

防潮堤坝对山东昌邑滨海湿地植物及土壤性质的影响分析

陈 琤^{1,2,3}, 刘玉虹^{1,2}, 陆 滢^{1,2,4}, 王光美¹, 张 华¹

(1. 中国科学院 烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 2. 河海大学 环境学院, 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 吉林建筑大学 市政与环境工程学院, 吉林 长春 130118)

摘要: 为研究防潮堤坝对滨海湿地植物及土壤性质的影响, 本研究在昌邑国家级海洋生态特别保护区内, 通过样线法进行野外调查采样, 进行防潮堤坝内外土壤、植被以及两者之间联系的分析, 研究了堤坝内外植被及土壤性质差异。结果表明: 堤坝内外土壤、植被有一定的差异; 堤坝外部土壤 C、N、P 含量小于堤坝内部, 堤坝外部土壤盐度大于堤坝内部; 堤坝外部是以盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)和獐毛(*Aeluropus sinensis*)为主滨海湿地景观, 堤坝内部则是以柽柳(*Tamarix chinensis*)为主的灌草丛景观; 保护区内物种丰富度与土壤盐度值呈负相关关系, 随着盐度的升高, 堤坝外部物种丰富度低于堤坝内部; 芦苇(*Phragmites australis*)体内 TC、TN、TP 及 C:N:P 与土壤 C、N、P 含量及 C:N:P 没有明显相关性, 而柽柳体内 N 含量与土壤 P 含量呈明显负相关关系, 说明木本植物比草本植物更加依赖土壤中营养元素的供给。

关键词: 防潮堤坝; 滨海湿地; 昌邑国家级海洋生态特别保护区

中图分类号: P76 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2017)05-0050-09

DOI: 10.11759/hyxx20160929002

滨海湿地是陆地-海洋-大气相互作用最活跃的地带, 被喻为“海洋之肾”, 具有涵养水源、净化环境、调节气候、维持生物多样性、拦截陆源物质、护岸减灾、防风等生态功能, 并且能够通过生物地球化学过程促进大气及 C、H、S 等关键元素的循环, 提高环境质量^[1-2]。国内外学者对滨海湿地景观格局、沉积环境变化和碳的沉积、碳氮磷生物地球化学特征和人类活动的影响等进行了大量研究^[3-8]。

防潮堤坝是指修建于沿海滩涂、入海口等地, 用以抵御暴雨, 防止海水入侵的堤坝^[9]。对于经常发生风暴潮的沿海地区, 修建、加固防潮堤坝对防潮、防浪及防沙、汛期行洪排涝、控制海域污染、生态环境恢复等有重要的意义^[10]。据统计, 潍坊市已建成防潮堤坝总长 110 km 左右, 对潍坊市海洋生态恢复和控制海洋污染作出重要贡献^[11]。但防潮堤坝对滨海湿地生态环境的影响研究尚少。

昌邑国家级海洋生态特别保护区位于潮间带, 拥有多种滨海湿地生态系统, 包括柽柳林、滩涂湿地、浅海等^[12]。国内学者对该保护区的研究主要关注保护区内水盐运移^[13]、植物物种多样性^[14]、大型底栖动物时空分布特征^[15]、柽柳(*Tamarix chinensis*)分布与土壤性质的关系以及柽柳叶片生态化学计量

学特征^[16-18]。例如, 汤爱坤等^[12]曾对昌邑国家级海洋生态特别保护区土壤养分的空间异质性与植物群落的分布特征进行过研究。但前者对该保护区的研究主要集中在自然环境方面, 并未涉及保护区内已建成的防潮堤坝对该区域滨海湿地的影响。傅新等^[19]曾对人工堤坝影响下黄河三角洲海岸带湿地的生态特征进行分析, 结果表明人工堤坝的阻隔作用影响着土壤养分的梯度变化及植被演替方向。但是, 针对昌邑海洋生态特别保护区土壤养分和植被群落的研究较少, 且保护区内防潮堤坝修建对土壤养分和植物群落演替的影响鲜有研究。

作者以昌邑国家级海洋生态特别保护区内的防

收稿日期: 2016-09-29; 修回日期: 2017-03-04

基金项目: 中国科学院重点部署项目(Y324021021); 国家自然科学基金资助项目(31370474); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD); 中央高校基本科研业务费专项资金(2016B12014)

[Foundation: Key Project of Chinese Academy of Sciences, No. Y324021021; National Natural Science Foundation of China(General Program), No.31370474; A Project Funded by the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions, No. PAPD; The Fundamental Research Funds for the Central Universities, No.2016B12014]

作者简介: 陈琤(1993-), 女, 安徽马鞍山人, 硕士研究生, 主要从事滨海湿地水文模型研究, 电话: 18363827098, E-mail: chen@yic.ac.cn; 刘玉虹, 通信作者, E-mail: yhlou@hhu.edu.cn

潮堤坝为界,以堤坝外部自然滨海湿地和堤坝内部自然柽柳林为研究对象,通过分析土壤 pH、盐度、C、N、P 含量和 C:N:P 生态化学计量学和植物体内 TC、TN、TP 和 C:N:P 之间的相互关系,以及群落物种丰富度与土壤性质之间的相互联系,揭示防潮堤坝对土壤养分元素、盐度、pH 的改变和滨海湿地植被演替内部作用机制的影响,为滨海湿地保护和生态重建提供理论依据。

1 研究区域概况

山东昌邑国家级海洋生态特别保护区(图 1)(119°20'19"~119°23'49"E, 37°03'07"~37°07'12"N)于 2007 年 10 月底获得国家海洋局批准建立,是中国唯一以柽柳为主的国家级海洋生态特别保护区,总面积 29.3 km²^[16]。保护区位于山东省潍坊市昌邑市北部堤河以东、海岸线以下的滩涂区域,属于渤海莱州湾南岸^[15]。莱州湾属正规半日潮,并受风暴潮影响^[12]。地质构造属于华北地台渤海凹陷的一部分,地层是第四纪堆积层,堆积平原海岸是主要地貌形态,土壤母质为近代黄河冲积物,整个地势自南向北从高到低,海拔 6 m 以下,地下水位高,潜水矿化度高^[16]。气候类型是温带半湿润季风性大陆气候,年降水量为 580~660 mm,年均蒸发量为 1 764~1 859 mm,平均气温 12.9℃左右,极端最高气温 39.2℃,极端最低气温 -19℃,无霜期 195~225 d^[16-17]。

保护区内生态类型主要由柽柳灌草丛、滩涂湿地、浅海构成,土壤种类以潮土和盐土为主,植被类型以灌木和草本为主,优势灌木树种为柽柳,优势草本植物有盐地碱蓬、二色补血草(*Limonium bicolor*)等。保护区内建有防潮堤坝,堤坝以北(简称堤坝内部)是柽柳林,堤坝以南(简称堤坝外部)是大片的滩涂湿地、浅海。

2 研究方法

2.1 采样方法

2014 年 8 月在山东昌邑国家级海洋生态特别保护区内堤坝内外分别设置采样带,共设置 5 条采样带和 48 个采样点。防潮堤坝外,设置了 3 条采样带(A、B、C),其中样带 A 平行海岸线,样带 B、C 垂直于海岸线;防潮堤坝内,设置了 2 条采样带(D、E),均垂直于防潮堤坝(图 1)。每条样带中采样点之间的距离为 50 m,每个样点设置 3 m×3 m 的样方采集植物和土壤样品。在采样过程中,为了保证样带连续,

不影响样带空间的关联性及造成空间的差异,始终以大堤为采样起始点。

采用样方调查法,记录样方内物种种类、数量、高度和盖度等数据,采集每个样方内植物的地上部分,并把茎和叶分别装入信封内保存。若样方内某种植物数量较少或生长状态较差,为保护当地植被生态不受破坏,则不采集该种植物。在每个样方中选取 5 个点(分别为样方 4 个角和样方中心位置),使用土壤采样器收集 0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm 深的土壤样品,放入密封袋封装保存。

2.2 实验分析

植物样品在采集后 24 h 内放置电热鼓风干燥箱中 105℃杀青 30 min,然后 70℃烘干至恒质量。烘干植物样品通过粉碎机粉碎并封存。剔除石块与植物根、茎等杂物土壤样品自然风干后过 100 目筛并通过密封袋保存。通过元素分析仪(Various MACRO cube)测定植物和土壤样品总碳和总氮。通过硫酸消煮法处理后植物样品及浓硫酸-高氯酸消煮法处理后土壤样品分别进入连续流动分析仪(Auto Analyzer III)测定总磷。称取 10.0 g 土壤样品,加入 25 mL 蒸馏水,配成溶液,经过低速离心机(3 500 r/min)处理后,静置 1 h,上清液通过手持 pH 计(SoilStik)测定 pH 和盐度。

2.3 数据分析

通过箱形图和独立样本 *T* 检验,分析防潮堤内外土壤 pH、盐度、C、N、P 含量的差异性;通过 Pearson 相关性检验,分析了物种丰富度与土壤性质之间的关系^[20-21]及植物体内营养含量特征(TC、TN、TP 及 C:N:P)与土壤性状之间的关系;通过配对 *T* 检验,比较堤坝内外植物体内 TN、TP、N:P 差异性;物种丰富度是指一个群落或生境中物种数目多少,在本研究中,物种丰富度表示为单位样方内植物物种种类数量。所有统计分析及数据绘图均通过统计软件(Excel 2003、Origin Pro 8、SPSS 23.0)完成。

3 结果

3.1 防潮堤坝内外土壤养分空间差异

通过独立样本 *T* 检验,防潮堤内外土壤除 pH ($t=-0.566$, $df=61.532$, $P=0.573$)以外,盐度($t=11.211$, $df=26.382$, $P=0.00$)、C($t=-3.052$, $df=64$, $P=0.001$)、N($t=-3.745$, $df=64$, $P=0.00$)、P($t=-4.099$, $df=37.981$, $P=0.00$)均有显著差异。

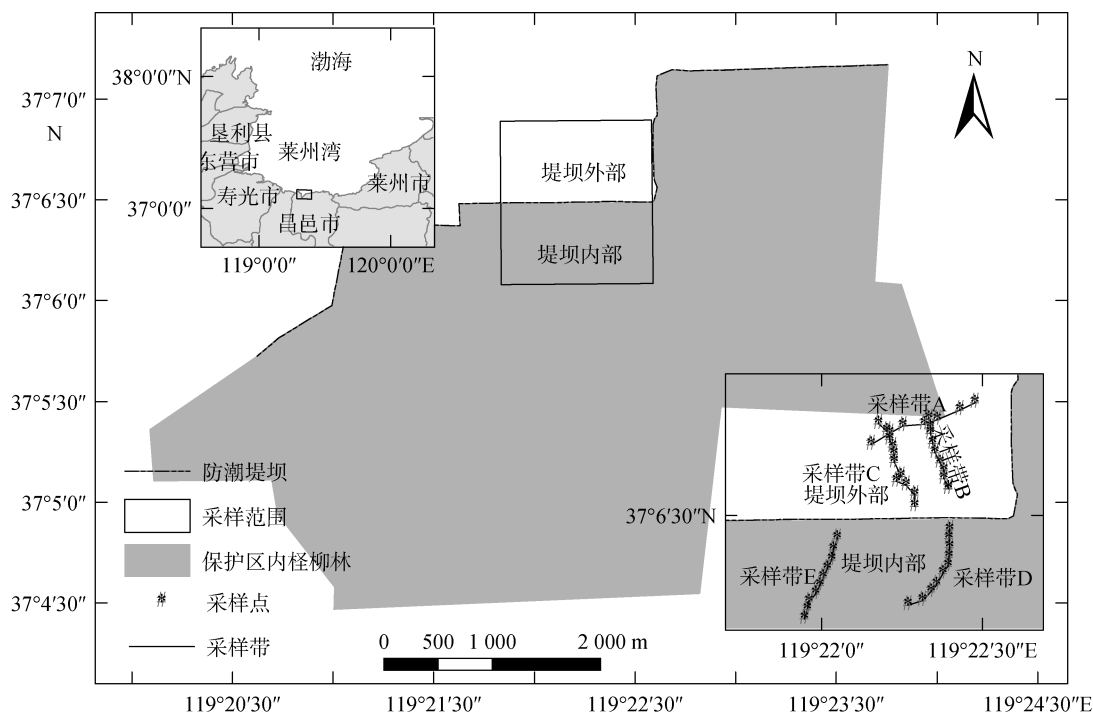


图1 山东昌邑国家级生态特别保护区内研究区域和采样点位

Fig. 1 Study area and locations of sampling points in Changyi National Marine Ecological Special Reserve of Shandong

防潮堤坝内外土壤 pH 差异不明显, 堤坝内土壤 pH 的离散程度大于堤坝外部, 说明堤坝内部土壤的 pH 空间上分布差异较大。堤坝外部土壤盐度及离散程度显著高于堤坝内部, 说明堤坝外盐度空间分布的差异大。堤坝内部土壤 C、N、P 含量均高于堤坝外部, 说明堤坝外部的土壤营养成分流失较大, 这可能与堤坝外潮汐作用的冲刷密切相关(图 2)。因此,

防潮堤坝造成了堤坝内外土壤盐度、C、N 和 P 含量的差异, 而堤坝内外土壤 pH 没有受到较大影响。

3.2 防潮堤坝内外植物物种分布比较

堤坝外部盐地碱蓬出现频数最多为 22 次, 其次是獐毛(*Aeluropus sinensis*)12 次, 柽柳出现 9 次, 二色补血草出现 7 次, 碱蓬和芦苇(*Phragmites australis*)

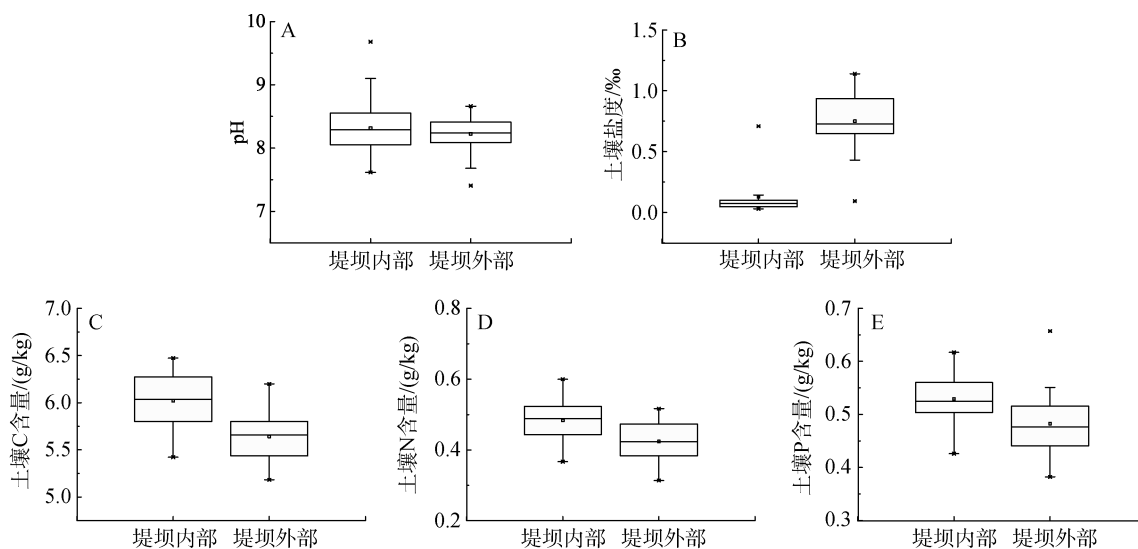


图2 堤坝内外土壤 pH、盐度、C、N、P 含量的箱形图

Fig. 2 Box plots of soil pH and salinity and C, N, and P content inside and outside the dyke

出现 6 次, 说明盐地碱蓬、獐毛和怪柳是堤坝外滩涂湿地优势种, 以草本、灌木为主要景观特征; 堤坝内部出现频数最多的物种是茵陈蒿(*Artemisia capillaries*) 18 次, 其余依次是怪柳、芦苇 9 次, 狗尾草(*Setaria viridis*)6 次, 鹅绒藤(*Cynanchum chinense*)、长裂苦苣菜(*Sonchus brachyotus*)5 次, 灰绿藜(*Chenopodium glaucum*) 4 次, 猪毛菜(*Salsola collina*)3 次, 二色补

血草、苦苣菜(*Ixeris polycephala*)2 次, 藜(*Chenopodium album*)和盐地碱蓬 1 次, 说明茵陈蒿、怪柳、芦苇在堤坝内属于优势物种。物种茵陈蒿、鹅绒藤、猪毛菜、长裂苦苣菜、灰绿藜、藜、苦苣菜、狗尾草只出现在堤坝内, 而碱蓬、獐毛只出现在堤坝外。优势种盐地碱蓬主要分布在堤坝外, 怪柳在堤坝内外均有分布(表 1)。

表 1 堤坝内外不同植物出现频数

Tab. 1 The frequency of occurrence of plants in and outside the dyke

植物名	属名	科名	植物出现频数(次)	
			堤外	堤内
碱蓬(<i>Suaeda glauca</i>)	碱蓬属(<i>Suaeda</i>)	藜科(<i>Chenopodiaceae</i>)	6	0
盐地碱蓬(<i>Suaeda salsa</i>)	碱蓬属	藜科	22	1
二色补血草(<i>Limonium bicolor</i>)	补血草属(<i>Limonium</i>)	白花丹科(<i>Plumbaginaceae</i>)	7	2
獐毛(<i>Aeluropus sinensis</i>)	獐毛属(<i>Aeluropus</i>)	禾本科(<i>Gramineae</i>)	12	0
怪柳(<i>Tamarix chinensis</i>)	怪柳属(<i>Tamarix</i>)	怪柳科(<i>Tamaricaceae</i>)	9	9
芦苇(<i>Phragmites australis</i>)	芦苇属(<i>Phragmites</i>)	禾本科	6	9
茵陈蒿(<i>Artemisia capillaris</i>)	蒿属(<i>Artemisia</i>)	菊科(<i>Compositae</i>)	0	18
猪毛菜(<i>Salsola collina</i>)	猪毛菜属(<i>Salsola</i>)	藜科(<i>Chenopodiaceae</i>)	0	3
鹅绒藤(<i>Cynanchum chinense</i>)	鹅绒藤属(<i>Cynanchum</i>)	萝藦科(<i>Asclepiadaceae</i>)	0	5
长裂苦苣菜(<i>Sonchus brachyotus</i>)	苦苣菜属(<i>Sonchus</i>)	菊科	0	5
灰绿藜(<i>Chenopodium glaucum</i>)	藜属(<i>Chenopodium</i>)	藜科	0	4
藜(<i>Chenopodium album</i>)	藜属	藜科	0	1
苦苣菜(<i>Ixeris polycephala</i>)	苦苣菜属(<i>Ixeris</i>)	菊科	0	2
狗尾草(<i>Setaria viridis</i>)	狗尾草属(<i>Setaria</i>)	禾本科	0	6

3.3 土壤因子对物种丰富度的影响分析

植物丰富度分别与土壤 pH ($r=0.371$, $P<0.05$)、土壤 C 含量($r=0.5000$, $P<0.01$)呈正相关关系, 和土壤盐度呈负相关关系($r=-0.657$, $P<0.01$), 而与土壤 N、P 含量无显著相关。因此, 植物丰富度主要受土壤 pH、C 含量和盐度的影响, 受土壤 N 和 P 含量的影响较小。土壤盐度分别与土壤 C、N、P 含量在 0.01 显著水平上呈现负相关关系, 相关系数分别为 -0.630 、 -0.487 、 -0.428 。土壤 C 含量与土壤 N 含量呈现正相关关系($r=0.444$, $P<0.01$)(表 2)。土壤 pH 对土壤养分含量无显著影响。

3.4 防潮堤坝内外典型植物物种 TN、TP 比较和土壤养分的关系

分别对堤坝内外典型植物芦苇和怪柳 TN、TP 和 N:P 数据进行配对 T 检验(表 3)。结果显示在堤坝内外同种植物 TN、TP 差异不明显($P>0.01$), 说明堤坝内外相同植物养分含量水平相似。

表 4 说明芦苇与土壤之间 C、N、P 含量及化学计量特征相关性不显著。表 5 说明怪柳植物 TC、TP 含量与土壤 C、N、P 含量相关性不显著; 怪柳植物 TN 含量与土壤 P 含量呈负相关关系($p<0.01$), 与土壤 C:P 含量存在正相关关系($P<0.05$); 怪柳植物 C:N 与土壤 P 含量呈现正相关关系($r=0.611$, $P<0.01$)与土壤 C:P 比呈现负相关关系($r=-0.525$, $P<0.01$), 但与土壤 C、N 含量、C:N 及 N:P 比相关性不显著; 怪柳植物 C:P 正相关于土壤 C:P($r=0.483$, $P<0.05$), 而怪柳的 N:P 与土壤 N:P 相关性不显著。

4 讨论

在昌邑海洋生态特别保护区内, 由于潮汐作用和风暴潮的影响差异, 防潮堤坝内外土壤性状和植物类型差异明显。堤坝外土壤含盐率高、养分含量偏低, 因此, 盐地碱蓬成为堤坝外的优势种, 并且其呈簇状分布, 这与郭晓丽^[22]的研究结果相似。由于不受潮汐的影响, 堤坝内土壤盐度低于堤坝外部、土壤

表 2 采样点植物丰富度与土壤性质之间的相关性分析

Tab. 2 Correlation analysis between soil properties and plant richness at sampling sites

相关系数(<i>r</i>)	物种丰富度	土壤 pH	土壤盐度(‰)	土壤 C 含量(g/kg)	土壤 N 含量(g/kg)	土壤 P 含量(g/kg)
物种丰富度	1					
土壤 pH	0.371*	1				
土壤盐度(‰)	-0.657**	-0.148	1			
土壤 C 含量(g/kg)	0.500**	0.015	-0.630**	1		
土壤 N 含量(g/kg)	0.23	0.048	-0.487**	0.444**	1	
土壤 P 含量(g/kg)	0.256	0.252	-0.428**	0.262	0.269	1

注: *. 在 0.05 级别(双尾), 相关性显著, **. 在 0.01 级别(双尾), 相关性显著(表 5 同)

表 3 昌吕海洋生态特别保护区典型植物柽柳与芦苇 TN、TP 和 N : P 及其堤坝内外显著性

Tab. 3 The values and significance of TP, TN, N : P of *Tamarix chinensis* and *Phragmites australis* in Changyi National Marine Ecological Special Reserve

植物种类	数据项	堤坝外部	堤坝内部
芦苇	N(g/kg)	19.13±11.01	16.70±6.24
	显著性(<i>p</i>)		0.318
	P(g/kg)	1.33±0.42	1.32±0.47
	显著性(<i>p</i>)		0.477
	N : P	12.87±7.30	14.28±9.77
	显著性(<i>p</i>)		0.942
柽柳	N(g/kg)	22.15±9.94	17.97±8.81
	显著性(<i>p</i>)		0.267
	P(g/kg)	1.33±0.20	1.35±0.61
	显著性(<i>p</i>)		0.489
	N : P	15.52±8.03	16.93±16.34
	显著性(<i>p</i>)		0.633

表 4 昌吕海洋生态特别保护区土壤与芦苇 TC、TN、TP 含量及其化学计量比之间的相关性分析

Tab. 4 Correlation analysis between the content and stoichiometric ratio of C, N, and P in the soil and *Phragmites australis* in Changyi National Marine Ecological Special Reserve

相关系数(<i>r</i>)	芦苇					
	C(g/kg)	N(g/kg)	P(g/kg)	C : N	C : P	N : P
C(g/kg)	0.282	-0.091	0.080	-0.017	0.032	-0.039
N(g/kg)	0.293	0.119	0.157	-0.158	-0.025	0.126
P(g/kg)	0.406	-0.280	-0.217	0.277	0.398	0.006
C : N	-0.275	-0.120	-0.050	0.121	-0.051	-0.172
C : P	-0.281	0.209	0.222	-0.254	-0.346	-0.021
N : P	0.071	0.245	0.262	-0.287	-0.230	0.112

养分流失少, 而且植物凋落物分解营养物质^[23]有利于提高土壤营养物质含量, 因此, 土壤 N、P、C 含量高于堤坝外, 形成了以柽柳为优势种景观类型, 并且柽柳作为一种泌盐植物, 可以改善土壤性质^[24], 也是大坝内土壤盐度低的原因之一。植被群落景观特征与土壤性状具有一定的相关性, 并且土壤的差异将对湿地植物种类产生影响^[25], 大量研究表明黄河三

角洲盐生植被生长与分布受土壤盐分影响较大^[26-28], 随着盐度增加, 物种丰富度不断减少。作者的研究也发现, 由于防潮堤坝的存在, 物种丰富度主要受土壤 pH、C 含量和盐度的影响, 受土壤 N 和 P 含量的影响较小, 随着盐度的增加, 堤外物种丰富度小于堤内, 而且堤坝外部植物的平均生物量(372.67 g/m²)也小于大堤内部植物的平均生物量(655.26 g/m²),

表 5 昌邑海洋生态特别保护区土壤与怪柳 TC、TN、TP 含量及化学计量比之间的相关性分析

Tab. 5 Correlation analysis between the content and stoichiometric ratio of C, N, and P in the soil and *Tamarix chinensis* in Changyi National Marine Ecological Special Reserve

相关系数(r)	怪柳					
	C(g/kg)	N(g/kg)	P(g/kg)	C : N	C : P	N : P
C(g/kg)	0.317	-0.063	0.178	0.047	0.169	0.091
N(g/kg)	0.197	-0.224	0.096	0.203	-0.068	-0.170
P(g/kg)	-0.339	-0.564**	-0.096	0.611**	-0.428	-0.452
C : N	-0.094	0.279	-0.001	-0.268	0.152	0.301
C : P	0.410	0.472*	0.154	-0.525*	0.483*	0.460
N : P	0.413	0.131	0.155	-0.183	0.222	0.106

该研究结果与王乐云等^[26]的研究一致。堤坝外部适合生长的植物主要有碱蓬、盐地碱蓬、二色补血草、獐毛、怪柳、芦苇，形成以盐地碱蓬、獐毛为优势种、怪柳稀疏分布的植被景观，而堤坝内部植物种类增加，物种丰富度提高，形成以怪柳为优势种的灌草丛植被景观。傅新等^[19]发现堤坝影响海岸带植被的盖度，并在一定程度上加速了植物群落的正向演替，依次形成裸滩涂-盐地碱蓬群落-怪柳群落-芦苇群落-怪柳群落的植物演替序列。本研究发现：堤坝外的植物群落依次是裸滩涂-盐地碱蓬群落-芦苇群落-怪柳群落；堤坝内为怪柳群落。因此，堤坝改变了堤坝内的演替序列，形成了怪柳顶级群落，而堤坝外的演替方向与傅新的研究相似。

在相似的气候环境条件下，土壤性状影响着植物的群落特征^[29]，例如土壤 pH 不仅能够反映了土壤的酸碱性，而且能够影响土壤的养分，对植物生长和种类有重要影响^[30]；土壤养分因子 C、N、P 对植物生长、发育和行为也起着重要作用，尤其 N : P 可以作为 N 的饱和指标，用来判断环境对植物生长元素供应情况和植物自身生长速率^[31]，同时可以对环境中的限制性元素起指示作用^[32-33]。对于滨海湿地生态系统，一些研究发现：当 N : P > 16 时，植物生长受到 P 元素控制；当 N : P < 14 时，植物生长受 N 元素限制；当 14 < N : P < 16 时，表示植物生长受 N、P 元素共同控制^[32]。2013 年，刘兴华^[34]对黄河三角洲滨海湿地的研究也得到了类似的结论，这主要是由于环境中所提供 P 元素含量比 N 含量元素少。在该研究中，作者探讨了优势种芦苇和怪柳的 N、P 与土壤养分的关系，发现堤坝外芦苇的平均 N : P (12.87) 小于临界阈值 14，说明堤坝外的芦苇生长主要受 N 元素限制，这与李征等^[35]的研究结果相似。这主要由于以下几种原因导致土壤中的 N 的损失：堤坝外潮水带来的外源 N 元素补给较少^[36]以及风暴

潮、降水和径流对 N 的淋洗^[37]；堤坝外滩涂处于周期性淹水状态，固氮菌无法生存；堤坝外植物群落较为简单，且海水不断淹没、冲刷使叶片等凋落物不能正常分解^[38]。在堤坝内部，由于堤坝阻拦了周期性潮汐，避免潮水带走大量营养物质及根部淹水导致固氮菌死亡，芦苇平均 N : P 值为 14.28，受到 N、P 元素的共同限制，并且堤坝内芦苇的 N : P 空间差异相差不大。堤坝外怪柳平均 N : P 值为 15.52，受到土壤 N、P 元素的共同控制，而堤坝内怪柳 N : P 值为 16.93，受到土壤中 P 元素限制，这种差异主要是堤坝外潮水能够补给滩涂 P 元素^[39]，因此，堤外怪柳 P 含量高于堤内怪柳。作者的研究还发现怪柳生长与土壤中养分关系密切，而芦苇植物体内 C、N、P 含量及 C : N : P 与土壤养分含量无明显相关性，这说明木本植物对土壤营养状态依赖程度要高于草本植物。总之，防潮大堤的建立能够改变堤坝内外植物种类、数量分布和养分需求情况，大堤外植物生长主要受土壤中 N 元素限制，而大堤内部主要受土壤中 P 元素限制。

因此，防潮堤坝阻隔了潮汐向堤坝内部输送盐分和水分，导致堤坝内土壤性质发生改变，主要包括盐度值降低、土壤 C、N、P 含量升高，加速了以盐地碱蓬、獐毛为主滨海湿地植被景观演替成以怪柳为主灌草丛景观，促进了湿生植被向中旱生植被的演化。

5 结论

防潮堤坝外部土壤 pH、C、N、P 含量均小于堤坝内部土壤，堤坝外部土壤盐度大于堤坝内部；堤坝外部是以盐地碱蓬和獐毛为主、怪柳伴生的滨海湿地景观，堤坝内部则是以怪柳为主的灌草丛景观；保护区内物种丰富度与土壤盐度值呈负相关关系，随着盐度的升高，物种丰富度降低，堤坝外部物种

丰富度低于堤坝内部。防潮堤坝的建立改变了堤坝内外土壤的养分状况,加速了堤坝内部植物群落正向演替及堤坝外部的生态脆弱性。

参考文献:

- [1] Costanza R, Pérez-Maqueo O, Martinez M L, et al. The value of coastal wetlands for hurricane protection[J]. *Ambio*, 2008, 37(4): 241-248.
- [2] 叶翔, 王爱军, 马牧, 等. 高强度人类活动对泉州湾滨海湿地环境的影响及其对策[J]. *海洋科学*, 2016, 40(1): 94-100.
Ye Xiang, Wang Aijun, Ma Mu, et al. Effects of high-intensity human activities on the environment variations of coastal wetland in the Quanzhou Bay, China[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(1): 94-100.
- [3] 肖艳芳, 张杰, 马毅, 等. 基于“资源三号”卫星的黄河口湿地景观格局及其空间尺度效应分析[J]. *海洋科学*, 2015, 39(2): 35-42.
Xiao Yanfang, Zhang Jie, Ma Yi, et al. Landscape pattern and scale effect of Yellow River Estuarine wetland based on ZY-3 satellite[J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(2): 35-42.
- [4] 刘力维, 张银龙, 汪辉, 等. 1983~2013年江苏盐城滨海湿地景观格局变化特征[J]. *海洋环境科学*, 2015, 34(1): 93-100.
Liu Liwei, Zhang Yinlong, Wang Hui, et al. Variation of landscape pattern in Jiangsu Yancheng coastal wetland 1983-2013[J]. *Marine Environmental Science*, 2015, 34(1): 93-100.
- [5] 曹磊, 宋金明, 李学刚, 等. 黄河三角洲典型潮湿地碳、氮、磷生物地球化学特征[J]. *海洋科学*, 2015, 39(1): 84-92.
Cao Lei, Song Jinming, Li Xuegang, et al. Biogeochemical characteristics of soil C, N, P in the tidal wetlands of the Yellow River Delta[J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(1): 84-92.
- [6] 魏梦杰, 叶思源, 丁喜桂, 等. 黄河三角洲滨海湿地沉积环境演化与碳的累积[J]. *海洋科学*, 2015, 39(4): 64-72.
Wei Mengjie, Ye Siyuan, Ding Xigui, et al. Carbon sequestration of different sedimentary layers in coastal wetland of the Yellow River Delta[J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(4): 64-72.
- [7] 梁文, 胡自宁, 黎广钊, 等. 50年来北海市滨海湿地景观格局变化及其驱动机制[J]. *海洋科学*, 2016, 40(2): 84-93.
Liang Wen, Hu Zining, Li Guangzhao, et al. Change and driving mechanism of landscape patterns in the coastal wetland of Beihai City in the last 50 years[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(2): 84-93.
- [8] Tian X Y, Ji Y L, Jørgensen S E, et al. Landscape change detection of the newly created wetland in Yellow River Delta[J]. *Ecological Modelling*, 2003, 164(1): 21-31.
- [9] 段晓峰, 许学工. 沿海防潮堤坝对风暴潮危害的减灾效益研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2006, 26(3): 279-283.
Duan Xiaofeng, Xu Xuegong. Research on contributions of coastal dykes to reducing losses caused by storm surges[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2006, 26(3): 279-283.
- [10] 刘玉凤, 王涛. 昌邑市潍河入海口防潮堤工程设计[J]. *山东水利*, 2011, 8: 39-40.
Liu Yufeng, Wang Tao. Design of the embankment of the Weihe River in Changyi City[J]. *Shandong Water Resources*, 2011, 8: 39-40.
- [11] 王磊. 潍坊市滨海开发区沿海防护堤的建设研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
Wang Lei. The construction of Weifang binhai coastal protection embankment[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [12] 汤爱坤, 刘汝海, 许廖奇, 等. 昌邑海洋生态特别保护区土壤养分的空间异质性与植物群落的分布[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(3): 88-93.
Tang Aikun, Liu Ruhai, Xu Liaoqi, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients and distribution of plant community in Changyi marine ecological special protection area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(3): 88-93.
- [13] 张顺, 贾永刚, 郭磊, 等. 山东昌邑海洋特别保护区土壤水盐运移现场原位自动监测研究[J]. *土壤通报*, 2014, 45(2): 376-382.
Zhang Shun, Jia Yonggang, Guo Lei, et al. An in-situ automatic monitoring technology for soil water and salt transport in the Changyi Marine ecological special protection area[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(2): 376-382.
- [14] 王学沁, 衣华鹏, 高猛, 等. 昌邑国家级海洋生态特别保护区植物物种多样性[J]. *湿地科学*, 2015, 13(3): 364-368.
Wang Xueqin, Yi Huapeng, Gao Meng, et al. Plant species diversity of Changyi Ocean ecology special protection zone[J]. *Wetland Science*, 2015, 13(3): 364-368.
- [15] 冷宇, 张守本, 刘一霆, 等. 昌邑海洋生态特别保护区潮间带大型底栖动物时空分布特征[J]. *中国环境监测*, 2014, 30(2): 164-169.
Leng Yu, Zhang Shouben, Liu Yiting, et al. Spatial distribution and seasonal variation of macrobenthos in intertidal flat of Changyi Marine ecological special protection area[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2014, 30(2): 164-169.

- [16] 夏江宝, 孔雪华, 陆兆华, 等. 滨海湿地不同密度柽柳林土壤调蓄水功能[J]. 水科学进展, 2012, 23(5): 628-634.
Xia Jiangbao, Kong Xuehua, Lu Zhaohua, et al. Capacity of soil water storage and regulation under different density forests of *Tamarix chinensis* Lour in coastal wetland[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(5): 628-634.
- [17] 荣饒饒, 刘京涛, 夏江宝, 等. 莱州湾湿地柽柳叶片 N、P 生态化学计量学特征[J]. 生态学杂志, 2012, 31(12): 3032-3037.
Rong Qiangqiang, Liu Jingtao, Xia Jiangbao. Leaf N and P stoichiometry of *Tamarix chinensis* L. in Laizhou Bay wetland, Shandong Province of East China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(12): 3032-3037.
- [18] 何秀平. 柽柳对滨海湿地土壤理化性质的影响[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2014.
He Xiuping. Effects of *Tamarix* on ecological environment of coastal wetlands[D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography, Soa, 2014.
- [19] 傅新, 刘高焕, 黄翀, 等. 人工堤坝影响下的黄河三角洲海岸带生态特征分析[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(6): 797-803.
Fu Xin, Liu Gaohuan, Huang Chong, et al. Analysis of ecological characteristics of coastal zone in Yellow River Delta under dam disturbance[J]. Journal of Geo-information Science, 2011, 13(6): 797-803.
- [20] 潘齐坤, 罗专溪, 颜昌宙, 等. 城市滨海湿地表层沉积物磷形态与相关关系分析[J]. 生态环境学报, 2010, 19(9): 2117-2122.
Pan Qikun, Luo Zhuaxi, Yan Changzhou, et al. Phosphorus fractions and theirs correlation analysis in surface sediment of urban coastal wetland[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(9): 2117-2122.
- [21] Han W, Fang J, Guo D, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China.[J]. New Phytologist, 2005, 168(2): 377-385.
- [22] 郭晓丽. 昌邑市国家沿海湿地公园生物资源调查及保护对策研究[D]. 济南: 山东农业大学, 2015.
Guo Xiaoli. Changyi national coastal wetland park research on biological resources investigation and protection countermeasures[D]. Jinan: Shandong Agricultural University, 2015.
- [23] Koull N, Chehma A. Soil characteristics and plant distribution in saline wetlands of Oued Righ, Northeastern Algeria[J]. Journal of Arid Land, 2016, 8(6): 948-959.
- [24] 丁秋祎, 白军红, 高海峰, 等. 黄河三角洲湿地不同植被群落下土壤养分含量特征[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(10): 2092-2097.
Ding Qiuyi, Bai Junhong, Gao Haifeng, et al. Soil nutrient contents in Yellow River Delta wetlands with different plant communities[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(10): 2092-2097.
- [25] 侯本栋, 马风云, 邢尚军, 等. 黄河三角洲不同演替阶段湿地群落的土壤和植被特征[J]. 浙江林学院学报, 2007, 24(3): 313-318.
Hou Bendong, Ma Fengyun, Xing Shangjun, et al. Soil and vegetation characteristics of wetland communities at different successive stages in the Huanghe River Delta[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2007, 24(3): 313-318.
- [26] 王乐云. 生物炭和湿地凋落物对黄河三角洲滨海湿地土壤有机碳矿化的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
Wang Leyun. Effects of biochar and wetland litter on mineralization of organic carbon in coastal wetlands of the Yellow River Delta[D]. Qingdao: Ocean University Of China, 2015.
- [27] 吴志芬, 赵善伦, 张学雷. 黄河三角洲盐生植被与土壤盐分的相关性研究[J]. 植物生态学报, 1994, 18(2): 184-193.
Wu Zhifen, Zhao Shanlun, Zhang Xuelei. Studies on interrelation between salt vegetation and soil salinity in the Yellow River Delta[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 1994, 18(2): 184-193.
- [28] 徐治国, 何岩, 闫百兴, 等. 植物 N/P 与土壤 pH 对湿地植物物种丰富度的影响[J]. 中国环境科学, 2006, 26(3): 346-349.
Xu Zhiguo, He Yan, Yan Baixing, et al. The influence of plant N/P, soil pH value on wetland plant species richness[J]. China Environmental Science, 2006, 26(3): 346-349.
- [29] 张小萌, 李艳红, 李磊. 艾比湖湿地梭梭与土壤因子关系的分析[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(6): 1406-1409.
Zhang Xiaomeng, Li Yanhong, Li Lei. Analysis of the relations between *Haloxylon* Bunge and soil factors in Ebinur Lake wetland[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(6): 1406-1409.
- [30] 师刚强, 赵艺, 施泽明, 等. 土壤 pH 值与土壤有效养分关系探讨[J]. 现代农业科学, 2009, 16(5): 93-94.
Shi Gangqiang, Zhao Yi, Shi Zeming, et al. Soil pH value and to explore the relationship between soil nutrient[J]. Modern Agricultural Sciences, 2009, 16(5): 93-94.
- [31] 宋红丽. 围填海活动对黄河三角洲滨海湿地生态系统类型变化和碳汇功能的影响[D]. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2015.
Song Hongli. Influence of reclamation activities on ecosystem type and carbon sink function of the coastal wetland in the Yellow River Estuary[D]. Changchun:

- Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [32] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N : P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [33] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation[J]. Journal of Applied Ecology, 2003, 40(3): 523-534.
- [34] 刘兴华. 黄河三角洲湿地植物与土壤 C、N、P 生态化学计量特征研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013.
- Liu Xinghua. C, N, P stoichiometry of plants and soil in the wetland of Yellow River Delta[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2013.
- [35] 李征, 韩琳, 刘玉虹, 等. 滨海盐地碱蓬不同生长阶段叶片 C、N、P 化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2012, 36(10): 1054-1061.
- Li Zheng, Han Lin, Liu Yuhong, et al. C, N and P stoichiometric characteristics in leaves of *Suaeda salsa* during different growth phase in coastal wetlands of China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(10): 1054-1061.
- [36] Smalt R, Mitchell F T, Howard R L, et al. Induction of NO and prostaglandin E₂ in osteoblasts by wall-shear stress but not mechanical strain[J]. American Journal of Physiology, 1997, 273(4): E751-E758.
- [37] Zheng X, Fu C, Xu X, et al. The Asian nitrogen cycle case study[J]. Ambio A Journal of the Human Environment, 2002, 31(2): 79-87.
- [38] 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 等. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 64-71.
- Liu Xingzhao, Zhou Guoyi, Zhang Deqiang, et al. N and P stoichiometry of plant and soil in lower subtropical forest successional series in Southern China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1): 64-71.
- [39] Sundby B, Gobeil C, Silverberg N, et al. The phosphorus cycle in coastal marine sediments[J]. Limnology and Oceanography, 1992, 37(6): 1129-1145.

Effects of tide dyke on plants and soil properties of coastal wetlands in Changyi, Shandong

CHEN Cheng^{1, 2, 3}, LIU Yu-hong^{1, 2}, LU Ying^{1, 2, 4}, WANG Guang-mei¹, ZHANG Hua¹

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lake of Ministry of Education, College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. China School of Municipal and Environmental Engineering, the University of Jilin Architecture, Changchun 130118, China)

Received: Sep. 29, 2016

Key words: Tide dyke; coastal wetland; Changyi National Marine Ecological Special Reserve

Abstract: A field-survey sampling was conducted in Changyi National Marine Ecological Special Reserve to study the influence of tide dyke on the plant and soil properties of coastal wetlands. The analysis of the relation between soils and vegetation and that between the two sides of the dam was performed. Results showed that the soil and vegetation status inside and outside the dyke had some differences. While the salinity was contrary, the contents of soil such as C, N, and P outside the dyke were less than that inside the dyke. Outside the dyke, *Suaeda salsa* and *Aeluropus sinensis* are the dominant species of coastal wetlands, while inside the dyke, shrub-grassland *Tamarix chinensis* is the dominant species. The richness of species was negatively correlated with soil salinity; with the increasing soil salinity, the richness of soil outside the dyke was less than that inside the dyke. There was no significant correlation of C, N, and P, and the stoichiometric ratio C : N : P between the soil and *Phragmites australis*, whereas a significant negative correlation existed between the contents of P of soil and content of N of *Tamarix chinensis*, which indicated that woody plants depended on soil nutrient more than herbaceous plants.

(本文编辑: 谭雪静)