

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

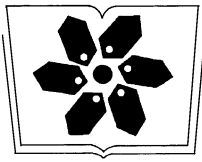
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 22 期 Vol.32 No.22 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 22 期

2012 年 11 月 (半月刊)

目 次

CO ₂ 浓度和温度升高对噬藻体 PP 增殖的联合作用	牛晓莹,程 凯,荣茜茜,等 (6917)
1956—2009 年内蒙古苏尼特左旗荒漠草原的降水格局	陈 军,王玉辉 (6925)
两个污水处理系统的能值与经济综合分析	李 敏,张小洪,李远伟,等 (6936)
退化草地阿尔泰针茅种群个体空间格局及关联性	赵成章,任 珩 (6946)
地表覆盖栽培对雷竹林凋落物养分及其化学计量特征的影响	刘亚迪,范少辉,蔡春菊,等 (6955)
福州酸雨区次生林中台湾相思与银合欢叶片的 12 种元素含量	郝兴华,洪 伟,吴承祯,等 (6964)
“雨花露”水蜜桃主要害虫与其捕食性天敌的关系	柯 磊,施晓丽,邹运鼎,等 (6972)
大兴安岭林区 10 小时滞可燃物湿度的模拟	胡天宇,周广胜,贾丙瑞 (6984)
陕北风沙区不同植被覆盖下的土壤养分特征	李文斌,李新平 (6991)
南方型杨树人工林土壤呼吸及其组分分析	唐罗忠,葛晓敏,吴 麟,等 (7000)
黑河下游土壤水盐对生态输水的响应及其与植被生长的关系	鱼腾飞,冯 起,刘 蔚,等 (7009)
树木胸径大小对树干液流变化格局的偏度和时滞效应	梅婷婷,赵 平,倪广艳,等 (7018)
外来植物紫茎泽兰入侵对土壤理化性质及丛枝菌根真菌(AMF)群落的影响	于文清,刘万学,桂富荣,等 (7027)
基于 Landsat TM 的热带精细地物信息提取的模型与方法——以海南岛为例	王树东,张立福,陈小平,等 (7036)
雪被去除对川西高山冷杉林冬季土壤水解酶活性的影响	杨玉莲,吴福忠,杨万勤,等 (7045)
不同土壤水分处理对水稻光合特性及产量的影响	王唯逍,刘小军,田永超,等 (7053)
木蹄层孔菌不同居群间生长特性、木质素降解酶与 SRAP 标记遗传多样性	曹 宇,徐 晔,王秋玉 (7061)
加拿大一枝黄花入侵对土壤动物群落结构的影响	陈 雯,李 涛,郑荣泉,等 (7072)
间作对玉米品质、产量及土壤微生物数量和酶活性的影响	张向前,黄国勤,卞新民,等 (7082)
接种 AM 真菌对玉米和油菜种间竞争及土壤无机磷组分的影响	张宇亭,朱 敏,钱岩相注,等 (7091)
大亚湾冬季不同粒级浮游生物的氮稳定同位素特征及其与生物量的关系	柯志新,黄良民,徐 军,等 (7102)
太湖水华期间有毒和无毒微囊藻种群丰度的动态变化	李大命,叶琳琳,于 洋,等 (7109)
锌胁迫对小球藻抗氧化酶和类金属硫蛋白的影响	杨 洪,黄志勇 (7117)
基于国家生态足迹账户计算方法的福建省生态足迹研究	邱寿丰,朱 远 (7124)
能源活动 CO ₂ 排放不同核算方法比较和减排策略选择	杨喜爱,崔胜辉,林剑艺,等 (7135)
基于生境等价分析法的胶州湾围填海造地生态损害评估	李京梅,刘铁鹰 (7146)
县级生态资产价值评估——以河北丰宁县为例	王红岩,高志海,李增元,等 (7156)
专论与综述	
丛枝菌根提高宿主植物抗旱性分子机制研究进展	李 涛,杜 娟,郝志鹏,等 (7169)
城市土壤碳循环与碳固持研究综述	罗上华,毛齐正,马克明,等 (7177)
基于遥感的光合有效辐射吸收比率(FPAR)估算方法综述	董泰锋,蒙继华,吴炳方 (7190)
光衰减及其相关环境因子对沉水植物生长影响研究进展	吴明丽,李叙勇 (7202)
浮游动物化学计量学稳态性特征研究进展	苏 强 (7213)
研究简报	
2010 年两个航次獐子岛海域浮游纤毛虫丰度和生物量	于 莹,张武昌,张光涛,等 (7220)
基于熵值法的我国野生动物资源可持续发展研究	杨锡涛,周学红,张 伟 (7230)
残落物添加对农林复合系统土壤有机碳矿化和土壤微生物量的影响	王意锟,方升佐,田 野,等 (7239)
人工湿地不同季节与单元之间根际微生物多样性	陈永华,吴晓芙,张珍妮,等 (7247)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 338 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 36 * 2012-11



封面图说: 水杉农田防护林中的小麦熟了——水杉曾广泛分布于北半球,第四纪冰期以后,水杉属的其他种类全部灭绝,水杉却在中国川、鄂、湘边境地带得以幸存,成为旷世奇珍,野生的水杉是国家一级保护植物。由于水杉耐水,适应力强,生长极为迅速,其树干通直挺拔,高大秀颀,树冠呈圆锥形,姿态优美,自发现后被人们在中国南方广泛种植,不仅成为了湖边、道路两旁的绿化观赏植物,更成为了农田防护林的重要树种。此图中整齐划一的水杉防护林像忠实的哨兵一样,为苏北农村即将成熟的麦田站岗。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201204090493

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.

Chen W, Li T, Zheng R Q, Chen P, Li T, Lu J J, Zhang J Y. Effects of the invasion by *Solidago canadensis* L. on the community structure of soil animals. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 7072-7081.

加拿大一枝黄花入侵对土壤动物群落结构的影响

陈 雯, 李 涛, 郑荣泉*, 陈 平, 李 婷, 陆俊佳, 张加勇

(浙江师范大学生态研究所, 金华 321004)

摘要:外来植物对入侵地土壤动物群落及理化性质影响的研究不仅有助于评估入侵植物对生态系统的影响, 而且对探索外来植物入侵的土壤动物学响应机制尤为重要。为了了解加拿大一枝黄花对入侵地土壤动物的群落结构及理化性质的影响, 本文分季节分层次对加拿大一枝黄花不同程度的入侵地进行取样, 获得土壤动物 9900 个, 隶属 3 门 11 纲 14 目, 弹尾目和蛴螬类均为优势类群。入侵程度不同的样地中土壤动物个体数量和类群组成不同。土壤动物个体数量和类群数量表现为轻度入侵区 > 中度入侵区 > 重度入侵区; 多样性指数和均匀性指数表现为轻度入侵区 < 中度入侵区 < 重度入侵区, 优势度指数表现与前两指数相反。加拿大一枝黄花的入侵没有改变土壤动物表聚性特点。非度量多维标度排序分析表明, 不同入侵程度下的土壤动物分为 3 类, 即轻度入侵类、中度入侵类、重度入侵类。不同入侵区域土壤的 pH、有机质含量、铵态氮、速效钾和速效磷差异显著 ($P < 0.05$), 土壤的含水量和温度差异不显著 ($P > 0.05$)。灰色关联分析表明, 入侵区域土壤铵态氮对土壤动物关联最大, 有机质含量次之, 再次是速效磷和 pH, 土壤含水量的影响最小。因而, 加拿大一枝黄花的入侵, 改变了入侵地土壤理化性质 (尤其是对铵态氮的调控), 进而改变了土壤动物的群落结构, 创造了利于自身生长、竞争有利的土壤环境。

关键词:加拿大一枝黄花; 土壤动物; 土壤理化性质; 垂直分布

Effects of the invasion by *Solidago canadensis* L. on the community structure of soil animals

CHEN Wen, LI Tao, ZHENG Rongquan*, CHEN Ping, LI Ting, LU Junji, ZHANG Jiayong

Institute of Ecology, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China

Abstract: The interaction between exotic invasive plants and soil animal communities is an important aspect of understanding plant invasibility and susceptibility of receptive communities. Consequently, studies on the effects of plant invasion on soil animal communities and their physicochemical properties are becoming increasingly important in determining the effects of plant invasion on ecosystems and the relationship of the invasion mechanism to the underground soil biota. In this paper, we report the soil animal community structure and the soil physicochemical properties of three sampling areas in Jinhua, Zhejiang Province of Eastern China where *Solidago canadensis* has invaded native plant communities. The objectives of the study are to evaluate how *S. canadensis* invasion affects the physicochemical characteristics of the plant rhizosphere and the soil animal parameters and to determine whether these parameters can serve as indicators for the invasion density of *S. canadensis*. Soil samples were collected at three depths over four seasons in different *S. canadensis*-invaded areas. A total of 9900 individual soil animals, which belong to 14 orders, 11 classes, and 3 phyla, were collected. The most dominant taxa in three invaded areas were Collembola and Acarina. Statistical analysis was performed with the SPSS 18.0 program package. The one-way ANOVA shows that pH, organic carbon, ammonium nitrogen, available K, and

基金项目: 浙江省重点学科资助

收稿日期: 2012-04-09; 修订日期: 2012-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhengrq@zjnu.cn

available P are significantly different among the sampling areas ($p < 0.05$), whereas soil water content and soil temperature were not ($p > 0.05$). The sequence of the diversity indices and the evenness indices were as follows: newly invaded areas < moderately invaded areas < heavily invaded areas. A positive association was found between diversity index and dominance index. The spatial distribution of soil animals in the different *S. canadensis* invaded areas had obvious surface segregation. Using the non-metric multidimensional scaling method, the soil animals communities were classified into three types. Grey relevant analysis indicated that the soil physicochemical properties had different effects on the key soil animal communities, Ammonium nitrogen produced the most significant effect on soil animals, followed by organic carbon, available P, and finally by soil water content. Therefore, *S. canadensis* L. invasion changes the soil physicochemical properties (especially the $\text{NH}_4\text{-N}$), and then changes the soil animal community used by *S. canadensis* to expand its invasive range rapidly.

Key Words: *Solidago canadensis* L.; soil animals; soil physicochemical properties; spatial distribution

土壤动物作为土壤中的分解者和消费者,是土壤生态系统的重要组成部分,并以其丰富的多样性及其在地下生态系统食物链中发挥的作用,成为调控生态系统地上部分结构、功能和过程的一个至关重要的因素^[1]。人们对不同区域及植被条件下的土壤动物生物多样性进行了大量的研究,近年来开始关注各种干扰因素对土壤动物的影响及其响应,如人为干扰^[2]、施肥^[3]、重金属^[4-5]和农药等因素。但对另一种干扰因素——生物入侵对土壤动物的影响鲜有研究^[6]。

生物入侵是指因某种非本地生物从原来的分布区域扩散到一个新的区域里,并通过定居、建群和扩散而逐渐占领该栖息地,从而对当地土著生物和生态系统造成负面影响的一种生态现象^[6]。生物入侵已被列为当今世界最为棘手的三大环境难题(动植物栖息地丧失、生物入侵、全球变化)之一^[7]。外来植物的入侵,严重威胁着当地物种多样性、生态系统的结构和功能、农业和林业的生产^[8-10]。然而,大量评价植物入侵生态后果的研究都集中在生态系统的地上部植物群落上,而对地下部土壤生物群落结构和功能的研究相对较少^[11-13]。

近年来随着对生态系统地下过程的不断认识,科学家开始重视外来入侵植物对土壤的理化性质、土壤生物多样性和生态系统过程的影响^[14-15]。如入侵植物对土壤的理化性质的变化^[16,17]及对土壤微生物的影响等^[18]。遗憾的是,目前尚缺乏足够的外来入侵植物如何改变土壤动物群落结构的研究实例和证据,进而影响对外来入侵植物的危害评估及更深入的机理研究。

加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis* L.)原产北美,曾作为观赏植物被引至世界各地,后逸生为恶性杂草,现已入侵欧洲、大洋洲以及亚洲的部分地区^[19-20]。1935年首次作为一种观赏植物引入上海,逸生后扩散,严重影响农林生产以及荒地植被的自然恢复过程,对入侵地的生物地生物多样性也造成了严重的危害,已被我国列入林业检疫性有害植物的名单,并极有可能发展为继紫茎泽兰等之后的又一外来恶性杂草^[21-22]。目前,对加拿大一枝黄花的研究主要集中于形态描述^[23]、分布动态^[20]、检疫和除害处理^[24]、入侵机制^[25]、化感作用^[26]以及其对土壤微生物^[27]和土壤线虫^[28]影响等方面。本研究拟通过调查加拿大一枝黄花不同程度入侵地的土壤动物群落结构和土壤理化性质,分析土壤理化性质的变化和土壤动物群落变化的内在联系,为阐明加拿大一枝黄花对入侵地土壤动物的影响规律及机制提供科学依据。

1 材料与研究方法

1.1 研究区域概况

金华市位于浙江省中部,属中亚热带季风气候,四季分明,气温适中。年均日照时数为 2062.6 h,年降水量 1500—1800 mm,年均气温 15.1 °C,7 月均温 26.4 °C,1 月均温 3.6 °C,极端高温 41.3 °C,极端低温 -9.5 °C,无霜期平均为 257 d,≥10 °C 的平均积温为 5504.5 °C。采样地生长的植物主要以加拿大一枝黄花为主要种群,伴生植物有北美车前(*Plantago virginica*)、一年蓬(*Erigeron annuus*)、小飞蓬(*Conyza canadensis*)、毛茛(*Ranunculus japonicus*)、空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)等。

1.2 样地的设置

根据入侵程度的不同,参考牛红榜等^[16]的方法,设置3种不同的样地,分别为轻度入侵区(I型)、中度入侵区(II型)、重度入侵区(III型)。轻度入侵区的加拿大一枝黄花与本地植物处于竞争生长,盖度在10%—30%,当地植物的盖度在30%—50%,主要以北美车前和一年蓬为主,面积约1100 m²;中度入侵型的加拿大一枝黄花盖度在40%—60%,当地植物盖度在20%—30%,主要以北美车前、一年蓬和小飞蓬等伴生,面积约600 m²;重度入侵区的加拿大一枝黄花的盖度在70%以上,当地种北美车前、毛茛和空心莲子草伴生,面积约500 m²。由于,3种类型样地相隔较远(大于1 km),考虑到土壤的异质性,每个样地分别设置相对应的对照样地(就近相同生境下当地植物的样地,轻度入侵区对照样地当地植物为北美车前和一年蓬等,盖度大约为40%;中度入侵区对照样地当地植物为北美车前、一年蓬和小飞蓬等,盖度大约为50%;重度入侵区对照样地当地植物为北美车前、毛茛和空心莲子草等,盖度大约为40%;)。每个样地采用5点法采集土样,分4个季节定点采样。

1.3 样地的采样和分离鉴定

大型土壤动物的每个样点采样面积为50 cm×50 cm,每样点取样3次。大型土壤动物采取手捡法,用70%的酒精固定,编号存放。中小型土壤动物的采样面积为20 cm×20 cm,每一个样点利用取土环刀(内径50 mm)按0—5 cm,5—10 cm,10—15 cm分3层进行取样,对取样袋子进行编号。将所取土壤样品用干漏斗法分离提取土壤动物,采用40 W光照分离器,持续照射24 h分离。土壤动物分离出来后用70%酒精保存。参照《中国土壤动物检索图鉴》与《中国亚热带土壤动物》,利用Nikon双目体视显微镜进行分离鉴定,并做数据统计。土壤动物类群采用土壤动物大类群分类法鉴定,通常将幼虫和成虫分开,鉴定到目。

在每个取样点同时用ST-99027土壤采样器(内径25 mm)采集0—15 cm的表土,组成混合土样,并进行编号,取样前去除地表植物和凋落物等有机杂质,带回实验室待土壤理化性质的测定。

1.4 土壤理化性质的测定

pH和温度采用TFW-VI型土壤养分测定仪测定;含水量采用烘干法来测定;土壤的有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法来测定;土壤的铵态氮采用浸提蒸馏法来测定;土壤的速效磷采用钼锑抗-比色法来测定;土壤的速效钾采用火焰光度法来测定。

1.5 数据分析

土壤动物各类群优势度为:个体数量占总捕获量的10.00%以上者为优势类群,介于总捕获量1.00%—10.00%为常见类群,占总捕获量的1.00%以下为稀有类群。土壤动物群落结构多样性采用Shannon-Wiener多样性指数(H')、Pielou均匀性指数(E)和Simpson优势度指数(C)。为了解土壤动物群落结构和土壤理化指标之间的关系,利用灰色关联分析方法,其原理是依据空间理论为数学基础,按照规范性、偶对称性、整体性、接近性的原则,对信息部分确定和部分不确定的系统——灰色系统进行定量的描述和比较,以确定母序列和子序列之间的灰色关系,进而确定各个子序列对母序列的相对重要程度^[29]。

对不同入侵地及相应对照地土壤动物的类群数、个体数量和土壤的理化性质的差异性用单因素方差分析(ANOVA)进行,后续比较采用LSD多重比较检验,数据分析前对数据进行 $\log(x+1)$ 转换;群落排序用非度量多维标度排序(MDS)进行,对不同入侵程度的加拿大一枝黄花入侵区域的土壤动物群落中的个体数量进行4次开方,目的在于减少优势类群对整个群落的影响权重,后用欧氏距离来进行组间MDS排序。描述性统计值用平均值±标准差表示,显著性水平设置为 $\alpha=0.05$ 。用SPSS 18.0软件运行上述统计分析。

2 结果

2.1 入侵区域土壤的理化性质

加拿大一枝黄花不同入侵区域的土壤pH介于5.04—5.73之间,呈现酸性,并随入侵程度的增大而减小;土壤有机质含量均值在27.84—33.15 g/kg,试验样地的有机质含量均高于对照样地;土壤的铵态氮的含量均值介于6.80—18.69 mg/kg,速效钾含量均值介于95.50—251.88 mg/kg,重度入侵区铵态氮和速效钾的

含量低于轻度入侵区和重度入侵区(表1)。单因素方差分析表明,土壤的 pH、有机质的含量、铵态氮速效钾、速效磷的差异显著($P<0.05$);而土壤的含水量及温度差异不显著($P>0.05$)。

表1 入侵区域试验样地 and 对照样地的土壤理化性质

Table 1 The physiochemical properties of soils in control and. invaded area

采样区 Sampling area	轻度入侵 I 型(NIA)		中度入侵 II 型(MIA)		重度入侵 III 型(HIA)	
	试验样地(TG)	对照样地(CG)	试验样地(TG)	对照样地(CG)	试验样地(TG)	对照样地(CG)
pH	5.73±0.14a	5.39±0.13b	5.30±0.12b	5.42±0.21b	5.04±0.19c	5.22±0.15bc
土壤含水量 soil water/%	30.25±4.86	32.65±6.75	29.65±5.05	29.06±4.06	28.78±5.46	28.65±5.88
土壤温度 soil temperature/°C	16.60±8.11	16.06±8.81	17.00±9.03	17.56±9.35	18.20±8.72	18.17±9.53
有机质 Organic carbon /(g/kg)	44.01±7.70a	43.54±8.77a	31.91±3.74b	26.67±3.32bc	33.36±3.98b	29.10±4.45c
铵态氮 NH ₄ -N /(mg/kg)	17.73±1.77a	18.69±1.95a	10.64±1.31b	11.81±0.95b	6.80±0.51c	9.89±0.89b
速效钾 Available K /(mg/kg)	251.88±55.26a	174.50±36.60b	169.50±21.83b	123.13±8.21c	95.50±6.87c	185.13±23.25b
速效磷 Available P /(mg/kg)	14.22±2.38a	15.43±1.70a	6.20±0.47bc	6.02±0.51c	8.25±0.49bc	8.88±3.04b

$n=5$, 表中数据为平均值±标准差,同行中不同的小写字母表示各采样点 LSD 检测差异达显著水平($P<0.05$); NIA: Newly invaded areas, 轻度入侵区; MIA: Moderately invaded areas, 中度入侵区; HIA: Heavily invaded areas, 重度入侵区; TG: Treatment group, 试验样地 CG: Control group, 对照样地

2.2 加拿大一枝黄花入侵地土壤动物的群落组成

2.2.1 入侵对土壤动物类群数和个体数的影响

加拿大一枝黄花不同入侵程度的3个样地中,共捕获土壤动物9900个,隶属3门11纲14目(表2)。在轻度入侵区(I型)的试验样地捕获土壤动物2478个,占总捕获量的25.03%,对照样地捕获1879个,占18.98%;中度入侵区(II型)试验样地捕获土壤动物1670个,占总捕获量的16.87%,对照样地捕获1261个,占12.74%;重度入侵区(III型)试验样地中捕获1251个,占总捕获量的12.64%,对照样地捕获1361个,占总量的13.75%。在不同入侵程度的试验样地中,土壤动物个体数量表现为:轻度入侵区(I型)>中度入侵区(II型)>重度入侵区(III型)。其中不同入侵地的试验样地弹尾目($F=7.986, P<0.05$)、膜翅目($F=3.714, P<0.05$)、综合纲($F=3.491, P<0.05$)的个体数量差异显著,其余类群差异不显著。

在不同的入侵样地共有的优势类群为弹尾目、蛴螬类,常见类群为膜翅目和鞘翅目,稀有类群为综合纲、半翅目(表2)。在入侵样地中,轻度入侵区(I型),中度入侵区(II型)和重度入侵区(III型)土壤动物的类群数分别为13、11和9(表3)。随着入侵程度增大,土壤动物类群数减少。在3个入侵试验样地中,随加拿大一枝黄花的入侵程度的增大,较轻度入侵区(I型),中度入侵区(II型)和重度入侵区(III型)的等翅目、原尾纲、倍足纲土壤动物已经消失;重度入侵区(III型)较中度入侵区(II型),唇足纲和等足目没有被发现。

2.2.2 入侵对多样性指数、均匀性指数、优势度指数的影响

随入侵程度的加大,入侵地土壤动物群落的多样性指数、均匀性指数和优势度指数都呈现相应的变化趋势(表3)。Shannon-Winner 指数由轻度入侵区(1.19),中度入侵区(1.26)到重度入侵区(1.27)逐渐升高;均匀性指数和多样性指数的趋势类似;优势度指数的趋势与多样性指数和均匀性指数恰恰相反,由轻度入侵区(0.42),到中度入侵区(0.40),再降低到重度入侵区(0.38)。重度入侵区(III型)的土壤动物的个体总数和类群总数少于中度入侵区(II型)和轻度入侵区(I型),但是其个体数量在各个类群之间分布相对均匀,表现出较高的多样性均匀性和较低的优势性;而在轻度入侵区(I型)和中度入侵区(II型)土壤动物的个体数量和类群数量都比较丰富,但各类群之间的个体数量之间差别相对较大,所以均匀性较低,优势度较高。

2.3 入侵地土壤动物的垂直分布

各不同入侵区的试验样地和对照样地在垂直分布上均表现为表层的土壤动物的个体数量最多,越往深层土壤动物数量越少(图1)。单因素方差检验表明不同土壤层次的土壤动物个体数目差异极显著($F=95.10, P<0.01$)。在轻度入侵区和中度入侵区中,0—5 cm、5—10 cm、10—15 cm 三层土壤试验样地的个体数量均大

表 2 不同入侵区域试验样地和对照样地土壤动物的群落组成和数量组成

Table 2 Species and distribution of soil animal communities in control and different <i>Solidago canadensis</i> L. invaded area													
采样区 Sampling area	轻度入侵 I 型 Newly invaded areas			中度入侵 II 型 Moderately invaded areas			重度入侵 III 型 Heavily invaded areas			F			
	试验样地 TG	对照样地 CG		试验样地 TG	对照样地 CG		试验样地 TG	对照样地 CG					
	个体数量 /个	个体数量 /个	%	个体数量 /个	个体数量 /个	%	个体数量 /个	个体数量 /个	%				
类群数 Groups													
线虫 Nematoda	3.75±3.77	0.61	4.00±4.69	0.85	7.75±11.84	1.86	2.50±2.89	0.79	13.75±11.15	4.40	8.25±5.74	2.42	1.75
后孔寡毛目 Opilthpora	5.75±4.03	0.93	2.50±1.73	0.53	14.00±15.64	3.35	12.50±14.80	3.97	1.00±1.15	0.32			0.89
蛭蟊类 Acarina	213.75±128.18	34.50	238.75±123.13	50.82	231.75±57.30	55.51	163.75±52.41	51.94	131.50±55.98	42.05	126.25±29.47	37.11	2.01
唇足纲 Chilopoda	5.50±4.20a	0.89	1.75±1.50b	0.37	1.25±0.50b	0.30	1.00±2.00b	0.32					3.92**
综合纲 Symphyla	3.25±3.40ab	0.52	1.50±1.00b	0.32	1.25±1.50b	0.30	5.00±2.16a	1.59	0.25±0.50b	0.08	0.75±1.50b	0.22	5.66**
倍足纲 Diplopoda	1.50±3.00	0.24	2.25±4.50	0.48							1.50±3.00	0.44	1.22
等足目 Isopoda					0.75±1.50	0.18	1.00±2.00	0.32					1.87
原尾目 Protura	6.75±9.07	1.09	4.75±9.50	1.01									1.94
弹尾目 Collembola	309.50±85.40a	49.96	182.25±64.06b	38.80	59.50±34.15c	14.25	70.00±38.22c	22.20	119.75±80.86bc	38.29	111.75±72.99bc	32.84	15.33**
双尾目 Diplura	1.00±2.00	0.16	3.25±6.50	0.69	8.50±2.65	2.04	3.25±3.77	1.03	11.00±15.10	3.52	8.75±11.56	2.57	2.11
缨翅目 Thysanoptera			0.25±0.50	0.05									
等翅目 Isoptera	0.25±0.50	0.04											
半翅目 Hemiptera	0.25±0.50	0.04			0.25±0.50	0.06	0.75±1.50	0.24	0.50±0.58	0.16	0.25±0.50	0.07	1.03
鞘翅目幼虫 Coleoptera larvae	6.75±12.84	1.09	0.25±0.50	0.05	1.75±1.50	0.42	1.25±0.96	0.40	14.50±14.48	4.64	2.00±1.15	0.59	1.49
鞘翅目 Coleoptera adult	1.75±2.36	0.28	3.50±4.36	0.75	4.75±5.56	1.14	2.75±2.87	0.87	3.25±3.20	1.04	1.50±3.00	0.44	0.97
双翅目 Diptera	46.00±27.83	7.43	11.00±11.23	2.34	73.25±65.82	17.55	42.50±31.44	13.48	4.50±5.00	1.44	9.00±7.53	2.65	2.15
膜翅目 Hymenoptear	13.75±6.70a	2.22	13.75±7.63a	2.93	12.75±19.55a	3.05	9.00±16.69a	2.85	12.75±10.47a	4.08	70.25±52.45b	20.65	6.43**
合计 Σ summation	619.50±163.37	100.00	469.75±144.53	100.00	417.50±44.64	100.00	315.25±58.32	100.00	312.75±169.88	100.00	340.25±151.33	100.00	

表中数据为平均值±标准差,同行中不同的小写字母表示各采样点 LSD 检测差异达显著水平(P<0.05)

表 3 入侵区域试验样地和对照样地土壤动物群落主要特征指数

Table 3 Characteristic indices of soil animal communities in *Solidago Canadensis* L. invaded area

采样区 Sampling area	轻度入侵 I 型 NIA		中度入侵 II 型 MIA		重度入侵 III 型 HIA	
	试验样地 TG	对照样地 CG	试验样地 TG	对照样地 CG	试验样地 TG	对照样地 CG
类群数 Number of groups	13	11	11	11	9	8
个体数 Individual number	2478	1879	1670	1261	1251	1361
多样性指数 Diversity index	1.19±0.11	1.07±0.15	1.26±0.15	1.28±0.07	1.27±0.16	1.26±0.26
均匀性指数 Evenness index	0.51±0.05	0.48±0.04	0.54±0.07	0.59±0.06	0.58±0.06	0.64±0.13
优势度指数 Dominance index	0.42±0.04	0.44±0.04	0.40±0.06	0.36±0.05	0.38±0.08	0.35±0.12

于对照样地个体数量;而在重度入侵区,土壤动物个体数量在 0—5 cm、5—10 cm 土层试验样地<对照样地, 10—15 cm 土层试验样地>对照样地。

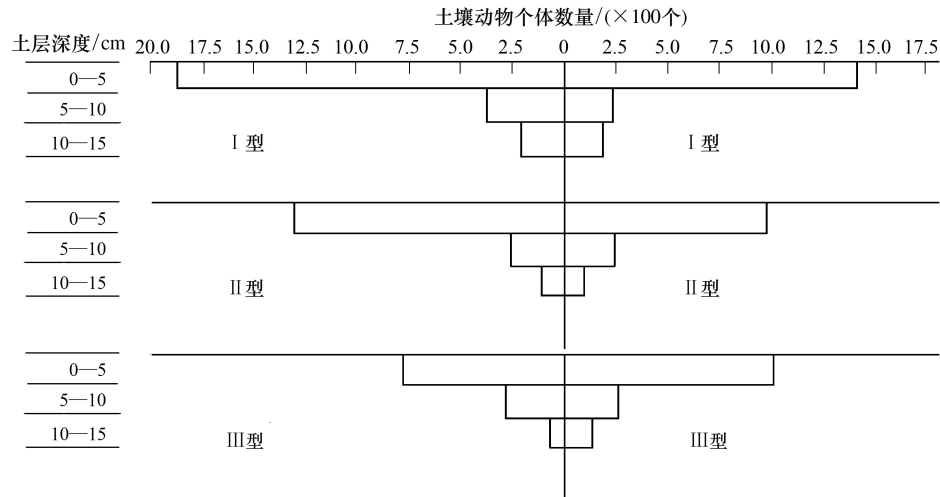


图 1 入侵区域试验样地和对照样地土壤动物数量的垂直分布

Fig.1 The vertical distribution of individuals of soil animals in *Solidago Canadensis* L. invaded area

2.4 入侵地土壤动物的季节变化

入侵地和对照样地的土壤动物群落类群的组成随季节的变化差异不显著,多数类群在四季均有出现。但土壤动物个体数量随季节有明显的变化,在轻度入侵区土壤动物个体数量为春季(527)<夏季(534)<秋季(553)<冬季(864);在中度入侵区为夏季(355)<春季=冬季(427)<秋季(461);重度入侵区为秋季(148)<冬季(214)<春季(358)<夏季(531)(图2)。

2.4 群落的聚类和排序

非度量多维标度的二维分析显示 Stress 值为 0.07971,当该值介于 5%—10% 之间时,表示图形拟合较好。通过排序结果可以看出,不同入侵程度的加拿大一枝黄花的入侵样地下的土壤动物群落可以分为 4 类,即加拿大一枝黄花轻度入侵地和相应对照聚成一类,中度入侵地和相应对照聚成一类,重度入侵地和相应对照分别为另一类(图3)。

2.5 土壤动物群落和土壤理化性质的关联度分析

选择土壤动物优势和常见类群弹尾目,蜱螨类,双尾目,膜翅目,综合纲,双翅目,鞘翅目,线虫,个体总量,群落多样性指数作为母数列(y),并依次定义为弹尾目(y_1),蜱螨类(y_2),双尾目(y_3),膜翅目(y_4),综合纲(y_5),双翅目幼虫(y_6),鞘翅目(y_7),线虫(y_8),个体总量(y_9),群落多样性指数(y_{10})为母数列。选择土壤的理化性质为子数列(x),依次定义为 pH(x_1),土壤的含水量(x_2),土壤的温度(x_3),有机质含量(x_4),铵态氮(x_5),速效钾(x_6),速效磷(x_7)。原始数据无量纲化初始值,计算灰色绝对关联度(ε)、灰色相对关联度(γ)以及灰色综合关联度(ρ),其关联序大小依次为:

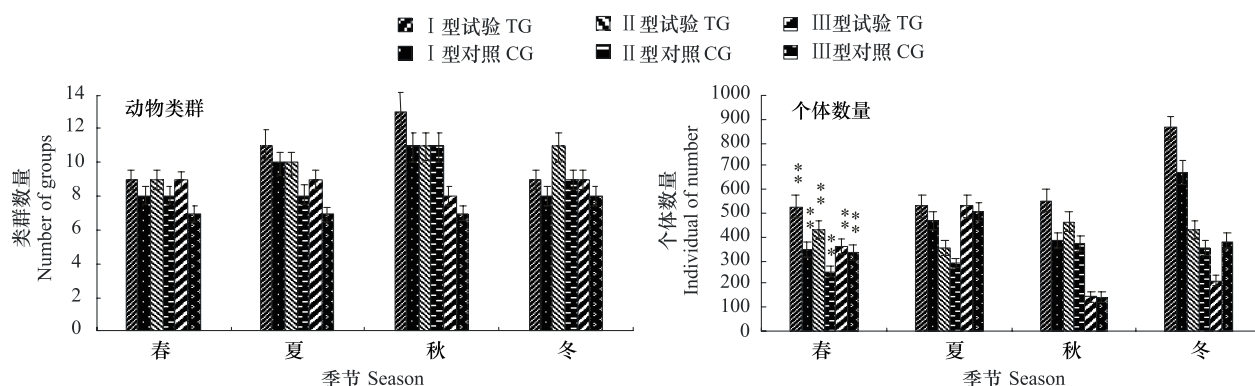


图2 不同的入侵试验样地和对照样地土壤动物类群和个体数量的季节变化

Fig. 2 The groups of soil animal communities and individual of soil animal at different seasons in *Solidago Canadensis* L. invaded area

$$\begin{aligned} \varepsilon_{5j}(0.5606) &> \varepsilon_{6j}(0.5599) > \varepsilon_{3j}(0.5572) > \varepsilon_{7j} \\ (0.5569) &> \varepsilon_{4j}(0.5567) > \varepsilon_{1j}(0.5418) > \varepsilon_{2j}(0.5181) \\ \gamma_{5j}(0.7078) &> \gamma_{4j}(0.6978) > \gamma_{1j}(0.6815) > \gamma_{7j} \\ (0.6708) &> \gamma_{3j}(0.6594) > \gamma_{6j}(0.6494) > \gamma_{2j}(0.6286) \\ \rho_{5j}(0.6342) &> \rho_{4j}(0.6272) > \rho_{7j}(0.6139) > \rho_{1j} \\ (0.6116) &> \rho_{3j}(0.6083) > \rho_{6j}(0.6047) > \rho_{2j}(0.5783) \end{aligned}$$

上述数据表明,绝对关联度(ε)中, x_5 为最优因素, x_6 次之, x_3 再次之, x_2 最劣,即入侵地土壤理化性质中铵态氮对土壤动物的影响最大,速效钾的影响次之,其次是土壤温度的影响,土壤含水量的影响最小;相对关联度(γ)中, x_5 为最优因素, x_4 次之, x_1 又次之, x_2 最

劣,即铵态氮对土壤动物的影响最大,有机质含量的影响次之,再次是土壤的pH,土壤含水量的影响最小;在综合关联度(ρ)中, x_5 为最优因素, x_4 次之, x_7 又次之, x_2 最劣,即土壤的铵态氮对土壤动物的影响最大,土壤有机质的含量的影响次之,再次是速效磷的影响,土壤含水量的影响最小。

3 讨论

国外研究表明,外来植物的入侵可以增加土壤动物的多样性或生物量。Aplet比较研究了入侵美国夏威夷的火树(*Myrica faya*)群落与土著植物群落土壤中蚯蚓的生物量,发现外来植物入侵显著增加了蚯蚓的生物量^[30]。Kourtev等发现美国新泽西州的两种外来植物群落中单位面积土壤的蚯蚓数量显著高于土著植物群落^[31]。在国内,孙刚和殷秀琴等研究发现,入侵植物豚草(*Ambrosia artemisiifolia* L.)对土壤动物群落影响明显,豚草发生地土壤动物个体数量和类群数量少于对照样地,并发现对豚草响应明显的类群为线虫和线蚓^[32-33];刘志磊的研究表明,紫茎泽兰入侵后,土壤动物群落多样性下降,多数类群个体数量减少,弹尾目和蛴螬目受紫茎泽兰影响不显著,试验样方内受紫茎泽兰影响密度和数量下降显著的类群有后孔寡毛目、膜翅目、原尾目、鳞翅目幼虫等^[34]。本研究表明,加拿大一枝黄花的入侵改变了土壤动物的群落结构,首先是随着入侵程度的增加,土壤动物的类群数减少,从轻度入侵区的13个类群减少到重度入侵地的9个类群,主要体现在一些稀有类群的消失,比如原尾纲、倍足纲土壤动物在中度入侵区消失,而唇足纲和等足目在重度入侵区消失,这些生态幅狭窄的类群,对入侵的影响反应较为敏感,可以考虑作为加拿大一枝黄花的指示类群;其次随着入侵程度的增加,土壤动物的个体数量也在减少,主要体现在土壤动物优势类群个体数目的减少,但是其个体数量在各个类群之间分布相对均匀,表现出较高的多样性均匀性和较低的优势性。入侵程度与土壤动物群落改变的正相关性也可以从群落的非度量多维标度分析中得到验证,图3中,轻度和中度入侵地分别和相

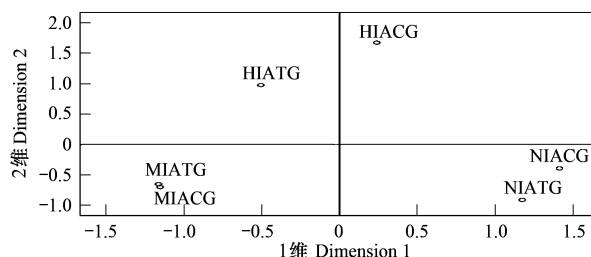


图3 不同入侵区域试验样地和对照样地土壤动物非度量多维标度排序图(stress = 0.07971)

Fig. 3 The 2-dimentional MDS ordinal configuration of the soil animal communities in *Solidago Canadensis* L. invaded area

应对照聚成一类,但重度入侵地和相应对照已聚成各自不同的两个类别。说明随着入侵程度的增加,入侵对土壤动物群落特征的改变程度加剧。3 个对照聚成不同的类别,说明对照地具有不同的土壤动物群落特征,这是由于 3 个对照地所处区域不同,具有不同的植被特征所造成的。

以往的研究表明,自然生态系统中土壤动物在土壤中的垂直分布具有表聚性,即绝大多数土壤动物分布在 0—5 cm 表层土壤中,而在 5—10 cm、10—15 cm 层的土壤动物数量明显减少^[35-36]。加拿大一枝黄花的入侵对土壤动物群落产生了一定的影响,但总体来说,加拿大一枝黄花的入侵还没有达到致使土壤动物逆态分布现象的程度,入侵区域的土壤动物在垂直分布上具有表聚性;但随着入侵程度的增加,由于 0—5 cm 土壤层土壤动物的减少,尤其是优势类群弹尾目、蛴螬类个体数量的减少,导致入侵区域土壤动物的表聚性减弱。但表聚性影响因素众多,如降水,植被的盖度等,是什么因素在入侵地土壤动物的个体数量的动态垂直分布起决定性的作用尚不清楚。

陈慧丽等认为植物入侵可能通过多种机制对土壤动物产生影响^[6]。首先,植物入侵改变地上部分的初级生产力和植物组织化学特性,导致通过分解作用进入碎屑食物网的资源产生质和量的不同,进而影响土壤动物的组成和多样性。如大米草入侵荷兰东斯凯尔德海湾增加土壤无脊椎动物数量的原因是米草盐沼常具有较高的净初级生产力,大米草衰老的茎秆被分解后,通过食物链或食物网的养分和能量流动可以支持更多的地下生物^[37]。同时,外来入侵植物通过根系分泌物、凋落物改变土壤的理化性质。陆建忠等人发现入侵植物加拿大一枝黄花调节了土壤的 pH,增加了总碳、氮库和有机质库,降低了铵态库和硝态库,并认为这种改变利于其入侵^[27]。本研究发现加拿大一枝黄花入侵后一些土壤的理化性质发生变化,土壤的 pH、有机质的含量、铵态氮、速效钾、速效磷在入侵前后差异显著,尤其是铵态氮较入侵前大幅度降低。本研究的灰色关联度分析表明土壤理化特性与土壤动物存在关联性,其中铵态氮对土壤动物的影响最大,土壤有机质含量次之,再次是速效磷、pH 和土壤含水量。其次,入侵植物和土著植物生长特征(如生长密度、根系特征和物候等)的差异也会影响土壤无脊椎动物多样性。第三,土壤生态系统食物网各营养级之间存在着捕食、竞争等复杂的相互作用,因此,各种动物类群对植物入侵的响应模式各不相同。本研究中,加拿大一枝黄花重度入侵地中唇足纲和等足目等动物的消失,必然进一步影响更高一级的捕食者的数量和种类。土壤动物群落结构和功能与地上植物群落关系密切,常表现出动态的反馈关系^[38-39]。虽然这种反馈关系较为复杂,并需要很多实验验证,但可以推测的是,土壤动物作为土壤中的分解者和消费者,是土壤生态系统的重要组成部分,其的群落结构变化,将改变食物链的能流和物质流,进而改变土壤的营养成分,并改变原有土壤与土著植物的平衡关系,从而获得竞争优势。

References:

- [1] Yin W Y. Soil Animal of China. Beijing: Science Press, 2000: 2-3.
- [2] Jin XL, Lu L, Gong J, Wang LL. Effects of tourism activities on soil macrofauna community in Mount Jiuhua scenic area. *Geographical Research*, 2011, 30(1):103-114.
- [3] Andres P, Domene X. Ecotoxicological and fertilizing effects of dewatered, composted and dry sewage sludge on soil mesofauna: a TME experiment. *Ecotoxicology*, 2005, 14(5):545-57.
- [4] Li T, Li C Y, Yu D N, Zhang J Y, Zheng R Q. Effects of heavy metal from road traffic on the community structure and spatial distribution of cropland soil animals. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(18):5001-5011.
- [5] Zhao X W, Luo Y M, Teng Y, Li Z G, Song J, Wu L H. Genetic diversity of microbial communities in farmland soils contaminated with mixed heavy metals. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(2):186-191.
- [6] Elton CS. The ecology of invasions by animals and plants. London: Methuen, 1958: 23-25.
- [7] Qi Y H, Zhao Y H, Yin X Q. Ecological distribution of biological invasion in China. *Ecology and Environment*, 2004, 13(3):414-416.
- [8] Walker L R, Vitousek P M. An invader alters germination and growth of a native dominant tree in Hawaii. *Ecology*, 1991, 72(4): 1449-1455.
- [9] Hobbs R J, Mooney H A. Broadening the extinction debate: population deletions and additions in California and Western Australia. *Conservation Biology*, 1998, 12(2): 271-283.

- [10] Mack R N, Simberloff D, Lonsdale W M, Evans H, Clout M, Bazzaz F A. Biotic invasions: cause, epidemiology, global consequences and control. *Ecological Applications*, 2000, 10(3): 689-710.
- [11] Chen H L, Li Y J, Li B, Chen J K, Wu J H. Impacts of exotic plant invasion on soil biodiversity and ecosystem processes. *Biodiversity Science*, 2005, 13(6): 555-565.
- [12] Sun B Y, Tan J Z, Wan Z G, Gu F G, Zhu M D. Allelopathic effects of extracts from *Solidago canadensis* L. against seed germination and seedling growth of some plants. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(2): 304-309.
- [13] Lei Y B, Xiao H F, Feng Y L. Impacts of alien plant invasions on biodiversity and evolutionary responses of native species. *Biodiversity Science*, 2010, 18(6): 622-630.
- [14] Callaway R M, Thelen G C, Rodriguez A, Holben W E. Soil biota and exotic plant invasion. *Nature*, 2004, 427: 731-733.
- [15] Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N, Setälä H, van der Putten W H, Wall D H. Ecological linkage between aboveground and belowground biota. *Science*, 2004, 304(5677): 1629-1633.
- [16] Niu H B, Liu W X, Wan F H. Invasive effects of *Ageratina adenophora* sprengel (Asteraceae) on soil microbial community and physical and chemical properties. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 3051-3060.
- [17] Zhang T R, Huangfu C H, Bai X M, Yang D L, Li G, Lai X, Zhao J N. Effects of *Flaveria bidentis* invasion on soil nutrient contents and enzyme activities. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(7): 1353-1358.
- [18] Hawkers C V, Wren I F, Herman D J, et al. Plant invasion alters nitrogen cycling by modifying the soil nitrifying community. *Ecol. Lett.*, 2005, 8: 976-985.
- [19] Kolar C S, Lodge D M. Progress in invasion biology: predicting invaders. *Trend in ecology and evolution*, 2004, 16(4): 199-204.
- [20] Dong M, Lu J Z, Zhang W J, Chen J K, Li B. Canada goldenrod (*Solidago canadensis*): An invasive alien weed rapidly spreading in China. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 2006, 44(1): 72-85.
- [21] Li B, Xu B S, Chen J K. Perspectives on general trends of plant invasions with special reference to alien weed flora of Shanghai. *Biodiversity Science*, 2001, 9(4): 446-457.
- [22] Yang R Y, Zan S T, Tang J J, Chen X. Invasion mechanisms of *Solidago Canadensis* L.: a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(4): 1185-1194.
- [23] Hartnett D C, Bazzaz F A. The regulation of leaf, ramet and genet densities in experimental populations of the rhizomatous perennial *Solidago Canadensis*. *Journal of Ecology*, 1985, 73(2): 429-443.
- [24] Werner P A, Bradbury I K, Gross R S. The biology of Canadian weeds. 45. *Solidago Canadensis* L. *Canadian Journal of Plant Science*, 1980, 60(4): 1393-1409.
- [25] Lam J, Christensen L P, Färch T, Thomasen T. Acetylenes from the roots of *Solidago specis*. *Phytochemistry Oxford*, 1992, 31(12): 4159-4161.
- [26] Fang F, Guo S L, Huang L B. Allelopathic effects of the invasive plant *Solidago canadensis*. *Ecologic Science*, 2004, 23(4): 331-334.
- [27] Lu J Z, Qiu W, Chen J K, Li B. Impacts of invasive species on soil properties: *Canadina goldenrod* (*Solidago canadensis*) as a case study. *Biodiversity Science*, 2005, 13(4): 347-356.
- [28] Xu X Q, Wang Y Y, Lu Q, Lin Z H, Chen H L. Effect of *Solidago Canadensis* invasions on soil nematode communities in Hangzhou Bay. *Biodiversity Science*, 2011, 19(5): 519-527.
- [29] Liu S F, Dang Y G, Fang Z G. The Grey System and its Application. Beijing: Science Press, 2004: 44-58.
- [30] Aplet G H. Alteration of earthworm community biomass by the alien *Myrica faya* in Hawaii. *Oecologia*, 1990, 82(3): 414-416.
- [31] Kourtev P S, Huang W Z, Ehrenfeld J G. Differences in earthworm densities and nitrogen dynamics in soils under exotic and native plant species. *Biological Invasions*, 1999, 1(2/3): 237-245.
- [32] Sun G, Yin X Q, Zu Y G. Preliminary studies on soil animals in a ragweed habita. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(4): 608-611.
- [33] Yin X Q, Qiu L L, Yang L B, Song B. The relation and difference of nutritional elements in forest litter-macrofaunas-soil system. *Geographical research*, 2006, 25(2): 320-326.
- [34] Liu Z L, Xu H G, Ding H. Impacts of invasive Alien plant *Eupatorium adenophorum* on soil animal communities in Kunming. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(2): 31-35.
- [35] Wang Z Z, Zhang Y M, Xing X J. Effect of change in soil environment on community structure of soil animal. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(6): 892-897.
- [36] Song B, Ma J H, Li J, Wei L H, Yin X Q. Soil animals and their response to soil pollution in Kaifeng city. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(3): 529-535.
- [37] 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.

- [38] Ehrenfeld J G, Scott N. Invasive species and the soil: effects on organisms and ecosystem processes. *Ecological Application*, 2001, 11(5): 1259-1260.
- [39] Ehrenfeld J G. Effect of exotic plant invasion on soil nutrient cycling processes. *Ecosystems*, 2003, 6(6): 503-523.

参考文献:

- [1] 尹文英. 中国土壤动物. 北京: 科学出版社, 2000: 2-3.
- [2] 晋秀龙, 陆林, 巩劫, 王立龙. 旅游活动对九华山风景区大型土壤动物群落影响. *地理研究*, 2011, 30(1): 103-114.
- [4] 李涛, 李灿阳, 俞丹娜, 张加勇, 郑荣泉. 交通要道重金属污染对农田土壤动物群落结构及空间分布的影响. *生态学报*, 2010, 30(18): 5001-5011.
- [5] 赵祥伟, 骆永明, 滕应, 李振高, 宋静, 吴龙华. 重金属复合污染农田土壤的微生物群落遗传多样性研究. *环境科学学报*, 2005, 25(2): 186-191.
- [7] 齐艳红, 赵映慧, 殷秀琴. 中国生物入侵的生态分布. *生态环境*, 2004, 13(3): 414-416.
- [11] 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.
- [13] 类延宝, 肖海峰, 冯玉龙. 外来植物入侵对生物多样性的影响及本地生物进化响应. *生物多样性*, 2010, 18(6): 622-630.
- [16] 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.
- [17] 张天瑞, 皇甫超河, 白小明, 杨殿林, 李刚, 赖欣, 赵建宁. 黄顶菊入侵对土壤养分和酶活性的影响. *生态学杂志*, 2010, 29(7): 1353-1358.
- [20] 董梅, 陆建忠, 张文驹, 陈家宽, 李博. 加拿大一枝黄花——一种正在迅速扩张的外来入侵植物. *植物分类学报*, 2006, 44(1): 72-85.
- [21] 李博, 徐炳声, 陈家宽. 从上海外来杂草区系剖析植物入侵的一般特征. *生物多样性*, 2001, 9(4): 446-457.
- [22] 杨如意, 笪树婷, 唐建军, 陈欣. 加拿大一枝黄花的入侵机理研究进展. *生态学报*, 2011, 31(4): 1185-1194.
- [26] 方芳, 郭水良, 黄林兵. 入侵杂草加拿大一枝黄花的化感作用. *生态科学*, 2004, 23(4): 331-334.
- [27] 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.
- [28] 许湘琴, 王莹莹, 陆强, 林植华, 陈慧丽. 加拿大一枝黄花入侵对杭州湾地区土壤线虫群落的影响. *生物多样性*, 2011, 19(5): 519-527.
- [29] 刘思峰, 党耀国, 方志耕. 灰色系统理论及其应用(第二版). 北京: 科学出版社, 2004: 44-58.
- [32] 孙刚, 殷秀琴, 祖元刚. 豚草发生地土壤动物的初步研究. *生态学报*, 2002, 22(4): 608-611.
- [33] 殷秀琴, 邱丽丽, 杨令宾, 宋博. 森林凋落物-土壤动物-土壤系统中营养元素含量关系及分异. *地理研究*, 2006, 25(2): 320-326.
- [34] 刘志磊, 徐海根, 丁晖. 外来入侵植物紫茎泽兰对昆明地区土壤动物群落的影响. *生态与农村环境学报*, 2006, 22(2): 31-35.
- [35] 王振中, 张友梅, 邢协加. 土壤环境变化对土壤动物群落结构影响的研究. *土壤学报*, 2002, 39(6): 892-897.
- [36] 宋博, 马建华, 李剑, 魏林恒, 殷秀琴. 开封市土壤动物及其对土壤污染的响应. *土壤学报*, 2007, 44(3): 529-535.

CONTENTS

The combined effects of elevated CO ₂ and elevated temperature on proliferation of cyanophage PP	NIU Xiaoying, CHENG Kai, RONG Qianqian, et al (6917)
Precipitation pattern of desert steppe in Inner Mongolia, Sunite Left Banner: 1956—2009	CHEN Jun, WANG Yuhui (6925)
Emergy and economic evaluations of two sewage treatment systems	LI Min, ZHANG Xiaohong, LI Yuanwei, et al (6936)
Individual spatial pattern and spatial association of <i>Stipa krylovii</i> population in Alpine Degraded Grassland	ZHAO Chengzhang, REN Heng (6946)
Litter characteristics of nutrient and stoichiometry for <i>Phyllostachys praecox</i> over soil-surface mulching	LIU Yadi, FAN Shaohui, CAI Chunju, et al (6955)
Characteristics of leaf element concentrations of twelve nutrients in <i>Acacia confusa</i> and <i>Leucaena glauca</i> in secondary forests of acid rain region in Fuzhou	HAO Xinghua, HONG Wei, WU Chengzhen, et al (6964)
Relationships between main insect pests and their predatory natural enemies in “Yuhualu” juicy peach orchard	KE Lei, SHI Xiaoli, ZOU Yunding, et al (6972)
Simulating 10-hour time-lag fuel moisture in Daxinganling	HU Tianyu, ZHOU Guangsheng, JIA Bingrui (6984)
Soil nutrient characteristics under different vegetations in the windy and sandy region of northern Shaanxi	LI Wenbin, LI Xinpeng (6991)
Partitioning of autotrophic and heterotrophic soil respiration in southern type poplar plantations	TANG Luozhong, GE Xiaomin, WU Lin, et al (7000)
Soil water and salinity in response to water deliveries and the relationship with plant growth at the lower reaches of Heihe River, Northwestern China	YU Tengfei, FENG Qi, LIU Wei, et al (7009)
Effect of stem diameter at breast height on skewness of sap flow pattern and time lag	MEI Tingting, ZHAO Ping, NI Guangyan, et al (7018)
Invasion of exotic <i>Ageratina adenophora</i> Sprengel. alters soil physical and chemical characteristics and arbuscular mycorrhizal fungus community	YU Wenqing, LIU Wanxue, GUI Furong, et al (7027)
Models and methods for information extraction of complex ground objects based on LandSat TM images of Hainan Island, China	WANG Shudong, ZHANG Lifu, CHEN Xiaoping, et al (7036)
Effects of snow pack removal on soil hydrolase enzyme activities in an alpine <i>Abies faxoniana</i> forest of western Sichuan	YANG Yulian, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (7045)
Effects of different soil water treatments on photosynthetic characteristics and grain yield in rice	WANG Weixiao, LIU Xiaojun, TIAN Yongchao, et al (7053)
Growth characteristics, lignin degradation enzyme and genetic diversity of <i>Fomes fomentarius</i> by SRAP marker among populations	CAO Yu, XU Ye, WANG Qiuyu (7061)
Effects of the invasion by <i>Solidago canadensis</i> L. on the community structure of soil animals	CHEN Wen, LI Tao, ZHENG Rongquan, et al (7072)
Effects of intercropping on quality and yield of maize grain, microorganism quantity, and enzyme activities in soils	ZHANG Xiangqian, HUANG Guoqin, BIAN Xinmin, et al (7082)
Influence of mycorrhizal inoculation on competition between plant species and inorganic phosphate forms	ZHANG Yuting, ZHU Min, XIAN Yanxiangwa, et al (7091)
The stable nitrogen isotope of size-fractionated plankton and its relationship with biomass during winter in Daya Bay	KE Zhixin, HUNG Liangmin, XU Jun, et al (7102)
Dynamics of toxic and non-toxic <i>Microcystis</i> spp. during bloom in the large shallow hypereutrophic Lake Taihu	LI Daming, YE Linlin, YU Yang, et al (7109)
Activities of antioxidant enzymes and Zn-MT-like proteins induced in <i>Chlorella vulgaris</i> exposed to Zn ²⁺	YANG Hong, HUANG Zhiyong (7117)
Ecological footprint in Fujian based on calculation methodology for the national footprint accounts	QIU Shoufeng, ZHU Yuan (7124)
The comparison of CO ₂ emission accounting methods for energy use and mitigation strategy: a case study of China	YANG Xiai, CUI Shenghui, LIN Jianyi, et al (7135)
Ecological damage assessment of Jiaozhou Bay reclamation based on habitat equivalency analysis	LI Jingmei, LIU Tieying (7146)
The value assessment of county-level ecological assets: a case in Fengning County, Hebei Province	WANG Hongyan, GAO Zhihai, LI Zengyuan, et al (7156)
Review and Monograph	
Molecular basis for enhancement of plant drought tolerance by arbuscular mycorrhizal symbiosis: a mini-review	LI Tao, DU Juan, HAO Zhipeng, et al (7169)
A review of carbon cycling and sequestration in urban soils	LUO Shanghua, MAO Qizheng, MA Keming, et al (7177)
Overview on methods of deriving fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FPAR) using remote sensing	DONG Taifeng, MENG Jihua, WU Bingfang (7190)
Research progress on influencing of light attenuation and the associated environmental factors on the growth of submersed aquatic vegetation	WU Mingli, LI Xuyong (7202)
The framework of stoichiometry homeostasis in zooplankton elemental composition	SU Qiang (7213)
Scientific Note	
Abundance and biomass of planktonic ciliates in the sea area around Zhangzi Island, Northern Yellow Sea in July and August 2010	YU Ying, ZHANG Wuchang, ZHANG Guangtao, et al (7220)
Research of wildlife resources sustainable development based on entropy method in China	YANG Xitao, ZHOU Xuehong, ZHANG Wei (7230)
Influence of residue composition and addition frequencies on carbon mineralization and microbial biomass in the soils of agroforestry systems	WANG Yikun, FANG Shengzuo, TIAN Ye, et al (7239)
Seasonal changes in microbial diversity in different cells of a wetland system constructed for municipal sewage treatment	CHEN Yonghua, WU Xiaofu, ZHANG Zhenni, et al (7247)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 22 期 (2012 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 22 (November, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元