

白洋淀地区土壤动物群落结构和多样性

葛雪迎, 高思佳, 张钰博, 刘 僮, 刘浩宇*

河北大学生命科学与绿色发展研究院生命科学学院, 河北 保定
Email: *liuhy@aliyun.com

收稿日期: 2020年12月3日; 录用日期: 2020年12月31日; 发布日期: 2021年1月8日

摘 要

基于2018年5~9月在白洋淀地区5类样地中土壤动物调查数据, 研究其群落结构和多样性特点。5次调查共分离获得土壤动物1601头, 隶属于3门10纲18目。优势类群为膜翅目(67.02%), 常见类群中较丰富类群依次为柄眼目(8.31%)、鞘翅目(6.18%)和中腹足目(4.31%)。土壤动物的整体数量按照季节表现为8月 > 9月 > 6月 > 7月 > 5月, 按照土层表现为第1层(691) > 第2层(470) > 第3层(440)。不同季节间动物群落Jaccard相似性指数均高于0.5, 6月相对其它月份Shannon-Wiener多样性指数最高, 8月的Simpson优势度指数和Pielou均匀度指数显著不同于其它月份, 不同样地间指数均不存在显著性差异($P > 0.05$)。结果表明: 白洋淀土壤中存着大量的动物类群, 种群数量随土层加深而减少; 不同季节土壤动物结构存在差异, 呈现为极相似性和中度相似性; 不同样地间土壤动物结构表现为中度不相似性、中度相似性和极度相似性。研究结果可为白洋淀土地利用及科学管理提供理论依据。

关键词

白洋淀, 土壤动物, 群落组成, 生物多样性

Community Structure and Diversity of Soil Animals in the Baiyangdian Area, Hebei

Xueying Ge, Sijia Gao, Yubo Zhang, Tong Liu, Haoyu Liu*

School of Life Science, Institute of Life Science and Green Development, Hebei University, Baoding Hebei
Email: *liuhy@aliyun.com

Received: Dec. 3rd, 2020; accepted: Dec. 31st, 2020; published: Jan. 8th, 2021

Abstract

From May to September, 2018, the project team studied the soil animal community structure and

*通讯作者。

文章引用: 葛雪迎, 高思佳, 张钰博, 刘僮, 刘浩宇. 白洋淀地区土壤动物群落结构和多样性[J]. 土壤科学, 2021, 9(1): 1-9. DOI: 10.12677/hjss.2021.91001

diversity in five types of land in Baiyangdian Area. A total of 1601 soil animals were obtained from 5 surveys, belonging to 3 phylum, 10 classes, 18 orders. The dominant species was Hymenoptera (67.02%), and the richer group in the common group was Stylomatophora (8.31%), Coleoptera (6.18%) and Mesogastropoda (4.31%). The total number of soil animals was shown as August > September > June > July > May, and it was shown as layer 1 (691) > layer 2 (470) > layer 3 (440) according to the soil layer. The Jaccard similarity index of animal communities in different seasons was higher than 0.5. In June, the Shannon-Wiener diversity index was the highest relative to other months. In August, Simpson dominance index and Pielou evenness index were significantly different from other months, and there is no significant difference between indexes in different places ($P > 0.05$). The results showed that there were a large number of animal groups in the soil of Baiyangdian Area, and the number of population decreased with the deepening of soil layer. The structure of soil animals in different seasons was different, but showed extremely and moderate similar levels. There are also differences in soil animal structures between different areas, and they are moderately non-similar to extremely similar levels. The results can provide theoretical basis for land use and scientific management in Baiyangdian Area.

Keywords

Baiyangdian Area, Soil Fauna, Community Structure, Biodiversity

Copyright © 2021 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

土壤是目前地球上生物多样性最丰富的生态环境[1] [2], 土壤动物约占全球已知生物多样性的 23% [3]。在陆地生态系统中, 土壤动物是除土壤微生物外, 种类最为丰富、数量最多的生物类群[4]。所有地下生态学过程几乎都与土壤动物相关, 并对部分地上生态系统的结构、功能和过程起着重要作用[5] [6], 从而对整个生态系统的构建和维持有着不可忽视的影响[7]。但是, 因土壤动物体型多微小, 且长期生活在土壤中, 不被人们所熟悉, 进而经常在生产生活中被忽视。

进入到本世纪以来, 人们才逐渐意识到人类的干扰活动不断引发环境污染和全球变化, 并严重威胁着土壤生物多样性, 开始对土壤动物多样性研究、监测和保护愈加重视[4]。国家在关于对《河北雄安新区规划纲要》的批复中[8] [9], 要求打造优美自然生态环境, 明确提出实施白洋淀生态修复和加强生态环境建设等相关内容。鉴于土壤动物在地下生态系统中有着至关重要的作用, 本研究以雄安新区内白洋淀湿地区域为研究对象, 通过对土壤动物群落的调查分析, 旨在查明其土壤动物群落组成、多样性及季节变化规律。分别在淀缘混合带(A)、农田乔木带(B)、淀内湿地区(C)、河岸乔木带(D)、入淀河口区(E)选取 5 类样地, 并于 2018 年 5 月、6 月、7 月、8 月和 9 月的各月月初进行土壤取样。研究结果不仅为本地区提供土壤动物多样性的基础资料, 还能为其土地规划利用、土壤健康监测以及科学管理提供理论依据。

2. 研究区概况

研究区域位于雄安新区腹地安新县和容城县交界的白洋淀湿地, 即烧车淀和南拒马河口附近, 四季分明, 年平均降雨量 551.5 mm, 土地利用方式主要为湿地旅游、养殖和农田耕种, 部分为树林、荒地和建设用地等, 人为扰动较频繁。植被的优势物种除农作物小麦和玉米外, 主要包括: 芦苇 *Phragmites*

australis、欧亚旋覆花 *Inula britannica*、白毛杨 *Populus tomentosa*、狗尾草 *Setaria viridis*、荻 *Triarrhena sacchariflora*、风花菜 *Rorippa globosa*、茜草 *Rubia cordifolia*、山莴苣 *Lagedium sibiricum*、野大豆 *Glycine soja*、苍耳 *Xanthium sibiricum*、葎草 *Humulus scandens* 等。

3. 研究方法

3.1. 样地选择

5 类样地代表了典型生境特点：样地 A 位于淀缘，长期不被水淹没，植被较好，包括乔木和草本植物；样地 B 位于农田旁的树林，主要为白毛杨，有少量杂草，地表硬化；样地 C 为淀内湿地，植被主要为芦苇，有少量杂草，土壤湿度大；样地 D 为河流岸边杨树林，植被稀少，土质松软；样地 E 邻近码头，植被主要为稀疏的草本植物，地表硬化。

3.2. 野外土壤动物取样与处理

2018 年 5 月、6 月、7 月、8 月和 9 月，在每月月初赴白洋淀地区调查取样。在 5 个目标样地处，各划定一个 100 cm * 100 cm 的样方，样方内按梅花形取 5 点，每点处用 100 cm³ 容环刀采集 0~5 cm、5~10 cm、10~15 cm 3 个垂直层次的土壤，并测量每份土壤温度。遇到表层大型土壤动物采用手拣法收集。每个样地每次共计取 15 份样品，将采集得到的土壤放入自封袋并记录采集信息，带回实验室低温保存。本研究共获得 375 份土壤样品。

3.3. 室内土壤动物分离与鉴定

在实验室内将采集得到的土样，先采用体视显微镜(Nikon SMZ800)分拣中、大型动物，然后采用干漏斗法(Tullgren 法)分离小、微型土壤动物。10%福尔马林溶液浸制蚯蚓，其余用 75%酒精保存标本。将土壤动物置于体视显微镜下，依据《中国土壤动物检索图鉴》[10]和《昆虫分类学》[11]鉴定到目级阶元，并统计数量，加注标签后长期保存在冰箱中。

3.4. 室内土壤动物分离与鉴定

类群数量等级划分：个体数量占总数 10%以上的为优势类群，占总数 1%~10%的为常见类群，少于 1%的为稀有类群[12]。多样性分析：选用 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数、Pielou 均匀度指数来描述土壤动物的群落状况，相似性采用 Jaccard 指数，公式如下：

1) Shannon-Wiener 多样性指数[13]

$$H' = -\sum P_i \ln P_i$$

2) Simpson 优势度指数[14]

$$C = \sum (n_i/N)^2$$

3) Pielou 均匀度指数[15]

$$E = H'/\ln S$$

其中， P_i 为群落中第 i 个类群的个体比例， S 为种类数量， n_i 为样区内第 i 个类群的个体数量， N 为样区内所有类群的个体数量。

4) Jaccard 指数[16]

$$q = c/(a+b-c)$$

式中， a 、 b 分别为群落 A、B 的类群数， c 为两类群的共有类群数。相似性指数标准分别为极相似(0.75~1.00)、

中等相似(0.50~0.74)、中等不相似(0.25~0.49)和极不相似(0~0.24)。

采用 SPSS21 软件对所测数据进行统计分析, 对不同土层深度土壤动物个体数量进行方差分析, 绘制图表采用软件 Microsoft Excel 2010。

4. 结果与分析

4.1. 土壤动物群落组成

2018 年 5~9 月的 5 次调查共获得土壤动物 3 门 10 纲 18 目 1601 头, 分别是节肢动物门、软体动物门和环节动物门 3 门, 昆虫纲、双尾纲、弹尾纲、原尾纲、综合纲、软甲纲、多足纲、蛛形纲、寡毛纲和腹足纲 10 纲。其中节肢动物门有 8 纲 14 目, 昆虫纲有 6 目, 分别是门和纲类群最丰富的类群。

节肢动物门 1340 头, 占总个数的 83.70%, 是门级阶元上的优势类群, 其次是软体动物门, 占 15.49%, 环节动物门最少, 仅占 0.81%。在纲级水平, 优势类群为昆虫纲和腹足纲, 分别占 76.08% 和 15.49%; 常见类群为软甲纲、蛛形纲和弹尾纲, 分别占 3.06%、2.06% 和 1.19%, 其余 5 个稀有类群, 合计仅占 2.12%。在目级阶元, 只有膜翅目是优势类群, 高达 67.02%, 常见类群有柄眼目、鞘翅目、中腹足目、等足目、基眼目、寄螨目、双翅目和弹尾目, 分别占总数的 8.31%、6.18%、4.31%、3.06%、2.87%、1.69%、1.37% 和 1.19%; 稀有类群 9 目, 合计仅占 3.40% (表 1)。

Table 1. The composition of animal communities in soil of Baiyangdian Area

表 1. 白洋淀地区土壤中动物群落组成

		类群 Group	总数 Total	%	优势度 Dominance
节肢动物门 Arthropoda	昆虫纲 Insecta	膜翅目 Hymenoptera	1073	67.02	+++
		鞘翅目 Coleoptera	99	6.18	++
		鳞翅目 Lepidoptera	12	0.75	+
		半翅目 Hemiptera	11	0.69	+
		双翅目 Diptera	22	1.37	++
		脉翅目 Neuroptera	1	0.06	+
	双尾纲 Diplura	双尾目 Diplura	2	0.12	+
	弹尾纲 Collembola	弹尾目 Collembola	19	1.19	++
	原尾纲 Protura	原尾目 Protura	1	0.06	+
	综合纲 Symphyla	综合目 Symphyla	11	0.69	+
	软甲纲 Malacostraca	等足目 Isopoda	49	3.06	++
	多足纲 Myriapoda	带马陆目 Polydesmida	7	0.44	+
	蛛形纲 Arachnoidea	蜘蛛目 Araneae	6	0.37	+
		寄螨目 Parasiformes	27	1.69	++
环节动物门 Annelida	寡毛纲 Oligochaeta	单向蚓目 Haplotaxida	13	0.81	+
软体动物门 Mollusca	腹足纲 Gastropoda	中腹足目 Mesogastropoda	69	4.31	++
		柄眼目 Stylommatophora	133	8.31	++
		基眼目 Basommatophora	46	2.87	++
		总数	1601		

+++优势类群; ++常见类群; +稀有类群。

4.2. 土壤动物时间动态

从土壤动物的数量上看, 5月的动物数量最少(87), 6月和7月动物的数量上升且较为稳定, 分别为214头和199头, 8月数量最高(816), 到9月份数量明显下降(285) (图1, 表2)。而从土壤动物类群数量分析, 在18个目级阶元类群中, 5月类群数量最少为11目, 而6月最多为15目, 其它月类群数量较稳定, 分别为14、13、14目。

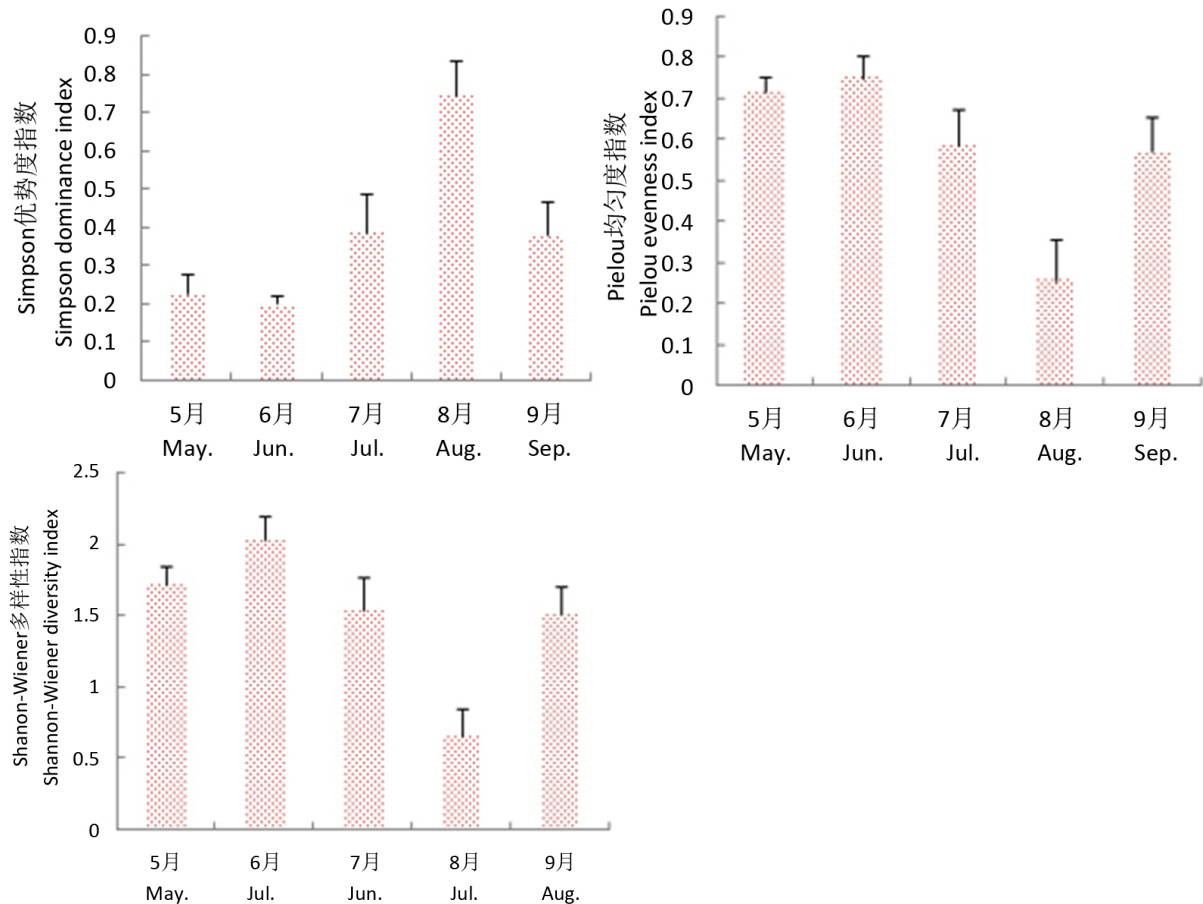


Figure 1. The ecological index of Baiyangdian Area in different months (mean \pm SE)

图1. 白洋淀地区不同月份土壤动物生态指数(平均值 \pm 标准误)

通过比较不同月份的土壤动物类群 Jaccard 指数发现, 除5月与6月、7月、8月、9月相似性指数表现为中等相似性外, 其他月份间的相似性指数均表现为极度相似性(表3)。统计分析各月份的 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数, 发现6月份 Shannon-Wiener 多样性指数最高(2.03), Pielou 均匀度指数最高(0.75), Simpson 优势度指数最低(0.20)。8月份 Shannon-Wiener 多样性指数最低(0.65), Pielou 均匀度指数最低(0.25), Simpson 优势度指数最高(0.75)。就以上两个月在图中的波动幅度而言, 5月、7月和9月的3种指数较接近(图1)。

4.3. 土壤动物垂直分布

从所有样地5个月的土壤动物数量上看, 表现为第1层(691) > 第2层(470) > 第3层(440), 逐层递减。而在不同月份间, 分布情况有一定的差异, 5月第1层(13)明显少于第2层(34)和第3层(30); 6月、7月和9月均是第1层明显高于第2层和第3层, 其中6月第2层(37)略低于第3层(43), 7月第2层(58)

明显高于第3层(9), 9月第2层(44)明显低于第3层(99); 8月表现为3层数量较为稳定, 分别为270、285和259头。说明土壤动物垂直空间分布在5月、6月、7月和9月有季节响应, 而在8月无季节响应。同时, 通过比较不同土层的群落总数的 Jaccard 指数发现, 第1层与2层为极相似(0.76), 第1层与第3层以及第2层与第3层是中等相似(0.71, 0.59)。

Table 2. Statistical table of soil animal community composition from May to September in Baiyangdian Area
表 2. 白洋淀地区 5-9 月份土壤动物群落组成统计表

类群 Group	5月 May.	%	6月 Jun.	%	7月 Jul.	%	8月 Aug.	%	9月 Sep.	%
膜翅目 Hymenoptera	1	1.15	81	37.85	120	60.30	702	86.03	169	59.30
鞘翅目 Coleoptera	6	6.90	36	16.82	15	7.54	13	1.59	29	10.18
鳞翅目 Lepidoptera	1	1.15	1	0.47	7	3.52	2	0.25	1	0.35
半翅目 Hemiptera	1	1.15	3	1.40	2	1.01	2	0.25	3	1.05
双翅目 Diptera	6	6.90	7	3.27	2	1.01	6	0.74	1	0.35
脉翅目 Neuroptera	0	0.00	0	0.00	1	0.50	0	0.00	0	0.00
双尾目 Diplura	0	0.00	2	0.93	0	0.00	0	0.00	0	0.00
弹尾目 Collembola	1	1.15	18	8.41	0	0.00	0	0.00	0	0.00
原尾目 Protura	0	0.00	0	0.00	0	0.00	1	0.12	0	0.00
综合目 Symphyla	0	0.00	5	2.34	1	0.50	3	0.37	2	0.70
等足目 Isopoda	1	1.15	23	10.75	2	1.01	4	0.49	19	6.67
带马陆目 Polydesmida	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	7	2.46
蜘蛛目 Araneae	1	1.15	1	0.47	3	1.51	0	0.00	1	0.35
寄螨目 Parasiformes	0	0.00	12	5.61	9	4.52	2	0.25	4	1.40
单向蚓目 Earthworm	0	0.00	2	0.93	1	0.50	2	0.25	8	2.81
基眼目 Basommatophora	16	18.39	12	5.61	8	4.02	8	0.98	2	0.70
中腹足目 Mesogastropoda	26	29.89	2	0.93	11	5.53	19	2.33	11	3.86
柄眼目 Stylommatophora	27	31.03	9	4.21	17	8.54	52	6.37	28	9.82
总数 Sum	87		214		199		816		285	

Table 3. Jaccard index of soil animal communities in different months of Baiyangdian Area
表 3. 白洋淀地区不同月份土壤动物群落相似性指数

月份 Month	6月份 Jun.	7月份 Jul.	8月份 Aug.	9月份 Sep.
5月份 May	0.73	0.67	0.60	0.63
6月份 Jun.		0.81	0.75	0.81
7月份 Jul.			0.80	0.87
8月份 Aug.				0.80

4.4. 不同样地的土壤动物差异

不同类型样地间土壤动物个体数量排序为: 样地 A(944) > 样地 B(218) > 样地 C(193) > 样地

D(145) > 样地 E(101)。依据类群数的统计, 样地 C 类群数量最丰富为 15 目, 样地 E 类群数为 13 目, 样地 A、样地 B 类群数为 12 目, 样地 D 类群最少, 为 10 目。样地 C 的 Shannon-Wiener 多样性指数为所有样地中最高(2.28), 其余样地依次为样地 E(1.86) > 样地 B(1.69) > 样地 D(1.38) > 样地 A(0.49)。Simpson 优势度指数从高到低样地 A(0.81) > 样地 D(0.36) > 样地 E(0.27) > 样地 B(0.24) > 样地 C(0.13)。Pielou 均匀度指数从高到低样地 C(0.84) > 样地 E(0.72) > 样地 B(0.68) > 样地 D(0.59) > 样地 A(0.20)。统计分析表明不同样地间 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数均不存在显著性差异($P > 0.05$)。

不同样地类群 Jaccard 相似性指数的结果表明, 除样地 D 与样地 A、B 间相似性指数为中等不相似以及样地 E 与样地 B、C 之间, 样地 C 与样地 A 之间为极度相似外, 其余样地间均为中等相似(表 4)。

Table 4 Jaccard index of soil animal communities in different tapes of Baiyangdian Area

表 4. 白洋淀地区不同样地类型土壤动物群落相似度指数

样地类型 Plot tape	样地 B Plot B	样地 C Plot C	样地 D Plot D	样地 E Plot E
样地 A Plot A	0.60	0.79	0.47	0.56
样地 B Plot B		0.69	0.38	0.79
样地 C Plot C			0.56	0.75
样地 D plot D				0.53

5. 讨论与结论

调查共分离出土壤动物 1601 头, 隶属于 3 门 10 纲 18 目。昆虫纲和腹足纲构成了白洋淀土壤动物的主要类群, 对土壤动物群落特征起着决定性作用。其中在昆虫纲中, 优势类群为膜翅目的蚁科昆虫, 而在北京市郊区、河北清西陵和上海大金岛的浅层土壤动物中的蜉蝣目和弹尾目为优势类群[17] [18] [19], 其在数量和种类上都很丰富, 各月均有出现, 其原因可能是蚂蚁相对其它类群抗人为干扰能力较强[20], 并在北京近郊深层土壤中也得到了验证[21]。蚂蚁是主要的土壤生态系统的捕食者, 蚁科的优势度直接影响猎物的种群密度, 还会影响猎物的行为, 从而对食物链产生明显的级联效应。腹足纲中的种类和数量也较大, 很可能与湿地环境有关, 陆生贝类动物大多喜欢潮湿的环境, 而且对空气湿度非常敏感, 湿地气候利于腹足纲动物的栖息、产卵和调节体内湿度等。

土壤动物数量随季节明显变化, 5 月份数量较少, 6 月数量逐渐增多, 与 7 月基本持平, 8 月份达到顶峰, 9 月份数量下降。一般来说, 温度过高和过低都不利于土壤动物的繁殖[22], 经过对本地区 5 个月土壤温度的规律分析比较, 土壤温度未出现过低或过高现象, 土壤动物数量与土壤温度呈正相关, 随着土壤的温度升高而升高, 伴随土壤温度降低而减少。

样地土壤随土层深入, 动物数量逐层递减, 第 1 层 > 第 2 层 > 第 3 层, 表现为表聚现象, 经过对 5 个月土层平均温度统计分析发现, 总体上土壤温度随土层深入而降低, 与动物数量呈正相关, 即随着土层深入, 土温下降, 进而种群丰富度降低, 与现有研究结果相符合[21] [23] [24]。不同时间的土层对季节响应略有差异, 5 月、6 月、7 月和 9 月有季节响应, 是由于处于气温的上升过程或下降过程, 尤其是地表土壤动物的响应比较敏感, 而在 8 月份, 气温最高, 土层的温度也最高, 超过 32℃且土层间的温差最小, 故而无季节响应。当然, 随着土层不断深入和寒冬季节影响, 不同土层的类群组成有待进一步的研究。

不同类型样地间土壤动物数量比较, 样地 A 的土壤动物个体数量明显高于其它样地, 通过比较 5 类样地的植被、土壤硬度和人为干扰情况发现, 样地 A 的植被覆盖率最高和植物种类最多, 地表腐殖质层

较丰富且受人为干扰小。植被为土壤动物提供活动场所和食物来源,自然状态下植被类型能显著影响土壤生物多样性和结构组成[25]。而在样地 D,由于近期有人工土地翻整,植被在恢复过程中,个体数量明显减少;样地 E 植被最差,且土质异常坚硬,不利于土壤动物的生存。各样地间土壤类群相似性指数的结果表明,均处于中等不相似或中等相似。不同样地间距离约 1~5 公里,尽管植被、土质状况和受人为干扰程度有一定差异,但 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数均不存在显著性差异。以上这些白洋淀地区土壤动物的群落结构特点和多样性规律,将为其土地规划利用、土壤健康、生物多样性恢复和监测等提供基本数据支撑和服务。

致 谢

河北大学生命科学学院唐宏亮副教授帮助鉴定植被部分种类,在此表示衷心感谢。

基金项目

河北省自然科学基金项目(C2019201192);河北大学实验室开放项目(SY201840)。

参考文献

- [1] Decaëns, T. (2010) Macroecological Patterns in Soil Communities. *Global Ecology & Biogeography*, **19**, 287-302. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2009.00517.x>
- [2] Powell, J.R., Craven, D. and Eisenhauer, N. (2014) Recent Trends and Future Strategies in Soil Ecological Research-Integrative Approaches at Pedobiologia. *Pedobiologia*, **57**, 1-3. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2014.01.001>
- [3] Decaëns, T., Gioia, C., Measey, G.J., et al. (2006) The Values of Soil Animals for Conservation Biology. *European Journal of Soil Biology*, **42**, S23-S38. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2006.07.001>
- [4] 潘开文, 张林, 邵元虎, 等. 中国土壤动物多样性监测: 探知土壤中的奥秘[J]. 生物多样性, 2016, 24(11): 1234-1239.
- [5] Rüter, P.C.D., Neutel, A.M. and Moore, J.C. (1998) Biodiversity in Soil Ecosystems: The Role of Energy Flow and Community Stability. *Applied Soil Ecology*, **10**, 217-228. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(98\)00121-8](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(98)00121-8)
- [6] Fu, S.L., Zou, X.M. and Coleman, D. (2009) Highlights and Perspectives of Soil Biology and Ecology Research in China. *Soil Biology & Biochemistry*, **41**, 868-876. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.10.014>
- [7] 傅声雷. 土壤生物多样性的研究概况与发展趋势[J]. 生物多样性, 2007, 15(2): 109-115.
- [8] 中共河北省委、省人民政府. 河北雄安新区规划纲要[M]. 北京: 人民出版社, 2018.
- [9] 中共中央、国务院. 关于对《河北雄安新区规划纲要》的批复[N]. 人民日报, 第 001 版, 2018-04-21.
- [10] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [11] 袁锋. 昆虫分类学(第二版) [M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [12] 傅必谦, 陈卫, 董晓晖, 等. 北京松山四种大型土壤动物群落组成和结构[J]. 生态学报, 2002, 22(2): 215-223.
- [13] Shannon, C.E. and Weaver, W. (1949) *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press, Urbana.
- [14] Simpson, E.H. (1949) Measurement of Diversity. *Nature*, **163**, 688. <https://doi.org/10.1038/163688a0>
- [15] Pielou, E.C. (1985) *Mathematical Ecology*. Wiley-Interscience, New York.
- [16] Jaccard, P. (1912) The Distribution of the Flora of the Alpine Zone. *New Phytologist*, **11**, 37-50. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1912.tb05611.x>
- [17] 陈国孝, 宋大祥. 暖温带北京小龙门林区土壤动物的研究[J]. 生物多样性, 2000, 8(1): 88-94.
- [18] 安哲. 河北清西陵地区土壤动物群落多样性研究[J]. 河北林果研究, 2008, 23(2): 150-152.
- [19] 靳亚丽, 李必成, 耿龙, 等. 上海大金山岛不同植被类型下土壤动物群落多样性[J]. 生物多样性, 2017, 25(3): 304-311.
- [20] Gibb, H. and Hochuli, D.F. (2002) Habitat Fragmentation in an Urban Environment: Large and Small Fragments Support Different Arthropod Assemblages. *Biological Conservation*, **106**, 91-100. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(01\)00232-4](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(01)00232-4)

-
- [21] 莫畏, 王志良, 李猷, 等. 北京近郊深土层动物群落结构特征[J]. 生物多样性, 2018, 26(3): 248-257.
- [22] 廖崇惠, 李健雄, 杨悦屏, 等. 海南尖峰岭热带林土壤动物群落——群落的组成及其特征[J]. 生态学报, 2002, 22(11): 1866-1872.
- [23] 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.
- [24] 宋英石, 李晓文, 李锋, 等. 北京市奥林匹克公园不同地表类型对土壤动物多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(4): 1130-1136.
- [25] 黄旭, 文维全, 张健, 等. 川西高山典型自然植被土壤动物多样性[J]. 应用生态学报, 2010, 21(1): 181-190.