

小飞蓬入侵对伊犁河谷草原土壤有机碳的影响

杜田^{1,2,3}, 崔东^{1,2,3,4}, 张雨露^{1,2,3}, 沙吾丽^{2,3},
刘海军^{2,3}, 闫俊杰^{2,3}, 陈晨^{2,3}

(1.伊犁师范大学,新疆维吾尔自治区普通高校天然产物化学与应用重点实验室,新疆伊宁 835000;
2.伊犁师范大学生物与地理科学学院,新疆伊宁 835000;3.伊犁师范大学资源与生态研究所,新疆伊宁 835000;
4.中国科学院新疆生态与地理研究所,荒漠与绿洲生态国家重点实验室,新疆乌鲁木齐 830011)

摘要:为探讨小飞蓬入侵对伊犁河谷草原生态系统的影响,揭示小飞蓬的入侵机制,对不同入侵程度(轻度、中度、重度)小飞蓬及本地植物猪毛蒿根际土壤有机碳(SOC)、土壤容重和土壤含水量的变化规律进行研究。结果表明:随着小飞蓬入侵程度的加深,土壤SOC含量上升;小飞蓬重度、中度、轻度入侵和猪毛蒿群落土壤有机碳含量平均值分别为16.70、11.31、9.56 g·kg⁻¹和8.23 g·kg⁻¹,表明小飞蓬入侵增加了伊犁河谷草原土壤SOC的含量,随着入侵程度的加深,土壤SOC含量提高更加明显,同时增加了伊犁河谷草原土壤的碳汇功能。从垂直分布剖面上看,4个群落土壤SOC含量变化一致:随着土壤深度的增加而SOC含量减少,且最大土壤SOC含量均出现在0~20 cm土层,小飞蓬重度、中度、轻度入侵和猪毛蒿群落最大土壤SOC含量分别为:20.3、15.0、13.2 g·kg⁻¹和11.5 g·kg⁻¹。小飞蓬重度、中度、轻度入侵和猪毛蒿群落土壤容重平均值分别为5.02、4.94、4.85 g·kg⁻¹和5.09 g·kg⁻¹,土壤含水量平均值分别为1.22%、1.20%、1.19%和1.24%,表明小飞蓬的入侵改变了伊犁河谷土壤物理性质,随着小飞蓬入侵程度的加深不断降低土壤容重与含水量,土壤含水量与土壤容重存在极显著的正相关性($P<0.01$),结合土壤SOC进行分析,发现土壤容重与含水量对土壤SOC的影响一致,均呈现极其显著的负相关性($P<0.01$)。

关键词:小飞蓬入侵;土壤有机碳;土壤容重;土壤含水量;伊犁河谷草原

中图分类号:S154.1 **文献标志码:**A

Effects of invasion of *Conyzacanadensis* on soil organic carbon in Grassland of Yili Valley

DU Tian^{1,2,3}, CUI Dong^{1,2,3,4}, ZHANG Yulu^{1,2,3}, SHA Wuli^{2,3},
LIU Haijun^{2,3}, YAN Yunjie^{2,3}, CHEN Chen^{2,3}

(1. University and College Key Lab of Natural Product Chemistry and Application in Xinjiang, Yili Normal University, Yining, Xinjiang 835000, China;
2. College of Biology and Geography, Yili Normal University, Yining, Xinjiang 835000, China;
3. Institute of Resources and Ecology, Yili Normal University, Yining, Xinjiang 835000, China;
4. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: In order to reveal the invasion mechanism of the *Conyzacanadensis*, and explore its influence on grassland ecosystem in Yili Valley, the evolution of soil organic carbon(SOC) in the rhizosphere of *Conyzacanadensis* with different invasion degree(mild, moderate, severe) and the local plant of *Artemisia scoparia* Waldst.et Kit. were analyzed. The results showed that the soil SOC content increased with the deepening of the invasion of *Conyzacanadensis*; the severe, moderate, and the mild invasion of *Conyzacanadensis*, and the average soil values of *Arte-*

收稿日期:2019-02-26 修回日期:2020-01-27

基金项目:新疆维吾尔自治区教育厅普通高校重点实验室资助项目(2017YSHXZD03)

作者简介:杜田(1996-),女,河南邓州人,硕士研究生,研究方向为入侵植物与生态研究。E-mail:1531224349@qq.com

通信作者:崔东(1984-),男,河北河间人,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事土壤生态、入侵植物及其生态研究。E-mail:cuidongw@126.com

misia scoparia Waldst.et Kit. were 16.70, 11.31, 9.56, 8.23 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$. It is indicated that the invasion of *Conyzacandensis* increased soil SOC content. With the deepening of the invasion, the ability to increase soil SOC was more obvious. At the same time, the carbon sink function of the grassland soil in the Yili River Valley increased. From the vertical distribution profile, the soil SOC content of the four communities changed uniformly: it decreased with the increase in soil depth, and the maximum soil SOC values all appeared in the 0~20 cm soil layer. The severe invasion of *Conyzacandensis*, the moderate invasion of *Conyzacandensis*, the mild invasion of *Conyzacandensis*, and the maximum soil SOC values of *Artemisia scoparia* Waldst.et Kit. were 20.3, 15.0, 13.2 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and 11.5 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$. The severe invasion of *Conyzacandensis*, the moderate invasion of *Conyzacandensis*, the mild invasion of *Conyzacandensis*, and soil bulk density values of *Artemisia scoparia* Waldst.et Kit. were 5.02, 4.94, 4.85 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-3}$ and 5.09 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-3}$. The average values of soil water content were 1.22%, 1.20%, 1.19%, and 1.24%. It showed that the invasion of *Conyzacandensis* changed the physical properties of the soil in the Yili River Valley. As the invasion of *Conyzacandensis* was deepened, the soil bulk density and water content were continuously reduced. There was a very significant positive correlation between water content, soil water content, and soil bulk density ($P < 0.01$). Based on the analysis of soil SOC, it was found that the effects of soil bulk density and water content on soil SOC were consistent, and all showed extremely significant negative correlations ($P < 0.01$).

Keywords: *Conyzacandensis* invasion; soil organic carbon; soil bulk density; soil moisture content; grassland in Yili valley

有机碳在土壤中的含量变化可以用来衡量土壤特性的变化。由于植物的入侵,使得植物的不同组成结构和群落对土壤造成的影响也不同,从而改变了土壤的理化性质。国内外针对植物入侵与土壤性质方面的影响开展过多项研究,如针对目前祁连山北坡遭受甘肃臭草 (*Melicaprzewalskyi*) 入侵的退化草地,由于甘肃臭草的入侵使得土壤特征发生变化^[1];加拿大一枝黄花 (*Solidagocanadenis*) 入侵杭州湾湿地从而提高了土壤 pH 值及土壤有机碳含量^[2];互花米草 (*Spartina alterniflora*) 入侵闽江河口湿地导致互花米草生物量增加及土壤有机碳及养分发生变化^[3];紫茎泽兰 (*Eupatorium adenophoru*) 通过入侵改变土壤的微生物群落,加速了养分循环,使得紫茎泽兰吸收更多的养分,加速其扩张竞争^[4]。Kourtev、Zaman 等^[5-7] 比较了入侵美国新泽西州的外来植物日本小檗 (*Berberis thunbergii* DC.) 和柔枝莠竹 (*Microstegium vimineum* (Trin.) A. Camus) 对土壤功能、微生物群落结构的影响,发现两种外来植物入侵后通过土壤酶和微生物群落对呼吸作用强度起到一定的作用。外来植物频繁的入侵能够最大程度破坏农林自然生态系统,这个问题已经受到广泛关注。我国是世界上受外来植物入侵影响最大的国家之一。中国每年的外来物种数量多,种类广,在生态平衡和生物多样性方面遭受了巨大的损失^[8]。而目前关于干旱区植物入侵对土壤性质影响方面的研究较少。

小飞蓬 (*Conyzacandensis*) 为菊科植物小白酒

草的全草或鲜叶,为越年生或一年生草本植物。2014年8月,小飞蓬被列入《中国外来入侵物种名单(第三批)》^[9]中,原产于北美洲,在世界各地广泛分布,在我国广泛分布于湖南(24°38'N~30°08'N)至黑龙江(43°26'N~53°33'N)^[10]。该植物可以产生大量瘦果,这种果子有一种叫做介冠毛的物质,在风中可以迅速被吹散以覆盖的形式蔓延在植物上,对农作物有着极大危险,为一种常见的野草,通过分泌化感物质抑制邻近的其他植物生长^[11-12]。

目前,伊犁河谷已经成为小飞蓬入侵较严重的地区之一,但关于其入侵对伊犁河谷草原土壤生态环境的影响目前尚未见报道。因此本研究以小飞蓬自然入侵条件下的伊犁河谷为研究区域,对入侵区域的土壤有机碳及活性组分质量分数的垂直分布状况及其影响因子进行探讨,以期能够解析小飞蓬入侵的土壤生态学机制,为干旱半干旱区草原生态环境的保护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆伊犁托乎拉苏大草原,平均海拔 2 300 m,地理坐标为 81°13'40"~82°42'20"E, 43°35'10"~44°29'30"N 之间,年均降水量 340 mm,年均蒸发量为 1 621 mm,极端最高气温 38.7℃、极端最低气温 -40.4℃、年平均气温 9.2℃,平均日照时数为 2 900 h 左右,无霜期 163 d。土壤随海拔的升高,由低向高依次分布着灰钙土、栗钙土、黑钙土、灰褐

色森林土、亚高山草甸土、高山草甸土^[13]。

1.2 样品采集与处理

本研究采用野外样地实验的方法,在 2017 年 8 月对小飞蓬入侵较为严重的托乎拉苏大草原进行采样。选取小飞蓬轻度、中度、重度三种入侵区域和猪毛蒿生长的样地各 3 个,每个样地设置为 1 m×1 m 样方,共 12 块。在每块样地内,采集 3 个土壤剖面,每隔 20 cm 采集 1 个土壤样品,采样深度为 60 cm,按自上而下对土壤取样,采集的样品装入自封

袋中,共采集 108 袋土壤样品,同时记录采样点位置及海拔。土样带回实验室,置于通风、阴凉、干燥处风干,过筛备用。土样基本理化性质见表 1 所示^[14]。

1.3 样品分析与数据处理

土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾—外加加热法测定;土壤容重采用环刀法进行测定^[15];土壤水分采用烘干法^[15]。

运用 Excel 2016 软件进行数据处理和分析,利用 SPSS 13.0 进行统计检验。

表 1 样地基本理化性质
Table 1 Basic physical and chemical properties of plot plots

群落 Community	海拔高度 Altitude/m	土层深度 Soil layer/cm	土壤水分含量 Water content/%	土壤容重 Soil bulk density/(g·cm ⁻³)
小飞蓬轻度	1157	0~20	5.17	1.2535
Mild invasion of <i>Conyzacandensis</i>	1157	20~40	5.01	1.2476
	1157	40~60	4.87	1.2278
小飞蓬中度	1162	0~20	5.10	1.2325
Moderate invasion of <i>Conyzacandensis</i>	1162	20~40	4.89	1.2275
	1162	40~60	4.83	1.1998
小飞蓬重度	1164	0~20	4.97	1.2010
Severe invasion of <i>Conyzacandensis</i>	1164	20~40	4.85	1.2110
	1164	40~60	4.80	1.1810
猪毛蒿	1163	0~20	5.28	1.2940
<i>Artemisia scoparia</i>	1163	20~40	5.07	1.2735
Waldst.et Kit.	1163	40~60	4.91	1.2152

2 结果与分析

2.1 小飞蓬不同入侵程度下土壤有机碳的水平分布特征

小飞蓬轻度、中度、重度入侵的植物群落和猪毛蒿 0~60 cm 土层深度的 SOC 平均值分别为 9.56、11.31、16.70 g·kg⁻¹和 8.23 g·kg⁻¹。在相同土层中 SOC 含量大小均为:小飞蓬重度入侵>小飞蓬中度入侵>小飞蓬轻度入侵>猪毛蒿(见图 1)。在 0~20 cm 土层中,与对照组猪毛蒿相比,小飞蓬轻度、中度和重度入侵的土壤有机碳含量分别增长了 14.78%、30.43%和 76.52%。在 20~40 cm 土层中,与对照组猪毛蒿相比,小飞蓬轻度入侵的土壤有机碳含量增幅最少,小飞蓬重度入侵的土壤有机碳含量增幅最多,分别为 25.49%和 81.35%。在 40~60 cm 土层中,小飞蓬轻度、中度入侵和重度入侵的土壤有机碳含量增幅变化不明显。在由图 1 可知,任一群落类型相同土层中,SOC 含量均呈现随着土层深度的增加而减小的趋势,且随小飞蓬入侵程度的加深,SOC 含量呈现上升的趋势。

小飞蓬轻度入侵变化与小飞蓬中度入侵及猪毛蒿入侵在土壤中 SOC 变化仅存在很小差异,小飞

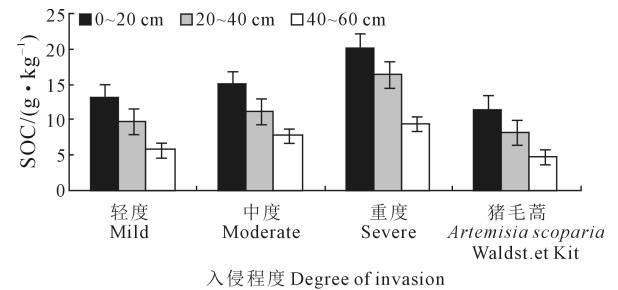


图 1 小飞蓬不同入侵程度下土壤有机碳(SOC)含量
Fig.1 SOC content under different degrees of invasion of *Conyzacandensis*

蓬重度入侵与小飞蓬其他程度入侵呈现明显差异($P<0.05$),在表层与中度土层中与其他入侵程度相比,SOC 变化幅度较大。在深度土层中随着入侵程度的加深,土壤 SOC 含量增幅变化不明显,含量较低。

2.2 小飞蓬不同入侵程度下土壤有机碳的垂直分布特征

由图 2 可见,小飞蓬轻度、中度、重度入侵阶段和猪毛蒿 0~60 cm 土层深度的 SOC 分别在 5.72~13.2、7.74~15.0、13.3~20.3 g·kg⁻¹和 5.06~11.5 g·kg⁻¹,小飞蓬轻度、中度和重度入侵阶段的 SOC 最大值出现在 0~20 cm 土层,而对照组猪毛蒿的最大

值也出现在 0~20 cm 土层;小飞蓬轻度入侵、中度入侵和重度入侵 SOC 剖面垂直分布都表现出持续降低的趋势,对照组猪毛蒿也表现出了 SOC 的持续降低趋势,随着土层深度的增加,表现出了显著的差异性 ($P<0.05$)。对照组猪毛蒿 0~20 cm 土层 SOC 含量比 20~40 cm 土层降低 40.24%,20~40 cm 土层 SOC 含量比 40~60 cm 土层降低70.83%。与猪毛蒿相比,在 0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层,小飞蓬轻度、中度和重度入侵土壤有机碳含量减幅分别为 5.55%、6.63%和 17.21%,呈现随着土层深度的增加土壤有机碳含量下降的趋势。20~40 cm 土层和 40~60 cm 土层对比,小飞蓬轻度、中度和重度入侵土壤有机碳含量相较于猪毛蒿土壤有机碳质量分别减少 3.87、4.15 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 4.32 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,这说明与猪毛蒿群落相比,小飞蓬在 20~40 cm 土层深度 SOC 变化幅度较大,但在 40~60 cm 土层变化不明显。

由有机碳含量变化幅度可知小飞蓬入侵对表层土壤有机碳的影响最为剧烈。随着土层深度加深,土壤有机碳含量变化幅度逐渐减小,小飞蓬入侵对深层土壤有机碳的影响较小。

2.3 土壤有机碳含量与土壤容重以及土壤含水量之间的关系

小飞蓬入侵伊犁河谷草原不仅造成了 0~60 cm 土层 SOC 含量的剧烈变化,而且也对土壤容重与土壤含水量产生了影响(见图 3 和图 4)。

由图 3 可知,土壤容重在同一土层深度的大小为:猪毛蒿>小飞蓬轻度入侵>小飞蓬中度入侵>小飞蓬重度入侵。由图 4 可知,土壤含水量在同一土层深度的大小为:猪毛蒿>小飞蓬轻度入侵>小飞蓬中度入侵>小飞蓬重度入侵。由图 3 和图 4 可以看出,4 个不同群落类型的土壤容重和土壤含水量均随

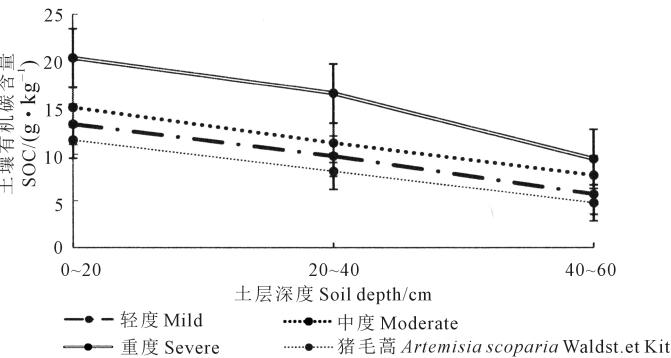


图 2 小飞蓬不同入侵程度下有机碳的垂直分布
Fig.2 Vertical distribution of SOC under different degrees of invasion of *Conyzacanadensis*

着土层深度的增加而降低。对伊犁河谷草原 4 个群落 3 个土层的土壤容重、土壤含水量和 SOC 进行相关性分析(见表 2)。结果表明:伊犁河谷草原的土壤含水量与土壤容重存在极显著的正相关性 ($P<0.01$),SOC 和土壤容重、土壤含水量存在极显著的负相关性($P<0.01$)。

3 讨 论

3.1 小飞蓬不同入侵程度下有机碳水平分布差异
随着小飞蓬入侵程度的加深,有机碳 (SOC) 含量呈现增加的趋势。在相同土层深度中:小飞蓬重度入侵>小飞蓬中度入侵>小飞蓬轻度入侵>猪毛蒿。

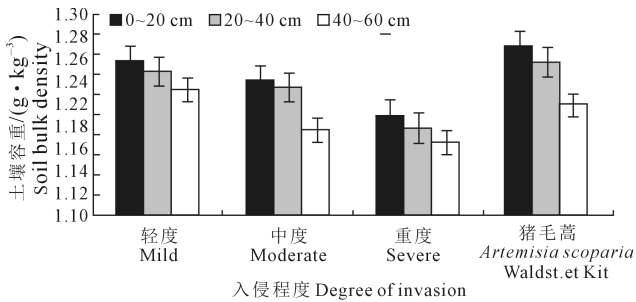


图 3 小飞蓬不同入侵程度下的土壤容重
Fig.3 Soil bulk density under different degrees of invasion of *Conyzacanadensis*

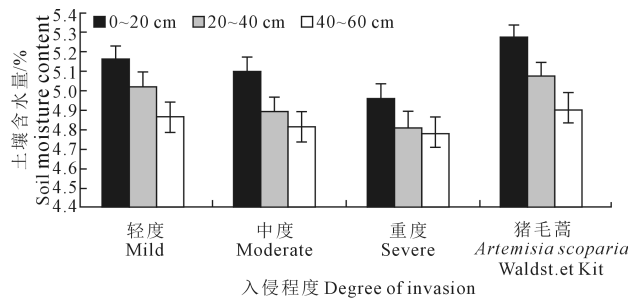


图 4 小飞蓬不同入侵程度下的土壤含水量
Fig.4 Soil moisture content under different degrees of invasion of *Conyzacanadensis*

表 2 土壤含水量、土壤容重及 SOC 含量的相关性分析
Table 2 Soil moisture content, soil bulk density and SOC correlation analysis

	土壤含水量 Soil moisture content	土壤容重 Soil bulk density	SOC
土壤含水量 Soil moisture content	1		
土壤容重 Soil bulk density	0.311 **	1	
SOC	-0.366 **	-0.304 **	1

注: ** 表示 $P=0.01$ 水平(双侧)显著相关。
Note: ** indicates significant bilateral correlation at $P=0.01$ level.

这是因为小飞蓬重度入侵的地下根茎及植被明显多于小飞蓬中度入侵和小飞蓬轻度入侵,而重度入侵小飞蓬植物根系较发达,大量的死根腐烂分解增加了 SOC 的含量,因此小飞蓬重度入侵的 SOC 含量明显高于小飞蓬中度入侵和小飞蓬轻度入侵。研究表明,外来入侵的植物会引起入侵地土壤养分的增加,从而引起土壤有机碳的增加^[16],如加拿大一枝黄花的入侵增加杭州湾湿地土壤有机碳的含量^[2],入侵的紫茎泽兰显著提高了土壤有机碳含量^[17]。小飞蓬轻度入侵与对照组猪毛蒿比较,猪毛蒿主根单一,几乎无植被覆盖,由于 SOC 主要来自水中的营养物质和生物的残体,从而致使猪毛蒿对土壤有机碳的滞留能力差,因此轻度入侵小飞蓬的 SOC 含量高于猪毛蒿。

3.2 小飞蓬不同入侵程度下有机碳垂直分布差异

土壤有机碳在剖面上的垂直分布大都表现为随着土壤深度的增加而减少^[18],本文所研究的小飞蓬不同入侵阶段土壤有机碳在垂直分布上也表现为随着土壤深度的增加而减少。

轻度入侵小飞蓬、中度入侵小飞蓬、重度入侵小飞蓬和猪毛蒿这 4 个群落类型的 SOC 含量在 0~20 cm 达到最大。这是由于土壤中的有机碳主要由地表枯落物提供,当植物完成自己的生命周期后,枯落物聚集于地表,经腐烂分解为有机质,进而进入到土壤中,逐渐向下传递^[19]。因此,表层土壤有机质含量最高,中层 20~40 cm 和深层 40~60 cm 的有机碳含量低于表层,且越往深处含量越低。随着小飞蓬入侵程度及土层深度的增加根系分布减少,有机质明显减少,并呈现下降趋势。Kochy^[20]等对土壤有机质分布情况进行研究,结果发现表层土壤有机质最先被补给,此时局部微环境发生变化,微生物则会推动有机质向下转化,逐渐向深处扩散,但含量呈现明显降低趋势。

土壤中的有机碳主要来源于植物,植被类型是主要的影响因素,同时也存在其他因素的作用。梁启鹏等^[21]曾就这一问题进行研究,所获得的结论与本研究一致。

3.3 小飞蓬不同入侵程度下土壤容重与土壤含水量的变化

根据图 2 和图 3 所示情况来看,土壤容重和土壤水分均随着土层深度的增加呈现下降趋势。此外,植物的凋落物和残留体在土壤转化中形成腐殖质^[22],一般腐殖质多的表层土壤容重较小。在进行采样时发现小飞蓬的根系分布相对较浅,主要集中于地表附近,深处根系不发达,呈现逐渐减少趋势,

那么对土壤的作用也会发生变化^[23]。由于存在上述特点,就使得植物对土壤的作用主要集中在浅层土壤,可以改善局部孔隙状况。土层深浅与土壤的通气状况密切相关,浅层通气状况较好,这也为微生物生长提供了条件,对其分解作用起到了促进,因此近地表处的土壤有机化增加^[24]。试验表明土壤容重随着土层深度的增加呈现减小的趋势,这可能与小飞蓬入侵前猪毛蒿的根系分布较深,导致小飞蓬入侵后表层腐殖质较少,土壤容重大;深层腐殖质较多,土壤容重小。这种变化对土壤孔隙度^[25]产生影响,土层越深孔隙度则越小,水分不容易下渗,这与表层土壤疏松吸水性强,表层的植物根茎较多,根茎需要吸收大量的水分以维持植物自身的生长有关^[26],而深层土壤比较紧实吸水性差,植物根茎不能大量储存水分。此外由于其他因素的影响,导致水分丢失,下层难以得到补充^[27]。

4 结 论

4 种不同群落 SOC 含量在水平分布上,随着小飞蓬入侵程度的深入在相同土层深度中 SOC 的含量大小为:小飞蓬重度入侵>小飞蓬中度入侵>小飞蓬轻度入侵>猪毛蒿样地;在垂直分布上,土壤有机碳在剖面上的垂直分布大都表现为随着土壤深度的增加而减少,尤其是在 0~20 cm 土层 SOC 含量变化最大,在 40~60 cm 土层变化不明显。经差异显著性检验,小飞蓬轻度、小飞蓬中度、小飞蓬重度和猪毛蒿这 4 个不同的入侵阶段在垂直分布上都具有显著性差异($P<0.05$)。

本研究的土壤容重在同一土层深度的大小为:猪毛蒿样地>小飞蓬轻度入侵>小飞蓬中度入侵>小飞蓬重度入侵,而土壤含水量变化规律亦是如此。土壤容重和土壤含水量在 0~20、20~40、40~60 cm 土层的大小均为:猪毛蒿样地>小飞蓬轻度入侵>小飞蓬中度入侵>小飞蓬重度入侵。随着土层深度的增加,土壤容重和土壤含水量均随着 SOC 含量的增加而呈现降低的趋势。

土壤含水量与土壤容重存在极显著的正相关性($P<0.01$),SOC 含量和土壤容重存在极显著的负相关性($P<0.01$),SOC 含量与土壤含水量存在极显著的负相关性($P<0.01$)。

参 考 文 献:

- [1] 曹静娟,尚占环,郭瑞英,等.甘肃臭草入侵对亚高山草地土壤碳氮库的影响[J].草原与草坪,2010,30(5):11-14.
- [2] 梁雷,叶小齐,吴明,等.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[J].土壤,2016,48(4):680-685.

[3] 李家兵,张秋婷,张丽烟,等.闽江河口春季互花米草入侵过程对短叶荇沼泽土壤碳氮分布特征的影响[J].生态学报,2016,36(12):3628-3638.

[4] 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[J].生态学报,2007,27(7):3051-3060.

[5] Kourtev P S, Ehrenfeld J G, Haggblom M. Exotic Plant species alter the microbial community structure and function in the soil [J]. Ecology, 2002, 83(11):3152-3166.

[6] Kourtev P S, Ehrenfeld J G, Haggblom M. Experimental analysis of the effect of exotic and native plant species on the structure and function of soil microbial communities [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2003, 35(7):895-905.

[7] Zaman M, Saggar S, Blennerhassett J D, et al. Effect of urease and nitrification inhibitors on N transformation, gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide, pasture yield and N uptake in grazed pasture system [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41(6):1270-1280.

[8] 黄乔乔,沈奕德,李晓霞,等.外来入侵植物在中国的分布及入侵能力研究进展[J].生态环境学报,2012,21(5):977-985.

[9] 龙连娣,缪绅裕,陶文琴.中国公布的3批外来入侵植物种类特征与入侵现状分析[J].生态科学,2015,34(3):31-36.

[10] 张鹏.加拿大蓬类黄酮物质及其潜在化感作用研究[D].长春:吉林农业大学,2011.

[11] 杨莉,韩梅,肖春萍,等.入侵种加拿大蓬对玉米的化感潜力及机制研究[J].华南农业大学学报,2011,32(4):1-5.

[12] 黄素,王煜,沙尔格,等.不同生长期加拿大蓬挥发油对蚕豆保卫细胞的毒性效应[J].安全与环境学报,2017,17(4):1620-1625.

[13] 温阿敏,郑江华,穆晨,等.新疆草原毒草白喉乌头高光谱特征提取与分析研究[J].中国植保导刊,2015,35(3):5-11.

[14] 温阿敏,郑江华,穆晨,等.基于GF-1 WFV数据的草原毒草白喉乌头空间分布监测与分析[J].新疆农业科学,2015,52(10):1939-1946.

[15] 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):9113-9115.

[16] 王颖.入侵植物喜旱莲子草对入侵地土壤生态系统的影响[D].合肥:安徽农业大学,2016.

[17] 牛红榜.外来植物紫茎泽兰入侵的土壤微生物学机制[D].北京:中国农业科学院,2007.

[18] 陈芙蓉,程积民,刘伟,等.不同干扰对黄土高原典型草原土壤有机碳的影响[J].草地学报,2012,20(2):298-304.

[19] 李龙,姚云峰,秦富仓,等.半干旱区县域尺度土壤有机碳的空间变异特征[J].生态学杂志,2016,35(8):2003-2008.

[20] Koch J, Schaldach R, Kochy M. Modeling the impacts of grazing land management on land-use change for the Jordan River region [J]. Global & Planetary Change, 2008, 64(3):177-187.

[21] 梁启鹏,余新晓,庞卓,等.不同林分土壤有机碳密度研究[J].生态环境学报,2010,19(4):889-893.

[22] 祁彪.青海环湖地区不同退化程度高寒草地土壤碳储量的研究[D].兰州:甘肃农业大学,2005.

[23] 宋红霞.紫茎泽兰入侵对生物多样性及土壤养分的影响[J].广东农业科学,2014,41(18):51-56.

[24] 党宏忠,赵雨森,陈祥伟,等.祁连山青海云杉林地土壤水分特征研究[J].应用生态学报,2004,15(7):1148-1152.

[25] 姚荣,杨劲松,刘广明,等.黄河三角洲地区土壤容重空间变异性分析[J].灌溉排水学报,2006,(25)4:11-15.

[26] 连纲,郭旭东,傅伯杰,等.黄土高原小流域土壤容重及水分空间变异特征[J].生态学报,2005,26(3):647-654.

[27] 萨茹拉,李金祥,侯向阳.草地生态系统土壤有机碳储量及其分布特征[J].中国农业科学,2013,46(17):3604-3614.



(上接第 109 页)

[22] 奚振邦,王寓群,杨佩珍.中国现代农业发展的有机肥问题.中国农业科学,2004,37(12):1874-1878.

[23] 郝小雨,高伟,王玉军,等.有机无机肥料配合施用对设施番茄产量、品质及土壤硝态氮淋失的影响.农业环境科学学报,2012,31(3):538-547.

[24] Yu H Y, Ding W X, Luo J F, et al. Long-term application of organic manure and mineral fertilizers on aggregation and aggregate-associated carbon in a sandy loam soil [J]. Soil and Tillage Research, 2012, 124:170-177.

[25] Liu Y R. Enzyme activity in water-stable soil aggregates as affected by long-term application of organic manure and chemical fertilizer [J]. Pedosphere, 2013, 23(1):111-119.

[26] Manna M C, Swarup A, Wanjarri R H, et al. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil organic carbon storage, soil quality and yield sustainability under sub-humid and semi-arid tropical India [J]. Field Crops Research, 2005, 93:264-280.

[27] 路克国,朱树华,张连忠.有机肥对土壤理化性质和红富士苹果果实品质的影响[J].石河子大学学报(自然科学版),2003,(3):205-208.

[28] H·马斯纳.高等植物的矿质营养[M].曹一平,陆景陵译.北京:北京农业大学出版社,1991:144-246.

[29] Velemis D, Almaliotis D, Bladenopoulou S, et al. Leaf nutrient levels of apple orchards (cv. *Starkrimson*) in relation to crop yield [J]. Advances in Horticultural Science, 1999, 13(4):147-150.

[30] 谢鹏,郭素娟,吕文君.板栗‘燕山早丰’不同类型枝条在花期和幼果期的矿质元素含量比较[J].东北农业大学学报,2014,45(4):41-45.

[31] 杨晓梅,李桂花,李贵春,等.有机无机配比比例对华北褐土冬小麦产量与氮肥利用率的影响[J].中国土壤与肥料,2014,(4):48-52.

[32] 许小伟,樊剑波,张其海,等.不同有机无机肥配比比例对红壤旱地花生产量、土壤速效养分和生物学性质的影响[J].生态学报,2014,34(18):5182-5190.

[33] 谢军,赵亚南,陈轩敬,等.有机肥氮替代化肥氮提高玉米产量和氮素吸收利用效率[J].中国农业科学,2016,49(20):3934-3943.

[34] Nielsen K L. The effect of phosphorus availability on the carbon economy of contrasting common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes [J]. Journal of Experimental Botany, 2001, 52(355):329-339.

[35] 戴文圣,王白坡,钱银才.桃叶片和果实矿质元素含量[J].浙江林学院学报,1994,(3):247-252.

[36] 肖时运.化学氮肥用量及有机无机复混肥对蔬菜产量和品质的影响[D].长沙:湖南农业大学,2006.

[37] 张福锁,陈新平,陈清.中国主要作物施肥指南[M].北京:中国农业大学出版社,2009:86-91.