

豫东黄河故道大型土壤动物群落组成及多样性研究^①

朱新玉¹, 胡云川², 侯瑞华³

(1 商丘师范学院环境与规划学院, 河南商丘 476000; 2 商丘师范学院生命科学学院, 河南商丘 476000;

3 商丘市城乡一体化示范区第二初级中学, 河南商丘 476000)

摘要:为查明故道湿地大型土壤动物类群对不同湿地类型的响应,于2014年对豫东黄河故道的盐碱滩地、湿草地、芦苇湿地和林地4种类型湿地的大型土壤动物群落进行了调查。结果表明:豫东黄河故道不同湿地类型大型土壤动物群落的类群数和优势类群均存在显著差异,优势类群和主要类群的差异也反映出不同湿地类型环境的异质性。季节变化对大型土壤动物群落类群数、密度和多样性指数均有显著影响($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$),且不同湿地类型大型土壤动物对季节变化的响应存在差异。湿地不同的土壤环境因子,尤其是土壤有机质、氮磷和土壤微生物生物量碳氮的含量与大型土壤动物类群数、密度和多样性间存在显著相关关系($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。

关键词:大型土壤动物;群落结构;黄河故道;湿地;植被类型

中图分类号:S154.5

湿地是水陆相互作用形成的综合生态系统,对区域环境保护、水资源净化、全球气候调节和生物多样性维护等方面有着重要的作用^[1-3]。党的十八大报告中特别指出“加大自然生态系统和环境保护力度,推进水土流失综合治理,保护湿地,扩大湿地面积”,这正反映了湿地生态系统资源的保护和维持已上升到国家战略地位。近年来,随着经济的发展和人口的增长,湿地已经成为人类开发利用程度较高且接触最为频繁的自然景观之一。大型土壤动物是湿地生态系统中不可或缺的重要生物组成成分之一^[4-6],对湿地营养物质的循环起着重要的作用,同时也是湿地生态系统演化的重要驱动因子。因此,研究湿地土壤动物与不同湿地类型之间的关系,可为深入揭示湿地土壤生物多样性及其服务功能的实现提供科学依据。

目前,国内外对湿地土壤动物方面的研究主要集中在土壤动物作为湿地恢复的生态指标研究^[7-9],湿地恢复过程中土壤动物生态特征^[10-12],湿地植被与土壤动物关系研究^[13-15],湿地环境因子与土壤动物之间关系^[16-19]等方面的研究。随着十八大的召开,国家湿地保护工程在逐步推行中,对于每一片湿地生态系统,目前迫切需要解决的任务就是系统地研究其各方面的生态特征,深入研究湿地土壤动物的

组成、分布特征及动态规律,构建湿地土壤动物结构特征的框架,这对整体把握和了解土壤动物多样性及表征不同恢复阶段湿地生物结构的变化特征具有重要的意义。

豫东黄河故道湿地位于黄河下游冲积扇的脊轴,因其独特的水文及气候条件发育了多样的湿地生态类型^[20]。目前,针对豫东黄河故道湿地开展了湿地景观类型多样性、湿地土壤生物质量评价、湿地土壤养分特征及湿地景观类型与土壤质量因子等方面的研究^[21-23],但其大型土壤动物群落组成和结构与不同湿地类型之间的关系还不清楚。鉴于此,本文以豫东黄河故道湿地为研究对象,探讨湿地大型土壤动物区系组成和季节变化特征及其与不同湿地类型之间的关系,旨在揭示湿地大型土壤动物的动态变化对不同湿地类型的响应机制,为湿地景观类型的演变、退化湿地恢复与重建提供基础资料。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

豫东黄河故道位于 $115^{\circ}47' \sim 116^{\circ}17' E$, $34^{\circ}50' \sim 34^{\circ}33' N$,处于河南省和山东省的接壤区域,东起虞城小乔集,西至民权县的睢州坝,南北以黄河故堤为

基金项目:国家自然科学基金项目(41501263)、教育部人文社会科学研究青年基金项目(13YJCZH283)、河南省高等学校重点科研项目(15A180054)、商丘师范学院骨干教师项目(2015GGJS15)和商丘师范学院青年科研基金项目(2011QN21)资助。

作者简介:朱新玉(1981—),女,河北邱县人,博士,副教授,主要从事土壤环境学和湿地生态系统等方面研究。E-mail: tia20021201@163.com

界。该故道全长 134.6 km, 面积约为 1 520 km², 为明清时期古黄河水道遗留下来的一段洼地, 整体呈带状分布, 走向为东南至西北走向^[23](图 1)。

研究区属于暖温带半湿润大陆性季风气候, 年均气温为 13.9~14.3℃, 最高气温 27.0~27.5℃, 最低气温为 -0.6~1.0℃, 年降水量约为 686.5~872.9 mm, 无霜期约 210 天。该研究区域属于洪泽湖水系, 由山东单县大姜庄南入安徽省砀山, 流经徐州后入淮河。历代由于黄河频繁泛滥和决堤改道等, 以及地下

水位的不断上升, 发育了众多的湿地。主要的湿地类型为盐碱滩地(saline-alkali wasteland, SAW)、湿草地(marsh wetland, MW)、芦苇湿地(reed wetland, RW)和林地(forest land, FL)等类型, 湿地土壤多为古黄河冲击沙土或砂壤土。调查区主要以草本植物为主, 乔木类型主要有柳树(*Salix babylonica*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、山杨(*Populus davidiana*)和兰考泡桐(*Paulownia elongata*)等, 灌木主要以野生柽柳林(*Tamarix chinensis*)为主^[23]。

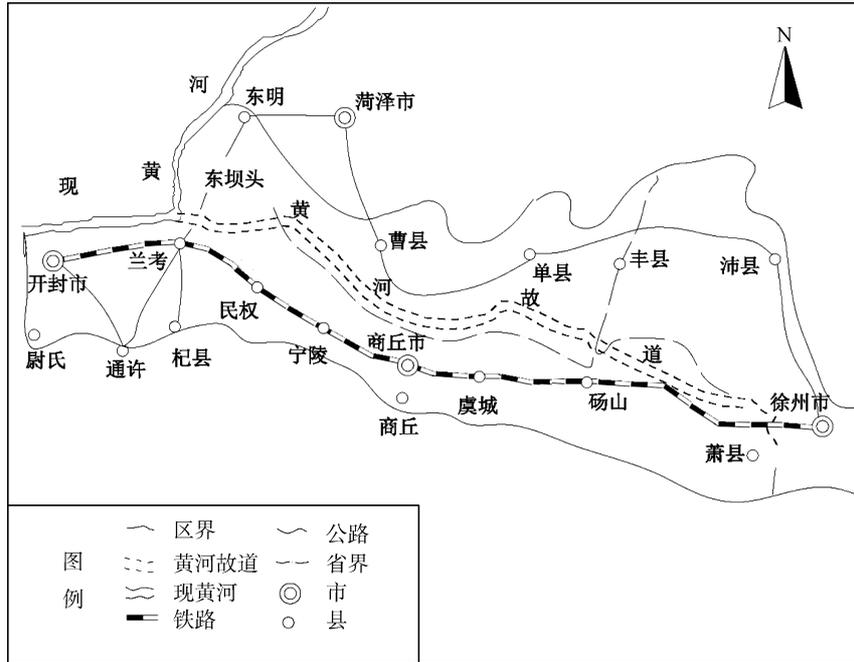


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与土壤动物调查

野外样地的选择是在植物群落调查的基础上, 依据湿地主要植物群落及其分布特征, 结合相关地形林相图来选择样地。本次调查样地主要为盐碱滩地、湿草地、芦苇湿地和林地 4 种类型, 每种样地设置 3 次重复。采用 5 点采样法对每个样地进行采样, 每个样点设置 50 cm × 50 cm 的样方, 分 0~5 cm 和 5~10 cm 两层进行土壤大型动物采样, 手拣法收集大型土壤动物, 并放入 75% 的酒精保存。于 2014 年的 5 月、7 月和 9 月进行 3 次调查, 共采集大型土壤动物样方 180 个(4 类样地 × 3 次样地重复 × 3 次调查 × 5 个样点重复)。

大型土壤动物鉴定根据《中国土壤动物检索图鉴》^[24]、《幼虫分类学》^[25]和《昆虫分类属种检索表》(上、下册)^[26], 在奥林巴斯体视显微镜(SZX16)下进行鉴定计数。绝大多数土壤动物鉴定到属, 少数类群

到科和目。

1.2.2 土壤指标测定

所采土壤样品经过初步处理后, 土壤有机质(SOM)用重铬酸钾-比色法测定; 土壤全氮(TN)采用凯氏定氮法测定; 全磷(TP)采用高氯酸消化-钼锑抗比色法测定; 全钾(TK)采用火焰光度法测定; 碱解氮(AN)采用碱解扩散法测定; 速效磷(AP)采用双酸浸提-钼锑抗比色法测定; 速效钾(AK)采用乙酸铵浸提-原子吸收法测定; 土壤体积质量(容重, SBD)用环刀法测定; 土壤 pH 采用酸度计测定(水土比为 2.5), 以上指标的测定参照刘光崧^[27]的方法。土壤微生物生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸 K₂SO₄ 浸提-TOC 仪法测定^[28]; 土壤微生物生物量氮(MBN)采用氯仿熏蒸浸提-碱性过硫酸钾氧化比色法测定^[28]。4 种湿地类型土壤理化性质见表 1。

1.2.3 数据处理

1) Shannon-Wiener 指数(H')^[29-30]:

$$H' = -\sum_{i=1}^s P_i \log P_i$$

表 1 黄河故道不同类型湿地土壤性质(均值±标准差)
Table 1 Soil properties in different wetlands of old Yellow River

| 土壤性质 | SAW | MW | RW | FL |
|-------------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| SBD(g/cm ³) | 1.17 ± 0.06 a | 1.20 ± 0.03 a | 1.18 ± 0.04 a | 1.10 ± 0.01 a |
| pH | 8.38 ± 0.05 a | 7.99 ± 0.07 a | 8.10 ± 0.04 a | 7.65 ± 0.01 a |
| SOM(g/kg) | 5.40 ± 0.40 b | 6.99 ± 0.11 a | 6.68 ± 0.10 a | 7.84 ± 0.53 a |
| TN(g/kg) | 0.30 ± 0.01 a | 0.35 ± 0.01 a | 0.41 ± 0.02 a | 0.42 ± 0.02 a |
| TP(g/kg) | 0.49 ± 0.04 a | 0.57 ± 0.05 a | 0.57 ± 0.04 a | 0.67 ± 0.11 a |
| TK(g/kg) | 19.02 ± 0.12 a | 20.56 ± 0.25 ab | 19.52 ± 0.67 a | 20.26 ± 0.61 b |
| AP(mg/kg) | 4.37 ± 0.15 b | 4.84 ± 0.23 ab | 4.89 ± 0.06 ab | 5.00 ± 0.01 ab |
| AK(mg/kg) | 63.45 ± 1.53 a | 76.53 ± 0.50 b | 75.28 ± 1.08 b | 78.72 ± 0.30 bc |
| AN(mg/kg) | 19.67 ± 0.57 a | 18.25 ± 0.21a | 20.05 ± 0.33 ab | 28.75 ± 0.34 c |
| MBC(mg/kg) | 72.55 ± 8.59 a | 82.76 ± 0.38 ab | 81.32 ± 0.91 bc | 97.56 ± 0.45 d |
| MBN(mg/kg) | 14.41 ± 0.88 c | 18.03 ± 0.22 b | 16.99 ± 0.17 b | 20.52 ± 0.45 a |

注：同行小写字母不相同表示不同湿地类型间差异在 $P < 0.05$ 水平显著。

式中： S 为所有的物种数； P_i 为第 i 个物种的多度比例。

2) Pielou 均匀度指数(E)^[29-30]：

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

式中： S 为所有的物种数； H' 为多样性指数。

3) 土壤动物群落结构分析：根据每种样地类型大型土壤动物个体数量占总个体数量的百分比来划分各类群数量的等级，个体数量占总个体数量 10% 以上为优势类群，1% ~ 10% 为常见类群，不足 1% 为稀有类群。

4) 主成分分析(principal component analysis, PCA)和简单相关分析：分析土壤动物群落结构差异及其与土壤因子间的关系，以 Pearson 相关系数表示两个变量间的相关关系，对所有相关系数均进行显著性检验，差异显著水平为 $P < 0.05$ ，差异极显著水平为 $P < 0.01$ ；在进行分析前对数据进行 $\log(x+1)$ 转化。

试验数据采用 Excel 2003 和 SPSS16.0 软件进行整理，Origin 8.0 和 Canoco for Windows4.5 软件作图；多重比较利用最小显著差异法(least-significant different, LSD)。

2 结果与分析

2.1 豫东黄河故道湿地大型土壤动物群落组成

本次调查共捕获大型土壤动物 34 类，隶属 5 纲 14 目 28 科 34 类(表 2)。优势类群有蜘蛛目、石蜈蚣目、地蜈蚣属和蚁属，分别占总捕获量的 10.39%、12.90%、10.94% 和 34.51%，共占个体总量的 68.74%；常见类群分别有白线蚓属、爱胜蚓属、虎甲科、步甲科、金龟甲科、隐翅甲科、草蚁属、康虫八属和偶铈虫八属 9 类，共占个体总量的 22.16%；稀有类群共 22 类，仅占总个体数量的 11.33%。由大型土壤动物群落组成和个体数量来看，节肢动物门的昆

虫纲为豫东黄河故道湿地大型土壤动物的主要组成部分。

不同类型湿地大型土壤动物群落结构不同。白线蚓属、正蚓属、爱胜蚓属、蜘蛛目、山蛭属、刺圆马陆属、地蜈蚣属、石蜈蚣目、蚁属和草蚁属 10 种动物为 4 种湿地类型共有类群。SAW 湿地动物类群最少，仅为 12 类，个体数占总个体数量的 9.49%，其次为 RW 湿地，22 类群，个体数占总个体数量的 16.58%，MW 和 FL 样地类型大型土壤动物类群分别为 31 类和 33 类，个体数量分别占总个体数量的 27.47% 和 46.45%。

2.2 豫东黄河故道湿地大型土壤动物群落多样性动态

不同湿地类型大型土壤动物类群数在 5 月至 7 月间呈现增加趋势，但在 7 月到 10 月间则呈现下降的趋势(图 2)。不同季节对大型土壤动物物种类群有显著影响($P < 0.05$)，各湿地类型夏季(7 月)大型土壤动物群落类群数显著高于春季($P < 0.05$)；秋季(9 月)动物类群数除 SAW、MW 湿地显著低于夏季动物类群数量及 FL 湿地显著高于春季外，其他均无显著差异($P > 0.05$)。类群数动态表明，不同湿地植被类型和季节变化对大型土壤动物的物种丰富度有较大影响。

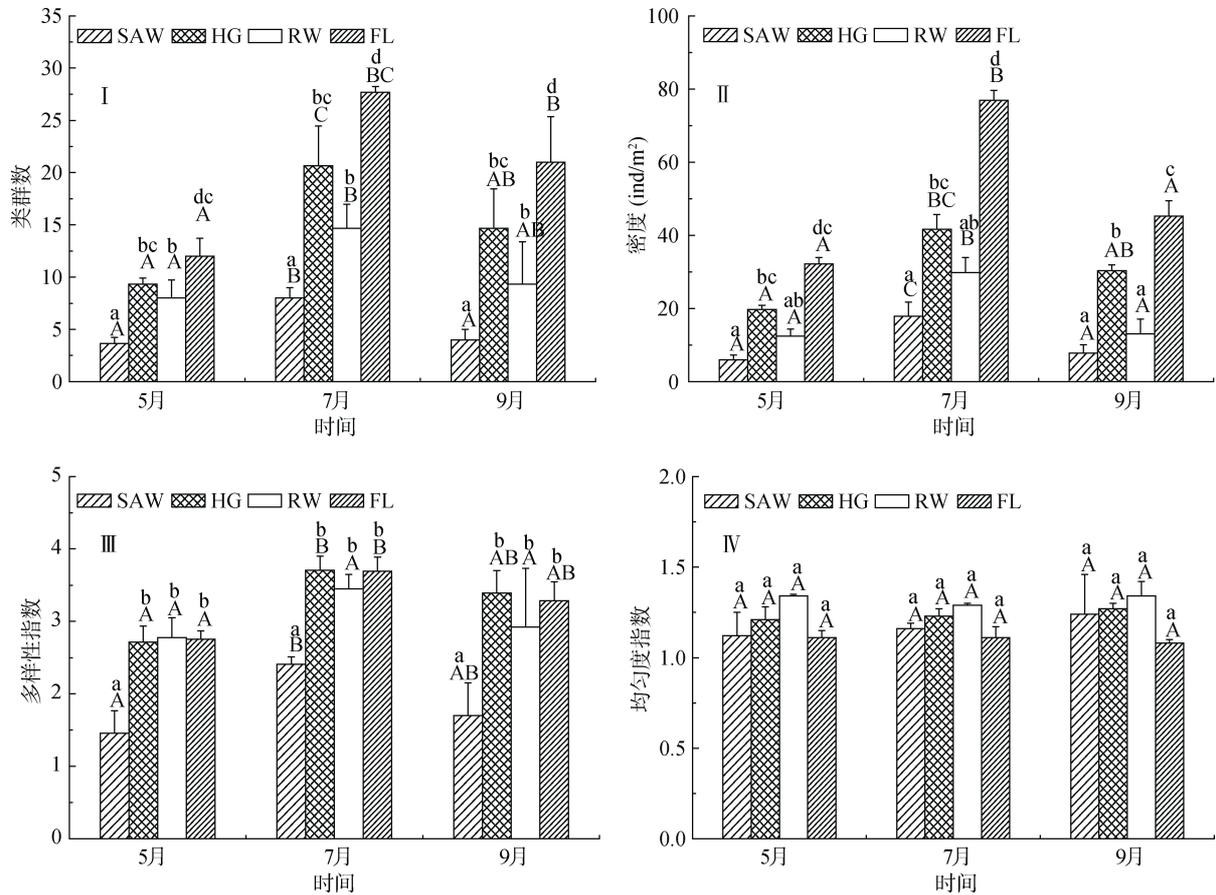
群落的密度在不同湿地类型及季节间同样呈现出明显的变化(图 2)。FL 湿地土壤动物群落密度大于其他湿地类型，SAW 和 RW 湿地的密度变化相对于 MW 和 FL 湿地的密度变化较小。与群落类群数变化趋势相同，群落密度在 5 月到 7 月间呈现增加趋势，7 月到 9 月间呈现下降趋势。方差分析表明，群落密度易受生境和季节变化的影响，FL 湿地群落密度显著高于其他样地类型($P < 0.05$)，SAW 湿地群落密度最低(除各季节 RW 湿地外)均显著低于其他湿地类型($P < 0.05$)。

表 2 黄河故道不同类型湿地大型土壤动物群落组成
Table 2 Compositions of soil macrofauna community in different wetlands of old Yellow River

| 种类 | SAW | | MW | | RW | | FL | | 汇总 | |
|------------------------------|-----------------------------|------------|-----------------------------|------------|-----------------------------|------------|-----------------------------|------------|-----------------------------|------------|
| | 密度 (ind/m ²) | 百分比 (%) |
| 白线蚓属 <i>Fridericia</i> | 16 | 0.22 | 44 | 0.61 | 44 | 0.61 | 56 | 0.78 | 160 | 2.23 |
| 正蚓属 <i>Lumbricus</i> | 4 | 0.06 | 12 | 0.17 | 8 | 0.11 | 24 | 0.34 | 48 | 0.67 |
| 爱胜蚓属 <i>Eisenia</i> | 8 | 0.11 | 36 | 0.50 | 16 | 0.22 | 36 | 0.50 | 96 | 1.34 |
| 蜘蛛目 Araneida | 76 | 1.06 | 244 | 3.41 | 120 | 1.68 | 304 | 4.25 | 744 | 10.39 |
| 山蛩属 <i>Spirobolus</i> | 4 | 0.06 | 16 | 0.22 | 12 | 0.17 | 20 | 0.28 | 52 | 0.73 |
| 刺圆马陆属 <i>Sphaerobelum</i> | 8 | 0.11 | 16 | 0.22 | 16 | 0.22 | 16 | 0.22 | 56 | 0.78 |
| 腹孔地蜈蚣属 <i>Stigmatogaster</i> | 0 | 0 | 8 | 0.11 | 4 | 0.06 | 28 | 0.39 | 40 | 0.56 |
| 地蜈蚣属 <i>Geophilus</i> | 112 | 1.56 | 204 | 2.85 | 176 | 2.46 | 292 | 4.08 | 784 | 10.94 |
| 石蜈蚣目 Lithomorpha | 64 | 0.89 | 280 | 3.91 | 168 | 2.35 | 412 | 5.75 | 924 | 12.90 |
| 鼠妇虫属 <i>Porcellio</i> | 0 | 0 | 4 | 0.06 | 0 | 0 | 8 | 0.11 | 12 | 0.17 |
| 湖水虱属 <i>Ligidium</i> | 0 | 0 | 12 | 0.17 | 12 | 0.17 | 0 | 0 | 24 | 0.34 |
| 卷甲虫属 <i>Armadillidium</i> | 0 | 0 | 16 | 0.22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16 | 0.22 |
| 大蚊科 Tipulidae | 0 | 0 | 4 | 0.06 | 0 | 0 | 20 | 0.28 | 24 | 0.34 |
| 毛蠓科 Psychodidae | 0 | 0 | 12 | 0.17 | 0 | 0 | 32 | 0.45 | 44 | 0.61 |
| 摇蚊科 Chironomidae | 0 | 0 | 12 | 0.17 | 0 | 0 | 20 | 0.28 | 32 | 0.45 |
| 虻科 Tabanidae | 0 | 0 | 12 | 0.17 | 12 | 0.17 | 12 | 0.17 | 36 | 0.50 |
| 长足虻科 Dolichopodidae | 0 | 0 | 12 | 0.17 | 0 | 0 | 24 | 0.34 | 36 | 0.50 |
| 水虻科 Stratiomyiidae | 0 | 0 | 8 | 0.11 | 16 | 0.22 | 12 | 0.17 | 36 | 0.50 |
| 圆土螬属 <i>Byrsinus</i> | 4 | 0.06 | 8 | 0.11 | 0 | 0 | 8 | 0.11 | 20 | 0.28 |
| 地长螬属 <i>Rhyparochromus</i> | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16 | 0.22 | 16 | 0.22 |
| 星尺蠖属 <i>Ophthalmodes</i> | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 52 | 0.73 | 52 | 0.73 |
| 地老虎属 <i>Agrotis</i> | 0 | 0 | 24 | 0.34 | 8 | 0.11 | 32 | 0.45 | 64 | 0.89 |
| 虎甲科 Cicindelidae | 0 | 0 | 52 | 0.73 | 8 | 0.11 | 148 | 2.07 | 208 | 2.90 |
| 步甲科 Carabidae | 24 | 0.34 | 84 | 1.17 | 32 | 0.45 | 80 | 1.12 | 220 | 3.07 |
| 金龟甲科 Scarabaeidae | 0 | 0 | 124 | 1.73 | 120 | 1.68 | 132 | 1.84 | 356 | 4.97 |
| 隐翅甲科 Staphylinidae | 0 | 0 | 116 | 1.62 | 76 | 1.06 | 112 | 1.56 | 240 | 3.35 |
| 蚁甲科幼虫 Pselaphidae larva | 0 | 0 | 16 | 0.22 | 0 | 0 | 32 | 0.45 | 48 | 0.67 |
| 叩甲科幼虫 Elateridae larva | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 32 | 0.45 | 32 | 0.45 |
| 金龟甲科幼虫 Scarabaeidae larva | 0 | 0 | 12 | 0.17 | 0 | 0 | 12 | 0.17 | 24 | 0.34 |
| 隐翅甲科幼虫 Staphylinidae larva | 0 | 0 | 24 | 0.33 | 6 | 0.22 | 24 | 0.34 | 64 | 0.89 |
| 大蠊属 <i>Periplaneta</i> | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 0.11 | 28 | 0.39 | 36 | 0.50 |
| 蚁属 <i>Formica</i> | 124 | 1.73 | 180 | 2.51 | 128 | 1.79 | 512 | 7.15 | 2472 | 34.51 |
| 草蚁属 <i>Lasius</i> | 236 | 3.30 | 368 | 5.14 | 188 | 2.63 | 736 | 10.28 | 72 | 1.01 |
| 康虫八属 <i>Campodea</i> | 0 | 0 | 16 | 0.22 | 16 | 0.22 | 40 | 0.56 | 76 | 1.06 |
| 偶铈虫八属 <i>Parajapyx</i> | 0 | 0 | 24 | 0.34 | 0 | 0 | 52 | 0.73 | 160 | 2.23 |
| 类群数 | 12 | | 31 | | 22 | | 33 | | 34 | |
| 个体总数 | 170 | | 492 | | 297 | | 832 | | 1 791 | |
| Shannon-Wiener 多样性 | 2.10 | | 3.64 | | 3.48 | | 3.58 | | | |

除 SAW 湿地外, 群落多样性指数在各湿地类型间波动较小(图 2)。夏季土壤动物群落多样性最高, 其次为秋季, 春季最低, 但差异不显著($P > 0.05$); 在各季节中, MW、RW 和 FL 湿地群落多样性变化较小, 差异不显著, 但 SAW 湿地显著低

于其他湿地类型。季节和生境差异对大型土壤动物群落均匀度均无显著影响($P > 0.05$), 各湿地类型中群落均匀度均在秋季最高(除 FL 湿地外), 在各季节中 RW 湿地群落均匀度高于其他湿地类型, 但差异不显著(图 2)。



(柱图上方不同大写字母表示同一类型湿地不同时间土壤动物群落多样性差异在 $P < 0.05$ 水平显著；不同小写字母表示相同时间不同类型湿地间的差异在 $P < 0.05$ 水平显著)

图 2 黄河故道不同类型湿地大型土壤动物群落多样性

Fig. 2 Diversities of soil macrofauna community in different wetlands of old Yellow River

2.3 豫东黄河故道不同类型湿地对大型土壤动物群落的影响

图 3 为主成分分析(PCA)对湿地大型土壤动物群落的排序结果。由图 3 可知，PC1 和 PC2 两个排序轴大体上将大型土壤动物分为 3 个组，林地为一组，湿草地和芦苇湿地为一组，盐碱滩地为一组，该结果表明生境类型(优劣)对大型土壤动物群落结构有显著的影响，同时林地和盐碱滩地中大型土壤动物群落结构的差异也反映了不同湿地类型生境条件的不同。

2.4 豫东黄河故道湿地土壤生态环境与大型土壤动物间的关系

由相关分析可知(表 3)，在 14 种主要动物类群中，白线蚓属、地蜈蚣属和康虫八属与土壤因子呈显著相关($P < 0.01$ 或 $P < 0.05$)，其次为隐翅甲幼虫和虎甲科，其他类群密度与土壤因子的相关较弱。大型土壤动物类群数与 SOM、TK、AP 和 MBN 显著相关($P < 0.05$)；群落密度与 SOM、AN、AP 和 MBC 的含量呈显著相关($P < 0.05$)；Shannon-Wiener 多样性指数

与 SOM、AP、AK、MBN 和 SBD 显著相关($P < 0.05$)。总体来看，土壤因子中的有机质含量、有效磷、速效钾和土壤微生物量碳氮的含量与大型土壤动物群落的关系较为密切，大型土壤动物中白线蚓属、地蜈蚣属和康虫八属最易受土壤环境因子变化的影响。

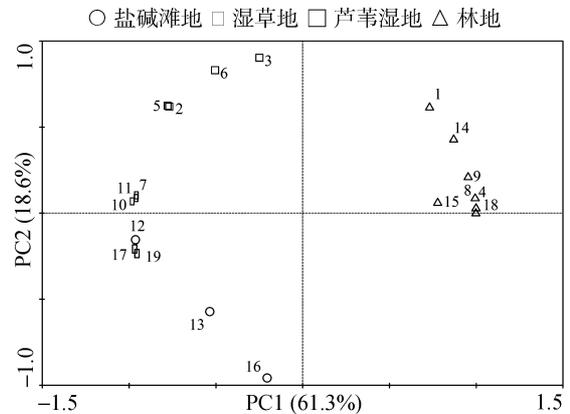


图 3 黄河故道不同类型湿地大型土壤动物群落 PCA 排序图

Fig. 3 Principal component analyses of soil macrofauna communities in different wetlands of old Yellow River

表 3 黄河故道湿地大型土壤动物群落与土壤生态环境因子间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between soil macrofauna community and soil ecological environmental factors in different wetlands of old Yellow River

| | SOM | TN | TP | TK | AN | AP | AK | MBC | MBN | SBD | pH |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|--------|
| 白线蚓属 <i>Fridericia</i> | 0.979* | 0.898* | 0.888 | 0.786 | 0.716 | 0.997** | 0.990** | 0.899* | 0.974* | -0.922* | 0.542 |
| 爱胜蚓属 <i>Eisenia</i> | 0.881 | 0.485 | 0.599 | 0.982* | 0.712 | 0.774 | 0.736 | 0.793 | 0.917* | -0.343 | 0.023 |
| 蜘蛛目 Araneida | 0.919* | 0.550 | 0.721 | 0.910* | 0.858 | 0.791 | 0.775 | 0.897* | 0.936* | -0.404 | 0.181 |
| 地蜈蚣属 <i>Geophilus</i> | 0.978* | 0.775 | 0.913* | 0.774 | 0.926* | 0.900* | 0.910* | 0.992** | 0.965* | -0.960* | 0.504 |
| 石蜈蚣目 Lithomorpha | 0.969* | 0.687 | 0.837 | 0.855 | 0.901* | 0.869 | 0.866 | 0.961* | 0.970* | -0.956* | -0.359 |
| 地老虎属 <i>Agrotis</i> | 0.937* | 0.587 | 0.740 | 0.918* | 0.848 | 0.822 | 0.805 | 0.904* | 0.954* | -0.446 | -0.206 |
| 虎甲科 Cicindelidae | 0.867 | 0.585 | 0.828 | 0.680 | 0.989* | 0.720 | 0.741 | 0.953* | 0.850 | -0.451 | -0.411 |
| 步甲科 Carabidae | 0.814 | 0.364 | 0.507 | 0.973* | 0.685 | 0.680 | 0.639 | 0.734 | 0.858 | -0.213 | -0.092 |
| 金龟甲科 Scarabaeidae | 0.874 | 0.851 | 0.728 | 0.766 | 0.457 | 0.954* | 0.926* | 0.713 | 0.885 | -0.904* | -0.426 |
| 隐翅甲科 Staphylinidae | 0.921* | 0.696 | 0.676 | 0.942* | 0.584 | 0.913* | 0.874 | 0.774 | 0.951* | -0.597 | -0.205 |
| 隐翅甲科幼虫 Staphylinidae larva | 0.936* | 0.716 | 0.704 | 0.936* | 0.611 | 0.926* | 0.890* | 0.797 | 0.962* | -0.916* | -0.236 |
| 蚁科 Formicidae | 0.799 | 0.536 | 0.808 | 0.576 | 0.996** | 0.639 | 0.671 | 0.923* | 0.772 | -0.907* | 0.437 |
| 康虫八属 <i>Campodea</i> | 0.960* | 0.838 | 0.965* | 0.670 | 0.931* | 0.903* | 0.925* | 0.998** | 0.933* | -0.740 | -0.634 |
| 铗虫八属 <i>Parajapyx</i> | 0.858 | 0.510 | 0.758 | 0.753 | 0.960* | 0.695 | 0.704 | 0.922* | 0.854 | -0.364 | -0.282 |
| 类群数 | 0.954* | 0.663 | 0.725 | 0.957* | 0.725 | 0.895* | 0.865 | 0.857 | 0.978* | -0.541 | -0.211 |
| 密度 | 0.934* | 0.655 | 0.851 | 0.775 | 0.959* | 0.812 | 0.822 | 0.974* | 0.925* | -0.523 | -0.402 |
| 多样性指数 | 0.984* | 0.796 | 0.693 | 0.834 | 0.470 | 0.942* | 0.907* | 0.715 | 0.904* | -0.934* | -0.334 |

注：双尾检验，* $P<0.05$ ，** $P<0.01$ 。

3 结论与讨论

1) 豫东黄河故道不同湿地类型导致其大型土壤动物群落的组成不同，且变化明显；盐碱滩地大型土壤动物的类群数、个体数和多样性指数均低于其他 3 种湿地类型。相关研究表明，生态系统的地上植被类型、组成和变化格局对地下生物及整个生态系统的功能和稳定性均有重要的影响^[4,12,31]。故道湿地不同类型植物种类对大型土壤动物群落组成及多样性影响不同(表 2)，植物群落多样性的提升可以通过影响初级生产力来间接影响土壤动物多样性^[5,10]，同时植物根系分泌物和凋落物为土壤动物提供了充足的食物，也为土壤提供了较多的有机质，改善了土壤环境，满足动物生长发育需要，促进土壤动物的生存和繁衍^[30]。本文盐碱滩地地表植被稀疏，有机物质积累少，加之其碱度较大，不利于有机质及养分的积累，因此，盐碱滩地土壤动物群落多样性较低。由此可知故道湿地植物群落的组成与地下土壤动物多样性存在密切的关系。

2) 豫东黄河故道不同类型湿地的大型土壤动物类群数、密度和多样性指数均有显著季节变化($P<0.05$ 或 $P<0.01$)，不同湿地类型大型土壤动物的季节动态不同。相关研究表明，温湿度的变化是影响土壤动物群落变化的主要因子，且温度和湿度的季节性变化有

可能导致土壤动物群落组成和个体数量的变化^[32-34]。在故道湿地不同类型中，林地和湿草地的大型土壤动物类群数分别与降雨量($r_{\text{林地}}=0.863$, $P<0.05$; $r_{\text{湿草地}}=0.912$; $P<0.01$)和气温($r_{\text{林地}}=0.832$, $P<0.05$; $r_{\text{湿草地}}=0.908$; $P<0.01$)有显著正相关关系，芦苇湿地大型土壤动物的类群数与温度和降雨量相关关系无显著差异($P>0.05$)。由于芦苇湿地的土壤含水量较高，土质较为疏松，对于温湿度的变化不敏感；而盐碱滩地虽然对温湿度变化敏感，尤其是降雨量的变化，但在盐碱滩地中，土壤有机质、养分含量、土壤微生物量等较低，且其距离故堤较近，碱度过大，土壤质量状况较差^[23,35]，导致土壤动物种类和个体数均非常稀少，季节变化弱(图 2)，因此与气温和降雨量无显著关系。此外，温度和降水与大型土壤动物群落密度和多样性的相关性较弱，未达到显著水平。表明故道湿地不同植被类型大型土壤动物群落动态对季节变化的响应不同。

3) 豫东黄河故道湿地大型土壤动物群落类群数、密度和多样性与土壤有机质、氮、磷和土壤微生物量有显著相关关系，这与其他研究结果较为一致^[16-18]。由表 1 可知，土壤体积质量、速效及全效养分和土壤微生物生物量的含量在不同湿地类型中变化较大，各土壤指标在林地中最高，其次为湿草地，盐碱滩地中最低。研究表明，土壤动物群落密度与土壤的养分状

况有关,在贫瘠的土壤中大型土壤动物的数量最低^[34],这与本研究的结果较为一致。4种湿地类型大型土壤动物的类群数依次为林地最高,其次为湿草地,盐碱滩地最低。各样地优势类群存在差异,草蚁属为不同湿地类型共有优势类群,除此之外,盐碱滩地优势类群还有蜘蛛目、地蜈蚣属和蚁属;湿草地还有蜘蛛目、地蜈蚣和石蜈蚣;芦苇湿地还有蜘蛛目、地蜈蚣、石蜈蚣和蚁属;林地有石蜈蚣目和蚁属。以上表明,黄河故道不同湿地类型对大型土壤动物群落的物种组成影响较大,优势类群和主要类群的差异也反映出不同湿地类型环境的异质性。

故道湿地生态系统中,大型土壤动物群落组成与结构对不同湿地类型的响应不同,而不同的环境因子对动物各类群的影响也存在着显著差异。已有研究表明,在其他生态系统中也发现土壤理化性质对土壤动物的影响较大^[18]。文中 14 种主要类群中,白线蚓属、地蜈蚣和康虫八属最易受土壤环境因子变化的影响(表 3),且有机质含量、有效磷、速效钾和土壤微生物生物量碳氮的含量与大型土壤动物群落的关系较为密切,表明湿地土壤养分含量对大型土壤动物类群密度有较大影响。

参考文献：

- [1] Niu Z G, Zhang H Y, Gong P. More protection for China's wetlands[J]. *Nature*, 2011, 471(7338): 305
- [2] 吕宪国, 刘晓辉. 中国湿地研究进展[J]. *地理科学*, 2008, 28(3): 301-308
- [3] Xie Z L, Xu L F, Liu J Y, et al. Analysis of boundary adjustments and land use policy change: A case study of Tianjin Palaeocoast and Wetland National Natural Reserve, China[J]. *Ocean and Coastal Management*, 2012, 56(3): 56-63
- [4] Bardgett R D, Putten W H V D. Belowground biodiversity and ecosystem functioning[J]. *Nature*, 2014, 515(7528): 505-511
- [5] Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N, et al. Ecological linkages between aboveground and belowground biota[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1 629-1 633
- [6] Chauvat M, Wolters V, Dauber J. Response of collembolan communities to land-use change and grassland succession[J]. *Ecography*, 2007, 30(2): 183-192
- [7] 殷秀琴, 安静超, 陶岩, 等. 拉萨河流域健康湿地与退化湿地大型土壤动物群落比较研究[J]. *资源科学*, 2010, 32(9): 1 643-1 649
- [8] Adl S M, Coleman D C, Read F. Slow recovery of soil biodiversity in sandy loam soils of Georgia after 25 years of no-tillage management [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 114(2): 323-334
- [9] 徐国良, 周国逸, 莫江明. 南亚热带退化植被重建中土壤动物群落变化[J]. *动物学研究*, 2006, 27(1): 23-28
- [10] Wenninger E J, Inouye R S. Insect community response to plant diversity and productivity in a sagebrush-steppe ecosystem[J]. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(1): 24-33
- [11] 刘长海, 王希群, 王文强, 等. 湿地土壤动物及其与湿地恢复的关系[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(4): 705-709
- [12] 吴鹏飞, 张洪芝, 崔丽巍, 等. 大型土壤动物群落对高寒草甸退化的响应[J]. *土壤学报*, 2013, 50(4): 786-799
- [13] 武海涛, 吕宪国, 杨青, 等. 三江平原湿地岛状林土壤动物群落结构特征及影响因素[J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(2): 50-57
- [14] 黄杰灵, 施时迪, 王美花, 等. 西溪国家湿地公园 5 种人工植物群落土壤动物群落的结构与多样性[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2012, 39(4): 434-442
- [15] 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): 1-13
- [16] 潘林, 焦德志, 王文峰, 等. 扎龙湿地苔藓群落土壤动物的分布及多样性[J]. *土壤*, 2010, 42(4): 536-540
- [17] 李伟, 崔丽娟, 王小文, 等. 太湖岸带湿地土壤动物群落结构与土壤理化性质的关系[J]. *林业科学*, 2013, 49(7): 106-113
- [18] 刘继亮, 李锋瑞, 牛瑞雪, 等. 黑河中游不同土地利用方式地面节肢动物对土壤盐渍化的响应[J]. *土壤学报*, 2011, 48(6): 1 242-1 252
- [19] Hentges V A, Stewart T W. Macroinvertebrate assemblages in Iowa Prairie Pothole wetlands and relation to environmental features[J]. *Wetlands*, 2010, 30(3): 501-511
- [20] 张明祥, 张阳武, 朱文星, 等. 河南省郑州黄河自然保护区湿地恢复模式研究[J]. *湿地科学*, 2010, 8(1): 67-73
- [21] 朱新玉, 胡云川, 芦杰. 豫东黄河故道湿地土壤生物学形状及土壤质量评价[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(2): 27-32
- [22] 朱新玉. 豫东黄河故道湿地尽管格局及其多样性变化[J]. *人民黄河*, 2012, 34(8): 82-84
- [23] 朱新玉. 黄河故道湿地土壤质量因子与景观类型的耦合关系[J]. *资源科学*, 2015, 37(1): 85-93
- [24] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998
- [25] 钟觉民. 幼虫分类学[M]. 北京: 农业出版社, 1990
- [26] 湖南省林业科学研究所编. 昆虫分类属种检索表(上、下册)[M]. 湖南省湘阴县印刷, 1981
- [27] 刘光崧. 土壤理化性质与剖面分析[M]. 北京: 标准出版社, 1996: 30-67
- [28] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 中国气象出版社, 2006: 54-78
- [29] 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): 1 866-1 872
- [30] Zhu X Y, Zhu B. Diversity and abundance of soil fauna as influenced by long-term fertilization in cropland of purple soil, China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 146: 39-46
- [31] Tyler G. Differences in abundance, species richness, and body size of ground beetles (Coleoptera: Carabidae)

- between beech (*Fagus sylvatica* L.) forests on Podzol and Cambisol[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(12): 2 154–2 159
- [32] Bokhorst S, Huiskes A, Convey P, et al. Climate change effects on soil arthropod communities from the Falkland Islands and the Maritime Antarctic[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(7): 1 547–1 556
- [33] 廖崇惠, 李健雄, 杨悦屏, 等. 海南尖峰岭热带林土壤动物群落——群落结构的季节变化及其气候因素[J]. *生态学报*, 2003, 23(1): 139–147
- [34] 张洪芝, 吴鹏飞, 崔丽巍. 高寒草甸大型土壤动物群落结构特征及其与环境的关系[J]. *土壤学报*, 2012, 49(6): 1 267–1 273
- [35] 檀满枝, 李开丽, 史学正, 等. 华北平原土壤剖面质地构型对小麦产量的影响研究[J]. *土壤*, 2014, 46(5): 913–919

Soil Macrofauna Community Compositions and Diversities in Different Wetlands of Old Riverway of the Yellow River in Eastern Henan

ZHU Xinyu¹, HU Yunchuan², HOU Ruihua³

(1 *College of Environment and Planning, Shangqiu Normal University, Shangqiu, Henan 476000, China*; 2 *College of Life Science, Shangqiu Normal University, Shangqiu, Henan 476000, China*; 3 *Shangqiu Urban and Rural Integration Demonstration Area Second Junior High School, Shangqiu, Henan 476000, China*)

Abstract: There are four typical vegetation forms, such as saline-alkali wasteland, marsh wetland, reed wetland and forest land in the old Yellow River wetland which is located in the eastern Henan Province. From May to September in 2014, three investigations were conducted on soil macrofauna communities in the four wetland patterns to analyze the impacts of the different vegetation forms on soil macrofauna. The results showed that significant differences were existed between the phases in taxonomic composition and dominant groups of soil macrofauna communities which reflect the environmental heterogeneity of different wetland patterns. Soil macrofauna communities in the different wetland patterns responded to changes in season significantly in groups, densities and diversities, and the responses varied from different wetland patterns ($P < 0.05$ or $P < 0.01$). Correlation analysis showed that groups, densities and diversities of soil macrofauna communities were significant correlative to soil physical, chemical and biological properties, especially the contents of soil organic matter, nitrogen, phosphorus and soil micro biomass carbon and nitrogen in the wetlands ($P < 0.05$ or $P < 0.01$).

Key words: Soil macrofauna; Community structure; Old Yellow River; Wetland; Vegetation types