

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2018.03.004

入侵植物替代控制中土著种选择机制的研究

张震¹, 代宇雨¹, 王一帆¹, 吕得林¹, 王瑞²

¹安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036; ²植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193

摘要: 生物入侵对入侵地生态系统的稳定性及社会经济造成严重危害, 成为全球三大环境问题之一。为有效治理入侵植物, 结合常采用的物理、化学和生物防治等方法, 从防治机制方面分析土著种替代控制入侵植物的有效性。通常土著种替代控制入侵植物是由于土著植物向环境中分泌化感物质, 使得土壤中的微生物、动物以及化学成分相互作用, 从而改变了入侵植物的生存环境。同时, 土著植物利用自身的优势条件与入侵植物进行养分和光能等资源竞争, 使入侵植物处于不利地位。通过对替代控制机理的概述, 提出了替代植物的选择方法, 讨论了需要进一步加强的领域, 以期拓展替代控制这一领域的广度和深度, 为入侵植物的生态防治提供理论依据。

关键词: 生物入侵; 替代控制; 入侵机制

Review of the use of native plants as a control mechanism of invasive weeds

ZHANG Zhen¹, DAI Yuyu¹, WANG Yifan¹, LÜ Delin¹, WANG Rui²,

¹*School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China;*

²*State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Beijing 100193, China*

Abstract: As one of the three major global environmental problems, invasive species have posed serious threats to native ecosystems and regional economies. On the basis of comparing physical, chemical and biological methods to control invasive plants, this paper analyzed the effectiveness of the methods of replacement control, namely native plant alternatives as a mechanism to prevent and control invasive plants. One way for native alternatives to control invasive plants is through plant allelochemicals that modify the environment, including interactions among soil microorganisms, animals, and soil chemical compositions interact thus affecting invasive plants. At the same time, the native plants compete with the invasive plants for nutrient and light resources, which makes the invasive plants at an unfavorable position. This paper may not only help us understand the underlying mechanism of exotic plants intensively, but also provide a scientific foundation of control current invasions and prevention of future invasions.

Key words: biological invasion; replacement control; invasive mechanism

自 1958 年 Charles Elton 首次提出生物入侵的概念以来 (Pyšek & Hulme, 2010), 入侵生物受到了越来越多的关注, 被视为全球三大环境问题之一 (Sala & Wall, 2000)。随着全球经济一体化 (Dunn & Robert, 2010)、人口增加和人类干扰, 生态系统稳定性被破坏, 抗干扰能力降低, 入侵种的扩散与定殖加剧 (鞠瑞亭等, 2012; Pimentel *et al.*, 2000; Weber *et al.*, 2008)。入侵物种由于自身的生物学和生态学特性, 严重危害入侵地的生物多样性, 甚至造成土著生物灭绝 (Baider & Florens, 2011)。

研究表明, 美国因生物入侵造成的损失每年约 1370 亿美元, 印度和南非每年受到的损失也已超过 800 亿美元 (谢联辉等, 2011), 我国每年仅入侵植物造成的损失就超过 70 亿美元 (黄乔乔等, 2012)。目前, 中国外来入侵植物共计 515 种, 隶属 72 科 285 属, 其中以菊科、豆科和禾本科为主, 原产于南美洲的物种约占 34.6% (闫小玲等, 2014)。入侵植物不仅对入侵地造成了严重的经济损失, 也对生态安全产生危害。其通过有性生殖或无性生殖, 快速提高自身的竞争能力, 从而降低土著植物丰富度

(Dudley, 2000; Jamieson & Bowers, 2010; Wang *et al.*, 2010)。入侵植物在新环境中往往能够占据主导地位,主要原因包括种间竞争、杂交以及天敌缺乏等(徐海根等, 2004)。

目前,入侵植物的治理方法中,物理方法主要是通过刈割、砍伐或火烧等来遏制其生长,虽然短期内效果较为明显,但不能长久维持,再次入侵的可能性高,且费财费力(常瑞英等, 2013; 唐龙, 2008; Jia *et al.*, 2009)。化学防治是通过喷洒噻磺隆(符克开等, 2012)、氨基吡啶酸(朱文达等, 2013)、草甘膦(汪小飞等, 2012)等除草剂从而致植株死亡(曹勘程等, 2006)。化学防治见效快,但喷施量大,易污染水体、大气、土壤等(李林等, 2016)。生物防治主要包括天敌防治、土壤动物防治和土壤微生物防治等(王颖等, 2015)。生物防治能长期有效地控制入侵植物,但引进天敌容易造成二次生态入侵,具有一定的风险(Fagan *et al.*, 2002; Liu *et al.*, 2011)。此外,天敌对新环境气候等因子的适应性也有待探讨(刘雨芳等, 2011)。竞争替代控制是主要的生态控制方法,指使用非耕地和草场,通过人为管理创造有利条件,以植被覆盖的方式使目标有害植物被替代(Piemeisel, 1954; Piemeisel & Carsner, 1951),是目前普遍认可的控制方法(Li *et al.*, 2015)。如白蝶合果芋 *Syngonium podophyllum* Schott 和细叶萼距花 *Cuphea hyssopifolia* Kunth 替代控制猫爪藤 *Macfadyena unguis-cati* (Linn.) A. Gentry(卢昌义等, 2005)、无瓣海桑 *Sonneratia apetala* Buch.-Ham 和海桑 *Sonneratia caseolaris* (L.) Engl. 替代控制互花米草 *Spartina alterniflora* Loisel(Yujun *et al.*, 2004)、高丹草 *Sorghum bicolor* (L.) Moench 替代控制黄顶菊 *Flaveria bidentis* (L.) Kuntze(皇甫超河等, 2010a)、多年生黑麦草 *Lolium perenne* L. 等替代控制紫茎泽兰 *Eupatorium adenophora* Spreng(周泽建, 2006),均取得明显效果。生态控制虽然耗时较长,但是土著种替代控制入侵种效果持久,能较为彻底地恢复生态系统功能,丰富入侵地的生物多样性,具有良好的生态效益和经济效益。

近年来国内外学者开展了入侵植物的入侵机制和防治策略等诸多研究,完善了相关入侵理论,提高了入侵物种的防治效果。为了更好地对入侵植物进行防控,本文结合已有研究,分别对替代植物的选择、作用机制进行总结和展望,以期对替代

控制研究有所帮助。

1 替代控制作用机制

1.1 化感作用

植物通过根际分泌(Callaway *et al.*, 2005)、挥发、淋溶(Kangle & Hopkins, 2004)等方式向环境中分泌特异性的化学物质来改变周围环境,从而影响附近的植物或微生物群落的变化。Callaway & Rid-enour (2004)提出了"novel weapons"假说,为入侵植物的入侵机制提供了理论基础。

植物在生长过程中胚根最先接触化感物质,影响了根系的发育,降低其对水肥的吸收,进而影响种子萌发率以及幼苗生长(于文清等, 2012)。如麻栎 *Quercus acutissima* Carruth 对火炬树 *Rhus Typhina* L. 种子的萌发和幼苗生长表现出显著的抑制作用(侯玉平等, 2016)。葎草 *Humulus scandens* (Lour.) Merr. 浸提物对喜旱莲子草根茎的分蘖力具有明显抑制作用,且葎草地下部分浸提物较地上部分对喜旱莲子草的化感抑制强度更明显(张震等, 2012)。其原因可能是由于化感物质通过影响周围植物体内化学成分的改变而造成生理指标的变化。Kakuta (1993)在向日葵 *Helianthus annuus* L.、牛蒡 *Arctium lappa* L.、莴苣 *Lactuca sativa* Linn. 中发现的 Lepidimoide 可以明显促进受体植物叶绿素的合成,特别是在低光照条件下也能促进受体植物生长。叶绿素是植物光合作用必须物质,叶绿素含量的变化会对植物的生长发育产生严重的影响(赵洪兵等, 2011)。韩春梅等(2012)发现,生姜 *Zingiber officinale* Rosc. 水浸提液对土壤酶活性产生显著影响。化感物质改变了土壤酶活性,进而影响土壤微生物环境的变化,而微生物和动物群落结构的变化,也间接影响了植物对于养分的吸收。化感物质可以直接作用于土壤,通过改变土壤中的生物群落或养分来营养其他植物。矢车菊 *Centaurea diffusa* Lam. 能产生一种 8-羟基喹啉的化感物质,其原产地有一种细菌对该化感物质具有抗性,可抵御矢车菊化感物质的攻击,但在矢车菊的入侵地却由于缺少该细菌导致矢车菊入侵成功(Vivanco *et al.*, 2004)。入侵植物火炬树的水浸提液提高了土壤中碳、全钾、速效氮、有效磷、速效钾的含量,从而为自身定殖提供充足的资源(侯玉平等, 2013)。

1.2 资源竞争作用

在替代控制中,资源竞争主要是养分竞争和光

能竞争。养分竞争的相关研究主要集中于土著种和入侵种对土壤养分的争夺:土著种通过与入侵种竞争土壤养分,提高了自身的营养生长及生殖生长,更大的生物量使其在竞争优势种中处于有利地位。单一种植时,甘薯 *Dioscorea esculenta* (Lour.) Burkill 的各项形态指标均高于薇甘菊 *Mikania micrantha* Kunth,而薇甘菊的土壤养分浓度显著高于甘薯土壤;混合种植时,薇甘菊的形态指标及生物量均被显著抑制,且土壤养分显著降低,因此甘薯在植物生长特性方面有更强的优势,对土壤养分有更强的吸收能力(Shen *et al.*, 2015)。同时,薇甘菊的生殖生长被严重抑制,这是由于甘薯的竞争推迟了薇甘菊的开花物候期,降低了传粉者数量(Shen *et al.*, 2016)。在混种时,氮肥的增加提高了土著种苘麻 *Abutilon theophrasti* Medic 对入侵种的抑制作用,高的资源利用率使得土著种比入侵种有更快的生长速率和更高的净同化速率(Zhang, 2015)。

在光能竞争中,遮阴是十分重要的策略之一。较低的光合强度会降低叶片的生物量和 CO₂ 固定酶的数量,导致其生物量降低(Li *et al.*, 2015)。作为典型的 C₄ 植物(McKown *et al.*, 2005),黄顶菊 *Flaveria bidentis* (L.) Kuntze 种子需要一定的光照刺激才能萌发,而替代植物藜 *Chenopodium album* L. 的遮阴郁闭作用则有效阻止其萌发(杨晴等, 2014)。少数萌发生长的黄顶菊很难与长势高大、郁闭度高的紫穗槐 *Amorpha fruticosa* L.、沙打旺 *Astragalus adsurgens* Pall 争夺光照资源,因而其植株生长受到抑制,密度和结实量也随之降低,土壤中黄顶菊种子的库储量显著减少(张瑞海等, 2016)。

资源利用率高的植物在竞争中将处于优势地位,高生长速率和同化速率则会促进土著种对入侵种的替代,从而提高自身的定殖,丰富群落多样性。

1.3 土壤微生物作用

植物通过凋落物和分泌物来影响碳氮循环,从而改变土壤微生物的群落结构,进而形成连锁反应,改变周边生物群落(Ehrenfeld & Scott, 2001)。

土壤中根际分泌物可以直接或间接抑制或促进一些丛枝菌根真菌(AMF)的生长,影响入侵植物种子的发芽率(于文清等, 2012)。土壤微生物对植物具有抑制或促进作用,能增强或抑制对植物的致病性,这些“反馈”关系可能改变植物——土壤生物群的相互作用方式,促进或抑制建立入侵种群(Re-

inhart & Callaway, 2006)。李立青等(2016)测定了林下和林地边缘两类生境中紫茎泽兰和土著种的 AMF 侵染率和 AMF 含量,发现 2 种生境中紫茎泽兰的菌根侵染率和 AMF 含量均显著高于本地植物,且接种 AMF 显著提高了紫茎泽兰的生长速率。但也有研究发现,AMF 群落结构的变化可能抑制植物入侵,如入侵植物长叶车前 *Plantago lanceolata* L. 与本地黍 *Panicum sphaerocarpon* ELL. 在与 AMF 互作时,黍生长得更好,长叶车前受到抑制,AMF 的负反馈效应阻止了长叶车前的完全入侵(Bever, 2002)。不同的地上群落结构会间接导致地下微生物群落结构的变化(Saggar *et al.*, 1999),而微生物又能调节地上植物的竞争与生长,通过正或负反馈两条动力学因素与土壤微生物产生相互作用(Wagg *et al.*, 2011)。白三叶 *Trifolium repens* 和杂交狼尾草 1:1 混种作为胜红蓟 *Ageratum conyzoides* L. 的替代控制材料,能显著提高土壤中的真菌数量,替代控制效果较好(李光义等, 2013)。非洲狗尾草 *Setaria sphacelata* (Schumach.) Stapf 与紫茎泽兰混种能改善土壤微生物的多样性,明显降低紫茎泽兰的生物量(桂富荣等, 2010)。有益菌与致病菌在土壤中相互作用,直接影响植物的抗病力。紫茎泽兰根际土壤中存在着丰富的芽孢杆菌和假单胞菌,其中枯草芽孢杆菌和巨大芽孢杆菌对番茄枯萎病菌和青枯病菌有不同程度的拮抗作用,其代谢产物的抑菌率分别为 85.5% 和 83.8%(牛红榜等, 2007)。

微生物与化感物质的共同作用为入侵种的传播扩散提供了有利的条件,但这不是入侵种所特有的,土著种同样可以通过这种机制反馈于入侵种,改变入侵地的微生物群落,使之朝着有利于自身的群落结构的方向演替(Ning *et al.*, 2016)。

1.4 土壤动物作用

植物通过凋落物、根系分泌物等引起周围局部气候环境和土壤理化性质的变化,可能会改变中小型土壤动物群落结构特征(谢俊芳等, 2011)。

研究发现,加拿大一枝黄花 *Solidago canadensis* L. 通过调控入侵地土壤铵态氮,改变土壤动物的群落结构,创造出对自身生长有利的环境(陈雯等, 2012)。入侵植物显著增加了蚯蚓的生物量,而蚯蚓增加了生态系统中氮循环的速率(Aplet, 1990; Kourtev *et al.*, 1999)。地上植被通过自身的分泌物或凋落物改变了土壤的养分结构,如有机酸、碳水

化合物等分泌物为中小型土壤动物的生存和发展提供了条件(李钧敏等,2008)。薇甘菊生长过程中形成的大量凋落物为土壤动物提供了丰富的食物来源,因而入侵区内土壤动物尤其是线虫类和蛴螬目数量显著高于其他土著群落(全国明等,2011)。土壤动物也会对植物进行反馈作用,根际小型土壤动物通过取食微生物调节微生物的群落结构和数量,并通过释放养分、积累和固定有机碳对地上的多级营养关系产生影响(Bonkowski *et al.*, 2009)。土壤动物对调节土壤微生物群落起着十分重要的作用,间接影响了植物生长(Bonkowski *et al.*, 2000a, 2000b),在土壤动物的参与下,植物根系、根系分泌物和微生物之间的相互作用才能顺利进行。另外,土壤动物还能增加细菌的活性,改变细菌群落组分及根际分部形态(Kreuzer *et al.*, 2006)。研究发现,蚯蚓和AMF的相互作用,能提高土壤养分有效性,影响植物对营养元素的吸收(李欢等, 2011)。食细菌线虫和食真菌线虫则能提高土壤中氮素的矿化率,提高AMF对营养的吸收并转移到植物体内的速率,促进植物生长(Bakhtiar *et al.*, 2001; Bonkowski *et al.*, 2000b)。

土壤动物在整个资源利用和物质循环过程中起着十分重要的作用,植物可以通过改变土壤动物群落组成进而为自身的生长提供更加有利的条件。

2 替代控制植物的选择标准

替代控制是根据植物群落演替规律,运用生态位占先的原理,利用具有生态或经济效益的土著植物取代外来入侵植物群落,实现恢复具有自我维持能力的合理生态系统(皇甫超河等,2010b; 周泽建等,2006)。在选择替代控制植物时应该从具有高繁殖能力(Wang *et al.*, 2008)、较低叶建成成本、较高光合速率和资源利用率(Van *et al.*, 2010)以及较强化感作用(Fabbro *et al.*, 2014)这几个方面考虑。

2.1 资源利用率高

资源利用率包括养分利用率和光能利用率,植物通过提高光合速率或增加自身对氮磷等养分的吸收水平来提高竞争能力(Verlinden *et al.*, 2014)。紫茎泽兰利用自身较大冠幅来遮盖其他土著植物,降低了其他植被的光合能力,从而成功入侵(Keddy *et al.*, 2002)。因此,选取具有更大的遮蔽效果的土著种有可能控制入侵植物的定殖。替代植物非洲狗尾草和葛藤 *Pueraria lobata* (Willd.) Ohwi 盖度

达到一定程度时对紫茎泽兰生长的抑制效果十分显著(卢向阳等,2015)。同样的研究结果也出现在狼尾草 *Pennisetum alopecuroides* (L.) Spreng 等禾本科植物与刺萼龙葵 *Solanum rostratum* Dunal. (向俊等,2011)和豚草 *Ambrosia artemisiifolia* L. (岳茂峰等,2013)的竞争中。而紫穗槐和沙打等也在控制刺萼龙葵(庞立东和孙余卓,2016)和黄顶菊(张瑞海等,2016)的过程中,以其对养分的吸收能力成为替代植物的优先植物。

2.2 具有化感抑制作用

入侵种往往通过向环境中分泌一定的化感物质来降低土著植物丰富度,从而为自身定植提供有利环境(Murrell *et al.*, 2011)。因此,在选择替代控制植物时需选取对入侵植物具有抗化感能力或者自身具有化感作用的物种,通过抢夺生态位来实现对入侵植物的防治。非洲狗尾草、宽叶雀稗 *Paspalum wettsteinii* Hackel 等植物对紫茎泽兰具有较好的抗化感能力,可作为替代控制紫茎泽兰的优选物种(钟声等,2007; Lu *et al.*, 2013)。向日葵根系发达,具有较强的化感作用,对阔叶杂草生长有较强的抑制作用(周凯等,2004)。紫花苜蓿 *Medicago sativa* L.通过根系分泌物改变黄顶菊入侵地的土壤微生物群落结构,使其向有利于替代植物的群落结构转变(皇甫超河等,2010b)。

2.3 生长能力强

入侵植物通常具有较强的环境适应能力与较快的生长速度,因此,作为替代植物应该具有前期生长迅速、植物高大、具有良好遮阴效果以及较强抗逆性等特点。紫花苜蓿的生长期较豚草早,可以在豚草大面积生长前期就对其产生抑制作用(高尚宾等,2017)。木豆 *Cajanus cajan* (L.) Millsp 与杂交狼尾草 *Pennisetum americanum* × *P. purpureum* 由于较大的生物量,使其个体可以对飞机草 *Chromolaena odoratum* L.起到很好的遮蔽作用,从而在与飞机草的竞争中形成优势(岳茂峰等,2016)。沙打旺为豆科植物,具有较好的固氮能力,同时抗旱、抗风沙、耐盐碱和耐贫瘠,有防风固沙,水土保持的能力(高农,2001)。因此,具有较强的生长能力与适应能力是选择替代植物的重要标准。

2.4 具有经济效益

由于替代控制植物的种植和管理需投入劳力和资金,并且占用一定土地,如果替代植物缺乏良

好的经济价值,将难以调动广大农户种植的积极性,导致不能大规模推广应用。

贵州皇竹草 *Pennisetum sinense* Roxb 替代紫茎泽兰实施工程失败(尹俊,2006)的原因就在于皇竹草草质较差,既不能作为饲料利用,也缺少其他用途,使得农户丧失了种植和管理的积极性,最终皇竹草替代区内紫茎泽兰再度复发(卢向阳,2014)。但在云南、贵州、四川等地开展的作物和牧草替代控制紫茎泽兰的工程中,通过种植人工植被,不但提高了保水、蓄水能力,还对恢复和建立新的农业生态系统、抑制紫茎泽兰的恶性发展起了重要作用(尹俊,2006)。因此,选择具有一定经济效益的替代植物不但可以提高生态系统功能,还能对当地的经济发展起到推动作用。

3 替代控制的应用

深圳市于 2001—2002 年在广东内伶仃岛进行群落改造研究,在薇甘菊危害严重地段种植血桐 *Macaranga tanarius* (L.) Muell.、幌伞枫 *Heteropanax fragrans* (Roxb.) Seem.、阴香 *Cinnamomum burmannii* (C. G. et Th. Nees) Bl.、海南蒲桃 *Syzygium hainanense* Chang et Miao、枫香 *Liquidambar formosana* Hance、木荷 *Schima superba* Gardn. et Champ.、黎蒴 *Castanopsis fissa* (Champ. ex Benth.) Rehd. et Wils. 等,2002 年底停止抚育,2003 年群落改造效果已显现。2010 年跟踪监测发现,改造群落生长良好并形成了不利于薇甘菊生长的环境(李鸣光等,2012;殷祚云等,2003)。在广东内伶仃岛开展的群落改造,已成功控制薇甘菊的危害(许少娣等,2013)。

4 展望

近年来,国内外学者对入侵植物替代控制的研究日益增多(Fagan *et al.*, 2002)。替代控制的过程较为缓慢,在替代过程中,植物、动物、微生物以及环境因子都有着紧密的联系,这种关系随着替代程度的不同而产生变化。

利用不同植物之间的相互作用,选择合适的替代植物,通过资源竞争或化感作用来抑制入侵植物的扩散是生态演替理论的应用,可以有效地控制入侵物种的肆意蔓延。环境因子的变化直接影响着植物的生长发育,不同植物的表型可塑性不同,对于环境的响应机制也不同,直接影响了植物之间的关系(耿宇鹏等,2004)。氮沉降等全球性问题日益

严重,对入侵植物的入侵能力产生影响。入侵植物可能通过全球气候的变化来改变自身的定植区域,因此,资源分配及气候变化也会对入侵植物的竞争能力产生影响。因此,探讨入侵植物与本地植物对资源的分配利用,找到提高替代植物竞争能力的环境资源是之后的研究方向。

入侵植物和土著植物之间的相互作用改变了土壤中的微生态环境,土壤中的动物与微生物的群落结构的变化影响了土壤理化性质的变化,土壤理化性质又影响了植物的生长发育,植物通过自身的分泌、淋溶以及根系吸收等过程改变了土壤动物与微生物的生存环境(王光华等,2006;杨效东和沙丽清,2001)。因此,应该从土壤微生物群落结构、土壤养分的变化以及植物体内化学成分的变化这几个方面深入分析,综合考虑资源竞争、化感作用及微生态环境,从而找出替代控制入侵植物的最优方法,这也是今后需要进一步研究的重点。

参考文献

- 曹焯程, 芮昌辉, 郭美霞, 袁会珠, 杨代斌, 陈福良, 2006. 紫茎泽兰的化学防除及生态修复效果. 安全与环境学报, 6(3): 80–85.
- 常瑞英, 王仁卿, 张依然, 刘建, 2013. 入侵植物空心莲子草的入侵机制及综合管理. 生态与农村环境学报, 29(1): 17–23.
- 陈雯, 李涛, 郑荣泉, 陈平, 李婷, 陆俊佳, 2012. 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, 32(22): 7072–7081.
- 符克开, 钟宝珠, 钱军, 黄守浓, 吕朝军, 2012. 2 种表面活性物质对 70% 啶磺隆 WP 防治薇甘菊的增效作用. 生物安全学报, 21(3): 240–243.
- 桂富荣, 于亮, 李云国, 刘万学, 彭恒, 2010. 混种牧草对紫茎泽兰根际土壤微生物的影响. 中国植保导刊, 30(4): 10–14.
- 高农, 2001. 国产特有草种——沙打旺. 小康生活(11): 38.
- 高尚宾, 张宏斌, 孙玉芳, 张国良, 2017. 植物替代控制 3 种入侵杂草技术的研究与应用进展. 生物安全学报, 26(1): 18–22.
- 耿宇鹏, 张文驹, 李博, 陈家宽, 2004. 表型可塑性对外来植物的入侵能力. 生物多样性, 12(4): 447–455.
- 韩春梅, 李春龙, 叶少平, 潘开文, 吴宁, 李伟, 2012. 生姜水浸液对生姜幼苗根际土壤酶活性、微生物群落结构及土壤养分的影响. 生态学报, 32(2): 489–498.
- 侯玉平, 柳林, 王信, 闫晓宇, 门航, 李伟杰, 2013. 外来植

- 物火炬树水浸液对土壤微生物生态系统的化感作用. 生态学报, 33(13): 4041-4049.
- 侯玉平, 魏巍, 翟文婷, 初航, 殷吉林, 柏新富, 2016. 山东半岛丘陵生境优势树种凋落物对外来植物火炬树种子萌发和幼苗生长的影响. 林业科学, 52(6): 28-34.
- 皇甫超河, 陈冬青, 王楠楠, 杨殿林, 2010a. 外来入侵植物黄顶菊与四种牧草间化感互作. 草业学报, 19(4): 22-32.
- 皇甫超河, 张天瑞, 刘红梅, 李刚, 赖欣, 杨殿林, 2010b. 三种牧草植物对黄顶菊田间替代控制. 生态学杂志, 29(8): 1511-1518.
- 黄乔乔, 沈奕德, 李晓霞, 程汉亨, 宋鑫, 范志伟, 2012. 外来入侵植物在中国的分布及入侵能力研究进展. 环境学报, 21(5): 977-985.
- 鞠瑞亭, 李慧, 石正人, 李博, 2012. 近十年中国生物入侵研究进展. 生物多样性, 20(5): 581-611.
- 李光义, 侯宪文, 邹雨坤, 刘振迪, 李勤奋, 2013. 3种牧草不同搭配方式对胜红蓟的替代控制. 杂草科学, 31(2): 19-25.
- 李欢, 李晓林, 张俊伶, 盖京苹, 王冲, 向丹, 2011. 蚯蚓与丛枝菌根真菌的相互作用及其对植物的影响. 土壤学报, 48(4): 847-855.
- 李钧敏, 钟章成, 董鸣, 2008. 田野菟丝子(*Cuscuta campestris*)寄生对薇甘菊(*Mikania micrantha*)入侵群落土壤微生物生物量和酶活性的影响. 生态学报, 28(2): 868-876.
- 李立青, 张明生, 梁作盼, 肖博, 万方浩, 刘万学, 2016. 丛枝菌根真菌促进入侵植物紫茎泽兰的生长和对本地植物竞争效应. 生态学杂志, 35(1): 79-86.
- 李林, 曹勘程, 喻大昭, 朱文达, 颜冬冬, 欧阳灿彬, 2016. 油菜对紫茎泽兰的替代控制效果. 中国油料作物学报, 38(4): 513-517.
- 李鸣光, 鲁尔贝, 郭强, 咎启杰, 韦萍萍, 蒋露, 2012. 入侵种薇甘菊防治措施及策略评估. 生态学报, 32(10): 3240-3251.
- 刘雨芳, 苏文杰, 曾强国, 李菲, 彭梅芳, 彭佳星, 2011. 空心莲子草叶甲对空心莲子草控制效果的定量评价. 昆虫学报, 54(11): 1305-1311.
- 卢昌义, 胡宏友, 张明强, 钟跃庭, 郑逢中, 2005. 人工清除结合生态替代根除外来入侵植物猫爪藤. 植物保护, 31(3): 53-56.
- 卢向阳, 2014. 替代植物的选育与紫茎泽兰的持续控制. 杂草科学, 32(1): 69-74.
- 卢向阳, 曹勘程, 欧阳灿彬, 张锦华, 2015. 葛藤定植及替代控制紫茎泽兰的技术研究. 杂草科学, 33(4): 18-22.
- 牛红榜, 刘万学, 万方浩, 刘波, 2007. 紫茎泽兰根际土壤中优势细菌的筛选鉴定及拮抗性能评价. 应用生态学报, 18(12): 2795-2800.
- 庞立东, 孙余卓, 2016. 刺萼龙葵的入侵机理与控制策略研究进展. 中国植保导刊, 36(8): 20-25.
- 全国明, 章家恩, 谢俊芳, 毛丹鹃, 徐华勤, 姜万兵, 2011. 薇甘菊入侵对中小型土壤动物群落结构特征的影响. 应用生态学报, 22(7): 1863-1870.
- 唐龙, 2008. 刈割、淹水及芦苇替代综合控制互花米草的生态学机理研究. 博士学位论文. 上海: 复旦大学.
- 汪小飞, 黄奏义, 汪传友, 吴磊, 金亮亮, 马敏, 2012. 三种除草剂对外来入侵植物大狼把草的防除效果. 生态学杂志, 31(7): 1714-1717.
- 王光华, 金剑, 徐美娜, 刘晓冰, 2006. 植物、土壤及土壤管理对土壤微生物群落结构的影响. 生态学杂志, 25(5): 550-556.
- 王颖, 李为花, 李丹, 张震, 2015. 喜旱莲子草入侵机制及防治策略研究进展. 浙江农林大学学报, 32(4): 625-634.
- 向俊, 李翠妮, 刘全儒, 周云龙, 孙乐, 毛春明, 2011. 北京外来入侵植物刺萼龙葵的生态状况. 生态学杂志, 30(3): 453-458.
- 谢俊芳, 全国明, 章家恩, 毛丹鹃, 徐华勤, 秦钟, 2011. 豚草入侵对中小型土壤动物群落结构特征的影响. 生态学报, 31(19): 5682-5690.
- 谢联辉, 尤民生, 侯有明, 2011. 生物入侵: 问题与对策. 北京: 科学出版社.
- 徐海根, 强胜, 韩正敏, 郭建英, 黄宗国, 孙红英, 2004. 中国外来入侵物种的分布与传入路径分析. 生物多样性, 12(6): 626-638.
- 许少嫦, 高亿波, 林绪平, 刘建锋, 余海滨, 梁玮莎, 2013. 广东薇甘菊发生现状、防治和研究进展. 林业与环境科学, 29(4): 83-89.
- 闫小玲, 刘全儒, 寿海洋, 曾宪锋, 张勇, 陈丽, 刘演, 马海英, 齐淑艳, 马金双, 2014. 中国外来入侵植物的等级划分与地理分布格局分析. 生物多样性, 22(5): 667-376.
- 杨晴, 李婧实, 郭艾英, 齐艳玲, 李彦生, 张凤娟, 2014. 遮阴和藜竞争对黄顶菊光合荧光和生长特性的影响. 应用生态学报, 25(9): 2536-2542.
- 杨效东, 沙丽清, 2001. 西双版纳“龙山”片断热带雨林中小型土壤动物群落组成与多样性研究. 应用生态学报, 12(2): 261-265.
- 殷祚云, 李小川, 何立平, 黄文辉, 周永文, 黎容根, 2003. 薇甘菊生态防除研究初报. 林业与环境科学, 19(4): 17-22.
- 尹俊, 2006. 中国西南地区紫茎泽兰防治的现状及对策建议. 草业科学, 23(6): 82-85.
- 于文清, 周文, 万方浩, 刘万学, 2012. 丛枝菌根真菌(AMF)对外来植物入侵反馈机制的研究进展. 生物安全学报, 21(1): 1-8.
- 岳茂峰, 冯莉, 田兴山, 杨彩宏, 2013. 杂交狼尾草与豚草

- 的竞争效应. 广东农业科学, 40(8): 83–86.
- 岳茂峰, 崔烨, 冯莉, 张纯, 田兴山. 2016. 入侵植物飞机草与 4 种牧草的竞争效应. 生物安全学报, 25(4): 270–274.
- 张瑞海, 付卫东, 宋振, 晏静, 朱昌雄, 张国良. 2016. 河北地区黄顶菊土壤种子库特征及其对替代控制的响应. 生态环境学报, 25(5): 775–782.
- 张震, 徐丽, 王育鹏, 李丹. 2012. 葎草水浸提物对外来入侵植物喜旱莲子草营养生长的影响. 西北植物学报, 32(9): 1844–1849.
- 赵洪兵, 郭会君, 赵林姝, 古佳玉, 赵世荣, 李军辉. 2011. 空间环境诱变小麦叶绿素缺失突变体的主要农艺性状和光合特性. 作物学报, 37(1): 119–126.
- 钟声, 段新慧, 奎嘉祥. 2007. 紫茎泽兰对 16 种牧草发芽及幼苗生长的化感作用. 草业学报, 16(6): 81–87.
- 周凯, 郭维明, 徐迎春. 2004. 菊科植物化感作用研究进展. 生态学报, 24(8): 1776–1784.
- 周泽建. 2006. 狗尾草和黑麦草对紫茎泽兰的竞争效应. 硕士学位论文. 长沙: 湖南农业大学.
- 周泽建, 周美兰, 刘万学. 2006. 三种植物在不同肥力下对紫茎泽兰的生态控制效果. 中国农学通报, 22(6): 361–364.
- 朱文达, 曹勘程, 颜冬冬, 李林, 刘晓燕, 郭章碧. 2013. 除草剂对紫茎泽兰防治效果及开花结实的影响. 生态环境学报, 22(5): 820–825.
- APLET G H. 1990. Alteration of earthworm community biomass by the alien *Myrica faya* in Hawai'i. *Oecologia*, 82(3): 414–416.
- BAIDER C, FLORENS F B V. 2011. Control of invasive alien weeds averts imminent plant extinction. *Biological Invasions*, 13(12): 2641–2646.
- BAKHTIAR Y, MILLER D, CAVAGNARO T, SMITH S. 2001. Interactions between two arbuscular mycorrhizal fungi and fungivorous nematodes and control of the nematode with fenamifos. *Applied Soil Ecology*, 17(2): 107–117.
- BEVER J D. 2002. Host-specificity of AM fungal population growth rates can generate feedback on plant growth. *Plant and Soil*, 244(1): 281–290.
- BONKOWSKI M, CHENG W X, GRIFFITHS B S, ALPHEI J, SCHEU S. 2000a. Microbial-faunal interactions in the rhizosphere and effects on plant growth. *European Journal of Soil Biology*, 36(3): 135–147.
- BONKOWSKI M, GRIFFITHS B, SCRIMGEOUR C. 2000b. Substrate heterogeneity and microfauna in soil organic 'hotspots' as determinants of nitrogen capture and growth of ryegrass. *Applied Soil Ecology*, 14(1): 37–53.
- BONKOWSKI M, VILLENAVE C, GRIFFITHS B. 2009. Rhizosphere fauna: the functional and structural diversity of intimate interactions of soil fauna with plant roots. *Plant and Soil*, 321(1): 213–233.
- CALLAWAY R M, RIDENOUR W M. 2004. Novel weapons: invasive success and the evolution of increased competitive ability. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 2(8): 436–443.
- CALLAWAY R M, RIDENOUR W M, LABOSKI T, WEIR T, VIVANCO J M. 2005. Natural selection for resistance to the allelopathic effects of invasive plants. *Journal of Ecology*, 93(3): 576–583.
- DUDLEY D R. 2000. Wicked weed of the west. *California Wild*, 53(4): 32–35.
- DUNN, ROBERT R. 2010. *Invasion ecology fifty years after Elton's book*. Berlin: Springer Verlag.
- EHRENFELD J G, SCOTT N. 2001. Invasive species and the soil: effects on organisms and ecosystem processes. *Ecological Applications*, 11(5): 1259–1260.
- FABBRO C D, GÜSEWELL S, PRATI D. 2014. Allelopathic effects of three plant invaders on germination of native species: a field study. *Biological Invasions*, 16(5): 1035–1042.
- FAGAN W F, LEWIS M A, NEUBERT M G, VAN D D P. 2002. Invasion theory and biological control. *Ecology Letters*, 5(1): 148–157.
- JAMIESON M A, BOWERS M D. 2010. Iridoid glycoside variation in the invasive plant *Dalmatian toadflax*, *Linaria dalmatica* (Plantaginaceae), and sequestration by the biological control agent, *Calophasia lunula*. *Journal of Chemical Ecology*, 36: 70–79.
- JIA X, PAN X Y, LI B, CHEN J K, YANG X Z. 2009. Allometric growth, disturbance regime, and dilemmas of controlling invasive plants: a model analysis. *Biological Invasions*, 11(3): 743–752.
- KANGLE, HOPKINS T L. 2004. Behavioral and olfactory responses of grasshopper hatchlings, *Melanoplus sanguinipes*, to plant odours and volatile compounds. *Science Bulletin*, 49(2): 136–141.
- KAKUTA H. 1993. Biomolecule transfer into plant cells by the particle gun. *Chemical Regulation of Plants*, 28: 98–104.
- KEDDY P, NIELSEN K, WEIHER E, LAWSON R. 2002. Relative competitive performance of 63 species of terrestrial herbaceous plants. *Journal of Vegetation Science*, 13(1): 5–16.
- KOURTEV P S, HUANG W Z, EHRENFELD J G. 1999. Differences in earthworm densities and nitrogen dynamics in soils under exotic and native plant species. *Biological Invasions*, 1(2): 237–245.
- KREUZER K, ADAMCZYK J, IJIMA M, WAGNER M, SCHEU S, BONKOWSKI M. 2006. Grazing of a common species of soil protozoa (*Acanthamoeba castellanii*) affects rhizosphere bacterial community composition and root archi-

- ture of rice (*Oryza sativa* L.). *Soil Biology & Biochemistry*, 38(7): 1665–1672.
- LI W, LUO J, TIAN X, SOON CHOW W, SUN Z, ZHANG T, 2015. A new strategy for controlling invasive weeds: selecting valuable native plants to defeat them. *Scientific Reports*, 5(10): 1–11.
- LIU J, WISNIEWSKI M, DROBY S, TIAN S, HERSHKOVITZ V, TWOROSKI T, 2011. Effect of heat shock treatment on stress tolerance and biocontrol efficacy of *Metschnikowia fructicola*. *Fems Microbiology Ecology*, 76(1): 145–155.
- LU X Y, WANG Q X, ZHANG J H, ZUO X B, LIU B, 2013. Control effect of several replacement plants on invasive weed *Eupatorium adenophorum* Spreng. *Plant Diseases and Pests*, 4(2): 40–44.
- MCKOWN A D, MONCALVO J M, DENGLER N G, 2005. Phylogeny of *Flaveria* (Asteraceae) and inference of C4 photosynthesis evolution. *American Journal of Botany*, 92: 911.
- MURRELL C, GERBER E, KREBS C, PAREPA M, SCHAFFNER U, BOSSDORF O, 2011. Invasive knotweed affects native plants through allelopathy. *American Journal of Botany*, 98(1): 38–43.
- NING L, YU F H, KLEUNEN M V, 2016. Allelopathy of a native grassland community as a potential mechanism of resistance against invasion by introduced plants. *Biological Invasions*, 18(12): 3481–3493.
- PIEMEISEL R L, 1954. Replacement control: changes in vegetation in relation to control of pests and diseases. *The Botanical Review*, 20(1): 1–32.
- PIEMEISEL R L, CARSONER E, 1951. Replacement control and biological control. *Science*, 113: 14–15.
- PIMENTEL D, LACH L, ZUNIGA R, MORRISON D, 2000. Environmental and economic costs of nonindigenous species in the United States. *BioScience*, 50(1): 53–65.
- PYŠEK P, HULME P E, 2010. Biological invasions in Europe 50 years after Elton: time to sound the alarm//DAVIS M A, *Fifty years of invasion ecology: the legacy of Charles Elton*: 71–88.
- REINHART K O, CALLAWAY R M, 2006. Soil biota and invasive plants. *New Phytologist*, 170(3): 445–457.
- SAGGAR S, MCINTOSH P D, HEDLEY C B, KNICKER H, 1999. Changes in soil microbial biomass, metabolic quotient, and organic matter turnover under *Hieracium* (*H. pilosella* L.). *Biology & Fertility of Soils*, 30(3): 232–238.
- SALA O E, WALL D H, 2000. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 287: 1770–1774.
- SHEN S, XU G, CLEMENTS D R, JIN G, CHEN A, ZHANG F, 2015. Suppression of the invasive plant mile-a-minute (*Mikania micrantha*) by local crop sweet potato (*Ipomoea batatas*) by means of higher growth rate and competition for soil nutrients. *BMC Ecology*, 15(1): 1–10.
- SHEN S, XU G, ROY C D, JIN G, LIU S, YANG Y, 2016. Suppression of reproductive characteristics of the invasive plant *Mikania micrantha* by sweet potato competition. *BMC Ecology*, 16(1): 1–9.
- VAN K M, WEBER E, FISCHER M, 2010. A meta-analysis of trait differences between invasive and non-invasive plant species. *Ecology Letters*, 13(2): 235–245.
- VERLINDEN M, BOECK H J D, NIJS I, 2014. Climate warming alters competition between two highly invasive alien plant species and dominant native competitors. *Weed Research*, 54(3): 234–244.
- VIVANCO J M, BAIS H P, STERMITZ F R, THELEN G C, CALLAWAY R M, 2004. Biogeographical variation in community response to root allelochemistry: novel weapons and exotic invasion. *Ecology Letters*, 7(4): 285–292.
- WAGG C, JANSÁ J, STADLER M, SCHMID B, VAN DER HEIJDEN M G A, 2011. Mycorrhizal fungal identity and diversity relaxes plant & plant competition. *Ecology*, 92(6): 1303–1313.
- WANG N, YU F, LI P, HE W, LIU F J, DONG M, 2008. Clonal integration affects growth, photosynthetic efficiency and biomass allocation, but not the competitive ability, of the alien invasive *Alternanthera philoxeroides* under severe stress. *Annals of Botany*, 101(5): 671–678.
- WANG Y Z, KAI W, DING J Q, 2010. Host specificity of *Eupops chinensis*, a potential biological control agent of *Fallopia japonica*, an invasive plant in Europe and North America. *BioControl*, 55(4): 551–559.
- WEBER E, SUN S G, LI B, 2008. Invasive alien plants in China: diversity and ecological insights. *Biological Invasions*, 10(8): 1411–1429.
- ZHANG F J, 2015. Effects of nitrogen addition on the competition between the invasive species *Flaveria bidentis* and two native species. *Russian Journal of Ecology*, 46(4): 325–331.