

DOI: 10.5846/stxb202109232671

吴逢润, 黄思程, 王涛, 王琰, 王之梦. 城市嵌草式铺装植被和大型土壤动物群落组成特征——以新泰市为例. 生态学报, 2023, 43(6): 2368-2377.
Wu F R, Huang S C, Wang T, Wang Y, Wang Z M. Community composition of vegetation and soil macrofauna in the urban grass planting pavement: A case study in Xintai City. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(6): 2368-2377.

城市嵌草式铺装植被和大型土壤动物群落组成特征 ——以新泰市为例

吴逢润^{1,*}, 黄思程², 王 涛², 王 琰³, 王之梦¹

¹ 厦门理工学院, 环境科学与工程学院, 厦门 361013

² 华东师范大学, 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241

³ 上海市环境监测中心, 上海 200235

摘要: 嵌草式铺装近年来广泛应用于城市停车场及道路, 研究其群落组成特征对城市生态的综合治理具有重要意义。以新泰市为例, 通过现场采样调研分析探讨了嵌草式铺装对植被和土壤动物群落组成和多样性的影响。结果显示, 植被调查中共记录草本植物 14 科 22 属 22 种。牛筋草 (*Eleusine indica*) 为新泰市嵌草式铺装中植被的优势种。植被的平均密度和生物量分别为 (21.87 ± 2.15) 株/ m^2 和 (4.15 ± 0.45) g/ m^2 。不同站点间植株密度和高度有显著空间差异 ($P < 0.05$), 生物量和盖度差异不显著。不同站点的植被物种多样性特征也有所差异。大型土壤动物调查共记录 7 目 8 科 10 种, 其中蚁科为优势类群。嵌草式铺装中土壤动物的丰度、生物量均显著高于不透水路路面 ($P < 0.05$)。逐步回归分析表明, 嵌草式铺装中植被和土壤动物的丰度和生物量与土壤的容积密度和含水率等理化性质显著相关 ($P < 0.05$)。土壤动物丰度与植被盖度、土壤动物生物量与植被生物量间也具有显著相关关系 ($P < 0.05$)。结果表明, 嵌草式铺装能够有效提高城市生态系统中植被和土壤动物群落的丰度、生物量和多样性, 这种影响是直接和间接多种方式的协同作用。未来应结合多种环境因子的监测, 在不同时空尺度上系统探究嵌草式铺装带来的生态效应及其高效合理利用途径。

关键词: 嵌草式铺装; 植被; 土壤动物; 物种多样性; 城市生态系统

Community composition of vegetation and soil macrofauna in the urban grass planting pavement: A case study in Xintai City

WU Fengrun^{1,*}, HUANG Sicheng², WANG Tao², WANG Yan³, WANG Zhimeng¹

¹ School of Environmental Science and Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361013, China

² State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China

³ Shanghai Environmental Monitoring Center, Shanghai 200235, China

Abstract: Grass planting pavement has been widely used in urban roads, parks, and parking lots in recent years due to its composite structure of plant-soil-permeable filler. Many scholars have extensively studied its ecological and environmental functions in enhancing infiltration, reducing urban surface runoff, purifying water quality, and adjusting the microclimate of the local ecosystem. However, we had little knowledge about its effects on the organism communities and species diversity, even though it is of great significance to the comprehensive management and planning of the urban ecosystem. Therefore, based on field sampling and investigation, we carried out this study to quantitatively analyze the community composition and species diversity of the vegetation and soil macrofauna in the urban grass planting pavement in 9 sites of Xintai City, Shandong Province, and discuss the ecological effects of the grass planting pavement. A total of 22 species of herbaceous

基金项目: 福建省中青年教育科研项目 (JAT210346); 厦门理工学院科学技术研究项目 (YKJ22009R)

收稿日期: 2021-09-23; **网络出版日期:** 2022-11-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: frwu1993@163.com

plants in 14 families, 22 genera were recorded in the study. With the highest relative abundance and biomass, *Eleusine indica* was the dominant species of vegetation in the grass planting pavement in Xintai City. The average abundance and biomass of the vegetation in the grass planting pavement was (21.87 ± 2.15) shoots/m² and (4.15 ± 0.45) g/m². There were significantly spatial differences in the shoot density ($F = 2.671$, $P < 0.05$) and stem height ($F = 2.748$, $P < 0.05$) among different sampling sites. Nevertheless, the differences in the vegetation biomass and coverage among different sites were not significant ($P > 0.05$), though significant differences existed in the pairwise comparison between sites by the Least Significant Difference (LSD) analysis. The species diversity of vegetation at different sites also varied significantly, the lowest value appeared in the grass planting pavement of the hospital parking lot. A total of 10 species in 7 orders, 8 families of the soil macrofauna were recorded in the survey. *Formicidae* was the dominant group of the soil macrofauna communities in the grass-planting pavement transects. Only two species of soil macrofauna were recorded in the porous pavement transect of all sites. The abundance and biomass of the soil macrofauna in grass planting pavement transect were significantly higher than that in porous pavement ($P < 0.05$). The results of stepwise regression analysis showed that the community characteristics of vegetation and soil macrofauna significantly correlated to the soil physiochemical properties, such as bulk density and water content. The biomass ($R^2 = 0.810$, $P < 0.05$) and coverage ($R^2 = 0.819$, $P < 0.001$) of the vegetation in the grass planting pavement had the strongest correlations with the biomass and abundance of the soil macrofauna. The study showed that the grass planting pavement could effectively increase the abundance, biomass, and diversity of the vegetation and soil macrofauna communities in the urban ecosystem. This effect is a direct and indirect synergy of multiple factors, such as trampling frequency, soil texture, water content and some other biological factors. On the basis of long-term monitoring, systematic and comprehensive studies should be carried out in combination with environmental factors in the future to systematically explore the ecological effects of the grass planting pavement and provide a scientific basis for the further efficient and reasonable utilization of the grass planting pavement.

Key Words: grass planting pavement; vegetation; soil macrofauna; species diversity; urban ecosystem

随着社会经济的迅速发展和城市规模的快速扩张,城市中不透水路面比例不断升高,给城市的生态环境造成了重要影响。一些研究指出,北京、上海、南京、西安等城市主城区的不透水路面面积占比达到了65%—90%^[1-3],导致城市绿化率下降、内涝频发、城市热岛效应加剧等问题^[4]。合理设计地面铺装从而改善区域生态环境已成为城市生态建设的重要要求^[5-6]。

嵌草型铺装是一种典型的透水性铺装,它一般指具有植草空隙,能够绿化城市路面的砖或空心砌块,通常被应用于城市中的公园、停车场以及人行道的地面铺装,具有绿化城市道路的功能^[5,7]。由于其含有植物-土壤-透水填料的多重结构,近年来已有众多学者广泛研究了其增强入渗、降低城市地表径流量、净化水质、改变局部区域小气候等方面的生态与环境功能^[8-10]。

区域植被、土壤动物等生物群落的组成特征和物种多样性决定了生态系统的生产力,影响生态系统的物质循环和能量流动等重要过程^[11-12]。嵌草型铺装中的植被通常是依据景观效果人工种植,最初品种较为单一^[5],但群落往往在自然和人为因素的干扰下发生演替,导致群落结构复杂化。然而,目前针对嵌草型铺装中生物群落组成特征的研究还相对较少。阙彩霞^[5]曾对上海市道路、公园及停车场嵌草型铺装中的植物群落进行调查,但其研究仅关注了植被的种类组成。同时,众多研究表明局部生态系统植被的变化往往能引起环境异质性、营养物质等生境条件的动态变化,进而可能对土壤动物等其他生物类群的群落组成和多样性产生间接影响^[13-15]。对嵌草式铺装中生物群落组成特征的研究是了解生态系统中过程、功能与服务的基础。基于此,本文选取山东省新泰市作为研究区域,布设采样站点监测分析城市嵌草式铺装中植被和土壤动物群落特征,重点探讨嵌草式铺装对生物群落组成和物种多样性产生的直接和间接影响,以期为城市生态环境的综合治理和可持续发展提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区域和站点布设

新泰市地处山东省中部,位于北纬 35°37′—36°07′、东经 117°16′—118°之间,人口约 137 万,面积约 1946 km²,耕地面积 7.07×10⁵hm²。该区域地属暖温带大陆性半湿润季风气候区,四季分明,雨热同期,年均温度 19.0℃,年均降雨量约 467 mm。域内山区、丘陵、平原均有分布,丘陵区占总面积的 56%。土壤类型以棕壤、褐土、沙姜黑土为主^[16]。新泰市矿产资源丰富,是山东省重要的能源基地之一。同时,新泰市也是“全国十佳生态文明城市”和“国家园林城市”,中心城区绿地面积超过 10.7%(www.xintai.gov.cn),城区内嵌草式铺装应用较为广泛,为研究嵌草式铺装的生态影响提供了理想场地。

在新泰市域内布设 9 个采样站点。站点具体位置如图 1 所示。其中,A、B、C、D、F 分别为玉璟花园、山能小镇、恒丰家园、青云花苑和幸福里小区停车场,E、G 分别为电视塔公园、新甫山两处景区停车场,H 为孙村煤矿公司停车场,J 为新汶中心医院停车场。不同站点嵌草式铺装建成时间存在一定差异。为探讨嵌草式铺装对生物群落的影响,在每个站点分别设置嵌草式铺装和不透水路面区域两个断面,以不透水路路面作为对照断面。断面之间距离在 10 m 以内。在每个断面设置三个 1 m×1 m 的样方,样方之间距离 20—50 m。

1.2 样品采集与处理

2021 年 8 月,采用样方法进行样品采集。分别采集地面的植被和大型土壤动物。植被采集时首先在现场记录植被株数、盖度并测量植株高度,然后利用枝剪紧贴地面剪下植物,带回实验室鉴定、60℃烘干、称重测量植被干重生物量(g)。不透水路面无植物群落生长,因此未作植物样品采集。大型土壤动物采集时先捡取地面表层的土壤动物,因嵌草式铺装表层土壤层深度一般为 6—8 cm^[17],因此再用小型铁铲挖掘采集深度 5cm 以内的土壤,筛选捡取其中的大型土壤动物。不透水路路面仅抓取表面土壤动物。现场采集的大型土壤动物放入装有 70%浓度酒精的塑料瓶固定,带回实验室鉴定计数,测量其湿重生物量(g)。

现场使用便携式土壤多参数测定仪(希玛 PH328)测定每个样方中的土壤温度和土壤 pH。使用内径 3.5 cm 的柱状样金属取土器在每个样方中采集 2 个 5 cm 深度的土壤柱样,储存于自封袋中带回实验室。在实验室中首先称量土壤柱样湿重,然后经 60℃烘干后称量其干重,测算土壤容重和含水率。然后通过干筛法过滤去除草根等杂质后将土壤进行研磨并过 100 目筛。取 2 g 过筛后的土样于离心管中,加入质量分数 10% 的盐酸,摇匀、静置 12 h,去除其中的无机碳成分。将样品进行离心,去除上层酸液,再用超纯水将酸化土壤反复清洗 3 次。清洗好的土样置于 60℃烘箱中烘至恒重后,用元素分析仪测定土壤有机碳含量^[18]。

1.3 数据处理

采用相对丰度(Relative abundance,% N),相对生物量(Relative biomass,% B)和 Pinkas 相对重要性指数(Index of relative importance, IRI)来反映研究区域植物和土壤动物群落的组成特征,其中 IRI>20 的视为区域优势类群^[19]。

相对丰度 N(%)= 某种生物个体数/全部生物个体数×100%,

相对生物量 B(%)= 某种生物生物量/全部生物生物量×100%,

相对频度 F(%)= 某种生物出现的次数/总调研次数×100%,

Pinkas 相对重要性指数(IRI)= (某种生物相对丰度+某种生物相对生物量)×某种生物相对频度。

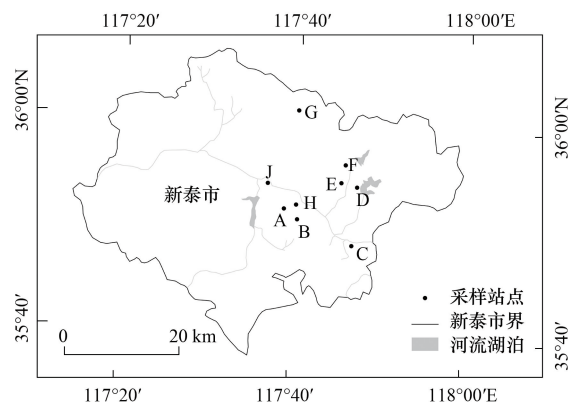


图 1 研究区域及采样站点布设示意图

Fig.1 The map of the study area and sampling sites

采用 Margalef 物种多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数对相应生物类群的多样性特征进行测度^[20]。其中,

Margalef 物种多样性指数:

$$D = \frac{S - 1}{\ln N}$$

Shannon-Wiener 多样性指数:

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

Pielou 均匀度指数:

$$J' = \frac{H'}{\ln S}$$

式中, S 为总物种数; N 为总个体数; P_i 为第 i 种个体数占总个体数的比例。

采用统计软件包(IBM SPSS Statistics 21)进行数据处理。对数据先进行方差齐性检验,不具备方差齐性的数据需经四次方根转化后再进行分析。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)对土壤动物群落组成、植物群落特征、土壤理化参数的空间变化进行差异的显著性检验,再选用最小显著差法(LSD)进行均数间的多重比较^[20-21]。其中,以 $P<0.05$ 表示显著差异, $P<0.001$ 表示极显著差异。采用逐步线性回归分析检验植物群落、土壤动物群落特征和土壤理化指标间的相关性,并筛选出对植被和土壤动物群落最具影响的环境因子组合。

2 研究结果

2.1 植被特征

嵌草式铺装中植物群落组成特征如表 1 所示。调查中共记录草本植物 14 科 22 属 22 种。整体上,牛筋草(*Eleusine indica*)的相对丰度最高,其次为地锦(*Parthenocissus tricuspidata*)和篇蓄(*Polygonum aviculare*);相对生物量最高的也为牛筋草,其次为篇蓄和地毯草(*Axonopus compressus*)。牛筋草的 IRI 值>20,为区域的优势种。

表 1 嵌草式铺装中植物群落组成特征
Table 1 Communities characteristics of the vegetation in the grass planting pavement in Xintai City

物种 Species	科 Family	属 Genus	N/%	B/%	IRI/%
牛筋草 <i>Eleusine indica</i>	禾本科	稃属	44.59	42.30	70.80
马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i>	禾本科	马唐属	1.32	1.29	0.39
地毯草 <i>Axonopus compressus</i>	禾本科	地毯草属	7.92	9.72	5.23
苦苣菜 <i>Sonchus oleraceus</i>	菊科	苦苣菜属	2.64	0.77	0.88
蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>	菊科	蒲公英属	3.43	1.52	0.73
小蓬草 <i>Conyza canadensis</i>	菊科	白酒草属	1.85	0.85	0.20
青蒿 <i>Artemisia caruifolia</i>	菊科	蒿属	0.26	0.12	0.01
一年蓬 <i>Erigeron annuus</i>	菊科	一年蓬属	0.53	0.27	0.06
石胡荽 <i>Centipeda minima</i>	菊科	石胡荽属	1.58	1.60	0.24
裂苞铁苋菜 <i>Acalypha brachystachya</i>	大戟科	铁苋菜属	1.06	1.65	0.20
地锦 <i>Parthenocissus tricuspidata</i>	大戟科	大戟属	11.08	19.43	9.04
篇蓄 <i>Polygonum aviculare</i>	蓼科	蓼属	10.29	6.68	5.03
鼠尾草 <i>Salvia japonica</i>	唇形科	鼠尾草属	1.85	5.38	0.54
繁缕 <i>Stellaria media</i>	石竹科	繁缕属	1.06	0.40	0.11
马齿苋 <i>Portulaca oleracea</i>	马齿苋科	马齿苋属	4.49	4.64	1.35
茜草 <i>Rubia cordifolia</i>	茜草科	茜草属	0.53	0.30	0.06
蛇莓 <i>Duchesnea indica</i>	蔷薇科	蛇莓属	0.26	0.12	0.01
石斛 <i>Dendrobium nobile</i>	兰科	石斛属	0.26	0.15	0.02
酢浆草 <i>Oxalis corniculata</i>	酢浆草科	酢浆草属	1.06	0.91	0.15
龙葵 <i>Solanum nigrum</i>	茄科	茄属	0.53	0.38	0.03
附地菜 <i>Trigonotis peduncularis</i>	紫草科	附地菜属	0.26	0.27	0.02
平车前 <i>Plantago depressa</i>	车前科	车前属	2.90	1.25	0.46

不同站点的植株密度、生物量、株高和盖度特征如图 2 所示。整体上,新泰市嵌草式铺装中植被的平均丰度和生物量分别为 (21.87 ± 2.15) 株/ m^2 和 (4.15 ± 0.45) g/ m^2 。不同站点的植株密度和植株高度间具有显著空间差异 ($P < 0.05$),同时站点之间普遍存在两两之间的显著差异(图 2)。如站点 B、C、J、H 的植株密度显著低于其他站点 ($P < 0.05$)。站点 D 的植株高度显著高于其他站点 ($P < 0.05$),其他站点之间的株高没有显著差异。植被的生物量和盖度特征整体差异不显著,但站点之间存在两两之间的显著差异(图 2)。如站点 D、J 的植物生物量显著高于其他站点,而站点 A、C、J 的生物量相对较低。站点 B、D、J 的植被盖度显著高于其他站点,而站点 C、J 的植被盖度相对较低。

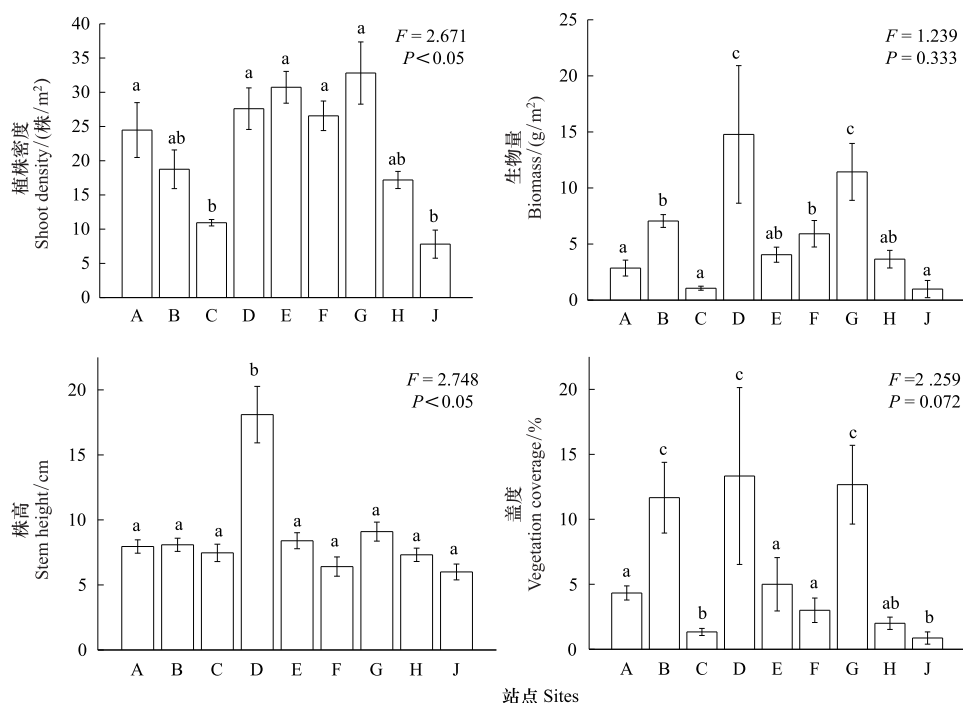


图 2 不同站点的植株密度、生物量、株高、盖度特征(平均值 $\pm$ 标准误)

Fig.2 The vegetation density, biomass, stem height, and coverage in the grass planting pavement of the different sites in Xintai City (mean $\pm$ se)

图中标注相同字母的表示站点间植被特征不存在显著差异

不同站点的植物多样性特征如图 3 所示。整体上不同站点的植物物种多样性特征有所差异。站点 E 的 Margalef 物种多样性指数和 Shannon-Wiener 多样性指数均在所有站点中最高, Pielou 均匀度指数相对较低。站点 C 的 Margalef 物种多样性指数在所有站点中最低, 站点 J 的 Shannon-Wiener 多样性指数最低。

2.2 大型土壤动物群落特征

嵌草式铺装和不透水路面大型土壤动物群落组成特征如表 2 所示。调查中共记录大型土壤动物 7 目 8 科 10 种。其中,嵌草式铺装断面记录 10 种,不透水路面断面仅记录 2 种。嵌草式铺装断面中相对丰度和相对生物量最高的均为蚁科,其 IRI 值 >20 ,是断面的优势类群。

嵌草式铺装和不透水路面大型土壤动物群落的丰度、生物量特征如图 4 所示。整体来看,嵌草式铺装断面大型

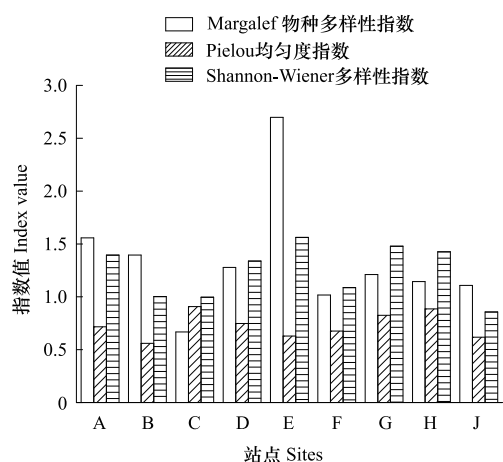


图 3 不同站点的植物多样性特征

Fig.3 The species diversity of the vegetation in different sites in Xintai City

土壤动物的丰度和生物量均显著高于不透水路面 ($P<0.05$)。同时,无论嵌草式铺装还是不透水路面断面,不同站点大型土壤动物的丰度和生物量特征均存在显著空间差异 ($P<0.05$)。嵌草式铺装断面中,D 站点的土壤动物丰度最高,G 站点的生物量最高,两个站点的丰度和生物量均显著高于其他站点 ($P<0.05$)。在不透水路面中,E 站点的土壤动物丰度和生物量显著高于其他断面 ($P<0.05$)。

表 2 大型土壤动物的群落组成特征

Table 2 Community composition of the soil macrofauna in the grass planting pavement of Xintai City

断面 Transect	目 Order	科 Family	种数 Number of species	N/%	B/%	IRI/%
嵌草式铺装 Grass planting pavement	膜翅目	蚁科	2	81.72	36.32	106.62
	鞘翅目	丽金龟甲科	1	0.54	1.69	0.16
	鳞翅目	螟蛾科	1	0.54	0.84	0.05
	半翅目	盲蝽科	2	10.22	10.14	7.78
		网蝽科	1	1.08	1.69	0.20
	同翅目	蚜科	1	0.54	0.84	0.05
	等足目	鼠妇科	1	4.30	5.07	2.08
	双翅目	果蝇科	1	1.08	1.69	0.20
不透水路面 Porous pavement	膜翅目	蚁科	2	100	100	200

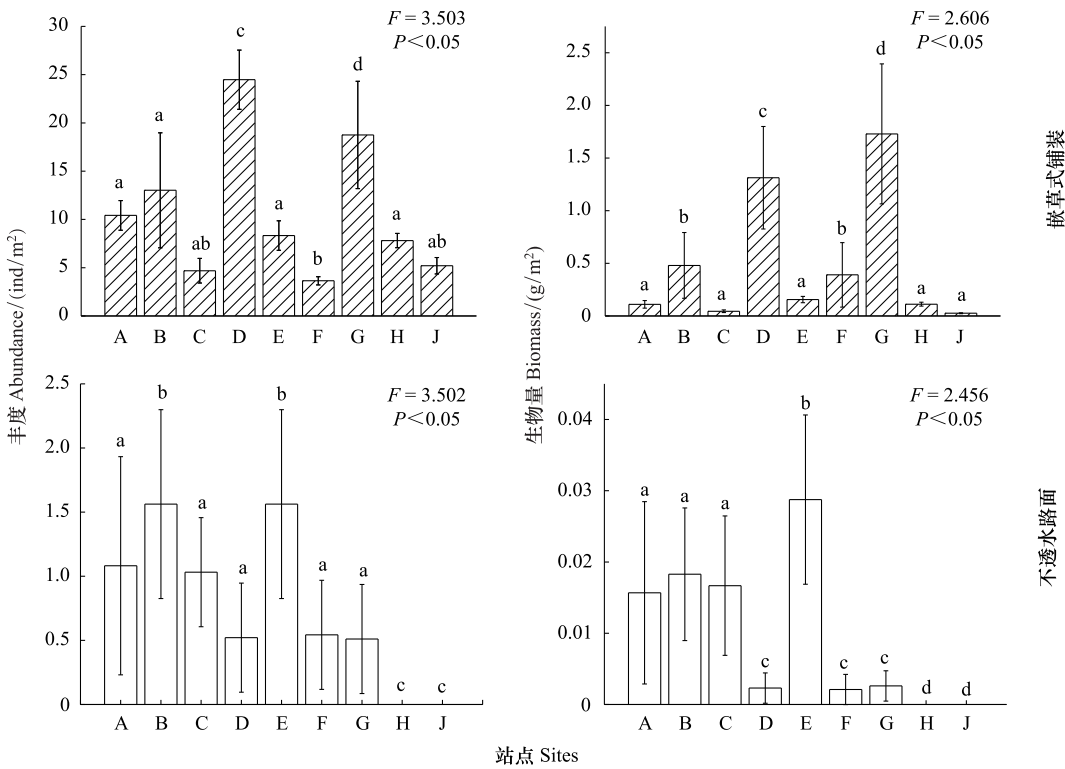


图 4 嵌草式铺装和不透水路面不同站点大型土壤动物群落的丰度、生物量特征(平均值±标准误)

Fig.4 The abundance and biomass of the soil macrofauna in the different sites in Xintai City (mean±se)

图中标注相同字母的表示站点间土壤动物特征不存在显著差异

嵌草式铺装和不透水路面大型土壤动物多样性特征如图 5 所示。嵌草式铺装断面的 Margalef 物种多样性指数和 Shannon-Wiener 多样性指数明显高于不透水路面,而不透水路面土壤动物群落的均匀度指数较高。

2.3 植被、土壤动物群落特征与土壤理化性质的关系

不同站点嵌草式铺装中土壤理化性质如表 3 所示。其中,土壤温度、土壤 pH 在 9 个站点间不存在显著差异($P>0.05$)。土壤含水率在不同站点间差异显著($P<0.05$),其中 D、G 两站点相对较高。土壤容重和土壤有机碳含量在不同站点间的差异也十分显著($P<0.05$)。其中,C、J 两站点土壤容重较大;G、H 两站点土壤有机碳含量较高。

逐步回归分析结果显示,土壤理化指标与嵌草式铺装植被和土壤动物群落特征之间存在相关关系(图 6)。筛选得到与植被丰度相关性最高的土壤理化指标为土壤容重($R^2=0.478$; $P<0.05$),与植被生物量相关性最高的为土壤含水率($R^2=0.752$; $P<0.05$)。筛选得到与大型土壤动物丰度相关性最高的为土壤含水率($R^2=0.519$; $P<0.05$),而土壤容重与大型土壤动物的密度相关性最高($R^2=0.771$; $P<0.05$)。

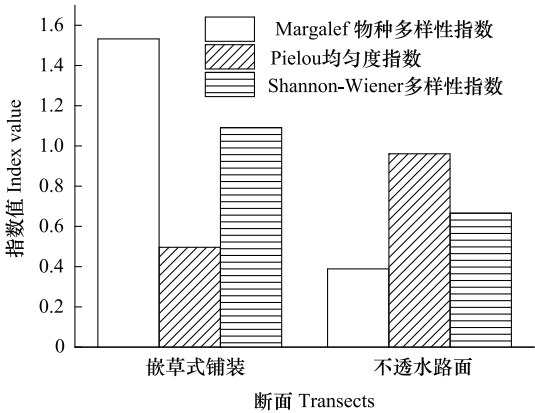


图 5 嵌草式铺装和不透水路面的土壤动物多样性特征
Fig.5 The species diversity characteristics of soil macrofauna in grass planting pavement and porous pavement

表 3 新泰市嵌草式铺装土壤理化因子特征(平均值±标准误)

Table 3 Physiochemical properties of the soil in grass planting pavement in Xintai City (mean±se)

站点 Sites	温度 Temperature/℃	pH	含水率 Water content (100%)	容重 Bulk density/ (g/cm ³)	有机碳含量 Organic carbon content/%
A	29.4±0.2	7.4±0.1	14.1±5.15	1.7±0.1	0.7±0.1
B	28.1±0.1	7.6±0.2	13.2±4.22	1.4±0.2	2.9±0.7
C	29.2±0.1	7.5±0.1	9.2±2.06	1.9±0.2	1.0±0.2
D	29.4±0.1	7.9±0.2	24.1±5.18	1.3±0.1	2.8±0.2
E	28.5±0.2	7.2±0.1	13.22±3.74	1.6±0.2	1.5±0.2
F	29.4±0.1	7.5±0.2	15.31±2.25	1.6±0.1	2.2±0.8
G	29.9±0.2	8.0±0.2	23.2±4.36	1.3±0.1	4.2±1.1
H	29.4±0.1	7.2±0.1	18.5±2.71	1.7±0.1	4.9±1.5
J	29.2±0.1	7.2±0.2	11.1±1.99	1.8±0.1	0.9±0.1

植被群落特征与大型土壤动物群落特征间也存在相关关系(图 7)。筛选得到与土壤动物丰度具有显著相关性的植被群落特征包括植被高度和植被盖度($P<0.05$),其中植被盖度与土壤动物丰度的相关性最高($R^2=0.810$)(图 7)。与土壤动物生物量显著相关的植被群落特征是植被的生物量($R^2=0.819$; $P<0.001$)(图 7)。

3 讨论

嵌草式铺装已广泛应用于城市停车场、公园及道路路面,其增强入渗、降低城市地表径流量、净化水质、改变局部区域小气候等方面的生态与环境功能已被广泛关注^[8-10]。但有关其对植被和土壤动物等生物群落的影响研究还比较少。本文以新泰市为例,调研分析了嵌草式铺装中植被和土壤动物群落组成特征,表明嵌草式铺装能够一定程度提升城市生态系统物种多样性。从研究结果来看,新泰市嵌草式铺装中分布有较高密度和生物量的草本植物,群落整体的物种多样性也较高。不同站点之间植被的群落组成、密度、生物量、植株高度和盖度等特征之间存在着明显的空间差异,如站点 C、J 的植被丰度和生物量显著偏低。结合本文调查和以往研究结果,这种差异可能是多种因素造成的。嵌草式铺装中的土壤通常为人工铺设,不同研究站点土壤质

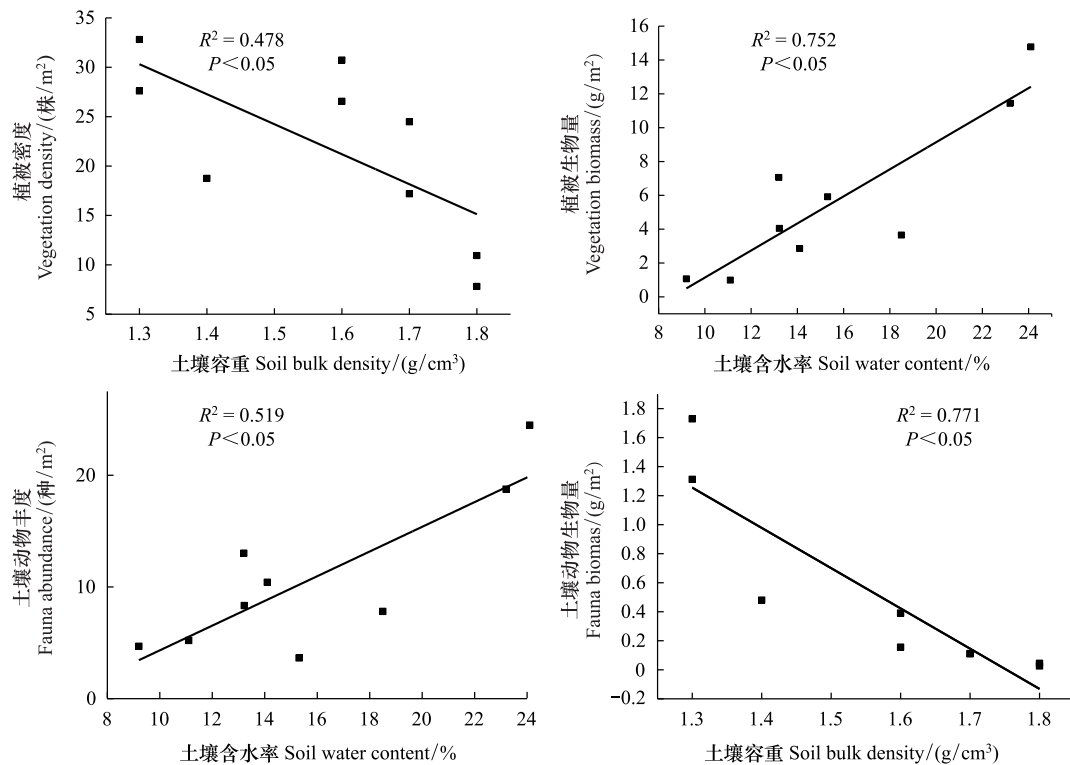


图 6 嵌草式铺装土壤理化性质与植被、土壤动物群落特征的相关关系

Fig.6 Correlations between the community characteristics and the soil properties in the grass planting pavement

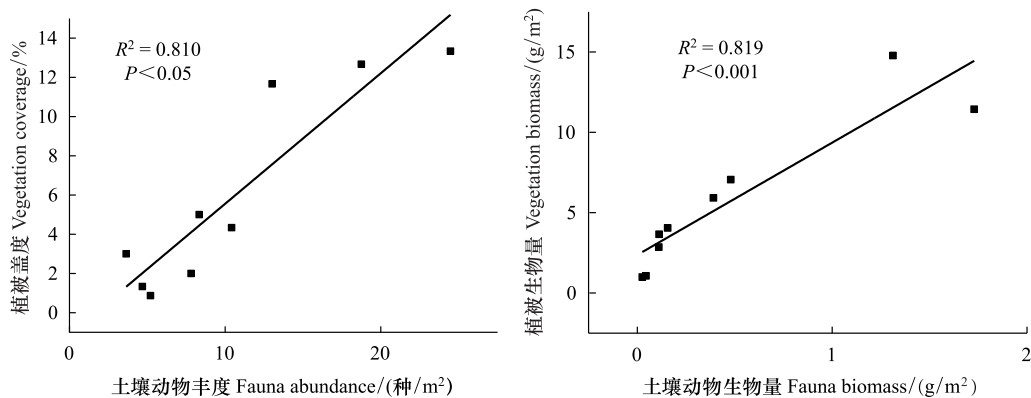


图 7 植被群落特征与大型土壤动物群落特征的相关关系

Fig.7 Correlations between the community characteristics of vegetation and soil macrofauna

地、土壤含水率、氧化还原环境等植物生长重要的生境因子往往存在差异^[17]。本文中,回归分析表明嵌草式铺装植被丰度与土壤容重呈显著负相关,而植被生物量与土壤含水率正相关关系最为密切。这与一些城市绿地等相关研究的结果较为一致^[22],土壤质地和湿度调节同样是嵌草式铺装中植被生长特征的重要因素。本文中,站点 C 的嵌草式铺装土壤容重大、质地相对坚硬,土壤较为干燥,可能是导致该站点植被丰度、生物量及多样性等指标显著偏低的主要原因。这表明,未来的城市嵌草式铺装系统的建设与日常维护,需注重维持土壤湿度、改善土壤质地。除了土壤理化因子以外,嵌草式铺装的建成时间、受干扰程度等多种因素也可能对其中的植被群落产生影响。阙彩霞^[23]的研究表明嵌草式铺装中植被的生长状况与铺装的受践踏、碾压的频率有明显的负相关关系。从本文研究结果来看,处于医院停车场的 J 站点植被的生长状况偏差。这可能是由

于医院停车场相对小区停车场车流量更大,植被受干扰强度大,导致相应站点植被丰度和生物量等指标偏低。本文调查中未能获取嵌草式铺装建成时间的定量数据,但从以往研究来看,该因素对铺装中生物群落的组成特征可能同样关键。随着群落建成后的演替,植物群落的物种组成与多样性会发生鲜明变化^[24],嵌草式铺装系统中的生物群落可能同样存在该规律。未来需结合长时间序列监测,系统探究嵌草式铺装系统中群落演替特征及其影响要素。

除了植被以外,本文结果显示嵌草式铺装中的土壤动物丰度、生物量和多样性都明显高于不透水路面,表明嵌草式铺装对物种多样性的保育功能不局限于植被。不同站点之间土壤动物的丰度、生物量也存在显著空间差异。以往研究表明大型土壤动物的群落动态与众多生境因子有关,包括适宜的温度、湿度、土壤污染状况、食物来源等^[25-26]。如韩慧莹等^[27]的研究表明,土壤动物丰度和生物量与土壤的温度、湿度等条件密切相关。相比不透水路面,嵌草式铺装表层具有相对松软的土质、较高的湿度和相对低的温度^[17,28-29],能够为土壤动物提供更适宜的生境条件,这种直接作用是造成土壤动物丰度、多样性更高的重要原因。本文的回归分析结果也显示,土壤的含水率和容重显著影响了土壤动物的丰度和生物量,其中含水率较高和土壤容重较小的嵌草式铺装中土壤动物的分布往往更加密集。众多土壤动物适宜栖息在阴暗、潮湿的环境,如本文中的鼠妇等。另一方面,植被的改变往往也能引起土壤动物等其他生物类群群落组成和多样性等特征的动态变化^[13,30-31]。本文中,回归分析的结果显示土壤动物的丰度和生物量与植被的生物量和盖度有显著的相关关系。这与以往研究结果比较一致^[29,30]。植被的生物量和盖度的变化,能够引起局部小区域的温度和湿度的变化,进而改变这类土壤动物的聚集特征^[32]。此外,一些土壤动物类群以草本植物汁液为食,如本文中的盲蝽、网蝽科动物,其对生境中植被的丰度、生物量要求较高^[33]。此外,除了土壤动物,如土壤微生物等其他类群也常受到植被变化的控制影响^[17]。因此,在铺装空隙中种植草本植物的嵌草式铺装能够对区域生态系统物种多样性维持产生重要影响,且该过程是直接和间接过程的协同作用的结果。

将嵌草式铺装广泛用于城市停车场、道路的建设可以有效地增加植被、土壤动物等群落的生境面积,进而能够提高生态系统的物种多样性、初级和次级生产力。本研究中所有站点平均的植物干重生物量约为 4.15 g/m²。尽管这个数字不大,但若广泛采用嵌草式铺装替代不透水路面将对城市生态系统产生重要影响。按照站点 E 青云花苑小区规划地上停车场面积估算(www.xintai.gov.cn),约 2000m² 的停车场整体的干重生物量将达到约 8.3 kg。假设城市中有 500 个同等规模的小区铺设嵌草式铺装,城市生态系统增加的生物量将达到 4150 kg,而在大型及特大型城市该数值将更加庞大。依托植被和土壤动物群落本身具备的重要生态功能,嵌草式铺装能够为城市生态系统提供增强碳沉降、降低城市内涝风险、改善局部气候、增加物种多样性、提升景观美感等生态系统服务。未来需结合人工建成时间、受干扰强度及气候环境因子的系统监测,在不同时空尺度上探究嵌草式铺装的生态效应及其高效合理利用途径。

参考文献(References):

- [1] 谭春阳, 匡文慧, 徐天蜀, 魏锦宏. 近 20 年上海市不透水地表时空格局分析. 测绘地理信息, 2014, 39(3): 71-74.
- [2] 王静, 苏根成, 匡文慧, 迟文峰, 陆灯盛. 特大城市不透水地表时空格局分析——以北京市为例. 测绘通报, 2014, (4): 108-112.
- [3] 任勇翔, 刘强, 王希, 赵耀龙, 王建斌, 熊家晴. 西安城区海绵城市建设设计降雨量与不透水地面分布研究. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2018, 50(1): 100-104.
- [4] 孟宪磊. 不透水面、植被、水体与城市热岛关系的多尺度研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2010.
- [5] 阙彩霞. 上海市嵌草型铺装植物筛选[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [6] Kamali M, Delkash M, Tajrishy M. Evaluation of permeable pavement responses to urban surface runoff. Journal of Environmental Management, 2017, 187: 43-53.
- [7] Dietz M E. Low impact development practices: a review of current research and recommendations for future directions. Water, Air, and Soil Pollution, 2007, 186(1/4): 351-363.
- [8] 阙彩霞, 徐冬. 人行道嵌草型铺装对夏季地表温度的影响. 福建林业科技, 2016, 43(2): 147-150.
- [9] 陈韬, 韩朦紫, 李剑洋. 嵌草铺装系统微生物群落变化研究. 给水排水, 2018, 44(10): 48-52.

- [10] 陈韬, 李剑沣, 邹子介. C/N 值对嵌草铺装系统 N 迁移转化的影响. 中国给水排水, 2018, 34(5): 115-120.
- [11] 王国良, 吴波, 杨秋玲, 贾春林, 盛亦兵. 刈割对灌草丛草地植被物种多样性和生产力的影响. 草地学报, 2012, 20(6): 1020-1025.
- [12] 包剑利, 殷秀琴, 李晓强. 长白山牛皮杜鹃凋落物分解及土壤动物的作用. 生态学报, 2015, 35(10): 3320-3328.
- [13] Pauli N, Barrios E, Conacher A J, Oberthür T. Farmer knowledge of the relationships among soil macrofauna, soil quality and tree species in a smallholder agroforestry system of western Honduras. *Geoderma*, 2012, 189-190: 186-198.
- [14] 殷秀琴, 顾卫, 董炜华, 邱丽丽, 刘永兵, 陶岩. 公路边坡人工恢复植被后土壤动物群落变化及多样性. 生态学报, 2008, 28(9): 4295-4305.
- [15] 严珺, 吴纪华. 植物多样性对土壤动物影响的研究进展. 土壤, 2018, 50(2): 231-238.
- [16] 李梦红, 黄现民, 郑家文, 诸葛玉平. 新泰市农田重金属污染现状及评价. 安徽农业科学, 2009, 37(31): 15605-15608, 15623-15623.
- [17] 李剑沣. 嵌草铺装系统中氮的迁移转化规律研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2018.
- [18] 陈怀璞, 张天雨, 葛振鸣, 张利权. 崇明东滩盐沼湿地土壤碳氮储量分布特征. 生态与农村环境学报, 2017, 33(3): 242-251.
- [19] 童春富. 长江河口潮间带盐沼植被分布区及邻近光滩鱼类组成特征. 生态学报, 2012, 32(20): 6501-6510.
- [20] 吴逢润, 童春富. 近 30 年长江口北支演变及其对物种多样性的影响. 海洋学报, 2017, 39(2): 72-85.
- [21] Tong C F, Baustian J J, Graham S A, Mendelsohn I A. Salt marsh restoration with sediment-slurry application: effects on benthic macroinvertebrates and associated soil - plant variables. *Ecological Engineering*, 2013, 51: 151-160.
- [22] Don A, Schumacher J, Scherer-Lorenzen M, Scholten T, Schulze E D. Spatial and vertical variation of soil carbon at two grassland sites—implications for measuring soil carbon stocks. *Geoderma*, 2007, 141(3/4): 272-282.
- [23] 阙彩霞. 践踏胁迫对人行道嵌草型铺装植物的表观质量影响. 现代园艺, 2016, (3): 11-13.
- [24] 王长庭, 龙瑞军, 王启兰, 刘伟, 景增春, 张莉. 三江源区不同建植年代人工草地群落演替与土壤养分变化. 应用与环境生物学报, 2009, 15(6): 737-744.
- [25] 王移, 卫伟, 杨兴中, 陈利顶, 杨磊. 我国土壤动物与土壤环境要素相互关系研究进展. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2441-2448.
- [26] Da Silva P M, Berg M P, Serrano A R M, Dubs F, Sousa J P. Environmental factors at different spatial scales governing soil fauna community patterns in fragmented forests. *Landscape Ecology*, 2012, 27(9): 1337-1349.
- [27] 韩慧莹, 殷秀琴, 寇新昌. 长白山地低山区土壤动物群落特征及其对环境因子变化的响应. 生态学报, 2017, 37(7): 2197-2205.
- [28] Nnadi E O, Newman A P, Coupe S J. Geotextile incorporated permeable pavement system as potential source of irrigation water: effects of re-used water on the soil, plant growth and development. *Clean - Soil, Air, Water*, 2014, 42(2): 125-132.
- [29] Mullaney J, Lucke T. Practical review of pervious pavement designs. *Clean-Soil, Air, Water*, 2014, 42(2): 111-124.
- [30] Yang X, Li T A, Li T C, Gan M, Chen M Y. Community characteristics and distribution patterns of soil fauna after vegetation restoration in the northern Loess Plateau. *Ecological Indicators*, 2021, 122: 107236.
- [31] Kooch Y, Noghre N. The effect of shrubland and grassland vegetation types on soil fauna and flora activities in a mountainous semi-arid landscape of Iran. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 135497.
- [32] Birkhofer K, Gossner M M, Diekötter T, Drees C, Ferlian O, Maraun M, Scheu S, Weisser W W, Wolters V, Wurst S, Zaitsev A S, Smith H G. Land-use type and intensity differentially filter traits in above-and below-ground arthropod communities. *Journal of Animal Ecology*, 2017, 86(3): 511-520.
- [33] 吴伟坚, 余金咏, 符悦冠, 沈叔平, 梁广文. 中华微刺盲蝽的食性及植物寄主分析. 热带作物学报, 2004, 25(3): 61-65.