Venterink et al, 2002)。

作为先锋作物的翅碱蓬(*Suaeda salsa*),亦称盐地碱蓬,是可以生长在河口潮滩湿地的一种藜科碱蓬属一年生耐盐草本植物(http://www.iplant.cn/info/Suaeda%20salsa?t=z)。研究显示其具有降低土壤盐度,改良、修复土壤污染,降解石油烃等的成土和生物修复功能。翅碱蓬主要分布于江苏、山东、河北、天津和辽宁沿海的河口潮间带和潮上带,如黄河口、辽河口翅碱蓬盐沼湿地。翅碱蓬不仅形成动物栖息生境,还可形成重要的生态工程岸线,防止海岸侵蚀,作为生态景观,供游憩,提供食用及药用原材料等,具有重要的生态系统服务价值。但是,并非所有的滨海潮滩湿地都生长翅碱蓬。本文研究了我国5地分布翅碱蓬的典型滨海潮滩盐沼湿地不同土层土壤理化性质及C:N:P:K生态化学计量关系,以期了解滨海潮滩盐沼湿地翅碱蓬生长的土壤理化环境条件,为滨海潮滩湿地生态修复提供依据。

1 材料与方法

1.1 土壤样品

2013年8-9月于辽宁盘锦、辽宁庄河、天津、山东东营和江苏连云港(表1)滨海潮滩翅碱蓬盐沼湿地分

收稿日期:2022-01-06

基金项目:国家自然科学基金(41171389);国家海洋公益性行业科研专项(201305043);辽宁省高等学校优秀科技人才支持计划(LR2013035)。

作者简介:唐敏,1997年生,女,硕士研究生,主要从事海洋环境科学研究。E-mail:1432391529@qq.com

通信作者:刘长发,1964年生,男,博士,教授。E-mail:liucf@dlou.edu.cn

别设置3个样点，每个样点按照“五点采样法”采集0~10、10~20和20~30 cm土壤样品。样品经风干、粉碎、过筛（孔径1 mm）后，等量混合均匀用于理化因子测定。

表1　采样点地理位置

Tab.1　Sampling site locations

采样地点	坐标		样品编号
盘锦	40°55′24.54″N	121°46′53.16″E	PJ1、PJ2、PJ3
庄河	39°41′43.93″N	123°6′1.95″E	ZH1、ZH2、ZH3
天津	38°46′22.64″N	117°35′29.80″E	TJ1、TJ2、TJ3
东营	37°26′22.8″N	118°55′6.9″E	DY1、DY2、DY3
连云港	34°46′31.35″N	119°18′5.72″E	LYG1、LYG2、LYG3

1.2　测定方法

土壤碳酸盐碱度（A，CO_3^{2-} + HCO_3^-）采用酸滴定法测定，含盐量（S）采用电导仪（Orion 150A）测定；pH采用pH计（MT SG2）测定（NY/T 1121.2-2006）；氯离子（Cl）采用硝酸银滴定法（NY/T 1378-2007）测定；速效磷（AP）采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法（NY/T 1121.7-2014）测定；铵氮（NH_4^+ - N）、亚硝酸盐氮（NO_2^- - N）、硝酸盐氮（NO_3^- - N）分别采用氯化钾溶液提取-靛酚蓝分光光度法、氯化钾溶液提取-盐酸萘乙二胺分光光度法、氯化钾溶液提取-锌镉还原法（HJ 634-2004）测定；速效钾（K）采用乙酸铵溶液浸提-火焰光度计法（PE Aanalyst 800型原子吸收光谱仪）（NY/T 889-2004）测定；土壤全碳（TC）、全氮（TN）采用元素分析仪（vario PYRO cube型元素分析仪）测定。

1.3　统计分析

不同样地土壤理化指标差异显著性检验采用单因素方差分析法，并以最小显著性差异法（LSD）进行事后多重比较。同一样地不同土层样品土壤理化指标相关性分析采用Pearson相关性分析法。

2　结果与分析

2.1　土壤pH、含盐量、碱度及氯离子、全碳含量

2.1.1　不同样地土壤中含量　不同样地不同土层土壤pH、含盐量、碱度及氯离子、全碳含量见图1。5个样地土壤pH均大于7，范围（7.05±0.01）~（8.96±0.01），为弱碱性土壤（图1a）。含盐量（2.50±0.5）~（19.00±6.1）g/kg，碳酸盐碱度（3.56±0.59）~（8.78±0.78）mmol/kg，全碳含量（7.70±1.84）~（21.73±4.11）mg/kg。庄河土壤的pH、含盐量、氯离子含量、碳酸盐碱度的平均含量最低，盘锦土壤全碳平均含量最低、碳酸盐碱度平均含量最高，东营土壤平均pH最高，天津土壤平均含盐量、氯离子平均含量最高，连云港土壤全碳平均含量最高。

2.1.2　不同土层土壤中含量　单因素方差分析结果（图1）显示，土壤pH、氯离子和全碳含量在不同土层间有显著性差异，其他因子在不同土层间均不具有显著性差异。LSD多重比较显示连云港的氯离子及全碳含量在（0~10）cm与（20~30）cm深度间有显著性差异，土壤pH在（10~20）cm层与（20~30）cm层间有显著性差异。

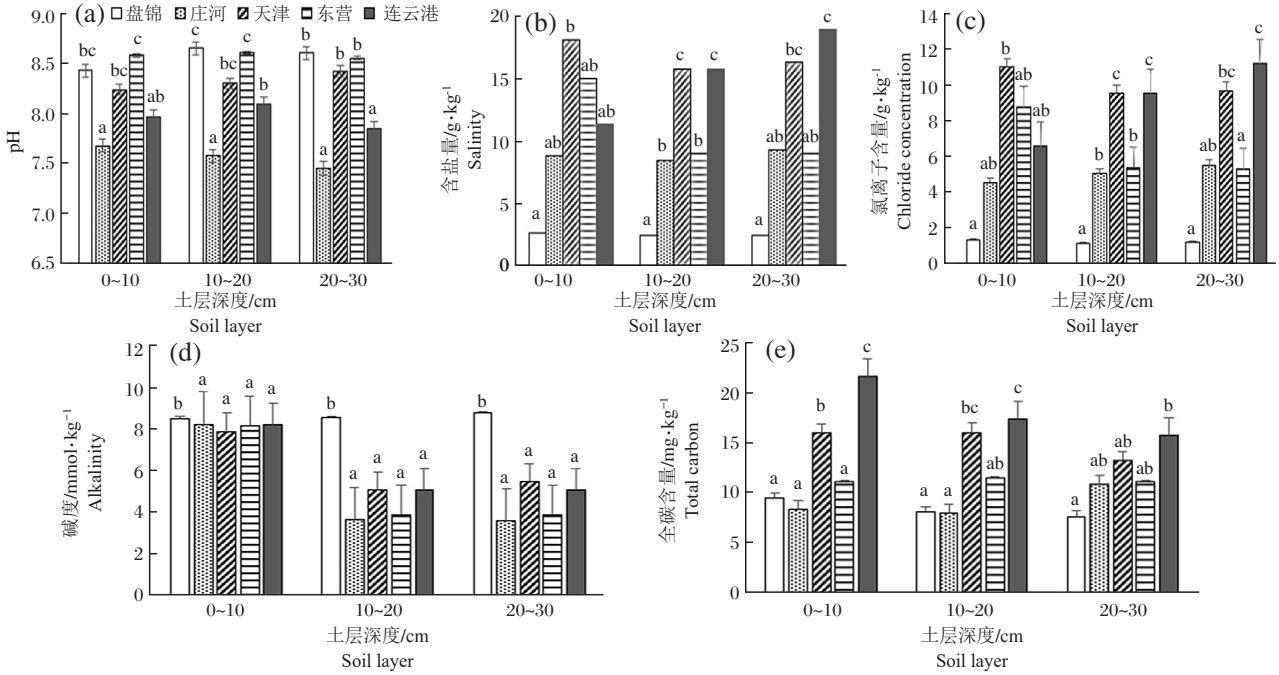

图1　土壤pH、含盐量、碱度及氯离子、全碳含量

Fig. 1　pH, salinity, alkalinity and concentrations of chloride and total carbon in each soil layer at each sampling site

2.2 土壤氮磷钾含量

2.2.1 不同样地土壤中含量 不同样地不同土层土壤氮磷钾含量见图2。5个样地土壤全氮含量(0.36~0.87)mg/kg,铵态氮含量(1.60~8.72)mg/kg,硝酸盐氮含量(1.00~2.54)mg/kg,亚硝酸盐氮含量(0.01~0.11)mg/kg,速效磷含量(5.26~39.98)mg/kg,速效钾含量(0.53~1.77)mg/kg。不同样地土壤全氮、铵态氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、速效磷、速效钾含量间存在差异,但仅部分样地土壤间具差异显著性。其中,庄河样地土壤硝酸盐氮、亚硝酸盐氮平均含量最低,东营样地土壤速效磷、速效钾、无机氮和全氮平均含量最低;盘锦样地土壤铵氮、亚硝酸盐氮平均含量最高,东营样地土壤硝酸盐氮平均含量最高,庄河样地土壤速效磷、全氮平均含量最高,连云港样地土壤速效钾平均含量最高。

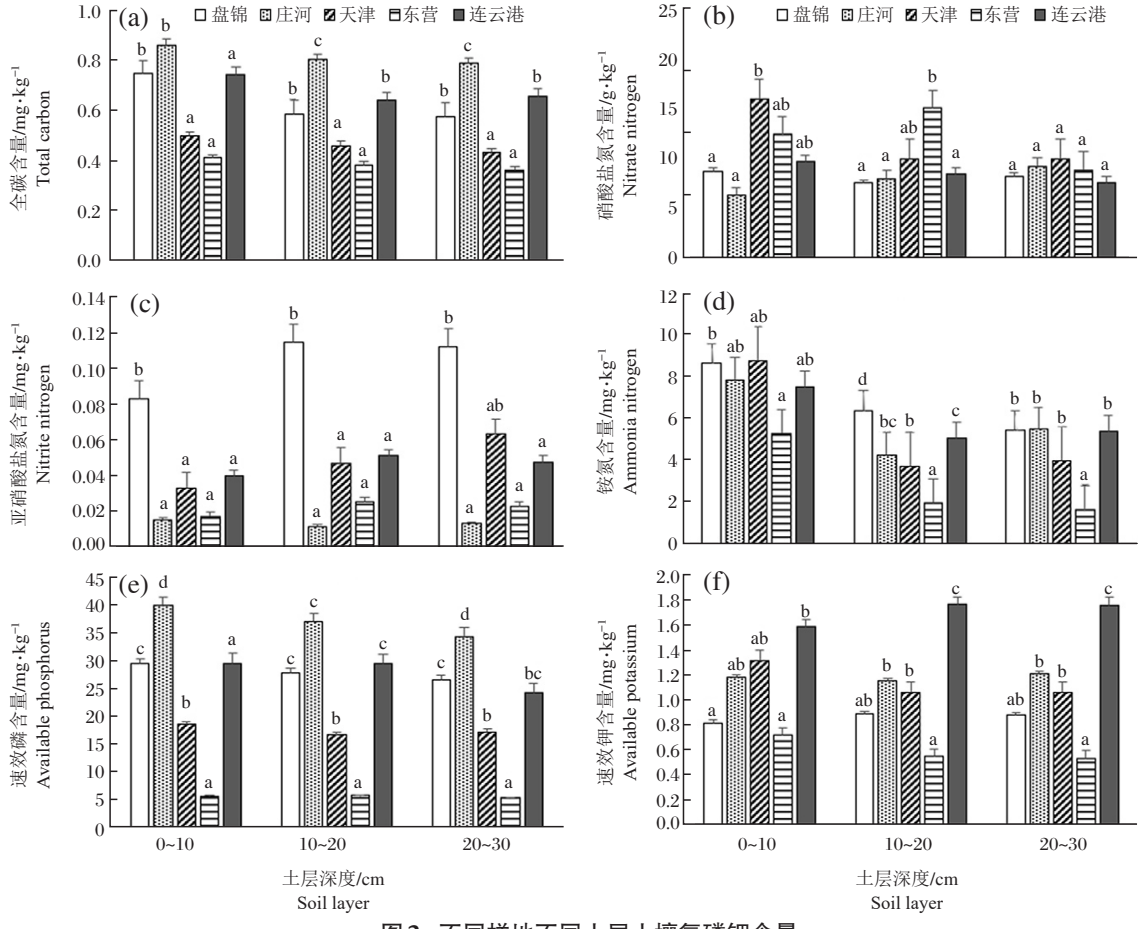

图2 不同样地不同土层土壤氮磷钾含量

Fig. 2 Concentrations of nitrogen, phosphorus and potassium for each soil layer at each sampling site

2.2.2 不同土层土壤中含量 单因素方差分析结果显示,5个样地土壤仅亚硝酸氮含量在不同土层间有显著性差异。LSD多重比较显示天津样地土壤亚硝酸氮含量在(0~10)cm与(20~30)cm土层间具有显著性差异,而其他各因子在不同土层间均不具有显著性差异。庄河、盘锦、天津与东营4个样地土壤全氮含量随土层深度增加而逐渐降低,连云港样地则先减少后增加。随土层深度增加,庄河样地土壤硝酸盐氮含量增加,连云港样地减少,东营样地先增加后减少,天津与盘锦样地先降低后稳定;天津样地土壤亚硝酸盐氮含量增加,盘锦样地先增加后减小,其他3个样地相对稳定;5个样地土壤铵氮含量降低,而后略有增加。随土层深度增加,庄河样地土壤速效磷含量降低,连云港样地呈先增加后降低,其他3个样地基本不变;天津样地土壤速效钾含量先降低后增加,庄河、连云港与盘锦样地增加,东营样地降低。整体上,随土层深度增加,5个样地土壤全氮、铵态氮、速效钾含量降低,亚硝酸盐含量增加,硝酸盐、速效磷含量则没有明显的规律性。

2.3 土壤理化因子相关性

5个样地土壤含盐量与氯离子含量均有显著正相关关系。盘锦样地土壤速效钾与含盐量、氯离子含量有显著负相关关系,而庄河、天津、东营样地则反之。盘锦样地土壤速效钾与碳酸盐碱度、亚硝酸

盐氮含量有显著正相关关系，庄河样地土壤速效钾与碳酸盐碱度、天津样地土壤速效钾与亚硝酸盐氮含量有显著负相关关系。盘锦样地土壤含盐量与速效磷含量有显著负相关关系，天津样地则反之。

2.4　土壤N:P:K与TC:TN生态化学计量关系

5个样地土壤N:P:K、TC:TN生态化学计量比见表2。5个样地间土壤N:P平均值为(0.80±0.25)，N:K平均值为(17.77±6.08)，P:K平均值为(26.90±4.67)，TC:TN平均值为(26.50±4.67)。各区域土壤N:P大小顺序为东营>天津>盘锦>连云港>庄河，N:K为盘锦>东营>天津>庄河>连云港，P:K为盘锦>庄河>连云港>天津>东营，TC:TN为天津>东营>连云港>盘锦>庄河。

表2　5个样地土壤生态化学计量比

Tab.2　Soil nutrient ratios at each sampling site

样地	N:P	N:K	P:K	TC:TN
盘锦	0.65	27.11	41.26	15.44
庄河	0.36	14.25	40.00	13.15
天津	0.87	17.24	19.62	37.98
东营	1.54	19.00	12.50	34.38
连云港	0.58	11.26	21.13	31.56

3　讨论

3.1　滨海潮滩湿地翅碱蓬生长土壤条件

研究现有滨海潮间带翅碱蓬盐沼湿地土壤理化特征可以指导在滨海潮间带光滩实施翅碱蓬植物生境修复。在众多土壤理化因子中仅对翅碱蓬的水盐生态阈值进行了研究，得出了翅碱蓬生长最适土壤含盐量为12.71 g/kg(崔保山等, 2008)、12.14 g/kg (王摆等, 2014)，生态阈值区间为(5.17~20.25)g/kg (崔保山等, 2008)、(5.02~19.26)g/kg (王摆等, 2014)，最适生态阈值区间为(8.94~16.48)g/kg(崔保山等, 2008)、(8.58~15.70)g/kg(王摆等, 2014)。翅碱蓬作为先锋作物，具有较好的耐环境胁迫能力，相关研究也较多，如耐高盐(张立宾等, 2007；夏宁等, 2020)、耐高碱(郜少敏等, 2019)等。张立宾等(2007)的研究显示，盐地碱蓬的耐盐能力在25.0 g/kg左右，耐盐极限为35.0 g/kg左右。虽然翅碱蓬具有良好的耐盐碱能力，但是土壤含盐量达到11 g/kg时，翅碱蓬叶片叶绿素和类胡萝卜素合成受到明显抑制，翅碱蓬叶片变红，生存状况良好；达到15 g/kg时翅碱蓬株高生长明显受到抑制；达到19.5 g/kg时翅碱蓬出现死亡现象(夏宁等, 2020)。2018年4–5月，在辽河口盘锦红海滩翅碱蓬盐沼湿地观测到最高土壤含盐量23.76 g/kg的区域是翅碱蓬出现大面积死亡的区域，该区域出现高值的还包括氯离子470.00 mmol/kg(16.66 g/kg)和镁离子18.75 mmol/kg (赵雨朦等, 2019)。尽管土壤含盐量19.5 g/kg接近翅碱蓬耐盐生态阈值的上限，但土壤含盐量可能仅仅是导致翅碱蓬出现死亡现象的原因之一，高碱亦可对翅碱蓬产生较大影响。翅碱蓬种子和幼苗暴露于100 mmol/L摩尔比9:1的$NaHCO_3$和Na_2CO_3混合碱液中14 d即可导致翅碱蓬种子活力、胚胎发育受到明显影响(郜少敏等, 2019)。

土壤氮、磷、钾含量是进行土壤肥力水平高低评价的重要指标，常用来研究土壤肥力特性及其空间变异特征(庞夙等, 2009)。土壤中的氮、磷含量及形态会受到碱蓬(牟晓杰等, 2013)(养分–植物互作)以及潮汐状况(牟晓杰等, 2012)影响。氮、磷广泛参与植物的生命活动过程，而且氮还通过多种途径参与植物耐盐，如通过调节抗氧化防御系统和渗透调节物质含量(Sikder et al, 2020)、限制脂质体中的Na^+(Gao et al, 2016)、增加叶片光合色素含量、提高光合效率(尹海龙等, 2013)等增强耐盐性。K^+通过参与渗透调节、活化酶的作用多方面参与植物代谢过程，促进NH_4^+的同化、促进植物根吸收和运输NO_3^-(中国农业百科全书总编辑委员会农业化学卷编辑委员会，1996)对植物结构、组成、代谢、生长发育及抗逆性产生影响。与陆地土壤相比，滨海潮滩翅碱蓬盐沼湿地全碳含量低于我国(0~10)cm土层陆地土壤全碳含量(24.56±1.85)g/kg (Tian et al, 2010)，全氮含量接近黄淮海平原区的旱地(0.63±0.29 g/kg)和水田(0.93±0.29)g/kg(中国农业百科全书总编辑委员会农业化学卷编辑委员会，1996)，但低于(0~10)cm土层土壤全氮含量(1.88±0.12) g/kg (Tian et al, 2010)；速效钾含量低于黄河冲积物粘土(2.10 mg/kg)，接近壤土(1.33 mg/kg)和砂土(0.67 mg/kg)。除盘锦、庄河样地土壤TC:TN低于我国湿地土壤平均C:N比外，其他3地土壤TC:TN均高于我国湿地土壤平均值，且总体高于黄河三角洲新兴湿地土壤C:N(4.62~12.67)(张友等, 2016)，位于双台河口湿地土壤C:N变化范围8.26~52.97内(Zhang et al, 2013)。

3.2　翅碱蓬生长影响土壤理化特征

翅碱蓬盐沼湿地土壤全氮、亚硝酸盐、速效磷、速效钾含量在(0~10)、(10~20)、(20~30)cm土层间有极显著相关性，且(0~20)cm土层土壤氮磷钾含量变化比(20~30)cm土层更为明显，并具有较高的TC:TN。可见滨海潮滩盐沼湿地土壤N、P、K养分含量虽然受土壤母质和潮流水质影响，但是更易受翅碱蓬影响。

有机质主要来源于外源输入，并受潮汐作用影响。土壤中的养分流动性受动植物残体的分解与归还作用(刘文龙等, 2014)、施肥和植物吸收的影响，土壤C、N、P、K含量相关性反映其受植物影响情况，土壤C:N:P:K生态化学计量关系反映生态系统养分利用与循环。

一般认为，0~10cm土层是最活跃的生物-环境互作层（Tian et al, 2010），土壤环境要素更易受到植物生命活动的影响。即上层土壤中各元素含量会更多地受到翅碱蓬等植物根系吸收、海洋潮汐变化及生物地球化学过程等的影响，而下层土壤养分因子主要受成土母质基础、土壤性质等影响(牟晓杰等, 2012)。土壤养分水平及其分布规律与植物区系及生物量、植物吸收与归还能力、土壤盐分、营养元素化学性质及潮汐等密切相关。研究显示，翅碱蓬不同生长期土壤铵氮、硝酸盐氮含量垂直变化不同(牟晓杰等, 2012)。本研究中土壤铵氮含量随土层深度的变化，与生长旺期的黄河口翅碱蓬盐沼湿地土壤的研究结果(牟晓杰等, 2012)一致。盘锦、东营的铵氮垂直分布是一直降低的，与生长末期的黄河口翅碱蓬盐沼湿地土壤的研究结果(牟晓杰等, 2012)一致。

研究显示，沉积物C:N可用于判别湖泊沉积物中有机质的来源(钱君龙等, 1997)，C:N<10，说明沉积物中有机质主要来源于内源有机质，C:N>10，则说明以外源输入为主(张智博等, 2020)。同时，C:N还可作为预测有机质分解速率的很好指标(王维奇等, 2010)。若C:N<25，说明有机质腐殖化和矿化程度高，有效氮含量增加，氮含量不会限制有机质的分解；若C:N>25，说明沉积物中的氮会限制微生物分解有机质的速率(Paul & Clark, 1989；曹磊等, 2015)。本项研究中，5样地土壤TC:TN均大于10，因此，其有机质主要来源于外源输入。天津、东营与连云港样地土壤TC:TN>25，这3个区域土壤中的氮可能会限制有机质的分解速率。相对较高的C:N，较低的C:P和N:P则显示湿地生物地球化学过程可能更多地受氮、磷营养元素的限制(曹磊等, 2015)。滨海湿地土壤C:N:P生态化学计量学因受多种因素综合影响，具有高度异质性(王维奇等, 2010)。不仅受到有机质来源(张智博等, 2020)、微生物(Paul & Clark, 1989)的影响，在河口潮滩湿地还受潮汐作用影响。其中潮汐过程通过各种物理、生物和化学作用影响着湿地土壤的碳、氮、磷元素的循环过程及其相应的生态化学计量学特征(Taylor &Townsend, 2010)。

翅碱蓬不仅通过根吸收叶分泌带走土壤中的盐分，还可改善土壤结构、加速土壤水分入渗、促进土壤盐分淋洗(杨策等, 2019)，增加土壤有机质、氮、磷、钾含量(张立宾等, 2007)等发挥土壤脱盐和积累养分的改良作用。土壤pH以及氯离子、全碳含量受翅碱蓬影响较大，不同土层间有显著性差异，但是并没有发现随深度增加而产生规律性变化。曾在辽河口红海滩区域观测到土壤氯离子含量表层>中层>底层(赵雨朦等, 2019)，本研究也观测到相同的结果，含盐量和氯离子含量均随深度增加而降低。可能在历史沉积过程中所受辽河径流量和不同盐度的海水下渗影响所致。但是，杨楚烨等(2019)在辽河口湿地翅碱蓬生长区和翅碱蓬-芦苇交错生长区观测到了相反的结果，土壤pH随深度增加而增大。一般地，pH、全碳含量及亚硝酸盐氮含量受包括翅碱蓬在内的各种生物生命活动影响，上层土壤会沉积较多的有机碳，微生物利用这些有机碳会消耗氧气并产生二氧化碳，生物量增大。缺氧的土壤中硝酸盐氮会作为氧化剂而被还原为亚硝酸盐氮。

研究土壤中元素相关性可以了解构成盐分的离子在土壤盐分中的贡献和元素生物地球化学行为。5个样地土壤含盐量与氯离子均具有显著正相关关系。可见，土壤盐分含量的主要影响因素是海水。在辽河口盐沼湿地，无论是翅碱蓬生长区还是翅碱蓬-芦苇交错生长区，Na^+和K^+是主导阳离子、Cl^-和SO_4^{2-}是主导阴离子，且总盐分和其他各盐离子均为极显著正相关(杨楚烨等, 2019)。但在本项研究中，发现盘锦样地土壤碳酸盐碱度，亚硝酸盐氮、速效磷和速效钾含量与含盐量和氯离子含量间有显著的负相关关系。可能翅碱蓬在该区域呈现脱盐和积累养分作用较为明显。除连云港外，其他样地土壤无机氮分别与铵氮、硝酸盐氮含量具有显著的正相关关系，说明土壤无机氮主要由铵氮和硝酸盐氮贡献。盘锦与天津两地土壤速效钾与速效磷含量具有显著正相关关系，可能是由于土壤的成土作用，枯枝落叶分解释放了速效氮、磷、钾(次瑞敏等, 2020)。

参考文献

曹磊, 宋金明, 李学刚, 等, 2015. 黄河三角洲典型潮汐湿地碳、氮、磷生物地球化学特征[J]. 海洋科学, 39: 84-92.

次瑞敏, 王莉, 可宇娜, 2020. 修复后临汾湿地公园土壤养分状况及沉积物污染特征[J]. 水土保持学报, 34(1): 371-379,384.

崔保山, 贺强, 赵欣胜, 2008. 水盐环境梯度下翅碱蓬(*Suaeda salsa*)的生态阈值[J]. 生态学报, 28(4): 1408-1418.

郜少敏, 耿玉清, 丛日春, 等, 2019. 碱胁迫对碱蓬种子萌发及

幼苗生长的影响[J]. 中国水土保持科学, 17(6): 126-131.
刘文龙, 谢文霞, 赵全升, 等, 2014. 胶州湾芦苇潮滩土壤碳、氮和磷分布及生态化学计量学特征[J]. 湿地科学, 12(3): 362-368.
牟晓杰, 孙志高, 刘兴土, 2012. 黄河口不同生境下翅碱蓬湿地土壤碳、氮储量与垂直分布特征[J]. 土壤通报, 43(5): 1444-1449.
牟晓杰, 孙志高, 刘兴土, 2013. 黄河口翅碱蓬湿地土壤氮的季节变化[J]. 干旱区资源与环境, 27(1): 114-119.
庞夙, 李廷轩, 王永东, 等, 2009. 土壤速效氮、磷、钾含量空间变异特征及其影响因子[J]. 植物营养与肥料学报, 15(1): 114-120.
钱君龙, 王苏民, 薛滨, 等, 1997. 湖泊沉积研究中一种定量估算陆源有机碳的方法[J]. 科学通报, 42(15): 1655-1658.
王摆, 韩家波, 周遵春, 等, 2014. 大凌河口湿地水盐梯度下翅碱蓬的生态阈值[J]. 生态学杂志, 33(1): 71-75.
王维奇, 仝川, 曾从盛, 2010. 不同质地湿地土壤碳、氮、磷计量学及厌氧碳分解特征[J]. 中国环境科学: 30(10): 1369-1374.
夏宁, 孟茹, 魏海峰, 等, 2020. 土壤盐分对翅碱蓬生长的影响[J]. 环境生态学, 2(1): 52-56.
杨策, 陈环宇, 李劲松, 等, 2019. 盐地碱蓬生长对滨海重盐碱地的改土效应[J]. 中国生态农业学报(中英文), 27(10): 1578-1586.
杨楚烨, 王立, 苏芳莉, 等, 2019. 辽河口湿地翅碱蓬群落及其交错区土壤盐分特征[J]. 中国水土保持科学, 17(1): 117-123.
尹海龙, 田长彦, 陈春秀, 等, 2013. 不同盐度施氮水平下盐地碱蓬幼苗生长及光合色素含量分析[J]. 干旱区研究, 30(5): 887-893.
张立宾, 徐化凌, 赵庚星, 2007. 碱蓬的耐盐能力及其对滨海盐渍土的改良效果[J]. 土壤, 39(2): 310-313.
张友, 徐刚, 高丽, 等, 2016. 黄河三角洲新生湿地土壤碳氮磷分布及其生态化学计量学意义[J]. 地球与环境, 44(6): 647-653.
张智博, 刘涛, 曹起孟, 等, 2020. 东平湖沉积物-菹草系统碳、氮、磷空间分布及化学计量特征[J]. 环境化学, 39(8): 2263-2271.
赵雨朦, 魏海峰, 张明亮, 等, 2019. 盘锦红海滩湿地沉积物常量元素化学成分调查[J]. 中国野生植物资源, 38(5): 25-30.
中国农业百科全书总编辑委员会农业化学卷编辑委员会, 1996. 中国农业百科全书: 农业化学卷[M]. 北京: 农业出版社.
Di Palo F D, Fornara D A, 2017. Plant and soil nutrient stoichiometry along primary ecological successions: is there any link[J]. PLoS One, 12(8): e0182569.
Ehrenfeld J G, 2013. Plant-soil interactions[M]//Levin S A.Encyclopedia of Biodiversity: Volume 6, 2nd . Amsterdam: Academic Press:109-128.
Elser J J, Dobberfuhl D R, MacKay N A, et al, 1996. Organism size, life history, and N:P stoichiometry. toward a unified view of cellular and ecosystem processes[J]. BioScience, 46: 674-684.
Forrester D I, Bauhus J, Cowie A L, 2005. On the success and failure of mixed-species tree plantations: lessons learned from a model system of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*[J]. Forest Ecology and Management, 209(1-2): 147-155.
Gao L, Liu M, Wang M, et al, 2016. Enhanced salt tolerance under nitrate nutrition is associated with apoplast Na^+ Content in Canola (*Brassica napus* L) and Rice (*Oryza sativa* L) Plants[J]. Plant and Cell Physiology, 57(11): 2323-2333.
Paul E A, Clark F E, 1989. Transformation of nitrogen between the organic and inorganic phase and to nitrate[M]//Paul E A, Clark F E, Soil Microbiology and Biochemistry. San Diego: Academic Press, Inc:131-146.
Qaswar M, Ahmed W, Huang J, et al, 2019. Soil carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) stoichiometry drives phosphorus lability in paddy soil under long-term fertilization: A fractionation and path analysis study[J]. PLoS One, 14(6): e0218195.
Sikder R K, Wang X, Zhang H, et al, 2020. Nitrogen enhances salt tolerance by modulating the antioxidant defense system and osmoregulation substance content in *Gossypium hirsutum*[J]. Plants, 9(4): 450.
Taylor P G, Townsend A R, 2010. Stoichiometric control of organic carbon-nitrate relationships from soils to the sea[J]. Nature, 464(7292): 1178-1181.
Tian H, Chen G, Zhang C, et al, 2010. Pattern and variation of C:N:P ratios in China′s soils: a synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 98: 139-151.
Venterink H O, Pieterse N M, Belgers J D M, et al, 2002. N, P, and K budgets along nutrient availability and productivity gradients in wetlands[J]. Ecological Applications, 12(4): 1010-1026.
Williams A, Börjesson G, Hedlund K, 2013. The effects of 55 years of different inorganic fertiliser regimes on soil properties and microbial community composition[J]. Soil Biology and Biochemistry, 67: 41-46.
Zhang Z-S, Song X-L, Lu X-G, et al, 2013. Ecological stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in estuarine wetland soils: influences of vegetation coverage, plant communities, geomorphology, and seawalls[J]. Journal of Soils and Sediments, 13: 1043-1051.
Zhao K F, 1991. Desalinization of saline soils by Suaeda salsa[J]. Plant and Soil, 135: 303-305.

（责任编辑　张俊友）

Appropriate Soil Physicochemistry for Growing *Suaeda salsa* in Salt Marsh Wetlands

TANG Min[1], TAO Wei[1], LIU Chang-fa[1,2], LIU Yuan[1,2], LI Qin-rui[1], PI Sai[1], LI Xia[1]

(1. College of Ocean Technology and Environment, Dalian Ocean University, Dalian 116023, P.R.China;
2. Key Laboratory of Offshore Marine Environmental Research of Liaoning Higher Education,
Dalian Ocean University, Dalian 116023, P.R.China)

Abstract: *Suaeda salsa*, a salt tolerant annual plant, is a pioneer plant growing in the intertidal mudflats of estuaries that provides important ecosystem services. In this study, we investigated the physicochemical characteristics of different soil layers and the C:N:P:K ratios in soils from five *S. salsa* growing regions located at different latitudes. Our objective was to identify the conditions needed for *S. salsa* growth to support ecological restoration of intertidal wetlands. During August and September of 2013, soil samples of different layers (0−10, 10−20 and 20−30 cm) were collected from the intertidal mudflats of Panjin, Zhuanghe, Tianjin, Dongying, and Lianyungang for the determination of physicochemical parameters. Results show that the suitable environmental conditions for *S. salsa* growth included the following soil parameter ranges: salinity (2.5−19.0 g/kg), chloride (1.16−11.27 g/kg), pH (7.05−8.96), alkalinity (3.56−8.78 mmol/kg), total carbon (7.70−21.73 mg/kg), total nitrogen (0.36−0.87 mg/kg), available nitrogen (1.95−16.10 mg/kg), available phosphorus (5.26−39.98 mg/kg), available potassium (0.53−1.77 mg/kg), ammonia nitrogen (1.60−8.72 mg/kg), nitrite nitrogen (0.01−0.11 mg/kg) and nitrate nitrogen (1.00−2.54 mg/kg). Average soil nutrient ratios were as follows: N:P (0.80±0.25), N:K (17.77±6.08), P:K (26.90±4.67), and TC:TN, (26.50±4.67). *S. salsa* can be used for phytoremediation of bare intertidal flats of coastal salt marsh wetlands, and the appropriate date for planting *S. salsa* at different latitudes is determined by the accumulated temperature of the soil at a given latitude.

Key words: physicochemical properties; ecological stoichiometry; coastal; salt marsh; *Suaeda salsa*