

山东滨海盐渍区植物群落与土壤化学因子的关系

尹德洁 张洁 荆瑞 董丽*

(国家花卉工程技术研究中心/城乡生态环境北京实验室/北京林业大学园林学院, 北京 100083)

摘要 在山东滨海盐渍区选取 81 个样方进行植物群落调查,对土壤化学性质进行分析,研究耐盐植物分布与土壤 pH、可溶性盐总量、全氮、全磷、有机质、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 12 个土壤化学因子之间的关系.结果表明:共记录耐盐植物 30 科 67 属 85 种,排名前三的优势科为菊科、禾本科、藜科.群落类型分为 4 类,分别是芦苇-白茅+茵陈蒿群落、盐地碱蓬+芦苇-茵陈蒿+地肤群落、芦苇-香蒲+罗布麻群落和芦苇-罗布麻群落.CCA 排序表明,土壤可溶性盐总量和水溶性离子含量是影响该区域耐盐植被分布的关键土壤化学因子,其次是土壤全氮含量.优势种为芦苇,同时伴生白茅和茵陈蒿的群落在 4 个群落类型中具有较丰富的物种多样性,所蕴含的耐盐植物资源丰富.群落的物种多样性与土壤可溶性盐总量和水溶性盐离子含量呈显著负相关,高盐分土壤会降低群落的物种多样性指数,影响群落的物种多样性.

关键词 滨海盐渍区;土壤化学因子;空间异质性;耐盐植物

Relationships between plant community and soil chemical factors in coastal saline area of Shandong, China. YIN De-jie, ZHANG Jie, JING Rui, DONG Li* (*National Engineering Research Center for Floriculture/Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment/College of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China*).

Abstract: To reveal the correlation between plant communities and soil chemical factors (pH, the total amount of soil soluble salt, TN, TP, SOM, K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) in Shandong coastal saline area, a field investigation of 81 samples was carried out and the chemical properties of the soil were analyzed. The results showed that a total of 85 species, 67 genera and 30 families of salt-tolerant plants were recorded. The top three dominant families were Compositae, Gramineae and Chenopodiaceae. The community could be divided into four types: *Phragmites australis* - *Imperata cylindrical* + *Artemisia capillaris*, *Suaeda salsa* + *P. australis* - *A. capillaris* + *Kochia scoparia*, *P. australis* - *Typha orientalis* + *Apocynum venetum*, *P. australis* - *A. venetum*. The CCA sequencing results showed that the soil total soluble salt and water-soluble ions were the key chemical factors affecting the distribution of salt-tolerant vegetation, followed by total nitrogen content. The community of *P. australis* - *I. cylindrical* + *A. capillaris* had richest species diversity among the four community types, and the resources of salt-tolerant plants were abundant. The species diversity of plant community showed a significant negative correlation with soil total soluble salts and water soluble salt ions content. The plant community diversity index would be reduced by the high saline soil.

Key words: coastal saline area; soil chemical factor; spatial heterogeneity; salt-tolerant plant.

根据联合国粮农组织 (FAO) 统计,全球约有盐渍土 $9.54 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ^[1],我国盐渍土总面积约为 $9.9 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ^[2],其中滨海盐渍土分布广泛,主要位于长江以北沿海地区,其中山东半岛沿海地区土壤受盐

渍影响较大.

山东滨海盐渍区主要包括黄河三角洲和莱州湾南岸^[3],是我国重要的后备土地资源,同时蕴含丰富的耐盐植物资源.近年来,由于自然环境和人为开发等因素的影响,该区域内植被分布出现不同程度的退化,大量耐盐植物遭到破坏,甚至部分物种濒临消失.因此,为了更好地开发利用耐盐植物资源以及

本文由北京市共建项目资助 This work was supported by the Special Fund for Beijing Common Construction Project.

2018-03-13 Received, 2018-06-14 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dongli@bjfu.edu.cn

修复盐渍土壤,系统地调查山东滨海盐渍区的耐盐植物以及土壤生境条件,研究植物群落和土壤化学因子之间的关系,对耐盐植物的保护和利用具有重要的意义。

土壤对植物而言是非常重要的环境因子,对植物的生理和群落的分布都有重要影响^[4-5],尤其是土壤化学性质如酸碱度、盐分、养分等,是影响盐渍区植被分布多样性的关键因子^[6-8]。近年来,针对土壤化学性质和植物多样性之间的关系已有大量研究,但是研究地域多集中在山地和荒漠等内陆地区^[9-12],对于滨海盐渍区植物群落分布与土壤化学性质的相关性研究较少。

本研究以耐盐植物群落信息和土壤化学性质数据为基础,利用 TWINSpan 双向指示种分析和 CCA 典范对应分析研究山东滨海盐渍区土壤化学性质的空间异质性,及其与耐盐植物群落分布之间的关系,为保护和利用耐盐植物资源,丰富盐渍区园林绿地植物种类和修复盐渍土壤提供一定的科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

山东滨海盐渍区主要包括黄河三角洲和莱州湾南岸(117°50'—119°58' N, 36°52'—38°14' E),行政区划包括滨州市、东营市和潍坊市。其中,黄河三角洲位于渤海湾南岸和莱州湾西岸,是由黄河泥沙填充渤海凹陷而成的扇形沉积平原,土壤类型主要为潮土和盐土,该区域为暖温带大陆性季风气候,四季分明,冬冷夏热,年均温 12.1℃,年降水量 551.6 mm。莱州湾南岸是由海洋、潍河和弥河等河流共同作用形成的冲积平原,土壤类型自南向北主要为褐土、潮土和盐土,气候为暖温带大陆性季风气候,年均温 12.3℃,年降水量 613.2 mm。根据陆地和海洋相互作用的强度以及地貌,将山东滨海盐渍区划分为潮上带湿地、潮间带湿地和潮下带湿地 3 种立地类型。

该区域土壤含盐量较高,因此盐生植被群落是主要的植被类型,主要组成物种有菊科、禾本科和藜科的草本植物,如盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)、地肤(*Kochia scoparia*)、芦苇(*Phragmites australis*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、藜(*Chenopodium album*)等,以及部分能够从地下土壤吸取足够水分的乔木和灌木,如旱柳(*Salix matsudana*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)等。由于人口、资源、环境等压力的增大,盐生植被分布的部分区域存在农业开发、油田开采等人为

干扰情况。

1.2 植物群落调查

2017 年 4—8 月,对滨州市、东营市和潍坊市布设样方进行植被调查,前期考察研究区内植被、水土条件和人为干扰活动影响,选择人为干扰较少的区域进行。每个样地间隔一定距离设置 1 个 10 m × 10 m 乔灌木样方,样方的 4 个端点和对角线交点处各设置 1 个 1 m × 1 m 草本小样方,7 个样地共设样方 81 个,草本小样方 405 个(表 1 和图 1)。本研究中,涉及到的立地类型主要是潮间带湿地和潮上带湿地。其中,潮间带湿地包括的样地为黄河三角洲自然保护区和昌邑怪柳自然保护区,潮上带湿地包括的样地为徒骇河、漳卫新河、明月湖湿地、白浪河和虞河。调查每个样方中乔灌木的名称、数量、高度、冠幅、胸径(地径)、生长状况,草本植物的名称、优势

表 1 样方设置
Table 1 Design of sampling plots

市 City	样地 Sample plot	样方数量 Number of samples	样方号 Sample number
滨州 Binzhou	徒骇河 Tuhai River	14	1~14
	漳卫新河 Zhangweixin River	10	15~24
东营 Dongying	明月湖湿地 Mingyue Lake Wetland	15	25~39
	黄河三角洲自然保护区 Yellow River Delta Nature Reserve	10	40~49
潍坊 Weifang	白浪河 Bailang River	10	50~59
	昌邑怪柳自然保护区 Changyi Tamarix Natural Reserve	12	60~71
	虞河 Yuhe River	10	72~81

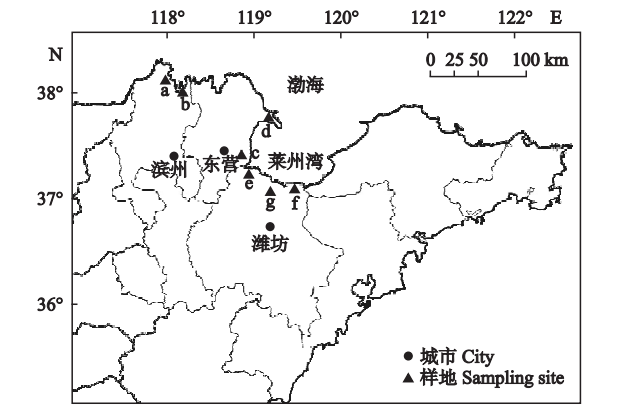


图 1 山东滨海盐渍区样地分布
Fig.1 Distribution of sampling plots in Shandong coastal saline area.
a) 徒骇河 Tuhai River; b) 漳卫新河 Zhangweixin River; c) 明月湖湿地 Mingyue Lake Wetland; d) 黄河三角洲自然保护区 Yellow River Delta Nature Reserve; e) 白浪河 Bailang River; f) 昌邑怪柳自然保护区 Changyi Tamarix Natural Reserve; g) 虞河 Yuhe River.

种、高度、盖度和密度.

采用重要值 (importance value, IV) 反映某种植物在群落中的作用和地位, 计算公式为:

乔木重要值 = (相对多度 + 相对优势度 + 相对频度) / 3

灌木重要值 = (相对多度 + 相对盖度 + 相对频度) / 3

草本重要值 = (相对密度 + 相对盖度 + 相对频度) / 3

物种多样性通过 Shannon 多样性指数 (H)、Patrick 丰富度指数 (S) 和 Pielou 均匀度指数 (E) 表示, 计算公式为:

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

式中: P_i 为物种 i 的重要值; S 为样方中出现的物种数.

$$E = H / \ln S$$

1.3 土壤化学性质测定

在植被调查的同时, 采集土样对其化学性质进行分析. 采用五点取样法取每个样方 0~20 cm 土层土样, 经过风干、磨碎和过筛后测定 pH、土壤可溶性盐总量 (S)、全氮 (TN)、全磷 (TP)、有机质 (SOM)、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 和 Cl^- 含量.

土壤 pH 采用电位法, 水土比 5 : 1; 土壤可溶性盐总量 (S) 采用电导法, 水土比 5 : 1; 全氮 (TN) 采用凯氏蒸馏法; 全磷 (TP) 采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法; 有机质 (SOM) 采用油浴加热-重铬酸钾氧化容量法; K^+ 、 Na^+ 采用原子吸收分光光度计法 (SpectAA-220, Varian, Australia); Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 采用 EDTA 滴定法; CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 采用双指示剂-中和滴定法; Cl^- 采用 $AgNO_3$ 滴定法; SO_4^{2-} 采用 EDTA 间接络合滴定法. 具体方法参见《土壤农化分析》^[13].

1.4 数据处理

为了更好地对数据进行分析, 剔除频度小于 5% 的植物物种^[14], 以物种的重要值 (IV) 建立 81×36 的样方-物种矩阵, 使用 WinTWINS 23 软件进行双向指示种 TWINSpan 分类. 用 Canoco for Windows 4.5 进行 CCA 典范对应分析, 用 CanoDraw for Windows 作图. 利用 SPSS 19.0 软件进行 Duncan 多重比较、Pearson 相关性分析、Spearman 相关性分析以及作图. 图表中数据为平均值±标准差.

2 结果与分析

2.1 耐盐植物资源分析

共调查到耐盐植物 30 科 67 属 85 种. 植物种类

数量在 2 种以上的优势科有 12 个, 以种的数量排序依次为: 菊科 (16 属 22 种)、禾本科 (10 属 11 种)、藜科 (6 属 9 种)、蓼科 (2 属 5 种)、十字花科 (3 属 4 种)、豆科 (4 属 4 种)、紫草科 (2 属 2 种)、蔷薇科 (1 属 2 种)、车前科 (1 属 2 种)、莎草科 (1 属 2 种)、锦葵科 (2 属 2 种)、香蒲科 (1 属 2 种). 种类数量在 2 种以上的优势属有 13 个, 以种的数量排序依次为: 蒿属 (5 种)、蓼属 (3 种)、藜属 (3 种)、小苦苣属 (2 种)、独行菜属 (2 种)、委陵菜属 (2 种)、碱蓬属 (2 种)、车前属 (2 种)、蒲公英属 (2 种)、藜草属 (2 种)、酸模属 (2 种)、稗属 (2 种)、香蒲属 (2 种).

频度排名前 10 的物种依次为: 芦苇、盐地碱蓬、茵陈蒿 (*Artemisia capillaris*)、鹅绒藤 (*Cynanchum chinense*)、紫花山莴苣 (*Mulgedium tataricum*)、怪柳、地肤、藜、砂引草 (*Messerschmidia sibirica*)、白茅. 重要值排名前 10 的植物依次为: 芦苇、盐地碱蓬、茵陈蒿、紫花山莴苣、白茅、地肤、砂引草、罗布麻 (*Apocynum venetum*)、鹅绒藤、怪柳.

按照生活型对该区域内耐盐植物进行分类, 乔木类耐盐植物共有 3 科 3 属 3 种, 灌木类耐盐植物共有 6 科 6 属 6 种, 草本类耐盐植物共有 22 科 58 属 76 种, 山东滨海盐渍区植物类型以草本植物为主.

2.2 植物群落类型划分

将研究区群落按照重要值划分为 4 个群落类型 (图 2):

1) 群落类型 A: 芦苇-白茅+茵陈蒿群落. 群落中芦苇占绝对优势, 同时伴生白茅和茵陈蒿. 其他植物还有紫花山莴苣、獐毛 (*Aeluropus sinensis*)、阿尔泰狗娃花 (*Heteropappus altaicus*)、盐地碱蓬、砂引草、

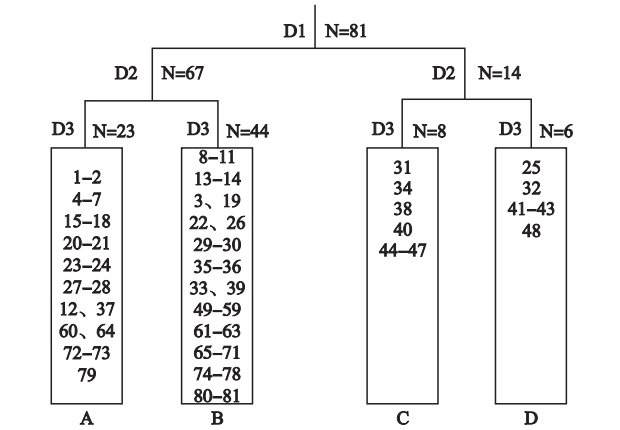


图 2 山东滨海盐渍区植物群落的 TWINSpan 分类树状图
Fig.2 Dendrogram of the TWINSpan classification of phytocoenoses in Shandong coastal saline area.
A-D: 群落类型 Community type. 下同 The same below.

扁秆藨草(*Scirpus planiculmis*)、刺儿菜(*Cirsium setosum*)等.主要分布在徒骇河、漳卫新河、明月湖湿地和虞河,主要立地类型是潮上带湿地,共包括 23 个样方.

2)群落类型 B:盐地碱蓬+芦苇-茵陈蒿+地肤群落.群落中盐地碱蓬和芦苇占绝对优势,同时伴生茵陈蒿和地肤.其他植物还有紫花山莴苣、怪柳、鹅绒藤、砂引草、藜、白茅、黄花蒿(*Artemisia annua*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、碱蓬(*Suaeda glauca*)、蒙古鸦葱(*Scorzonera mongolica*)、中亚滨藜(*Atriplex centralasiatica*)等.主要分布在徒骇河、明月湖湿地、白浪河、昌邑怪柳自然保护区、虞河,主要立地类型是潮间带湿地和潮上带湿地,共包括 44 个样方.

3)群落类型 C:芦苇-香蒲(*Typha orientalis*)+罗布麻群落.群落中芦苇占绝对优势,同时伴生香蒲和罗布麻.其他植物还有茵陈蒿、盐地碱蓬、碱蓬、二色补血草(*Limonium bicolor*)、旱柳、狗尾草、灰绿藜(*Chenopodium glaucum*)、怪柳等.主要分布在明月湖湿地和黄河三角洲自然保护区,主要立地类型是潮间带湿地和潮上带湿地,共包括 8 个样方.

4)群落类型 D:芦苇-罗布麻群落.群落中芦苇占绝对优势,同时伴生罗布麻.其他植物还有盐地碱蓬、刺儿菜、旱柳、灰绿藜、怪柳、香蒲、扁秆藨草等.主要分布在明月湖湿地和黄河三角洲自然保护区,主要立地类型是潮间带湿地和潮上带湿地,共包括 6 个样方.

2.3 植物与土壤化学因子的关系

2.3.1 不同植被群落类型土壤化学因子空间异质性

由表 2 可以看出,不同植物群落类型差异显著的

土壤化学因子为土壤可溶性盐总量、全氮、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻,表明它们是影响山东滨海盐渍区耐盐植物群落类型分布的主要因素,而其他土壤化学因子对群落类型分布的影响不显著.CO₃²⁻含量接近 0,因此忽略不计.

以芦苇为优势种,伴生香蒲和罗布麻的群落 C 和以芦苇为优势种,伴生罗布麻的群落 D 中土壤可溶性盐总量和全氮含量较高,表明这 2 个群落类型中植物可以耐受较高的土壤盐渍程度以及需要较高的氮素供应.群落 C 中 HCO₃⁻含量最高,其他离子含量较高,而群落 D 中 Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻含量最高.由土壤可溶性盐总量和水溶性盐离子含量的分析可知,群落 C 和群落 D 分布在土壤盐分、全氮含量以及 Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻含量均较高的环境中,群落中的植物可以耐受较高的土壤盐渍化水平;而以盐地碱蓬和芦苇占绝对优势,同时伴生茵陈蒿和地肤的群落 B,分布在土壤盐分含量及水溶性盐离子含量较低的环境中;以芦苇为优势种,同时伴生白茅和茵陈蒿的群落 A 为过渡类型.

2.3.2 不同立地类型土壤化学因子空间异质性 我国土壤酸碱度的分级标准如下:强酸性 pH<5.0,酸性 5.0<pH<6.5,中性 6.5<pH<7.5,碱性 7.5<pH<8.5,强碱性 pH>8.5^[15].本研究中,81 个样方土壤 pH 8.09,因此为碱性土.

由表 3 可知,潮间带湿地和潮上带湿地差异显著的土壤化学因子为 pH、土壤可溶性盐总量、全磷、Na⁺、Mg²⁺、Cl⁻、HCO₃⁻,且除 Mg²⁺外,其他土壤化学因子含量在潮上带湿地均大于潮间带湿地,说明生长在潮上带湿地的植物比潮间带湿地的植物能够

表 2 不同群落类型土壤化学因子
Table 2 Soil chemical variables in different community types

项目 Item	群落类型 Community type				方差分析 ANOVA	
	A (n=23)	B (n=44)	C (n=8)	D (n=6)	F	P
pH	8.04±0.18	8.13±0.24	8.04±0.22	8.01±0.25	1.14	0.340
S (mS · cm ⁻¹)	1.15±0.71	0.85±0.97	2.22±1.42	2.19±1.16	6.89	0.000
TN (g · kg ⁻¹)	0.38±0.15	0.31±0.13	0.44±0.27	0.43±0.15	2.76	0.048
TP (g · kg ⁻¹)	2.74±0.51	2.46±0.74	2.46±0.18	2.57±0.47	1.06	0.371
SOM (g · kg ⁻¹)	6.34±0.72	14.25±9.59	8.04±1.47	17.25±10.54	0.18	0.910
K ⁺ (g · kg ⁻¹)	0.061±0.005	0.059±0.003	0.062±0.002	0.062±0.001	2.59	0.059
Na ⁺ (g · kg ⁻¹)	1.07±0.25	0.96±0.29	1.17±0.39	1.21±0.27	2.59	0.059
Ca ²⁺ (g · kg ⁻¹)	0.13±0.06	0.13±0.11	0.29±0.16	0.37±0.14	10.13	0.000
Mg ²⁺ (g · kg ⁻¹)	0.10±0.05	0.075±0.042	0.25±0.10	0.29±0.19	25.82	0.000
Cl ⁻ (g · kg ⁻¹)	1.93±1.21	1.34±0.95	2.79±1.66	3.10±1.11	4.28	0.008
SO ₄ ²⁻ (g · kg ⁻¹)	0.96±0.48	0.65±0.54	1.56±0.92	1.64±0.84	9.90	0.000
HCO ₃ ⁻ (g · kg ⁻¹)	0.53±0.11	0.47±0.11	0.60±0.14	0.53±0.14	3.61	0.017

S: 可溶性盐总量 Total amount of soil soluble salt; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; SOM: 有机质 Organic matter. 下同 The same below.

表 3 不同立地类型土壤化学因子
Table 3 Soil chemical variables in different site types

项目 Item	立地类型 Site type		方差分析 ANOVA	
	潮间带湿地 Intertidal wetland (n=22)	潮上带湿地 Supralittoral zone wetland (n=59)	F	P
pH	7.95±0.19	8.14±0.22	12.95	0.001
S (mS · cm ⁻¹)	0.76±0.17	1.32±0.15	4.62	0.035
TN (g · kg ⁻¹)	0.38±0.20	0.34±0.14	0.73	0.397
TP (g · kg ⁻¹)	2.24±0.40	2.67±0.67	8.09	0.006
SOM (g · kg ⁻¹)	25.17±19.12	6.56±1.15	2.53	0.116
K ⁺ (g · kg ⁻¹)	0.060±0.0030	0.061±0.0039	1.35	0.250
Na ⁺ (g · kg ⁻¹)	0.87±0.21	1.09±0.30	10.14	0.002
Ca ²⁺ (g · kg ⁻¹)	0.18±0.15	0.16±0.14	0.30	0.584
Mg ²⁺ (g · kg ⁻¹)	0.17±0.16	0.096±0.057	9.41	0.003
Cl ⁻ (g · kg ⁻¹)	1.08±0.25	2.05±0.21	6.72	0.011
SO ₄ ²⁻ (g · kg ⁻¹)	0.83±0.81	0.93±0.63	0.31	0.579
HCO ₃ ⁻ (g · kg ⁻¹)	0.46±0.11	0.52±0.13	4.10	0.046
盐分类型 Salt type	硫酸盐-氯化物 Sulfate-chloride	氯化物 Chloride		

耐受更高的土壤酸碱度和盐渍程度.依据对土属类型划分的标准^[15],由 Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 的比值可知,潮间带湿地属于硫酸盐-氯化物类型,潮上带湿地属于氯化物类型,整体上研究区属于硫酸盐-氯化物类型.

山东滨海盐渍区 0~20 cm 表层土壤盐分离子以 Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 和 HCO₃⁻ 为主,分别占离子总量的 22.6%、39.0%、19.7%、10.9%,表明该区域土壤类型为硫酸盐-氯化物型.由于 HCO₃⁻ 在土壤水溶性盐离子中占据一定的比重,说明样地内土壤呈弱碱性,这与土壤为碱性土的结论是一致的.阴、阳离子分别以 Cl⁻ 和 Na⁺ 为主,分别占阴、阳离子总量的 55.9% 和 74.6%.

2.3.3 土壤化学因子相关性 由表 4 可知,土壤酸碱度和有机质与其他土壤化学因子均不显著;土壤

可溶性盐总量与所有水溶性盐离子呈显著相关,并与全氮和全磷含量呈显著相关,能够表征 Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 变异的大部分,表明这 3 种离子对土壤可溶性盐总量的影响最大.全氮含量与全磷、K⁺、Na⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 和 HCO₃⁻ 含量呈显著相关;全磷含量与 K⁺、Na⁺、Cl⁻ 含量呈显著相关;水溶性盐离子含量之间均呈显著相关,其中 Cl⁻ 与 Na⁺、SO₄²⁻ 相关系数分别为 0.920、0.832,进一步说明 Na⁺、Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 3 种离子是土壤盐分组成中最重要的因子.

2.3.4 基于典范对应分析的植被分布与土壤化学因子相关性 由表 5 可知,物种数据累计百分比方差为 22.4%,说明物种信息在分析中有一部分丢失,但是物种与环境因子前 4 轴的相关系数能够解释物种-环境因子关系总方差的 79.4%,排序前 2 轴解释了总方差的 53.9%,因此用前 2 轴绘制植被分布与土壤化学因子的二维空间 CCA 排序图(图 3).

由图 3 和表 6 可知,pH、有机质(SOM)、全磷(TP)与植被分布的关系不密切.CCA 第 1 排序轴主要反映土壤可溶性盐总量、全氮、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻ 和 Cl⁻,第 2 排序轴主要反映土壤可溶性盐总量、K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 和 HCO₃⁻.由此可知,影响山东滨海盐渍区耐盐植被分布的关键土壤化学因子是土壤可溶性盐总量和水溶性盐离子含量,其次是全氮含量.

小蓬草(*Conyza canadensis*)、黄花蒿、碱地蒲公英(*Taraxacum borealisinense*)、泥胡菜(*Hemistepta lyrata*)、抱茎小苦荬(*Ixeridium sonchifolium*)、中华小苦荬(*Ixeridium chinense*)、砂引草、紫花山莴苣、鹅绒藤、茵陈蒿、小花山桃草(*Gaura parviflora*)、独行菜(*Lepidium apetalum*)、藜、蒙古洋葱、白茅、狗尾草、

表 4 土壤化学因子之间的 Pearson 相关系数
Table 4 Pearson correlation coefficients of soil chemical factors

	pH	S	TN	TP	SOM	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
S	0.149										
TN	-0.011	0.252 *									
TP	0.166	0.219 *	0.430 **								
SOM	0.051	-0.032	-0.113	-0.100							
K ⁺	0.187	0.589 **	0.502 **	0.505 **	-0.067						
Na ⁺	0.215	0.907 **	0.373 **	0.385 **	-0.057	0.677 **					
Ca ²⁺	-0.058	0.720 **	0.154	0.033	-0.019	0.441 **	0.569 **				
Mg ²⁺	-0.190	0.493 **	0.564 **	0.120	-0.015	0.418 **	0.395 **	0.552 **			
Cl ⁻	0.134	0.961 **	0.321 **	0.327 **	-0.053	0.655 **	0.920 **	0.665 **	0.470 **		
SO ₄ ²⁻	0.065	0.850 **	0.458 **	0.198	-0.042	0.603 **	0.796 **	0.746 **	0.655 **	0.832 **	
HCO ₃ ⁻	0.205	0.669 **	0.346 **	0.186	-0.083	0.588 **	0.660 **	0.453 **	0.378 **	0.631 **	0.626 **

* P<0.05; ** P<0.01. 下同 The same below.

表 5 CCA 排序前 4 轴的特征值、物种-环境相关性和累计百分比方差

Table 5 Eigenvalues, species-environment correlations and cumulative percentage variance of the four axes of CCA

项目 Item	轴 Axis			
	1	2	3	4
特征值 Eigenvalue	0.337	0.243	0.172	0.103
物种-环境相关性 Species-environment correlation	0.829	0.896	0.772	0.733
累计百分比方差 Cumulative percentage variance				
物种数据 Species data	8.8	15.2	19.7	22.4
物种-环境关系 Species-environment relation	31.3	53.9	69.9	79.4
总特征值 Sum of all eigenvalues	3.827			
总典范特征值 Sum of all canonical eigenvalues	1.077			

表 6 土壤化学因子与 CCA 前两轴的相关系数

Table 6 Correlation coefficients of soil chemical variables with the first two axis of CCA

轴 Axis	pH	S	TN	TP	SOM	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
1	-0.204	0.410 **	0.437 **	0.143	-0.057	0.411 **	0.264	0.547 **	0.746 **	0.386 *	0.462 **	0.246
2	0.203	0.713 **	0.177	0.323	-0.048	0.422 **	0.754 **	0.395 *	0.031	0.767 **	0.590 **	0.527 **

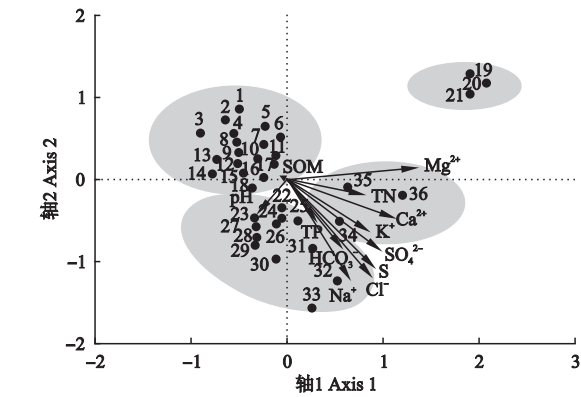


图 3 植物种类与土壤化学因子的 CCA 双序图

Fig.3 CCA bi-plot of plant species and soil chemical variables.

1)小蓬草 *Conyza canadensis*; 2)黄花蒿 *Artemisia annua*; 3)碱地蒲公英 *Taraxacum borealisinense*; 4)泥胡菜 *Hemistepta lyrata*; 5)抱茎小苦荬 *Ixeridium sonchifolium*; 6)中华小苦荬 *Ixeridium chinense*; 7)砂引草 *Messerschmidia sibirica*; 8)紫花山莴苣 *Mulgedium tataricum*; 9)鹅绒藤 *Cynanchum chinense*; 10)茵陈蒿 *Artemisia capillaris*; 11)小花山桃草 *Gaura parviflora*; 12)独行菜 *Lepidium apetalum*; 13)藜 *Chenopodium album*; 14)蒙古鸦葱 *Scorzonera mongolica*; 15)白茅 *Imperata cylindrica*; 16)狗尾草 *Setaria viridis*; 17)怪柳 *Tamarix chinensis*; 18)地肤 *Kochia scoparia*; 19)红蓼 *Polygonum orientale*; 20)罗布麻 *Apocynum venetum*; 21)灰绿藜 *Chenopodium glaucum*; 22)苣荬菜 *Sonchus arvensis*; 23)车前 *Plantago asiatica*; 24)盐地碱蓬 *Suaeda salsa*; 25)刺儿菜 *Cirsium setosum*; 26)葎草 *Humulus scandens*; 27)阿尔泰狗娃花 *Heteropappus altaicus*; 28)野古草 *Arundinella anomala*; 29)中亚滨藜 *Atriplex centralasiatica*; 30)扁秆藨草 *Scirpus planiculmis*; 31)獐毛 *Aeluropus sinensis*; 32)碱蓬 *Suaeda glauca*; 33)狗牙根 *Cynodon dactylon*; 34)芦苇 *Phragmites australis*; 35)二色补血草 *Limonium bicolor*; 36)香蒲 *Typha orientalis*. S: 可溶性盐总量 Total amount of soil soluble salt; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; SOM: 有机质 Organic matter.

怪柳、地肤位于 CCA 双序图的左上方,分布在低盐分、低全氮的环境中;红蓼 (*Polygonum orientale*)、罗布麻、灰绿藜位于 CCA 双序图的右上角,主要与较低的土壤盐分和较低的土壤全氮含量相对应;苣荬菜 (*Sonchus arvensis*)、车前 (*Plantago asiatica*)、盐地碱蓬、刺儿菜、葎草 (*Humulus scandens*)、阿尔泰狗娃花、野古草 (*Arundinella anomala*)、中亚滨藜、扁秆藨草、獐毛、碱蓬、狗牙根 (*Cynodon dactylon*) 位于双序图的左下部,主要与较高的土壤盐分和土壤全氮含量相对应;芦苇、二色补血草、香蒲位于双序图的右下部,与土壤高盐分含量和高全氮含量有关。

2.3.5 植物群落多样性与土壤化学因子的相关性 由图4可知,在4个群落类型中,以芦苇为优势

种,伴生种为白茅和茵陈蒿的群落 A 的 Shannon 多样性指数、Patrick 物种丰富度指数、Pielou 均匀度指数 3 个物种多样性指数均最高,说明群落 A 具有较高的物种多样性,所蕴含的耐盐植物资源较丰富;而以芦苇为优势种,伴生种为罗布麻的群落 D 的物种多样性指数最低;以盐地碱蓬和芦苇为优势种,伴生种为茵陈蒿和地肤的群落 B 和以芦苇为优势种,伴生种为香蒲和罗布麻的群落 C 的物种多样性指数为中间值。

由表 7 可知,Shannon 多样性指数与土壤可溶性盐总量、有机质、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 和 HCO₃⁻ 呈显著负相关关系;Patrick 物种丰富度指数与土壤可溶性盐总量、有机质、Na⁺、Mg²⁺、Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 呈显著负相关;Pielou 物种均匀度指数与土壤可溶性盐总量、K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 和 HCO₃⁻ 呈显著负相关.表明山东滨海盐渍区耐盐植被群落的多样性主要与土壤可溶性盐总量和水溶性盐离子含量呈显著负相关,即土壤中高盐分含量会降低群落的物种多样性指数,影响植物群落的分布。

3 讨 论

在山东滨海盐渍区共发现 85 种耐盐植物.王仁卿等^[16]对黄河三角洲野生植物的调查中发现,该区域内植物种类有近 400 种.山东滨海盐渍区植物种类最多的科为菊科、禾本科、藜科,这与谭向峰等^[17]

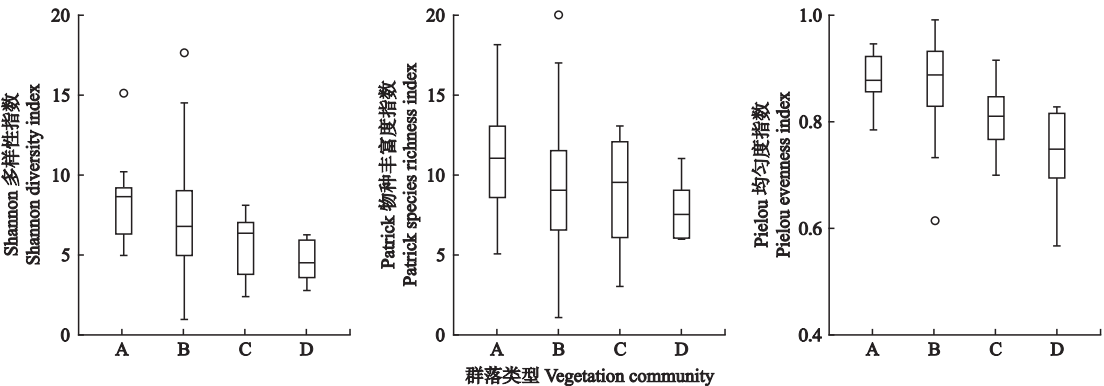


图 4 不同群落类型的物种多样性指数箱式分布图

Fig.4 Box plots of species diversity index of different vegetation communities.

表 7 物种多样性指数与土壤化学因子之间的 Spearman 相关系数

Table 7 Spearman correlation coefficients of species diversity indexes and soil chemical variables

	pH	S	TN	TP	SOM	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Shannon 多样性指数	-0.100	-0.382 **	-0.186	-0.055	-0.288 **	-0.206	-0.352 **	-0.348 **	-0.486 **	-0.374 **	-0.373 **	-0.274 *
Shannon diversity index												
Patrick 物种丰富度指数	-0.163	-0.283 *	-0.144	-0.021	-0.265 *	-0.132	-0.297 **	-0.212	-0.383 **	-0.283 *	-0.257 *	-0.208
Patrick species richness index												
Pielou 均匀度指数	0.120	-0.402 **	-0.113	-0.123	-0.196	-0.285 **	-0.326 **	-0.420 **	-0.389 **	-0.402 **	-0.416 **	-0.267 *
Pielou evenness index												

对黄河三角洲滨海盐生草甸植被优势科的研究结果一致,说明它们作为世界广布科对盐渍环境同样具有高度适应性.虽然藜科的植物种类不是最多的,少于菊科和禾本科,但它具有极强耐盐性的植物,如碱蓬、盐地碱蓬、地肤、灰绿藜、猪毛菜等都属于藜科,因此藜科在山东滨海盐渍区耐盐植物中占据重要的地位.出现频度和重要值排名前 10 的植物中,两者之间重合植物种类达 9 种:芦苇、盐地碱蓬、茵陈蒿、鹅绒藤、紫花山莴苣、柺柳、地肤、砂引草、白茅.说明在该研究区域内,频度和重要值 2 个表征物种重要性的指标具有显著相关性.

由 CCA 排序结果可知,影响该区域耐盐植被分布的关键土壤化学因子是土壤可溶性盐总量和水溶性盐离子含量,与土壤 pH 没有显著关系,这与文献[18–20]研究结果一致,即土壤盐分是影响植被分布的关键因素.Schuster 等^[21]研究发现,在碱性土壤中植被分布与土壤 pH 不存在显著相关性,本研究区土壤 pH 均值为 8.09,为碱性,与耐盐植被分布不存在相关关系,验证了 Schuster 等^[21]的结论.而马宗文等^[22]对黄河三角洲自然保护区植物与土壤环境因子关系进行研究,发现影响物种分布的关键土壤环境因子为土壤盐分和 pH,这可能与其采样地点的土壤碱性不强有关.

在盐渍土壤中,土壤全氮、全磷及有机质等养分

因子也可能是影响植被分布的因素^[18,23–24].本研究中,耐盐植物分布与土壤全氮含量具有一定的相关性,但与土壤全磷和有机质含量没有显著相关关系.这可能与研究区域成土年龄较短、全磷和有机质含量相对较低有关.

本研究中,物种多样性与土壤盐分呈显著负相关,Shannon 多样性指数、Patrick 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数均与土壤盐分呈现显著负相关,与大多数研究结论相同^[17,22,25].由 TWINSpan 划分得到 4 个群落类型:芦苇-罗布麻群落、芦苇-香蒲+罗布麻群落、芦苇-白茅+茵陈蒿群落、盐地碱蓬+芦苇-茵陈蒿+地肤群落,在群落演替梯度上,土壤盐分逐渐下降.其中,芦苇-罗布麻群落的土壤盐分含量最高,其群落结构单一,除了优势种芦苇和伴生种罗布麻外,仅分布少数几种其他植物,物种多样性较低;土壤盐分含量最低的盐地碱蓬+芦苇-茵陈蒿+地肤群落,除了优势种和伴生种外,其他植物分布广泛,物种多样性较高.然而,贺强等^[24]研究表明,黄河河口盐沼植被多样性与土壤盐分呈显著正相关.这可能是由调研采样地点不同导致的,本研究区域土壤盐分含量低于黄河河口盐沼.贺强等^[24]研究表明,黄河河口盐沼随着群落演替的进行,土壤盐分含量由高到低发生变化,植物群落也由丰富的耐盐植物群落演替为芦苇等单优群落,因此得到较低的土

壤盐分对应较低物种多样性的结果.而大部分研究中,物种多样性和丰富度随着土壤盐分的增加而降低是符合生态过滤原理的.

本研究中,大部分水溶性盐离子与物种多样性呈显著负相关,其原因可能与研究区土壤盐分类型为硫酸盐-氯化物有关.盐离子是组成土壤盐分的基础,因此与土壤可溶性盐总量与物种多样性的相关性保持一致.目前,关于物种多样性与土壤水溶性离子含量的研究较少.Roem 等^[26]研究认为, Ca^{2+} 是发生盐胁迫时植物体内维持自身阳离子稳态的关键元素, Ca^{2+} 含量的增加可以达到抵抗盐害的作用,因此 Ca^{2+} 含量的增加有利于提高物种多样性.同时, Mg^{2+} 也是植物生长发育必须的营养元素,也有利于抵抗盐胁迫造成的毒害^[27].贺强等^[24]研究表明,物种多样性指数与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量呈显著正相关.而新疆荒漠过渡区物种多样性与 Ca^{2+} 不存在显著相关关系, Mg^{2+} 随着土壤取样深度的不同与物种多样性的相关关系也不相同^[28].这些研究结果的差异可能是由研究区域不同导致的,关于物种多样性与水溶性盐离子的相关关系还需要进一步的研究.

参考文献

- [1] Zhao K-F (赵可夫), Li F-Z (李法曾), Zhang F-S (张福锁). Chinese Halophytes. Beijing: Science Press, 2013 (in Chinese)
- [2] Yang Z (杨真), Wang B-S (王宝山). Present status of saline soil resources and countermeasures for improvement and utilization in China. *Shandong Agricultural Sciences* (山东农业科学), 2015, **47**(4): 125–130 (in Chinese)
- [3] Fu T-F (付腾飞), Zhang Y (张颖), Xu X-Y (徐兴永), et al. Spatio-temporal variability of saline soil salinity in Shandong low-lying coastal plain. *Ocean Development and Management* (海洋开发与管理), 2017, **34**(12): 38–45 (in Chinese)
- [4] Zhang G-S (张高生), Wang R-Q (王仁卿). Quantitative classification of plant communities in the modern Yellow River Delta. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2008, **30**(3): 31–36 (in Chinese)
- [5] Song C-Y (宋创业), Huang C (黄翀), Liu Q-S (刘庆生), et al. Simulation of *Suaeda heteroptera* potential distribution in the Yellow River Delta by using generalized additive models. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2010, **25**(4): 677–685 (in Chinese)
- [6] Van Wijnen HJ, Bakker JP. Nitrogen and phosphorus limitation in a coastal barrier salt marsh: The implications for vegetation succession. *Journal of Ecology*, 1999, **87**: 265–272
- [7] Rogel JÁ, Silla RO, Ariza FA. Edaphic characterization and soil ionic composition influencing plant zonation in a semiarid Mediterranean salt marsh. *Geoderma*, 2001, **99**: 81–98
- [8] Silvestri S, Defina A, Marani M. Tidal regime, salinity and salt marsh plant zonation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, **62**: 119–130
- [9] Zhao P (赵鹏), Xu X-Y (徐先英), Qu J-J (屈建军), et al. Spatial distribution of *Nitraria tangutorum* communities and its environmental interpretations in the Minqin oasis-desert ecotone. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 2016, **33**(5): 1003–1011 (in Chinese)
- [10] Zheng J-G (郑敬刚), Wu G-X (吴国玺), He M-Z (何明珠). Correlation between plant diversity and soil properties in Alax desert. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境), 2009, **23**(3): 151–155 (in Chinese)
- [11] Bai X-H (白晓航), Zhang J-T (张金屯), Cao K (曹科), et al. Community characteristics and species diversity of subalpine meadows in Xiaowutai Mountain. *Pratacultural Science* (草业科学), 2016, **33**(12): 2533–2543 (in Chinese)
- [12] Hao Z-Q (郝占庆), Guo S-L (郭水良). Canonical correspondence analysis on relationship of herbs with their environments on northern slope of Changbai Mountain. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23**(10): 2000–2008 (in Chinese)
- [13] Bao S-D (鲍士旦). Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2013 (in Chinese)
- [14] Lepš JP. Multivariate Analysis of Ecological Data Using CANOCO. Cambridge: Cambridge University Press, 2003
- [15] Saline Soil Specialized Committee, China Soil Society (中国土壤学会盐渍土专业委员会). Classification of Saline Soil in China. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1989 (in Chinese)
- [16] Wang R-Q (王仁卿), Zhang Z-G (张治国), Wang Q (王清), et al. Classification of vegetation in the Yellow River Delta. *Journal of Shandong University* (Natural Science) (山东大学学报: 自然科学版), 1993, **28**(suppl.): 23–28 (in Chinese)
- [17] Tan X-F (谭向峰), Du N (杜宁), Ge X-L (葛秀丽), et al. Relationships between coastal meadow distribution and soil characteristics in the Yellow River Delta. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32**(19): 5998–6005 (in Chinese)
- [18] Shaltout KH, El-Kady HF, Al-Sodany YM. Vegetation analysis of the Mediterranean region of Nile Delta. *Plant Ecology*, 1995, **116**: 73–83
- [19] Ma Y-L (马玉蕾), Wang D (王德), Liu J-M (刘俊民), et al. Relationships between typical vegetations, soil salinity, and groundwater depth in the Yellow River Delta of China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(9): 2423–2430 (in Chinese)
- [20] Zhao R-F (赵锐锋), Zhou H-R (周华荣), Qian Y-B

(钱亦兵), *et al.* Interrelations between plant communities and environmental factors of wetlands and surrounding lands in mid- and lower reaches of Tarim River. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(6): 955-960 (in Chinese)

[21] Schuster B, Diekmann M. Changes in species density along the soil pH gradient-evidence from German plant communities. *Folia Geobotanica*, 2003, **38**: 367-379

[22] Ma Z-W (马宗文), Xie Z-L (谢正磊), Duan X-F (段晓峰). Plant-soil relationship and plant niche in the Yellow River Delta National Natural Reserve, China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (北京大学学报: 自然科学版), 2012, **48**(5): 801-811 (in Chinese)

[23] Funk DW, Noel LE, Freedman AH. Environmental gradients, plant distribution, and species richness in arctic salt marsh near Prudhoe Bay, Alaska. *Wetlands Ecology and Management*, 2004, **12**: 215-233

[24] He Q (贺强), Cui B-S (崔保山), Zhao X-S (赵欣胜), *et al.* Relationships between salt marsh vegetation distribution/diversity and soil chemical factors in the Yellow River Estuary, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(2): 676-687 (in Chinese)

[25] Wang X (王鑫), Hu Y-K (胡玉昆), Rehemudula A (热合木都拉·阿迪拉), *et al.* Effects of soil salt on the niche of main plant species in alpine meadow. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(7): 1448-1454 (in Chinese)

[26] Roem WJ, Klees H, Berendse F. Effects of nutrient addition and acidification on plant species diversity and seed germination in heath land. *Journal of Applied Ecology*, 2002, **39**: 937-948

[27] Flowers TJ. Improving crop salt tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 2004, **55**: 307-319

[28] Zhang L-J (张林静), Yue M (岳明), Gu F-X (顾峰雪), *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* (应用生态学报), 2002, **13**(6): 658-662 (in Chinese)

作者简介 尹德洁, 女, 1986年生, 博士研究生. 主要从事园林植物生理及生态修复研究. E-mail: yindejie103@163.com

责任编辑 孙菊