

天津市填海造陆区自然植被演替特征及其影响因素

高越¹, 罗莉², 李洪远¹

[1.南开大学 环境科学与工程学院, 天津 300350; 2.中国矿业大学(北京) 恢复生态研究所, 北京 100083]

摘要: [目的] 探究天津市填海造陆区自然演替特征和影响因素, 为填海造陆区生态恢复与重建提供科学依据。[方法] 以天津市不同时期填海造陆区为研究对象, 采取野外调查采样、实验室测定与双向指示种分析法(TWINSPAN)、除趋势典范对应分析(detrended correspondence analysis, DCA)、典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)等分析方法, 分析天津市填海造陆区植物群落类型、演替模式和影响因素。[结果] ①天津市填海造陆区自然植被演替序列为: 盐地碱蓬群落→芦苇—盐地碱蓬群落→獐毛群落→芦苇群落→怪柳—鹅绒藤群落。随着演替的进行, 土壤含盐量逐渐降低, 植物种类逐渐增加。②土壤全盐含量、离市区二级道路的距离和离 15 m 等深线的距离在不同演替阶段间存在显著差异, 是天津市填海造陆区自然植被演替的主要影响因子。[结论] 天津市填海造陆区的植被演替受自然和人为因子的共同作用, 科学调控环境因子(如土壤全盐含量)可为填海造区植被恢复提供有利环境条件。

关键词: 填海造陆; 自然植被; 演替序列; 影响因素; 天津市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)04-0251-07

中图分类号: Q14, X171.4

文献参数: 高越, 罗莉, 李洪远. 天津市填海造陆区自然植被演替特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 251-257. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.032; Gao Yue, Luo Li, Li Hongyuan. Natural vegetation succession characteristics and influencing factors for reclamation area of Tianjin City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 251-257.

Natural Vegetation Succession Characteristics and Influencing Factors for Reclamation Area of Tianjin City

Gao Yue¹, Luo Li², Li Hongyuan¹

(1.College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China;

2.Institute of Restoration Ecology, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The natural vegetation succession characteristics and influencing factors for a reclamation area in Tianjin City were studied in order to provide a scientific basis for ecological restoration and reconstruction of the reclamation area. [Methods] The plant community types, succession patterns and influencing factors in a reclamation area of Tianjin City were analyzed by field survey and sampling, laboratory measurements and TWINSPAN, detrended correspondence analysis and canonical correspondence analysis, etc. [Results] ① The natural vegetation succession sequence in the reclamation area of Tianjin City followed the order of: Ass. *Suaeda salsa* → Ass. *Phragmites australis* + *Suaeda salsa* → Ass. *Aeluropus sinensis* → Ass. *Phragmites australis* → Ass. *Tamarix chinensis*-*Cynanchum chinense*. Soil salinity gradually decreased and the number of the plant species gradually increased as succession proceeded. ② Total soil salinity, distance from urban secondary roads, and distance from the 15 m isobath were significantly different in different succession stages, and these were the main factors influencing the primary succession of vegetation in the reclamation area of Tianjin City. [Conclusion] Vegetation succession in the reclamation area of Tianjin City was affected by both natural and human factors. Scientific regulation of environmental factors (e.g. total soil salinity)

收稿日期: 2021-12-01

修回日期: 2022-03-04

资助项目: 天津市重大科技专项与工程“天津市域生态空间格局优化与生态功能提升技术及应用”(18ZXSZSF00200); 国家自然科学基金重点项目“渤海湾海洋生态安全屏障构建研究”(19AZD005)

第一作者: 高越(1997—), 女(汉族), 河北省沧州市人, 硕士研究生, 研究方向为生态恢复与生态系统服务。Email: 2120190530@mail.nankai.edu.cn.

通讯作者: 李洪远(1963—), 男(汉族), 天津市人, 教授, 博士生导师, 主要从事生态恢复理论与技术等方面的研究。Email: rikohen@126.com.

could provide favorable environmental conditions for vegetation restoration in reclamation areas.

Keywords: reclamation area; natural vegetation; succession sequence; influencing factors; Tianjin City

围填海作为一种快速改变海洋原有格局的人类活动^[1],给沿海地区带来大量土地和经济效益的同时,其在建设过程中挖泥、吹填等环节都可能对近岸水质、岸滩稳定、生物群落等造成影响^[2]。2002—2015年,中国围海造地确权面积就累积达到949.41 km²^[3],其中2005—2008年及2013年围海造地确权面积均超过100 km²。然而,由于缺乏计划、盲目实施围填海工程,也出现了很多围而不填、填而不建的区域。据统计,中国围填海造陆区中未利用地所占比例为23.2%(个别地区比例为90%),仅次于人工湿地(41.4%),高于建设用地类型(19.7%)^[4]。这不仅造成了资源的浪费,同时围填海活动还降低了土壤有机碳含量、有机碳密度以及单位面积有机碳储量,提升了温室气体的排放通量,加剧了滨海湿地的退化^[5]。

天津市地处渤海之滨,属于淤泥质海岸,围填海工程以吹填浅海底泥为主^[6],亦存在较多未利用的填海造陆区域。随着填海造陆时间的推移,这些区域逐渐被自然植被覆盖。研究填海造陆区植被演替特征及影响因素对科学恢复海造陆区植被,改善土壤环境,增加滨海湿地生态系统的碳汇功能具有重要意义^[7-11]。然而,已有关于填海造陆区的研究主要集中

于吹填土固化、基质改良及人工植被种植等方面^[12-16],对于填海造陆区自然植被演替特征及驱动因素的研究尚不系统。本研究通过分析天津市填海造陆区自然植被演替特征,揭示填海造陆这一特殊干扰环境下自然植被演替驱动因素,为填海造区植被恢复提供基础理论依据。

1 研究区概况

天津市填海造陆区(38°4′—39°0′N,117°2′—118°0′E)主要集中于滨海新区的东部沿海地区,东临渤海,南邻河北省黄骅市,北接河北省唐山市,陆域与海域总面积5 270.0 km²,海岸线长153.0 km。研究区地处北温带,属于暖温带大陆性季风气候,年平均气温13.0℃,年平均降水量为566.0 mm,夏季降水量占总降水量的73.0%。区域内含盐量普遍较高且空间分布不均,自然植被以耐盐碱性植物为主,主要有盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)、芦苇(*Phragmites australis*)等。本文选取2000—2015年填海年限不同、受人类干扰(主要指人工种植植被的干扰)较小的地段作为研究对象,设立14个试验样区(表1),探究自然植被演替梯度下植物群落变化特征及驱动因素。

表1 研究区14个试验样区基本情况

样点	位置	填海年份	经度	纬度	坡向(坡度)/(°)	海拔/m	DC/km	DR/km
1	临港经济区	2000—2005	117°42′45.0″	38°56′58.1″	0	8	34.5	0.1
2	临港经济区	2005—2010	117°40′44.8″	38°54′40.1″	180.0(1.0)	13	36.3	0.2
3	临港经济区	2005—2010	117°45′0.7″	38°55′8.4″	0	0	30.7	0.2
4	临港经济区	2005—2010	117°46′47.1″	38°54′40.3″	189.8(7.0)	12	36.2	0.2
5	南疆港区	2005—2010	117°47′5.9″	38°57′14.5″	0	0	28.7	1.1
6	南疆港区	2005—2010	117°48′51.0″	38°57′28.3″	0	0	26.5	0.6
7	南疆港区	2005—2010	117°50′7.1″	38°57′16.1″	0	0	24.7	1.2
8	南疆港区	2005—2010	117°51′58.7″	38°56′12.5″	0	0	21.5	0.7
9	南疆港区	2005—2010	117°52′32.5″	38°56′45.7″	0	0	21.2	1.6
10	东疆港区	2005—2010	117°47′25.6″	39°01′20.6″	0	0	31.5	0.2
11	东疆港区	2010—2015	117°46′6.0″	39°3′50.2″	35.5(6.1)	7	35.7	1.1
12	北塘港区	2010—2015	117°47′40.4″	39°07′39.5″	0	0	38.5	0.2
13	北塘港区	2010—2015	117°46′40.6″	39°6′38.1″	0	0	38.3	1.6
14	北塘港区	2010—2015	117°45′25.3″	39°06′16.9″	232.6(5.1)	17	39.3	0.3

注:DC为样地离15 m等深线的距离;DR为样地离市区二级道路的距离。

2 材料与方法

2.1 样地设置与调查取样

2018年7—8月,在每个试验样区内,根据植物分

布和群落结构的复杂程度,随机选择2~5个面积为10 m×10 m样地,共计40个。其中,草本群落样地按X形布设5个1 m×1 m样方。灌木群落样地内采用对角线的方法,随机布设2个5 m×5 m样方,并

在每个样方中随机布设 3~5 个 1 m×1 m 草本样方。记录样方中灌木和草本植物的种类、多度、盖度、高度、基径(灌木)等,同时记录样地植物群落类型、经纬度、海拔、坡度、坡向等。

土样采集采用 S 形布点法,用土壤环刀在每个样地内采集 8 个深 30 cm 的土壤剖面样品。土样经风干、混合并研碎过筛(0.88, 0.25, 0.150 mm),用于测定土壤 pH 值、全盐量、有机质、全氮、有效磷、有效钾等指标。pH 值用 PHS-2C 型数字式酸度计测定,全盐量采用电导法测定,有机质采用重铬酸钾氧化外加加热法测定,全氮采用凯式蒸馏法测定,有效磷用钼锑抗分光光度法测定,有效钾用 1 mol/L 乙酸铵浸提火焰光度法测定。

2.2 数据分析

研究区 40 个样地共记录了 31 种植物(表 3),采用双向指示种分析法(TWINSPAN)对重要值>0.2 的 23 个优势植物物种进行聚类分析。构建 40×23 样方—物种重要值矩阵数据,导入 Canoco for Windows 4.5 中,进行除趋势典范对应分析(DCA),研究植被演替的趋势和梯度。重要值(IV)计算公式为:

$$IV = (x + y + z) / 3 \quad (1)$$

式中: x, y, z 分别代表相对高度、相对多度和相对盖度。

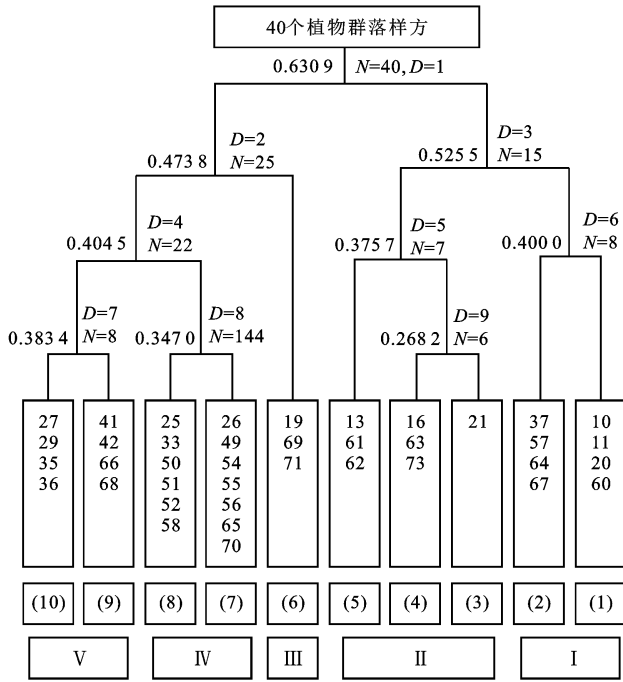
所有数据采用 Excel 2003 进行数据的统计和储存;利用 SPSS 22 进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Pearson 相关关系分析,比较不同演替阶段环境因子的差异性,并检验各环境因子之间的相关关系;采用 PCROD 5 对 40×31 的重要值矩阵数据进行聚类分析,划分不同的群落;采用 CANOCA 4.5 对物种重要值矩阵数据进行 DCA 排序;结合 40×9 的环境因子数据矩阵,经典对应分析(CCA),研究影响植被演替的驱动因素。各采样点离市区二级道路的距离(distance to urban secondary road, DR)、离 15 m 等深线的距离(distance to 15 m isobath, DC)利用 ArcGIS 进行测算。

3 结果与分析

3.1 植被演替特征

3.1.1 植被演替阶段划分 综合 TWINSPAN 分类法与 DCA 分析(图 1,表 2),结果显示研究区 DCA 第一排序轴与土壤含盐量具有显著的正相关关系($R^2 = 0.426, p < 0.001$)(图 2),反映了天津市填海造陆区植被演替的趋势和梯度,从右到左,随着土壤含盐量逐渐下降。DCA 第二排序轴所指示的环境特征不如第一排序轴明显,根据天津市滨海湿地盐生植被演替规

律,即盐地碱蓬群落、芦苇群落等在缺水的环境下会转变为獐毛群落^[17],因此该排序结果(图 3—4)可能反映的是土壤含水量的变化,即第二轴从上往下,土壤含水量逐渐增加。但第一排序轴特征值为 0.8,较其他排序轴具有更重要的生态意义(表 2)。因此,依据第一排序轴,即土壤含盐量梯度,可将天津市填海造陆区植被划分为 5 个演替阶段:①第 I 阶段:盐地碱蓬群落(*S. salsa*),该群落主要分布于临港经济区、南疆港区(2005—2010 年围填)、东疆港区(2005—2015 年围填)、北塘港区(2010—2015 年围填),海拔 0~13 m,群落总盖度 55%~90%。主要伴生种有芦苇、碱蓬(*Suaeda glauca*)、东亚市藜(*Chenopodium urbicum* subsp. *sinicum*)等。②第 II 阶段:芦苇—盐地碱蓬群落(*P. australis*—*S. salsa*),该群落主要分布于北塘港区和东疆港区(2010—2015 年围填),少数分布于临港经济区(2005—2010 年围填),海拔 0~13 m,群落总盖度 70%~95%。主要伴生种有怪柳、扁秆荆三棱(*Bolboschoenus planiculmis*)、碱蓬、小蓬草(*Erigeron canadensis*)等。③第 III 阶段:獐毛群落(*Aeluropus sinensis*),该群落主要分布于临港经济区(2005—2010 年围填),海拔 8~10 m,群落总盖度 80%~100%。主要伴生种有芦苇、鹅绒藤(*Cynanchum chinense*)、小蓬草、乳苣(*Lactuca tatarica*)等。④第 IV 阶段:芦苇群落(Ass. *P. australis*),该群落主要分布于临港经济区(2000—2010 年围填),少数分布于北塘港区(2010—2015 年围填),海拔 0~17 m,群落总盖度 65%~90%。主要伴生种有怪柳、鹅绒藤、假苇拂子茅(*Calamagrostis pseudophragmites*)、碱菀(*Tripolium panonicum*)、苣荬菜(*Sonchus wightianus*)、乳苣、碱蓬、狗尾草(*Setaria viridis*)、虎尾草(*Chloris virgata*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、小蓬草、草木犀(*Melilotus officinalis*)、牛筋草(*Eleusine indica*)和藜(*Chenopodium album*)等。⑤第 V 阶段:怪柳—鹅绒藤群落(*T. chinensis*—*C. chinense*),该群落主要分布于临港经济区(2000—2005 年围填),少数分布于南疆港区(2005—2010 年围填),海拔 0~8 m,群落总盖度 85%~95%。主要伴生种有苣荬菜、乳苣、小蓬草、狗尾草、虎尾草、砂引草(*Tournefortia sibirica*)、野大豆(*Glycine soja*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)、芦苇、草木犀、稗(*Echinochloa crusgalli*)、葎草(*Humulus scandens*)、鬼针草(*Bidens pilosa*)、猪毛蒿、刺儿菜(*Cirsium arvense* var. *integrifolium*)等。在该阶段,随着芦苇对土壤环境条件的改善,怪柳种群逐渐扩大,形成灌木群落。



注：①数据来源于作者罗莉硕士学位论文。②D 为分组序号；N 为样本数。③ I 为盐地碱蓬群落；II 为芦苇—盐地碱蓬群落；III 为獐毛群落；IV 为芦苇群落；V 为柽柳—鹅绒藤群落。下同。

图 1 植物群落 TWINSpan 聚类分析

表 2 研究区样方 DCA 排序前 4 轴的特征值、物种方差累计贡献率

指标	第一轴	第二轴	第三轴	第四轴
特征值	0.8	0.6	0.4	0.3
梯度长度	5.5	4.3	2.5	2.4
物种方差累计贡献率	11.4	19.1	24.5	28.3
总特征值	7.258			

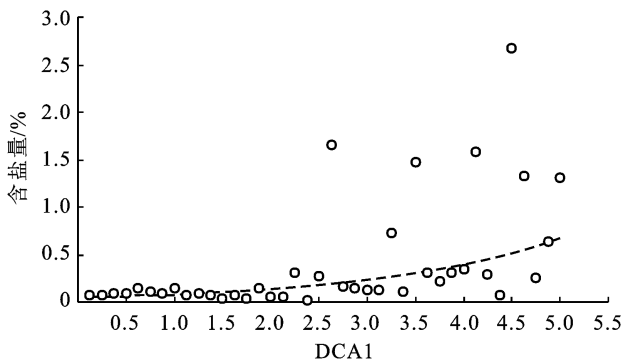


图 2 研究区样方 DCA 第一轴与土壤含盐量的 Logistics 非线性回归分析

3.1.2 各演替阶段的物种组成 随着植被的演替,天津市填海造陆区植物群落组成结构日趋复杂。在演替的前 3 个阶段,物种数量增加较为缓慢,但生长型变化明显,一年生草本植物减少,多年生草本植物缓慢增加,木本植物出现(表 3)。演替进行到芦苇群落(IV)阶段,物种数量大幅度增加,一年生草本植物由

第 III 阶段的 1 种增加到第 V 阶段的 15 种,多年生草本植物也从第 III 阶段的 4 种增加到第 V 阶段的 10 种,植被演替进入繁盛时期。

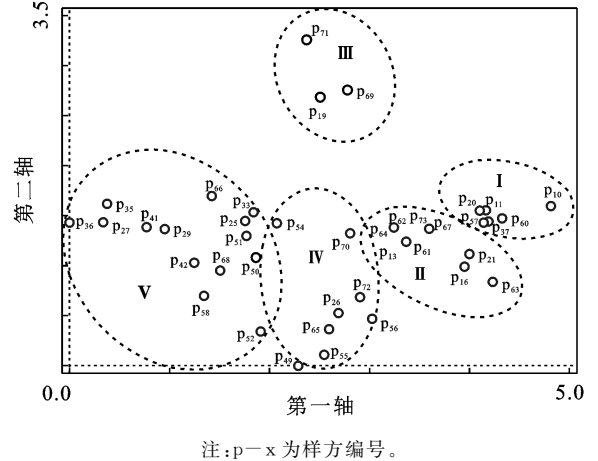
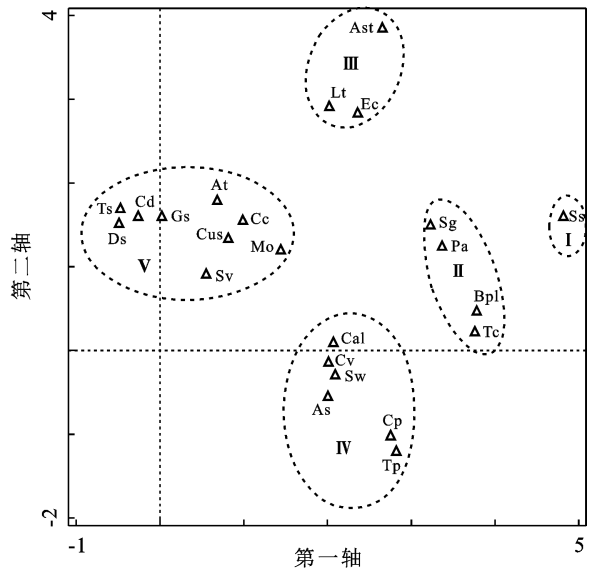


图 3 研究区植物群落演替样方排序图



注：Ss:盐地碱蓬；Sg:碱蓬；Tc:柽柳；Pa:芦苇；Asi:獐毛；Cc:鹅绒藤；Bpl:扁秆荆三棱；Sw:苣荬菜；Ec:小蓬草；Mo:草木犀；Sv:狗尾草；Cp:假苇拂子茅；As:猪毛蒿；Cd:绳虫实；Cus:东亚市藜；Gs:野大豆；Ts:砂引草；Ds:马唐；Lt:乳苣；At:苘麻；Cv:虎尾草；Tp:碱菟；Cal:藜。下同。

图 4 研究区植物群落 23 个物种排序图

3.2 植被演替影响因素

对不同演替阶段环境因子进行单因素方差分析,结果显示土壤全盐量、离市区二级道路的距离和离 15 m 等深线的距离在不同演替阶段间存在显著差异(表 4),这主要与植被对土壤的影响、道路密度以及围填海年限有关。而土壤 pH 值、有机质、全氮、有效钾、有效磷和含水量在不同演替阶段间差异不显著。尽管土壤性质在不同演替阶段间的差异性未达显著

水平,但在各阶段间仍然存在土壤性质的相对差异。演替第 I 阶段,土壤经过围填海初期吹填、压实之后,成为新型滩涂盐渍土,含盐量平均为 10.2 g/kg;pH 值 7.8~9.0,土壤平均含水量 12.1%。第 II 阶段,在先锋植物盐地碱蓬的开拓下,该阶段土壤盐分含量有所下降,平均值接近 5.0 g/kg,pH 值 7.8~9.3,含水量主要集中于 6.6%~13.7%。随着土壤逐渐脱盐,伴生种增加。第 III 阶段,土壤性质较为均一,含盐量

平均值为 1.3 g/kg,pH 值 8.6~9.0,含水量主要在 8.0%左右。土壤受天然淋洗,盐分进一步下降,有机质含量成倍增加,植物种类逐渐增多。第 IV 阶段,土壤含盐量平均值略有增加,为 3.3 g/kg,pH 值 8.1~9.5,含水量 8.2%~18.1%,有机质含量较丰富,植物种类趋于复杂。第 V 阶段,土壤含盐量平均值降为 0.8 g/kg,pH 值 8.2~9.4,含水量变化较大,最低 1.7%,最高 19.9%。有机质有所下降,群落垂直结构明显。

表 3 研究区各演替阶段植物种类组成及生长型

演替阶段	物种构成
I	盐地碱蓬(A),东亚市藜(A),碱蓬(A),芦苇(P)
II	盐地碱蓬(A),碱蓬(A),芦苇(P),扁秆荆三棱(P),小蓬草(A),怪柳(S)
III	芦苇(P),小蓬草(A),獐毛(P),鹅绒藤(P),乳苣(P)
IV	碱蓬(A),芦苇(P),小蓬草(A),怪柳(S),鹅绒藤(P),乳苣(P),碱菀(P),狗尾草(A),虎尾草(A),牛筋草(A),藜(A),草木犀(P),假苇拂子茅(P),猪毛蒿(P),苜蓿菜(P)
V	东亚市藜(A),碱蓬(A),芦苇(P),扁秆荆三棱(P),小蓬草(A),怪柳(S),鹅绒藤(P),乳苣(P),狗尾草(A),虎尾草(A),藜(A),草木犀(P),猪毛蒿(P),苜蓿菜(P),砂引草(P),刺儿菜(P),菎草(P),绳虫实(<i>Corispermum declinatum</i>)(A),野大豆(A),打碗花(<i>Calystegia hederacea</i>)(A),菟丝子(<i>Cuscuta chinensis</i>)(A),马唐(A),苘麻(<i>Abutilon theophrasti</i>)(A),稗(A),鬼针草(A),蒺藜(<i>Polygonum aviculare</i>)(A)

注:A 为一年生草本植物;P 为多年生草本植物;S 为灌木。

表 4 研究区不同演替阶段环境因子的平均值及方差检验

环境因子	演替阶段					方差分析	
	I (n=8)	II (n=7)	III (n=3)	IV (n=8)	V (n=14)	F	p
TS/(g · kg ⁻¹)	10.160±8.751	4.961±4.722	1.341±0.067	3.344±5.455	0.839±0.320	4.720	0.004
pH 值	8.330±0.510	8.584±0.561	8.774±0.184	8.804±0.510	8.758±0.424	1.375	0.263
OM/(g · kg ⁻¹)	7.796±5.037	6.481±7.668	18.437±17.196	13.556±14.286	6.604±10.481	1.252	0.307
TN/(g · kg ⁻¹)	0.340±0.213	0.256±0.263	0.629±0.425	0.511±0.484	0.271±0.303	1.312	0.285
AK/(g · kg ⁻¹)	0.417±0.532	0.257±0.352	0.388±0.253	0.549±0.471	0.168±0.212	1.505	0.222
AP/(mg · kg ⁻¹)	9.360±4.063	8.936±5.534	8.361±4.099	9.792±6.752	5.764±3.612	1.245	0.310
W/%	12.108±8.161	9.264±4.546	7.981±1.443	12.630±3.687	9.587±5.085	0.610	0.658
DR/km	0.431±0.476	0.566±0.597	0.076±0.029	0.155±0.108	0.738±0.559	4.605	0.019
DC/km	30.498±4.382	34.580±4.384	34.930±0.719	36.157±3.329	32.711±6.786	3.471	0.025

注:TS 为全盐;OM 为有机质;TN 为全氮;AK 为有效钾;AP 为有效磷;W 为含水量。下同。

环境因子之间的 Pearson 相关分析结果(表 5)表明,土壤全盐量与土壤有效钾($r=0.615, p<0.01$)、有效磷($r=0.324, p<0.05$)极显著或显著正相关,说明天津市填海造陆区随着土壤全盐含量的降低,土壤中有效钾和有效磷都表现出减少的趋势。pH 值与采样点离 15 m 等深线的距离($r=0.335, p<0.05$)显著正相关,说明土壤酸碱性受离海距离的影响。土壤含水量与土壤有机质($r=0.318, p<0.05$)显著正相关。土壤有机质与全氮($r=0.842, p<0.01$)、有效磷($r=0.789, p<0.01$)、有效钾($r=0.499, p<0.01$);全氮与有效磷($r=0.698, p<0.01$)、有效钾($r=0.659, p<0.01$);有效磷与有效钾($r=0.608, p<0.01$)之间均存在极显著正相关性,说明 4 者可以相互表征,随着土壤有机质含量的增加,土壤全氮、有效磷、有效钾均有一定程度的增加。采样点离市区二级道路的距离

与其他环境因子相关性均不显著。

由表 6 可知,CCA 排序的前 4 轴虽仅保留了物种数据总方差的 19.2%,但物种与环境因子的相关系数较高,共解释了物种—环境关系总方差的 78.9%。其中,前两轴共解释了物种与环境因子之间的关系的 56.2%,能够满足解释天津市填海造陆区植被演替与环境因子间关系的需求。

在植物群落分布和环境因子的 CCA 双排序图中(图 5,表 7),环境因子用带箭头的红色连线表示,箭头所指的方向表示某一环境因子的变化趋势,箭头所处的象限表示该环境因子与排序轴之间的正负相关性,连线的长短代表植物群落与环境因子的相关性大小,连线与排序轴的夹角表示该因子与排序轴之间的相关性大小。一般排序图上距离越近的植物,所处的环境越相似。

表 5 研究区环境因子之间的 Pearson 相关系数

项目	TS	pH 值	OM	TN	AP	AK	W	DR	DC
TS	1								
pH	-0.409	1							
OM	0.023	-0.069	1						
TN	0.237	-0.071	0.842**	1					
AP	0.324*	-0.130	0.789**	0.698**	1				
AK	0.615**	0.017	0.499**	0.659**	0.608**	1			
W	0.010	0.033	0.318*	0.172	0.199	0.023	1		
DR	-0.004	-0.039	-0.414	-0.413	-0.241	-0.255	-0.252	1	
DC	0.096	0.335*	0.086	0.141	0.094	0.310	0.138	-0.581	1

注: ** 表示 $p < 0.01$ 水平上相关性显著; * 表示 $p < 0.05$ 水平上相关性显著。

表 6 研究区 CCA 排序前 4 轴的特征值、物种—环境相关性和方差累计贡献率

指标	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4
特征值	0.6	0.4	0.2	0.2
物种—环境相关	0.9	0.7	0.6	0.8
物种方差累计贡献率	8.3	13.6	16.6	19.2
物种环境关系的方差累计贡献率	34.3	56.2	68.3	78.9
总特征值	7.258			
总典范特征值	1.763			

CCA 排序结果显示,土壤全盐量、pH 值、采样点离市区二级道路的距离和离 15 m 等深线的距离的连线较长,说明其对植被演替的影响较大。其次为,土壤有机质、含水量和有效磷。总氮、有效钾对植被演替的影响较小。因此,天津市填海造陆区植被演替的主要影响因素为土壤全盐含量、离 15 m 等深线的距离和离市区二级道路的距离。

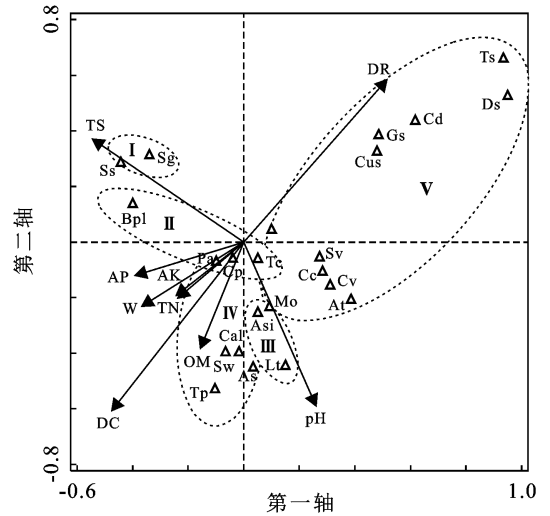


图 5 研究区植物种类与环境因子的 CCA 双序图

表 7 研究区环境因子与 CCA 前 2 轴的相关系数

轴序	TS	pH 值	OM	TN	AP	AK	W	DR	DC
第一轴	-0.565**	0.257	-0.195	-0.290	-0.442*	-0.281	-0.420*	0.578**	-0.517*
第二轴	0.404	-0.644***	-0.412*	-0.215	-0.117	-0.221	-0.271	0.616**	-0.625**

注: *** 表示 $p < 0.001$ 水平上相关性显著; ** 表示 $p < 0.01$ 水平上相关性显著; * 表示 $p < 0.05$ 水平上相关性显著。

4 讨论与结论

4.1 讨论

天津市填海造陆区植被演替不同阶段物种组成和生长型均表现出较大差异。从初期的 4 种增加到后期的 26 种,从一年生草本占优势,到多年生草本、灌木占优势。植被演替第 I 阶段,围填海区域吹填土壤含盐量高,土壤较贫瘠。盐分含量高达 2.6%,含水量达 26.6%,此环境下只有盐地碱蓬等极少数耐盐植物能够正常生长,种类组成较单一,群落结构简单。至第 II 阶段,群落中土壤含盐量有明显的下降,芦苇群落出现,逐渐形成以芦苇—盐地碱蓬为共优种的植被类型。随着芦苇产生大量枯枝落叶,土壤有机质累积。同时,受道路工程等人为活动的影响,地势抬高,

土壤持续脱盐,土壤含水量减少,旱生耐盐碱多年生草本植物獐毛的优势度增加(第 III 阶段),群落结构逐渐复杂化。至第 IV 阶段,土壤环境得到明显改善,土壤含盐量持续降低,含盐量多在 0.2% 以下,土壤肥力和持水能力增强,耐盐、喜湿类植物优势逐渐增强,芦苇凭借着植株高度、盖度和生物量等优势,不断发展壮大,形成芦苇群落,植物种类大幅增加,多年生草本植物如碱菀、草木犀、乳苣、苣荬菜等成为主要伴生种,群落结构逐渐复杂,物种丰富度增加,多样性增加。至第 V 阶段,人为干扰较小,木本植物怪柳开始表现出更大的竞争力,形成灌木群落,土壤含盐量基本在 0.1% 以下,鹅绒藤、狗尾草、苘麻、绳虫实等草本植物陆续出现,逐渐发展形成群落分层明显的怪柳—鹅绒藤群落,植被演替进程变缓,物种多样性趋于稳

定。已有研究认为,随着土壤盐分含量的下降,盐地碱蓬群落逐渐向芦苇群落转变^[17],这与本研究所得结论存在相似性。但是,也有研究认为由海到陆,滨海湿地植物群落的分布格局为盐地碱蓬群落、怪柳群落、芦苇群落^[18],若以空间代替时间,该植物群落分布格局可视为滨海湿地植被演替的不同阶段,与本研究所得到的演替序列存在差异,究其原因可能与研究区地理环境条件不同有关。此外,已有研究还认为随着演替的进行,植物物种多样性呈现增加的趋势^[18],这与本研究所得结论具有相似性。

本研究将离 15 m 等深线的距离和离市区二级道路的距离作为人为因子纳入影响天津市填海造陆区植被演替的环境因子范畴。研究发现,土壤全盐、酸碱度、有机质、有效磷、含水量以及采样点离 15 m 等深线和市区二级道路的距离是影响天津市填海造陆区植被演替的主要环境因素,说明该区植被演替受自然和人为因素的共同影响。已有研究也证实了这一点,认为滨海湿地近数 10 a 的植被演替是由淤积型海岸等自然因素和滩涂开发、引入外来物种等人为因素共同作用的结果^[19],该研究具体影响因子与本研究存在差异的原因主要是由于选取的指标不同所致。本研究显示,除人为因素影响外,土壤全盐是影响天津市填海造陆区植被演替的主要自然因素,这与已有研究结论一致^[20]。当然,土壤酸碱度、有机质、有效磷、含水量在天津市填海造陆区植被演替中也发挥着重要的作用。但已有研究认为,影响滨海湿地植被演替的主要自然因素为全盐和含水量^[17]或者全盐、含水量和速效氮^[18]或者海拔和全盐等^[21],与本研究所得结论不同,这主要是由于研究区域以及选取的环境指标不同所致。

4.2 结论

(1) 天津市填海造陆区自然植被演替序列为:盐地碱蓬群落→芦苇—盐地碱蓬群落→獐毛群落→芦苇群落→怪柳—鹅绒藤群落。随着演替的进行,土壤含盐量逐渐降低,植物种类逐渐增加。

(2) 土壤全盐含量、离市区二级道路的距离和离 15 m 等深线的距离在不同演替阶段间存在显著差异,是天津市填海造陆区自然植被演替的主要影响因子,科学调控自然和人为因子可为填海造区植被恢复提供有利环境条件。

[参 考 文 献]

[1] 陈星.面向大型填海工程施工仿真及工程量统计分析的 BIM 应用研究[D].天津:天津理工大学,2019.
[2] Bo Tian, Wu Wenting, Yang Zhaoqing, et al. Drivers, trends, and potential impacts of long-term coastal reclamation in China from 1985 to 2010 [J]. *Estuarine Coastal*

and Shelf Science, 2016,170:83-90.

- [3] 胡姬. EPC 模式下大型填海造地项目造价控制措施研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2018.
[4] 邱建慧.围填海活动对中国滨海湿地碳储量的影响研究[D].福建 厦门:厦门大学,2017.
[5] 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].北京:中国科学院大学,2015.
[6] 钱丹,尹建道,田苗,等.近 20 年天津海泥吹填土改良与绿化研究进展[J].*土壤通报*,2014,45(6):1533-1536.
[7] Dontis E E, Radabaugh K R, Chappel A R, et al. Carbon storage increases with site age as created salt marshes transition to mangrove forests in Tampa Bay, Florida (USA) [J]. *Estuaries and Coasts*, 2020,43(6):1470-1488.
[8] 柯丽丽.利用电石渣等固体废弃物改性吹填土来配制绿化新基质的研究[D].北京:北京林业大学,2010.
[9] 胡月楠,张松涛,周鹏涛,曹妃甸滨海盐碱地梯田式吹填土绿化方法[J].*中国水土保持*,2014(8):33-35.
[10] 李文峰.天津滨海吹填土区土壤改良机制及怪柳栽植技术研究[D].天津:天津理工大学,2016.
[11] Luysaert S, Mertens J, Vervaeke P, et al. Preliminary results of afforestation of brackish sludge mounds [J]. *Ecological Engineering*, 2001,16(4):567-572.
[12] 韦菁,范昕宇.滨海盐碱地适生植物筛选研究:以金山围填海项目为例[J].*中国园林*,2021,37(4):116-121.
[13] 许晓静,刘洪庆,张蕊,等.天津临港吹填土植被生态重建中土壤改良及绿化技术研究[J].*安徽农业科学*,2016,44(10):82-84.
[14] 钱丹.天津海泥吹填土改良与怪柳繁育技术研究[D].天津:天津理工大学,2015.
[15] 赵秀芳,张清,王振宇.微地形对天津滨海吹填土土壤理化性质和植被状况的影响[J].*土壤通报*,2014,45(2):281-285.
[16] 赵秀芳,王振宇,张振,等.不同吹填年限围海吹填土的障碍特征分析[J].*中国农学通报*,2016,32(17):91-97.
[17] 郝翠,李洪远.天津滨海新区湿地植物群落特征及植被演替过程[J].*南水北调与水利科技*,2012,10(3):77-81.
[18] 赵心怡.黄河三角洲滨海湿地典型植物群落特征及其与环境因子的响应[D].山东 烟台:鲁东大学,2020.
[19] 张佳佳.盐城滨海湿地植被演替及土壤有机碳分布研究[D].江苏 南京:南京师范大学,2019.
[20] Shijie Yi, Wu Pan, Bai Fenghua, et al. Environmental filtering drives plant community assembly processes in the riparian marsh of downstream Yellow River, China [J]. *Wetlands(Wilmington, N. C.)*, 2019,40(2):287-298.
[21] Xuliang Zhang, Zhang Zhaohui, Wang Wei, et al. Vegetation successions of coastal wetlands in Southern Laizhou Bay, Bohai Sea, Northern China, influenced by the changes in relative surface elevation and soil salinity [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 293:112964.