

加拿大一枝黄花入侵对杭州湾湿地围垦区土壤养分及活性有机碳组分的影响^①

梁雷^{1,2}, 叶小齐¹, 吴明^{1*}, 邵学新¹, 李长明^{1,2}

(1 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 国家林业局杭州湾湿地生态系统定位观测研究站, 浙江富阳 311400;

2 杭州师范大学生命与环境科学学院, 杭州 310036)

摘要:加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)是我国危害最严重的外来入侵植物之一,为了阐明其对入侵地生态系统的影响,以浙江省慈溪市杭州湾湿地围垦区内自然分布的加拿大一枝黄花群落和3种土著植物群落:束尾草(*Phacelurus Griseb*)群落、白茅(*Imperata cylindrica*)群落和芦苇(*Phragmites australis*)群落为研究对象,采用野外样地实验的方法,研究了加拿大一枝黄花入侵对土壤氮、磷和钾含量以及有效性和活性有机碳组分含量的影响。结果表明加拿大一枝黄花的入侵显著降低了土壤的pH($P < 0.05$),对土壤全氮、全磷、全钾、有效磷、速效钾和钾含量没有显著影响($P > 0.01$),但显著提高了碱解氮、铵态氮和硝态氮的含量($P < 0.01$),其中加拿大一枝黄花0~10 cm土层碱解氮含量分别是束尾草、白茅和芦苇的1.72倍、2.35倍和2.00倍。加拿大一枝黄花入侵对土壤总有机质含量无显著影响($P > 0.01$),但是却改变了活性有机碳组分,与束尾草、白茅和芦苇相比,加拿大一枝黄花群落0~10 cm表层土壤中微生物生物量碳的含量分别提高了196.72%、180.21%和41.47%;可溶性碳0~10 cm土层分别降低了27.27%、40.78%和4.00%,10~20 cm土层分别降低了41.36%、39.49%和29.63%;易氧化碳含量在两个土层中均显著降低($P < 0.01$)。上述结果表明加拿大一枝黄花的入侵降低了土壤pH,提高了土壤氮素的有效性,改变了活性有机碳组分。

关键词:外来植物入侵;加拿大一枝黄花;土壤养分;活性有机碳组分

中图分类号:Q948.1

外来植物的大肆入侵给农林和自然生态系统造成了极大危害,已成为全球关注的问题^[1]。我国是外来生物入侵影响最严重的国家之一^[2]。在中国每年由有害外来生物造成大量经济损失,它们引起的生态系统平衡改变、生物多样性丧失而造成的间接损失更是无法估计^[3]。

外来植物入侵不同程度地改变本地原有植物群落的物种组成和结构,继而对土壤的理化因素产生影响^[4]。外来植物成功入侵后,往往利用凋落物和根系分泌物等形成的化感作用^[5]以及根系结构,通过对土壤微生物群落的改变,从而影响土壤的养分循环^[6]。许多研究表明,外来植物入侵能改变土壤的有机质、氮元素、磷元素^[7]和钾元素的循环。外来植物入侵导致的土壤环境变化,改变外来种和本地种的竞争关系,导致其入侵性的增强,可能是其成功入侵的重要

原因^[8]。

加拿大一枝黄花在分类上属于菊科,一枝黄花属,原产北美,1935年引入到上海,20世纪80年代迅速扩散蔓延成杂草^[9],目前在我国上海、浙江、江苏等多省(市)都有广泛分布,我国已将加拿大一枝黄花列入中国重要外来有害植物名录^[9]。目前,国内外对加拿大一枝黄花的研究主要在于形态描述^[10]、繁殖特性^[11]、分布动态^[12]、生理生化特点^[13]、化感作用^[14]、土壤微生物^[15]的影响等方面。陆建忠等^[16]发现加拿大一枝黄花能调节土壤pH,增加总碳氮库和有机质库,降低了铵氮库和硝氮库,并且促进了微生物的矿化速率和氨化速率。Zhang等^[17]发现加拿大一枝黄花群落提高了土壤pH和体积质量,增加了土壤有机碳和铵态氮含量,同时降低了土壤全氮、全磷、硝态氮和速效磷的含量。这些对于进一步展开对加拿

基金项目:国家自然科学基金项目(31400378)、中国林业科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(CAFYBB2014QB034)资助。

* 通讯作者(hangzhoubay@126.com)

作者简介:梁雷(1988—),男,河北廊坊人,硕士研究生,主要从事湿地生态学研究。E-mail: ll2012wetland@126.com

大一枝黄花入侵机制的研究提供了重要的参考。但是,这些研究在探讨加拿大一枝黄花的入侵对土壤的影响时,仅仅将加拿大一枝黄花群落与一种土著植物群落进行比较,而据野外观察,在加拿大一枝黄花入侵的区域,土著植物群落呈现出高度的多样性,因此加拿大一枝黄花的入侵效应是否具有普遍性,还需要更多的研究。本文比较了加拿大一枝黄花入侵的杭州湾湿地围垦区 3 种优势土著植物群落与加拿大一枝黄花单优势群落的土壤性状的差异,为进一步阐明加拿大一枝黄花的入侵效应提供依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究样地位于浙江宁波杭州湾国家湿地公园的生态保育区内(121°09'58"E, 30°19'29"N)。该区域植被群落自然发育,较少受到人为干扰,湿地公园内地势平坦、生境条件均一,土壤含盐量约为 2‰, pH 8~9,不同草本植被发育时间相同,具有可比性。

植被受人为干扰影响较小,物种多样性较低,多为单优势群落。主要群落是处于演替早期的单优势种的草本群落:白茅群落、芦苇群落、束尾草群落和加拿大一枝黄花群落。该区域位于杭州湾南岸,属于北亚热带海洋性季风气候,年均气温 16℃,年均降水量 1 273 mm,日照 2 038 h,无霜期 244 天。8 月份本区域所研究植被生长趋于稳定,因此不同植物群落植物取样和土壤取样均在 2015 年 8 月份进行。调查时,白茅、芦苇、束尾草和加拿大一枝黄花的平均株高分别约为 90、150、155 和 155 cm,平均生物量分别为 693.24、954.86、1 531.66 和 1 666.25 g/m²。各样地间距离大于 200 m。芦苇、束尾草和白茅均为禾本科多年生草本植物,芦苇地下有发达的匍匐根状茎,水生或湿生,白茅具粗壮的长根状茎。加拿大一枝黄花为菊科、一枝黄花属的多年生草本植物,植株粗壮,成株平均高度 2 m 以上,主根较明显,须根细且密布,具长根状茎,有种子和根茎两种繁殖方式。

表 1 样地土壤基本理化性质
Table 1 Soil basic physico-chemical properties of experiment

群落	土层(cm)	pH	含水量(%)	体积质量(g/cm ³)	孔隙度(%)
加拿大一枝黄花	0~10	8.17±0.03 D	19.05±1.83 B	0.91±0.09 A	65.67±3.26 A
	10~20	8.36±0.05 b	17.47±1.95 b	1.02±0.05 a	61.52±1.91 a
束尾草	0~10	8.47±0.04 B	29.62±1.57 A	0.90±0.05 A	66.17±1.89 A
	10~20	8.57±0.08 a	27.54±1.42 a	0.88±0.09 a	66.96±3.29 a
白茅	0~10	8.28±0.01 C	25.19±2.13 A	0.85±0.03 A	68.02±1.25 A
	10~20	8.38±0.02 b	26.81±1.78 a	0.90±0.08 a	66.29±3.13 a
芦苇	0~10	8.57±0.04 A	29.47±2.41 A	0.99±0.06 A	62.56±2.12 A
	10~20	8.69±0.02 a	25.63±2.35 a	1.02±0.07 a	61.74±2.50 a

注:同列数据大写字母不同表示不同优势种植物群落间 0~10 cm 土层差异显著($P<0.05$),小写字母不同表示不同优势种植物群落间 10~20 cm 土层差异显著($P<0.05$)。

1.2 样地设置和土壤样品采集

本研究采用野外样地实验的方法,研究加拿大一枝黄花和 3 种土著植物对土壤主要营养元素和活性有机碳组分的影响。以选取优势种为芦苇、束尾草、白茅和加拿大一枝黄花的典型样地各 5 个,每个样地设置 10 m×10 m 样方。所选样地中加拿大一枝黄花群落为单优势群落;白茅群落中伴生有加拿大一枝黄花;芦苇群落和束尾草群落中芦苇、束尾草分别是优势种,除了冠层伴生有少量加拿大一枝黄花外,下层伴生有少量白茅、野艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia*)、苣荬菜(*Sonchus brachyotus*)等物种。

土壤物理性质(土壤体积质量、含水量和总孔隙度)的测定采集样方内原状土,测定其他参数时分别采集每个样方内深度为 0~10 cm 表层土壤以及 10~

20 cm 下层土壤,将每个样地内 5 个小样方中采集到的新鲜土壤样品分成 2 份,一份在室内自然风干、过筛后保存;另一份于 4℃ 冰箱保存,在两周内完成土壤铵态氮、硝态氮的测定。

1.3 土壤主要理化性质测定

土壤含水量采用烘干法测定;土壤体积质量采用环刀法测定;土壤 pH 采用电位法(土:液=1:2.5)测定;土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定;土壤全氮采用凯氏定氮法测定;土壤铵态氮含量采用 KCl 浸提-靛蓝比色法测定;土壤硝态氮含量采用酚二磺酸比色法测定;土壤碱解氮采用碱解扩散法测定;土壤全磷含量采用 HClO₄-H₂SO₄ 法测定;土壤速效磷含量采用 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定;土壤全钾采用 NaOH 熔融-火焰光度法测定;土壤速效钾用

NH₄OAc 浸提-火焰光度法测定。以上测定指标均参照鲍士旦^[18]的方法。

土壤总有机碳含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定；土壤易氧化碳含量测定采用 KMnO₄ 氧化法；土壤可溶性碳含量采用蒸馏水浸提，0.45 μm 滤膜过滤，总有机碳分析仪测定的方法；土壤微生物生物量碳的测定采用氯仿熏蒸法^[19]。

1.4 数据处理

应用 SPSS 12.0 One Way ANOVA 对加拿大一枝黄花土壤、束尾草土壤、白茅土壤和芦苇土壤之间的土壤特性参数进行方差分析。

2 结果与分析

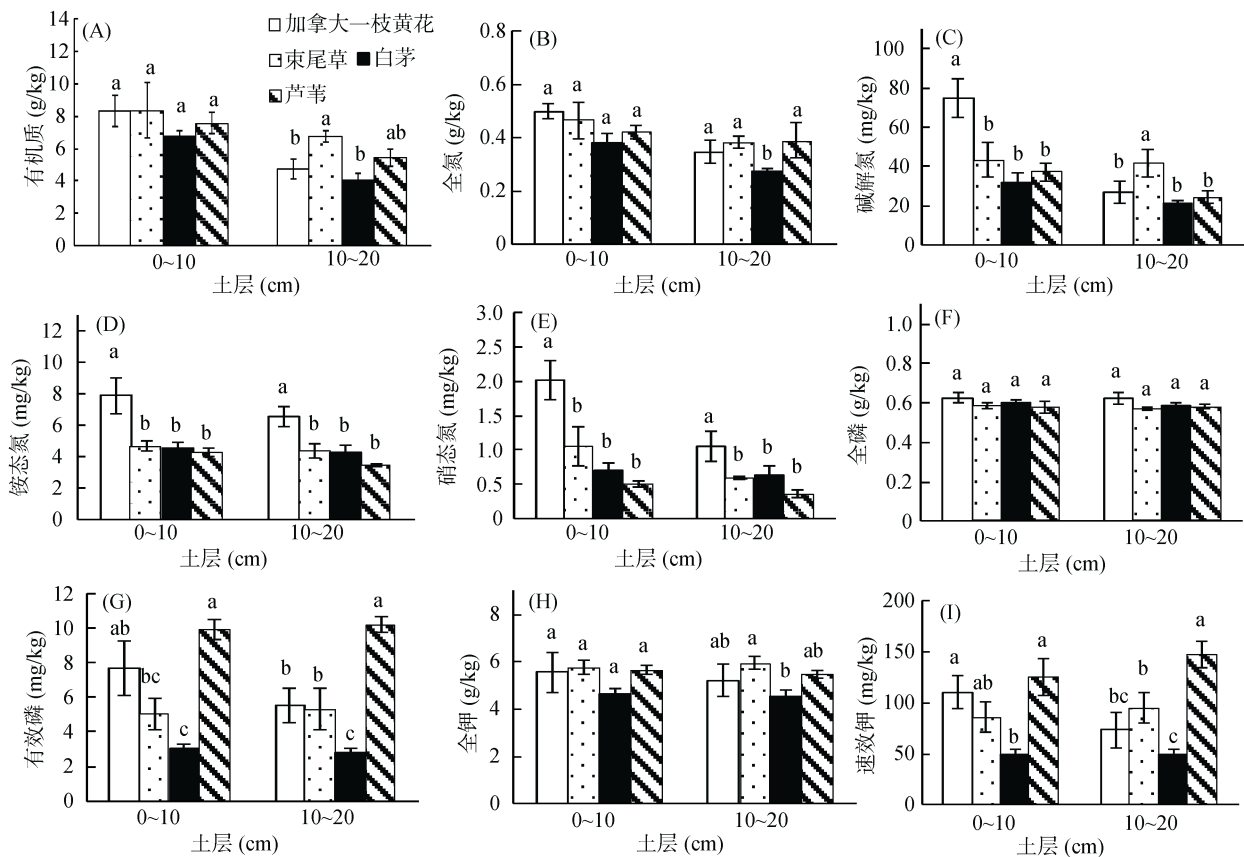
2.1 不同植物群落的土壤理化性质变化

由表 1 可见，加拿大一枝黄花入侵后 0~10 cm 及 10~20 cm 土层的 pH 均显著降低 ($P<0.05$)，其高低顺序为：加拿大一枝黄花<白茅<束尾草<芦苇。加拿大一枝黄花两个土层的土壤含水量也显著低于 3 种土著植物 ($P<0.05$)，与土著植物束尾草、白茅和芦苇相比，其含水量在 0~10 cm 土层分别降低了

35.68%、24.37% 和 35.34%，在 10~20 cm 土层分别降低了 36.58%、34.85% 和 31.85%。4 种植物的土壤体积质量比较，在 0~10 cm 土层加拿大一枝黄花低于芦苇但是高于束尾草和白茅，在 10~20 cm 土层加拿大一枝黄花比 3 种土著植物都要高。而土壤孔隙度在 4 种植物中的趋势正相反，在 0~10 cm 土层加拿大一枝黄花高于芦苇但是低于束尾草和白茅，在 10~20 cm 土层加拿大一枝黄花比 3 种土著植物都要低。

2.2 不同植物群落的土壤无机养分变化

由图 1 可见，加拿大一枝黄花的入侵没有显著影响土壤的有机质状况。与之类似，各优势种植物群落土壤间的全氮也没有明显差异。但是加拿大一枝黄花与 3 种土著植物的土壤铵态氮、硝态氮和碱解氮含量在 0~10 cm 土层均差异显著 ($P<0.01$)，其中 0~10 cm 土层土壤碱解氮含量加拿大一枝黄花分别是束尾草、白茅和芦苇的 1.72 倍、2.35 倍和 2.00 倍，加拿大一枝黄花在 10~20 cm 土层中的铵态氮和硝态氮含量同样显著高于 3 个土著种植物 ($P<0.01$)，但是碱解氮含量低于束尾草。与束尾草、白茅和芦苇相比，加拿大一枝黄花在 0~10 cm 土层的全磷含量分别提高了



(图中小写字母不同表示同一土层不同植物群落间差异显著 ($P<0.01$), 下同)

图 1 加拿大一枝黄花群落、束尾草群落、白茅群落和芦苇群落土壤有机质、氮、磷、钾及其有效成分分布

Fig. 1 Soil organic matter, nitrogen, phosphorus, potassium and their available components distributions in *Solidago canadensis* community, *Phacelurus Griseb* community, *Imperata cylindrica* community and *Phragmites australis* community

7.29%、4.57%和 8.59%，在 10~20 cm 土层分别提高了 9.28%、6.23% 和 6.92%。两个土层中的土壤全钾含量在加拿大一枝黄花入侵后均无显著改变。加拿大一枝黄花土壤两个土层有效磷含量和 0~10 cm 土层速效钾含量类似，均高于束尾草和白茅，但低于芦苇；10~20 cm 土层速效钾含量与束尾草和白茅无显著差异，但显著低于芦苇。

2.3 不同植物群落的土壤活性有机碳变化

加拿大一枝黄花的入侵对土壤总有机碳在 0~10 cm 土层和 10~20 cm 土层没有产生显著影响(图 1)。由图 2 可见，加拿大一枝黄花在两个土层中均显著降低了易氧化碳的含量($P<0.01$)，在 0~10 cm 土层中 3 种土著植物束尾草、白茅和芦苇的

易氧化碳含量分别是加拿大一枝黄花的 1.63 倍、1.54 倍和 2.12 倍，在 10~20 cm 土层中分别为 1.61 倍、1.78 倍和 2.64 倍。加拿大一枝黄花同样降低了可溶性碳的含量，与束尾草、白茅和芦苇相比，加拿大一枝黄花的可溶性碳含量在 0~10 cm 土层中分别降低了 27.27%、40.78% 和 4.00%，在 10~20 cm 土层分别降低了 41.36%、39.49% 和 29.63%。与之相反的是，加拿大一枝黄花的入侵提高了 0~10 cm 表层土壤中土壤微生物生物量碳的含量，与束尾草、白茅和芦苇相比分别提高了 196.72%、180.21% 和 41.47%，但是在 10~20 cm 土层中加拿大一枝黄花的入侵并没有对微生物生物量碳的含量产生显著的影响($P>0.01$)。

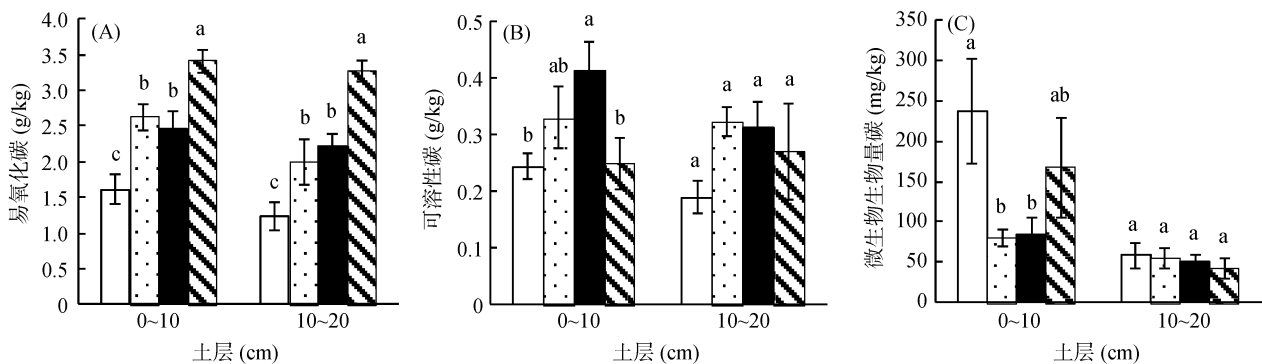


图 2 加拿大一枝黄花群落、束尾草群落、白茅群落和芦苇群落土壤易氧化碳、可溶性碳和微生物生物量碳分布

Fig. 2 Soil readily oxidizable carbon, soluble carbon, microbial biomass carbon distributions in *Solidago canadensis* community, *Phacelurus Griseb* community, *Imperata cylindrica* community and *Phragmites australis* community

3 讨论

3.1 加拿大一枝黄花入侵对土壤理化性质的影响

植物通过影响土壤系统从而形成有利于自身生长的环境被认为是植物竞争演替的重要驱动机制之一^[20]，大量研究表明，很多外来入侵植物都因为改变了新环境的土壤理化性质从而实现成功入侵，入侵植物对土壤系统的理化性质能产生影响，但存在不一致的格局，包括增加、减少和无影响 3 种效应^[21]，入侵植物与土著植物在生理生态特性、根系结构特征、凋落物的质与量、化感物质的差异可能是形成格局多样性的主要原因^[22]。本研究结果显示，加拿大一枝黄花的入侵降低了土壤含水量、孔隙度和 pH，提高了土壤体积质量。加拿大一枝黄花与 3 种土著植物相比较低的土壤含水量，可能是植物自身对于生长环境的选择导致的。土壤体积质量和土壤孔隙度都是土壤紧实度的指标，大小主要受到土壤有机质含量、土壤结构以及植物的根系结构的影响，加拿大一枝黄花较高的体积质量和较低的土壤孔隙度可能与其较大的植株密度和复杂的根系结构相关。本研究中的样

地均位于杭州湾滨海湿地的围垦区内，样地内土壤呈碱性，pH 多为 8~9 左右(表 1)，加拿大一枝黄花的入侵有效降低了土壤的 pH，这可能是由于其凋落物和根系分泌物中含有酸性物质能有效改善土壤碱性环境，有利于土壤养分的保存和积累。对于一些土壤基本理化性质的改变，可能是加拿大一枝黄花入侵机制的一部分。

3.2 加拿大一枝黄花入侵对土壤无机养分的影响

入侵的正反馈假说认为外来物种能通过与其土壤的相互作用来获得竞争优势以增强入侵力^[8]。Duda 等^[23]的研究发现随着藜科植物盐生草(*Halogeton glomeratus*)的入侵，显著改变了入侵地的土壤生态系统，显著提高了土壤中有机质、全氮、速效氮、全磷、全钾和钠的含量，这些土壤性质的改变显然有利于增强其在新生境中的竞争能力。陆建忠等^[16]通过野外和移栽实验分析了加拿大一枝黄花入侵对土壤有机质、全氮、铵态氮和硝态氮的影响，发现加拿大一枝黄花能够促进土壤氮矿化速率，提高土壤无机氮供给，从而创造出更有利于自身生长的环境，而这又与本研究得出的结论相似。本研究试验地点在 2008 年地形改造后较

少受到人为干扰,生境均一,土壤肥力差异不大,加之样方面积较大,样方间距离较远,可以排除潜在的土壤养分异质性的影响。因此,我们认为各优势种植物群落间土壤养分差异是由群落物种的不同造成的,加拿大一枝黄花群落下较高的土壤养分含量是其入侵的结果。研究结果显示,加拿大一枝黄花对土壤有机质、全氮、全磷、全钾、有效磷和速效钾无显著影响($P>0.01$),但是显著增加了土壤铵态氮、硝态氮和碱解氮含量($P<0.01$)。加拿大一枝黄花的入侵并没有改变土壤有机质和全钾的含量(图 2A、图 2H),造成这种结果的原因可能是加拿大一枝黄花群落形成时间较短,其大量凋落物和根系分泌物尚未进入土壤系统循环中,没有改变原本均一的土壤有机质和全钾的分布。土壤的全氮和全磷的含量在加拿大一枝黄花入侵后稍有提高($P>0.01$),但是其包括铵态氮、硝态氮和碱解氮在内的土壤有效氮与其他 3 种土著植物群落相比得到显著提高,这与陆建忠等^[16]发现的,加拿大一枝黄花能促进土壤氮矿化速率,提高土壤无机氮供给的现象一致。同时,加拿大一枝黄花群落的土壤有效磷和速效钾含量也是高于束尾草和白茅群落的,但是低于芦苇群落,这可能与芦苇生长环境中与其他植物相比较高的 pH 和含水量有关。

3.3 加拿大一枝黄花入侵对土壤活性有机碳组分的影响

土壤活性有机碳虽然只占总有机碳的一小部分,却是土壤生态系统中最重要能量来源之一,能指示土壤有机质的早期变化^[25]。王刚等^[26]在江苏盐城通过对互花米草(*Spartina alterniflora*)海向入侵对土壤有机碳的影响研究,发现互花米草的入侵对土壤活性有机碳的影响较大,并且随着入侵时间的增长互花米草显著改变了土壤总有机碳的组成。本试验的研究结果显示,加拿大一枝黄花对土壤总有机碳含量无显著影响($P>0.01$),但降低了土壤易氧化碳和可溶性碳含量,增加了土壤微生物生物量碳含量。加拿大一枝黄花的入侵对土壤总有机碳在两个土层中均未导致显著改变,这可能与土壤有机质的状况类似,均与加拿大一枝黄花群落形成时间较短有关。但是加拿大一枝黄花的入侵却在两个土层中均显著降低了易氧化碳的含量,易氧化碳作为土壤有机碳的敏感因子,可以指示土壤有机质的短暂波动,其含量降低可能是因为加拿大一枝黄花入侵提高了土壤微生物活性(微生物生物量碳提高),增加了土壤活性有机碳的分解损失。加拿大一枝黄花入侵后提高了 0~10 cm 土层的微生物生物量碳含量,对 10~20 cm 土层的微生物生物量碳含量则无显著影响($P>0.01$),微生物生物量碳是土

壤中微生物细胞裂解后细胞内容物中的有机碳,所以微生物生物量碳的含量可以表示土壤中微生物的数量与活性,也就是说加拿大一枝黄花提高了 0~10 cm 土层中微生物的含量与活性,但是对于 10~20 cm 土层没有显著影响,这也可以解释加拿大一枝黄花对 0~10 cm 土层中速效养分的影响要明显强于对 10~20 cm 土层中速效养分的影响的原因。加拿大一枝黄花降低了两个土层中的可溶性碳含量,作为土壤微生物可直接利用的有机碳源,土壤可溶性碳可以表示土壤中微生物消耗能量的情况,这也可以说明加拿大一枝黄花入侵后土壤微生物的数量和活性得到提高。伴随着加拿大一枝黄花的入侵,土壤中活性有机碳的组分也发生变化,打破了原有的平衡,创造了对加拿大一枝黄花入侵的有利条件。

4 结论

通过对加拿大一枝黄花与 3 种土著植物土壤相比较,发现加拿大一枝黄花比 3 种土著植物更显著地影响了土壤理化性质,表现出比土著植物更强地改善土壤养分有效性和活性有机碳组分的能力,即通过比较强烈地改善土壤环境,而快速高效地获得养分与土著植物竞争资源,以创造有利于其入侵的土壤环境。本文丰富了加拿大一枝黄花入侵影响的土壤类型和土壤因子,对于掌握加拿大一枝黄花入侵机理具有重要意义。

致谢:在本研究试验和论文写作过程中得到焦盛武老师的指导,在采集样品过程中得到吴昊、宁潇和古春风同学的帮助,谨此一并致谢!

参考文献:

- [1] Hooper D U, Adair E C, Cardinale B J. A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change[J]. *Nature*, 2012, 486(7401): 105-108
- [2] 强胜,曹学章. 中国异域杂草考察与分析[J]. *植物资源与环境学报*, 2000, 9(4): 31-38
- [3] 丁晖,徐海根,强胜. 中国生物入侵的现状与趋势[J]. *生态与农村环境学报*, 2011, 27(3): 35-41
- [4] 梁羽,胡章立,雷安平. 外来入侵种对土壤环境的影响[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(3): 1 652-1 654
- [5] Li Y P, Feng Y L, Chen Y J. Soil microbes alleviate allelopathy of invasive plants[J]. *Sci. Bull.*, 2015, 60(12): 1 083-1 091
- [6] Haubensak K A, Parker I M. Soil changes accompanying invasion of the exotic shrub *Cytisus scoparius* in glacial outwash prairies of western Washington[J]. *Plant Ecology*, 2004, 175: 71-79
- [7] 吴双桃. 薇甘菊对入侵地植物群落及土壤理化性质的影响[J]. *湖北农业科学*, 2011, 50(18): 3 711-3 713
- [8] Ehrenfeld J G. Effects of exotic plant invasions on soil nutrient cycling processes[J]. *Ecosystem*, 2003, 6: 503-523

- [9] 李振宇, 解焱. 中国外来入侵物种[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002
- [10] Hartnett D C, Bazzaz F A. The regulation of leaf, ramet and genet densities in experimental populations of the rhizomatous perennial *Solidago Canadensis*[J]. *Journal of Ecology*, 1985, 73(2): 429–443
- [11] 杨如意, 咎树婷, 唐建军. 加拿大一枝黄花的入侵机理研究进展[J]. *生态学报*, 2011, 31(4): 1 185–1 194
- [12] 徐燕云, 郭水良. 外来入侵植物加拿大一枝黄花种群分布格局研究[J]. *湖北农业科学*, 2011, 50(18): 3 732–3 734
- [13] 郭水良, 方芳. 入侵植物加拿大一枝黄花对环境的生理适应性研究[J]. *植物生态学报*, 2003, 27(1): 47–52
- [14] 白羽, 黄莹莹, 孔海南, 等. 加拿大一枝黄花化感抑藻效应的初步研究[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(7): 1 296–1 303
- [15] 沈荔花, 郭琼霞, 林文雄. 加拿大一枝黄花对土壤微生物区系的影响研究[J]. *中国农学通报*, 2007, 23(4): 323–327
- [16] 陆建忠, 裘伟, 陈家宽. 入侵种加拿大一枝黄花对土壤特性的影响[J]. *生物多样性*, 2005, 13(4): 347–356
- [17] Zhang C B, Wang J, Qian B Y. Effects of the invader *Solidago canadensis* on the soil properties[J]. *Appl. Soil Ecol.*, 2009, 43: 163–169
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1981
- [19] 秦纪洪, 王琴, 孙辉. 川西亚高山–高山土壤表层有机碳及活性组分沿海拔梯度的变化[J]. *生态学报*, 2013, 33(18): 5 858–5 864
- [20] Holmgren M, Scheffe M, Huston M A. The interplay of facilitation of and competition in plant communities[J]. *Ecology*, 1997, 78: 1 966–1 975
- [21] 柯展鸿, 邱佩霞, 胡东雄, 等. 三裂叶蟛蜞菊入侵对土壤酶活性和理化性质的影响[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(3): 432–436
- [22] 徐春荣, 肖文军. 植物入侵对土壤生物多样性及土壤理化性质的影响[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(17): 9 113–9 115
- [23] Duda J J, Freeman D C, Emlen J M, et al. Differences in native soil ecology associated with invasion of the exotic annual chenopod, *Halogeton glomeratus*[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 38: 72–77
- [24] 孙伟军, 方晰, 项文化, 等. 湘中丘陵区不同演替阶段森林土壤活性有机碳库特征[J]. *生态学报*, 2013, 33(24): 7 765–7 773
- [25] 王刚, 杨文斌, 王国祥. 互花米草海向入侵对土壤有机碳组分、来源和分布的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(8): 2 474–2 483

Invasion Effects of *Solidago canadensis* on Soil Nutrients and Active Organic Carbon Components in Reclamation District of Hangzhou Bay Wetland

LIANG Lei^{1,2}, YE Xiaoqi¹, WU Ming^{1*}, SHAO Xuexin¹, LI Changming^{1,2}

(1 Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Wetland Ecosystem Research Station of Hangzhou Bay, State Forestry Administration, Fuyang, Zhejiang 311400, China; 2 College of Life and Environment Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310036, China)

Abstract: *Solidago canadensis* is one of the worst hazardous invasive plants in China, in order to clarify its influence on the ecological system of invaded land, this experiment took *Solidago canadensis* communities and three kinds of native plant communities: *Phacelurus Griseb* communities, *Imperata cylindrical* communities and *Phragmites australis* communities naturally distributed in the reclamation district of Cixi city of Hangzhou Bay wetland as the research object, studied the invasion effects of *Solidago canadensis* on soil nitrogen, phosphorus and potassium contents and their available component contents as well as active organic carbon components on wild sample plots. The results showed that the invasion of *Solidago canadensis* significantly reduced soil pH value ($P < 0.05$), had no significant influence on contents of soil total nitrogen, total phosphorus, total potassium, available phosphorus and available potassium ($P > 0.01$), but significantly increased the contents of available nitrogen, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen ($P < 0.01$), soil available nitrogen content in *Solidago canadensis* in 0–10 cm soil layer were 1.7 times, 2.4 times and 2.0 times of *Phacelurus Griseb*, *Imperata cylindrical* and *Phragmites australis*, respectively. The invasion of *Solidago canadensis* had no significant influence on soil total organic matter content ($P > 0.01$), but changed soil active organic carbon components. Compared with the *Phacelurus Griseb*, *Imperata cylindrical* and *Phragmites australis*, soil microbial carbon content in 0–10 cm soil layer in *Solidago canadensis* increased by 196.72%, 180.21% and 41.47%, respectively; soil soluble carbon reduced by 27.27%, 40.78% and 27.27%, respectively, and reduced by 41.36%, 39.49% and 29.63% in 10–20 cm layer, respectively; soil readily oxidized carbon reduced significantly in the two layers ($P < 0.01$). The above results showed that the invasion of *Solidago canadensis* could reduce soil pH value, increase the effectiveness of soil nitrogen and change soil active organic carbon components.

Key words: Exotic plant invasion; *Solidago canadensis*; Soil nutrients; Active organic carbon components