

DOI: 10.5846/stxb202103020566

朱金方, 柳晓燕, 李俊生, 李飞飞, 赵彩云. 不同入侵程度下飞机草对喀斯特地区土壤理化性质的影响. 生态学报, 2021, 41(24): 9630-9636.

Zhu J F, Liu X Y, Li J S, Li F F, Zhao C Y. Effects of different invasion degrees of *Chromolaena odorata* on physical and chemical properties of soil in karst areas. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(24): 9630-9636.

不同入侵程度下飞机草对喀斯特地区土壤理化性质的影响

朱金方, 柳晓燕, 李俊生, 李飞飞, 赵彩云*

中国环境科学研究院生态研究所, 北京 100012

摘要: 外来生物入侵威胁着全球的生物多样性和生态系统的功能, 研究外来入侵植物对土壤理化性质的影响有助于理解外来入侵植物的入侵机制。以广西喀斯特地区飞机草 (*Chromolaena odorata*) 入侵生境为研究对象, 比较分析了不同飞机草入侵程度下 (对照、轻度入侵、中度入侵、重度入侵) 土壤物理和化学指标变化特征。结果表明: 随着飞机草的入侵程度加重, 土壤容重显著增加, 轻度入侵、中度入侵和重度入侵生境下土壤容重分别比对照增加了 10.3%、16.7%、22.3%, 土壤非毛管孔隙度、总孔隙度和土壤含水量显著降低, 土壤毛管孔隙度无显著变化; 飞机草入侵对土壤 pH 值无显著影响, 随着入侵程度加重, 土壤速效磷和速效钾的含量显著升高, 在重度入侵生境下土壤速效磷和速效钾含量分别比对照增加了 4.3 倍、3.8 倍, 土壤全氮和有机质含量显著降低。飞机草入侵显著改变了土壤理化性状, 导致喀斯特地区土壤物理结构退化, 生态系统水土保持能力下降, 同时飞机草通过改变土壤养分循环提高了土壤可直接利用养分的水平, 创造对自身有利的土壤环境, 进而促进其生长和扩散。

关键词: 生物入侵; 飞机草; 喀斯特地区; 土壤理化性质

Effects of different invasion degrees of *Chromolaena odorata* on physical and chemical properties of soil in karst areas

ZHU Jinfang, LIU Xiaoyan, LI Junsheng, LI Feifei, ZHAO Caiyun*

Institute of Ecology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract: Invasion of alien species threatens the global biodiversity and ecosystem functions. Studying the effects of alien invasive plants on soil physical and chemical properties is helpful to understand the invasion mechanism of alien plants. In this study, the characteristics of soil physical and chemical indexes under different invasion degrees (control, mild invasion, moderate invasion, and heavy invasion) of *Chromolaena odorata* in karst area of Guangxi were compared and analyzed. The results showed that soil bulk density increased significantly with the invasion of *C. odorata*. Compared with the control, the soil bulk density increased by 10.3%, 16.7% and 22.3% respectively in light invasion, moderate invasion and heavy invasion habitats, while soil non capillary porosity, total porosity and soil water content decreased significantly, and soil capillary porosity had no significant change. *C. odorata* invasion had no significant effect on soil pH value. The contents of soil available P and K increased significantly with the increase of invasion degree. Compared with the control, the contents of soil available P and K increased by 4.3 times and 3.8 times in heavy invasion habitat, respectively. The contents of soil total N and organic matter decreased significantly. The invasion of *C. odorata* significantly changed the soil physical and chemical properties, resulting in the degradation of soil physical structure and the decline of soil and water

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFC1806300); 国家自然科学基金项目 (41701026); 生态环境部生物多样性调查评估项目 (2019HJ2096001006); 广西重点研发计划项目 (桂科 AB17129008)

收稿日期: 2021-03-02; 采用日期: 2021-06-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaocy@craes.org.cn

conservation capacity of ecosystem in karst area. Meanwhile, the invasion of *C. odorata* improved the level of soil available nutrients by changing the soil nutrient cycle, created favorable soil environment for itself, and then promoted its growth and spread.

Key Words: biological invasion; *Chromolaena odorata*; karst area; physical-chemical properties of soil

外来植物的成功入侵威胁着自然生态系统的完整性和生物多样性,已经成为一个全球性的环境问题^[1]。我国地域辽阔,地形地貌复杂,几乎涵盖北半球所有气候带,为各种生物栖息繁衍提供了复杂多样性的生境环境,同时,拥有漫长多变的边境线以及与诸多国家相邻,这些特点导致我国成为世界上极易遭受外来生物入侵的国家之一^[2-3]。外来入侵物种引入当地后,通过其高结实率、高生长率及较强的资源竞争优势,极易在入侵区定殖并形成单优种群。外来入侵物种在与本土植物竞争水分、养分和空间或释放化感物质的过程中,可能改变土壤有机质、养分的有效性、土壤微生物群落结构及土壤酶活性,从而引起土壤理化性质的改变^[4]。Rodgers 等^[5]的研究结果表明外来入侵物种葱芥(*Alliaria petiolata*)入侵后能够显著提高土壤 N、P、Ca 和 Mg 等养分的有效性,从而形成适合其生长的土壤养分环境,在空间占据和持续扩散之间产生积极反馈作用。Cheng 等^[6]在对九段沙湿地的外来入侵物种互花米草(*Spartina alterniflora*)研究中发现,互花米草能够显著提高土壤总碳、有机碳和总氮的含量,但土壤养分组成的变化可能导致本土植物群落组成和生物多样性的改变。此外,一些研究表明外来植物入侵以后也会改变土壤微生物群落结构和土壤酶活性,从而影响生态系统的营养循环过程^[7-10]。因此,外来入侵物种对土壤理化性质的影响也越来越被学者们所关注。

飞机草(*Chromolaena odorata*)为多年生草本或亚灌木,原产于南美洲,被公认为是世界上危害最为严重的恶性杂草之一^[11]。飞机草的生态幅较广,能够适应多变的气候条件,可在贫瘠的土地、路边、河岸、空地、弃耕地和原生植被等多种生境中定殖,一旦建立种群将会与本土草本植物和灌木在开阔地产生激烈竞争^[12-13]。1934 年,在我国云南省南部首次发现飞机草,随后快速扩散传播,目前已遍布我国南方各省,严重威胁我国的生物多样性、农业生产和生态安全,并与 2003 年被原国家环境保护部列入《中国第一批外来入侵名单》^[14-15]。国内外针对飞机草生物学特性、传播途径、危害、入侵机制、防治技术等方面开展了大量研究工作^[8,13-14,16-17],在飞机草对土壤环境影响方面的研究主要以对土壤微生物的影响为主^[9,18],而对土壤理化性质影响的研究较少。西南喀斯特地区作为中国四大生态脆弱地区之一^[19],其特点是土壤层浅薄,持水保肥能力弱,水土流失问题严重^[20-21]。广西喀斯特地区是飞机草的主要入侵区,飞机草入侵该地区以后排挤本土物种,导致本土植物群落结构发生改变^[22]。土壤是陆地生态系统的重要组成部分,为植物和土壤生物的生长提供资源,是生态系统生态过程的重要载体^[23-24]。土壤理化性质对地表植物群落组成和分布具有重要的决定性作用,同样地表植物也反作用于土壤^[15],但飞机草入侵对喀斯特地区土壤理化性质的影响如何尚不清楚。

本研究以广西壮族自治区平果市果化镇飞机草入侵区为研究对象,选择飞机草不同入侵程度下的生境为样地,比较分析不同入侵程度下土壤理化性质的变化特征,研究飞机草入侵对喀斯特地区土壤环境的影响,为喀斯特生态系统的修复和保护提供一定的理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区平果市果化镇龙何屯(107°22′51″—107°23′48″E,23°22′51″—23°23′41″N)(图 1),属典型的喀斯特地貌。该地区气候属亚热带季风气候,热量丰富,降水量多,年均降雨量为 1369.9 mm,但年降雨量分配不均,70%的降雨集中在 5—8 月份,干、湿季明显;该地区年均气温为 19℃,极端最低温为 -1.3℃,极端最高温为 38.8℃^[25-26]。研究区地层岩性主要为石灰岩和硅质灰岩,土壤主要为棕色石灰土,土层浅薄(20—30 cm),分布不连片,主要为石隙土和石窝土,在陡坡和荒地的土壤覆盖度在 30%以下^[15]。

研究区石漠化问题严重,主要植被类型包括次生灌草丛和次生林灌地,盖度在 30%—70%之间。乔木主要包括茶条木(*Delavaya toxocarpa*)、任豆(*Zenia insignis*),灌木主要包括红背山麻杆(*Alchorne atrewioides*)、黄荆条(*Vitex negundo*)、雀梅藤(*Sageretia thea*)、穿破石(*Cudrania cochinchinensis*)、灰毛浆果楝(*Cipadessa acinerosa*)等,草本主要包括飞机草、荩草(*Arthraxon hispidus*)、蔓生莠竹(*Microstegium vagans*)、类芦(*Neyraudia reynaudiana*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、香薷(*Elsholtzia ciliata*)、肾蕨(*Nephrolepis auriculata*)等。

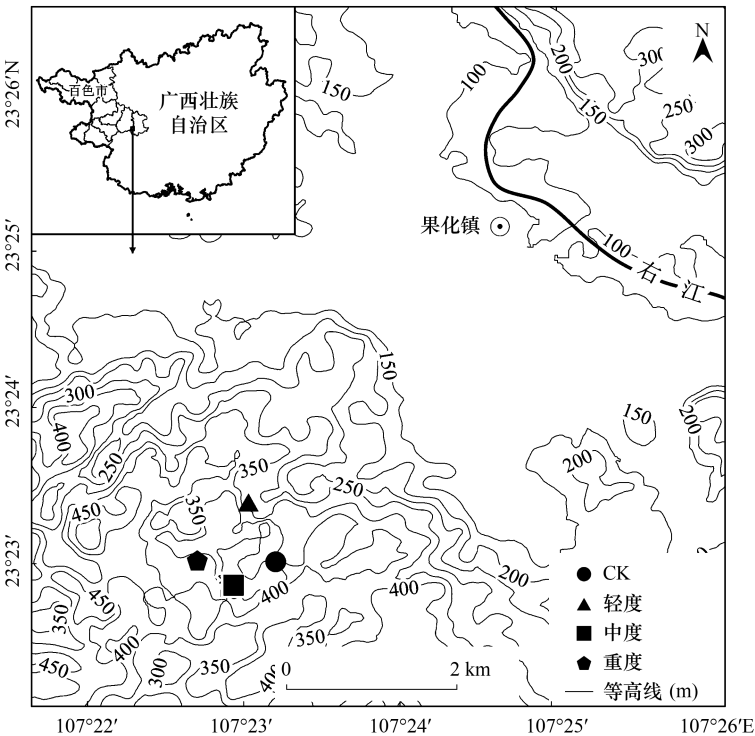


图1 研究区样地分布
Fig.1 Distribution of sample plots in study area

1.2 样地设置

在研究区域内,根据飞机草的分布盖度将其分为 3 个不同入侵程度:轻度入侵(10%≤盖度<30%),中度入侵(30%≤盖度<50%)、重度入侵(盖度≥50%),以未入侵生境作为对照样地(CK)。在野外选择 4 个飞机草不同入侵程度但地理环境相似的区域作为研究样地,样地基本概况见表 1。

表 1 样地基本概况
Table 1 Basic situation of sample plots

入侵程度 Invasion degree	海拔 Altitude/m	坡向 Aspect	坡位 Slope position	本土植被盖度 Native plant coverage/%	飞机草盖度 <i>C. odorata</i> coverage/%	主要植物 Major plants
对照 Control check	400	南	坡中	95	0	茶条木、任豆、黄荆条、龙须藤(<i>Bauhinia hampsonii</i>)、红背山麻杆、五节芒
轻度 Mild	342	南	坡中	80	15	黄荆条、飞机草、香薷、肾蕨
中度 Moderate	380	南	坡中	55	40	飞机草、蔓生莠竹、类芦、香薷
重度 Heavy	320	西南	坡中	10	80	飞机草、类芦、香薷、地桃花(<i>Urena lobata</i>)

1.3 样品采集

2017 年 7 月进行土壤样品采集。由于研究区土壤层浅薄,主要土层厚度在 20—30 cm 范围内,因此本研究主要采集 0—20 cm 深度的土壤。每个入侵程度下设置 3 个 10 m×10 m 的样方,在每个样方内采用十字交叉法采集 5 个土壤样品并混合成一个混合土壤样品。将土壤样品带回实验室,避光风干后过 2 mm 筛,用于土壤理化指标测定。在每个采样点用铝盒采集土样,并称重,带回实验室烘干(105℃)至恒重,测定土壤含水量。

1.4 土壤理化指标测定

土壤含水量采用烘干称重法测定;土壤容重采用环刀法测定;土壤非毛管孔隙度和毛管孔隙度采用环刀浸泡法测定;总孔隙度为毛管孔隙度和非毛管孔隙度之和;土壤 pH 值采用电极法(蒸馏水浸提液,土水比为 1:5)测定;土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定;土壤速效钾采用火焰光度计法测定;土壤速效磷采用 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定;全氮采用 H₂SO₄ 消煮-凯氏定氮法测定。

1.5 数据处理与分析

采用 Excel 进行数据整理,采用 SPSS 17.0 软件中的单因素方差分析和 LSD 法进行多重比较,分析飞机草不同入侵程度之间土壤理化特征指标的差异显著性($P<0.05$);采用 Origin 8.0 软件进行图表制作。

2 研究结果

2.1 不同入侵程度下土壤物理性质的变化

由表 2 可见,飞机草不同入侵程度的样地之间土壤物理性质有一定差异。单因素方差分析结果表明,飞机草入侵程度对土壤容重影响显著($F=37.9, P<0.01$),在 CK 样地中,土壤容重最小为 0.94 g/cm³,随入侵程度加重土壤容重显著增加($P<0.05$),在轻度、中度和重度入侵程度下土壤容重分别增加至 1.04、1.10、1.15 g/cm³,相比 CK 分别增加了 10.3%、16.7%、22.3%。土壤毛管孔隙度受飞机草入侵程度影响不显著($F=3.9, P>0.05$),在轻度入侵下土壤毛管孔隙度与 CK 相比显著降低($P<0.05$),但在中度和重度入侵程度下土壤毛管孔隙度与 CK 无显著差异($P>0.05$)。土壤非毛管孔隙度受飞机草入侵影响显著($F=29.7, P<0.01$),随入侵程度加重土壤非毛管孔隙度呈逐渐降低趋势,轻度入侵下土壤非毛管孔隙度与 CK 相比无显著差异($P>0.05$),而中度和重度入侵下土壤非毛管孔隙度与 CK 相比分别降低了 23.1%、38.4%,降低水平显著($P<0.05$)。土壤总孔隙度随飞机草入侵程度加重呈逐渐降低趋势,轻度和重度入侵下土壤总孔隙度均显著低于 CK($P<0.05$),而中度入侵下土壤总孔隙度与 CK 无显著差异($P>0.05$)。土壤含水量随飞机草入侵程度的加重呈降低趋势,CK 样地中土壤含水量最高,轻度和重度入侵下土壤含水量与 CK 相比分别降低了 13.9%、23.5%,降低水平均显著($P<0.05$),而中度入侵下的土壤含水量则与 CK 无显著差异($P>0.05$)。通过以上数据分析可知,随着飞机草入侵程度加重,样地土壤结构变得紧实,通气透水能力减弱,土壤物理性状恶化。

表 2 不同入侵程度下土壤物理性质

Table 2 The physical characteristics of soil in different invasion degrees

入侵程度 Invasion degree	土壤物理指标 Soil physical index				
	容重 Bulk density/ (g/cm ³)	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	非毛管孔隙度 Non capillary porosity/%	总孔隙度 Total porosity/%	含水量 Soil water content/%
对照 Control check	0.94±0.02d	49.55±1.95a	10.57±0.30a	60.12±1.67a	40.86±2.09a
轻度 Mild	1.04±0.01c	44.20±1.42b	11.63±0.36a	55.84±1.65bc	35.16±0.17b
中度 Moderate	1.10±0.01b	49.12±0.45a	8.13±0.68b	57.25±0.38ab	38.60±0.37ab
重度 Heavy	1.15±0.01a	46.68±0.32ab	6.51±0.22c	53.18±0.10c	31.27±0.36c

表中数据为平均值±标准误,同列不同小写字母表示入侵程度间差异显著($P<0.05$)

2.2 不同入侵程度下土壤化学性质的变化

由表 3 可见,飞机草不同入侵程度下土壤化学性质有一定差异。单因素方差分析结果表明,土壤 pH 值

受飞机草不同入侵程度影响并不显著 ($F=3.27, P>0.05$), 随入侵程度的加重土壤 pH 值呈逐渐升高趋势, 轻度和中度入侵程度下土壤 pH 值与 CK 无显著差异 ($P>0.05$), 而重度入侵程度下土壤 pH 值显著高于 CK ($P<0.05$)。土壤全氮含量受飞机草入侵影响显著 ($F=32.24, P<0.01$), CK 样地中土壤全氮含量最高 (5.72 g/kg), 随飞机草入侵程度加重, 土壤全氮含量呈降低趋势, 轻度、中度和重度入侵程度下的土壤全氮含量相比 CK 分别降低了 30.3%、42.7%、37.8%, 降低水平均显著 ($P<0.05$)。飞机草不同入侵程度对土壤速效钾含量影响显著 ($F=49.41, P<0.01$), 随飞机草入侵程度加重, 土壤速效钾含量呈逐渐升高趋势, 轻度入侵程度下土壤速效钾含量与 CK 相比虽有所升高, 但升高水平不显著 ($P>0.05$), 中度和重度入侵程度下土壤速效钾相比 CK 分别升高了 2.7 倍、3.8 倍, 升高水平显著 ($P<0.05$)。土壤速效磷含量受飞机草入侵影响也达到了显著水平 ($F=237.54, P<0.01$), 随入侵程度加重变化趋势与速效钾相同, 中度和重度入侵程度下土壤速效磷含量均显著高于 CK ($P<0.05$), 相比 CK 分别增加了 1.4 倍、4.3 倍。土壤有机质含量随飞机草入侵程度加重呈显著降低趋势 ($F=22.51, P<0.01$), 轻度、中度和重度入侵程度下土壤有机质含量与 CK 相比分别降低了 37.1%、50.7%、57.8%。

表 3 不同入侵程度下土壤化学性质

Table 3 The chemical characteristics of soil in different invasion degrees

入侵程度 Invasion degree	土壤化学指标 Soil chemical index				
	pH 值 pH value	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)	速效钾 Available K/ (mg/kg)	速效磷 Available P/ (mg/kg)	有机质 Organic matter/ (g/kg)
对照 Control check	7.34 ±0.08b	5.72 ±0.38a	30.33 ±9.17c	5.99 ±0.25c	108.69 ±8.36a
轻度 Mild	7.43 ±0.02ab	3.99 ±0.03b	48.67 ±5.21c	5.99 ±0.70c	68.40 ±7.73b
中度 Moderate	7.46 ±0.01ab	3.28 ±0.04c	113.33 ±8.82b	14.61 ±0.37b	53.59 ±2.16bc
重度 Heavy	7.54 ±0.03a	3.56 ±0.05bc	146.00 ±7.02a	31.99 ±1.36a	45.85 ±2.19c

3 讨论

外来入侵植物可对土壤性质产生影响, 如改变土壤水分、温度、pH、有机质含量^[10]、微生物活性和土壤过程 (C、N 循环)^[23-24]。土壤物理特性与植物生长密切相关, 土壤容重、含水量和孔隙度大小反映土壤结构、通气透水性和持水保肥能力等, 通过影响土壤呼吸、植物根系延伸, 进而对植被生长产生影响^[27]。一般情况下, 在植物群落正向演替过程中, 土壤物理结构逐渐得到改善, 土壤容重降低, 孔隙度增大, 土壤质地疏松, 持水能力增强^[21, 28]。本研究发现, 不同飞机草入侵程度的样地之间土壤容重随着入侵程度增加而增加, 可能飞机草的入侵导致了研究区土壤物理结构恶化, 土壤通气透水能力减弱^[27]。这主要是由于飞机草入侵后排挤本土植物, 并形成单优群落, 植物根系分布层次单一, 根系活动程度减弱, 土壤结构变得紧实, 这与梁雷等^[29]的研究结果相一致; 同时, 随着飞机草入侵程度加重, 植物群落结构单一化, 地表枯落物减少, 而枯落物对于改善土壤结构十分关键^[30], 因此这可能也是土壤物理结构恶化的原因之一。

非毛管孔隙度大小直接影响土壤蓄水能力和水分调节功能的强弱, 该研究发现土壤非毛管孔隙度随飞机草入侵程度加重显著减小, 表明飞机草入侵程度高的生境土壤雨水下渗能力弱, 容易形成地表径流, 增强了降雨对土壤的冲刷和侵蚀, 导致喀斯特地区土壤水土流失问题加剧^[31]。土壤水分作为植物生长所必需的环境要素, 在喀斯特地区土壤持水能力弱的情况下土壤水分十分关键, 研究结果表明随飞机草入侵程度加重, 土壤含水量显著降低, 使得本土植物所需水分的可利用率减小, 本土植物生长进一步受到抑制, 导致植物群落退化加速, 这可能是由于飞机草分布密度的增加对土壤水分需求增大, 消耗了土壤中的水分, 该结论与白静等^[32]的研究结果不一致, 他们认为互花米草入侵生境土壤含水量低的原因是植物自身对于环境的选择导致的。本研究发现, 土壤速效钾和速效磷含量随飞机草入侵程度增加呈显著升高趋势, 表明飞机草入侵可显著提高土壤速效钾和速效磷含量, 该结果与 Koné 等^[8]研究结果相一致。这可能与土壤微生物群落变化有关, 特别是

增加了与土壤养分代谢密切相关的土壤微生物生理功能类群的数量,进而增强土壤养分循环,提高了植物可以直接吸收利用的土壤养分的含量^[33]。然而,与土壤速效钾和速效磷含量变化趋势不同,土壤有机质含量随飞机草入侵程度增加呈显著降低趋势,这与 Ojeniyi 等^[34]研究结果相反,他们发现飞机草入侵休耕地后能够显著提高土壤有机质的含量。这可能与地表植物组成密切相关,随飞机草入侵程度增加,植物群落中乔木和灌木分布减少,尤其是在入侵程度较为严重的样地,地表植物群落组成主要以草本植物为主,因此植物所产生凋落物的量大幅度降低,从而导致土壤中有机质含量降低^[15]。土壤全氮是植物生长所需的大量元素之一,研究发现土壤全氮含量随飞机草入侵程度增加也呈显著降低趋势,这与 Zhang 等^[35]的研究结果相一致,他们研究发现加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)入侵后会显著降低土壤中全氮含量。这可能是由于飞机草入侵后迅速生长,加速了对土壤中氮的消耗,导致土壤全氮含量显著下降^[35]。土壤有机质和全氮是土壤的重要组成部分,也是植物养分的主要来源,对于土壤肥力维持至关重要^[19]。飞机草虽然可通过提高土壤速效养分的可利用量,但其入侵导致土壤肥力退化,不利于本土植物的生长和植物群落的发育。这表明飞机草入侵后能够创造有利自身生长和入侵的土壤环境,同时抑制本土植物生长,最终实现成功入侵。

土壤微生物群落结构和土壤酶活性与土壤养分循环密切相关,研究飞机草如何通过影响土壤微生物群落结构和酶活性来改变土壤养分水平对于了解其入侵机制十分重要。因此,在以后的研究中会将两部分与土壤养分变化相结合,深入分析外来入侵植物飞机草的入侵机制,为外来入侵物种危害评估和防控提供重要的科学依据。

4 结论

通过对喀斯特地区飞机草不同入侵程度下土壤理化性质的比较,发现随着飞机草入侵程度加重土壤容重、非毛管孔隙度、总孔隙度和土壤含水量等物理性状指标显著下降,使得喀斯特地区土壤水土保持能力退化;同时,飞机草入侵显著提高了土壤速效磷和速效钾的含量,但却显著降低了土壤全氮和有机质的含量。结果表明,飞机草入侵后对喀斯特地区土壤理化性质产生显著影响,尤其是提高了土壤中可直接利用养分的水平,创造了对自身生长、竞争有利的土壤环境,实现成功入侵。本研究不仅为飞机草入侵后的危害评估提供了科学实例,而且为探索飞机草入侵机制提供了科学依据。

参考文献 (References):

- [1] D'Antonio C M, Kark S. Impacts and extent of biotic invasions in terrestrial ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution*, 2002, 17(5): 202-204.
- [2] 王国欢, 白帆, 桑卫国. 中国外来入侵生物的空间分布格局及其影响因素. *植物科学学报*, 2017, 35(4): 513-524.
- [3] 李博, 马克平. 生物入侵: 中国学者面临的转化生态学机遇与挑战. *生物多样性*, 2010, 18(6): 529-532.
- [4] 吴双桃. 薇甘菊对入侵地植物群落及土壤理化性质的影响. *湖北农业科学*, 2011, 50(18): 3711-3713.
- [5] Rodgers V L, Wolfe B E, Werden L K, Finzi A C. The invasive species *Alliaria petiolata* (garlic mustard) increases soil nutrient availability in northern hardwood-conifer forests. *Oecologia*, 2008, 157(3): 459-471.
- [6] Cheng X L, Luo Y Q, Chen J Q, Lin G H, Chen J K, Li B. Short-term C_4 plant *Spartina alterniflora* invasions change the soil carbon in C_3 plant-dominated tidal wetlands on a growing estuarine Island. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(12): 3380-3386.
- [7] Kao-Kniffin J, Balser T C. Soil fertility and the impact of exotic invasion on microbial communities in hawaiian forests. *Microbial Ecology*, 2008, 56(1): 55-63.
- [8] Koné A W, Edoukou E F, Gonnety J T, N'Dri A N A, Assémien L F E, Angui P K T, Tondoh J E. Can the shrub *Chromolaena odorata* (Asteraceae) be considered as improving soil biology and plant nutrient availability? *Agroforestry Systems*, 2012, 85(2): 233-245.
- [9] Xiao H F, Feng Y L, Schaefer D A, Yang X D. Soil fungi rather than bacteria were modified by invasive plants, and that benefited invasive plant growth. *Plant and Soil*, 2014, 378(1/2): 253-264.
- [10] Ehrenfeld J G. Effects of exotic plant invasions on soil nutrient cycling processes. *Ecosystems*, 2003, 6(6): 503-523.
- [11] Quan G M, Mao D J, Zhang J E, Xie J F, Xu H Q, An M. Response of invasive *Chromolaena odorata* and two coexisting weeds to contrasting irradiance and nitrogen. *Photosynthetica*, 2015, 53(3): 419-429.
- [12] Amal D, Rajib P, Bimal D. Effects of the invasive shrub, *Chromolaena odorata* on soil properties in the Atharamura forest ecosystem; Indian

- Himalayan state of Tripura, North East India. *Vegetos- An International Journal of Plant Research*, 2018, 31(2): 77-90.
- [13] 全国明, 章家恩, 徐华勤, 毛丹鹃, 谢俊芳. 外来入侵植物飞机草的生物学特性及控制策略. *中国农学通报*, 2009, 25(9): 236-243.
- [14] 余香琴, 冯玉龙, 李巧明. 外来入侵植物飞机草的研究进展与展望. *植物生态学报*, 2010, 34(5): 591-600.
- [15] 朱金方, 李俊生, 赵彩云, 柳晓燕, 李飞飞. 不同植被修复年限对喀斯特地区飞机草入侵生境土壤蓄水能力的影响. *水土保持研究*, 2019, 26(1): 143-147, 154-154.
- [16] Shackleton R T, Witt A B R, Nunda W, Richardson D M. *Chromolaena odorata* (Siam weed) in eastern Africa: distribution and socio-ecological impacts. *Biological Invasions*, 2017, 19(4): 1285-1298.
- [17] Beest M T, Cromsigt J P G M, Ngobese J, Olff H. Managing invasions at the cost of native habitat? An experimental test of the impact of fire on the invasion of *Chromolaena odorata* in a South African savanna. *Biological Invasions*, 2012, 14(3): 607-618.
- [18] 张海霞. 不同入侵植物对本土植物根际土壤酶活性及微生物数量的影响. *广东农业科学*, 2014, 41(21): 61-66.
- [19] 胡忠良, 潘根兴, 李恋卿, 杜有新, 王新洲. 贵州喀斯特山区不同植被下土壤 C、N、P 含量和空间异质性. *生态学报*, 2009, 29(8): 4187-4195.
- [20] 颜萍, 熊康宁, 王恒松, 李晋, 刘洋. 喀斯特地区水土流失与水土保持研究进展. *中国水土保持*, 2016, (1): 54-59.
- [21] 盛茂银, 刘洋, 熊康宁. 中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的响应. *生态学报*, 2013, 33(19): 6303-6313.
- [22] 钟军弟, 李先琨, 向悟生, 袁长春, 陈燕, 刘锴栋. 桂西南喀斯特区域不同稳定性群落下飞机草种群结构特征分析. *南方农业学报*, 2012, 43(7): 971-976.
- [23] 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.
- [24] Chacón N, Herrera I, Flores S, González J A, Nassar J M. Chemical, physical, and biochemical soil properties and plant roots as affected by native and exotic plants in Neotropical arid zones. *Biology and Fertility of Soils*, 2009, 45(3): 321-328.
- [25] 吕仕洪, 陆树华, 李先琨, 蒋忠诚, 向悟生, 覃家科, 区智. 广西平果县石漠化地区立地划分与生态恢复试验初报. *中国岩溶*, 2005, 24(3): 196-201.
- [26] 唐赛春, 吕仕洪, 潘玉梅, 韦春强, 刘明超, 蒲高忠. 广西喀斯特地区割草结合植树方法对飞机草的控制效果. *应用生态学报*, 2011, 22(7): 1944-1948.
- [27] 张娜, 秦艳, 金轲, 纪磊, 崔志强. 放牧对典型草原群落特征及土壤物理性状的影响. *中国草地学报*, 2020, 42(4): 91-100.
- [28] 张恒硕, 查同刚, 张晓霞. 晋西黄土区退耕年限对土壤物理性质的影响. *北京林业大学学报*, 2020, 42(6): 123-133.
- [29] 梁雷, 叶小齐, 吴明, 邵学新, 李长明. 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. *土壤*, 2016, 48(4): 680-685.
- [30] 冯燕辉, 梁文俊, 魏曦, 赵伟文, 卜瑞英, 王凯娜. 不同林分密度华北落叶松林枯落物及土壤特征分析. *西南师范大学学报: 自然科学版*, 2021, 46(3): 179-187.
- [31] 朱万泽, 盛哲良, 舒树森. 川西亚高山次生林恢复过程中土壤物理性质及水源涵养效应. *水土保持学报*, 2019, 33(6): 205-212.
- [32] 白静, 严锦钰, 何东进, 蔡金标, 王韧, 游巍斌, 肖石红, 侯栋梁, 李威威. 互花米草入侵对闽东滨海湿地红树林土壤理化性质和酶活性的影响. *北京林业大学学报*, 2017, 39(1): 70-77.
- [33] 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.
- [34] Ojeniyi S, Odedina S A, Agbede T M. Soil productivity improving attributes of Mexican sunflower (*Tithonia diversifolia*) and siam weed (*Chromolaena odorata*). *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 2012, 24(3): 243-247.
- [35] Zhang C B, Wang J, Qian B Y, Li W H. Effects of the invader *Solidago canadensis* on soil properties. *Applied Soil Ecology*, 2009, 43(2/3): 163-169.