DOI: 10.20103/j.stxb.202306261353

冯钧, 乔志宏, 鄢麒宝, 姚海凤, 王滨, 孙新.城市化和绿地类型对土壤跳虫群落及功能性状的影响.生态学报,2024,44(6):2582-2596.

Feng J, Qiao Z H, Yan Q B, Yao H F, Wang B, Sun X.Effects of urbanization and greenspace types on community structure and functional traits of soil Collembola.Acta Ecologica Sinica,2024,44(6):2582-2596.

城市化和绿地类型对土壤跳虫群落及功能性状的影响

冯 钧[1,2], 乔志宏[2,3,4], 鄢麒宝[2], 姚海凤[2,4], 王 滨[2], 孙 新[2,4,*]

1 河北大学生命科学学院, 保定 071000

2 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361021

3 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102

4 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:随着城市规模不断扩大和城市植被管理实践的日益推进,我国城市化进程正在飞速发展。城市化进程的加快及其导致的植被改变强烈影响土壤生物多样性。作为城市绿地生态系统中的优势类群和环境变化的指示生物,土壤跳虫的群落结构和功能性状变化反映了环境变化对土壤生态功能的影响。以跳虫为研究对象,按照城市化梯度,分别在公园绿地、道路两侧绿化带、居民区绿地和工业园绿地四种绿地类型中采集样品,并选择森林样地作为对照,探讨了城市化和绿地类型对跳虫群落及其功能性状的影响。结果表明:(1)不同绿地类型中跳虫群落组成和结构存在显著差异,其中森林中等节跳科的丰度最高,而其它绿地中为长角跳科;城市化和绿地类型显著影响了跳虫的物种多样性,其中城市公园中跳虫的 Shannon 指数比城郊公园显著降低,而城市居民区中的 Shannon 指数显著高于城郊居民区;在城市生境中,居民区和绿化带中跳虫的 Pielou 均匀度指数显著大于公园,而在城郊中,公园中的物种丰富度和 Shannon 指数均显著大于森林。(2)相比城市化,绿地类型对跳虫功能性状的影响更强烈,比如公园、绿化带和居民区等人为扰动较强的绿地筛选出了弹器发达、相对腿长较长和体色较深的表土生物种,而在森林中则以弹器退化、相对腿长较短和体色较浅的真土生物种为主。(3)此外,跳虫科阶元的丰度与土壤 pH 具有较强的相关性。本研究结果为城市土壤动物多样性的环境驱动机制及城市生物资源保护提供了一定的数据支撑和理论依据。

关键词:城市化; 绿地类型; 跳虫; 群落多样性; 功能性状; 人为干扰

Effects of urbanization and greenspace types on community structure and functional traits of soil Collembola

FENG Jun[1,2], QIAO Zhihong[2,3,4], YAN Qibao[2], YAO Haifeng[2,4], WANG Bin[2], SUN Xin[2,4,*]

1 *School of Life Sciences, Hebei University, Baoding* 071000, *China*

2 *Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen* 361021, *China*

3 *Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130102, *China*

4 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract: In recent years, the impact of human activities on ecosystems has become increasingly evident worldwide. One of the most notable factors is urbanization, which significantly disrupts natural systems. The rapid expansion of urban areas and vegetation management practices in cities has driven the urbanization process. This has accompanied by changes in vegetation, has had a profound influence on urban soil biodiversity. Nevertheless, collembolans are the dominant groups and serve as excellent indicators of environmental changes in urban greenspaces. The changes in community structure and functional traits of collembolans imply the effects of environmental changes on soil ecological functions. In this study, we

基金项目:国家自然科学基金项目(42021005); 国家科技基础资源调查计划项目(2018FY100303)

收稿日期:2023-06-26; **网络出版日期**:2023-12-22

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xsun@iue.ac.cn

collected soil samples from four types of human interventional greenspaces, named park greenspace, median green strips on both sides of the road, residential greenspace, and industrial greenspace, in urban-suburban areas, and eight forest plots were selected as the biological pool for local collembolans. The study aimed to investigate the effects of urbanization and greenspace type on community composition and functional traits of collembolans. The results of the study showed that: (1) there were significant differences in the community composition and structure of collembolans among different greenspace types. In the forest, the Isotomidae exhibited the highest abundance, whereas the dominant taxa in the other greenspace types were the Entomobryidae. The study demonstrated that both urbanization and greenspace types had a significant impact on the taxonomic diversity of collembolans. Specifically, the Shannon index of collembolans in urban parks was significantly lower compared to suburban parks. On the other hand, the Shannon index in urban residential areas was significantly higher than that in suburban residential areas. In urban habitats, the Pielou evenness index of collembolans in residential areas and median green strips was significantly higher than that in parks. Regarding suburban areas, the study found that both richness and the Shannon index of collembolans in parks were significantly higher than those in forests. (2) Additionally, the study revealed that the type of greenspaces had a stronger effect on the functional traits of collembolans compared to urbanization. For example, in the greenspaces with strong human disturbance, such as parks, median green strips, and residential areas, epedaphic collembolans with well-developed furca, longer relative legs and patterned pigmentation were dominant, while in the forest, euedaphic collembolans with absent furca, shorter relative legs, and white pigmentation were the most abundant. (3) The physicochemical properties of soil played an important role in the structure of the collembolan community. There was a strong correlation between the abundance of the family of collembolans and soil pH. The results provided certain data support and a theoretical basis for the environmental driving mechanism of urban soil fauna diversity and urban biodiversity conservation.

Key Words: urbanization; greenspace types; Collembola; community diversity; functional traits; human interference

随着城市化进程的加快,城市环境正在发生明显变化,如土壤磷富集[1]、土壤酸化[2]和生境破碎化等[3],这严重影响了城市中的生物多样性[4]。城市绿地提供了大量的生态系统服务功能,在城市固碳、缓解气候变化和保护生物多样性等方面发挥着至关重要的作用[5]。在城市绿地建设过程中,往往会因城市功能区块的绿化需求而设置不同的植被组合和管理模式[6—8],这些绿地中的土壤微气候、土壤理化性质及生物群落都发生了显著改变[9—10]。

土壤动物是物质循环、维持地上植被生长、污染物降解以及病原体控制等城市土壤生态功能的重要贡献者[11—12]。作为城市土壤动物的优势类群,跳虫具有种群数量大、分布广泛、种类丰富等特征,是城市土壤环境质量的理想指示物种[13]。跳虫主要通过消化作用进行有机质分解,从而促进凋落物中的有机质转化为无机物参与生物地球化学循环;此外跳虫还可通过取食作用调控土壤微生物群落结构[14—17]。跳虫的群落组成受诸多因素的影响,包含土壤 pH、养分和生物因素[18—19]。例如,研究发现 *Isotomodes armatus*, *Mesaphorura macrochaeta* 和 *Entomobrya nicoleti* 更适合在高 pH 的环境下生存,而 *Stenaphorura quadrispina* 的群落受土壤磷含量的强烈影响[20]。另外,驱动跳虫群落组成的因素易受到城市化程度和绿地类型的影响[20—22]。例如,基于草坪绿地的研究发现,城市化对跳虫群落结构的影响[23]是通过城市草坪土壤中磷和钾的浓度梯度来驱动的[20];公园中不同的绿地类型对跳虫群落组成的影响同样与土壤非生物条件和细菌群落等生物因素的变化相关[24]。

目前关于跳虫对城市环境变化响应的研究不仅包含物种组成和群落多样性,还囊括了其功能性状的响应机制[25—29],如此不仅强调了环境对群落结构的塑造[30],还关联到其下游的生态功能变化[31]。环境变化对跳虫功能性状的影响主要表现在生活型、形态特征和生存策略等方面[26]。例如,在干旱环境下耐旱能力强、体型大、表土生的物种会生存得更好,然而亲水型,体型较小的和真土生的物种则会被排除[27]。在此情况下,基

于分类学的群落指数、物种多样性没有受到显著影响,但是基于功能性状的群落结构已经发生了变化[27]。功能性状多样性强调了物种间功能特征值的差异性[28],能够反应物种对环境变化的响应以及对生态系统的贡献[29]。研究发现,体型较大、弹器和触角较长的跳虫更适合在有机质含量高的土壤中生存[32],另外表土生跳虫耐旱性更强,同时在经历干旱之后它们也具有更强的活动能力以便寻求更适合生存的微环境[33]。Qiao 等人通过研究城市化与公园相关的绿地对跳虫群落的影响发现,城市化和绿地类型对跳虫的物种和功能组成均有负面影响[24]。综上,在群落结构及物种多样性的基础上再结合功能性状研究城市化程度和绿地类型对跳虫的影响会更加科学全面。

城市化促成了绿地景观类型的多样性[34],形成如公园、绿化带等不同绿地类型。然而,不同城市化程度下绿地特征对土壤跳虫群落的影响机制有待得到深入探索。基于此,本文探究了城市化程度和绿地类型对跳虫的群落组成和功能性状变化的影响,以及土壤理化性质与跳虫群落及其多样性的相关性,以期为保护土壤生态系统的生物多样性、合理规划城市景观、实现城市的可持续发展提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域与采样设计

本研究选取浙江省宁波市为研究区域,宁波市(28°51′—30°33′ N,20°55′—122°16′ E)是我国东南沿海地区的重要港口城市,隶属于“长三角”南翼经济中心。该地区属于亚热带季风气候,年平均温度约为 16.4℃,年平均降水量为 1480 mm,汛期为每年的 5—9 月,气候温和,四季分明[35]。近十年来宁波市人口数量增加明显,十年间宁波常住人口增量为 179.86 万人[36],且各项城市化指数均呈增加趋势[37],城市化率达 72.9%[38—39]。

本研究根据红外遥感方法获得的人口数量将所选取的研究区域划分为城市和城郊,其中人口数量相对较高的区域为城市,其周边为城郊(图 1)。为了研究城市化梯度与绿地类型对土壤跳虫群落结构及其功能性状的影响,我们按照城市-城郊梯度分别选取公园绿地、道路两侧绿化带、居民区绿地和工业园绿地,并以森林作为对照,总共选取了 5 种主要绿地类型进行样品采集(图 1)。其中,“公园绿地”样地选取用于居民休闲游憩的公园,该绿地植被多为人工种植且有常规频繁的人为管理,如施肥、灌溉、驱虫、修剪、去除杂草和凋落物等;“道路两侧绿化带”样地选取车流量较大的主干道两侧条带状绿地,其植被为矮灌且有保留完好的凋落物层;“居民区绿地”植被多属于观赏性植被,具有多彩的颜色或怡人的气味,因此会频繁施肥、驱虫和修剪;“工业园绿地”则更多选用具有较强的环境耐性的植被,能够在较强污染的土壤中顽强生长,绿化管理相对较弱。“森林”属于植被覆盖度高且受人为干扰较少的次生林。在符合要求区域内,从以上 4 种绿地类型中各随机

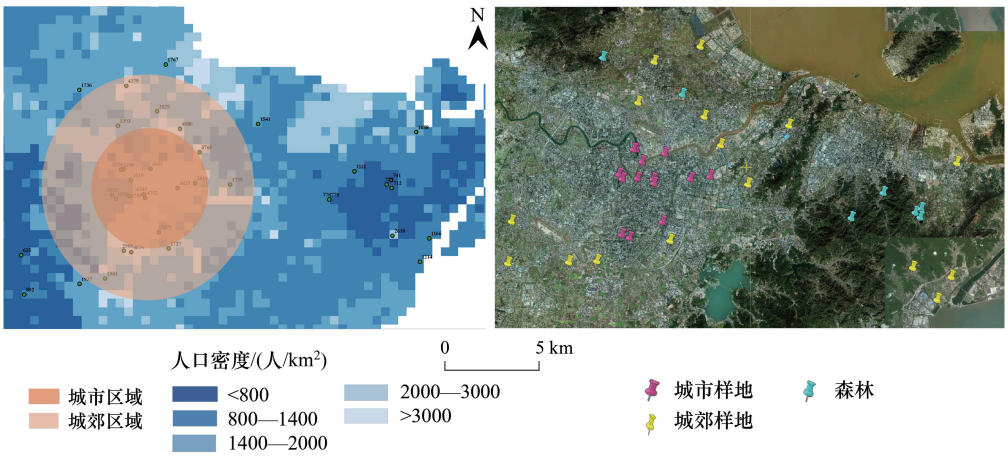

图 1 宁波市人口数量分布及采样地示意图

Fig.1 Schematic overview of population distribution and sampling sites in Ningbo city

选取 4 个重复样地,从森林中选取了 8 个重复样地,样地之间的距离要大于 1km 或样地之间存在明显的物理隔离,如河流、高速公路等。随后,在每个重复样地中,使用 5.5 cm 土钻随机采集 4 份表层土芯(0—10 cm),合计选取 160 个实验样方(2 城市化梯度×4 绿地类型×4 样地×4 样方+ 8 森林×4 样方)。

1.2　土壤跳虫样品采集与鉴定

2021 年 5 月,在每个重复样地进行土壤跳虫样品采集。采集后的土芯立即运回实验室,使用 Berlese 漏斗法分离土壤跳虫标本,分离时间 7 d[40]。分离获得的跳虫标本置于无水乙醇中,并于-20℃冰箱中保存。所有跳虫的鉴定与计数使用生物显微镜(Nikon ECLIPSE E200)和体视镜(Nikon SMZ745T)。跳虫鉴定至物种阶元,主要鉴定依据有《中国土壤动物检索图鉴》[41]、《Synopses on Palaearctic Collembola: ISOTOMIDAE》[42]、《Synopses on Palaearctic Collembola: HYPOGASTRURIDAE》[43]、《中国亚热带土壤动物》[44]与 Checklist of the Collembola(https://www.collembola.org/)[45]。

1.3　跳虫功能性状获取

研究选取 7 个功能性状:生活型、相对腿长、弹器长短、小眼数目、体色、体长和鳞片有无。所有功能性状均在体视镜(Nikon SMZ745T)下使用 S-gauge 软件获取。功能性状赋值及其生态功能见表 1。

表 1　跳虫的性状,赋值及其生态功能

Table 1　Collembolan traits, scores and their ecological functions

功能性状 Functional traits	描述 Description	赋值 Score	生态功能 Function	参考文献 References
生活型 Habitat	表土生	3	与有效应对环境变化及生殖方式相关	[46]
	半土生	2		
	真土生	1		
相对腿长	长	2	与躲避天敌及捕食者相关	[46—47]
Relative leg length	短	1		
弹器 Furca	完整	3	与跳虫的活动能力及逃离天敌的捕食相关,	[46—47]
	退化	2	并与跳虫在受干扰环境中的迁移能力相关	
	不存在	1		
小眼 Ocelli	7+7—8+8 个	5	与感知外界环境相关,如发现天敌等	[48—49]
	5+5—6+6 个	4		
	3+3—4+4 个	3		
	1+1—2+2 个	2		
	0+0	1		
体色 Pigmentation	有体色,有斑纹	3	与保护色作用及热力学缓冲相关	[46, 48]
	有体色,无斑纹	2		
	无色	1		
体长 Body size	从头部到腹部末端的最大长度	以实际测量值为准	与生理代谢、活动能力及逃离捕食者的能力相关	[46]
鳞片 Scales	存在	2	与防止紫外线、控制体温、保护跳虫躯体及躲避天敌相关	[46, 49—50]
	不存在	1		

1.4　土壤理化性质测定

土壤含水率通过烘干法进行测定,使用烘箱在 105℃下将土壤烘 8 h 至恒重,然后分别计算烘干后土壤重量和土壤水分的重量。

土壤含水率 = $W/M\times100\%$,M 为烘干后的土壤重量,W 为土壤水分的重量。

经过研磨并通过 100 目筛子获得的土壤样品用于理化数据的获取。土壤 pH 运用电位测定法,使用 pH 计(PHS-3C;上海电气科学仪器有限公司,中国)进行测定。土壤全磷(TP)先运用硫酸-高氯酸法对其进行消化处理,再运用钼锑比色法进行测定。土壤全碳(TC)和全氮(TN)运用 CNS 元素分析仪(Elemental Analyzer

System Vario Macro Cube, Langenselbold, Germany)测定。土壤碳氮比(C/N)即全碳(TC)与全氮(TN)的比值。

1.5 数据处理与统计学分析

分别统计 40 个样地下跳虫的物种数量及各物种的个体数量。依据个体数目与总体数目的比值,比值大于 10%的物种为优势类群;比值在 1%—10%之间的物种为常见类群;比值小于 1%的物种为稀有类群[51]。

计算跳虫的物种多样性指数和均匀度指数[52]。

Shannon-Wiener 多样性指数(H'):

$$H' = -\sum n_i/N \times \ln(n_i/N)$$

式中,n_i为第 i 个类群的个体数,N 为所有类群的个体数。

Pielou 均匀度指数 (J):

$$J = H'/\ln S,$$

式中,H' 为 Shannon-Wiener 多样性指数,S 为类群数。

将跳虫的功能性状分为生活史(生活型)和形态(相对腿长、弹器长短、小眼数目、体色、体长和鳞片)等特征,并计算每个样品的群落加权平均值(Community weighted mean,CWM),它是以物种丰度为权重计算群落特征值的一种方法,用于评价群落的生态过程,具体计算公式如下:

$$\mathrm{CWM} = \sum_{i=1}^{n} p_i x_i$$

式中,P_i为第 i 个物种的相对丰度,x_i为第 i 个物种的功能性状值[53]。

非度量多维尺度分析(non-metric multidimensional scaling,NMDS)是基于群落 Bray-Curtis 不相似矩阵去评估不同绿地类型中土壤跳虫的群落结构差异,此分析使用“vegdist”和“metaMDS”函数完成。此外使用 999 排列的排列多变量方差分析(PERMANOVA)去检验差异的统计学意义,以上检验使用“adonis”函数完成。我们使用主成成分分析(principal components analysis, PCA)研究了城市-城郊不同绿地类型中土壤跳虫功能性状的差异,以上分析利用中的“prcomp”函数完成。通过采用冗余分析(redundancy analysis,RDA),研究了土壤跳虫的群落组成与土壤理化性质的相关性,并使用“rda”函数计算方差膨胀因子(Variance inflation factors, VIFs)去评估模型中解释变量的多重共线性,去除共线性较强的变量后(VIF >10)剩余的解释变量分别为水分、pH 和 TP。

以上分析均在 R 4.0.4 软件中进行计算。物种多样性指数、均匀度指数、非度量多维尺度分析和冗余分析运用“vegan”计算,群落加权平均值运用“FD”包计算,主成成分分析运用“factoextra”包进行分析。此外,本研究中土壤理化性质的差异、跳虫物种多样性指数的差异及 CWM 性状特征值的差异均使用“multcomp”包中的 Tukey 检验比较其显著性。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

不同绿地类型之间土壤理化性质存在较大差异(表 2),城郊区域中不同绿地类型之间土壤含水率、pH、TC、TP、C/N 均存在显著差异($P<0.05$),尤其土壤 pH 的显著差异更为突出;城市区域中不同绿地类型之间只有土壤 pH 和 TP 含量存在显著差异($P<0.05$)。城市和城郊区域下,绿化带、工业园、公园和居民区 4 种绿地中土壤 pH 和土壤 TP 均显著高于森林绿地。土壤含水率和 TC 含量城郊不同绿地类型之间均存在显著差异($P<0.05$),而在城市区域中差异不显著。其中,土壤含水率森林显著高于城郊工业园($P<0.05$),土壤 TC 含量城郊绿化带和森林显著高于城郊居民区($P<0.05$)。绿地类型对土壤理化性质影响的 F 值和 P 值见表 3。

土壤理化性质在城市-城郊之间的差异小于不同绿地类型之间的差异(表 2)。其中,公园的土壤 pH、工业园的土壤 TN 含量以及居民区的土壤碳氮比,在城市和城郊之间均存在显著差异($P<0.05$)(表 3)。

表 2　宁波城市-城郊四种绿地类型和森林土壤理化性质(平均值±标准误,$n=4$)

Table 2　Physicochemical properties (means±SE, $n=4$) **of soils from four greenspace types in urban and suburban regions and forest of Ningbo city**

指标 Indicators	城市化 Urbanization	森林绿地 Forest greenspace	道路两侧绿化带 Green strips on both sides of the road	工业园绿地 Industrial area greenspace	公园绿地 Park greenspace	居民区绿地 Residential greenspace
Moisture(% dry weight)	城郊	29.17±2.98aA	21.45±1.39ab	17.70±1.44b	24.51±1.51a	21.58±0.69ab
	城市		21.05±1.53A	23.80±0.01A	25.32±1.72A	23.42±1.42A
pH	城郊	5.42±0.25cB	7.61±0.04a	7.38±0.29ab	6.73±0.16b	7.44±0.11ab
	城市		7.62±0.03A	7.43±0.05A	7.22±0.07A	7.63±0.05A
TC/(g/kg)	城郊	25.83±3.03aA	20.64±1.30a	17.31±2.98ab	15.33±3.33ab	9.49±1.01b
	城市		21.45±2.94A	30.36±3.09A	14.80±0.24A	16.78±2.62A
TN/(g/kg)	城郊	1.87±0.20aA	1.59±0.08a	1.26±0.17a	1.44±0.26a	1.06±0.09a
	城市		1.64±0.13A	2.17±0.04A	1.44±0.06A	1.44±0.17A
TP/(g/kg)	城郊	1.38±0.05bC	1.65±0.05a	1.75±0.16a	1.64±0.06a	1.56±0.04ab
	城市		1.52±0.04BC	2.16±0.01A	1.83±0.08AC	1.86±0.11AB
C:N	城郊	13.69±0.87aA	12.95±0.30a	13.60±2.02a	10.27±0.66ab	8.88±0.24b
	城市		12.83±0.85A	13.95±1.20A	10.33±0.35A	11.38±0.79A

Moisture:土壤含水率 Soil moisture;TC:全碳 Total carbon;TN:全氮 Total nitrogen;TP:全磷 Total phosphorus;C:N:土壤碳氮比; 同行不同的字母(小写字母表示城郊绿地,大写字母表示城市绿地)表示差异显著($P<0.05$)

表 3　城市化和绿地类型对土壤理化性质影响的 *F* 值和 *P* 值

Table 3　*F*- and *p*-values of the effects of urbanization and greenspace types on soil physicochemical properties

土壤理化性质 Soil properties	城市化 Urbanization $DF=1$			绿地类型 Greenspace type $DF=4$		
	绿地类型 Greenspace	*F*	*P*	城市化 Urbanization	*F*	*P*
Moisture	道路两侧绿化带	0.028	0.872	城市	1.716	0.193
	工业园绿地	5.365	0.082			
	公园绿地	0.093	0.771	城郊	4.565	0.009**
	居民区绿地	1.015	0.353			
pH	道路两侧绿化带	0.009	0.929	城市	24.020	< 0.001***
	工业园绿地	0.021	0.891			
	公园绿地	6.107	0.048*	城郊	18.400	< 0.001***
	居民区绿地	2.022	0.205			
TC	道路两侧绿化带	0.048	0.834	城市	2.245	0.107
	工业园绿地	5.035	0.088			
	公园绿地	0.072	0.798	城郊	4.380	0.011*
	居民区绿地	5.070	0.065			
TN	道路两侧绿化带	0.081	0.785	城市	1.723	0.191
	工业园绿地	38.400	0.003**			
	公园绿地	0.082	0.785	城郊	2.799	0.056
	居民区绿地	3.159	0.126			
TP	道路两侧绿化带	3.327	0.118	城市	13.540	< 0.001***
	工业园绿地	2.197	0.212			
	公园绿地	2.976	0.135	城郊	3.303	0.033*
	居民区绿地	5.595	0.056			
C:N	道路两侧绿化带	0.013	0.912	城市	2.372	0.093
	工业园绿地	0.009	0.929			
	公园绿地	0.005	0.947	城郊	4.774	0.008**

* 表示差异显著, *** $P<0.001$, ** $P<0.01$, * $P<0.05$

2.2 城市-城郊不同绿地类型中跳虫的群落组成及物种多样性

本研究共采集跳虫标本 1870 只,隶属于 10 科 30 属 54 种。城市和城郊绿地中,长角跳科物种丰度均最高。其中,森林共采集跳虫标本 184 头,隶属于 9 科 37 种,其中优势类群包括等节跳科(39.13%)、长角跳科(21.20%)和棘跳科(21.20%)。公园共采集标本 432 头,隶属于 8 科 28 种,其中优势类群包括长角跳科(43.29%)、等节跳科(21.53%)和卡天圆跳科(18.98%)。绿化带共采集标本 287 头,隶属于 7 科 34 种,其中优势类群包括长角跳科(48.78%)、棘跳科(19.16%)、等节跳科(12.89%)和卡天圆跳科(10.45%)。居民区共采集标本 340 头,隶属于 8 科 27 种,其中优势类群包括长角跳科(59.71%)、等节跳科(14.12%)、棘跳科(10.88%)和卡天圆跳科(10.29%)。工业园共采集标本 255 头,隶属于 7 科 27 种,其中优势类群包括长角跳科(29.80%)、棘跳科(25.49%)、等节跳科(15.69%)、球角跳科(14.51%)和卡天圆跳科(13.33%)。城市和城郊环境下不同绿地类型中各个科跳虫的丰度见图 2。

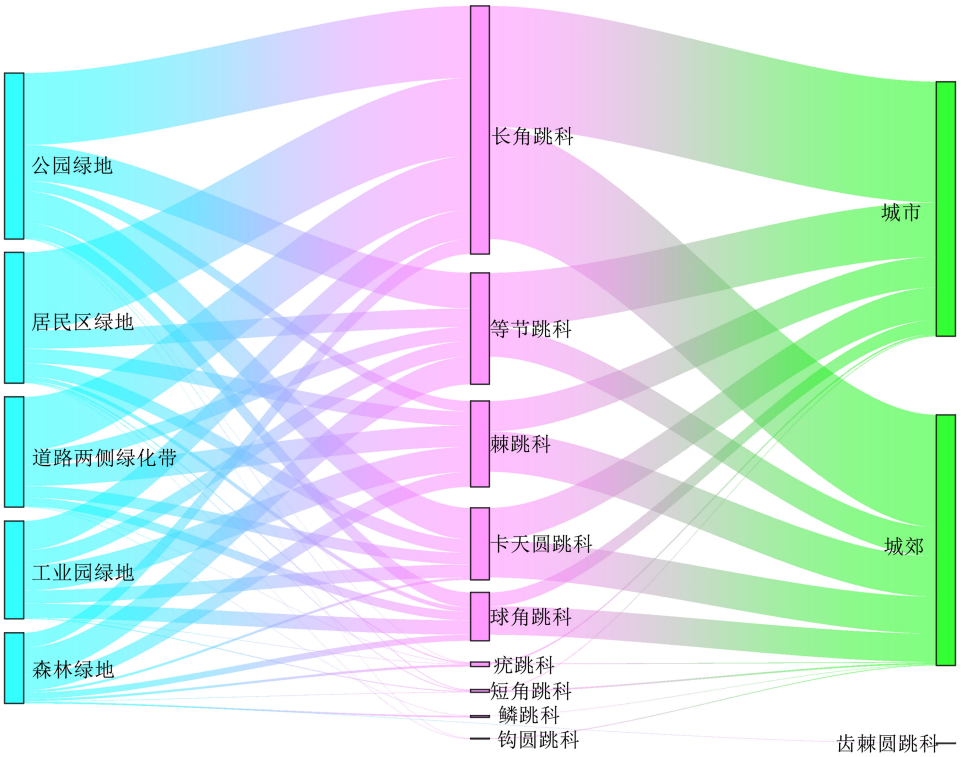

图 2 宁波城市-城郊不同绿地类型中各个科跳虫的丰度

Fig.2 Abundance of collembolan families in different greenspace types in Ningbo city

城市绿地不同类型中的优势物种有一定差异(表 4)。其中,森林中优势物种为 *Leeonychiurus gulinensis*, *Folsomia* spp2 和 *Isotomiella leksawasdii*;公园中优势物种为 *Sminthurinus* spp5, *Homidia socia* 和 *Isotomurus quadrisetosus*;绿化带中优势物种为 *Homidia sinensis*, *Thalassaphorura encarpata* 和 *Homidia socia*;居民区中优势物种为 *Homidia sinensis*, *Homidia socia*, *Thalassaphorura encarpata* 和 *Sinella zhangi*;工业园中优势物种为 *Thalassaphorura encarpata*, *Ceratophysella yinae* 和 *Sminthurinus* spp5。

城市化和绿地类型均显著影响了跳虫的物种多样性(图 3)。城市化程度的提高,显著降低了公园中跳虫的 Shannon 多样性指数和均匀度指数($P<0.05$),却显著增加了居民区中跳虫的 Shannon 多样性指数和物种丰富度指数($P<0.05$)。绿地类型显著影响了跳虫的多样性指数和均匀度指数。在城市区域下,跳虫的均匀度指数在绿化带和居民区中显著高于公园($P<0.05$),且跳虫的 Shannon 多样性指数在居民区中显著高于公园($P<0.05$)。在城郊区域下,跳虫的物种丰富度指数在公园中显著高于森林($P<0.05$),且跳虫的 Shannon 多样性指数在公园显著高于森林和居民区($P<0.05$)。

表 4　城市-城郊不同绿地类型中各个科跳虫丰度的显著性

Table 4　Significance of the abundance of collembolan of different families in urban and suburban greenspace types

科 Family	城市化 Urbanization DF=1								绿地类型 Greenspace type DF=4	
	公园绿地		居民区绿地		道路两侧绿化带		工业园绿地			
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
长角跳科 Entomobryidae	0.233	0.646	0.022	0.886	0.462	0.522	1.641	0.269	4.100	0.008 **
等节跳科 Isotomidae	1.787	0.230	0.291	0.609	0.291	0.609	0.002	0.970	1.659	0.183
棘跳科 Onychiuridae	1.710	0.239	1.526	0.263	2.192	0.189	1.055	0.362	0.584	0.676
卡天圆跳科 Katiannidae	0.043	0.842	0.044	0.841	1.956	0.211	0.062	0.816	2.790	0.042 *
球角跳科 Hypogastruridae	0.019	0.894	0.048	0.834	0.910	0.377	2.044	0.226	0.645	0.634
疣跳科 Neanuridae	1.000	0.356	1.000	0.356	1.000	0.356	0.444	0.541	0.848	0.505
短角跳科 Neelidae	3.000	0.134	3.000	0.134	NA	NA	0.444	0.541	0.556	0.696
鳞跳科 Tomoceridae	NA	NA	NA	NA	1.000	0.356	NA	NA	2.571	0.056
钩圆跳科 Bourletiellidae	1.000	0.356	1.000	0.356	NA	NA	NA	NA	0.682	0.609
齿棘圆跳科 Arrhopalitidae	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0.930	0.458

* 表示差异显著, ** $P< 0.01$, * $P<0.05$

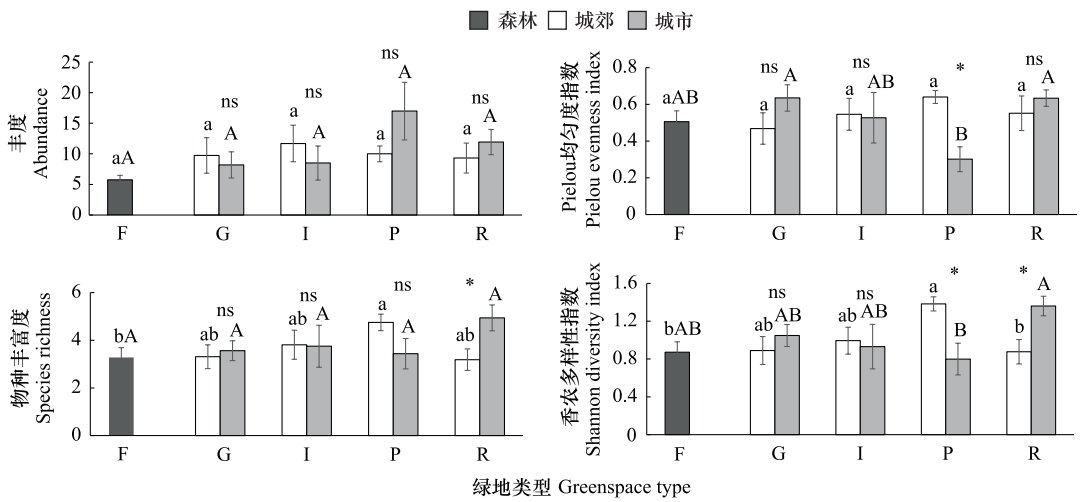

图 3　宁波城市-城郊四种绿地类型和森林中跳虫的丰度、均匀度、丰富度和 Shannon 指数(平均值±标准误)

Fig.3　Abundance, Pielou, richness and Shannon indexes of collembolan in four greenspace types in urban and suburban regions and forest of the Ningbo city(means±SE)

F:森林; G:道路两侧绿化带; I:工业园绿地; P:公园绿地; R:居民区绿地;柱状图上方不同的字母(小写字母表示城郊绿地,大写字母表示城市绿地)表示基于 Tukey 检验的绿地之间存在显著差异($P<0.05$), * 表示某种绿地中城市-城郊之间存在显著差异($P<0.05$), *ns* 表示城市-城郊之间无显著差异($P>0.05$)

跳虫的群落结构在不同绿地类型之间存在显著差异,主要表现为质心和离散度的差异。同时,相较于城市绿地,城郊区域下不同绿地类型之间跳虫群落结构的差异更大($P = 0.001$)。科阶元下丰度排名前五的跳

虫,其群落组成在城市绿地和城郊绿地中并无明显区别,但在群落结构方面存在一定的差异(图 4)。

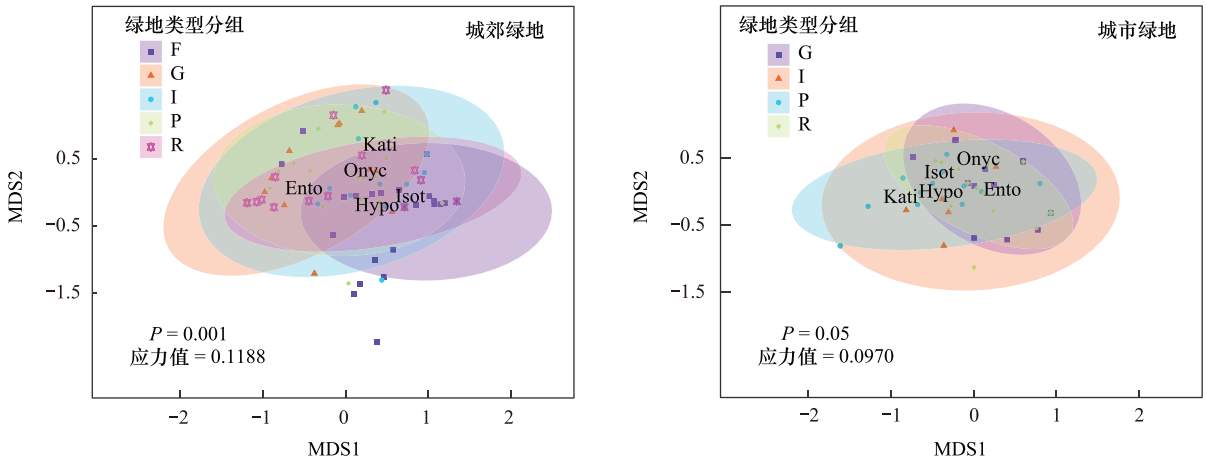

图 4 宁波城郊和城市不同绿地类型下跳虫科阶元群落结构的非度量多维尺度标序图

Fig.4 Non-metric multidimensional scaling (NMDS) of different families of collembolan communities structure in different greenspace types in suburban and urban areas of Ningbo city

Hypo:球角跳科;Ento:长角跳科;Isot:等节跳科;Onyc:棘跳科;Kati:卡天圆跳科

2.3 城市-城郊不同绿地类型中跳虫的功能性状多样性

结果表明,绿地类型对跳虫功能性状的影响比城市化更为强烈(图 5)。其中,CWM 结果显示,在城市区域下,跳虫的相对腿长及弹器发达程度在公园和居民区环境中均显著大于森林环境;跳虫的体长在绿化带环境中显著大于公园环境。在城郊区域下,绿化带、公园和居民区环境相比于森林环境,表土生跳虫的个体数量、相对腿长和小眼数目均更高,且跳虫的体色相对更深。然而,城市化仅对居民区中跳虫小眼的数目有显著影响,它显著降低了居民区中跳虫小眼的数目。

PCA 结果显示,在城郊区域下,绿化带、工业园、公园和居民区 4 种绿地相对于森林绿地,均会筛选出相对腿长更长、弹器更发达、体色更深和小眼数目多的物种;在城市环境下同样存在以上情况。以上功能性状在 PC1 轴上的解释率均远大于 PC2 轴(图 6)。

2.4 土壤理化性质与跳虫群落组成的关系

跳虫科阶元的丰度对土壤理化性质的响应也存在差异(图 7)。其中,长角跳科、卡天圆跳科和等节跳科跳虫的丰度与土壤理化性质的相关性最强。在各影响因子中,pH 与跳虫科阶元的丰度相关性最强,其中长角跳科的丰度受 pH 影响最大,且二者为正相关关系。而 TP 含量与卡天圆跳科跳虫的丰度相关性最强,卡天圆跳科跳虫在 TP 含量更高的生境下个体数量更多。此外,等节跳科跳虫丰度受土壤水分含量影响最为明显,土壤环境越湿润,其丰度也越高。

3 讨论

3.1 土壤理化性质的变化及其对跳虫群落组成的影响

绿地类型和城市化均显著影响了土壤的理化性质,且绿地类型的影响更为强烈。土壤 pH 和 TP 含量在城市和城郊的不同绿地类型中均存在显著差异,其中,绿化带、工业园、公园和居民区中土壤呈中性偏碱,而森林土壤呈酸性,此结果与 Mao 等人的研究结果相一致[54]。同时,绿化带、工业园、公园和居民区中土壤 TP 含量也均高于森林。出现以上结果的原因,可能是相比于森林绿地,在绿化带、工业园、公园和居民区绿地中存在相对较多的人为干扰。例如,将石灰水用于病虫害防治可能导致其土壤 pH 升高[55];废弃物填埋和施肥措施等可能导致土壤 TP 含量的升高[56]。

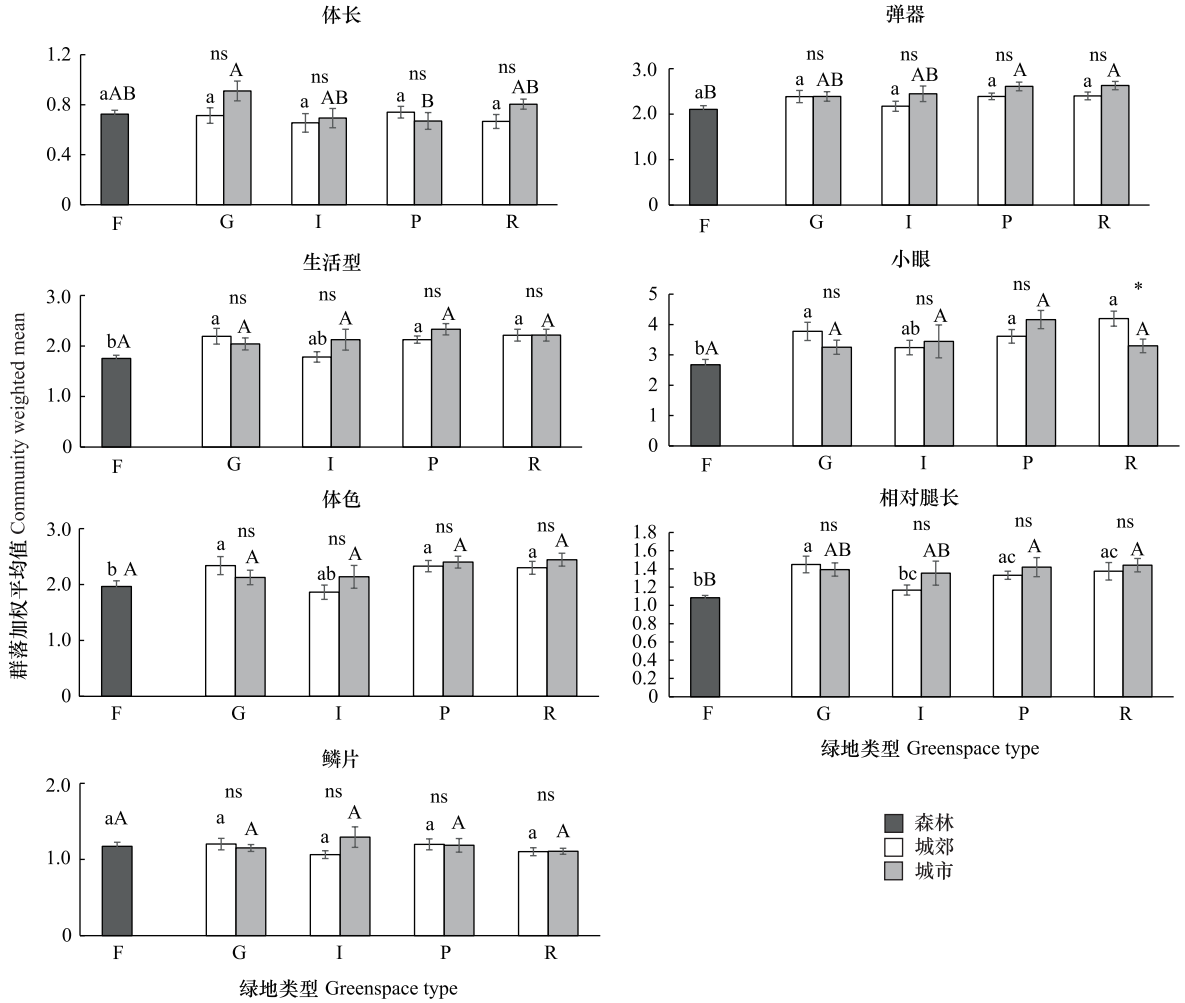

图 5　宁波城市-城郊四种绿地类型和森林中跳虫功能性状的群落加权平均值(平均值±标准误)

Fig.5　Community-weighted mean (CWM) **of the functional traits of collembolan communities in four greenspace types in urban and suburban areas and forest of Ningbo city**(means±SE)

柱状图上方不同的字母(小写字母表示城郊绿地,大写字母表示城市绿地)表示基于 Tukey 检验的绿地之间存在显著差异($P<0.05$),* 表示某种绿地中城市-城郊之间存在显著差异($P<0.05$),*ns* 表示城市-城郊之间无显著差异($P>0.05$)

不同绿地类型之间土壤 pH 的差异会对跳虫群落结构产生一定的影响,因为不同跳虫物种有着不同的 pH 偏好[57]。第一,森林绿地中等节跳科跳虫丰度占比最大,然而其它绿地中均为长角跳科跳虫丰度最高,造成以上现象最直接的原因是绿化带、公园、居民区、工业园绿地中的 pH 比森林高,表明长角跳科物种更倾向于在碱性环境下生存,而等节跳科物种却倾向于在酸性环境下生存。例如公园、绿化带、居民区相关绿地中 *H. sinensis* 和 *H. socia* 的丰度要比森林高出两倍以上,而 *F.* spp2 只集中分布在森林中。第二,森林中跳虫的物种丰富度最高,丰富最低;公园与之相反,其跳虫丰度最高,物种丰富度较低。由此可见森林与公园的生境存在很大差别,除了土壤理化性质的差异外,可能是公园中存在较多的管理措施,例如定期施肥、养护等,这些管理措施形成了稳定的环境,有利于跳虫的生存与繁殖。例如,公园中 *H. socia* 丰度最高,可能的原因是此类物种更适合在公园这种碱性且磷含量高的环境中生存。前人的研究显示森林中跳虫的丰度和物种丰富度均为最高[24],超过了其它绿地类型[57],然而本研究结果显示森林绿地中跳虫的丰度是最低的,这可能与森林的营养供给相对较低相关。

3.2　城市化和绿地类型对跳虫物种多样性的影响

城市化和不同绿地类型对跳虫群落的个体数量不存在显著影响,但是对跳虫群落的物种多样性和群落结

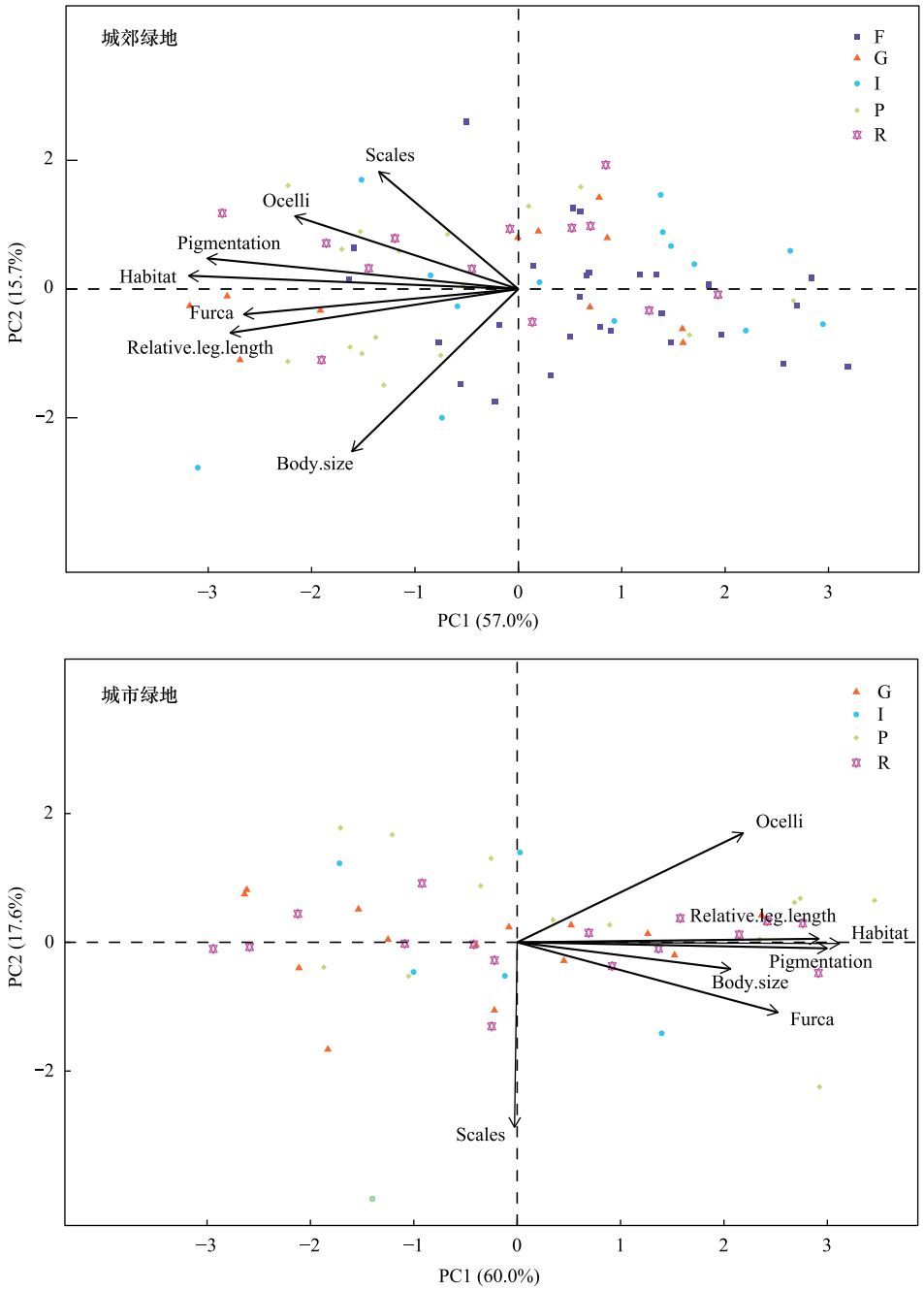

图 6 宁波市城郊和城市不同绿地类型中跳虫功能特征的主成分分析

Fig.6 Principal components analysis of collembolan functional traits in different greenspace types in suburban and urban areas of Ningbo city

Body size:体长;Furca:弹器;Habitat:生活型;Ocelli:小眼;Pigmentation:体色;Relative leg length:相对腿长;Scales:鳞片

构有着显著影响。城市化和绿地类型对跳虫的功能多样性均存在显著影响,且绿地类型的影响程度更高。对于跳虫群落结构,城市化对其影响不明显,但是绿地类型却有着明显的影响。

均匀度指数、丰富度指数和 Shannon 指数的结果均表明城市化对跳虫的多样性产生了显著影响。居民区绿地中跳虫的多样性随着城市化程度的升高而升高;公园绿地中跳虫的多样性随着城市化程度的升高而降低。在居民区绿地中,人口密度会随着城市化进程而增加,城市居民区中人口密度相对较大,同时人类活动也较为丰富,表土生跳虫很可能会伴随着人类活动在较大空间尺度上发生移动,从而造成城市居民区跳虫的物

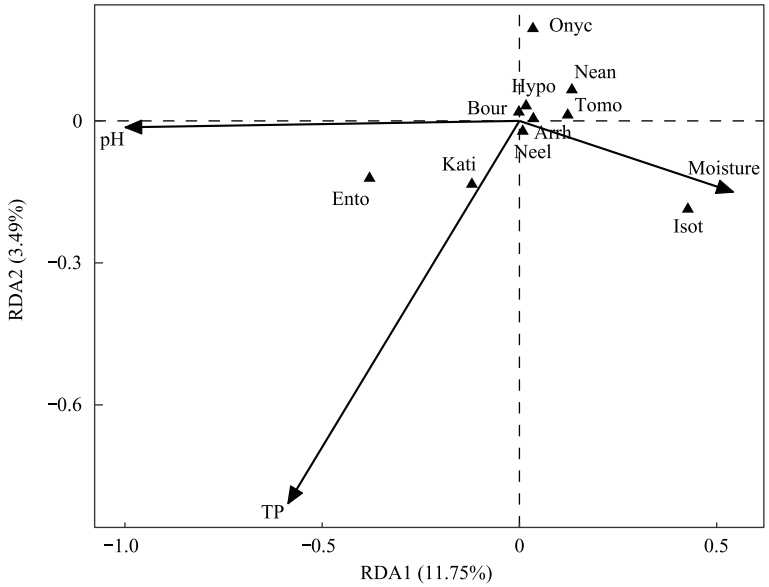

图 7　宁波市不同科跳虫与土壤理化性质的冗余分析

Fig.7　Redundancy analysis between different families of collembolan and soil physicochemical properties in Ningbo city

Arrh:齿棘圆跳科;Bour:钩圆跳科;Nean:疣跳科;Neel:短角跳科;Tomo:鳞跳科

种多样性显著增加。例如,在城市居民区中优势物种基本上为 *H. sinensis*,*H. socia* 和 *S. zhangi* 等表土生的长角跳科物种。不同于居民区绿地,公园绿地是一种区域生态,在净化空气和提供各种生态系统服务方面均发挥着不可替代的作用[11]。城市化进程会造成城市绿地生境的破碎化[58—59],导致城市生态循环的不完善,城市化带来的空气污染和水质变差等负面影响不会得到及时修复,进而威胁城市公园中土壤跳虫的多样性。

不同绿地类型均对跳虫多样性有显著影响,但是在城市和城郊中呈现出不同的结果。城市区域下,绿化带绿地相比于公园绿地,跳虫多样性更高;而城郊区域下,公园绿地相比于森林绿地,跳虫多样性更高。在城市区域下,绿化带中凋落物多样性较为丰富,质量也相对较高,然而在公园中为了美化景观、创造人类休闲活动的舒适环境,会存在定期清理凋落物和清除垃圾等管理措施[60]。综合以上推测的原因,绿化带中有机质含量较高的凋落物为跳虫提供了优良的生存环境,其可容纳物种丰富度更高的跳虫。虽然在公园中种植了不同类型的植被,但是公园跳虫的物种多样性较低,其可归因于公园绿地没有保留丰富的凋落物,毕竟跳虫的食物资源和表土生跳虫的栖息环境都和凋落物息息相关[46]。在城郊区域下,公园跳虫的物种多样性要显著高于森林。森林环境相对封闭,土壤跳虫的生存资源基本上依赖于森林中植物的凋落物及根系分泌物[61],食物来源比较单一。然而在公园中会存在各种形式的人为养分输入,如施肥造成公园绿地的 TP 含量显著高于森林[56],宠物粪便的残留等都可能是土壤跳虫食物获取来源多样化的途径。故城郊公园相对于森林,其养分供给更加多样化,从而使得更多的跳虫物种被保留下来。

3.3　城市化和绿地类型对跳虫群落结构的影响

不同绿地类型之间跳虫的群落结构具有显著差异,例如优势物种中,*F.* spp2 跳虫物种仅存在于森林单一绿地中,而 *S.* spp5 和 *H. socia* 大量存在于除森林之外的公园相关绿地中。相比与其它类群的跳虫,*S.* spp5 会取食植物幼嫩组织[62—63],而在公园管理措施下,会定期更换观赏植被,这为 *S.* spp5 提供了良好的食物来源。另外, 相比于城郊区域,城市区域下不同绿地类型之间的跳虫群落结构差异更小。因为城市化进程中往往伴随着城市建设等人工干扰,形成了城市中不同绿地植被种类单一化,这些绿地类型往往具有相似的景观[64],进而被选择出的跳虫物种也趋于同质化。

3.4　城市化和绿地类型对跳虫功能性状的影响

跳虫的功能性状反映出其形态、生理及生活史特征,是研究环境变化对其群落影响的有效指标[65—66],跳

虫功能性状的变化能科学地反映出其对环境变化的响应及其生态功能。研究表明,环境的过滤作用会将具有相似功能性状的跳虫物种选择出来[67]。绿地类型对跳虫功能性状的选择作用要比城市化更为强烈,研究结果发现,在公园、绿化带和居民区绿地中,弹器发达、相对腿长较长、体色较深且有斑纹的表土生物种丰度较高,然而在森林中体表无色素沉着、弹器退化、相对腿长较短的真土生物种则更为丰富。一方面,说明了跳虫在不同绿地类型中的垂直分布是有区别的,森林中跳虫物种的食物来源更多地指向了土壤深层植物根系的微生物,而公园、绿化带等绿地中的物种则以地表的凋落物为食[60]。另一方面,表土生跳虫更容易受到干旱的影响。由于公园的定期灌溉,森林表土层相较于公园更加干旱,这可能是表土生跳虫在森林中较少的原因。跳虫体长与其生理代谢及其生态位息息相关[46]。结果显示,城市绿化带中跳虫的体长显著高于城市公园类群。这可能因为在城市公园绿地中,凋落物的去除、割草及常绿植物的广泛种植等措施导致了公园绿地残留物大量减少[68],从而减少了表土生体型较大跳虫的相对丰度,而在绿化带中不仅有可供表土生跳虫取食的丰富的凋落物层还有半土生和真土生跳虫生存繁殖的土壤层,很好地为不同物种提供了资源可用性较强的营养生态位。除了上述环境对跳虫具体功能性状的过滤作用外,还发现除森林以外的绿地类型的跳虫功能性状相似。相较于森林环境,在其它绿地环境中,人类活动更为频繁,造成了不同绿地类型之间跳虫的迁移与交流,从而使得这些绿地类型中跳虫功能性状的同质化。

4 结论

本研究对城市-城郊不同绿地类型下跳虫群落结构、物种多样性及功能性状进行了对比分析。城市化和绿地类型对土壤跳虫群落及功能性状均产生了明显效应,其中,城市化对公园中跳虫的物种多样性产生了负向效应,对居民区跳虫的物种多样性却存在正向效应;此外人为干扰较强的绿地对跳虫的功能性状有正向效应。未来仍需要深入了解城市绿地植被及其他土壤生物群落特征,以探索地上-地下生物联系以及生物互作关系对土壤跳虫群落的影响,从而为保护城市绿地土壤动物多样性提出更科学的措施和方法。

致谢:感谢上官华媛博士生提供实验环境数据测定,感谢陈婷、刘相钰对野外采集和样品分拣的帮助。

参考文献(References):

[1] Xia X H, Zhao X L, Lai Y J, Dong H Y. Levels and distribution of total nitrogen and total phosphorous in urban soils of Beijing, China. Environmental Earth Sciences, 2013, 69(5): 1571-1577.

[2] Huang J, Zhang W, Mo J M, Wang S Z, Liu J X, Chen H. Urbanization in China drives soil acidification of Pinus massoniana forests. Scientific Reports, 2015, 5: 13512.

[3] Sala O E, Chapin F S 3rd, Armesto J J, Berlow E, Bloomfield J, Dirzo R, Huber-Sanwald E, Huenneke L F, Jackson R B, Kinzig A, Leemans R, Lodge D M, Mooney H A, Oesterheld M, Poff N L, Sykes M T, Walker B H, Walker M, Wall D H. Global biodiversity scenarios for the year 2100. Science, 2000, 287(5459): 1770-1774.

[4] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, Melillo J M. Human domination of earth's ecosystems. Science, 1997, 277(5325): 494-499.

[5] 汤煜, 石铁矛, 卜英杰, 石羽. 城市绿地碳储量估算及空间分布特征. 生态学杂志, 2020, 39(4): 1387-1398.

[6] Talal M L, Santelmann M V, Tilt J H. Urban Park visitor preferences for vegetation-An on-site qualitative research study. Plants, People, Planet, 2021, 3(4): 375-388.

[7] Zhao M, Liu Q R, Xu F, Cheng C N. Effects of greenbelt plant configuration on atmospheric PM2.5 in Beijing. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2018, 25(2): 176-183.

[8] Lee H, Lim B S, Kim D U, Kim A R, Seol J W, Lim C H, Kil J H, Moon J S, Lee C S. Decline and passive restoration of forest vegetation around the yeocheon industrial complex ofsouthern Korea. Forests, 2020, 11(6): 674.

[9] Baruch Z, Liddicoat C, Cando-Dumancela C, Laws M, Morelli H, Weinstein P, Young J M, Breed M F. Increased plant species richness associates with greater soil bacterial diversity in urban green spaces. Environmental Research, 2021, 196: 110425.

[10] 彭彩云, 田惠, 肖玖金, 张健, 罗熳丽. 城市不同类型绿地土壤动物群落特征. 云南农业大学学报: 自然科学, 2018, 33(4): 729-736.

[11] Guilland C, Maron P A, Damas O, Ranjard L. Biodiversity of urban soils for sustainable cities. Environmental Chemistry Letters, 2018, 16(4): 1267-1282.

[12] Bach E M, Ramirez K S, Fraser T D, Wall D H. Soil biodiversity integrates solutions for a sustainable future. Sustainability, 2020, 12(7): 2662.

[13] Joimel S, Jules A, Gonod L V. Collembola dispersion, selection, and biological interactions in urban ecosystems: a review. Environmental Chemistry Letters, 2022, 20(3): 2123-2133.
[14] Dou Y J, Chang L, Zhang B, Wu D H. Effect of soybean cultivation on soil Collembola community in marshland of Sanjiang plain, China. Russian Journal of Ecology, 2018, 49(6): 570-576.
[15] Petersen H, Luxton M. A comparative analysis of soil fauna populations and their role in decomposition processes. Oikos, 1982, 39(3): 288.
[16] 孙新, 李琪, 姚海凤, 刘满强, 吴东辉, 朱冬, 朱永官. 土壤动物与土壤健康. 土壤学报, 2021, 58(5): 1073-1083.
[17] Goncharov A A, Tsurikov S M, Potapov A M, Tiunov A V. Short-term incorporation of freshly fixed plant carbon into the soil animal food web: field study in a spruce forest. Ecological Research, 2016, 31(6): 923-933.
[18] Hågvar S. Collembola in Norwegian coniferous forest soils I. Relations to plant communities and soil fertility. Pedobiologia, 1982, 24(5/6): 255-296.
[19] Villani M G, Allee L L, Díaz A, Robbins P S. Adaptive strategies of edaphic arthropods. Annual Review of Entomology, 1999, 44: 233-256.
[20] Rzeszowski K, Zadrożny P, Nicia P. The effect of soil nutrient gradients on Collembola communities inhabiting typical urban green spaces. Pedobiologia, 2017, 64: 15-24.
[21] Yi X Y, Ning C, Feng S L, Gao H Q, Zhao J L, Liao J Y, Peng Y H, Zhao S Q, Liu S G. Urbanization-induced environmental changes strongly affect wetland soil bacterial community composition and diversity. Environmental Research Letters, 2022, 17(1): 014027.
[22] Liu L, Barberán A, Gao C, Zhang Z C, Wang M, Wurzburger N, Wang X, Zhang R, Li J X, Zhang J A. Impact of urbanization on soil microbial diversity and composition in the megacity of Shanghai. Land Degradation & Development, 2022, 33(2): 282-293.
[23] Rzeszowski K, Sterzyńska M. Changes through time in soil Collembola communities exposed to urbanization. Urban Ecosystems, 2016, 19(1): 143-158.
[24] Qiao Z H, Wang B, Yao H F, Li Z P, Scheu S, Zhu Y G, Sun X. Urbanization and greenspace type as determinants of species and functional composition of collembolan communities. Geoderma, 2022, 428: 116175.
[25] Moretti M, Dias A T, Bello F, Altermatt F, Chown S, Azcúrate F M, Bell J, Fournier B, Hedde M, Hortal J, Ibanez S, Öckinger E, Sousa J P, Ellers J, Berg M. Handbook of protocols for standardized measurement of terrestrial invertebrate functional traits. Functional Ecology, 2017, 31(3): 558-567.
[26] Bonfanti J, Krogh P H, Hedde M, Cortet J. Ecomorphosis in European Collembola: a review in the context of trait-based ecology. Applied Soil Ecology, 2023, 182: 104692.
[27] Makkonen M, Berg M P, van Hal J R, Callaghan T V, Press M C, Aerts R. Traits explain the responses of a sub-arctic Collembola community to climate manipulation. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(2): 377-384.
[28] 陈又清. 功能多样性——生物多样性与生态系统功能关系研究的新视角. 云南大学学报: 自然科学版, 2017, 39(6): 1082-1088.
[29] Malmström A. Life-history traits predict recovery patterns in Collembola species after fire: a 10 year study. Applied Soil Ecology, 2012, 56: 35-42.
[30] 马克平, 钱迎倩. 生物多样性保护及其研究进展. 应用与环境生物学报, 1998, 4(1):96-100.
[31] Mouchet M, Villéger S, Mason N, Mouillot D. Functional diversity measures: an overview of their redundancy and their ability to discriminate community assembly rules. Functional Ecology, 2010, 24(4): 867-876.
[32] Kouakou A K, Cortet J, Kolo Y, Brauman A. Using trait-based approaches to assess the response of epedaphic Collembola to organic matter management practices: a case study in a rubber plantation in south-eastern Côte d'Ivoire. Insects, 2022, 13(10). doi: 10.3390/insects13100892.
[33] Ferrín M, Márquez L, Petersen H, Salmon S, Ponge J F, Arnedo M, Emmett B, Beier C, Schmidt I K, Tietema A, de Angelis P, Liberati D, Kovács-Láng E, Kröel-Dulay G, Estiarte M, Bartrons M, Peñuelas J, Peguero G. Trait-mediated responses to aridity and experimental drought by springtail communities across Europe. Functional Ecology, 2023, 37(1): 44-56.
[34] Jarrett M, Shackleton C. Integrating biodiversity considerations into urban golf courses: managers' perceptions and woody plant diversity in the Eastern Cape, South Africa. Journal of Land Use Science, 2017, 12(4): 292-311.
[35] 宁波市气象服务中心. 宁波天气. (2023) [引用日期 2023-7-24]. https://www.qx121.com/weather/weatherStatic/climateSurvey/index.html.
[36] 李洪英. 宁波人口支撑经济增长潜力分析--基于八个城市七普人口数据的比较. 城市发展, 2022: 41-44.
[37] 孟悦. 宁波市城市化发展对区域生态系统服务价值的影响. 地域研究与开发, 2016, 35(6): 81-86.
[38] Han Y, Yu C Y, Feng Z, Du H C, Huang C S, Wu K N. Construction and optimization of ecological security pattern based on spatial syntax classification—taking Ningbo, China, as an example. Land, 2021, 10(4): 380.
[39] 朱庆. 提高宁波城市绿化三大指标的措施. 中国园艺文摘, 2012, 28(9): 58-59, 170.
[40] 殷秀琴, 马祝阳. Tullgren 法对土壤动物的分离效率. 东北师大学报: 自然科学版, 2002, 34(2): 84-91.
[41] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998.
[42] Mikhail Potapow. Synopses on Palaearctic Collembola: ISOTOMIDAE. Germany: Staatliches Museum für Naturkunde Görlitz, 2001.
[43] Jean-Marc Thibaud, Hans-Jürgen Schulz, Maria Manuela da Gama Assalino. Synopses on Palaearctic Collembola: HYPOGASTRURIDAE. Germany: Staatliches Museum für Naturkunde Görlitz, 2004.
[44] 尹文英. 中国亚热带土壤动物. 北京: 科学出版社, 1992.

[45] Frans Janssens. Checklist of the Collembola: Families. (2023-4-30) [2022-5-23]. https://www.collembola.org/index.html
[46] The biology of the Collembola (springtails): the most abundant insects in the world. Oxford University Press, 1997.
[47] Ponge J F, Salmon S. Spatial and taxonomic correlates of species and species trait assemblages in soil invertebrate communities. Pedobiologia, 2013, 56(3): 129-136.
[48] Salmon S, Ponge J F, Gachet S, Deharveng L, Lefebvre N, Delabrosse F. Linking species, traits and habitat characteristics of Collembola at European scale. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 75: 73-85.
[49] Pollet S, Chabert A, Burgeon V, Cornelis J, Fouché J, Gers C, Hardy B, Pey B. Limited effects of century-old biochar on taxonomic and functional diversities of collembolan communities across land-uses. Soil Biology and Biochemistry, 2022,164. doi: 10.1016/j.soilbio.2021.108484.
[50] Hawes Timothy C, Penelope G. A note on scale morphology in Collembola. Zootaxa, 2015, 3925(4): 594-596.
[51] Laliberté E, Legendre P. A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits. Ecology, 2010, 91(1): 299-305.
[52] Sun R Y. Principles of animal ecology, 3rd version. Beijing: Beijing Normal University Press, 2001.
[53] Garnier E, Cortez J, Billès G, Navas M, Roumet C, Debussche M, Laurent G, Blanchard A, Aubry D, Bellmann A, Neill C, Toussaint J. Plant functional markers capture ecosystem properties during secondary succession. Ecology, 2004, 85(9): 2630-2637.
[54] Mao Q Z, Huang G L, Buyantuev A, Wu J G, Luo S H, Ma K M. Spatial heterogeneity of urban soils: the case of the Beijing metropolitan region, China. Ecological Processes, 2014, 3(1): 1-11.
[55] Vergnes A, Blouin M, Muratet A, Lerch T Z, Mendez-Millan M, Rouelle-Castrec M, Dubs F. Initial conditions during Technosol implementation shape earthworms and ants diversity. Landscape and Urban Planning, 2017, 159: 32-41.
[56] Salomon M J, Watts-Williams S J, McLaughlin M J, Cavagnaro T R. Urban soil health: a city-wide survey of chemical and biological properties of urban agriculture soils. Journal of Cleaner Production, 2020, 275: 122900.
[57] Martins da Silva P, Carvalho F, Dirilgen T, Stone D, Creamer R, Bolger T, Sousa J P. Traits of collembolan life-form indicate land use types and soil properties across an European transect. Applied Soil Ecology, 2016, 97: 69-77.
[58] Braaker S, Moretti M, Boesch R, Ghazoul J, Obrist M K, Bontadina F. Assessing habitat connectivity for ground-dwelling animals in an urban environment. Ecological Applications, 2014, 24(7): 1583-1595.
[59] Chong K Y, Teo S, Kurukulasuriya B, Chung Y F, Rajathurai S, Tan H T W. Not all green is as good: different effects of the natural and cultivated components of urban vegetation on bird and butterfly diversity. Biological Conservation, 2014, 171: 299-309.
[60] Heiniger C, Barot S, Ponge J F, Salmon S, Meriguet J, Carmignac D, Suillerot M, Dubs F. Collembolan preferences for soil and microclimate in forest and pasture communities. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 86: 181-192.
[61] Bardgett R D, Mommer L, De Vries F T. Going underground: root traits as drivers of ecosystem processes. Trends in Ecology & Evolution, 2014, 29(12): 692-699.
[62] Davies W M. On the economic status and bionomics of Sminthurus viridis, lubb. (collembola). Bulletin of Entomological Research, 1928, 18(3): 291-296.
[63] Greenslade P, Ireson J E. Collembola of the southern Australian culture steppe and urban environments: a review of their pest status and key to identification. AustralianJournal of Entomology, 1986, 25(4): 273-291.
[64] 陈国奇, 强胜. 人类活动是导致生物均质化的主要因素. 生态学报, 2011, 31(14): 4107-4116.
[65] de Bello F, Lavorel S, Gerhold P, Reier Ü, Pärtel M. A biodiversity monitoring framework for practical conservation of grasslands and shrublands. Biological Conservation, 2010, 143(1): 9-17.
[66] Pey B, Nahmani J, Auclerc A, Capowiez Y, Cluzeau D, Cortet J, Decaëns T, Deharveng L, Dubs F, Joimel S, Briard C, Grumiaux F, Laporte M A, Pasquet A, Pelosi C, Pernin C, Ponge J F, Salmon S, Santorufo L, Hedde M. Current use of and future needs for soil invertebrate functional traits in community ecology. Basic and Applied Ecology, 2014, 15(3): 194-206.
[67] Pillar V D, da S Duarte L, Sosinski E E, Joner F. Discriminating trait-convergence and trait-divergence assembly patterns in ecological community gradients. Journal ofVegetation Science, 2009, 20(2): 334-348.
[68] Youngsteadt E, Henderson R C, Savage A M, Ernst A F, Dunn R R, Frank S D. Habitat and species identity, not diversity, predict the extent of refuse consumption by urban arthropods. Global Change Biology, 2015, 21(3): 1103-1115.