

鄱阳湖南矶湿地土壤动物群落结构与功能多样性分析

陈连水, 袁凤辉, 饶 军

东华理工大学师范学院生物系, 江西 南昌

收稿日期: 2025年5月29日; 录用日期: 2025年6月30日; 发布日期: 2025年8月25日

摘 要

南矶湿地位于鄱阳湖主湖区南部, 为赣江汇入鄱阳湖的最前沿地带, 是国家级自然保护区。本次对南矶湿地土壤动物多样性进行调查, 旨在为南矶湿地乃至鄱阳湖的保护利用提供依据。本次调查选取南山菜地(A)、南山滩涂(B)、南山灌丛(C)、矾山林地(D)、矾山灌丛(E)、矾山滩涂(F)6个典型样地, 各样地再选取3个样点, 分别收集表层土壤(含地表碎屑, 地表深5 cm以上)和深层土壤(地表深5 cm以下, 约10 cm厚); 经挑捡和自研Tullgren分离器分离收集土壤动物, 再进行分类鉴定、数理统计和多样性研究。本次调查共获得表层土壤动物6门26目71属80种, 节肢动物鞘翅目物种丰富度最高; 表层的群落多样性的分析表明, 矾山滩涂(F)的丰富度、矾山灌丛(E)的优势度、南山菜地(A)的多样性和南山菜地(A)的均匀度分别最高; 表层的SHE分析表明, 各样地间的表层土壤动物分布均匀且连续; 表层的聚类分析表明, 群落相似性大小依次为E = F-B-D-A-C。总之, 南矶湿地表层土壤动物多样性有着较强的表聚性, 其群落结构与功能突出表现在水平衔接与垂直联动上, 区域景观基底的梯度变化痕迹明显。另外, 本次调查共获得深层土壤动物5门16目28属30种, 节肢动物弹尾目物种丰富度最高; 深层的群落多样性的分析表明, 南山滩涂(B)的丰富度、矾山滩涂(F)的优势度、矾山滩涂(F)的多样性和南山菜地(A)的均匀度分别最高。深层的SHE分析表明, 各样地间的深层土壤动物分布均匀且连续; 深层的聚类分析表明, 群落相似性大小依次为C = D-E-F-B-A。总之, 南矶湿地深层土壤动物群落多样性要低于表层土壤, 但它更能反映南矶湿地生态系统的复杂性和稳定性样貌。概括地讲, 南矶湿地地上植物能映射其地下根系生长状况与改善植入土壤状态, 驱动以根尖为中心的邻近各土壤生物群落辐射演替, 塑造土壤基底-根系廊道-生物斑块动态变化的土壤结构与功能新格局。

关键词

鄱阳湖, 南矶湿地, 土壤动物, 群落, 结构, 功能, 多样性

Analysis of Soil Animal Community Structure and Functional Diversity in Nanji Wetland, Poyang Lake

Lianshui Chen, Fenghui Yuan, Jun Rao

文章引用: 陈连水, 袁凤辉, 饶军. 鄱阳湖南矶湿地土壤动物群落结构与功能多样性分析[J]. 世界生态学, 2025, 14(3): 253-268. DOI: 10.12677/ije.2025.143031

Abstract

The Nanji wetland is located in the south of the main lake area of Poyang Lake in Jiangxi. It is the frontier of the Ganjiang River into the Poyang Lake and a national nature reserve. This survey of the diversity of soil animals in the Nanji wetland aims to provide a basis for the protection and utilization of the Nanji wetland and even Poyang Lake. This survey selected six typical sample plots, in which each plot was divided into three sample sits, such as the Nanshan vegetable field (A), the Nanshan beach (B), the Nanshan shrub (C), the Jinshan forest (D), the Jishan shrub (E) and the Jishan beach (F), for each site to collect surface soil (including surface debris, surface depth above 5cm) and deep soil (5cm deep, about 10cm thick); picked up and separated by using arm and self-developed instruments apart, and collected soil animals, and then classified identification, mathematical statistics and diversity study. This survey obtained 80 species of surface soil animals and 71 genera in 26 orders, with the highest species richness of Coleoptera in Arthropoda. The surface community diversity analysis indicated that the richness of the Jishan beach (F), the dominance of the Jishan shrub (E), the diversity of the Nanshan vegetable field (A) and the evenness of the Nanshan vegetable field (A) were the highest respectively. The SHE analysis showed that the surface soil animals are uniform and continuous, and the clustering analysis showed that the surface layer community similarity was $E = F > B > D > A > C$. In short, the diversity of surface soil animals of the Nanji wetland has a strong surface aggregation characteristic, and its community structure and function is prominent in the horizontal connection and vertical linkage, and the gradient change of the regional landscape matrix background has obvious traces. In addition, this survey obtained 30 species of deep soil animals in 5 phyla, 16 orders, 28 genera, with the highest species richness of Collembola in Arthropoda. The deep communities diversity analysis showed that the richness of the Nanshan beach (B), the dominance of the Jishan beach (F), the diversity of the Jishan beach (F) and the evenness of the Nanshan vegetable field (A) were the highest respectively. The SHE analysis shows that the deep soil animals are uniform and continuous, and the cluster analysis shows that the deep layer community similarity is $C = D > E > F > B > A$. In short, the soil animal communities diversity of the deep layer in the Nanji wetland is lower than that of the surface layer, but it can better reflect the complexity and stability of the Nanji wetland ecosystem. Generally speaking, the above-ground plants in the Nanji wetland can map the growth status of their underground roots and improve the implanted soil status, drive the radiation succession of the adjacent soil biological communities centered on the root tip, and shape the new soil structure and function pattern of the dynamic change of soil matrix, root corridor and biological patch.

Keywords

Poyang Lake, Nanji Wetland, Soil Animals, Community, Structure, Function, Diversity

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土壤动物是指其整个完整的使用寿命都在土壤中生存和活动的动物[1]; 目前, 土壤动物被广泛定义

为经常或暂时生活在土壤环境中,并对其生活周围的土壤有一定影响的动物[2]。由于土壤动物门类广、数量丰、种类多、差异大,且食性功能不同,故有依其体型大小分为大型和中小型的,也有按其食性不同分为腐食性、植食性、捕食性和杂食性的。随着地下生态系统研究的趋热,土壤动物生态学研究越来越受到重视[3]。土壤动物是陆地生态系统的重要组成部分,它们不仅参与土壤的发育与形成,调节土壤的基本物化性质与结构,而且与土壤中的某些微生物也有着密切关系,是衡量土壤质量的指示生物,是陆地生态系统的关键环节[4]。土壤生物区系在陆地生态系统中起着至关重要的作用,在大生态尺度上了解地下土壤群落结构和多样性的势头越来越大[5]。

水陆交替的生态景观动态变化,使湿地生态系统生境类型多样、生境结构复杂、空间分异明显,且具有典型的生态边缘效应[6]。有研究表明,蜘蛛和昆虫是食物链中两个重要的中间环节,它们共同维持着南矶湿地地上生态系统的运转和平衡[7];而土壤动物是湿地地下生态系统物质循环和能量流动的关键环节,也是湿地地下生态系统演化的重要驱动因子[8]。本文通过对鄱阳湖南矶湿地国家级自然保护区内不同群落类型的土壤动物进行采集、分离、鉴定和统计,分析其表层和深层土壤动物多样性组成情况和物种分布特征,采用聚类分析方法比较不同样地间土壤动物群落演替关系、结构变化和生态功能等,旨在为南矶湿地乃至鄱阳湖区域生物多样性的保护利用提供理论依据。

2. 材料与方法

2.1 样地概况

江西鄱阳湖南矶湿地国家级自然保护区位于鄱阳湖主湖区南部,为赣江北支、中支和南支汇入鄱阳湖开放水域冲积形成的赣江三角洲最前沿地带,自然保护区内有南山、矾山两个小岛,合称南矾山。该保护区以赣江入湖口湿地生态系统作为主要保护对象。该区面积 33,300 hm²,位于 E116°10′~116°25′、N28°51′~29°08′之间,为第四纪以来的地质构造运动(新构造运动)中心沉降区,是不断发育的各古河流域的汇聚中心。南矾湿地植物物种丰富,区系成分复杂,类型多样,显示具有明显的南北植物汇合的过渡性质。它是研究内陆河口湿地生态系统不可多得的场所[9]。本次调查采样选取南山菜地(A)、南山滩涂(B)、南山灌丛(C)、矾山林地(D)、矾山灌丛(E)、矾山滩涂(F)共 6 个样地。

2.2. 研究方法

2.2.1. 样品采集与标本鉴定

本次调查时间为 2022 年 11 月 12 日,晴天,气温 28℃~32℃,鄱阳湖南矶湿地自然保护区进入干涸季,滩涂裸露面广,草甸干枯点多。各样地随机选取 3 个区域共 18 个样点,每样点采集邻近三处约 1.5 kg 土壤样品。采样时,先用铁铲收集地表凋落物和表层土壤(至地表下 5 cm),装袋后标记为表层土壤样品,记录地表土壤温湿度;然后再收集该地表深层土壤(地表下约 5~15 cm),再装袋标记为深层土壤样品。返回实验室后,土壤样品经网筛和挑捡先将大型土壤动物分离,再用自研 Tullgren 土壤动物分离器(专利 IPC 号: A01M29/10)分离收集小型土壤动物。仪器设置温度为 40℃、时间 24 h。将分离好的土壤动物转入 75%酒精标本瓶并标记保存。参照《中国土壤动物检索图鉴》等文献资料[10]-[15],依据土壤动物不同发育体态等分类特征,在连续变倍体视镜下,分别对表层和深层土壤动物标本进行分类、鉴定与计数。土壤动物标本鉴定至门、目、属、种等分类阶元。采样地具体情况详见表 1。

2.2.2. 数据处理与统计分析

(1) 多样性指数:多样性指数是一种反映群落中物种丰富度和个体均匀分布程度的指标,其中, α 多样性是一定空间单元的特征,而 β 多样性是两个或多个空间单元多样性的差异程度。本文 α 多样性指数

Table 1. The six sampled sites for soil animal survey in the Nanji Wetland, Poyang Lake
表 1. 鄱阳湖南矶湿地国家级自然保护区土壤动物调查六个采样地情况

采样地	海拔高度	地理位置	土壤类型	地表温度	地表湿度
南山菜地(A)	16 m	28.9515°N, 116.35°E	黄壤土	30℃	65%
南山滩涂(B)	14 m	28.9517°N, 116.35°E	棕壤土	34℃	71%
南山灌丛(C)	16 m	28.9502°N, 116.35°E	砾石土	30℃	65%
矾山林地(D)	19 m	28.8830°N, 116.32°E	黄壤土	28℃	69%
矾山灌丛(E)	12 m	28.8860°N, 116.32°E	砾石土	30℃	63%
矾山滩涂(F)	11 m	28.8872°N, 116.32°E	棕壤土	35℃	70%

注：“A”代表南山菜地，“B”代表南山滩涂，“C”代表南山灌丛，“D”代表矾山林地，“E”代表矾山灌丛，“F”代表矾山滩涂；

采用 Marglef 丰富度指数 M 、Shannon 多样性指数 H' 、Berger-Parker 优势度指数 d 及 Mackintosh 均匀度指数 E ，各指数计算公式： $M=(S-1)/\ln N$ ，式中， S 为物种数目， N 为所有物种的个体数之和； $H'=-\sum P_i \ln P_i$ ，式中， $P_i = N_i/N$ ， N_i 为第 i 种的个体数； $E = N - \sqrt{\sum n_i^2} / N - N/\sqrt{S}$ 。而 β 多样性测度则采用聚类分析、SHE 分析和物种分布等[16][17]。

(2) SHE 分析：由于 Shannon 多样性指数 H' 是均匀度自然对数($\ln E$)和丰富度自然对数($\ln S$)之和。这种分解最明显的优点是，使用者能解释多样性的变化[17]。

(3) 聚类分析：聚类分析是从一批样本中的多个观测指标中找出能度量样本之间相似程度的统计数，构成一个相似矩阵，再计算出样本之间的相似程度或距离，按其疏密关系归类，形成一个样本亲疏关系谱系图，直观地显示分类对象的差异和联系。该研究采用的是最短距离法[18]。Bray-Curtis 距离系数的计算公式： $B_{(jk)} = \frac{\sum_{i=1}^j |x_{ij} - x_{ik}|}{\sum_{i=1}^j |x_{ij} + x_{ik}|}$ ，式中， j 、 k 代表不同的样方； i 代表种的数量。

本研究涉及的多样性指数的测定和群落间的聚类分析采用 BioDiversity Pro. 软件、各指数间的相关性分析采用 SPSS 17.0 软件进行数据处理与统计分析。

3. 结果与分析

3.1. 南矶湿地土壤动物名录及区系分布

3.1.1. 表层土壤动物名录及区系分布

经鉴定，鄱阳湖南矶湿地自然保护区有表层土壤动物 6 门 26 目 71 属 80 种，计 461 头。主要或优势物种有小杆线虫 *Rhabditia* sp.、南方根结线虫 *Meloidogyne incognita*、盲甲螨 *Malaconothrus* sp.、隐翅虫 *Oxytelus* sp.①、鹧虻 *Chryso* sp. 幼虫；区域特色种有南矶隅蛛 *Tegenaria* sp.、南矶古虱 *Eosentomon* sp. 和南矶副铗虻 *Parajapyx* sp. 等。该区表层土壤动物名录列于表 2。详见表 2。

3.1.2. 深层土壤动物名录及区系分布

经鉴定，鄱阳湖南矶湿地自然保护区有深层土壤动物 5 门 16 目 28 属 30 种，计 210 头。主要或优势物种有小杆线虫 *Rhabditia* sp.、南方根结线虫 *Meloidogyne incognita*、小吻盲虫 *Pristinella* sp.、等节跳虫 *Isotoma* sp.、隐翅虫 *Oxytelus* sp.①和鹧虻 *Chryso* sp. 幼虫；区域特色种有南矶古虱 *Eosentomon* sp.、南矶跳虫 *Podura* sp. 和南矶综合虻 *Symphylurinus* sp. 等。该区深层土壤动物名录列于表 2。详见表 2。

3.1.3. 南矶湿地土壤动物的总体情况

总的来看，鄱阳湖南矶湿地自然保护区有土壤动物 6 门 28 目 81 属 89 种，计 671 头。主要或优势物

种有小杆线虫 *Rhabditia* sp.、南方根结线虫 *Meloidogyne incognita*、盲甲螨 *Malaconothrus* sp.、南矾古蛭 *Eosentomon* sp.、等节跳虫 *Isotoma* sp.、隐翅虫 *Oxytelus* sp.①和鹼虻 *Chryso* sp.幼虫等。因受季节性物候条件尤其是温湿度的影响，土壤砂粒化或干涸板结等致使该区域土壤动物个体数相对偏低，但区域特色种能响应环境变化而适度调节其群落分布行为，如南矾隅蛛 *Tegenaria* sp.常栖息于土块穴隙中，南矾副铈耙 *Parajapyx* sp.和南矾综合耙 *Symphylurinus* sp.常栖息于土块上下层边缘处，而南矾古蛭 *Eosentomon* sp.和南矾跳虫 *Podura* sp.似乎更能适应南矾湿地土壤的物相变化，相对活跃。

Table 2. List of surface soil animals and species distribution in the Nanji Wetland, Poyang Lake
表 2. 鄱阳湖南矾湿地国家级自然保护区表层土壤动物名录及物种分布

序号、种名	表层	分布	深层	分布
(1)小杆线虫 <i>Rhabditia</i> sp.	A ⁺ B ⁺ C ⁺ D ⁺⁺ E ⁺⁺ F ⁺	随机	A ⁺ C ⁺⁺ D ⁺⁺ E ⁺⁺ F ⁺	随机
(2)螺旋线虫 <i>Helicotylenchus</i> sp.	A ⁺	随机		
(3)南方根结线虫 <i>Meloidogyne incognita</i>	A ⁺⁺⁺ B ⁺⁺⁺ C ⁺⁺ D ⁺ E ⁺⁺ F ⁺⁺⁺	聚集	A ⁺⁺ B ⁺ C ⁺⁺⁺ D ⁺⁺ E ⁺⁺ F ⁺⁺	随机
(4)小剑线虫 <i>Xiphinemella</i> sp.	B ⁺	随机		
(5)小吻盲虫 <i>Pristinella</i> sp.	A ⁺	随机	A ⁺⁺ B ⁺⁺ C ⁺⁺ D ⁺⁺ E ⁺ F ⁺⁺⁺	聚集
(6)裸线蚓 <i>Achaeta</i> sp.			D ⁺	随机
(7)爱胜蚓 <i>Eisenia</i> sp.			A ⁺	随机
(8)白线蚓 <i>Fridericia</i> sp.	A ⁺⁺⁺ B ⁺⁺ E ⁺⁺ F ⁺	聚集	A ⁺⁺⁺	聚集
(9)中国圆田螺 <i>Cipangopaladina chinesis</i>	F ⁺⁺	聚集	F ⁺⁺	聚集
(10)沟瓶螺 <i>Pomacea canaliculata</i>	F ⁺⁺	随机		
(11)土鸥螺 <i>Georiss</i> sp.	D ⁺	随机		
(12)虹蛹螺 <i>Pupilla</i> sp.	A ⁺⁺	随机		
(13)棘影虫 <i>Echiniscus</i> sp.	A ⁺	随机		
(14)鼠妇虫 <i>Porcellio</i> sp.	C ⁺⁺⁺	聚集		
(15)刺圆马陆 <i>Sphaerobelum</i> sp. 幼虫	D ⁺⁺⁺	聚集		
(16)蜈蚣 <i>Scolopendra</i> sp.	A ⁺⁺ C ⁺	聚集	A ⁺⁺⁺ D ⁺	聚集
(17)布伦螨 <i>Brennandania</i> sp.	B ⁺	随机		
(18)洼甲螨 <i>Camisia</i> sp.	D ⁺	随机		
(19)小缝甲螨 <i>Hypochthoniella</i> sp.	D ⁺	随机		
(20)大奥甲螨 <i>Lasiobelba</i> sp.	D ⁺	随机		
(21)盲甲螨 <i>Malaconothrus</i> sp.	A ⁺⁺⁺ B ⁺⁺ D ⁺⁺⁺ E ⁺⁺ F ⁺	聚集	A ⁺⁺⁺ B ⁺⁺	聚集
(22)树穴甲螨 <i>Truncopes</i> sp.			D ⁺⁺	随机
(23)跳甲螨 <i>Zetorchestes</i> sp.	D ⁺	随机		
(24)苦伪蝎 <i>Microcreagris</i> sp.	D ⁺⁺	随机		
(25)金罗比平腹蛛 <i>Gnaphosa kompirensis</i>	E ⁺	聚集		
(26)平腹蛛 <i>Gnaphosa</i> sp.若蛛	C ⁺	聚集		
(27)栓栅蛛 <i>Hahnica corticicola</i>	E ⁺⁺	聚集		
(28)拟水狼蛛 <i>Pirata subpiraticus</i> 若蛛卵袋	B ⁺ C ⁺⁺ D ⁺ E ⁺	随机	A ⁺⁺	随机

续表

(29)沟渠蝇虎 <i>Plexippus petersi</i> 若蛛	C ⁺	聚集		
(30)南矾隅蛛 <i>Tegenaria</i> sp.	E ⁺	聚集		
(31)南矾古虱 <i>Eosentomon</i> sp.	A ⁺⁺⁺ D ⁺⁺⁺ E ⁺⁺	聚集	A ⁺⁺⁺ B ⁺ D ⁺	聚集
(32)类符跳虫 <i>Folaomina</i> sp.			D ⁺	随机
(33)符跳虫 <i>Folsomia</i> sp.			A ⁺⁺⁺	聚集
(34)等节跳虫 <i>Isotoma</i> sp.	C ⁺ D ⁺⁺ E ⁺⁺⁺	聚集	A ⁺⁺ B ⁺ C ⁺⁺ D ⁺⁺ E ⁺⁺ F ⁺⁺	随机
(35)棘跳虫 <i>Onychiurus</i> sp.	D ⁺⁺ E ⁺⁺⁺ F ⁺	随机	D ⁺⁺	随机
(36)南矾跳虫 <i>Podura</i> sp.			D ⁺	随机
(37)裸长角跳虫 <i>Sinella</i> sp.	C ⁺	聚集	C ⁺ D ⁺	随机
(38)奇跳虫 <i>Xenylla</i> sp.	D ⁺⁺	随机	A ⁺⁺	聚集
(39)南矾副铈螯 <i>Parajapyx</i> sp.	C ⁺⁺	聚集		
(40)南矾综合螯 <i>Symphylurinus</i> sp.			E ⁺	随机
(41)哈蛎 <i>Haslundichilis</i> sp.	D ⁺⁺	聚集		
(42)跳蛎 <i>Petrobius</i> sp.	A ⁺	随机		
(43)疹蠊 <i>Anisolampra</i> sp.			B ⁺⁺	随机
(44)溪蛉 <i>Osmylus</i> sp. 幼虫	E ⁺	聚集		
(45)叩头甲 <i>Alaus</i> sp. 幼虫	A ⁺⁺	聚集		
(46)蚁形甲 <i>Anthicus</i> sp.	E ⁺	聚集		
(47)鳃金龟 <i>Chalcosoma</i> sp. 幼虫	C ⁺	聚集		
(48)朽木龟甲 <i>Cossonus</i> sp.	C ⁺	聚集		
(49)豉甲 <i>Enhydrus</i> sp.	A ⁺ C ⁺⁺⁺ F ⁺	随机		
(50)薪甲 <i>Enicmus</i> sp.	B ⁺ F ⁺⁺	聚集		
(51)萤叶甲 <i>Haplomela</i> sp.	C ⁺⁺ E ⁺⁺⁺ F ⁺⁺	聚集	A ⁺	随机
(52)变步甲 <i>Harpalus</i> sp.	E ⁺	聚集		
(53)牙甲 <i>Hydrophilus</i> sp.	C ⁺ E ⁺	聚集		
(54)青步甲① <i>Isiocarabus</i> sp.	B ⁺⁺⁺ E ⁺	聚集		
(55)青步甲② <i>Chlaenius</i> sp.	C ⁺	聚集		
(56)竹象 <i>Macrochirus</i> sp.	C ⁺	聚集		
(57)露尾甲 <i>Meligethes</i> sp.①	A ⁺	随机		
(58)露尾甲 <i>Meligethes</i> sp.②	A ⁺ F ⁺	随机		
(59)露尾甲 <i>Meligethes</i> sp.③	A ⁺⁺	随机		
(60)花蚤甲 <i>Metoeus</i> sp. 幼虫	C ⁺	聚集		
(61)隐翅虫 <i>Oxytelus</i> sp.①	A ⁺⁺ B ⁺⁺⁺ C ⁺ E ⁺⁺⁺ F ⁺⁺⁺	聚集	A ⁺⁺ B ⁺ D ⁺ E ⁺⁺ F ⁺⁺	随机
(62)隐翅虫 <i>Oxytelus</i> sp.②	B ⁺⁺	随机	C ⁺ D ⁺	随机
(63)隐翅虫 <i>Oxytelus</i> sp.③	F ⁺	随机	A ⁺ C ⁺⁺ D ⁺	随机
(64)窃蠹 <i>Prinomorphus</i> sp. 幼虫	C ⁺⁺	聚集		

续表

(65)龟甲 <i>Sindia</i> sp.			C ⁺	随机
(66)草甲 <i>Zonarius</i> sp.幼虫	C ⁺	聚集		
(67)剑虻 <i>Actorthia</i> sp. 幼虫	B ⁺⁺ D ⁺	随机	A ⁺⁺ C ⁺	随机
(68)毛蚊 <i>Bibio</i> sp.幼虫	A ⁺	随机		
(69)鹬虻 <i>Chryso</i> sp.幼虫	A ⁺⁺ B ⁺⁺⁺ D ⁺⁺ E ⁺⁺ F ⁺⁺	聚集	A ⁺⁺ B ⁺⁺ C ⁺⁺ E ⁺⁺ F ⁺	随机
(70)腐木蝇 <i>Clusiodes</i> sp.	B ⁺⁺⁺	聚集		
(71)库蠓 <i>Culicoides</i> sp. 幼虫	B ⁺⁺ D ⁺⁺ E ⁺⁺ F ⁺	随机		
(72)颈蠓 <i>Gayle</i> sp. 幼虫	B ⁺⁺⁺	聚集		
(73)驼舞蠓 <i>Hybos</i> sp. 幼虫	B ⁺ E ⁺⁺ F ⁺⁺⁺	聚集	C ⁺	随机
(74)食蚜蝇 <i>Syrphus</i> sp.①	A ⁺	随机		
(75)食蚜蝇 <i>Syrphus</i> sp.②	B ⁺	随机		
(76)食木虻 <i>Xylophagus</i> sp.幼虫	B ⁺⁺	随机		
(77)蠊蛄 <i>Arma</i> sp.	C ⁺⁺⁺	聚集		
(78)刺猎蛄 <i>Sclomina</i> sp.	C ⁺	聚集		
(79)行军蚁 <i>Dorylus</i> sp.	B ⁺	随机	A ⁺⁺	聚集
(80)黄猱蚁 <i>Oecophylla smaragdina</i>	A ⁺⁺ D ⁺	随机		
(81)细猛蚁 <i>Leptanilla</i> sp.①	D ⁺	随机		
(82)短猛蚁 <i>Leptanilla</i> sp.②	E ⁺⁺	聚集		
(83)稗飞虱 <i>Sogatella vibix</i>	F ⁺	随机		
(84)卷蛾 <i>Clepsis</i> sp.幼虫	D ⁺	随机		
(85)小卷叶蛾 <i>Laspeyrea</i> sp.幼虫	C ⁺	聚集		
(86)扁刺蛾 <i>Thosea</i> sp.幼虫	C ⁺	聚集		
(87)异斑腿蝗 <i>Nenocatantops</i> sp.	D ⁺⁺	聚集		
(88)箭管蓟马 <i>Hohurothrips</i> sp.	D ⁺⁺	随机		
(89)剪管蓟马 <i>Psalidothrips</i> sp.	C ⁺⁺	聚集		

注：“+”代表1头，“++”代表2-5头，“+++”代表5头以上。“A”代表南山菜地，“B”代表南山滩涂，“C”代表南山灌丛，“D”代表矾山林地，“E”代表矾山灌丛，“F”代表矾山滩涂。

3.2. 南矾湿地土壤动物群落组成

3.2.1. 表层土壤动物群落组成

对鄱阳湖南矾湿地自然保护区表层土壤动物群落组成和物种丰富度的统计分析表明：门类方面，有原生动物门 Protozoa、线形动物门 Nematomorpha 和环节动物门 Annelida 等 6 个门，其中，缓步动物门 Tardigrata 少见，节肢动物门 Arthropoda 为优势类群；目类方面，有变形目 Amoebida、垫刃目 Tylenchida、单向蚓目 Haplotaxida 等 26 个目，其中，类群物种丰富度高低依次为鞘翅目 Coleoptera 4.2887、双翅目 Diptera 2.0539、蜘蛛目 Araneae 2.0122、膜翅目 Hymenoptera 1.5417 和蜱螨目 Acarina 1.3554 等。参见表 3。

3.2.2. 深层土壤动物群落组成

对鄱阳湖南矾湿地自然保护区深层土壤动物群落组成和物种丰富度的统计分析表明：门类方面，有

原生动物门 Protozoa、线形动物门 Nematomorpha 和环节动物门 Annelida 等 5 个门，其中，节肢动物门 Arthropoda 为优势类群；目类方面，有变形目 Amoebida、垫刃目 Tylenchida、单向蚓目 Haplotaxida 等 16 个目，其中，类群物种丰富度高低依次为弹尾目 Collembola 1.5112、鞘翅目 Coleoptera 1.3353、双翅目 Diptera 0.7214、蜱螨目 Acarina 0.4024 和颤蚓目 Tubificida 0.3235。参见表 3。

3.2.3. 土壤动物群落组成情况

总的来看，鄱阳湖南矶湿地自然保护区土壤动物主要或优势类群为节肢动物蜱螨目 Acarina、弹尾目 Collembola、鞘翅目 Coleoptera 和双翅目 Diptera 等。在各类元水平上，表层土壤动物均多于深层土壤动物。参见表 3。

Table 3. Community composition of soil animal in the Nanji Wetland, Poyang Lake
表 3. 鄱阳湖南矶湿地国家级自然保护区土壤动物的群落组成

门与目名	表层		深层	
	属种数	物种丰富度	属种数	物种丰富度
一、原生动物门 Protozoa				
变形目 Amoebida	1 属 1 种	0.0000	1 属 1 种	0.0000
二、线形动物门 Nematomorpha				
垫刃目 Tylenchida	2 属 3 种	0.5318	1 属 1 种	0.0000
三、环节动物门 Annelida				
单向蚓目 Haplotaxida	1 属 1 种	0.0000	1 属 1 种	0.0000
四、正蚓目 Lumbricida				
颤蚓目 Tubificida	1 属 1 种	0.0000	2 属 2 种	0.3235
五、软体动物门 Mollusca				
中腹足目 Mesogastropoda	1 属 2 种	0.5139	1 属 1 种	0.0000
柄眼目 Stylommatophora	2 属 2 种	0.9103		
六、缓步动物门 Tardigrata				
棘节目 Echiniscoidea	1 属 1 种	0.0000		
七、节肢动物门 Arthropoda				
等足目 Isopoda	1 属 1 种	0.0000		
毛马陆目 Polyxenida	1 属 1 种	0.0000		
蜈蚣目 Scolopendridae	1 属 1 种	0.0000	1 属 1 种	0.0000
蜱螨目 Acarina	6 属 6 种	1.3554	2 属 2 种	0.4024
伪蝎目 Pseudoscorpiones	1 属 1 种	0.0000		
蜘蛛目 Araneae	5 属 6 种	2.0122	1 属 1 种	0.0000
古蛭目 Eosentomata	1 属 1 种	0.0000	1 属 1 种	0.0000
弹尾目 Collembola	4 属 4 种	0.8078	7 属 7 种	1.5112
双尾目 Diplura	1 属 1 种	0.0000	1 属 1 种	0.0000
石蛎目 Microcoryphia	2 属 2 种	0.6214		
蜚蠊目 Blattoptera			1 属 1 种	0.0000

续表

脉翅目 Neuropters	1 属 1 种	0.0000		
鞘翅目 Coleoptera	17 属 21 种	4.2887	3 属 5 种	1.3353
双翅目 Diptera	9 属 10 种	2.0539	3 属 3 种	0.7214
半翅目 Hemiptera	2 属 2 种	0.4809		
膜翅目 Hymenoptera	3 属 4 种	1.5417	1 属 1 种	0.0000
同翅目 Homoptera	1 属 1 种	0.0000		
鳞翅目 Lepidoptera	3 属 3 种	0.9618		
直翅目 Orthoptera	1 属 1 种	0.0000		
缨翅目 Thysanoptera	2 属 2 种	0.7214		
6 门 28 目	71 属 80 种	12.8803	28 属 30 种	5.4235

3.3. 南矶湿地土壤动物群落结构比较

3.3.1. 表层土壤动物群落结构比较

鄱阳湖南矶湿地自然保护区表层土壤动物群落组成的比较分析表明，其目数多少依次为：南山菜地 = 矾山林地 > 矾山灌丛 > 南山灌丛 > 南山滩涂 > 矾山滩涂；属数多少依次为：南山灌丛 = 矾山林地 > 矾山灌丛 > 南山菜地 = 南山滩涂 > 矾山滩涂；种数多少依次为：南山灌丛 > 矾山林地 > 矾山灌丛 > 南山菜地 = 南山滩涂 > 矾山滩涂；个体数多少依次为：南山滩涂 > 南山菜地 > 矾山灌丛 > 矾山林地 > 南山灌丛 > 矾山滩涂；群落物种丰富度大小依次为：南山灌丛 > 矾山林地 > 矾山灌丛 > 矾山滩涂 > 南山菜地 > 南山滩涂，样地物种丰富度均值大小依次为：灌丛 5.5817 > 林地 5.3109 > 菜地 4.4337 > 滩涂 4.4121。参见表 4。

Table 4. Comparison of community structure of surface soil animal in the Nanji Wetland, Poyang Lake
表 4. 鄱阳湖南矶湿地国家级自然保护区表层土壤动物群落结构比较

组成采样地	目数		属数		种数		个体数		物种丰富度	
	表层	深层	表层	深层	表层	深层	表层	深层	表层	深层
南山菜地(A)	14	12	19	17	21	18	91	106	4.4337	3.6454
南山滩涂(B)	9	8	19	8	21	8	99	13	4.3525	2.7291
南山灌丛(C)	11	6	24	10	26	11	58	25	6.1570	3.1067
矾山林地(D)	14	9	24	13	24	15	76	26	5.3109	4.2970
矾山灌丛(E)	12	7	22	7	23	7	81	18	5.0063	2.0758
矾山滩涂(F)	8	6	17	6	17	6	56	22	4.4716	1.6176
总数 total	26	16	71	28	80	30	461	210	12.8803	5.4235

3.3.2. 深层土壤动物群落结构比较

鄱阳湖南矶湿地自然保护区深层土壤动物群落组成的比较分析表明，其目数多少依次为：南山菜地 > 矾山林地 > 南山滩涂 > 矾山灌丛 > 南山灌丛 = 矾山滩涂；属数多少依次为：南山菜地 > 矾山林地 > 南山灌丛 > 南山滩涂 > 矾山灌丛 > 矾山滩涂；种数多少依次为：南山菜地 > 矾山林地 > 南山灌丛 > 南山滩涂 > 矾山灌丛 > 矾山滩涂；个体数多少依次为：南山菜地 > 矾山林地 > 南山灌丛 > 矾山滩涂

涂 > 矾山灌丛 > 南山滩涂; 群落物种丰富度大小依次为: 矾山林地 > 南山菜地 > 南山灌丛 > 南山滩涂 > 矾山灌丛 > 矾山滩涂, 样地物种丰富度均值大小依次为: 林地 4.2970 > 菜地 3.6454 > 灌丛 2.5913 > 滩涂 2.1734。参见表 4。

3.4. 南矾湿地土壤动物群落多样性比较

3.4.1. 表层土壤动物群落多样性比较

对鄱阳湖南矾湿地自然保护区表层土壤动物群落多样性指数进行计算, 其结果列入表 5。从表 5 可以看出, 丰富度指数 M 大小依次为: 矾山滩涂 > 南山灌丛 > 矾山林地 > 矾山灌丛 > 南山菜地 > 南山滩涂, 其 M 均值大小依次为: 灌丛 4.3097 > 滩涂 4.2388 > 林地 4.2003 > 菜地 4.0326; 优势度指数 d 大小依次为: 矾山灌丛 > 矾山滩涂 > 南山菜地 > 矾山林地 > 南山灌丛 > 南山滩涂, 其 d 均值大小依次为: 灌丛 0.2310 = 菜地 0.2310 > 林地 0.2110 > 滩涂 0.2070; 多样性指数 H' 大小依次为: 南山菜地 > 矾山滩涂 > 矾山灌丛 > 南山滩涂 > 矾山林地 > 南山灌丛, 其 H' 均值大小依次为: 菜地 0.1190 > 滩涂 0.1010 > 林地 0.0920 > 灌丛 0.085; 均匀度指数 E 大小依次为: 南山菜地 > 南山滩涂 > 矾山灌丛 = 矾山林地 > 南山灌丛 > 矾山滩涂, 其 E 均值大小依次为: 菜地 1.1210 > 灌丛 1.1165 > 林地 1.1150 > 滩涂 0.1010。参见表 5。

3.4.2. 深层土壤动物群落多样性比较

对鄱阳湖南矾湿地自然保护区深层土壤动物群落多样性指数进行计算, 其结果列入表 5。从表 5 中可看出, 丰富度指数 M 大小依次为: 南山滩涂 > 矾山灌丛 > 矾山滩涂 > 南山灌丛 > 矾山林地 > 南山菜地, 其 M 均值大小依次为: 滩涂 2.3819 > 灌丛 2.1924 > 林地 2.0495 > 菜地 1.4319; 优势度指数 d 大小依次为: 矾山滩涂 > 南山灌丛 > 南山滩涂 > 矾山灌丛 > 南山菜地 > 矾山林地, 其 d 均值大小依次为: 滩涂 0.3200 > 灌丛 0.2310 > 菜地 0.1980 > 林地 0.1540; 多样性指数 H' 大小依次为: 矾山滩涂 > 矾山灌丛 > 南山菜地 > 南山灌丛 > 南山滩涂 > 矾山林地, 其 H' 均值大小依次为: 滩涂 0.1445 > 灌丛 0.1105 > 菜地 0.1050 > 林地 0.0550; 均匀度指数 E 大小依次为: 南山菜地 > 南山灌丛 > 矾山林地 > 南山滩涂 > 矾山滩涂 > 矾山灌丛, 其 E 均值大小依次为: 菜地 1.2190 > 林地 1.1910 > 灌丛 1.1805 > 滩涂 0.1725。参见表 5。

Table 5. Comparison of community diversity in the deep soil animal in the Nanji Wetland, Poyang Lake

表 5. 鄱阳湖南矾湿地国家级自然保护区土壤动物群落多样性比较

指数采样地	Margaleff 丰富度指数 M		Berger-Parker 优势度指数 d		Simpsons 多样性指数 H'		Mackintosh 均匀度指数 E	
	表层	深层	表层	深层	表层	深层	表层	深层
南山菜地(A)	4.0326	1.4319	0.2310	0.1980	0.1190	0.1050	1.1210	1.2190
南山滩涂(B)	3.9586	2.6034	0.1820	0.2310	0.0940	0.0770	1.1200	1.1750
南山灌丛(C)	4.4799	2.0745	0.1900	0.2400	0.0740	0.0970	1.1150	1.1930
矾山林地(D)	4.2003	2.0495	0.2110	0.1540	0.0920	0.0550	1.1160	1.1910
矾山灌丛(E)	4.1394	2.3103	0.2720	0.2220	0.0990	0.1240	1.1160	1.1680
矾山滩涂(F)	4.5190	2.1603	0.2320	0.4090	0.1080	0.2120	1.1100	1.1700

3.5. 南矾湿地土壤动物群落聚类分析

3.5.1. 表层土壤动物群落聚类分析

利用欧氏距离系数公式计算出鄱阳湖南矾山湿地自然保护区 6 个不同样地中表层土壤动物群落间的相似性指数, 再将相似性指数矩阵转换成聚类分枝图, 参见图 1 左图。从图 1 左图可以看出, 矾山滩涂

(F)与矾山灌丛(E)两群落之间相似性最高,两群落之间联系密切。E 与 F 合为 G, G 与南山滩涂(B)相似性较高,两群落间比较连续,联系比较密切。G 与 B 合为 H, H 与矾山滩涂(D)两群落之间相似性一般,两群落间有交流,群落之间有联系。H 与 D 合为 I, I 与南山菜地(A)相似性较小,两群落间偶有交流,群落间不连续。I 与 A 合为 K, K 与南山灌丛(C)之间相似性最小,两群落之间几乎没有联系,群落间基本间断。

3.5.2. 深层土壤动物群落聚类分析

利用欧氏距离系数公式计算出鄱阳湖南矾湿地自然保护区 6 个不同样地中深层土壤动物群落间的相似性指数,再将相似性指数矩阵转换成聚类分枝图,参见图 1 右图。从图 1 右图可以看出,矾山林地(D)和南山灌丛(C)相似度最高,说明两地的有较多的共同土壤生物类群; C 和 D 合为 G, G 与矾山灌丛(E)相似性较高; G 和 E 合为 H, H 与矾山滩涂(F)相似性适中; F 和 H 合为 I, I 与南山滩涂(B)较低; I 和 B 合为 J, J 与南山菜地(A)相似性最低。

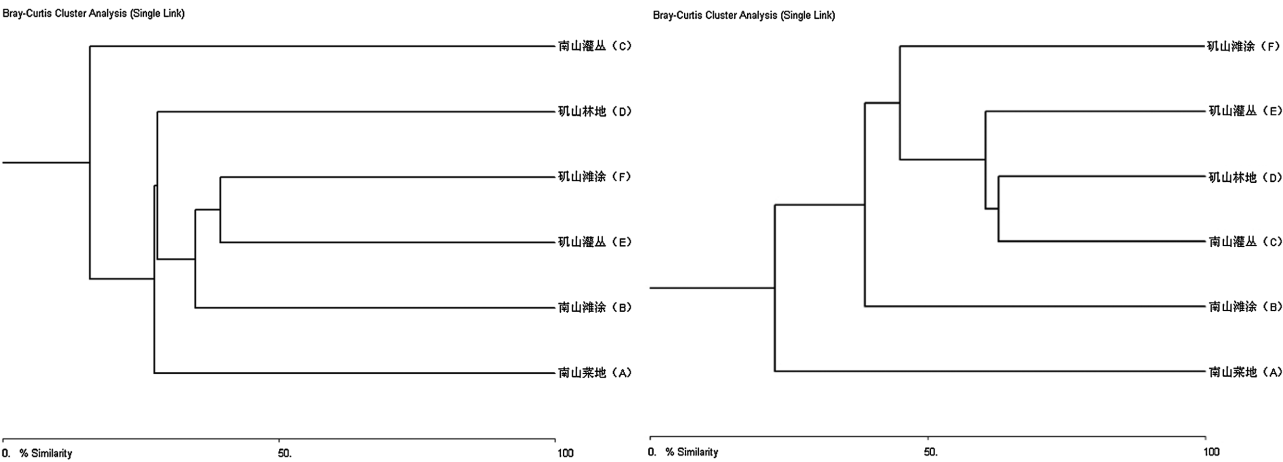


Figure 1. Cluster branch diagram of soil animal community in the Nanji Wetland,Poyang Lake (Left: surface, Right: deep)
图 1. 鄱阳湖南矾湿地国家级自然保护区土壤动物群落聚类分枝图(左:表层,右:深层)

3.6. 南矾湿地土壤动物物种分布及 SHE 分析

3.6.1. 表层土壤动物物种分布及 SHE 分析

通过对南矾湿地表层土壤动物进行物种分布和 SHE 分析,得到图 2 左图。从表 2 和图 2 左图可知,小杆线虫 *Rhabditia* sp.、螺旋线虫 *Helicotylenchus* sp.和小吻盲虫 *Pristinella* sp.等 36 种表层土壤动物为随机性分布,南方根结线虫 *Meloidogyne incognita*、白线蚓 *Fridericia* sp.和鼠妇虫 *Porcellio* sp.等 44 种表层土壤动物为聚集性分布。表层土壤动物的 SHE 分析显示, H 的走势前期从 A 到 C 较快上升趋势,中期 C 到 D 缓慢上升,后期 D 到 F 保持平稳状态, S 的走势一直保持平稳状态, E 的走势呈缓慢下降趋势。

3.6.2. 深层土壤动物物种分布及 SHE 分析

通过对南矾湿地深层土壤动物进行物种分布和 SHE 分析,得到图 2 右图。从表 2 和图 2 右图可知,小杆线虫 *Rhabditia* sp.、南方根结线虫 *Meloidogyne incognita* 和裸线蚓 *Achaeta* sp.等 21 种为随机性分布,小吻盲虫 *Pristinella* sp.、白线蚓 *Fridericia* sp.和中国圆田螺 *Cipangopaladina chinesis* 等 9 种为聚集性分布。深层土壤动物的 SHE 分析显示: H 的走势前期 A 到 B 缓慢上升, B 到 D 保持较快上升,后期保持平稳; S 的走势整体平缓; E 的走势前期 A 到 B 有缓慢上升,中期 B 到 C 平稳,后期 C 到 F 呈缓慢下降态势。

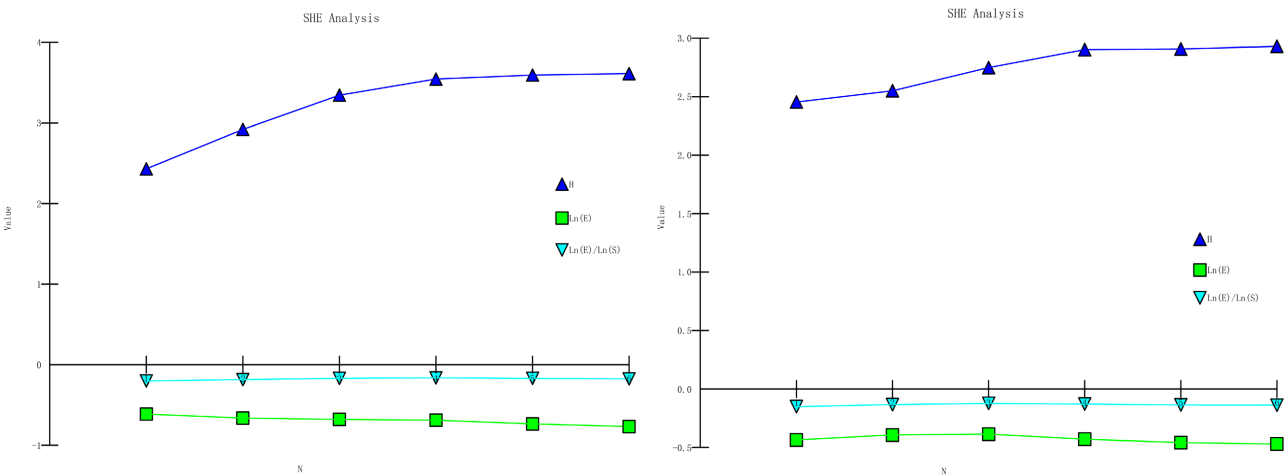


Figure 2. SHE line diagram of soil animal community in the Nanji Wetland, Poyang Lake (Left: surface, Right: deep)
图 2. 鄱阳湖南矶湿地国家级自然保护区土壤动物群落 SHE 线状图(左: 表层, 右: 深层)

4. 讨论与小结

4.1. 讨论

4.1.1. 南矶湿地表层土壤动物群落结构与功能多样性

土壤动物通过食物链、生态网络等途径, 连接起了生态系统中的各个生物和环境要素, 对维持生态的稳定性和自然循环起到了重要作用[19]。作为鄱阳湖南矶湿地自然保护区的主要地形, 湿地和滩涂是比较独特的生态系统, 在许多方面都与土壤动物密切相关, 其土壤动物的分布和作用方面有着不同的特点。在湿地地形中, 土壤动物主要包括蚯蚓、蠕虫、昆虫、蜘蛛等。这些土壤动物在降水充沛的情况下, 能够促进有机物的分解和养分的转化, 加速土壤的形成和更新。而在滩涂地形中, 则更多地涉及到浮游动物、底栖动物等水生生物, 这些生物对于水质和营养循环过程都具有重要影响。除此之外, 这两种地形中的土壤动物还对生态系统的稳定和生态平衡起着关键的作用。

在本次调查中, 从表层土壤动物群落结构多样性来看, 南矶滩涂除丰富度和多样性略高外, 其优势度和均匀度都偏低, 加上其群落物种丰富度也较低, 故推测南矶湿地表层土壤动物受该季节高温干涸条件影响较大(参见表 1), 导致其个体数和种类数偏少; 而灌丛(含草甸)除多样性偏低外其他指数均较高, 表明在枯水季的南矶湿地中, 灌丛仍然是地栖动物的天然庇护所。比较而言, 林地及其凋落物因数量少、面积小、分布散则只能充当调节作用, 而菜地多样性的变化则主要源自于施肥等人为干扰, 该群落多样性指数偏高是由线虫、双翅目幼虫等特定类群的种类数量较多造成的。另外, 表层土壤动物群落聚类分析表明, 矾山滩涂与灌丛、南山滩涂与菜地、南山灌丛与矾山林地交流频率及相似性分别较高(参见图 2 左图), 说明自然情况下南矶湿地滩涂表层物种更多源于水体水生生物与灌丛或菜地地栖动物的迁入, 南矶湿地灌丛与林地土壤动物群落的组成较为接近。

总之, 滩涂、灌丛和林地等作为南矶湿地自然保护区中的典型群落, 其表层土壤动物形成了比较独特的生态系统, 因为受旱涝水体等环境因素的干扰影响, 其群落结构的水平连续性较为明显, 与水生和地栖动物垂直交流相对频繁, 群落多样性指数的季节性变化较快; 表层土壤成为其种群生存发育的限时交错区域, 故表层土壤动物的群落功能更多体现出承上接下的过渡特点。概括地说, 南矶湿地表层土壤动物多样性有着较强的表聚性, 其群落功能突出表现在水平衔接与垂直联动上, 区域景观基底的梯度变化痕迹明显。

4.1.2. 南矶湿地深层土壤动物群落结构与功能多样性

土壤动物多样性指数可用来描述土壤中不同种类动物的数量和种类的综合情况；其数值越高代表土壤生态系统的复杂性越高，该系统中存在更多的生物相互作用和生态功能，稳定性也随之增强。它是评估土壤质量和功能的重要生物指标，对于土壤的养分循环和生态系统稳定性的维护都非常重要[2] [20]。有学者认为资源分配、多营养相互作用和环境中的微尺度环境变化可能是土壤动物多样性的形成原因[21]。

本次调查中，从深层土壤动物群落结构多样性来看，南矶滩涂除均匀度外其它指数都最高，但群落物种丰富度却最低，说明滩涂是南矶湿地深层土壤动物优势特色种类的繁育场，区域条件保证了一定量的特色物种及其个体的聚集分布；而灌丛、林地或菜地等则是其它物种的库源，它们维持着南矶湿地土壤动物多样性的基数。另外，深层土壤动物群落聚类分析表明，同表层土壤一样，南山灌丛与矾山林地群落组成仍较相似，但南山与矾山两个局域的群落组成与演替却相对独立(参见图 2 右图)，这说明其人为或自然环境条件均有所不同。

总之，南矶湿地深层土壤动物群落多样性要低于表层土壤，但从景观原生性角度来看，南矶湿地深层土壤动物群落更能反映南矶湿地生态系统的复杂性和稳定性样貌，它应是鄱阳湖湿地基底的一个真实缩影，其土壤动物群落多样性的时空格局更多由该区域土壤矿化状况、理化性质及微生物沉积等因素主导，受地表环境与物候影响相对较小。

4.1.3. 南矶湿地土壤动物群落结构与功能多样性

土壤动物在生态系统功能和稳定性方面发挥着重要作用，约翰斯顿等采用层次线性混合效应模型来揭示影响土壤动物群落纬度趋势的环境变量，确定了年平均温度、土壤 pH 值和土壤有机碳含量作为解释土壤动物群落全球质量-丰度尺度关系的关键环境控制因素[22]。生物群落的垂直分布与土壤理化性质变化的相关性解释了总氮、有效磷和 pH 是土壤生物群落变化的最大影响因素[5]。凋落物和根系对土壤动物群体丰度的影响可以用体型或垂直分布来解释[23]。有研究表明，对资源和营养结构的竞争结合调控了不同土壤动物群落的聚集[21]。有机碳、氮和土壤结构的线性和周期性空间结构解释了群落的显著变化，即物种沿环境、空间结构梯度排列。不过，在非常多样化的土壤节肢动物群落中，基于资源的生态位分配的作用较小，而环境过滤仍然是物种分布的基本驱动因素[24]。土壤 pH 的强烈影响表明，分解者群落主要由区域非生物因素促成，它超过了森林类型等当地生物因素的作用[25]。土壤中的微生物种群和动物性食物网都至少部分地依赖于植物根系提供的不稳定的有机碳，土壤动物群主要通过取食根系相关微生物参与深层土壤碳循环[26]。生境异质性是生物多样性的重要驱动因素之一，即使在较小的空间尺度上，地上凋落物和枯木等也可能通过维持较大的营养生态位变化，对土壤动物群落的有机物处理产生影响[27]。微生物和植物群落在土壤动物群落控制多样性和结构方面的重要性在于，其微生境结构的异步性和高多样性都促进了土壤动物群落的稳定[28]。土壤生物群还在营养和能量流动中具有重要意义，利用稳定同位素分析的研究就阐明了土壤群落的营养结构及土壤食物网的基础食物资源，揭示了地上和地下生态系统隔室之间的联系[19]。土壤动物的食物网不仅依赖于根系碳，而且还依赖于根系氮，根系氮对土壤动物营养的贡献随树种的增加而变化[29]。土壤分解者动物在养分循环中的作用通常被认为是间接的、缓慢的和累积的，通过取食作用对土壤微生物及其矿化活动产生影响。有研究发现，氮和碳从活的土壤动物到植物和食草动物的移动可以说是非常快速的[30]。由植被诱导的土壤条件镶嵌引起的土壤无脊椎动物群落的划分，似乎并没有导致在顶级营养水平上整合的局部食物网的空间隔离[31]。由于动物、环境和可持续性相互关联的，其中，复杂的土壤-植物-动物关系对生物圈的生态完整性就至关重要，物种间和物种内的动物多样性也具有多种社会经济属性[32]。在营养生态学方面，了解土壤动物的高 α 多样性以及它们在土壤食物网和系统中的功能作用具有重要意义，将微节肢动物整合到土壤食物网中可以更深入地了

解它们的营养结构[33]。另外,土壤物种对洪水频率影响的显著响应,就表明每个物种占据了不同的生态位。洪水的负面效应与群落中季节变化的影响相当,但远高于森林类型效应或复制序列间差异[34]。对于草甸及其管理维护来说,土壤微生物对维持土壤健康、分解有机质和循环牧草养分具有重要价值,土壤微生物群对草甸保护管理的响应是土壤健康的一个重要组成部分。动物残骸或粪便增加了土壤微生物群落的多样性,并可能是改善土壤健康的一种机制[35]。

据此可以推测,南矶湿地地上植物能映射其地下根系生长状况与改善植入土壤状态,驱动以根尖为中心的邻近各土壤生物群落辐射演替,塑造土壤基底-根系廊道-生物斑块动态变化的土壤结构与功能新格局。在更大的时空尺度下,鄱阳湖湿地土壤景观的地上气态与地下固态物质能量循环生态系统会随着液态水的涨落而出现均质性与异质性的周期性季节转换,其中,水的理化性质和内容物含量变化是触发因素。另外,鸟类等动物可通过其排泄物将营养物质从湖泊生态系统转移到陆地生态系统,从而增加湿地土壤生物类群的营养可利用性。

4.2. 小结

经调查分析,鄱阳湖南矶湿地共获得表层土壤动物 6 门 26 目 71 属 80 种,其中,节肢动物是主要类群,鞘翅目物种丰富度最高。(1) 物种分布情况表明,36 种为随机型分布,54 种为聚集型分布。(2) 群落组成的比较分析表明,南山菜地(A)和矾山林地(D)的目数最多,南山灌丛(C)和矾山林地(D)的属数最多,南山灌丛(C)的种数最多,南山滩涂(B)的个体数最多。(3) 群落多样性比较分析表明,矾山滩涂(F)的丰富度最高,矾山灌丛(E)的优势度最高,南山菜地(A)的多样性最高,南山菜地(A)的均匀度最高。(4) 南矶湿地表层土壤动物多样性有着较强的表聚性,其群落结构与功能突出表现在水平衔接与垂直联动上,区域景观基底的梯度变化痕迹明显。

另外,鄱阳湖南矶湿地共获得深层土壤动物 5 门 16 目 28 属 30 种,其中,节肢动物是主要类群,弹尾目物种丰富度最高。(1) 物种分布情况表明,21 种为随机性分布,9 种为聚集性分布。(2) 群落组成的比较分析表明,南山菜地(A)的目数、属数、种数和个体数均为最多。(3) 群落多样性比较分析表明,南山滩涂(B)的丰富度最高,矾山滩涂(F)的优势度最高,矾山滩涂(F)的多样性最高,南山菜地(A)的均匀度最高。(4) 南矶湿地深层土壤动物群落多样性要低于表层土壤,但它更能反映南矶湿地生态系统的复杂性和稳定性样貌。

致 谢

对参与调查的东华理工大学生物系 1923301-2 班学生孟浩、罗本萍、王琪和刘安财一并表示感谢!

基金项目

国家自然科学基金(31201718); 国家级大学生创新创业训练计划项目(2017405022)。

参考文献

- [1] 尹文英. 中国土壤动物[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] 陈茜, 李强强, 唐伟, 等. 不同栽培模式对中小型土壤动物多样性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(8): 1147-1156.
- [3] Auclerc, A., Beaumelle, L., Barantal, S., Chauvat, M., Cortet, J., De Almeida, T., *et al.* (2022) Fostering the Use of Soil Invertebrate Traits to Restore Ecosystem Functioning. *Geoderma*, **424**, Article 116019. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116019>
- [4] Ettema, C.H. and Wardle, D.A. (2002) Spatial Soil Ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, **17**, 177-183. [https://doi.org/10.1016/s0169-5347\(02\)02496-5](https://doi.org/10.1016/s0169-5347(02)02496-5)

- [5] Islam, W., Saqib, H.S.A., Adnan, M., Wang, Z., Tayyab, M., Huang, Z., *et al.* (2022) Differential Response of Soil Microbial and Animal Communities along the Chronosequence of *Cunninghamia lanceolata* at Different Soil Depth Levels in Subtropical Forest Ecosystem. *Journal of Advanced Research*, **38**, 41-54. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2021.08.005>
- [6] 王若男, 彭文启, 刘晓波, 等. 鄱阳湖南矶湿地典型植被对水深和淹没频率的响应分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 6(6): 528-535.
- [7] 李伟, 崔丽娟, 赵欣胜, 等. 太湖岸带湿地土壤动物群落结构与多样性[J]. 生态学报, 2015, 35(4): 944-955.
- [8] 陈连水, 袁凤辉, 饶军, 等. 鄱阳湖南矶湿地蜘蛛及其昆虫猎物多样性季节变化与群落功能分析[J]. 中国科技论文在线精品论文, 2024, 17(1): 1-15.
- [9] 百度. 江西鄱阳湖南矶湿地国家级自然保护区[EB/OL]. <https://baike.baidu.com/item/%E6%B1%9F%E8%A5%BF%E9%84%B1%E9%98%B3%E6%B9%96%E5%8D%97%E7%9F%B6%E6%B9%BF%E5%9C%B0%E5%9B%BD%E5%AE%B6%E7%BA%A7%E8%87%AA%E7%84%B6%E4%BF%9D%E6%8A%A4%E5%8C%BA/9553621>, 2024-02-08.
- [10] 尹文英, 等. 中国亚热带土壤动物[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [11] 尹文英, 等. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [12] 南开大学, 中山大学, 北京大学, 等. 昆虫学(上下册) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1980.
- [13] 忻介六, 杨庆爽, 胡成业. 昆虫形态分类学[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1985.
- [14] 袁锋, 张雅林, 冯纪年, 等. 昆虫分类学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996.
- [15] Song, D.X., Zhu, M.S. and Chen, J. (2000) The Spiders of China. Hebei Science and Technology Publishing House.
- [16] 马克平. 生物群落多样性的测度方法, 生物多样性研究的原理与方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1994.
- [17] Anne, E.M. 生物多样性测度[M]. 张峰, 译. 北京: 科学出版社, 2011.
- [18] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [19] Potapov, A.M., Tiunov, A.V. and Scheu, S. (2019) Uncovering Trophic Positions and Food Resources of Soil Animals Using Bulk Natural Stable Isotope Composition. *Biological Reviews*, **94**, 37-59. <https://doi.org/10.1111/brv.12434>
- [20] Fitter, A.H., Gilligan, C.A., Hollingworth, K., *et al.* (2005) Biodiversity and Ecosystem Function in Soil. *Functional Ecology*, **19**, 369-377.
- [21] Magilton, M., Maraun, M., Emmerson, M. and Caruso, T. (2019) Oribatid Mites Reveal That Competition for Resources and Trophic Structure Combine to Regulate the Assembly of Diverse Soil Animal Communities. *Ecology and Evolution*, **9**, 8320-8330. <https://doi.org/10.1002/ece3.5409>
- [22] Johnston, A.S.A. and Sibly, R.M. (2020) Multiple Environmental Controls Explain Global Patterns in Soil Animal Communities. *Oecologia*, **192**, 1047-1056. <https://doi.org/10.1007/s00442-020-04640-w>
- [23] Zhou, Z., Lu, J., Preiser, J., Widyastuti, R., Scheu, S. and Potapov, A. (2023) Plant Roots Fuel Tropical Soil Animal Communities. *Ecology Letters*, **26**, 742-753. <https://doi.org/10.1111/ele.14191>
- [24] Maaß, S., Maraun, M., Scheu, S., Rillig, M.C. and Caruso, T. (2015) Environmental Filtering vs. Resource-Based Niche Partitioning in Diverse Soil Animal Assemblages. *Soil Biology and Biochemistry*, **85**, 145-152. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.03.005>
- [25] Pollierer, M.M., Klärner, B., Ott, D., Digel, C., Ehnes, R.B., Eitzinger, B., *et al.* (2021) Diversity and Functional Structure of Soil Animal Communities Suggest Soil Animal Food Webs to Be Buffered against Changes in Forest Land Use. *Oecologia*, **196**, 195-209. <https://doi.org/10.1007/s00442-021-04910-1>
- [26] Potapov, A.M., Goncharov, A.A., Semenina, E.E., Korotkevich, A.Y., Tsurikov, S.M., Rozanova, O.L., *et al.* (2017) Arthropods in the Subsoil: Abundance and Vertical Distribution as Related to Soil Organic Matter, Microbial Biomass and Plant Roots. *European Journal of Soil Biology*, **82**, 88-97. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2017.09.001>
- [27] Fujii, S., Cornelissen, J.H.C., van Logtestijn, R.S.P., van Hal, J. and Berg, M.P. (2023) Downed Deadwood Habitat Heterogeneity Drives Trophic Niche Diversity of Soil-Dwelling Animals. *Soil Biology and Biochemistry*, **187**, Article 109193. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109193>
- [28] Caruso, T., Melecis, V., Kagainis, U. and Bolger, T. (2020) Population Asynchrony Alone Does Not Explain Stability in Species-Rich Soil Animal Assemblages: The Stabilizing Role of Forest Age on Oribatid Mite Communities. *Journal of Animal Ecology*, **89**, 1520-1531. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.13203>
- [29] Zieger, S.L., Holczinger, A., Sommer, J., Rath, M., Kuzyakov, Y., Polle, A., *et al.* (2017) Beech Trees Fuel Soil Animal Food Webs via Root-Derived Nitrogen. *Basic and Applied Ecology*, **22**, 28-35. <https://doi.org/10.1016/j.baec.2017.06.006>

-
- [30] Shutenko, G.S., Andriuzzi, W.S., Dyckmans, J., Luo, Y., Wilkinson, T.L. and Schmidt, O. (2022) Rapid Transfer of C and N Excreted by Decomposer Soil Animals to Plants and Above-Ground Herbivores. *Soil Biology and Biochemistry*, **166**, Article 108582. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108582>
 - [31] Goncharov, A.A., Khramova, E.Y. and Tiunov, A.V. (2014) Spatial Variations in the Trophic Structure of Soil Animal Communities in Boreal Forests of Pechora-Ilych Nature Reserve. *Eurasian Soil Science*, **47**, 441-448. <https://doi.org/10.1134/s106422931405007x>
 - [32] Singh, V. and Rastogi, A. (2021) Animals, Environment and Sustainability: Global Warming Reducing and Inducing Attributes of the Farm Animals. *The Indian Journal of Animal Sciences*, **91**, 807-813. <https://doi.org/10.56093/ijans.v91i10.117209>
 - [33] Maraun, M., Thomas, T., Fast, E., Treibert, N., Caruso, T., Schaefer, I., *et al.* (2023) New Perspectives on Soil Animal Trophic Ecology through the Lens of C and N Stable Isotope Ratios of Oribatid Mites. *Soil Biology and Biochemistry*, **177**, Article 108890. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108890>
 - [34] Devetter, M. and Schöll, K. (2014) Hydrobiont Animals in Floodplain Soil: Are They Positively or Negatively Affected by Flooding? *Soil Biology and Biochemistry*, **69**, 393-397. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.11.005>
 - [35] Yang, Y., Ashworth, A.J., DeBruyn, J.M., Willett, C., Durso, L.M., Cook, K., *et al.* (2019) Soil Bacterial Biodiversity Is Driven by Long-Term Pasture Management, Poultry Litter, and Cattle Manure Inputs. *PeerJ*, **7**, e7839. <https://doi.org/10.7717/peerj.7839>