

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20240238

网络首发日期: 2025-06-19; 网络首发地址: <http://link.cnki.net/urlid/12.1355.N.20250619.1333.003>

渤海湾滨海湿地土壤线虫群落分布特征

刘宇¹, 李阳^{2,3}, 赵兴贵¹, 刘宪斌¹

- 天津市海洋环境保护与修复技术工程中心, 天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457;
- 交通运输部天津水运工程科学研究所, 水路交通环境保护技术交通行业重点实验室, 天津 300456;
- 天科院环境科技发展(天津)有限公司, 天津 300456)

摘要: 渤海湾滨海湿地具有重要生态价值, 土壤线虫作为指示生物在湿地生态系统评价和修复中起关键作用。本研究采集了渤海湾 4 个湿地(七里海湿地、国家海洋公园潮滩湿地、龙岛潮滩湿地和临港二期湿地)的土壤样本, 共分离土壤线虫 12 064 条, 隶属于线虫动物门 3 纲 7 目 15 科 22 属, 对线虫群落的属组成、多样性、营养类群、生态指数和区系等进行分析。结果显示, 七里海湿地、国家海洋公园潮滩湿地、龙岛潮滩湿地和临港二期湿地的线虫丰度(相对于干土)分别为 1 151、1 121、890、860 条/100 g。不同湿地中线虫的总丰度无显著差异, 临港二期湿地相较于其他湿地而言, 食细菌线虫丰度较低, 捕食与杂食性线虫丰度增加, 通道指数下降, 成熟度指数上升。冗余分析表明, 土壤有机碳和含水率是影响线虫群落的主要环境因素。临港二期湿地呈现营养富集、食物网结构成熟的特征, 而其余湿地的食物网结构趋于退化。该研究为渤海湾滨海湿地的生态健康评估与科学管理提供了重要科学依据。

关键词: 生物多样性; 滨海湿地; 线虫群落; 代谢足迹

中图分类号: S154.38⁺6

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2026)02-0040-08

Distribution Characteristics of Soil Nematode Communities in Coastal Wetlands of Bohai Bay

LIU Yu¹, LI Yang^{2,3}, ZHAO Xingguo¹, LIU Xianbin¹

- Tianjin Marine Environmental Protection and Restoration Technology Engineering Center, College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;
- Key Laboratory of Environmental Protection Technology on Water Transport of Ministry of Transport, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China;
- Environmental Technology Development of TIWTE (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300456, China)

Abstract: The coastal wetlands along the western Bohai Bay hold significant ecological value, with soil nematodes serving as key bioindicators in evaluating wetland ecosystem health and restoration. This study collected soil samples from four wetlands along the western Bohai Bay—Qilihai Wetland, National Marine Park Tidal Wetland, Longdao Tidal Wetland, and Lingang Phase II Wetland. A total of 12 064 soil nematodes were isolated, belonging to 3 classes, 7 orders, 15 families, and 22 genera. The nematode community was analyzed in terms of genus composition, diversity, trophic groups, ecological indices, and floristic analysis. Results indicated that the nematode abundances (relative to dry soil) in the Qilihai Wetland, National Marine Park Tidal Wetland, Longdao Tidal Wetland, and Lingang Phase II Wetland were 1 151, 1 121, 890, and 860 individuals per 100 g, respectively. No significant differences were observed in the total nematode abundance among these wetlands. Compared to the other wetlands, Lingang Phase II Wetland exhibited lower abundance of bacterivorous nematodes, increased abundance of predatory and omnivorous nematodes, decreased channel index and elevated maturity index. Redundancy analysis identified soil organic carbon and moisture content as primary environmental factors influencing

收稿日期: 2024-11-19; 修回日期: 2025-05-06

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(4220070371); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(TKS20240802)

作者简介: 刘宇(2000—), 男, 安徽宿州人, 硕士研究生; 通信作者: 刘宪斌, 教授, lx0688@tust.edu.cn

the nematode community. Lingang Phase II Wetland showed characteristics of nutrient enrichment and a mature food web structure, whereas the food web structures in the other wetlands tended toward degradation. This study provides important scientific evidence for the ecological health assessment and scientific management of coastal wetlands along the western Bohai Bay.

Key words: biodiversity; coastal wetland; nematode community; metabolic footprint

引文格式:

刘宇,李阳,赵兴贵,等. 渤海湾滨海湿地土壤线虫群落分布特征[J]. 天津科技大学学报,2026,41(2):40-47.

LIU Y, LI Y, ZHAO X G, et al. Distribution characteristics of soil nematode communities in coastal wetlands of Bohai Bay[J]. Journal of Tianjin university of science and technology, 2026, 41(2):40-47.

渤海湾位于渤海西岸,是一个典型的半封闭海湾。作为陆海生态系统交界的重要地带,它不仅对全球环境变化表现出高度敏感性,而且是生物多样性研究的热点区域。湿地生态系统兼具陆地和水域的双重环境特征,具有高度丰富的生物多样性,是地球上初级生产力最高的生态系统之一^[1],在碳储存、水质净化及生物多样性保护方面具有重要作用^[2]。目前对湿地的研究主要集中在湿地外来植物入侵及人为干扰影响等方面,湿地生态系统中的生物群落也受到越来越多的关注^[3-4]。

土壤线虫不仅物种丰富、分布广泛,在有机质分解和营养循环方面发挥关键作用,还是湿地生态系统的重要生物类群,其群落分布特征对湿地生境具有重要的指示作用^[5]。湿地土壤异质性影响着线虫群落的分布与组成,土壤有机质含量、pH及含水率共同影响着线虫丰度与群落组成^[6-8]。通常,高有机质含量的土壤可显著提高线虫丰度和多样性,而盐渍化和干旱环境则会使线虫群落发生趋同演替^[9]。土壤线虫群落在地下食物网中占据重要的枢纽地位,通过调节有机质矿化速率、营养循环等生态过程,维持湿地生态系统的稳定性^[10]。

土壤线虫作为一种指示生物,对环境因子变化敏感^[11]。例如,土壤中的有机物可以增加体型小、世代周期短且繁殖能力强的食细菌线虫数量,同时降低植物寄生线虫的多样性^[12-13]。有研究^[14]表明,头叶属(*Cephalobus*)和小杆属(*Rhabditis*)食细菌线虫的群落特征,随有机污染物迁移而发生变化,可作为污染源的早期指示。因此,线虫的群落特征可以有效揭示湿地生态系统的土壤环境。

本研究从河口与海岸带土壤生态学角度出发,选取渤海湾4个湿地(天津宁河七里海湿地、天津滨海国家海洋公园潮滩湿地、河北唐山龙岛潮滩湿地和天津临港二期湿地)进行取样调查,通过分离和鉴定线

虫,分析不同湿地中线虫的丰度、群落组成及其多样性指数,通过计算线虫的生态指数与代谢足迹,探明湿地类型对线虫群落功能的影响,进而评估线虫群落结构与环境因子之间的关系。本研究通过分析我国渤海湾主要湿地土壤线虫群落特征,揭示了湿地生态系统土壤线虫群落的空间分布规律,旨在丰富和完善湿地生态系统土壤线虫分布格局的理论体系。

1 材料与方法

1.1 采样区域与样品采集

研究区域位于渤海湾,包括天津宁河七里海湿地(39°18'26.99" N, 117°32'12.26" E)、天津滨海国家海洋公园潮滩湿地(39°10'56.66" N, 117°51'4.11" E)、河北唐山龙岛潮滩湿地(39°1'30.23" N, 118°43'55.86" E)和天津临港二期湿地(38°54'29.07" N, 117°40'42.03" E)。该区域属暖温带大陆性季风气候,昼夜温差大,年平均气温 11~14℃,年均降水量 500~700 mm,土壤类型为滨海盐土、盐化潮土、沼泽土和水稻土。七里海湿地为盐沼湿地,国家海洋公园潮滩湿地与龙岛潮滩湿地属于潮间带湿地,而临港二期湿地为内陆湿地^[15-18]。

本研究在每个湿地内选取3个采样地,于2023年8月按照五点法^[19]用内径5 cm的取土器采集0~15 cm深度的土壤样品,共收集12份土壤样品。土壤样品均匀混合后放入有编号的自封袋中保存,带回实验室进行后续分析,分别用于线虫的分离鉴定以及土壤的理化性质分析。

1.2 土壤线虫分离与鉴定

称取50 g混合土壤样品,采用浅盘法^[20]分离土壤线虫,分离时间为48 h,用质量分数5%的甲醛溶液固定保存线虫。根据《中国土壤动物检索图鉴》^[21]和文献^[22]在倒置显微镜下将土壤线虫鉴定至属水

平,每个样品至少鉴定 150 条线虫,并依据土壤含水率将线虫数量折算为每 100 g 干土中的线虫数量。

1.3 土壤理化性质测定

土壤理化性质的分析方法参考《土壤农业化学分析方法》^[23]。含水率采用质量法测定,有机碳含量使用外加热-重铬酸钾容量法测定,总氮含量使用高氯酸-硫酸硝化法测定,总磷含量使用碱熔-钼锑抗分光光度法测定,pH 则采用水浸提电位法(水土比为 2.5 : 1)测定,盐度使用数显盐度计测定。

1.4 群落分析

参考 Bongers 的方法,采用多样性指数(H')、优势度指数(λ)、丰富度指数(R_s)和均匀度指数(J)描述线虫多样性和群落特征^[24]。

$$H' = -\sum P_i \times \ln P_i \quad (1)$$

$$P_i = N_i / N \quad (2)$$

$$\lambda = \sum P_i^2 \quad (3)$$

$$R_s = (S-1) / \lg S \quad (4)$$

$$J' = H' / \ln S \quad (5)$$

式中: N_i 为土壤线虫每个属的个体数量, N 为线虫群落总个体数量, P_i 为二者比值; S 为物种数。

线虫生态指数包括通路比值(R_{NC})、成熟度指数(I_M)、基础指数(I_B)、结构指数(I_S)、富集指数(I_E)和通道指数(I_C)。同时,本研究计算了线虫代谢足迹、富集足迹、结构足迹和功能足迹指数^[25]。

$$R_{NC} = N_{BF} / (N_{BF} + N_{FF}) \quad (6)$$

式中: N_{BF} 、 N_{FF} 分别为食细菌、食真菌线虫的数量。

$$I_M = \sum_i^n V_i \times P_i \quad (7)$$

式中: i 为土壤线虫营养类群, n 为土壤线虫 $c-p$ 值, V_i 为土壤线虫第 i 类群的 $c-p$ 值, P_i 为土壤线虫每个属的个体数量(N_i)与线虫群落总个体数量(N)的比值。

表 1 各考察湿地土壤理化指标

Tab. 1 Physicochemical properties of soils in the studied wetlands

研究区域	总氮含量/(g/kg)	总磷含量/(g/kg)	含水率/%	有机碳含量/(g/kg)	pH	盐度
七里海湿地	0.19 ± 0.14	0.86 ± 0.17	16.4 ± 1.05	35.5 ± 2.44 ^a	7.79 ± 0.03	17.2 ± 4.04
国家海洋公园潮滩湿地	0.55 ± 0.29	0.86 ± 0.17	18.4 ± 1.85	34.8 ± 4.06 ^a	7.84 ± 0.06	15.8 ± 1.20
龙岛潮滩湿地	0.10 ± 0.03	1.04 ± 0.20	17.4 ± 0.35	37.8 ± 0.54 ^a	7.73 ± 0.01	17.0 ± 0.29
临港二期湿地	0.09 ± 0.01	0.84 ± 0.06	16.1 ± 0.42	24.0 ± 0.86 ^b	7.82 ± 0.09	15.8 ± 0.27

注:不同字母表示 4 个湿地间土壤理化指标差异显著($P < 0.05$)。

2.2 不同湿地土壤线虫群落组成及丰度

本研究共分离出土壤线虫 12 064 条,隶属于线虫动物门 3 纲(色矛纲、刺嘴纲和尾感器纲)7 目 15 科 22 属。4 个考察湿地中各属线虫的丰度见表 2,不同湿地土壤线虫丰度和不同营养类群的丰度如图 1

$$I_B = 100 \times [b / (e + b + s)] \quad (8)$$

$$I_S = 100 \times [s / (s + b)] \quad (9)$$

$$I_E = 100 \times [e / (e + b)] \quad (10)$$

$$b = 0.8 \times (A_{Ba,2} + A_{Fu,2}) \quad (11)$$

$$e = 3.2 \times A_{Ba,1} + 0.8 \times A_{Fu,2} \quad (12)$$

$$s = A_{Ba,n} \times W_n + A_{Fu,n} \times W_n + A_{OP,n} \times W_n \quad (13)$$

$$I_C = 100 \times [0.8A_{Fu,2} / (3.2A_{Ba,1} + 0.8A_{Fu,2})] \quad (14)$$

式中: n 为土壤线虫 $c-p$ 值,取值范围为 3 ~ 5; $W_3 = 1.8$, $W_4 = 3.2$, $W_5 = 5.0$; $A_{Ba,n}$ 表示 $c-p$ 值为 n 的食细菌线虫的多度; $A_{Fu,n}$ 表示 $c-p$ 值为 n 的食真菌线虫的多度; $A_{OP,n}$ 表示 $c-p$ 值为 n 的捕食/杂食性线虫的多度。

1.5 数据分析

使用 SPSS 27.0 中单因素方差分析对不同湿地土壤线虫群落指标进行差异性检验,并使用 LSD 法进行事后多重比较。用冗余分析(RDA)分析各湿地线虫群落与环境因子的关系,用 Pearson 法检验分析环境因子与线虫群落指标的相关性。

2 结果与分析

2.1 不同湿地土壤的理化性质

七里海湿地、国家海洋公园潮滩湿地、龙岛潮滩湿地和临港二期湿地的总氮含量、总磷含量、有机碳含量、含水率、pH、盐度等理化指标见表 1。国家海洋公园潮滩湿地土壤总氮含量为(0.55 ± 0.29) g/kg,高于其他 3 个湿地,但差异不显著($P > 0.05$)。临港二期湿地土壤有机碳含量为(24.0 ± 0.86) g/kg,显著低于其他湿地($P = 0.016$)。这 4 个湿地的总氮含量、总磷含量、含水率、pH 和盐度差异不显著($P > 0.05$)。

所示。土壤中线虫平均丰度为 1 005 条/100 g(相对于干土,下同),其中七里海湿地、国家海洋公园潮滩湿地、龙岛潮滩湿地和临港二期湿地的线虫平均丰度分别为 1 151、1 121、890、860 条/100 g [图 1(a)]。在属水平,不同湿地土壤中 11 个属的平均丰度差异显

著, 临港二期湿地野外垫刃属的平均丰度为 55 条/100 g, 显著高于其他湿地; 螺旋属线虫在国家海洋公园潮滩湿地的平均丰度为 54 条/100 g, 显著高于龙岛潮滩湿地和临港二期湿地。在优势属方面, 食真菌线虫真滑刃属(*Aphelenchus*) 在 4 个湿地中均为优势属(相对丰度大于 10%); 食细菌线虫绕线属(*Plectus*) 和鹿角唇属(*Cervidellus*) 为七里海湿地、国家海洋公园潮滩湿地和龙岛潮滩湿地的优势属; 植物寄生线虫短体线虫属(*Pratylenchus*) 为龙岛潮滩湿地和临港二期

湿地的优势属。

各湿地线虫营养类群丰度排序为食细菌线虫 > 食真菌线虫 > 植物寄生线虫 > 捕食/杂食性线虫。其中临港二期湿地食细菌线虫丰度显著低于其他湿地 ($F = 13.248, P = 0.002$), 但捕食/杂食性线虫丰度显著高于国家海洋公园潮滩湿地和龙岛潮滩湿地 ($F = 7.076, P = 0.012$)。龙岛潮滩湿地植物寄生线虫丰度显著低于其他湿地 ($F = 5.157, P = 0.028$)。

表 2 各考察湿地土壤线虫群落组成

Tab. 2 Composition of soil nematode communities in the studied wetlands

类别	c-p 值	群落组成/(条/100 g)			
		七里海湿地	国家海洋公园潮滩湿地	龙岛潮滩湿地	临港二期湿地
食细菌类群(Bacterivores)		618.0 ± 78.3	588.5 ± 43.8	442.1 ± 37.7	291.7 ± 22.1
小杆属(<i>Rhabditis</i>)	1	44.5 ± 7.6 ^a	27.8 ± 9.02 ^{ab}	18.8 ± 2.71 ^{ab}	14.2 ± 5.65 ^b
拟丽突属(<i>Acrobeloides</i>)	2	51.6 ± 12.4	54.1 ± 8.23	28.2 ± 4.69	19.2 ± 4.39
头叶属(<i>Eucephalobus</i>)	2	64.5 ± 5.83	47.7 ± 11.1	64.2 ± 6.65	30.9 ± 8.15
高杯侧属(<i>Chiloplacus</i>)	2	109 ± 10.3 ^a	105 ± 1.73 ^{ab}	80.6 ± 4.14 ^{ab}	65.6 ± 15.8 ^b
绕线属(<i>Plectus</i>)	2	142 ± 21.8 ^a	132 ± 10.6 ^a	110 ± 9.87 ^{ab}	53.9 ± 14.4 ^b
单宫属(<i>Monhystera</i>)	2	9.46 ± 5.53	3.06 ± 3.06	6.26 ± 1.56	15.4 ± 6.64
鹿角唇属(<i>Cervidellus</i>)	2	120 ± 4.60 ^a	125 ± 8.20 ^a	93.9 ± 8.65 ^a	48.9 ± 14.7 ^b
丽突属(<i>Acrobeles</i>)	2	54.7 ± 9.49 ^{ab}	66.5 ± 10.6 ^a	21.9 ± 5.64 ^b	20.6 ± 7.90 ^b
巴氏属(<i>Bastiania</i>)	3	6.27 ± 3.13	15.43 ± 11.0	9.39 ± 2.71	6.42 ± 4.61
无咽属(<i>Alaimus</i>)	4	15.7 ± 8.40	12.4 ± 2.98	9.39 ± 2.71	16.7 ± 5.55
食真菌类群(Fungivores)		298.5 ± 26.5	322.9 ± 30.6	284.8 ± 27.9	273.6 ± 26.4
滑刃属(<i>Aphelenchoides</i>)	2	41.2 ± 8.78	28.0 ± 5.31	21.9 ± 4.14	55.3 ± 10.2
真滑刃属(<i>Aphelenchus</i>)	2	164 ± 7.96 ^a	171 ± 1.13 ^a	159 ± 7.18 ^a	104 ± 17.1 ^b
茎线虫属(<i>Ditylenchus</i>)	2	12.5 ± 6.27	48.5 ± 15.5	41.5 ± 4.51	8.99 ± 5.58
丝尾垫刃属(<i>Filenchus</i>)	2	61.6 ± 3.89 ^a	30.7 ± 10.9 ^{bc}	9.39 ± 2.71 ^c	52.6 ± 5.45 ^{ab}
膜皮属(<i>Diphtherophora</i>)	3	9.46 ± 5.53	29.2 ± 15.7	28.2 ± 5.42	29.5 ± 10.5
垫咽属(<i>Tylencholaimus</i>)	4	9.34 ± 5.33	15.7 ± 8.44	25.0 ± 4.14	23.1 ± 7.97
捕食/杂食类群(Omnivores-predators)		59.4 ± 11.7	28.3 ± 9.9	31.3 ± 6.8	102.9 ± 15.2
真矛线属(<i>Eudorylaimus</i>)	4	6.15 ± 3.08 ^b	3.06 ± 3.06 ^b	3.13 ± 1.56 ^b	45.0 ± 9.37 ^a
小矛线属(<i>Microdorylaimus</i>)	4	15.7 ± 8.40	19.1 ± 14.8	18.8 ± 2.71	42.5 ± 15.7
锉齿属(<i>Mylonchulus</i>)	4	37.5 ± 5.82 ^a	6.11 ± 3.06 ^b	9.39 ± 2.71 ^b	15.4 ± 6.64 ^b
植物寄生类群(Plant-parasites)		175.5 ± 16.3	181.1 ± 18.1	131.5 ± 6.0	191.4 ± 2.7
野外垫刃属(<i>Aglenchus</i>)	2	15.7 ± 6.49 ^b	18.3 ± 9.17 ^b	12.5 ± 1.56 ^b	55.2 ± 6.83 ^a
螺旋属(<i>Helicotylenchus</i>)	3	46.7 ± 0.56 ^{ab}	54.1 ± 8.23 ^a	15.7 ± 3.13 ^c	26.9 ± 7.96 ^{bc}
短体线虫属(<i>Pratylenchus</i>)	3	113 ± 10.1	109 ± 3.31	103 ± 3.52	109 ± 13.4
总线虫丰度		1 151.4 ± 131.5	1 120.8 ± 53.7	889.6 ± 71.5	859.6 ± 55.2

注: 同行不同字母表示 4 个湿地间土壤线虫丰度差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 不同湿地土壤线虫多样性与线虫生态指数

七里海湿地、国家海洋公园潮滩湿地、龙岛潮滩湿地和临港二期湿地线虫多样性指数、优势度指数、丰富度指数和均匀度指数结果见表 3。结果表明, 除优势度指数外, 临港二期湿地土壤线虫多样性指数均高于其他湿地; 比较各湿地的群落特征优势度(指数, 七里海湿地和临港二期湿地的线虫优势度指数均

低于国家海洋公园潮滩湿地和龙岛潮滩湿地。土壤线虫各多样性指数在 4 个湿地样地间均无显著差异 ($P > 0.05$)。

在计算的 6 个线虫生态指数中(表 4), 临港二期湿地土壤中线虫通路比值 ($F = 14.136, P = 0.001$) 和基础指数 ($F = 11.494, P = 0.003$) 显著低于其他湿地, 但其成熟度指数 ($F = 19.529, P < 0.001$) 和结构指数

($F = 11.406, P = 0.003$) 显著高于其他湿地。

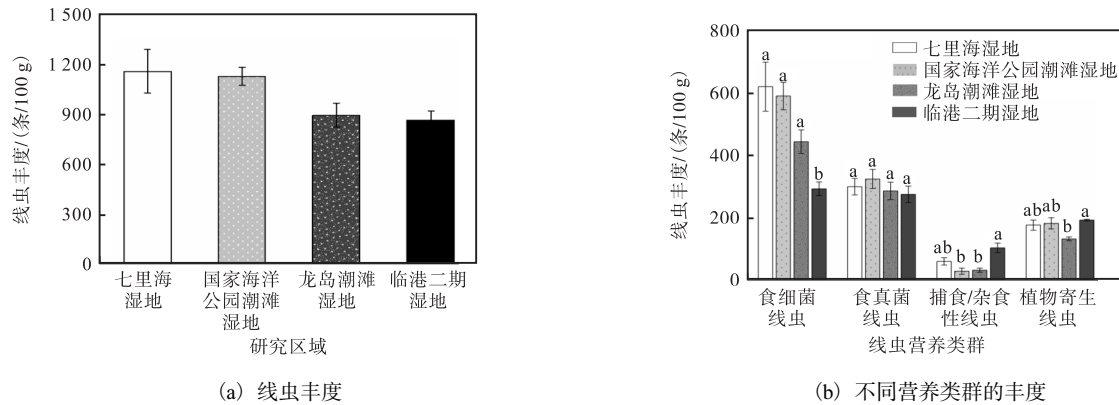


图 1 不同湿地土壤线虫丰度和不同营养类群的丰度
Fig. 1 Abundance of soil nematode and different trophic groups in different wetlands

表 3 不同湿地土壤线虫的多样性和群落特征

Tab. 3 Diversity and community characteristics of soil nematodes in different wetlands

研究区域	H'	λ	R_s	J
七里海湿地	2.66 ± 0.07	0.08 ± 0.01	2.99 ± 0.05	0.86 ± 0.02
国家海洋公园潮滩湿地	2.63 ± 0.04	0.09 ± 0.00	2.99 ± 0.02	0.85 ± 0.01
龙岛潮滩湿地	2.63 ± 0.04	0.09 ± 0.00	3.10 ± 0.04	0.85 ± 0.01
临港二期湿地	2.79 ± 0.07	0.07 ± 0.01	3.11 ± 0.03	0.90 ± 0.02

注:各多样性指数间均无显著差异($P > 0.05$)。

表 4 不同湿地土壤线虫生态指数

Tab. 4 Ecological indices of soil nematodes in different wetlands

研究区域	R_{NC}	I_M	I_B	I_S	I_E	I_C
七里海湿地	0.67 ± 0.01^a	2.26 ± 0.02^b	52.23 ± 1.10^a	26.56 ± 2.38^b	35.54 ± 0.75	61.49 ± 3.04^b
国家海洋公园潮滩湿地	0.65 ± 0.02^a	2.26 ± 0.04^b	55.75 ± 4.72^a	23.91 ± 7.66^b	32.19 ± 1.77	72.71 ± 5.22^{ab}
龙岛潮滩湿地	0.61 ± 0.02^a	2.30 ± 0.01^b	50.98 ± 1.33^a	32.46 ± 1.61^b	32.48 ± 1.10	75.74 ± 1.24^{ab}
临港二期湿地	0.52 ± 0.02^b	2.52 ± 0.03^a	35.73 ± 1.43^b	55.03 ± 1.80^a	36.45 ± 1.90	81.39 ± 5.60^a

注:同列不同字母表示 4 个湿地间土壤线虫生态指数差异显著($P < 0.05$)。

2.4 不同湿地土壤线虫区系分析和代谢足迹

线虫区系分析是以不同类型指数定性判断土壤食物网的结构、状态、分解途径及调节功能等,进而评价土壤食物网对外界干扰的响应。线虫代谢足迹是指线虫通过代谢活动(生物量增长和呼吸)驱动的能量通量,可以指示食物网结构和功能的相对大小。线虫区系分析结果显示:临港二期湿地线虫分布在 C 象限内;七里海湿地、国家海洋公园潮滩湿地和龙岛潮滩湿地主要分布于 D 象限(图 2)。线虫功能代谢足迹(菱形总面积)表现为七里海湿地 > 临港二期湿地 > 国家海洋公园潮滩湿地 > 龙岛潮滩湿地。

2.5 各湿地环境因子和土壤线虫群落的关系

为进一步探讨土壤线虫群落组成变化是否和环境驱动因素有关,对线虫群落各属同土壤理化性质进行冗余分析(RDA),结果如图 3 所示。由图 3 可知:轴 1 解释了 31.26%的方差,轴 2 解释了 15.50%的方差,土壤有机碳含量和含水率是影响土壤线虫群落各

属数量的主要环境因子。相关性分析结果表明,巴氏属(*Bastiania*)线虫($P = 0.031$)和茎线虫属(*Ditylenchus*)线虫($P = 0.04$)与含水率呈显著正相关,真矛线属(*Eudorylaimus*)线虫($P = 0.021$)、野外垫刃属(*Aglenchus*)线虫($P = 0.005$)和小矛线属(*Microdorylaimus*)线虫($P = 0.035$)与有机碳呈显著负相关(图

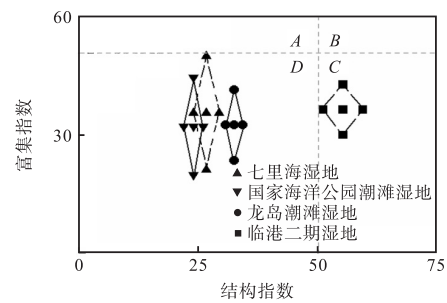


图 2 不同湿地土壤线虫区系分析(基于线虫代谢足迹)
Fig. 2 Analysis of soil nematode fauna in different wetlands (based on nematode metabolic footprints)

4)。植物寄生线虫丰度和总磷呈显著负相关 ($P = 0.009$), 线虫多样性指数 ($P = 0.022$) 和均匀度指数 ($P = 0.024$) 与有机碳呈显著负相关(表 5)。

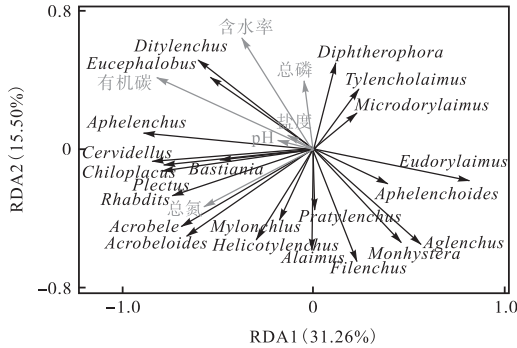


图 3 不同湿地土壤线虫群落 RDA 分析

Fig. 3 RDA analysis of soil nematode communities in different wetlands

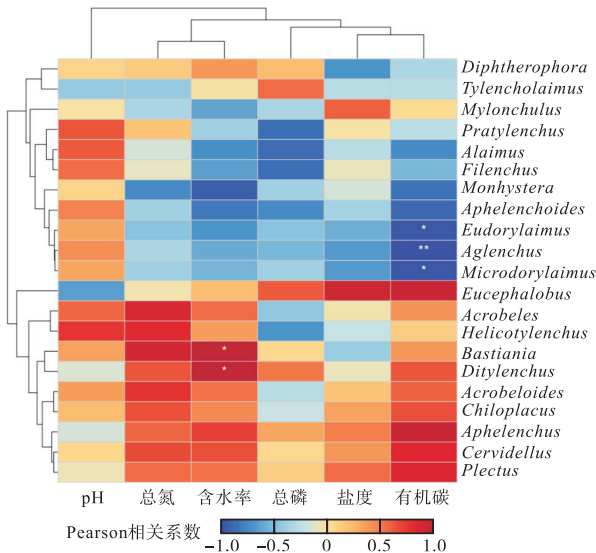


图 4 不同湿地土壤线虫群落与环境因子的 Pearson 相关性热图

Fig. 4 Pearson correlation thermograms between soil nematode communities and environmental factors in different wetlands

表 5 不同湿地土壤线虫数量、营养类群、生态指数与环境因子间的 Pearson 相关系数

Tab. 5 Pearson correlation coefficients among soil nematode abundance, trophic groups, ecological indices, and environmental factors in different wetlands

指标	Pearson 相关系数					
	总氮	总磷	含水率	有机碳	pH	盐度
线虫丰度	0.675	-0.406	0.362	0.473	0.415	0.204
食细菌线虫丰度	0.617	0.016	0.552	0.800	0.051	0.446
食真菌线虫丰度	0.941	-0.214	0.793	0.534	0.445	-0.090
植物寄生线虫丰度	0.305	-0.991**	-0.269	-0.700	0.924	-0.643

续表

指标	Pearson 相关系数					
	总氮	总磷	含水率	有机碳	pH	盐度
捕食/杂食性线虫丰度	-0.612	-0.531	-0.927	-0.831	0.223	-0.185
多样性指数	-0.464	-0.533	-0.735	-0.978*	0.360	-0.525
丰富度指数	-0.711	0.397	-0.408	-0.482	-0.427	-0.175
优势度指数	0.197	0.813	0.654	0.936	-0.636	0.566
均匀度指数	-0.472	-0.525	-0.739	-0.976*	0.350	-0.520
通路比值	0.508	0.086	0.476	0.836	-0.058	0.559
结构指数	-0.620	-0.208	-0.682	-0.893	0.078	-0.452
富集指数	-0.567	-0.584	-0.936	-0.726	0.237	-0.059
基础指数	0.633	0.283	0.750	0.912	-0.115	0.419
成熟度指数	-0.518	-0.289	-0.621	-0.933	0.191	-0.558
通道指数	-0.215	0.138	-0.025	-0.593	0.022	-0.657

注: *表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$ 。

3 讨论

3.1 湿地类型与线虫群落特征的关系

本研究考察了渤海湾 4 个滨海湿地中土壤线虫群落组成的特征, 研究发现不同湿地土壤中存在 11 个线虫属的丰度差异, 这可能与湿地类型的土壤食物网结构及其受干扰程度有关^[26]。已有研究表明, 土壤线虫的分布存在时空异质性, 王杨^[27]报道了不同时空条件下的土壤线虫数量的变化, 他发现不同时间尺度下土壤线虫的群落结构差异显著且秋季土壤线虫多样性高于春季; 焦加国等^[28]的研究也表明, 不同农业区间土壤线虫数量和群落组成均有显著的差异性。在本研究中, 临港二期湿地的野外垫刃属丰度显著高于其他湿地, 这可能由于其为植物寄生线虫, 在海岸带生态系统中, 植物根系发达及凋落物生物量的增加有助于提高土壤养分含量, 从而促进其生长和繁殖^[29]。此外, 螺旋属线虫在国家海洋公园潮滩湿地的丰度显著高于龙岛潮滩湿地和临港二期湿地, 且其丰度变化趋势与土壤总氮含量一致, 这可能与螺旋属线虫对土壤总氮含量的敏感性有关^[30]。

不同营养类群的线虫在 4 个湿地间同样存在差异, 这种差异可能与其在土壤生态系统中受到的“上行”控制效应有关^[31]。本研究发现, 七里海湿地、国家海洋公园潮滩湿地和龙岛潮滩湿地的食细菌线虫丰度显著高于临港二期湿地, 这一差异可能与土壤有机碳含量有关。研究结果显示, 临港二期湿地的土壤有机碳含量显著低于其他湿地, 而土壤有机碳含量的降低可能不利于细菌类群的生长与繁殖, 从而导致食细菌线虫的食物来源减少, 丰度降低^[32]。此外, 捕食/杂食性线虫属于 k -选择者, 通常分布在稳定的生态

系统中,其处于食物网的较高营养级,但当湿地发生退化,处于较高营养级的捕食/杂食性线虫受到环境胁迫数量骤减,使土壤食物网代谢失去平衡,出现退化倾向^[33]。这与本研究发现结果一致,临港二期湿地的捕食/杂食性线虫丰度显著高于国家海洋公园潮滩湿地和龙岛潮滩湿地。这可能是由于临港二期湿地的土壤生态系统为其提供了丰富的食物资源,从而使捕食/杂食性线虫的比例增加^[34]。这也反映出临港二期湿地的生态系统及土壤食物网结构相对稳定。综上所述,线虫营养类群受到湿地类型、环境因子等多重因素的共同影响。

3.2 湿地类型与线虫生态功能的关系

线虫生态指数对指示线虫群落结构特征有着重要意义。首先,通路比值是描述土壤线虫群落在生态系统功能路径中的贡献程度,常用于指示土壤有机质的分解途径,其数值越接近 1,表示分解者中食细菌线虫的比例越高^[35]。七里海湿地、国家海洋公园潮滩湿地和龙岛潮滩湿地的线虫通路比值显著高于临港二期湿地,且均大于 0.6。这表明除临港二期湿地外,食细菌线虫为线虫群落的主要类群。成熟度指数可指示沉积物在受扰动后的恢复状况^[36]。临港二期湿地的成熟度指数显著高于其他湿地,表明其受干扰程度较小,这可能与其地理位置的差异有关^[37]。

线虫群落组成的差异导致线虫代谢足迹的变化。七里海湿地的线虫功能代谢足迹高于其他湿地,提示该湿地线虫群落对碳的利用率更高。这可能是由于七里海湿地食细菌线虫的比例较大,且大部分属于 $c-p$ 值为 1 及 $c-p$ 值为 2 的线虫类群。 $c-p$ 值较小的线虫更偏于为 r -选择者,个体较小、生命周期较短、代谢速率快,对外源养分输入反应迅速,因而资源利用率较高^[38]。在 4 个滨海湿地中,临港二期湿地的结构代谢足迹最大,表明捕食/杂食性线虫的代谢活性更强^[39]。这可能与临港二期湿地土壤的营养富集状况良好、食物网结构成熟稳定以及捕食/杂食性线虫比例最高有关,从而使更多物质和能量从较低营养级流向较高营养级。

线虫代谢足迹反映了不同湿地土壤生态系统中的食物网结构。基于线虫代谢足迹的区系分析结果显示,临港二期湿地的线虫主要分布在 C 象限,表明该湿地土壤的干扰程度低,营养富集状况良好,食物网结构成熟稳定;而七里海湿地、国家海洋公园潮滩湿地和龙岛潮滩湿地的线虫则主要分布在 D 象限,说明这些湿地土壤受到较高等度的干扰,食物网有退

化趋势^[40]。这些结果可能与临港二期湿地属内陆人工修复湿地,能够有效富集营养和改善土壤环境有关,而七里海湿地、国家海洋公园潮滩湿地和龙岛潮滩湿地则作为近岸湿地,土壤环境更易受到外界干扰。

4 结 语

本研究通过对渤海湾 4 个滨海湿地土壤线虫群落及其生态功能分析,揭示了湿地类型对土壤生物多样性及其生态功能的深刻影响。结果显示,不同湿地类型的土壤线虫群落在组成中表现出显著差异,反映了湿地生态系统在环境异质性和人为干扰下的多重响应。其中,临港二期湿地因稳定的管理条件表现出更成熟的食物网结构和较低的生态干扰水平,而七里海湿地等自然湿地则呈现出较高的资源利用能力和生态干扰迹象,突显了不同湿地管理模式对土壤生物多样性和生态功能的调节作用。同时,线虫代谢足迹分析进一步揭示了不同湿地的功能特性,临港二期湿地食物网稳定性较强,而七里海湿地线虫群落具有对外源养分的快速响应能力。线虫生态指数的变化也指示了湿地生态系统的健康状况,验证了线虫群落作为湿地功能评估工具的科学性和可靠性。因此,合理优化湿地的管理策略,结合湿地功能和线虫群落的生态指示特性,有助于实现滨海湿地的生态保护与资源利用协同发展。本研究为滨海湿地生态系统可持续管理提供了重要的科学依据,也为进一步探索湿地生态系统的复杂性和稳定性奠定了理论基础。

参考文献:

- [1] 武海涛,吕宪国,姜明,等. 三江平原典型湿地土壤动物群落结构及季节变化[J]. 湿地科学, 2008, 6(4): 459-465.
- [2] 张乾,朱建佳,张锐,等. 津冀海岸带绿地碳储存服务时空分布特征[J]. 现代园艺, 2022, 45(7): 20-22.
- [3] 陈慧丽. 互花米草入侵对长江口盐沼湿地线虫群落的影响及其机制[D]. 上海:复旦大学, 2008.
- [4] 程智超,王文浩,隋心,等. 基于文献计量分析的湿地土壤微生物研究热点趋势[J]. 中国农学通报, 2020, 36(29): 145-152.
- [5] JIANG Y J, QIAN H Y, WANG X Y, et al. Nematodes and microbial community affect the sizes and turnover rates of organic carbon pools in soil aggregates[J]. Soil biology and biochemistry, 2018, 119: 22-31.

- [6] WU J H, FU C Z, LU F, et al. Changes in free-living nematode community structure in relation to progressive land reclamation at an intertidal marsh[J]. *Applied soil ecology*, 2005, 29(1): 47–58.
- [7] 杨昌烧,莫笑梅,郑国,等. 降水格局变化对土壤线虫氮沉降抵抗力的影响[J]. *生态学杂志*, 2025, 44(4): 1253–1260.
- [8] 寇钊阳,李春越,肖凤娇,等. 氮磷添加对黄土旱塬农田土壤线虫群落及能量结构的影响[J]. *生态学报*, 2024, 44(5): 1962–1971.
- [9] CHEN H L, LI B, FANG C M, et al. Exotic plant influences soil nematode communities through litter input[J]. *Soil biology and biochemistry*, 2007, 39(7): 1782–1793.
- [10] WANG J C, LIU T, ZHAO J, et al. Energy flows through nematode food webs depending on the soil carbon and nitrogen contents after forest conversion[J]. *Science of the total environment*, 2024, 935: 173322.
- [11] ZHAO J, LI D J, FU S L, et al. Using the biomasses of soil nematode taxa as weighting factors for assessing soil food web conditions[J]. *Ecological indicators*, 2016, 60: 310–316.
- [12] XU X, JIANG R Q, WANG X L, et al. Protorhabditis nematodes and pathogen-antagonistic bacteria interactively promote plant health[J]. *Microbiome*, 2024, 12(1): 221.
- [13] OBIDARI T, FILALI A I, AIT H M, et al. Diversity, distribution, and biological control strategies of plant parasitic nematodes: insights from Morocco within a global context: a comprehensive review and future research perspectives[J]. *Journal of plant diseases and protection*, 2024, 131: 1779–1802.
- [14] HAN D C, ZHANG X K, TOMAR V V S, et al. Effects of heavy metal pollution of highway origin on soil nematode guilds in North Shenyang, China[J]. *Journal of environmental sciences*, 2009, 21(2): 193–198.
- [15] 李世勇,丁虎,陈静,等. 天津七里海湿地生长季土壤CO₂通量及水热因子变化特征[J]. *生态学杂志*, 2025, 44(1): 85–93.
- [16] 王福,裴艳东,李建芬,等. 天津潮间带高程现状与滨海新区城市安全[J]. *地质通报*, 2010, 29(5): 682–687.
- [17] 程林,田海兰,刘西汉,等. 近44年来滦河口障壁岛演变过程及其影响因素研究:以唐山市龙岛为例[J]. *海洋科学*, 2020, 44(6): 22–30.
- [18] 李艳英,顾修君,周滨,等. 北方滨海人工湿地水生生物群落重建效果评估:以天津临港湿地二期生态重建工程为例[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(5): 1713–1720.
- [19] 梁歆珖. 基于场地概念模型的工业场地土壤采样布点方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2021.
- [20] JAKUBCSIKOVÁ M, DEMKOVÁ L, RENČO M, et al. Impact of *Solidago gigantea* invasion on nematode communities in grasslands[J]. *Nematology*, 2024, 26(7): 779–793.
- [21] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京:科学出版社,1998.
- [22] BONGERS T. The Nematodes of the Netherlands (De Nematoden van Nederland) [M]. Utrecht: Foundation Publisher of Royal Dutch Natural History Society, 1994.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
- [24] BONGERS T, BONGERS M. Functional diversity of nematodes[J]. *Applied soil ecology*, 1998, 10(3): 239–251.
- [25] FERRIS H. Form and function: metabolic footprints of nematodes in the soil food web[J]. *European journal of soil biology*, 2010, 46(2): 97–104.
- [26] CHEN J L, ZHANG Y F, LIU C, et al. Distribution pattern of soil nematode communities along an elevational gradient in arid and semi-arid mountains of Northwest China[J]. *Frontiers in plant science*, 2024, 15: 1466079.
- [27] 王杨. 云岭山系土壤线虫多样性与群落特征的空间分布格局[D]. 大理:大理大学,2024.
- [28] 焦加国,刘贝贝,毛妙,等. 江苏省不同农业区土壤线虫群落分布特征[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(11): 3489–3496.
- [29] 谷旭. 辽东半岛海岸带不同植被类型中土壤线虫群落特征[D]. 大连:辽宁师范大学,2013.
- [30] 沙玉宝,干珠扎布,胡国铮,等. 藏北高寒草甸土壤线虫群落结构和多样性对增氮的响应[J]. *草业学报*, 2023, 32(1): 154–164.
- [31] 刘贝贝,叶成龙,虞丽,等. 不同植被类型的滩涂湿地土壤线虫群落特征[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(11): 3057–3064.
- [32] STEINMULLER H E, CHAMBERS L G. Characterization of coastal wetland soil organic matter: implications for wetland submergence[J]. *Science of the total environment*, 2019, 677: 648–659.
- [33] 赵芳,张明伟,王春雯,等. 锦鸡儿属灌丛化对草原化荒漠区土壤线虫群落组成和代谢足迹的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(10): 4124–4136.

抄片 ISO 白度均提高了 1.3%。由此可见,将木聚糖酶直接加入漂段中使其与漂白剂协同作用,既能提高白度,保持纸浆的各项物理性能,还可以降低能耗,减少对环境的污染。与直接将酶加入相应漂段相比,在进行两段酶漂且降低两段酶用量的情况下,漂后手抄片 ISO 白度增加 0.5%,但漂后纸张性能略有降低。

3 结 语

木聚糖酶用于纸浆预处理阶段和 $O(X_1D_0)E_P D_1$ 、 $OD_0(X_2E_P)D_1$ 漂序,均提高了漂后纸浆手抄片的白度。将木聚糖酶与漂白剂协同作用后,在减少漂白工段的基础上,漂后 ISO 白度达到 86.5%,纸张的物理强度略有提高,其中 $O(X_1D_0)E_P D_1$ 漂后纸浆所得纸页的抗张指数和耐破指数分别提高了 10.4%和 10.9%。

与酸性木聚糖酶用于酶预处理阶段相比,耐高温、耐碱的木聚糖酶更能适应纸浆漂白的工艺条件,可直接与碱性漂段相结合,使酶的使用更加灵活;酸性木聚糖酶在漂白中的使用略有局限性,只可与酸性漂段(如二氧化氯漂白)相结合或用于酶预处理阶段。

参考文献:

- [1] 林鹿,詹怀宇,付时雨,等. 制浆漂白生物技术与原理[M]. 2版. 北京:中国轻工业出版社,2012.
- [2] 潘梦丽,王春,平清伟,等. 纸浆绿色漂白技术新进展[J]. 中国造纸,2015,34(11):52-58.
- [3] VIHKARI L, KANTELINEN A, SUNDQUIST J, et al. Xylanases in bleaching: from an idea to the industry[J].

FEMS Microbiology reviews, 1994, 13(2/3):335-350.

- [4] 詹怀宇,黄方,李建军,等. 碱法纸浆木聚糖酶辅助漂白的研究与应用[C]//中国造纸学会. 中国造纸学会第十届学术年会论文集. 北京:中国造纸学会,2001:287-292.
- [5] 周杨. 耐高温木聚糖酶在纸浆漂白中的应用研究[D]. 广州:华南理工大学,2018.
- [6] 王阳,盛杰,刘旭,等. 木聚糖酶预处理在檀皮纤维漂白中的应用[J]. 造纸科学与技术,2019,38(1):59-63.
- [7] 陈阳雷,吉兴香,许凤. 纸浆木聚糖酶生物助漂技术进展[J]. 中国造纸,2017,36(12):74-78.
- [8] 解复红,李文鹏,张克勤. 耐碱和耐热木聚糖酶研究进展[J]. 中国生物工程杂志,2003(7):72-75.
- [9] ZHOU B Y, WANG Y, JIANG Z H, et al. How do xylanase and hot acid stages differ at enhancing elemental chlorine-free bleaching of hardwood kraft pulp?[J]. Journal of wood chemistry and technology, 2021, 41(4):150-159.
- [10] NAGAR S, GUPTA V K. Hyper production and eco-friendly bleaching of kraft pulp by xylanase from *Bacillus pumilus* SV-205 using agro waste material[J]. Waste and biomass valorization, 2021, 12:4019-4031.
- [11] 刘宁,崔丹丹,黎晨晨. 纤维素酶制备香蕉皮纳米纤维素的工艺条件研究[J]. 中国食品添加剂,2018(2):112-117.
- [12] 陈家杰. 酶促麦草纤维素微纤丝制备、结构及性能的研究[D]. 西安:陕西科技大学,2017.
- [13] 马龙虎,史贺,杨扬,等. 纤维素酶预处理对针叶木纤维形态的影响[J]. 黑龙江造纸,2022,50(2):1-5.

责任编辑:周建军

(上接第 47 页)

- [34] WU H Y, LI X X, SHI L B, et al. Distribution of nematodes in wetland soils with different distance from the Bohai sea[J]. Plant soil and environment, 2008, 54(8):359-366.
- [35] 杨舒涵,王贺,陈磊,等. 松嫩平原异质生境对土壤线虫群落特征的影响[J]. 生物多样性,2024,32(1):75-88.
- [36] BONGERS T. The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition[J]. Oecologia, 1990, 83:14-19.
- [37] 徐光林,贺梦璇,莫训强,等. 人工湿地与自然湿地的植物群落多样性以及种间联结性[J]. 天津师范大学学

报(自然科学版),2023,43(4):25-32.

- [38] ZHAO J, SHAO Y H, WANG X L, et al. Sentinel soil invertebrate taxa as bioindicators for forest management practices[J]. Ecological indicators, 2013, 24:236-239.
- [39] LI L L, LUO Z Z, NIAN L L, et al. Response of soil nematode community structure and metabolic footprint to nitrogen addition in alfalfa fields on the Loess Plateau[J]. Scientific reports, 2024, 14(1):17640.
- [40] MICHONNEAU F, BROWN J W, WINTER D J. RotI: an R package to interact with the Open Tree of Life data[J]. Methods in ecology and evolution, 2016, 7(12):1476-1481.

责任编辑:周建军