

黄河河口盐沼植被分布、多样性与土壤化学因子的相关关系

贺 强, 崔保山*, 赵欣胜, 付华龄, 廖晓琳

(北京师范大学环境学院 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875)

摘要:以黄河河口盐沼实地调查的 67 个样地 19 个植物种的重要值, 运用双向指示种分析将黄河河口盐沼植被分为怪柳-翅碱蓬 + 补血草 + 碱蓬群落、翅碱蓬群落、怪柳-芦苇 + 翅碱蓬群落、芦苇群落、穗状狐尾藻 + 芦苇群落和旱柳-芦苇 + 荻群落。利用典范对应分析(CCA)分析了土壤盐分、pH、Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、全氮、全磷、全碳、有机质等 11 个土壤化学因子与黄河河口盐沼植被分布的相关关系。CCA 排序结果表明, 土壤盐分和土壤 pH 是影响黄河河口盐沼植被分布的主要土壤化学因子。CCA 排序第一轴与土壤盐分呈显著正相关关系($P < 0.001$), 第二轴主要和土壤 pH 呈显著负相关关系($P < 0.001$)。怪柳-翅碱蓬 + 补血草 + 碱蓬群落排列于排序图的右上部, 与生境土壤中高含盐量及中等 pH 相对应, 穗状狐尾藻 + 芦苇群落和芦苇群落分布于第一排序轴的最左端, 主要与土壤低含盐量相关, 翅碱蓬群落位于第二排序轴的下侧, 与较高的土壤 pH 相关, 怪柳-芦苇 + 翅碱蓬群落和旱柳-芦苇 + 荻群落, 土壤 pH 和盐分均较低。通过物种丰富度 R 、香农维纳多样性 H' 、物种均匀度 E 等指数与土壤化学因子的相关分析, 发现黄河河口盐沼植物物种多样性与土壤盐分没有呈现出与土壤盐分很好的负相关关系, 物种丰富度 R 、香农维纳多样性 H' 、物种均匀度 E 均与土壤盐分呈现显著正相关关系; R 、 H' 与土壤 pH 呈现出十分显著的负相关关系; R 、 H' 与土壤 Ca²⁺、Mg²⁺ 含量呈现极为显著正相关关系。

关键词:双向指示种分析; 典范对应分析; 分布; 多样性; 土壤化学因子; 黄河三角洲; 湿地

文章编号: 1000-0933(2009)02-0676-12 中图分类号: Q142, Q16, Q941.2, Q948 文献标识码: A

Relationships between salt marsh vegetation distribution/diversity and soil chemical factors in the Yellow River Estuary, China

HE Qiang, CUI Bao-Shan*, ZHAO Xin-Sheng, FU Hua-Ling, LIAO Xiao-Lin

State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China
Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2): 0676 ~ 0687.

Abstract: Relationships between salt marsh vegetation distribution/diversity and soil chemical factors in the Yellow River Estuary, China was analyzed. Field survey was carried out from Sept. to Oct., 2006. The vegetation of 67 sampling sites was investigated. Plant cover values and densities were recorded and five soil samples were collected randomly from a depth of 0–20cm in each sampling site. All together 11 soil chemical factors (soil salinity, soil pH, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, total nitrogen, total phosphorus and total carbon) were mensurated in the lab.

As a primary analysis, TWINSpan (Two Way Indicator Speceis Analysis) was performed to compartmentalize all the sampling sites into different plant associations. Seven associations of salt marsh vegetation in the Yellow River Estuary were obtained: Ass. *Tamarix chinensis-Suaeda salsa + Limonium sinense + Suaeda glauca*, Ass. *Suaeda salsa*, Ass. *Tamarix chinensis-Phragmites australis + Suaeda salsa*, Ass. *Phragmites australis*, Ass. *Myriophyllum spicatum + Phragmites*

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2006CB403303); 国家自然科学基金资助项目(40571149)

收稿日期:2007-08-27; **修订日期:**2007-11-05

致谢:北京师范大学生命科学学院张金屯教授在本文写作中给予帮助, 刘全儒副教授鉴定了采集的植物标本; 黄河三角洲国家级自然保护区管理局吕卷章主任、刘月良总工、大汶流管理站路峰副站长、王立东科长以及冯光海同志在野外实验过程中给予帮助, 特此致谢。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cuibs@bnu.edu.cn

australis, Ass. *Salix matsudana-Phragmites australis* + *Triarrhena sacchariflora*. The roles of all measured soil chemical factors on the vegetation distribution patterns were detected by Canonical Corresponding Analysis. And soil salinity and soil pH turned up to be the main determinants. Soil salinity showed a significant positive correlation with CCA axis 1 and soil pH significant negative with axis 2. Ass. *Tamarix chinensis-Suaeda salsa* + *Limonium sinense* + *Suaeda glauca* composed of salt tolerant species dominated the up right part of the CCA ordination chart, which indicated a high soil salinity but moderate soil pH. Ass. *Myriophyllum spicatum* + *Phragmites australis* and Ass. *Phragmites australis* dominated the negative end of CCA axis 1 mainly correlated negatively with soil salinity. Ass. *Suaeda salsa* distributed on the negative end of axis 2 indicating a high soil pH, and Ass. *Salix matsudana-Phragmites australis* + *Triarrhena sacchariflora*. and Ass. *Tamarix chinensis-Phragmites australis* + *Suaeda salsa* distributed on the up left part of the ordination chart negatively correlated with both soil salinity and pH. Spearman correlation coefficients were calculated between soil chemical factors and species richness (R), Shannon-Weiner diversity (H') and Pielou evenness (E). This revealed us a significant positive correlation between R , H' , E and soil salinity and a significant negative correlation between soil pH and H' , E . However, soil Ca^{2+} and Mg^{2+} seemed to play a more important role in determining the diversity. Reasons were detailed in Discussion.

Key Words: TWINSpan; CCA; distribution; diversity; soil chemical factors; Yellow River Delta; wetland

植被与土壤环境因子之间的关系已经被广泛讨论^[1-4]。土壤环境对于植物的生长和繁殖具有重要影响,它被视为气候、生物有机体、地形、母质和时间的一个函数^[5]。土壤和植物之间的关系可以从土壤物理性质和土壤化学性质两个方面来讨论。土壤物理性质主要包括土壤质地、土壤水分、土壤温度等,土壤化学性质主要包括土壤酸碱度、土壤有机质、土壤矿质营养元素(氮、磷、钾、钙、钠、镁等)等^[6]。许多研究强调了土壤化学性质对植被分布及多样性的影响^[7, 8]。

盐沼广泛分布于世界的中高纬度地区,由于特殊的植被地带分布现象而受到生态学者的广泛关注。国际上关于盐沼植被地带分布的研究难以计数。一般认为,盐沼植被的地带分布现象,主要与高程、土壤因子以及种间竞争等密切相关^[9-14]。土壤化学因子中的土壤盐分^[12]、土壤养分含量^[15, 16]等往往起重要作用。一般认为,土壤盐分也是影响盐沼植被多样性的关键因子^[17, 18]。

已有许多作者在他们的研究中指出了土壤盐碱化对黄河河口地区植物的生长和分布起着关键作用。Guo 等认为黄河河口地区芦苇的生长速率与土壤盐分呈负相关关系^[19]。赵可夫等研究了黄河三角洲不同生态型芦苇对土壤盐分的适应生理^[20]。邵秋玲等研究了对黄河三角洲国家级自然保护区的植物区系进行了研究分析^[21]。吴志芬等研究了黄河三角洲盐生植被与土壤盐分的相关性,并指出盐生植被的类型、植物体所含的化学成分、生物累计强度和演替等与土壤含盐量密切相关^[22]。然而,这些研究大都仅针对一个或少数几个植物种对土壤盐分的响应,邵秋玲等也仅仅是对自然保护区内植物种的区系组成进行了汇总分析,没有对黄河河口盐沼的植被进行数量分类,也没有关于这一地区植被分布与各种环境因子之间的相关性分析,更没有涉及这一地区植物群落多样性与各种环境因子之间相关性研究。本文就是想要从土壤化学因子的角度对黄河河口盐沼的植被分布及其多样性进行分析。

本文立足于解决以下几个问题:(1)黄河河口盐沼主要存在哪些植物群落类型;(2)影响黄河河口盐沼植被分布的主要土壤化学因子;(3)影响黄河河口盐沼植物群落物种多样性的关键土壤化学因子。

本文基于在黄河河口盐沼实地调查的 67 个样地,使用双向指示种分析(TWINSpan)、典范对应分析(CCA)、多样性计算以及一些必要的相关分析解决这些问题。

1 研究区概况

黄河三角洲国家级自然保护区(N37°40' ~ 38°10', E118°41' ~ 119°16')地处我国山东省东营市黄河入海口,总面积 $15.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,是以保护黄河口新生湿地生态系统和珍稀濒危鸟类为主体的自然保护区。保护区

主要分为故道保护区和现流路保护区两部分。故道保护区设立于 1976 年以前的黄河故道,以保护珍稀濒危鸟类为主;现流路保护区则以保护新生湿地生态系统为主。

属暖温带季风性气候区,具有明显的大陆性季风气候特点。四季分明,冷热干湿界限极明显,春季干旱多风回暖快,夏季炎热多雨,秋季凉爽多晴天,冬寒少雪多干燥。年平均气温 12.1℃,无霜期 196d,年平均降水量 551.6mm,年均蒸发量为 1962mm。黄河三角洲天然植被以草本为主,常见植物有芦苇(*Phragmites australis*)、荻(*Triarrhena sacchariflora*)、穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)、翅碱蓬(*Suaeda salsa*)及补血草(*Limonium sinense*)等;普遍存在的灌木仅怪柳(*Tamarix chinensis*)1种;天然乔木仅旱柳(*Salix matsudana*)1种,也仅在黄河河道两岸有少量分布。

2 实验设计与数据处理

2.1 实验设计

野外调查于 2006 年 9~10 月展开。布点设立于现流路保护区内。由于保护区内仍有部分地区农业开发油田开发等人为干扰严重,很难在该区域内设立完整的样线进行植被调查。本研究布设样地时,在充分了解研究区内植被和水土环境、农业开发、油气开发人为活动等影响的前提下,在缓冲区和核心区及少部分实验区内无人干扰或人为干扰较少的区域进行,且由于该区域南部大多为没有任何植被覆盖的光滩,布点以北部和东部为主。

研究区植被地带分布现象较为明显:潮间带下带及以下地区为无维管植物覆被的光滩,潮间带中带分布以翅碱蓬为优势种的植物群落,潮间带中上带主要分布以怪柳或翅碱蓬为优势种的植物群落,潮间带上带及潮上带则主要分布以芦苇为优势种的植物群落,潮上带常年积水较深的地区则发育为沉水植物群落,以穗状狐尾藻为主,黄河河道漫滩地区主要分布以旱柳、芦苇、荻等为单优势种或共优势种的植物群落^[23]。

布点在前期对该地区植被广泛考察的基础上进行。布点时综合考虑了湿地类型、植物覆被、距海距离和距黄河距离等多重因素。共布设 50m×50m 样地 67 个,每样地随机取 1m×1m 调查样方 5 个进行草本(包括半灌木罗布麻)植物调查;由于研究区内以草本为主,对于有怪柳(灌木)存在的样地随机取 10m×10m 调查样方 5 个进行怪柳的数量统计;对于有旱柳(乔木)存在的样地取 15m×15m 调查样方 5 个进行旱柳的数量统计。

2.2 数据采集

草本(包括半灌木罗布麻)调查样方直接计数各植物种的密度,用米尺测定株高,并目测估计盖度和多度。灌木(怪柳)调查样方和乔木(旱柳)调查样方分别计数怪柳和旱柳的密度,用米尺测定株高(旱柳由于米尺测定存在困难,部分目测估计),并目测估计投影盖度和多度。计算每个样地各层 5 个调查样方的平均值。由于研究区内仅存在乔木旱柳 1 种,灌木怪柳 1 种,故综合草本、灌木和乔木 3 层数据最终作为该样地的植被数据。下文分析不再分层分别进行。

在每个样地内随机设置 5 个采样点,于 0~20cm 土层处采集表层土样(淹水时采其底泥)。将同一样地的 5 份土样混合均匀,用于土壤化学因子的测量。土壤 pH、全盐量、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 的测定采用 5:1 水土比土壤浸出液。其中土壤 pH 采用便携式 pH 计;土壤盐分的测定采用便携式盐度测定仪测定浸出液盐度,并转换为土壤盐分(g/kg),文中统一用 S 表示; Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 采用等离子体色谱法; Cl^- 采用硝酸银滴定法。土壤 TC、TN 采用干烧法(元素分析仪)。土壤 TP 采用 HF-HClO₄ 消煮法分解后,利用电感耦合等离子体发射光谱(扫描式)测定。土壤速效钾采用 NH₄OAc 浸提,电感耦合等离子体发射光谱(扫描式)进行测定。土壤有机质(文中统一用 SOM 表示)的测定采用重铬酸钾容量法——稀释热法。详细实验方法参见文献^[24]。

2.3 数据分析

(1)采用重要值(important value, *IV*)作为各物种在群落中的优势度指标,计算公式为: $IV = (\text{相对密度} + \text{相对盖度})/200$ 。以 67 个样地 19 个植物种的重要值组成样地-物种矩阵 *Z*。以 67 个样地 10 个土壤化学因子数据组成样地-环境因子矩阵 *Q*。

(2)数量分类 以上述矩阵Z 使用 MOPED 软件进行双向指示种分析,分类时设置 Level of division 为 4, Minimum group size 为 10,将物种重要值分为 0 ~ 0.01, 0.01 ~ 0.10, 0.10 ~ 0.20, 0.20 ~ 0.40, 0.40 ~ 0.60, > 0.60 等 6 等级。

(3)排序 以Z 和Q 使用 CANOCO for Windows 4.5 进行典范对应分析。保留前两轴,使用 R 2.4.1 软件 ade4 package 中的 s.arrow、s.label 等绘图函数将分析结果绘制成 CCA 双序图,并将 TWINSpan 聚类所得到的 6 个群落类型 A、B、C、D、E、F,使用 R2.4.1 软件 ade4 package 中的 s.class 函数绘制在 CCA 双序图中(图中的椭圆)。

(4)多样性 分别计算各样地的物种丰富度指数 $R (R = S)$ 、香农维纳多样性指数 $H' (H' = -\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i)$ 以及物种均匀度指数 $E (E = H' / \ln S)$ 。其中 S 为各样地的物种数, P_i 用重要值 IV 代替。 R 、 H' 、 E 与土壤化学因子之间的相关关系使用 Spearman 方法进行。

(5)其他 数据的初步整理、计算与分析使用 Microsoft Excel 2003 进行; Pearson 和 Spearman 相关分析及方差检验(one way ANOVA)使用 SPSS 13.0 进行;箱式图的绘制使用 SigmaPlot 10.0 进行。

以上所有数据整理和分析均在 Dell Latitude D620 便携式计算机上进行。

3 实验结果与分析

3.1 黄河河口盐沼植被的数量分类

利用 67 个样地 19 个植物种的重要值矩阵对黄河河口盐沼植物群落进行双向指示种分析。结合实际生态意义,基本采用第三级的划分结果,将被单独分为一类的样地 30、35、65、67 与 31 等合并为一类,最后共得到 6 个群落类型(群丛)(表 1)。不同群落类型中的土壤化学因子见表 2。对各群落类型依据其优势种和 TWINSpan 划分的指示种进行命名。

(1)群落 A 柽柳-翅碱蓬 + 补血草 + 碱蓬群落 (Ass. *Tamarix chinensis-Suaeda salsa + Limonium sinense + Suaeda glauca*)。群落中翅碱蓬密度(446 ± 654)株/m²(平均值 ± 标准偏差,下同),盖度(23 ± 21)%;柽柳密度(47 ± 50)株/100m²,盖度(31 ± 11)%;补血草密度(11 ± 7)株/m²,盖度(15 ± 8)%;碱蓬密度(7 ± 6)株/m²,盖度(6 ± 4)%。除以上优势种和指示种外,该群落主要伴生种还有芦苇(密度(6 ± 8)株/m²,盖度(3 ± 4)%)、青蒿(*Artemisia carvifolia*) (密度(5 ± 8)株/m²,盖度(3 ± 4)%)、荻(密度(1 ± 2)株/m²,盖度(1 ± 1)%)、罗布麻(*Apocynum venetum*) (密度(1 ± 2)株/m²,盖度(1 ± 2)%)等,极少发现有假苇拂子茅(*Calamagrostis pseudophragmites*)在该群落中分布。该群落类型主要分布在潮间带中上带及上带的盐碱荒地。

(2)群落 B 翅碱蓬群落 (Ass. *Suaeda salsa*)。群落中翅碱蓬密度(694 ± 974)株/m²,盖度(51 ± 30)%。群落主要伴生种为芦苇和柽柳,群落中芦苇密度(45 ± 57)株/m²,盖度(19 ± 20)%;柽柳密度(20 ± 36)株/100m²,盖度(8 ± 11)%;鹅绒藤(*Cynanchum chinense*)和假苇拂子茅较少发现有分布。该群落类型主要分布在黄河入海口南北两侧的滩涂中。

(3)群落 C 柽柳-芦苇 + 翅碱蓬群落 (Ass. *Tamarix chinensis-Phragmites australis + Suaeda salsa*)。芦苇密度(199 ± 90)株/m²,盖度(65 ± 31)%;翅碱蓬密度(235 ± 129)株/m²,盖度(29 ± 16)%;柽柳密度(12 ± 12)株/100m²,盖度(13 ± 15)%。群落主要伴生种有荻(密度(9 ± 11)株/m²,盖度(13 ± 17)%)、鹅绒藤(密度(1 ± 2)株/m²,盖度(4 ± 4)%)、苣荬菜(*Sonchus arvensis*) (密度(10 ± 9)株/m²,盖度(5 ± 4)%)、罗布麻(密度(3 ± 3)株/m²,盖度(4 ± 2)%)、碱菴(*Tripolium vulgare*) (密度(3 ± 5)株/m²,盖度(6 ± 12)%)、假苇拂子茅(密度(2 ± 5)株/m²,平均盖度(2 ± 5)%)、草木犀(*Melilotus officinalis*) (密度(2 ± 3)株/m²,盖度(3 ± 3)%)、野大豆(*Glycine soja*) (密度(1 ± 1)株/m²,盖度(3 ± 4)%)和头状穗莎草(*Cyperus glomeratus*) (密度(1 ± 1)株/m²,盖度(1 ± 1)%),偶见补血草、鳢肠(*Eclipta prostrata*)等伴生。该群落主要分布在黄河河口盐沼潮间带中上带、潮间带上带的高地。

(4)群落 D 芦苇群落 (Ass. *Phragmites australis*)。芦苇在该群落中占据绝对优势,密度(220 ± 126)株/m²,盖度(85 ± 15)%。主要伴生种有翅碱蓬(密度(11 ± 23)株/m²,盖度(2 ± 3)%)、柽柳(密度(5 ± 8)株

100/m², 盖度(2 ± 3)%。偶见香蒲(*Typha orientalis*)、荻、旱柳、穗状狐尾藻、鳢肠、碱菀等伴生。该群落主要分布在黄河河口盐沼潮间带上带及潮上带地区。

(5) 群落 E 穗状狐尾藻 + 芦苇群落(Ass. *Myriophyllum spicatum* + *Phragmites australis*)。穗状狐尾藻密度(8 ± 3)株/m², 盖度(58 ± 24)%; 芦苇密度(114 ± 160)株/m², 盖度(35 ± 31)%。群落中少有荻、香蒲和柽柳伴生。该群落主要分布在黄河河口盐沼潮上带常年积水的湖库和池塘等。

(6) 群落 F 旱柳-芦苇 + 荻群落(Ass. *Phragmites australis* + *Triarrhena sacchariflora*-*Salix matsudana*)。芦苇密度(116 ± 172)株/m², 盖度(43 ± 20)%; 荻密度(19 ± 12)株/m², 盖度(39 ± 19)%; 旱柳密度(12 ± 14)株/225m², 盖度(20 ± 28)%。群落主要伴生种有罗布麻(密度(3 ± 8)株/m², 盖度(5 ± 11)%、假苇拂子茅(密度(3 ± 5)株/m², 盖度(4 ± 7)%等。香蒲、碱菀、罗布麻、柽柳、苣荬菜、碱蓬等有稀少分布。该群落类型主要分布在黄河 1976 ~ 1999 故道流路和现流路河道漫滩地区。

表 2 不同群落类型土壤化学因子的平均值及方差检验

Table 2 Mean ± standard deviation and ANOVA *F*-ratio and *P* values of the soil chemistry variables in the sites of different vegetation types obtained by TWINSpan

土壤化学因子 Soil chemical variables	植物群落类型 Vegetation types						方差分析 ANOVA	
	A (n = 15)	B (n = 20)	C (n = 8)	D (n = 11)	E (n = 6)	F (n = 7)	<i>F</i> -ratio	<i>P</i>
pH	7.99 ± 0.51	8.55 ± 0.56	7.86 ± 0.57	8.08 ± 0.65	7.68 ± 0.64	7.38 ± 0.47	5.902	0.000
TP (g/kg)	0.63 ± 0.06	0.60 ± 0.10	0.56 ± 0.14	0.60 ± 0.08	0.53 ± 0.16	0.51 ± 0.14	1.739	0.139
TN (g/kg)	1.78 ± 0.44	1.64 ± 0.49	1.70 ± 0.43	1.50 ± 0.39	1.36 ± 0.32	1.44 ± 0.33	1.302	0.275
S (g/kg)	17.77 ± 5.83	6.48 ± 4.23	5.00 ± 1.07	2.23 ± 1.71	1.25 ± 0.52	1.93 ± 0.67	34.230	0.000
Na ⁺ (g/kg)	4.66 ± 2.08	2.14 ± 1.37	1.59 ± 0.65	0.63 ± 0.47	0.32 ± 0.12	0.44 ± 0.19	19.446	0.000
Ca ²⁺ (g/kg)	0.59 ± 0.41	0.18 ± 0.21	0.54 ± 0.16	0.15 ± 0.10	0.09 ± 0.06	0.20 ± 0.09	7.320	0.000
Mg ²⁺ (g/kg)	0.37 ± 0.21	0.10 ± 0.10	0.41 ± 0.26	0.14 ± 0.15	0.05 ± 0.06	0.08 ± 0.04	10.093	0.000
K ⁺ (g/kg)	0.77 ± 0.44	0.51 ± 0.18	0.31 ± 0.22	0.21 ± 0.12	0.15 ± 0.08	0.15 ± 0.09	10.856	0.000
Cl ⁻ (g/kg)	4.44 ± 1.43	2.48 ± 2.55	2.47 ± 1.30	0.95 ± 1.12	0.53 ± 0.35	1.40 ± 0.66	7.703	0.000
SOM (g/kg)	6.90 ± 4.26	5.55 ± 2.69	5.27 ± 3.39	5.57 ± 4.01	6.16 ± 4.87	5.01 ± 3.27	0.408	0.842

3.2 土壤化学因子与黄河河口盐沼植被分布的相关关系

CCA 排序的前两个轴只保留了物种数据总方差的 26.6%, 因此分析中可能丢失了很大一部分的物种信息。但前两轴的物种与环境相关系数相当高, 共解释了物种-环境关系总方差的 74.8% (表 3)。Gauch (1982) 指出, 如果前 3 个主要特征向量的方差占总方差的 40% 以上, 则排序效果是满意的^[25]。因此, 只保留 CCA 的前两轴, 就能很好地反映黄河河口盐沼植被与土壤化学因子之间的关系。

在 CCA 三序图中, 土壤化学因子用带箭头的连线表示, 连线的长短表示植物种类分布与该因子关系的大小, 箭头所处的象限表示土壤化学因子与排序轴之间的正负相关性, 箭头连线与排序轴的夹角表示该因子与排序轴相关性的强弱。从图 1 和表 4 中可以看出, CCA 第一排序轴主要与土壤盐分及各种离子含量相关, 与 S ($r = 0.804$, $P < 0.001$)、Na⁺ ($r = 0.801$, $P < 0.001$)、K⁺ ($r = 0.723$, $P < 0.001$)、Cl⁻ ($r = 0.625$, $P < 0.001$) 相关关系最为密切, 与第一排序轴显著相关但相关关系较弱的有 TN ($r = 0.368$, $P < 0.01$)、Ca²⁺ ($r = 0.382$, $P < 0.01$)、Mg²⁺ ($r = 0.358$, $P < 0.01$)、TP ($r = 0.302$, $P < 0.05$)、pH ($r = 0.305$, $P < 0.05$); 而第二排序轴主要与 pH ($r = -0.542$, $P < 0.001$) 相关, 与其他土壤化学因子均无显著相关关系。

黄河河口盐沼土壤盐分的主要存在形式是 NaCl 和 KCl^[22]。Pearson 相关分析结果 (表 5) 也表明, 土壤盐分与 Na⁺、K⁺、Cl⁻ 含量等存在十分显著的线性关系, 土壤盐分 S 的变化能够表征 Na⁺、K⁺、Cl⁻ 变异的绝大部分 (见表 5 中的相关系数)。Ca²⁺、Mg²⁺ 也与土壤盐分 S 呈极其显著的相关关系, 但土壤盐分 S 解释 Ca²⁺、Mg²⁺ 变异的能力有限。TN、pH 等也与第一轴显著相关, 但土壤盐分显然起着决定性作用。因此, 根据 CCA 排序结果, 并结合土壤化学因子之间的相关关系, 土壤盐分 S 和土壤 pH 是土壤化学因子中影响黄河三角洲湿地植被分布的关键因子。

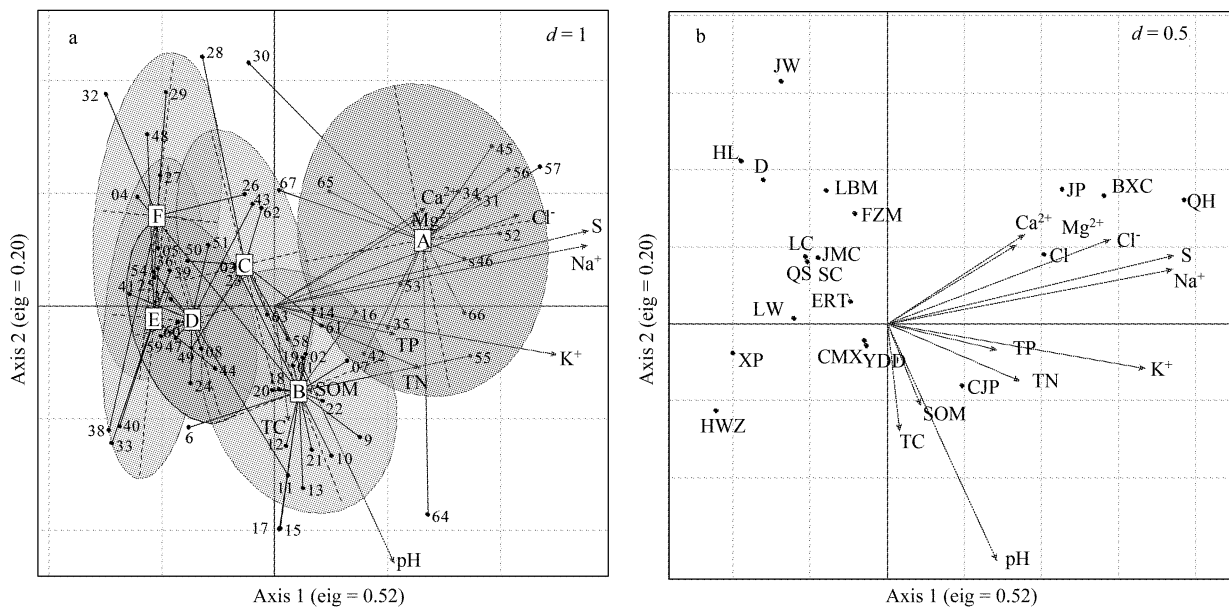


图1 CCA 双序图

Fig. 1 CCA biplot of sampling sites and soil chemistry factors

表3 CCA 排序前两轴的特征值、物种-环境相关性和累计百分比方差

Table 3 Eigenvalues, species-environment correlations and cumulative percentage variance for the first two axes of CCA

项目 Item	轴 Axes			
	1	2	3	4
特征值 Eigenvalues	0.521	0.204	0.110	0.052
物种-环境相关性 Species-environment correlations	0.879	0.719	0.486	0.427
累计百分比方差 Cumulative percentage variance				
物种数据 of species data	19.1	26.6	30.6	32.5
物种-环境关系 of species-environment relation	53.7	74.8	86.1	91.5

表4 CCA 前两轴与土壤化学因子的相关性

Table 4 Intra-set correlation of the soil chemistry factors with the first two axis of CCA

轴 Axis	pH	TP (g/kg)	TN (g/kg)	TC (g/kg)	S (g/kg)	Na ⁺ (g/kg)	Ca ²⁺ (g/kg)	Mg ²⁺ (g/kg)	K ⁺ (g/kg)	Cl ⁻ (g/kg)	SOM (g/kg)
Axis 1	0.305 *	0.302 *	0.368 **	0.034	0.804 ***	0.801 ***	0.382 **	0.358 **	0.723 ***	0.625 ***	0.092
Axis 2	-0.542 ***	-0.058	-0.131	-0.239	0.157	0.126	0.203	0.180	-0.103	0.192	-0.180

***: $P < 0.001$; **: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$

可以根据 CCA 三序图同时分析物种、样地与各土壤化学因子之间的关系。在分析植物种类和土壤化学因子之间的关系时,可以作出某一植物种类与该因子连线的垂直线,垂直线与环境因子连线相交点离箭头越近,表示该植物种与该因子的正相关性越大,处于另一端的则表示与该因子具有的负相关性越大;分析样地与土壤化学因子之间的相关关系时可以采用类似的方法^[26]。

由 TWINSpan 划分而得的各种群落类型在排序图上虽然有交叉重叠,但它们的相对位置仍然可从排序图中看出(图 1a)。以盐生植物为主的群落类型 A 的各个样地与土壤盐分 S、Na⁺、K⁺、Cl⁻ 含量及中等的土壤 pH 相对应,位于排序图的右上方。E、D 两个群落类型的各样地则主要集中分布在第一排序轴的左端,表征了这些样地土壤低盐分和低 Na⁺、K⁺、Cl⁻ 含量的特征。B 群落类型的各样地由于 pH 较高,则主要分布于第二排序轴的下方。C、F 两个群落类型与较低的土壤 pH 与中等的土壤盐分对应,位于排序图的左上方。

表 5 土壤化学因子之间的 Pearson 相关系数
Table 5 Pearson correlation coefficients of soil chemistry factors

	pH	TP	TN	S	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Cl ⁻	SOM
pH	1									
TP	0.323**	1								
TN	0.246*	0.270*	1							
S	0.091	0.177	0.301*	1						
Na ⁺	0.139	0.148	0.288*	0.951***	1					
Ca ²⁺	-0.140	0.167	0.376*	0.465***	0.349**	1				
Mg ²⁺	-0.104	0.203	0.364**	0.455***	0.384**	0.877***	1			
K ⁺	0.344**	0.316**	0.410**	0.802***	0.827***	0.262*	0.313*	1		
Cl ⁻	-0.117	-0.067	-0.025	0.718***	0.767***	0.256*	0.323**	0.488***	1	
SOM	-0.143	0.200	0.417***	0.155	0.077	0.282*	0.279*	0.114	0.078	1

$P < 0.001$; **, $P < 0.01$; *, $P < 0.05$

从各植物种的 CCA 排序(图 1b)来看,青蒿、补血草、柽柳、碱蓬等位于排序图的左侧偏上,这显然与其生境土壤盐分 S、Na⁺、K⁺、Cl⁻ 等的高含量有关,但其土壤 pH 并不高。穗状狐尾藻、香蒲位于第一排序轴的左端偏下,主要与低土壤盐分 S、Na⁺、K⁺、Cl⁻ 含量相对应,旱柳、荻、碱菀等位于排序图的左上部,与土壤 S、Na⁺、K⁺、Cl⁻ 含量、pH 等为负相关。翅碱蓬单独位于排序图的右下部,这与翅碱蓬土壤高 pH 有关。排序图中部地区的植物种鹅绒藤、草木犀、野大豆等则属于土壤盐分和土壤 pH 梯度上的过渡类型。

3.3 土壤化学因子与黄河河口盐沼植被多样性的相关关系

根据 67 个样地的 R 、 H' 、 E 的计算结果,分析由 TWINSpan 划分而得的各个植物群落类型的多样性(图 2)及物种多样性与土壤化学因子之间的相关关系(表 6)。

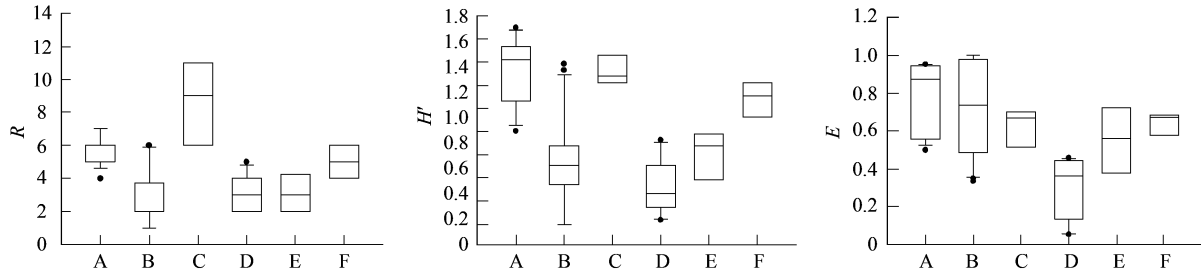


图 2 不同群落类型的物种丰富度(R)、香农-维纳多样性(H')和物种均匀度(E)箱式分布图

Fig. 2 The box plots of species richness (R), Shannon-Weiner diversity (H') and species evenness (E) of different vegetation types clustered by TWINSpan

位于排序图中部的群落类型 C 具有最高的平均物种丰富度指数 R 、平均香农维纳多样性指数 H' , 该群落类型的土壤盐分和土壤 pH 相对其他群落类型适中。土壤 pH 和土壤盐分较高的群落类型 B 平均物种丰富度 R 最低, H' 也较低, 但 E 相对较高。平均土壤盐分最高的群落类型 A 的 R 、 H' 、 E 相对 B、D、E 和 F 群落类型都较高。以芦苇为单优势种的群落类型 D 和以穗状狐尾藻和芦苇为共优势种的群落类型 E 的 R 、 H' 、 E 均较低。

Spearman 相关分析结果(表 6)表明, 物种丰富度指数 R 与 Ca^{2+} ($r = -0.741$, $P < 0.001$)、 Mg^{2+} ($r = -0.684$, $P < 0.001$) 相关关系最为显著, 与 pH ($r = -0.401$, $P < 0.01$)、S ($r = -0.326$, $P < 0.001$)、Cl⁻ ($r = -0.332$, $P < 0.001$) 也显著相关; 香农维纳多样性指数 H' 与 Ca^{2+} ($r = -0.668$, $P < 0.001$)、 Mg^{2+} ($r = -0.595$, $P < 0.001$)、S ($r = -0.426$, $P < 0.001$)、Cl⁻ ($r = -0.488$, $P < 0.001$) 相关关系最为显著, 与 pH ($r = -0.401$, $P < 0.01$)、Na⁺ ($r = -0.376$, $P < 0.01$) 也显著相关; 物种均匀度指数 E 与 TP ($r = -0.284$, $P < 0.05$)、S ($r = -0.262$, $P < 0.05$)、Na⁺ ($r = -0.247$, $P < 0.05$)、K⁺ ($r = -0.289$, $P < 0.05$)、Cl⁻ ($r = -0.267$, $P < 0.05$) 存在显著相关性。

表6 物种丰富度(R), 香农维纳多样性(H'), 物种均匀度(E)与土壤化学因子之间的 Spearman 相关系数Table 6 Spearman rank correlations of species richness (R), Shannon-Weiner diversity index (H'), evenness (E) and soil chemistry factors

	pH	TP	TN	S	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Cl ⁻	SOM
H'	-0.361 **	-0.024	0.151	0.426 ***	0.376 **	0.668 ***	0.595 ***	0.068	0.488 ***	-0.012
E	0.086	0.284 *	0.085	0.262 *	0.247 *	0.102	0.074	0.289 *	0.267 *	-0.122
R	-0.401 **	-0.081	0.174	0.326 **	0.271 *	0.741 ***	0.684 ***	-0.065	0.332 **	0.091

***, $P < 0.001$; **, $P < 0.01$; *, $P < 0.05$

4 讨论

4.1 土壤化学因子与黄河河口盐沼植被分布的相关关系

土壤化学因子与植被分布的相关关系已经被广泛讨论^[27-31]。一些盐沼湿地的具体研究也证明了土壤化学因子在影响滨海盐沼植被的分布上起着关键作用^[17, 32-34]。本文中选择土壤盐分、pH、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Cl⁻、TN、TP、SOM 等指标分析了土壤化学因子对黄河河口盐沼植被空间分布及多样性的影响,分析结论进一步证明了这一点。

黄河河口滨海盐沼和世界上其他地区的盐沼湿地一样,土壤盐分是影响这一地区植被分布的关键因子^[18, 33]。由 TWINSpan 划分而得的各种不同的群落类型各自分布在其适宜的盐分范围内。由怪柳、青蒿、补血草、碱蓬、翅碱蓬以及以这些植物种为主所组成的群落 A 耐盐能力最强;以香蒲、穗状狐尾藻、芦苇、早柳、荻以及以这些植物种为主的群落类型 E 和 F 耐盐能力最差;其他植物种和群落类型则属于过渡类型。它们在适宜土壤盐分上的差异可以从它们在 CCA 排序图上的空间分布明显看出。

除土壤盐分梯度外,土壤 pH 也对黄河河口盐沼植被分布起着重要作用,这一点可以从 pH 与 CCA 第二排序轴的紧密关系看出。翅碱蓬耐碱性极强,从 CCA 排序图中可以看出(图 1),以翅碱蓬为单优势种的群落类型 B 与土壤 pH 呈现为正相关。相反,以芦苇、荻、早柳为优势种的群落类型 F 与土壤 pH 呈负相关关系。国内外也有一些研究证明了盐沼植被分布和 pH 之间存在着密切关系^[17, 32]。但 Shaltout 在分析尼罗河口盐沼植被与环境因子之间的关系时,认为其植被分布与土壤 pH 之间无显著关系^[18]。

盐沼植被分布还可能与土壤化学因子之中的 TN、TP、SOM 等养分因子存在一定的关系^[17, 18]。本研究虽然也说明了 TN、TP 与黄河河口盐沼植被分布有显著相关关系(表 4),但却没有发现土壤 SOM 与植被分布的显著关系。黄河三角洲各种类型植物群落的有机质含量都较低,这可能是由于研究区内大多为新生湿地,成土年龄短所致^[35]。但相对于土壤盐分和 pH 而言,这些土壤化学因子的作用显然是较弱的。

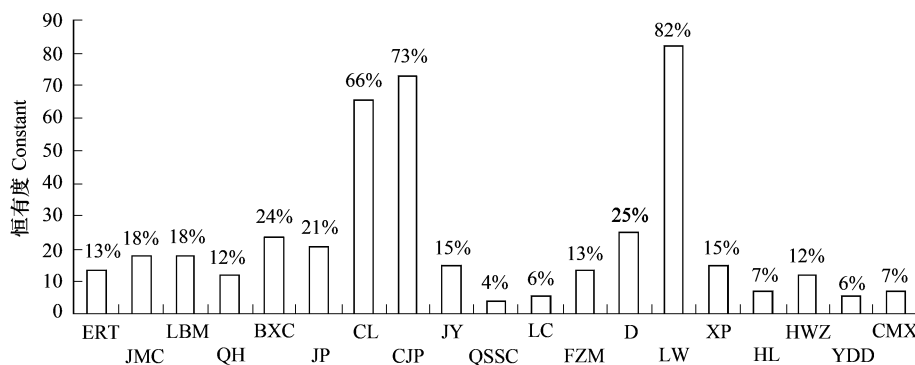


图3 19个植物种在67个样地中的恒有度

Fig. 3 The constants of 19 plant species in 67 sampling sites

4.2 土壤化学因子与黄河河口盐沼植物多样性的相关关系

盐沼植被往往具有较低的物种多样性^[34, 36]。高盐土壤环境限制了大多数植物种在这一类地区的分布、繁殖和生长^[18, 37]。黄河河口盐沼总体上表现出植物物种的低多样性。虽然有相关研究表明黄河三角洲湿

地共有 193 种高等植物^[21],本研究在野外考察中也发现了约 130 余种,但这些绝大多数只生长在道路两旁,或极其偶见。在所调查的 67 个 50m × 50m 样地中仅发现了 19 个植物种(表 1)。这 19 个植物种也仅有翅碱蓬、柽柳、芦苇 3 种植物恒有度较高,而其他 16 种恒有度均不高于 25% (图 3)。

但黄河河口盐沼的植物多样性并没有呈现出与土壤盐分很好的负相关关系。物种丰富度指数 R , 香农维纳多样性指数 H' , 物种均匀度 E 均与土壤盐分呈现显著正相关关系。这和目前的一些研究结论并不一致^[18,38]。从表 2 和图 2 可以看出,土壤盐分最高的群落类型 A 中柽柳、补血草、翅碱蓬、碱蓬、青蒿等盐生植物较为丰富,平均物种丰富度 $R(5.5)$ 和平均香农维纳多样性 $H'(1.31)$ 要高于 C 之外的所有群落类型。而土壤盐分相对较低的 B、D、E 3 个群落物种均非常单一。群落类型 B 是中度盐分条件下的翅碱蓬单优群落,一般仅在部分样地中存在少量的芦苇和柽柳伴生,伴生种一般不超过 2 种。这种群落一般广泛分布于黄河入海口新淤积的泥滩上,植物群落仍处于演替的初期。其他一些滨海盐沼植被多样性的研究中也曾多次报告了类似的群落类型^[34,39],但与黄河河口的翅碱蓬单优群落类型(B)不同的是,这些群落生长环境的土壤盐分要远为更高。这就说明了黄河河口淡水补给对河口附近土壤环境的关键作用。群落类型 D 是芦苇的单优群落,除柽柳外一般不存在其他伴生种。芦苇具有一定的耐盐能力,容易在适宜的条件下形成单优群落^[40]。高大的芦苇所形成的郁闭使其他物种的萌发和生长更加困难,这往往导致群落物种多样性的降低^[18,41]。E 群落类型土壤盐分最低,是穗状狐尾藻和芦苇的共优群落,穗状狐尾藻一般覆盖整个水面,芦苇斑块状分布其中,很少发现其他伴生种。

黄河河口盐沼植被的物种丰富度 R 、香农维纳多样性 H' 与土壤 pH 呈现出十分显著的负相关关系。王顺忠等、刘庆在我国青海湖地区盐沼的研究也证明了植物物种丰富度与土壤 pH 负相关^[42,43]。但 pH 与植物物种多样性的关系显然受到了所分析的 pH 梯度大小的影响^[44,45]。当 pH 梯度在 2 ~ 8 之间时,土壤 pH 与物种丰富度表现出很典型的单峰关系^[45~48]; pH 处于较低水平时,土壤 pH 与物种丰富度的关系一般为线性正相关^[44,48~50],而当 pH 处于较高水平时,二者呈现为线性负相关^[50]。根据 67 个样地土壤 pH 的分析结果,黄河河口盐沼的土壤 pH 在 6.62 ~ 9.46 之间,平均值 8.07,土壤 pH 与物种丰富度之间的负相关关系进一步证明了上述研究结论。

关于物种多样性与土壤 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量的研究目前还较少。黄河河口盐沼的物种丰富度 R 、香农维纳多样性 H' 与土壤 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量呈现极为显著正相关关系。Roem 等研究认为增加土壤 Ca^{2+} 会提高植物物种多样性(衡量指标为物种丰富度 R)^[49]。在 R 和 H' 都较大的群落类型 A 中,土壤盐分含量很高,而 Ca^{2+} 是在盐胁迫中维持植物体内阳离子稳态的关键,增加 Ca^{2+} 可以缓解金属离子对植物的毒害,从而可能有利于植物抵抗盐害^[51,52]。这也可能是为什么在土壤盐分最高的群落类型 A 中仍能有较高的 R 、 H' 的原因之一。 Mg^{2+} 是植物必需的营养元素,在 Na^+ 较高时, Na^+ 可以刺激植物对 Mg^{2+} 的吸收^[53],这也可能有利于植物抵抗盐害。这就可能使得在土壤盐分很高时植物群落仍能较好的生长并呈现多样化。但张林静等在研究新疆阜康绿洲荒漠过渡带植物群落物种多样性与土壤环境因子的耦合关系时,指出不同土壤深度 Mg^{2+} 含量与物种多样性指数的关系不尽相同,而土壤 Ca^{2+} 含量与物种多样性指数无显著相关关系^[54]。也有研究表明物种丰富度与土壤 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量均无显著相关关系^[55]。因此,物种多样性与土壤 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量的关系还有待深入研究。

References:

- [1] Ukpong I E. salinity in the Calabar mangrove swamp, Nigeria. *Mangroves and Salt Marshes*, 1997, 1; 211 – 218.
- [2] Abd El-Ghani M M, Amer W M. Soil vegetation relationships in a coastal desert plain of southern Sinai, Egypt. *Journal of Arid Environments*, 2003, 55; 607 – 628.
- [3] El-Demerdash M A, Hegazyt A K, Zilay A M. Vegetation-soil relationships in Tihamah coastal plains of Jazan region, Saudi Arabia. *Journal of Arid Environments*, 1995, 30; 161 – 174.
- [4] Critchley C N R, Chambers B J, Fowbert J A, *et al.* Plant species richness, functional type and soil properties of grasslands and allied vegetation in English environmentally sensitive areas. *Grass and Forage Science*, 2002, 57; 82 – 92.

- [5] Jafaria M, Chahouki M A Z, Tavili A, *et al.* Effective environmental factors in the distribution of vegetation types in Poshtkouh rangelands of Yazd Province (Iran). *Journal of Arid Environments*, 2004, 56: 627 — 641.
- [6] Li Z J, Chen X L, Zheng H L, *et al.* *Ecology*, 2nd. Beijing: Science Press, 2004.
- [7] Bruelheide H, Udelhoven P. Correspondence of the fine-scale spatial variation in soil chemistry and the herb layer vegetation in beech forests. *Forest Ecology and Management*, 2005, 210: 205 — 223.
- [8] Bninet J, Falkengren-Grenip U, Tyler G. Pattern and dynamics of the ground vegetation in south Swedish *Carpinus betulus* forests: importance of soil chemistry and management. *Ecography*, 1997, 20: 513 — 520.
- [9] Adams D A. Factors influencing vascular plant zonation in North Carolina salt marshes. *Ecology*, 1963, 44, 445 — 456.
- [10] Huckle J M, Potter J A, Marrs R H. Influence of environmental factors on the growth and interactions between salt marsh plants: effects of salinity, sediment and waterlogging. *Journal of Ecology*, 2000, 88, 492 — 505.
- [11] Pennings S C, Callaway R M. Salt marsh plant zonation: the relative importance of competition and physical factors. *Ecology*, 1992, 73, 681 — 690.
- [12] Silvestri S, Defina A, Marani M. Tidal regime, salinity and salt marsh plant zonation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 62: 119 — 130.
- [13] Vince S W, Snow A A. Plant zonation in an Alaskan salt marsh. I. distribution, abundance and environmental factors. *Journal of Ecology*, 1984, 72: 651 — 667.
- [14] Snow A A, Vince S W. Plant zonation in an Alaskan salt marsh. II. an experimental study of the role of edaphic conditions. *Journal of Ecology*, 1984, 72: 669 — 684.
- [15] Álvarez-Rogel J, Silla R O, Ariza F A. Edaphic characterization and soil ionic composition influencing plant zonation in a semiarid Mediterranean salt marsh. *Geoderma*, 2001, 99: 81 — 98.
- [16] van Wijnen H J, Bakker J P. Nitrogen and phosphorous limitation in a coastal barrier salt marsh: the implications for vegetation succession. *Journal of Ecology*, 1999, 87: 265 — 272.
- [17] Funk D W, Noel L E, Freedman A H. Environmental gradients, plant distribution, and species richness in arctic salt marsh near Prudhoe Bay, Alaska. *Wetlands Ecology and Management*, 2004, 12: 215 — 233.
- [18] Shaltout K H, El-Kady H E, Al-Sodany Y M. Vegetation analysis of the Mediterranean region of Nile Delta. *Vegetatio*, 1995, 116: 73 — 83.
- [19] Guo W H, Wang R Q, Zhou S L, *et al.* Genetic diversity and clonal structure of *Phragmites australis* in the Yellow River delta of China. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2003, 31: 1093 — 1109.
- [20] Zhao K F, Feng L T, Zhang S Q. Adaptive physiology of different ecotypes of *Phragmites communis* to salinity in the Yellow River Delta. I. osmotic and their contributions to the osmotic adjustment. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(5): 463 — 469.
- [21] Shao Q L, Xie X D, Li F Z. Studies of flora of Yellow River Delta National Reserve Area. *Acta Bot. Boreal-Occident. Sin.*, 2002, 22(4): 947 — 951.
- [22] Wu Z F, Zhao S L, Zhang X L. Studies on interrelation between salt vegetation soil salinity in the Yellow River Delta. *Acta Phytocologica Sinica*, 1994, 18(2): 184 — 193.
- [23] Xiao D N, Hu Y M, Li X Z. *Landscape ecology researches on deltaic wetlands around Bohai Sea*. Beijing: Science Press, 2001.
- [24] Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [25] Gauch H G. *Trans. Yang C. Multivariate Analysis in Community Ecology*. Beijing: Science Press, 1989.
- [26] Zhang J T. *Quantitative Ecology*. Beijing: Science Press, 2004.
- [27] Abdel-Razik M, Abdel-Aziz M, Ayyad M. Environmental gradients and species distribution in a transect at Omayed (Egypt). *Journal of Arid Environment*, 1984, 7: 337 — 352.
- [28] Schlesinger W, Raikes J, Hartley A, *et al.* On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems. *Ecology*, 1996, 77, 364 — 374.
- [29] Hook P B, Burke I C, Lauenroth W K. Heterogeneity of soil and plant N and C associated with individual plants and opening in North America short grass steppe. *Plant Soil*, 1991, 138: 247 — 256.
- [30] Omer L St. . Small-scale resource heterogeneity among halophytic plant species in an upper salt marsh community. *Aquatic Botany*, 2004, 78: 337 — 448.
- [31] Lu T, Ma K M, Zhang W H, *et al.* Differential responses of shrubs and herbs present at the upper Minjiang River basin (Tibetan Plateau) to several soil variables. *Journal of Arid Environments*, 2006, 67: 373 — 379.
- [32] Álvarez-Rogel J, Jiménez-Cárceles F J, Roca M J, *et al.* Changes in soils and vegetation in a Mediterranean coastal salt marsh impacted by human activities. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 73: 510 — 526.
- [33] Caçador I, Tibério S, Cabral H N. Species zonation in Corroios salt marsh in the Tagus estuary (Portugal) and its dynamics in the past fifty years. *Hydrobiologia*, 2007, 587: 205 — 211.
- [34] Asril Y, Ghorbanli M. The halophilous vegetation of the Orumieh lake salt marshes, NW. Iran. *Plant Ecology*, 1997, 132: 155 — 170.
- [35] Tang N, Cui B S, Zhao X S. The restoration of reed (*Phragmites australis*) wetland in the Yellow River Delta. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2616 — 2624.
- [36] Keddy P A. *Wetland Ecology: Principles and Conservation*. Cambridge University Press, 2000.

- [37] Ramberg L, Hancock P, Lindholm M, *et al.* Species diversity of the Okavango Delta, Botswana. *Aquatic Sciences*, 2006, 68: 310—337.
- [38] Gough L G, Grace J B, Taylor K L. The relationship between species richness and community biomass: the important of environmental variables. *Oikos*, 1994, 70: 271—279.
- [39] Dalby D H. Salt-marsh vegetation in the Shetland Islands. *Vegetatio*, 1985, 61: 45—54.
- [40] Holzner M. Weed species and weed communities. *Vegetatio*, 1978, 38: 13—20.
- [41] Shaltout K H, El-Shiekh M A. Vegetation-environment relations along water courses in the Nile Delta region. *Journal of Vegetation Science*, 1993, 4: 567—570.
- [42] Wang S Z, Chen G C, Bai Y P, *et al.* Interrelation between plant species diversity and soil environmental factors in bird island of Qinghai Lake. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16 (1): 186—188.
- [43] Liu Q. The species richness and biomass of plant communities a long environmental gradients in the north shore of Qinghai Lake. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2000, 20 (2): 259—267.
- [44] Schuster B, Diekmann M. Species richness and environmental correlates in deciduous forests of Northwest Germany. *Forest Ecology and Management*, 2005, 206: 197—205.
- [45] Dupré C, Wessberg C, Diekmann M. Species richness in deciduous forests: effects of species pools and environmental variables. *Journal of Vegetation Science*, 2002, 13: 505—516.
- [46] Pausas J G. Species richness patterns in the understory of Pyrenean *Pinus sylvestris* forest. *Journal of Vegetation Science*, 1994, 5: 517—524.
- [47] Schuster B, Diekmann M. Changes in species density along the soil pH gradient-evidence from German plant communities. *Folia Geobotany*, 2003, 38: 367—379.
- [48] Gough L, Shaver G R, Carroll J, *et al.* Vascular plant species richness in Alaskan arctic tundra: the importance of soil pH. *Journal of Ecology*, 2000, 88: 54—66.
- [49] Roem W J, Klees H, Berendse F. Effects of nutrient addition and acidification on plant species diversity and seed germination in heathland. *Journal of Applied Ecology*, 2002, 39: 937—948.
- [50] Pärtel M. Local plant diversity patterns and evolutionary history at the regional scale. *Ecology*, 2002, 83: 2361—2366.
- [51] Li Y P, Lin P. Impact of salinity on accumulation of several metal elements in *Bruguiera gymnorrhiza* seedlings and Ca effect. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11 (2): 177—180.
- [52] Ge Y, Li J D. A study on Ca, Mg content in *Aneurolepidium chinense* grassland in Northeast China. *Acta Phytocologica ET Geobotanica Sinica*, 1993, 17 (3): 264—272.
- [53] Hou X Y. *Vegetation Geography of China and Chemical Composition of Their Dominant Plants*. Beijing: Science Press, 1982.
- [54] Zhang L J, Yue M, Gu F X, *et al.* Coupling relationship between plant communities' species diversity and soil factors in ecotone between desert and oasis in Fukang, Xinjiang. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13 (6): 658—662.
- [55] Weiher E, Forbes S, Schauwecker T, *et al.* Multivariate control of plant species richness and community biomass in blackland prairie. *Oikos*, 2004, 106: 151—157.

参考文献:

- [6] 李振基, 陈小麟, 郑海雷. 生态学(第二版). 北京: 科学出版社, 2004.
- [20] 赵可夫, 冯立田, 张圣强. 黄河三角洲不同生态型芦苇对盐度适应生理的研究. I. 渗透调节物质及其贡献. *生态学报*, 18 (5): 463—469.
- [21] 邵秋玲, 解小丁, 李法曾. 黄河三角洲国家级自然保护区植物区系研究. *西北植物学报*, 2002, 22 (4): 947—951.
- [22] 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. *植物生态学报*, 1994, 18 (2): 184—193.
- [23] 肖笃宁, 胡远满, 李秀珍. 环渤海三角洲湿地的景观生态学研究. 北京: 科学出版社, 2001.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [25] Gauch H G. 杨持译. 群落生态学中的多元分析. 北京: 科学出版社, 1989.
- [26] 张金屯. 数量生态学. 北京: 科学出版社, 2004.
- [35] 唐娜, 崔保山, 赵欣胜. 黄河三角洲芦苇湿地的恢复. *生态学报*, 2006, 26 (8): 2616—2624.
- [42] 王顺忠, 陈桂琛, 柏玉平, 等. 青海湖鸟岛地区植物群落物种多样性与土壤环境因子的关系. *应用生态学报*, 2005, 16 (1): 186—188.
- [43] 刘庆. 青海湖北岸环境梯度上植物群落的生物量与物种多样性及其相互关系. *西北植物学报*, 2000, 20 (2): 259—267.
- [51] 李银鹏, 林鹏. 盐度对木橐幼苗某些金属元素累积的影响及钙的效应. *应用生态学报*, 2000, 11 (2): 177—180.
- [52] 葛滢, 李建东. 东北羊草草地钙、镁含量特征的研究. *植物生态学与地植物学学报*, 1993, 17 (3): 264—272.
- [53] 侯学煜. 中国植被地理及优势植物化学成分. 北京: 科学出版社, 1982.
- [54] 张林静, 岳明, 顾峰雪, 等. 新疆阜康绿洲荒漠过渡带植物群落物种多样性与土壤环境因子的耦合关系. *应用生态学报*, 2002, 13 (6): 658—662.