

DOI: 10.5846/stxb201801060035

黄玉梅,张凯,孙凌霄,张健,李三月,胡贞艳,王若然,李向,熊茜,解文峰.白三叶 (*Trifolium repens*) 入侵对城市草坪生态系统土壤动物的影响.生态学报,2018,38(23): - .

Huang Y M, Zhang K, Sun L X, Zhang J, Li S Y, Hu Z Y, Wang R R, Li X, Xiong X, Xie W F. Effects of *Trifolium repens* invasion on soil animals in an urban turf ecosystem. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(23): - .

# 白三叶 (*Trifolium repens*) 入侵对城市草坪生态系统土壤动物的影响

黄玉梅<sup>1</sup>, 张 凯<sup>1</sup>, 孙凌霄<sup>1</sup>, 张 健<sup>2</sup>, 李三月<sup>1</sup>, 胡贞艳<sup>1</sup>, 王若然<sup>1</sup>, 李 向<sup>1</sup>, 熊 茜<sup>1</sup>, 解文峰<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> 四川农业大学风景园林学院, 成都 611130

<sup>2</sup> 四川农业大学林学院, 成都 611130

**摘要:**土壤动物是土壤生态系统中十分活跃的生物类群之一,也是城市草坪生态系统的重要组成部分。由于外来植物白三叶入侵,草坪土壤动物可能受到直接或间接的影响,进而改变城市草坪生态系统功能及过程。研究白三叶入侵对城市草坪生态系统土壤动物的影响,可为进一步了解外来植物入侵机制及城市草坪的建植养护提供理论依据。采用野外调查的试验方法对 4 种不同入侵程度下城市草坪的土壤动物群落特征和土壤理化性质进行了研究。结果如下:4 种不同入侵程度的草坪样地共捕获土壤动物 30,099 只,隶属于 19 目 43 科,其中小杆科、线蚓科和跳虫科为优势类群;土壤动物个体数量和类群数量整体表现为中度入侵>轻度入侵>对照>重度入侵,符合中度干扰假说;土壤动物个体数量和类群数量的季节动态主要表现为夏秋较高,冬春较低。CCA 分析显示,土壤理化因子中铵态 N 对土壤动物影响相对较小,可能与白三叶改善了草坪土壤的供 N 水平并使其不成为土壤动物分布的限制因子有关;同时,土壤理化因子对土壤动物优势类群影响较小,而主要影响常见和稀有类群。总体而言,一定程度的白三叶入侵增加了土壤动物群落的多样性,但当达到重度入侵时,白三叶形成单优群落,减少了植物多样性,进而使土壤动物可获得的生活资源减少,土壤动物群落多样性呈下降趋势;白三叶入侵后通过改变土壤理化性质,影响到土壤动物常见和稀有类群,并最终改变草坪土壤动物的群落结构。

**关键词:**白三叶;入侵;城市草坪;土壤动物;土壤理化性质

## Effects of *Trifolium repens* invasion on soil animals in an urban turf ecosystem

HUANG Yumei<sup>1</sup>, ZHANG Kai<sup>1</sup>, SUN Lingxia<sup>1</sup>, ZHANG Jian<sup>2</sup>, LI Sanyue<sup>1</sup>, HU Zhenyan<sup>1</sup>, WANG Ruoran<sup>1</sup>, LI Xiang<sup>1</sup>, XIONG Xi<sup>1</sup>, XIE Wenfeng<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> College of Landscape Architecture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

<sup>2</sup> College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

**Abstract:** Soil animals are not only one of most active components of the biome in soil ecosystems, but also are an important part of urban turf ecosystems. The invasion of *Trifolium repens* L. may result in direct or indirect undesirable impacts on both turfgrass growth and the below-ground soil fauna, which somewhat alter the functions and processes of urban turf soil ecosystem. Therefore, research on the responses of soil fauna to the invasion of *T. repens* could not only help us to further understand the mechanisms of exotic plant invasion in urban turf ecosystems, but also to provide a practical and theoretical basis for turf establishment and maintenance. In this study, we analyzed the soil animal community structures and the soil physicochemical properties in four sampling areas with varying invasion intensities of *T. repens* using field

基金项目:国家自然科学基金项目(31370628);四川省教育厅重点项目(16ZA0031)

收稿日期:2018-01-06; 修订日期:2018-08-21

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xwenfeng@sicau.edu.cn

investigation methods. A total of 30,099 individual soil animals, belonging to 19 orders and 43 families, were collected. Among these soil animals, the dominant families present were Rhabditidae, Enchytraeidae, and Poduridae. The number of soil animal individuals and groups were significantly different and showed the following order among the four sampling areas: moderate invasion>mild invasion>control>severe invasion. This phenomenon is consistent with the intermediate disturbance hypothesis. Furthermore, we found that the number of soil animal individuals and groups was higher in summer and autumn than in spring and winter. A canonical correspondence analysis indicated that ammonium nitrogen concentration was not the environmental limitation factor for soil fauna distribution, which presumably resulted from the nitrogen fixation ability of *T. repens*. Our results also showed that soil physicochemical factors mainly affected common and rare groups of soil fauna, but had little influence on the dominant groups. In summary, our results demonstrated that the invasion of *T. repens* with a mild degree increased the diversity of soil fauna. With the increase of invasion intensity, the turf was gradually dominated by *T. repens* and the plant diversity decreased, which led to a shortage of available resource for soil fauna and resulted in a decline in soil animal community diversity. We hypothesized that the invasion of *T. repens* would influence the quantity and structure of common and rare groups of soil fauna, and would ultimately affect the community characteristics of soil animals by changing soil physicochemical properties.

**Key Words:** *Trifolium repens*; invasion; urban turf; soil animal; soil physicochemical property

外来生物入侵是全球性问题,业已给入侵地的生态环境、生物多样性及经济造成了显著影响,甚至巨大危害。据资料显示,全球每年因外来生物入侵造成的经济损失高达数千亿美元,仅我国就达 574 亿元<sup>[1-2]</sup>。外来植物成功侵入后,不仅对本土植物构成威胁,还会对该生态系统中其他生物,如大型脊椎动物、土壤无脊椎动物、土壤微生物,以及土壤理化性质等产生直接或间接影响<sup>[3-4]</sup>。目前,有关外来植物入侵对生态环境和生物多样性的影响已有许多研究<sup>[3-6]</sup>,但主要集中于农田、森林、湖泊等生态系统,并且主要关注其对地上物种的影响,而对城市生态系统以及土壤生态系统尤其是土壤生物的影响鲜有报道<sup>[7]</sup>。

土壤动物是土壤生态系统中最活跃的生物类群之一,不但起着联结地上/地下物质循环和能量流动的桥梁纽带作用,而且还对地上生态系统的结构、功能及过程具有重要的反馈调控作用<sup>[8-10]</sup>,因此,土壤动物群落特征常常作为反映整个生态系统质量状况的重要生物学指标<sup>[10-12]</sup>。

白三叶(*Trifolium repens* L.),为豆科植物,原产于欧洲,最早作为优质牧草引入我国<sup>[13]</sup>,因其颜色葱绿、适应性强<sup>[14-15]</sup>,上世纪末曾在北方地区被广泛用于城市园林草坪建植<sup>[16-17]</sup>。但现有研究发现,该植物同时也具有很强入侵性和排他性,极易对周边生态环境和混种植物产生负面影响,从而显著降低群落的生物多样性<sup>[18]</sup>。目前,白三叶已成为我国西南地区城市草坪的主要入侵植物之一<sup>[19]</sup>。本试验通过对白三叶不同入侵程度的城市草坪生态系统进行野外调查,研究入侵地土壤动物群落特征和土壤理化性质变迁,探讨白三叶入侵的土壤生物学机制,其结果将为城市草坪景观的建造和维护提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 样地概况

样地位于四川省成都市温江区(30°36'—30°52'N, 103°41'—103°55'E),该区四季分明,气候温和,雨量充沛,日照偏少,无霜期较长。年均温 16.0℃,年降雨量 865.9 mm,年均日照时数 991.1 h。草坪主要草种为高羊茅(*Festuca elata* Keng ex E. B. Alexeev),主要入侵植物为白三叶,主要土壤类型为冲积土和稻田土。各草坪均建植于 2008 年前后,管理水平中等,定期修剪和浇水,人为干扰较轻,样地立地条件基本一致。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 样地设置

在成都市温江区选择 3 块草坪作为样地(距离大于 3 km),每块样地根据入侵程度不同,设置 4 个调查小区(距离大于 50 m),分别设对照区(O 型)、轻度入侵区(I 型)、中度入侵区(II 型)、重度入侵区(III 型)<sup>[20]</sup>。

O型:无白三叶入侵,高羊茅成片均匀分布;I型:白三叶盖度为10%—30%,零星分布,高羊茅基本成片;II型:白三叶盖度为40%—60%,高羊茅与白三叶呈团块状镶嵌分布;III型:白三叶盖度为70%以上,成片分布,高羊茅零星分布,生长稀疏。分别于2016年7月、10月,2017年1月、4月中旬进行调查采样

### 1.2.2 样品采集与分离

①大型土壤动物(体长>2 mm):在每个调查小区挖取面积30 cm×30 cm,深度为5 cm的土壤,重复3次。用手捡法将大型土壤动物捡至盛有75%酒精的容器中,带回实验室鉴定至科,并记录数据。②中小型干生土壤动物(体长0.2—2 mm):在每个调查小区选取面积为10 cm×10 cm的土壤,用100 mL环刀取样,取样深度5 cm,重复3次,装入黑布袋中并编号。实验室内用Tullgren干漏斗法进行分离,在解剖镜下鉴定土壤动物至科,并记录数据。③中小型湿生土壤动物(体长0.2—2 mm):在每个调查小区选取面积为10 cm×10 cm的土壤,用50 mL环刀取样,取样深度5 cm,重复3次,装入黑布袋中并编号。实验室内用Baermann湿漏斗法进行分离,在解剖镜下鉴定土壤动物至科,并记录数据。④土壤指标:测定土壤含水率、pH值及铵态N、速效P、速效K的浓度。含水率测定采用烘干法,pH测定采用电位法,铵态N浓度测定采用纳氏比色法,速效P浓度测定采用钼锑抗比色法(0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub>浸提),速效K浓度测定采用火焰光度法<sup>[21-22]</sup>。

### 1.3 数据分析

1.3.1 土壤动物类群数量等级划分个体数占土壤动物群落个体总数比例大于等10%的类群为优势类群;占群落个体总数1%—10%者为常见类群;小于1%为稀有类群<sup>[23]</sup>。

1.3.2 数据分析和整理采用EXCEL2010进行数据整理并作图;采用SPSS17.0进行单因素方差分析(one-way ANOVA),对土壤动物群落特征作差异显著性检验,并用最小显著差异法(LSD)作多重比较;采用Canoco for windows 4.5对土壤动物与环境因子进行典范对应分析(Canonical correspondence analysis, CCA)。

## 2 结果与分析

### 2.1 白三叶不同入侵程度下土壤动物群落组成

由表1、2、3可知,白三叶不同入侵程度的调查样地共捕获土壤动物30,099只,隶属于19目43科。个体数量表现为中度入侵(8224)>轻度入侵(7707)>对照(7190)>重度入侵(6978)。类群数量表现为中度入侵(40)>轻度入侵(39)=重度入侵(39)>对照(36)。其中小杆科、线蚓科和跳虫科为成都市温江区草坪土壤动物的优势类群,其个体数量占总数的55.8%。常见土壤动物类群有棘虫兆科、垫刃科、厉螨科、丽甲螨科、驼虫兆科等8个科,个体数量占总数的38.4%。其余32个科均为稀有类群,其个体数量仅占总数的5.8%。

成都市温江区白三叶入侵草坪中,大型土壤动物的优势类群为蚁科、正蚓科、地蛛科和狼蛛科,占总数的56.6%;常见类群为地蜈蚣科、潮虫科、象甲科、夜蛾科幼虫、姬马陆科和木蠹科,占总数的41.9%;钻头螺科和苔甲科为稀有类群,占总数的1.5%。中小型干生土壤动物中优势类群为跳虫科、棘虫兆科、厉螨科和丽甲螨科,占总数的77.3%;常见类群为驼虫兆科、长角长虫兆科、隐颚螨科及厚厉螨科,占总数的18.9%;其余为稀有类群,如矮蒲螨科、圆虫兆科等,占总数的3.8%。中小型湿生土壤动物中优势类群为小杆科、线蚓科和垫刃科,占总数的98.9%;其余为稀有类群,如仙女虫科、双翅目幼虫等,占总数的1.1%。

### 2.2 白三叶不同入侵程度下土壤动物多样性的季节动态

如图1所示,不同入侵程度的白三叶群落一年中对土壤动物类群数量影响不一。对照组类群数量较低,其他入侵程度的土壤动物类群数量相似;土壤动物类群数量的季节动态特点表现为,夏季和秋季最高,冬季迅速减少,冬末至春季略有上升。方差分析表明,白三叶不同入侵程度下,草坪土壤动物类群数量有极显著差异( $F=10.469, P<0.01$ ),并且在不同季节间存在显著差异( $F=3.424, P<0.05$ )。中度入侵草坪中,土壤动物的个体数量明显高于其余3种处理;草坪土壤动物个体数量的季节动态总体表现特点是,夏季土壤动物个体数最多,秋季逐渐减少,冬季土壤动物最少,春季逐渐增加。方差分析结果显示,白三叶不同入侵程度间草坪土壤动物个体数量存在极显著差异( $F=8.501, P<0.01$ ),不同季节间也存在极显著差异( $F=7.371, P<0.01$ )。

表 1 成都温江区草坪大型土壤动物种类和分布  
Table 1 The composition of turf soil macrofauna in Wenjiang district, Chengdu

目 Order	食性 Diet	科 Family	重度入侵 Severe invasion		中度入侵 Moderate invasion		轻度入侵 Mild invasion		对照 Control		总个体数 Total individual number	%
			个体数 Individual number	%	个体数 Individual number	%	个体数 Individual number	%	个体数 Individual number	%		
鞘翅目 Coleoptera	Pr	苔甲科 Scydmaenidae	3	1.5	2	0.6	2	0.8	0	0	7	0.7
	Ph	象甲科 Curculionidae	9	4.4	14	4.4	11	4.6	23	12.6	57	6.0
	Ph	叩甲科 Elateridae	1	0.0	3	0.9	7	2.9	8	4.4	19	2.0
地蜈蚣目 Geophilomorpha	Pr	地蜈蚣科 Geophilidae	25	12.2	29	9.1	16	6.6	19	10.4	89	9.4
	Ph	木虱科 Kalotermitidae	0	0.0	12	3.8	20	8.3	21	11.5	53	5.6
等翅目 Isoptera	Pr	狼蛛科 Lycosidae	36	17.6	24	7.5	40	16.6	26	14.2	126	13.3
	Pr	蜘蛛科 Atypidae	33	16.1	42	13.1	27	11.2	28	15.3	130	13.7
鳞翅目 Lepidoptera	Ph	夜蛾科幼虫 Noctuidae	2	1.0	22	6.9	16	6.6	10	5.5	50	5.3
	Sa	正蛎科 Lumbricidae	28	13.7	44	13.8	33	13.7	24	13.1	129	13.6
等足目 Isopoda	Sa	潮虫科 Oniscidae	13	6.3	29	9.1	28	11.6	9	4.9	79	8.3
	O	蚁科 Formicidae	34	16.6	77	24.1	26	10.8	15	8.2	152	16.0
姬马陆目 Julida	Sa	姬马陆科 Julidae	18	8.8	17	5.3	15	6.2	0	0	50	5.3
	Ph	钻头螺科 Subulinidae	3	1.5	5	1.6	0	0	0	0	8	0.8
柄眼目 Stylommatophora	总个体数 Total individual number		205		320		241		183		949	
	类群数 Group number		12		13		12		10		13	

Pr: 捕食性, Predatory; Sa: 腐食性, Saprophagous; Ph: 植食性, Phytophagous; O: 杂食性, Omnivorous

表 2 成都温江区草坪中小型干生土壤动物种类和分布

目 Order	食性 Diet	科 Family	重度入侵 Severe invasion		中度入侵 Moderate invasion		轻度入侵 Mild invasion		对照 Control		总个体数 Total individual number	%
			个体数 Individual number	%	个体数 Individual number	%	个体数 Individual number	%	个体数 Individual number	%		
弹尾目 Collembola	Sa	跳虫科 Poduridae	835	30.4	1026	28.2	885	26.0	892	28.5	3638	28.2
	Sa	棘虫兆科 Onychiuridae	585	21.3	898	24.7	770	22.6	657	21.0	2910	22.5
	Sa	长角长虫兆科 Orchesellidae	163	5.9	260	7.1	88	2.6	28	0.9	539	4.2
	Sa	驼虫兆科 Cyphoderidae	141	5.1	193	5.3	172	5.1	158	5.1	664	5.1
	Sa	圆虫兆科 Sminthuridae	18	0.7	12	0.3	12	0.4	6	0.2	48	0.4
	Pr	赤螨科 Erythraeidae	39	1.4	61	1.7	25	0.7	21	0.7	146	1.1
	Sa	矮蒲螨科 Pigmephoridae	14	0.5	36	1.0	21	0.6	16	0.5	87	0.7
	Sa	莓螨科 Rhagidiidae	25	0.9	12	0.3	16	0.5	7	0.2	60	0.5
	Pr	隐颚螨科 Cryptognathidae	34	1.2	133	3.7	194	5.7	179	5.7	540	4.2
	Sa	美绥螨科 Ameroseiidae	0	0	2	0.1	2	0.1	8	0.3	12	0.1
中气门亚目 Mesostigmata	Pr	足角螨科 Podocemidae	8	0.3	16	0.4	13	0.4	20	0.6	57	0.4
	Pr	派盾螨科 Parholaspididae	11	0.4	17	0.5	20	0.6	39	1.2	87	0.7
	Sa	维螨科 Veigaiidae	5	0.2	6	0.2	9	0.3	2	0.1	22	0.2
	Pr	厚厉螨科 Pachylaelapidae	167	6.1	181	5.0	107	3.1	106	3.4	561	4.3
	Pr	厉螨科 Laelapidae	274	10.0	357	9.8	663	19.5	719	23.0	2013	15.6
	Sa	丽甲螨科 Liacaridae	418	15.2	415	11.4	376	11.0	215	6.9	1424	11.0
	Sa	懒甲螨科 Nothridae	0	0.0	0	0.0	0	0.0	9	0.3	9	0.1
	Sa	狭虫八科 Japygidae	7	0.3	8	0.2	13	0.4	0	0.0	28	0.2
	Sa	副狭虫八科 Parajapygidae	0	0.0	0	0.0	0	0.0	7	0.2	7	0.1
	Ph	木蟹科 Kalotermitidae	4	0.1	0	0.0	1	0.0	20	0.6	25	0.2
鞘翅目 Coleoptera	Pr	隐翅甲科 Staphylinidae	2	0.1	4	0.1	18	0.5	18	0.6	42	0.3
	Ph	锯谷盗科 Silvanidae	1	0.0	3	0.1	0	0.0	0	0.0	4	0.0
		总个体数 Total individual number	2751		3640		3405		3127		12923	
		类群数 Group number	19		19		19		20		22	

表 3 成都温江区草坪中小型湿生土壤动物种类和分布  
 Table 3 The composition of turf soil meso-microfauna (Baermann method) in Wenjiang district, Chengdu

目 Order	食性 Diet	科 Family	重度入侵 Severe invasion		中度入侵 Moderate invasion		轻度入侵 Mild invasion		对照 Control		总个体数 Total individual number	%
			个体数 Individual number	%	个体数 Individual number	%	个体数 Individual number	%	个体数 Individual number	%		
垫刃目 Tylenchida	Sa	垫刃科 Tylenchidae	677	16.8	922	21.6	819	20.1	481	12.4	2899	17.9
小杆目 Rhabditida	Sa	小杆科 Rhabditidae	1928	47.9	2016	47.3	1875	46.2	1895	48.8	7714	47.5
色矛目 Chromadorida	Sa	杯咽科 Cyatholaimidae	0	0.0	4	0.1	10	0.2	0	0.0	14	0.1
颤蚓目 Tubificida	Sa	仙女虫科 Naididae	15	0.4	12	0.3	21	0.5	28	0.7	76	0.5
	Sa	线蚓科 Enchytraeidae	1384	34.4	1269	29.8	1325	32.6	1460	37.6	5438	33.5
	Sa	颤蚓科 Tubificidae	1	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	1	0.0
双翅目 Diptera	Sa	摇蚊科幼虫 Chironomidae	4	0.1	17	0.4	1	0.0	0	0.0	22	0.1
	Sa	尖翅蝇科幼虫 Lonchopleridae	10	0.2	23	0.5	8	0.2	12	0.3	53	0.3
	Sa	尖眼蕈蚊科幼虫 Sciardae	3	0.1	1	0.0	2	0.0	4	0.1	10	0.1
		总个体数 Total individual number	4022		4264		4061		3880		16227	
		类群数 Group number	8		8		8		7		9	

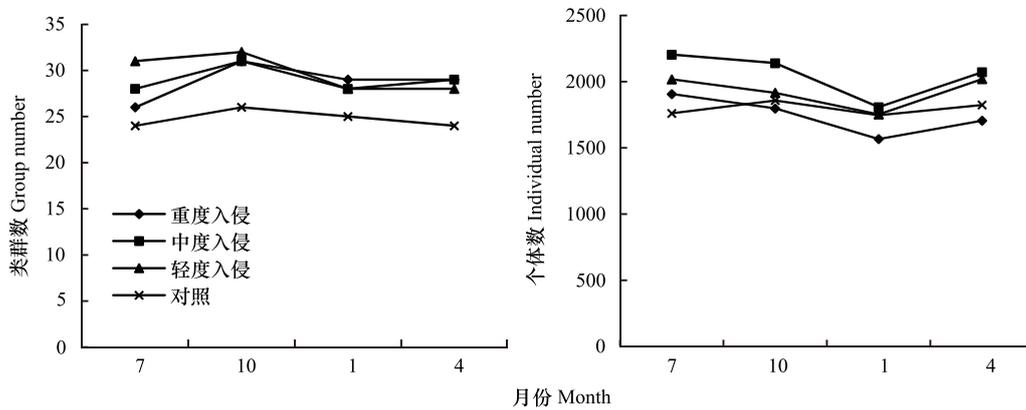


图 1 不同入侵程度下草坪土壤动物类群数量和个体数量的季节动态

Fig.1 The seasonal dynamics of turf soil animal groups and individuals with various invasion levels of *Trifolium repens*

## 2.3 白三叶不同入侵程度下土壤动物与土壤环境因子的 CCA 分析

### 2.3.1 大型土壤动物 CCA 分析

大型土壤动物 CCA 排序结果如表 4 所示。其中, pH 值、含水率和速效 K 与第 1 排序轴相关性较高,速效 P 与第 2 排序轴相关性较高,铵态 N 与第 3 排序轴相关性较高;前两个排序轴对大型土壤动物与土壤环境因子关系的累计解释量分别为 42.6% 和 68.3%,表明大型土壤动物和土壤环境因子之间存在较为密切的关系,大型土壤动物的分布能在一定程度上反映出土壤环境因子的变化。

表 4 土壤环境因子与排序轴的相关性

Table 4 Correlation of soil environmental variables with axes

环境因子 Environmental factor	大型土壤动物 Soil macrofauna			中小型干生土壤动物 Meso-microsoil fauna (Tullgren)			中小型湿生土壤动物 Meso-microsoil fauna (Baermann)		
	排序 1	排序 2	排序 3	排序 1	排序 2	排序 3	排序轴 1	排序轴 2	排序轴 3
	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Axis 1	Axis 2	Axis 3
pH 值 pH value	-0.6323	-0.3629	-0.2414	0.3493	-0.1849	-0.2506	-0.1874	-0.3767	-0.1591
含水率 Water ratio	0.5849	-0.4669	-0.0396	-0.3752	0.6064	-0.0060	0.5905	-0.2034	0.3273
铵态 N Ammonium N	-0.1984	-0.2991	0.6035	0.1000	-0.0889	0.4505	0.5292	0.0527	-0.4397
速效 K Available K	0.5395	0.2456	-0.4698	-0.6528	0.0836	-0.3761	-0.1391	-0.3097	0.2650
速效 P Available P	-0.4576	0.7013	0.0100	0.3665	-0.5392	-0.2975	-0.5838	0.2083	-0.4350

由图 2 可以看出,土壤环境因子对地蛛科、地蜈蚣科和夜蛾科幼虫等影响较小,这些物种分布在排序图原点附近,表明它们适应环境的能力较强;姬马陆科与土壤 pH 值存在相关性;狼蛛科与铵态 N 关系紧密;甲甲科和象甲科受土壤含水率影响较大;蚁科和苔甲科与速效 P 存在相关性;潮虫科和正蚓科受速效 P 和速效 K 的共同影响。总体看来,在前两个排序轴上,速效 P、含水率及 pH 值对大型土壤动物影响较大,而铵态 N 影响相对较小。

### 2.3.2 中小型干生土壤动物 CCA 分析

中小型干生土壤动物与土壤环境因子 CCA 排序结果显示(表 4),速效 K 与第 1 排序轴相关性较高,二者呈负相关;含水率、速效 P 与第 2 排序轴相关性较高,其中,含水率与第 2 排序轴呈正相关,而速效 P 则呈负相关;铵态 N 与第 3 排序轴相关性较高。前两个排序轴分别累计解释了中小型干生土壤动物与土壤环境因子关系的 54.3% 和 82.1%,表明二者之间存在较为密切的关系,土壤环境因子的变化能在一定程度上影响中小型干生土壤动物的分布。

如图 3 所示,土壤 pH 值、含水率及铵态 N、速效 K 和速效 P 浓度对跳虫科、棘虫兆科和丽甲螨科等优势类群影响较小,它们分布在排序图原点附近,表明具有较强的适应力;隐颚螨科和派盾螨科与速效 K 存在相

关性;厉螨科受速效 K 与含水率影响较大;赤螨科、莓螨科与 pH 值、铵态 N 及速效 P 均存在相关性。总体而言,在第 1 排序轴和第 2 排序轴上,含水率、速效 P 及速效 K 对中小型干生土壤动物影响较大,而铵态 N 影响相对较小,与大型土壤动物相似。

### 2.3.3 中小型湿生土壤动物 CCA 分析

中小型湿生土壤动物与土壤环境因子排序结果显示,含水率、铵态 N 与第 1 排序轴呈正相关,而速效 P 与第 1 排序轴呈负相关;pH 值、速效 K 与第 2 排序轴相关性高于第 1 排序轴(表 4)。前两个排序轴对中小型湿生土壤动物与土壤环境因子关系的累计解释量分别为 54.7% 和 82.1%,表明二者之间存在较为密切的关系,中小型湿生土壤动物的分布能较好地反映土壤环境因子的变化。

由图 4 可以看出,土壤环境因子对小杆科、线蚓科等优势类群影响较小,这些物种分布在排序图原点附近,表明其对环境具有较强的适应性;垫刃科、尖翅蝇科同时受速效 P、速效 K 和 pH 值的影响;杯咽科与 pH 值、速效 K 存在相关性;尖眼蕈蚊科与含水率相关较为紧密。总体而言,含水率、速效 P 等环境因子在第 1 排序轴和第 2 排序轴上,对中小型湿生土壤动物影响较大,而铵态 N、pH 值和速效 K 影响相对较小。

### 3 结论与讨论

本试验调查研究了白三叶不同入侵程度下草坪样地中土壤动物的群落结构,发现线虫类、蜱螨类和弹尾类为各种入侵程度土壤生态系统中共有的优势类群,这与杨晓东<sup>[24]</sup>、王振中<sup>[25]</sup>、王军<sup>[26]</sup>等人研究结果吻合。调查还发现白三叶入侵对草坪土壤动物个体数量的影响大于对土壤动物类群数量的影响,总体呈现出中度入侵>轻度入侵>对照>重度入侵的趋势,说明白三叶中度入侵在一定程度上能提高草坪土壤动物的个体数量,这与国外一些研究相似<sup>[27-29]</sup>。比如,新西兰次南极区群岛有外来植物入侵的生态系统中,其大型无脊椎动物和蜱螨类土壤动物的数量多于只有土著植物的生态系统<sup>[27]</sup>;美国有飞机草(*Chromolaena odorata*)入侵的桉树林单位面积的蚯蚓个体数量远远多于没有入侵的桉树林<sup>[29]</sup>。白三叶中度入侵对草坪土壤动物的个体数量有促进作用,可能与入侵植物的生物学特性和入侵地土壤理化性质发生变化有关<sup>[27]</sup>。一定数量的白三叶入侵后,改变了草坪生态系统的植物群落结构,使入侵地的生物资源发生改变,丰富了土壤动物的食物来源,同时,白三叶枯死后形成的较之高羊茅更易分解的凋落物,可能在某种程度上加快了土壤养分循环,优化了土壤质量<sup>[30]</sup>,从而使土壤动物个体数量有所增加。

白三叶入侵城市草坪实际是一种干扰作用。本试验结果表明,白三叶中度入侵的草坪土壤动物多样性整体高于其他入侵程度,符合中度干扰理论<sup>[31-32]</sup>。究其原因,白三叶入侵草坪生态系统时经历了数量上由少到多、程度上由轻至重的过程,最初,轻度入侵的白三叶增加了草坪植物多样性,提高了地上部分初级生产力,同时通过凋落物分解使数量更多、种类更丰富的植物残体进入土壤中,土壤环境有利于土壤动物生存,土壤动物的群落多样性呈上升趋势;随着白三叶入侵面积的增加,逐渐形成中度入侵,多样的食物资源及栖居环境促使土壤动物的个体数量和类群数量达到最高值;随着入侵程度的进一步加重,白三叶大面积占据草坪,基本形成单优群落,严重挤占了土著植物的生存空间,植物多样性下降,草坪草长期不能获得充足光照,植株生长低矮。

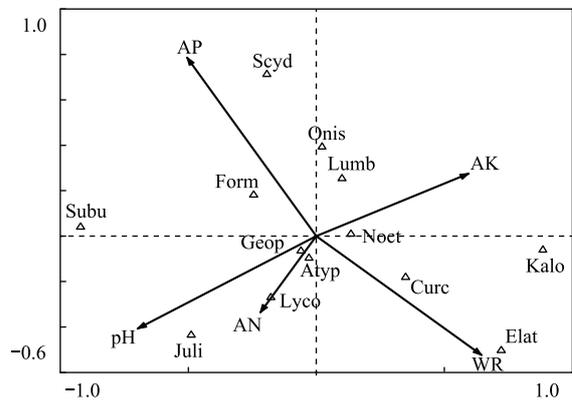


图 2 草坪土壤中的大型土壤动物 CCA 排序

### Fig.2 Canonical correspondence analysis of turf soil macrofauna

Elat: 叩甲科, Elateridae; Curc: 象甲科, Curculionidae; Scyd: 苔甲科, Scydmaenidae; Geop: 地蜈蚣科, Geophilidae; Kalo: 木虱科, Kalotermitidae; Lycp: 狼蛛科, Lycosidae; Atyp: 地蛛科, Atypidae; Noet: 夜蛾科幼虫, Noctuidae larva; Lumb: 正蚓科, Lumbricidae; Onis: 潮虫科, Oniscidae; Form: 蚁科, Formicidae; Juli: 姬马陆科, Julidae; Subu: 钻头螺科, Subulinidae; pH: 酸碱度, pH value; WR: 含水率, Water ratio; AP: 速效 P, Available P; AK: 速效 K, Available K; AN: 铵态 N, Ammonium N

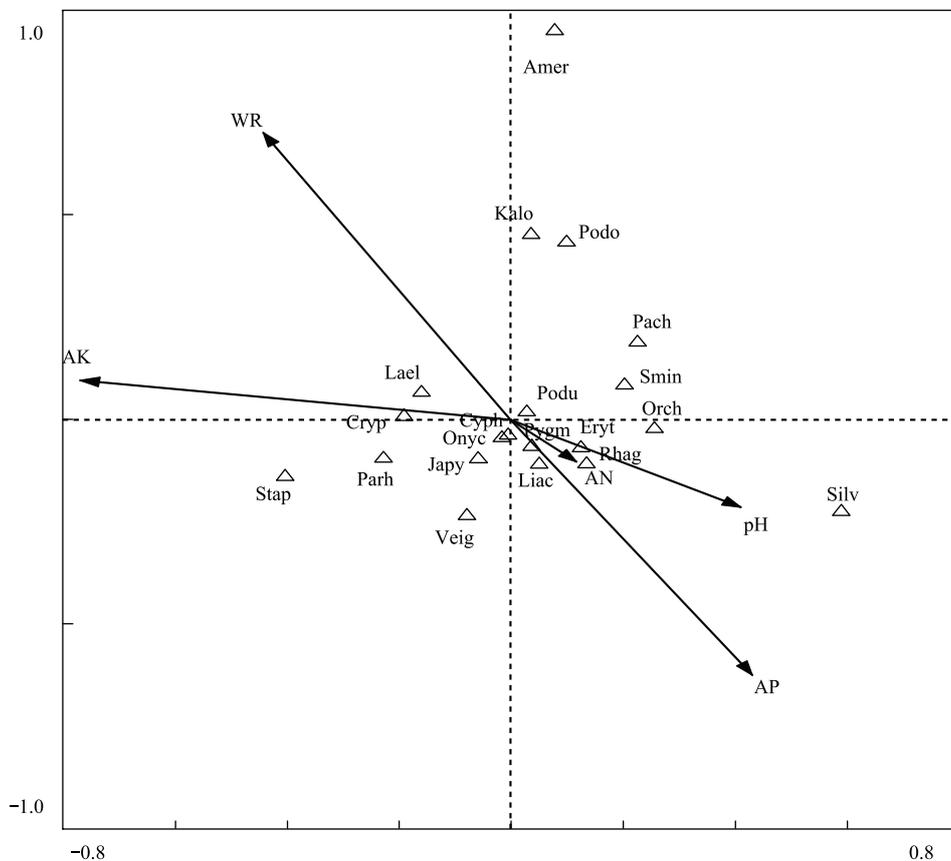


图3 草坪土壤中的中小型干生土壤动物 CCA 排序

Fig.3 Canonical correspondence analysis of turf soil meso-microfauna (Tullgren method)

Onyc: 棘虫兆科, Onychiuridae; Podu: 跳虫科, Poduridae; Smin: 圆虫兆科, Sminthuridae; Kalo: 木蠹科, Kalotermitidae; Orch: 长角长虫兆科, Orchesellidae; Cyph: 驼虫兆科, Cyphoderidae; Veig: 维螨科, Veigiidae; Lael: 厉螨科, Laelapidae; Liac: 丽甲螨科, Liacaridae; Pygm: 矮蒲螨科, Pygmephoridae; Podo: 足角螨科, Podocinidae; Eryt: 赤螨科, Erythraeidae; Cryp: 隐颚螨科, Cryptognathidae; Parh: 派盾螨科, Parholaspidae; Rhag: 莓螨科, Rhagidiidae; Amer: 美绥螨科, Ameroseiidae; Japy: 铗虫八科, Japygidae; Pach: 厚厉螨科, Pachylaelapidae; Stap: 隐翅甲科, Staphylinidae; Silv: 锯谷盗科, Silvanidae

加之,随着白三叶生物量的不断累积,其化感作用愈发显现,不仅抑制地上草坪草生长,同时其分泌产生的化感物质对土壤动物新陈代谢及生理生化活动也产生不利影响(未发表的数据),从而导致白三叶重度入侵下城市草坪中土壤动物的个体数量减至最低。

土壤动物群落的季节性动态变化可受到各种环境因子的影响,例如降水、土壤类型、光照、温度等<sup>[33]</sup>。本试验中,草坪土壤中动物群落的类群数量和个体数量明显受季节变化影响,总体表现为夏季和秋季土壤动物的类群数量和个体数量显著高于春季和冬季。夏季雨水丰沛,温度较高,适宜草坪土壤动物生存,其个体数量和类群数量均达到全年最高值;而秋季虽然温度略有降低,但凋落物有所增加,为土壤动物提供了较为丰富的食物来源,因此土壤动物的个体数量和类群数量仍维持较高水平;冬季植被稀疏,土壤表层温度骤降,生存环境恶劣,土壤动物的个体数量和类群量跌至最低值;春季万物复苏,植物茂盛生长,为土壤动物提供了适宜的栖居环境,其个体数量和类群数量呈现上升趋势。

研究表明,外来入侵植物一方面通过改变土著植物的初级生产力以及植物组织化学特性,使土壤动物所需生活资源发生变化<sup>[34-35]</sup>。另一方面,通过根系分泌物、凋落物等改变土壤理化性质<sup>[36-37]</sup>,进而影响土壤动物群落结构<sup>[38-40]</sup>。本试验中,CCA分析显示,白三叶不同入侵程度下土壤含水率、速效P及pH值对各体型土壤动物影响较大,而铵态N影响相对较小,可能的原因是白三叶为豆科固氮植物,一定程度上改善了草坪土壤的供氮水平,使N不成为土壤动物分布的限制因子。但同时,白三叶的快速扩张改变了土壤容重、土壤温

度以及土壤水分等环境条件,进而影响到与土壤养分循环有关的微生物群落结构和相关土壤酶活性,并通过土壤生物间的相互作用最终影响到土壤动物的分布<sup>[37,41]</sup>。CCA 排序还显示,白三叶入侵后,土壤理化因子的改变对地蛛科、地蜈蚣科、跳虫科、棘虫兆科、小杆科及线蚓科等优势类群影响较小,对常见和稀有类群影响较大,表明土壤动物优势类群往往具有更强的适应力,对环境变化具有更高的耐受性,而常见或稀有类群则对环境变化更敏感,因此常作为监测环境的生物学指标之一。

目前,关于外来植物入侵的研究大多集中于农田、湖泊、湿地、荒漠等生态系统,而缺少对城市草坪生态系统的关注。草坪是城市园林绿化中十分重要的形式,白三叶入侵不但对城市草坪景观造成严重破坏,增加养护成本,同时还对草坪土壤生态系统产生直接或间接影响。因此,通过研究白三叶入侵对城市草坪中各类土壤动物的影响,可进一步探明外来植物的入侵机制,为城市草坪生态系统建植养护及杂草防除提供一定的理论基础。当然,本文仅进行了为期一年的野外调查,白三叶入侵的长期效应如何? 以及土壤动物群落对白三叶化感物质直接作用的响应怎样? 尚需进一步深入研究。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Wilcove D S, Rothstein D, Dubow J, Phillips A, Losos E. Quantifying threats to imperiled species in the United States; assessing the relative importance of habitat destruction, alien species, pollution, overexploitation, and disease. *BioScience*, 1998, 48(8): 607-615.
- [ 2 ] Enserink M. Biological invaders sweep in. *Science*, 1999, 285(5435): 1834-1836.
- [ 3 ] Pimentel D, Lach L, Zuniga R, Morrison D. Environmental and economic costs of nonindigenous species in the United States. *BioScience*, 2000, 50(1): 53-65.
- [ 4 ] Callaway R M, Aschehoug E T. Invasive plants versus their new and old neighbors; a mechanism for exotic invasion. *Science*, 2000, 290(5491): 521-523.
- [ 5 ] Rhymer J M, Simberloff D. Extinction by hybridization and introgression. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1996, 27: 83-109.
- [ 6 ] Simpson E H. Measurement of diversity. *Nature*, 1949, 163(4148): 688-688.
- [ 7 ] 陈慧丽,李玉娟,李博,陈家宽,吴纪华. 外来植物入侵对土壤生物多样性和生态系统过程的影响. *生物多样性*, 2005, 13(6): 555-565.
- [ 8 ] 尹文英. 土壤动物学研究的回顾与展望. *生物学通报*, 2001, 36(8): 1-3.
- [ 9 ] 杨冬青,高峻. 城市生态系统中土壤动物研究及应用进展. *生态学杂志*, 2002, 21(5): 54-57.
- [ 10 ] 葛宝明,程宏毅,郑祥,孔军苗,鲍毅新. 浙江金华不同城市绿地大型土壤动物群落结构与多样性. *生物多样性*, 2005, 13(3): 197-203.
- [ 11 ] 彭涛,欧阳志云,文礼章,郑华. 北京市海淀区土壤节肢动物群落特征. *生态学杂志*, 2006, 25(4): 389-394.
- [ 12 ] 朱文泉,何兴元,陈玮. 城市森林研究进展. *生态学杂志*, 2001, 20(5): 55-59.
- [ 13 ] 董宽虎,沈益新. 饲草生产学. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [ 14 ] Lancashire J A. The distribution and use of forage legumes in New Zealand//Proceedings of a Trilateral Workshop Held in Palmerston North, New Zealand. Washington, DC: USDA Agricultural Research Service, 1984: 5-23.
- [ 15 ] 赵桂琴,王锁民,任继周. 白三叶转基因及其生态适应性研究进展. *生态学报*, 2004, 24(3): 592-598.
- [ 16 ] 胡中华,刘师汉. 草坪与地被植物. 北京: 中国林业出版社, 1995.
- [ 17 ] 于桂霞. 浅谈白三叶在朝阳地区绿化中的应用//关正君,田伟. 辽宁省风景园林优秀成果论文集. 沈阳: 沈阳出版社, 2006.
- [ 18 ] 余婷. 白三叶 (*Trifolium repens* L.) 根系分泌物的化感作用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [ 19 ] 徐海根,强胜. 中国外来入侵物种编目. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.

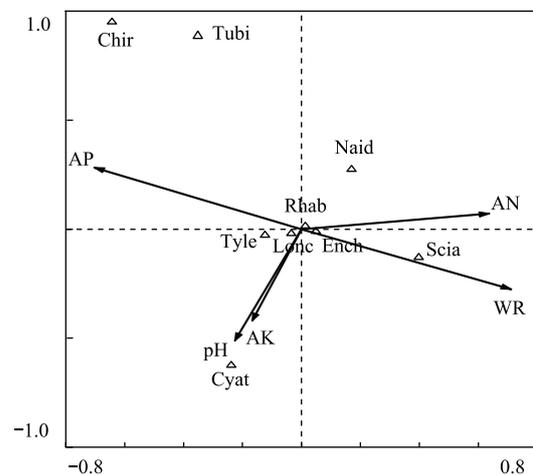


图 4 草坪土壤中的中小型湿生动物 CCA 排序

Fig. 4 Canonical correspondence analysis of turf soil meso-microfauna (Baermann method)

Tyle: 垫刃科, Tylenchidae; Tubi: 颤蚓科, Tubificidae; Naid: 仙女虫科, Naididae; Rhab: 小杆科, Rhabditidae; Ench: 线蚓科, Enchytraeidae; Cyat: 杯咽科, Cyatholaimidae; Chir: 摇蚊科幼虫, Chironomidae larva; Lonc: 尖翅蝇科幼虫, Lonchopteridae larva; Scia: 尖眼蕈蚊科幼虫, Sciaridae larva

- [20] 牛红榜, 刘万学, 万方浩. 紫茎泽兰 (*Ageratina adenophora*) 入侵对土壤微生物群落和理化性质的影响. 生态学报, 2007, 27(7): 3051-3060.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] 国家林业局. 中华人民共和国林业行业标准 LY/T 1210 1275-1999 森林土壤分析方法. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [23] 黄红英, 徐剑, 白音, 张伟群, 王晓维. 大宝山矿污染弃耕农田不同恢复植被下土壤动物群落结构及多样性. 中国农学通报, 2011, 27(24): 80-85.
- [24] 杨效东. 热带季节雨林凋落叶分解过程中的中小型土壤节肢动物的群落结构及动态. 生物多样性, 2004, 12(2): 252-261.
- [25] 王振中, 张友梅, 李忠武. 湘中低山丘陵红壤森林生态系统土壤动物群落结构的特征. 土壤学报, 2007, 44(6): 1097-1103.
- [26] 王军, 姚海元, 麦俊伟, 张维球, 童晓立. 广州长岗山森林凋落物土壤动物群落结构及季节变化. 生态学杂志, 2008, 27(3): 408-413.
- [27] Gremmen N J M, Chown S L, Marshall D J. Impact of the introduced grass *Agrostis stolonifera* on vegetation and soil fauna communities at Marion Island, sub-Antarctic. *Biological Conservation*, 1998, 85(3): 223-231.
- [28] Kourtev P S, Ehrenfeld J G, Häggblom M. Experimental analysis of the effect of exotic and native plant species on the structure and function of soil microbial communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(7): 895-905.
- [29] Mboukou-Kimbatsa I, Bernhard-Reversat F, Loumeto J J, Ngao J, Lavelle P. Understory vegetation, soil structure and soil invertebrates in Congolese eucalypt plantations, with special reference to the invasive plant *Chromolaena odorata* and earthworm populations. *European Journal of Soil Biology*, 2007, 43(1): 48-56.
- [30] 黄玉梅, 刘盼, 陈莹佳, 张健, 胡碧云, 黄胜岚, 沈金亮, 解文峰. 草坪草白三叶枯落物质量损失过程及土壤动物的贡献. 应用与环境生物学报, 2016, 22(4): 654-659.
- [31] 朱珠, 包维楷, 庞学勇, 闫晓丽, 李玉武. 旅游干扰对九寨沟冷杉林下植物种类组成及多样性的影响. 生物多样性, 2006, 14(4): 284-291.
- [32] 宋永昌. 植被生态学. 上海: 华东师范大学出版社, 2001.
- [33] 黄玉梅, 黄胜岚, 张健, 刘盼, 张凯, 王若然, 熊茜. 成都市温江区城市绿地不同植物配置下中小型土壤动物群落特征. 中国科学院大学学报, 2018, 35(1): 33-41.
- [34] Elton C S. *The Ecology of Invasions by Animals and Plants*. Chicago: University of Chicago Press, 1958.
- [35] Alkemade R, Wielemaker A, Hemminga M A. Correlation between nematode abundance and decomposition rate of *Spartina anglica* leaves. *Marine Ecology Progress Series*, 1993, 99: 293-300.
- [36] 陆建忠, 裘伟, 陈家宽, 李博. 入侵种加拿大一枝黄花对土壤特性的影响. 生物多样性, 2005, 13(4): 347-356.
- [37] 陈雯, 李涛, 郑荣泉, 陈平, 李婷, 陆俊佳, 张加勇. 加拿大一枝黄花入侵对土壤动物群落结构的影响. 生态学报, 2012, 32(22): 7072-7081.
- [38] 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.
- [39] 鲍毅新, 程宏毅, 葛宝明, 胡知渊, 方强. 不同土地利用方式下大型土壤动物群落对土壤理化性质的响应. 浙江师范大学学报: 自然科学版, 2007, 30(2): 121-127.
- [40] 肖玖金, 卢昌泰, 张健, 杨万勤. 川芎 (*Ligusticum chuanxiong* Hort) 种植地的土壤动物群落特征. 中国科学院大学学报, 2013, 30(6): 751-756.
- [41] 寇建村, 杨文权, 韩明玉, 郭宁, 贺璐璐. 行间种植豆科牧草对苹果园土壤微生物区系及土壤酶活性的影响. 草地学报, 2013, 21(4): 676-682.