

DOI: 10.5846/stxb201901160129

单元琪, 姚允龙, 张欣欣, 张强. 三江平原七星河流域湿地植物多样性及影响因素. 生态学报, 2020, 40(5): 1629-1636.

Shan Y Q, Yao Y L, Zhang X X, Zhang Q. Study on wetland plant diversity and its influencing factors in the Qixing River Basin of Sanjiang Plain. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(5): 1629-1636.

## 三江平原七星河流域湿地植物多样性及影响因素

单元琪<sup>1</sup>, 姚允龙<sup>1,\*</sup>, 张欣欣<sup>2</sup>, 张强<sup>3</sup>

1 东北林业大学野生动物与自然保护地学院, 哈尔滨 150040

2 哈尔滨师范大学生命科学学院, 哈尔滨 150040

3 黑龙江科技大学建筑工程学院, 哈尔滨 150040

**摘要:** 湿地植物多样性是生物多样性的重要组成部分, 在维护湿地生态功能和湿地生态系统稳定性方面发挥着极其重要的作用。为研究七星河流域湿地的多样性, 选择七星河流域的七星河国家级自然保护区和三环泡国家级自然保护区, 分别于 2016 年和 2017 年, 对该流域内湿地植物进行了实地植物样方调查, 共计调查 194 个样方, 利用 TWINSpan 进行了样方群落划分, 并采用广义线性模型分析了影响植物多样性的影响因素。结果表明七星河流域湿地植物共有 532 种, 隶属于 80 科, 212 属, 主要群落类型为湿苔草-隐果苔草群落; 狭叶甜茅群落; 萍蓬草-狐尾藻群落; 漂筏苔草群落; 小叶章-嫩囊苔草群落; 甜茅-芦苇群落; 芦苇群落; 貉藻群落等, 狭叶甜茅群落物种多样性较单一, 芦苇群落的物种多样性较丰富。广义线性模型分析结果得出物种多样性与植被密度密切相关, 植被密度越大, 物种的多样性越小。为七星河流域物种多样性研究提供了重要的基础数据。

**关键词:** 七星河; 物种; 群落; 多样性; 貉藻

## Study on wetland plant diversity and its influencing factors in the Qixing River Basin of Sanjiang Plain

SHAN Yuanqi<sup>1</sup>, YAO Yunlong<sup>1,\*</sup>, ZHANG Xinxin<sup>2</sup>, ZHANG Qiang<sup>3</sup>

1 College of Wildlife and Protected Area, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

2 College of Life Science, Harbin Normal University, Harbin 150040, China

3 College of Architectural Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150040, China

**Abstract:** Wetland plants play a vital role in maintaining wetland ecology and ecosystem stability. In order to evaluate the diversity of wetland plants in the Qixing River Basin, two sites, namely, Qixing River Nature Reserve and Sanhuan Pao Nature Reserve, were selected for the study. A total of 194 plots were investigated in 2016 and 2017 using a 1 m quadrat survey, and TWINSpan was used to classify the plots. The factors affecting biodiversity were analyzed using the generalized linear model. The results showed that there were 532 species of wetland plants, belonging to 80 families and 212 genera, in the Qixing River Basin. The main community types were *Carex humida*-*Carex cryptocarpa* association; *Glyceria spiculosa* association; *Nuphar pumilum*-*Myriophyllum verticillatum* association; *Carex pseudo-curaica* association; *Calamagrostis angustifolia*-*Carex schmidtii* association; *Glyceria acutiflora*-*Phragmites australis* association; *Phragmites australis* association; *Aldrovanda vesiculosa* association, etc. The indices indicated that species diversity of the *Glyceria spiculosa* association was relatively simple, and that of the *Phragmites australis* association was high. The results of generalized linear model indicate that species diversity is closely related to vegetation density, and the higher the vegetation density, the lower the species diversity. This study provides important basic data for the study of species diversity in the Qixing River Basin.

**基金项目:** 中央高校基本科研业务费专项资金 (2572017CA15); 黑龙江省自然科学基金 (QC2016047)

**收稿日期:** 2019-01-16; **网络出版日期:** 2019-12-17

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yaoyunlong@nefu.edu.cn

**Key Words:** Qixing River; species; community; diversity; *Aldrovanda vesiculosa*

生物多样性是在一定时间、地区内,所有生物物种及其遗传变异和生态系统复杂性总称,是衡量群落结构及其功能复杂性的一个重要指标,其中物种多样性是生物多样性的核心<sup>[1]</sup>。湿地植物是湿地的重要组成部分,其分布情况以及物种多样性的多少极大的反映了湿地的自然环境,同时也影响着动物栖息地的状况,对衡量湿地生态功能和生态系统稳定性起着非常重要的作用<sup>[2-3]</sup>。湿地植物多样性可以有效地反应湿地的恢复效果,并且在群落生态系统功能和服务的维持中起着重要的作用<sup>[4-5]</sup>。

国内外已经开展了许多植物多样性的相关研究,主要集中在不同类型湿地的植物群落特征及其影响物种多样性的环境因素等方面的研究,目前湿地植物多样性研究大多集中在河流湿地、潮汐湿地、湖泊湿地、低温高寒沼泽湿地和人工湿地等<sup>[6-10]</sup>。部分学者对三江平原典型湿地植物物种组成及植物物种多样性进行了研究,马克明等人将农田沟渠的密度作为干扰指标,总结不同干扰强度下湿地群落物种组成的差异,随着干扰强度的增加,湿生植物物种随之减少,而中生物种的数量随之增加,并且物种多样性在整体上也有减少的趋势;娄彦景等人以三江平原的毛果苔草群落和小叶章群落为研究对象,研究这两个群落植物物种分布及其组成特征<sup>[11-12]</sup>。基于学者对三江平原湿地植物的研究发现,对三江平原湿地植物物种多样性的变化特征研究较少,本文以三江平原的七星河流域为研究区,对该流域内湿地的植物物种多样性情况进行了全面的调查,主要目的有两个:1)明确三江平原七星河流域湿地内植物物种组成及多样性的变化情况;2)确定七星河流域湿地内物种多样性的影响因素。为三江平原七星河流域物种多样性研究提供重要的基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

七星河流域位于黑龙江省宝清县与富锦市境内,主要包括七星河国家级自然保护区和三环泡国家级自然保护区,图1所示为两个保护区的范围。这两个保护区地处七星河中下游,属内陆湿地和水域生态系统类型保护区(国际 GB/T14529-93)。地理坐标为 132°05′—132°57′E,46°40′—46°52′N,保护区的年平均气温 2.3—2.7℃,平均无霜期为 143 d,年平均降水量为 551 mm,水面蒸发量为 857.7 mm<sup>[13]</sup>。流域内地势平坦,平均海拔 70 m 左右,各种碟形洼地分布广泛,地表径流不畅,而且广泛分布的粘性土壤层阻碍着地表水的下渗,形成了大面积的沼泽地,独特的气候条件和自然环境,造就了丰富的湿地类型和独特的生态环境<sup>[14-15]</sup>。

### 1.2 研究方法

#### (1) 样方调查

基于植被 1 m×1 m 的样方调查法,分别于 2016—2017 年的春季、夏季和秋季对七星河流域内七星河国家级自然保护区和三环泡国家级自然保护区的湿地进行了植被样方调查。调查中随机选取 1 m×1 m 的样方,共计调查 194 个样方,同时采用量尺测量样方内的水深、植株水面以上高度,记录了植被的密度,盖度,多度。

#### (2) 样方分类法—TWINSpan

双向指示种分析(Two-Way Indicator Species Analysis, TWINSpan)<sup>[16]</sup>是由指示种分析(Indicator species analysis)修改而成的一种等级分类法,它是基于(Reciprocal Averaging, RA)排序的分类方法,以相互平均排序轴作为分类的基础,通过将样方与物种进行双向聚类分析,同时完成样方分类和种类分类,结果是把物种种类和样地类型排列成矩阵,该矩阵能够清晰的反映出物种和样地间的关系,并且能反映重要的环境梯度<sup>[17-18]</sup>,此分析方法是目前国际上常用的数量分类方法,在植被数量分类方法中一直占据主导地位<sup>[19]</sup>。依据《中国植被》和《中国湿地植被》中的群落命名原则<sup>[20-21]</sup>,结合样方调查的种类组成和群落生境特征的指示种和优势种命名植被群落类型。由于调查的 194 个样方有个别样方数据不完整,故剔除一些无效样方,最终将 128 个样方进行 TWINSpan 分析。

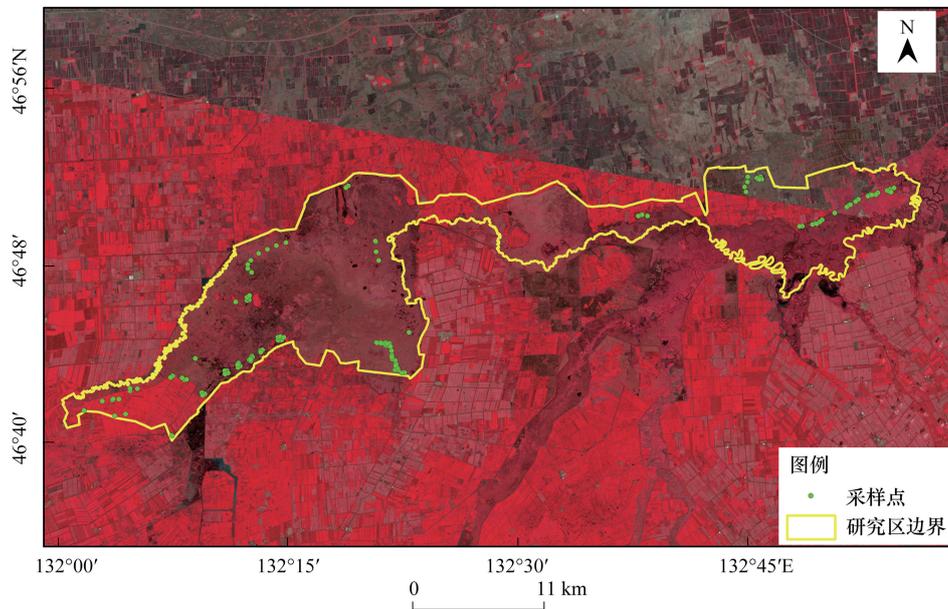


图 1 采样点在七星河自然保护区和三环泡自然保护区内分布图

Fig.1 The distribution of sampling sites in the Qixinghe and Sanhuanpao National Nature Reserves

### (3) 多样性指数计算

多样性指数是反映物种丰富度和均匀度的综合指标。有许多评定物种多样性的公式,本文采用常用的  $\alpha$  多样性指数,以探讨七星河流域内的物种多样性情况<sup>[11]</sup>,具体包括 Margalef 指数和 Shannon-Wiener 指数。

#### (a) Margalef 指数:

$$R = (S - 1) / \ln N \quad (1)$$

式中, $S$  为物种数目; $N$  为群落中全部物种的个体数。

#### (b) Shannon-Wiener 指数:

$$H = - \sum_{i=1}^S (P_i) (\ln P_i) \quad (2)$$

式中, $S$  为物种数目; $p_i$  为种  $i$  的个体数占群落中总个体的比例。

### (4) 物种多样性的影响因素分析

本文选用广义线性模型对物种多样性的影响因素进行分析。广义线性模型是由 Nelder 和 Wedderburn 提出的,广泛用于建立非正态响应变量的模型,但它的计算依赖于计算机和统计软件<sup>[22]</sup>。本文通过 R 软件建立了广义线性模型。在 R 软件中通过直方图得出本文的数据为非正态分布,通过计算该数据响应变量的平均值为 2.877,方差为 2.487,平均值与方差的差值不超过 20%,确定选用广义线性模型分析数据。通过相关性检验分析,发现植物高度、盖度、水深、密度这 4 个变量两两之间均有相关性,用 glm 模型进行逐步剔除无关变量,用影响物种多样性的主要指标建立与物种多样性的回归模型。

本文的数据处理与统计都是在免费开源 R 软件(版本号:3.4.3)<sup>[23]</sup>下进行,其中采用的工具包包括 dplyr<sup>[24]</sup>、ggplot2<sup>[25]</sup>、twinspan<sup>[16]</sup>。同时也借助了 Canoco for Windows 4.5 软件和 WinTWINS 软件对植物群落进行分类。

## 2 结果与分析

### 2.1 流域植物物种多样性

本次调查共发现 532 种植物,隶属于 80 科,212 属。其中 10 种以上的大科共有 11 个(图 2),分别为眼子

菜科(菹草 *Potamogeton crispus*、浮叶眼子菜 *Potamogeton natans*、穿叶眼子菜 *Potamogeton perfoliatus* 等),石竹科(垂梗繁缕 *Stellaria radicans*、细叶繁缕 *Stellaria filicaulis* 等),毛茛科(驴蹄草 *Caltha palustris* 等),伞形科(泽芹 *Sium suave* 等),豆科(山野豌豆 *Vicia amoena*、广布野豌豆 *Vicia cracca* 等),蓼科(戟叶蓼 *Polygonum thunbergii*、酸模叶蓼 *Polygonum lapathifolium* 等),蔷薇科(沼委陵菜 *Comarum palustre*、小白花地榆 *Sanguisorba tenuifolia* 等),莎草科(漂筏苔草 *Carex pseudo-curaica*、毛果苔草 *Carex miyabei*、膜囊苔草 *Carex schmidtii* 等),唇形科(华水苏 *Stachys chinensis*、毛水苏 *Stachys baicalensis* 等),禾本科(小叶章 *Calamagrostis angustifolia*、芦苇 *Phragmites australis*、甜茅 *Glyceria acutiflora*、菰 *Zizania latifolia* 等),菊科(水蒿 *Artemisia atrovirens*、野艾蒿 *Artemisia lavandulaefolia* 等)。

从物种的稀有性来看:国家一级保护植物 1 种,貉藻(*Aldrovanda vesiculosa*);国家二级保护植物 2 种,野大豆(*Glycine soja*)、莲(*Nelumbo nucifera*)。

## 2.2 植被类型

通过 TWINSAPN 分析将 128 个样方进行群落划分,结果将这些植物样方分为 8 个群落类型,结果如图 3 所示。

I:湿苔草-隐果苔草群丛( Assoc, *Carex humida-Carex cryptocarpa*),该群丛广泛分布在低河漫滩和阶地上各种洼地、旧河道和沼泽等地。主要伴生种有小叶章(*Calamagrostis angustifolia*)、膜囊苔草(*Carex schmidtii*)等。

II:狭叶甜茅群丛( Assoc, *Glyceria spiculosa*),该指数反映了群落内各植物种类的多群丛主要分布在重沼泽边缘和河漫滩上,多为零星分布,地表积水稍有流动。伴生有少量的湿苔草(*Carex humida*)、芦苇(*Phragmites australis*)等。

III:萍蓬草-狐尾藻群丛( Assoc, *Nuphar pumilum-Myriophyllum verticillatum*),该群丛多见于较开阔的静水体中,也在缓流中有分布,基底为软泥,水深 1—2 m,水温偏低。伴生植物有狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum*)、穿叶眼子菜(*Potamogeton perfoliatus*)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)等。

IV:漂筏苔草群丛( Assoc, *Carex pseudo-curaica*),此群丛常沿河床或水线附近分布,地表常年积水,水体呈微弱流动。伴生植物有燕子花(*Iris laevigata*)、水问荆(*Equisetum fluviatile*)、狭叶甜茅(*Glyceria spiculosa*)等。

V:小叶章-膜囊苔草群丛( Assoc, *Calamagrostis angustifolia-Carex schmidtii*),该群丛主要分布在岗平地、高河漫滩等地上,地表无积水,湿润或有季节性积水,积水水深在 5cm 左右。伴生植物有漂筏苔草(*Carex pseudo-curaica*)、水蒿(*Artemisia atrovirens*)、芦苇(*Phragmites australis*)等。

VI:甜茅-芦苇群丛( Assoc, *Glyceria acutiflora-Phragmites australis*),该群落通常分布在低河漫滩、水库附近洼地,地表往往有薄层积水,有时也分布在一些重沼泽边缘。并伴生有小叶章(*Calamagrostis angustifolia*)、驴蹄草(*Caltha palustris*)、毛果苔草(*Carex miyabei*)等。

VII:芦苇群丛( Assoc, *Phragmites australis*),芦苇群丛多分布在低洼地上,地表常年积水,水体流动,水深一般在 20 cm 以上。由于芦苇有发达的地下根茎,所以多形成单优势群落。伴生有少量漂筏苔草(*Carex pseudo-curaica*)、膜囊苔草(*Carex silvatica*)、五刺金鱼藻(*Ceratophyllum oryzetorum*)等。

VIII:貉藻群丛( Assoc, *Aldrovanda vesiculosa*),该群丛多见于较开阔的水体中,也在缓流中有分布,基底为软泥水深 1—2 m,水质清新。常见伴生种为狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum*)、萍蓬草(*Nuphar pumilum*)、菹草(*Potamogeton crispus*)等。

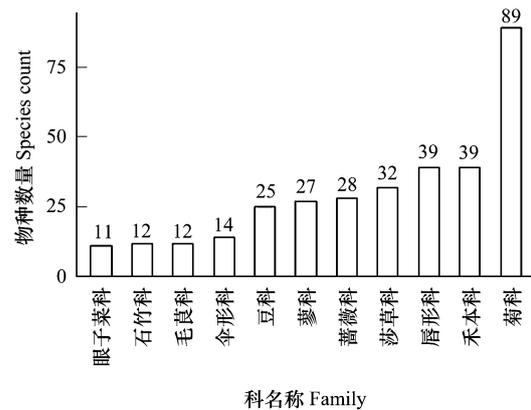


图 2 湿地植物优势科的种数值

Fig.2 Species count of the dominant wetland plants

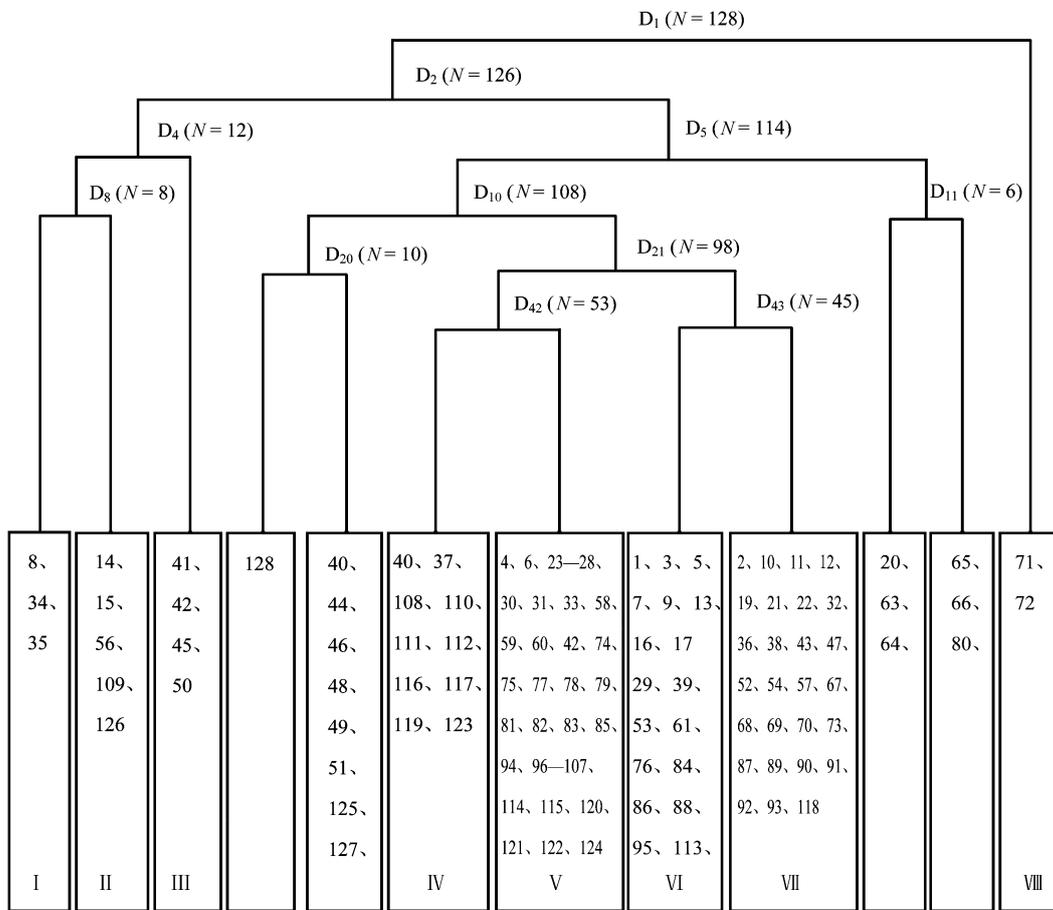


图3 TWINSpan 分类树状图

Fig.3 TWINSpan classification tree

$D_k$  为第  $k$  次分类,  $N$  为样方个数, 数字为样方序号

### 2.3 物种多样性指数

各个群落类型的主要湿地植物多样性指数如图 4 所示, 其中狭叶甜茅群丛的 Shannon-Weiner 指数为 0.09, 是所有群落中多样性指数最低的, 由于狭叶甜茅在此群丛中占绝对优势, 而其他物种分布不均匀导致物种多样性下降。芦苇群丛的 Margalef 指数为 3.32, 是所有群落中 Margalef 指数最高的, 其原因是水生植物和旱生植物均分布广泛, 所以物种丰富度较其他群落类型要高。小叶章-瓣囊苔草群丛中 Margalef 指数为 2.55, 虽然小叶章和瓣囊苔草为指示种, 但伴生植物的种类较多, 导致此群落中物种丰富度较大。

### 2.4 七星河流域内植物多样性影响因素

基于泊淞分布构建的广义线性模型为  $\log(y) = 1.1714 - 0.0004293x$ , 其中变量  $x$  为物种密度, 响应变量  $y$  为物种个数, 也就是物种多样性指示值。通过图 5 中的 QQ 图验证了此模型符合正态分布, 图形上的点总体分布在标线两侧, 虽然有个别点在标线的两端零散分布, 但整体趋势较好, 通过图 5 可知, 只有一个异常值, 综合看来, 此模型较好。在图 5 中可以看出, 随着物种密度的增加, 植物物种多样性呈现减少的趋势。并根据模型可知, 每当物种密度增加  $100 \text{ 个}/\text{m}^2$ , 物种个数  $\log(y)$  就会减少 0.04 个。从模型可以得出影响湿地植物物种多样性的因素与植被密度的多少有关。

### 3 讨论

植物群落的物种组成是反映群落结构变化的重要指示因子<sup>[26]</sup>。在本次 194 个样方的全面调查中, 七星

河流域内有 532 种高等植物,隶属于 80 科,212 属,相比于平陆黄河湿地、沂河湿地、黑河中游湿地、松花江下游恢复湿地的植物物种组成,该流域内的物种组成较丰富<sup>[2, 4, 8, 27]</sup>。菊科、禾本科、唇形科、莎草科的物种在该流域中占主要优势,这与莫莫格湿地、丹江湿地、黑河中游湿地等地区的物种组成基本相似,但七星河流域内,唇形科的植物种类相对于其他湿地的物种种类要多,说明它们作为世界上分布广泛的科对不同生长环境有较高的适应性<sup>[28-29]</sup>。

七星河国家级自然保护区首次发现了大面积貉藻群落。貉藻为茅膏菜科 (*Droseraceae*) 貉藻属 (*Aldrovanda*),多年生浮水草本食虫植物。叶片具有腺毛和感应毛,受到刺激时两半以中肋为轴互相靠合,外圈紧贴合,中央形成一个囊体,以此捕捉昆虫来补充营养物质<sup>[30]</sup>。在七星河国家级自然保护区内发现大面积貉藻群落,植株数量约 1—1.5 万株,这是目前中国最大的貉藻群落分布区。从生物学的角度看,大量的貉藻的存在不仅预示着该流域的生态环境非常优良,还为我国未来开展貉藻的生物学及生态学研究提供了天然场地。

双向指示种分析方法作为一种常用的分类和有效的排序方法,其结果简明清晰,客观合理<sup>[31]</sup>。本研究通过对 128 个样方的 TWINSpan 分析划分出了 8 个群落类型,体现了三江平原七星河流域湿地植物群落的整体特征和属性,尤其是貉藻群落,是七星河流域内特有的群落类型,在其他湿地自然保护区是少见的,在三江平原湿地之前的植物物种多样性调查中,也并未发现貉藻群落的广泛分布<sup>[11, 32]</sup>。在河流沿岸,有较丰富的物种种类,较好的反映了植物物种与该流域环境之间的适应关系。

植物群落物种多样性指数反映了群落内各植物种类的多少以及各物种的数量在种间分布的均匀程度<sup>[33]</sup>。本文通过对 Margalef 指数和 Shannon-Wiener 指数的计算,除狭叶甜茅群丛和貉藻群丛的物种多样性指数较低外,其他 6 种群落类型物种多样性差异不大,说明群落中优势植物明显,同时伴生有其他水生或旱生植物,物种多样性较丰富。总体看来, Margalef 指数和 Shannon-Weiner 指数能够比较准确的描述湿地生态系统中植物群落的结构复杂性、物种多样性和物种丰富度等情况。

物种多样性的影响因素有很多,如水位、土壤有机质、pH 等<sup>[34]</sup>。根据其他学者对湿地影响因素的研究,水位是影响湿地群落多样性的决定因素,随着湿地水位的变化,湿地植物组成也会发生相应的变化<sup>[35]</sup>。三江平原典型湿地的植物群落的 Shannon-Wiener 指数和物种丰富度都体现出随水位下降而升高的趋势<sup>[36]</sup>。但本文的研究具有局限性,调查时没有观测水位波动情况,不能判定水位波动对物种多样性的影响。虽然在调查中测量了水位的深浅,但通过 glm 模型逐步剔除无关变量,将水深因素视为无关变量将其剔除,最后得出的广义线性模型是物种多样性的多少与植物的密度有显著的负相关关系。还有学者研究了土壤有机质的含量和 pH 均与物种多样性呈显著正相关关系<sup>[29]</sup>,但本次调查中没有测量湿地中土壤的 pH 值与有机质含量,所以本研究中影响物种多样性的因素较单一。

#### 4 结论

七星河流域内的物种多样性丰富,有 532 种高等植物,隶属于 80 科,212 属,而且在七星河国家级自然保

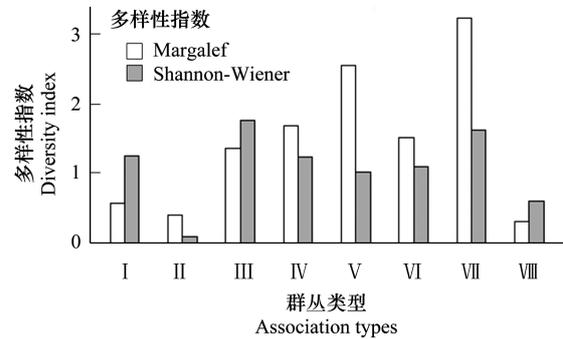


图 4 七星河流域主要湿地植物群落多样性

Fig. 4 Diversity of main dominant wetlands plants in the Qixing River Basin

( I: 湿苔草-隐果苔草群丛 *Carex humida-Carex cryptocarpa* association; II: 狭叶甜茅群丛 *Glyceria spiculosa* association; III: 萍蓬草-狐尾藻群丛 *Nuphar pumilum-Myriophyllum verticillatum* association; IV: 漂筏苔草群丛 *Carex pseudo-curaica* association; V: 小叶章-腋囊苔草群丛 *Calamagrostis angustifolia-Carex schmidtii* association; VI: 甜茅-芦苇群丛 *Glyceria acutiflora-Phragmites australis* association; VII: 芦苇群丛 *Phragmites australis* association; VIII: 貉藻群丛 *Aldrovanda vesiculosa* association)

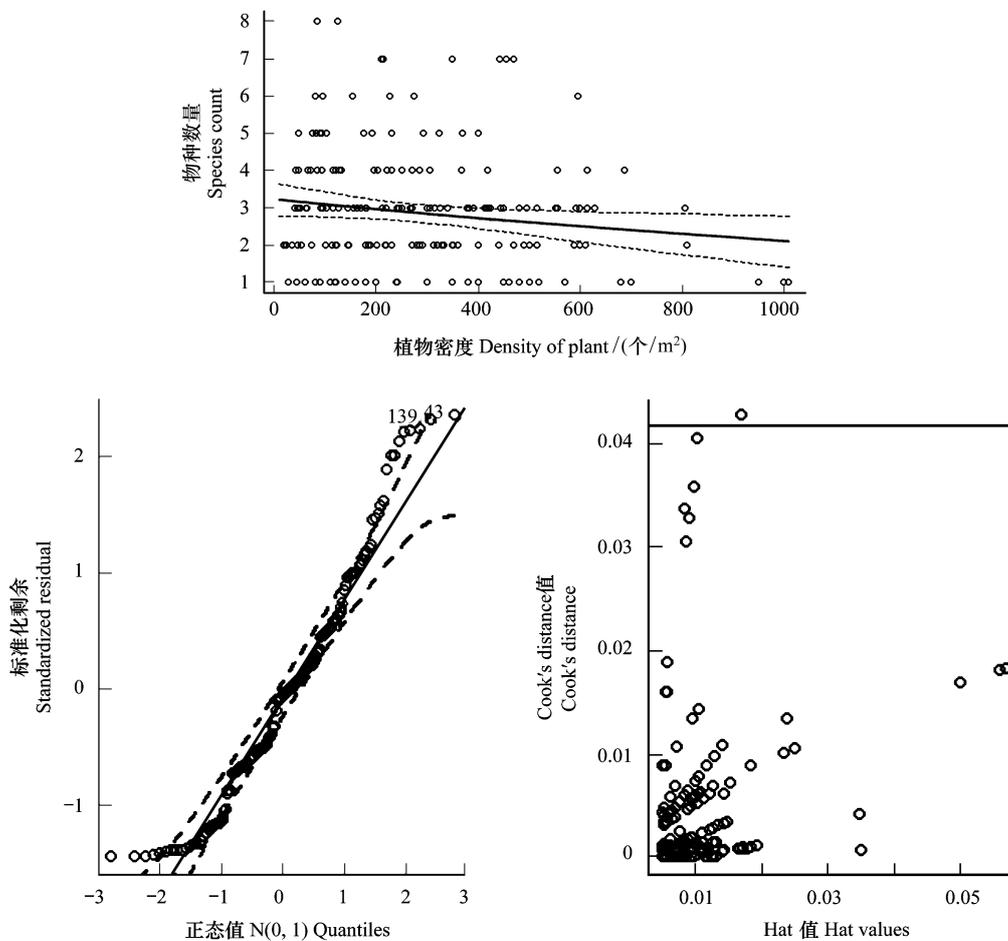


图5 密度对物种多样性影响的模型与检验

Fig.5 Study the impacts of density on species diversity by modeling and model checking

护区内首次发现了大面积国家一级保护植物,貉藻。通过 TWINSpan 分类方法,将该流域内植物划分为湿苔草-隐果苔草群丛;狭叶甜茅群丛;萍蓬草-狐尾藻群丛;漂筏苔草群丛;小叶章-瓣囊苔草群丛;甜茅-芦苇群丛;芦苇群丛;貉藻群丛等 8 个主要群丛类型。其中狭叶甜茅群丛的物种多样性单一,而芦苇群丛的物种多样性丰富。通过对七星河流域内物种多样性的回归分析得知,物种多样性的高低与植被密度有显著的负相关性,样方中植物密度越大,植被的物种种类越单一。

**致谢:**在本文的样方调查中,得到了三环泡国家级自然保护区管理局和七星河国家级自然保护区管理局的支持和帮助,特此致谢。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 吴安驰, 邓湘雯, 任小丽, 项文化, 张黎, 葛蓉, 牛忠恩, 何洪林, 何立杰. 中国典型森林生态系统乔木层群落物种多样性的空间分布格局及其影响因素. 生态学报, 2018, 38(21): 7727-7738.
- [ 2 ] 张冬杰, 王雪宏, 佟守正, 安雨, 齐清, 崔明炜, 张莉. 松花江下游富锦段沿江恢复湿地植物多样性. 湿地科学, 2016, 14(6): 883-887.
- [ 3 ] Nsor C A, Antobre O O, Mohammed A S, Mensah F. Modelling the effect of environmental disturbance on community structure and diversity of wetland vegetation in northern Region of Ghana. Aquatic Ecology, 2019, 53(1): 119-136.
- [ 4 ] 赵敏, 赵锐锋, 张丽华, 赵海莉, 周远刚. 基于盐分梯度的黑河中游湿地植物多样性及其与土壤因子关系. 生态学报, 2019, 39(11). (2019-03-21). [http://www.ecologica.cn/stxb/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=201806230000008&flag=2](http://www.ecologica.cn/stxb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=201806230000008&flag=2).

- [ 5 ] Lukács B A, Sramkó G, Molnár V A. Plant diversity and conservation value of continental temporary pools. *Biological Conservation*, 2013, 158: 393-400.
- [ 6 ] 刘晓琴, 张翔, 张立锋, 李英年, 赵亮, 徐世晓, 李红琴, 马荣荣, 牛犇, 高玉葆, 古松. 封育年限对高寒草甸群落组分和物种多样性的影响. *生态学报*, 2016, 36(16): 5150-5162.
- [ 7 ] Chang J, Fan X, Sun H Y, Zhang C B, Song C C, Chang S X, Gu B J, Liu Y, Li D, Wang Y, Ge Y. Plant species richness enhances nitrous oxide emissions in microcosms of constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 2014, 64: 108-115.
- [ 8 ] 孙倩, 王晓玉, 韩雪, 万丽娟, 周蕾, 陈明林. 安徽浍河湿地植物物种多样性. *湿地科学*, 2018, 16(5): 664-670.
- [ 9 ] 李艳红, 李发东, 马雯. 艾比湖湿地植物多样性特征及其影响因素研究. *生态科学*, 2016, 35(3): 78-84.
- [ 10 ] Janousek C N, Folger C L. Variation in tidal wetland plant diversity and composition within and among coastal estuaries: assessing the relative importance of environmental gradients. *Journal of Vegetation Science*, 2014, 25(2): 534-545.
- [ 11 ] 卢涛, 马克明, 倪红伟, 傅伯杰, 张洁瑜, 陆琦. 三江平原不同强度干扰下湿地植物群落的物种组成和多样性变化. *生态学报*, 2008, 28(5): 1893-1900.
- [ 12 ] 娄彦景, 赵魁义, 胡金明. 三江平原湿地典型植物群落物种多样性研究. *生态学杂志*, 2006, 35(4): 364-368.
- [ 13 ] 惠若男, 于洪贤, 姚允龙, 谭景旺, 裴仲旭. 退耕还湿对三江平原七星河湿地土壤有机碳累积的影响. *安徽农业科学*, 2013, 41(31): 12311-12313.
- [ 14 ] 崔保山, 刘兴土. 三江平原挠河流域湿地生态特征变化研究. *自然资源学报*, 2001, 16(2): 107-114.
- [ 15 ] 姚允龙, 吕宪国, 王蕾. 气候变化对挠力河径流量的影响. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2009, (3): 153-159.
- [ 16 ] Hill M O. TWINSPLAN-A FORTRAN Program for Arranging Multivariate Data in An Ordered Two-way Table by Classification of the Individuals and Attributes. Ithaca, New York: Cornell University, 1979.
- [ 17 ] Cajo J F, Braak T. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology*, 1986, 67(5): 1167-1179.
- [ 18 ] 康艳玲, 张钦弟, 段晓梅, 李婷婷, 毕润成. 不同稀有种处理对双向指示种分析分类结果影响的比较. *植物研究*, 2015, 35(6): 923-928.
- [ 19 ] 张文静, 张钦弟, 王晶, 冯飞, 毕润成. 多元回归树与双向指示种分析在群落分类中的应用比较. *植物生态学报*, 2015, 39(6): 586-592.
- [ 20 ] 吴征镒. 中国植被. 北京: 科学出版社, 1980.
- [ 21 ] 中国湿地植被编辑委员会. 中国湿地植被. 北京: 科学出版社, 1999.
- [ 22 ] Fahrmeir L, Tutz G. Multivariate Statistical Modelling Based on Generalized Linear Models. New York: Springer-Verlag, 2001.
- [ 23 ] Team R Core. A Language and Environment for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>. (2017).
- [ 24 ] Wickham H, Francois R, Müller K, RStudio. Dplyr: A Grammar of Data Manipulation. <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>. (2017).
- [ 25 ] Wickham H. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. New York: Springer-Verlag, 2009.
- [ 26 ] 郝文芳, 杜峰, 陈小燕, 梁宗锁. 黄土丘陵区天然群落的植物组成、植物多样性及其与环境因子的关系. *草地学报*, 2012, 20(4): 609-615.
- [ 27 ] 秦晓娟, 董刚, 邓永利, 毛空, 李旭华, 张峰. 山西平陆黄河湿地植物分类学多样性. *生态学报*, 2015, 35(2): 409-415.
- [ 28 ] 李树生, 安雨, 王雪宏, 薛振山, 刘波, 张文广, 唐克专, 佟守正. 不同地表水水位下莫莫格湿地植物群落物种组成和数量特征. *湿地科学*, 2015, 13(4): 466-471.
- [ 29 ] 刘俊娟. 丹江湿地植物多样性特征及其环境影响因素. *西南农业学报*, 2017, 30(12): 2811-2819.
- [ 30 ] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志: 第三十四卷 第一分册. 北京: 科学出版社, 1984.
- [ 31 ] 张金屯. 数量生态学(第二版). 北京: 科学出版社, 2011.
- [ 32 ] 赵琬婧, 王清波, 王瑜, 赵丹慧, 蔡体久, 邸雪颖, 孙晓新. 黑龙江三江自然保护区天然湿地植物物种多样性研究. *湿地科学与管理*, 2018, 14(3): 58-61.
- [ 33 ] Cadotte M W, Carscadden K, Mirotchnick N. Beyond species: functional diversity and the maintenance of ecological processes and services. *Journal of Applied Ecology*, 2011, 48(5): 1079-1087.
- [ 34 ] 汪殿蓓, 暨淑仪, 陈飞鹏. 植物群落物种多样性研究综述. *生态学杂志*, 2001, 20(4): 55-60.
- [ 35 ] 杨娇, 厉恩华, 蔡晓斌, 王智, 王学雷. 湿地植物对水位变化的响应研究进展. *湿地科学*, 2014, 12(6): 807-813.
- [ 36 ] 杨涛, 宫辉力, 胡金明, 王丽. 长期水分胁迫对典型湿地植物群落多样性特征的影响. *草业学报*, 2010, 19(6): 9-17.