

火与外来植物相互关系的研究进展

简曙光 任海*

(中国科学院华南植物园, 广东 广州 510650)

摘要:入侵种对本地的生态系统和生物多样性均有不良的影响,严重的会造成物种的灭绝和生态系统的崩溃,这已在全球范围引起广泛关注。在植物外来种与火生态因子的作用研究中发现,火与外来种的关系随物种生物学特性、火作用的时间、频度、强度不同而不同,火有时会有效地抑制外来种的生长和入侵,有时会促进一些外来种的生长和入侵。反之,一些外来种会对火的产生起到积极的作用,一些外来种又会抑制火的发生。火作为控制入侵种的一种方法,经科学地运用,可对某些入侵种起到有效的控制作用。

关键词:火; 外来植物; 入侵; 控制; 综述

中图分类号:Q948.11 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3395(2004)02-0182-07

The Relationship between Fire and Invasive Plant Species

JIAN Shu-guang REN Hai*

(South China Botanical Garden, the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract: Biological invasion and its effects on ecosystem and biodiversity are very important components of the global change, and have been paid great attention worldwide. The impact of invasive plant species on natural ecosystem and biodiversity is becoming more and more serious, which even leads to irreversible species extinction and ecosystem collapse. This is a review of recent studies on the relationship between fire and invasive plant species. This subject is very complicated, which is affected by the characteristics of exotic species, the time, frequency and intensity of fire, and other factors. Sometimes, fire can suppress or inhibit the growth and establishment of exotic species, and sometimes it can facilitate spreading and invasion of exotic species by reducing interference from native species. On the other hand, biological invasions alter the structure and function of ecosystems in myriad ways, and many of the alterations influence fire regimes and post-fire response. Some invasive plants can promote the fire frequency or intensity by changing fuel and fire regimes, and some species is fire suppressor. The characteristics of exotic species and the invasion mechanisms are so diverse that no common pattern could explain all cases. So prevention and management of invasive species is a hard and complicated job, which needs research and consideration on biological features of invasive species and native species, ecosystems, and other environmental factors. As one of the management method of invasive species, fire can be used to control some invasive species effectively when managed scientifically.

Key words: Fire; Exotic plant species; Invasion; Control; Review

外来种 (exotic species 或 alien species) 是指那些借助人或作用而越过自然不可逾越的空间障碍,在新的栖息地生长繁殖并建立稳定种群的物种。外

来种中有一些种类在新栖息地发生爆发性的生长,往往失去控制,这些外来种被称为入侵种 (invasive species)。随着人类活动对自然界影响的加剧,入侵

收稿日期:2003-02-25 接受日期:2003-05-16

基金项目:国家自然科学基金(30200035);广东省自然科学基金(021627,003031);中国科学院特别支持费(STZ-01-36);华南植物研究所所长基金(2002-3293)资助

* 通讯作者 Corresponding author

种已成为全球关注的问题。尽管有一些外来种在定居地有积极的作用,但总体来说,入侵种更多的是造成负面影响^[1]。入侵种改变了原有的生物地理分布和自然生态系统的结构与功能,对环境产生了很大的影响。与人类对环境的破坏不同,入侵种对环境的破坏及对生态系统的威胁是长期的、持久的,它导致本地物种的灭绝是不可恢复的。入侵种经常造成广泛的生物污染,危及乡土群落的生物多样性并影响农业生产,造成了巨大的经济损失^[2-5]。此外,外来种入侵能通过改变侵入地的自然生态系统、降低物种多样性从而对当地社会、文化甚至人类健康产生严重的危害。全球范围内很多地方都出现了植物外来种,尤其是热带和亚热带地区,如美国夏威夷地区外来种的数量占本地物种的45%,佛罗里达地区则为40%。植物外来种由于自身特性及其它因素作用,会影响本地物种及其生态系统,严重的会造成物种的灭绝和生态系统的崩溃^[6]。此外,全球气候带的改变,必然会改变物种与资源的分布区域,CO₂浓度和氮化合物的增加、气候变暖等均可促进一些外来种的入侵^[7-9]。反过来,生物入侵在全球范围内影响了生物群落的结构与功能,继而反馈性地影响全球环境,因而全球变化对生物入侵的促进会对地球环境产生长远的影响^[10]。因此,对外来种入侵及其控制的研究已成为生态学和生物多样性保护科学的热点,也是全球变化研究的重要内容之一。

目前,对入侵种的控制主要采取机械防治、化学防治、生物防治、综合防治等方法,火作为机械防治方法的一种,经科学地运用,可对某些入侵种起到有效的控制作用。由于入侵种的自身生物学特性及其入侵机制的不同,加上火作用的时间、频度、强度、温度及其它环境因素的影响,从而使火与入侵种的关系十分复杂。国内外在火与入侵种的控制方面做了不少研究,对入侵种的控制很有帮助。本文就近年来火与植物入侵种关系的研究进展作一综述,重点阐述火在控制入侵植物中的作用。

1 火的作用

火(自然火)是地球上大部分自然生态系统的—个基本要素(或必要组分),其作为一个生态因子,在森林、草地、稀树草原、沙漠、沼泽等生态系统中起着重要的作用,既有负面影响,也有一定的有益或积极作用^[11]。由于缺少保护,或不慎重和不负责任的人类活动及自然因素等均可引起火灾,如潮湿的森林形成林窗后,阳光和干燥的风渗入树林,使

地面植被变得干燥,容易引起火灾。火灾毁灭森林,造成森林和草地退化、野生生物减少、固碳作用降低。火烧在一定程度上可提高土壤中有效氮的供应水平,同时也降低植物群落的生物多样性。在美国,导致物种受威胁的因素中,火排在第二位,仅次于生境破坏^[12,13]。但作为重要生态因子之一,某些情况下,火可作为草原或其它生态系统管理的一种手段,来调控草原或其它植物群落的结构及组成,还可用来控制外来种入侵^[14]。火可改变植物、动物、微生物的生存环境,使其组成、数量发生变化。火烧后,多数情况下土壤含水量、容重、温度、pH值、主要营养元素含量等会增加^[14]。火烧对不同生活型植物的效应不同,它可使中国典型草原建群种羊草(*Leymus chinensis*)根茎数提高100%—150%,并使当年根茎得到充分发展,增加地上部生物量,对羊草种群的生长发育有积极或促进作用。但火烧过多地伤害丛生型禾草大针茅(*Stipa grandis*)的地面更新芽,使大针茅的数量减少且干重降低,对其生长发育起明显的抑制作用^[15]。不同的植物对火有不同的忍耐力或抵抗力,有的植物种类在火烧后会加速生长和繁殖,而有的种类则会被抑制生长、繁殖,甚至死亡。此外,火作用的时间、频度、强度不同也会对入侵种产生不同的影响。

2 火与入侵植物的相互关系

人类活动造成的生物入侵和火,被认为是威胁陆地生态系统完整性和可持续性发展的主要干扰因素^[16],它们破坏了人类的生存环境,影响了人类的生活质量。

生物入侵与火是紧密联系的,环境变化可通过增加生态系统中可燃物的方式促进火的发生,反之,火又可促进外来种的入侵,因为火是造成物种灭绝和杂草入侵的一个重要因素^[17]。1982—1983年,在印度尼西亚加里曼丹地区发生的雨林大火就与一些外来杂草、藤本植物和蕨类植物入侵有关^[18]。火烧后,当地的生态系统及环境发生变化,如树冠变疏,土壤有效氮含量提高及其它一些特性(如含水量、容重等)发生变化,有利于一些外来种的入侵^[17]。

生物入侵与火的关系取决于入侵者的类型,由于外来种的自身生物学特性差异,对火有不同的忍耐力或抵抗力,加上火作用的时间、频度、强度、温度不同及其它环境因素的影响,使火与入侵种的关系十分复杂。有的物种在火烧后被彻底烧死(如雀麦 *Bromus japonicus*),有的仅地上部分被烧死(如

Triadica sebifera), 有的虽然仅部分受损, 但失去繁殖能力 (如药鼠李 *Rhamnus cathartica* 和矢车菊属的 *Centraurea solstitialis*), 有的则无明显影响 (如乳浆大戟 *Euphorbia ecula*), 还有一些种类反而会生长加速、繁殖加快 (如早雀麦 *Bromus tectorum*)^[19]。同样, 入侵种也影响火的发生, 一些外来种 (如早雀麦) 的入侵会促进火的发生, 改变火的频度及强度, 如一些入侵草种生长快、繁殖快, 可在短期内积累大量生物量, 这些生物量将成为燃料的储备, 从而促进火的发生; 也有一些种类 (如乌柏 *Sapium sebiferum* 和冰草 *Agropyron cristatum*) 则抑制火的发生。一些入侵种会改变可燃物的组成结构, 影响野火的频度和严重性, 如侵入灌丛的草可增加野火^[20], 木本植物入侵到草地或灌木丛, 可能减少野火, 也有可能增加野火, 这由落叶层的含水量决定^[6, 21]。还有一些入侵种由于自身的生物学特性, 则可能与火相互抑制。

3 火对入侵种的影响

3.1 荒漠半荒漠环境

在干旱半干旱环境, 如荒漠半荒漠地区, 火与入侵种都会对本地生态系统产生影响, 二者相辅相成, 入侵种受益于火, 又会促进火的发生。1980–1988 年, 在美国的 200 000 hm² 的国家保护区中, 由于受到 200 多次火烧的影响, 近一半的灌木群落转变成以外来杂草占优势的草本植物群落^[22]。频繁的火烧导致本地植被丧失, 影响了本地生态系统的结构和功能, 一些对火烧后环境耐受力好的外来草种定植下来, 它们又会促进下一次火的发生, 同时很多本地物种由于受火的影响而在同一生态系统中减少甚至消失。Bock 等认为火对野生生物及其生境更多的是破坏, 而正面促进作用较少^[23]。在荒漠生态系统中, 随着火发生的频度增加, 导致更多的入侵种侵入到当地植物群落, 火与入侵种的相互作用导致本地物种种类和数量减少。

火与入侵种的协同作用通常造成负面影响, 但是, 如果加以科学合理的管理, 也会成为积极的工具, 如在美洲的 Chihuahua 荒漠, 外来种腺牧豆树 (*Prosopis glandulosa*) 入侵到本地黑格兰马草 (*Bouteloua eriopoda*) 群落, 因为火烧可杀死植物地上部分, 所以通过控制放牧牲畜的数量和地点, 在生长季节人为火烧可有效控制外来腺牧豆树的入侵和恢复本地黑格兰马草群落^[13]。另外, 某些入侵种 (如乌柏) 具有抗火的材料或物质能阻止火的发生

和蔓延^[22]。但火控制入侵种的有效性通常是短暂的。

3.2 温带草原

历史上, 火是温带草原进化的主要因素之一。在温带草原, 自然起火和人为火烧常有发生, 成为草原生态系统中植物和动物群落演化的动力。多年来一直存在着对火患的偏见而绝对控制火的发生。然而自然生态系统中火不可避免, 实属正常现象之一, 但人为火患不能与之相提并论。通常, 人为有意识的火烧常用来作为土著草群落生态管理和复垦的一种手段^[24, 25]。

由于不同的物种对火有不同的适应性, 因此入侵种对火的适应性较复杂。一些入侵种对火非常不适应, 可完全被火清除; 一些入侵种对火较适应, 在特定的敏感期和高频度的火烧下, 也可能被清除; 还有一些对火非常适应的入侵种, 仅通过火烧是不能清除的。因此, 对于前两种类型的入侵种, 火可起到环境过滤器的作用, 可清除或减少入侵种, 如火烧会抑制外来种无芒雀麦 (*Bromus inermis*) 和雀麦 (*B. japonicus*) 的生长和入侵^[25]。对于第三种类型, 即耐火的入侵种, 火不但不能有效地抑制其生长, 还可以为它们入侵提供条件, 如在北美温带草原, 火促进了白花草木樨 (*Melilotus alba*) 和早雀麦的生长和入侵^[26]。Kline 将入侵种对火的反应分为 7 种类型^[26]:

(1) 有效控制 火对入侵种影响强烈, 足以阻止其达到优势地位, 如雀麦^[27], 因为这类植物从种子到定植均需要枯枝落叶层, 且火可杀死其种子和植株, 而对本地植物无明显负作用。

(2) 促进定植, 但影响入侵 即少量火可促进生长和定植, 但频繁火烧却抑制其生长, 阻止入侵, 如矢车菊属的 *Centraurea solstitialis*^[28]。多数自然火不能完全控制这类植物, 有时火烧能促进种子萌发, 但可杀死已定植的植株, 在种子散布前的火烧可耗尽有些入侵种的种子库, 从而清除入侵种。

(3) 由于竞争而部分抑制 入侵种有一定的耐火性, 但由于竞争不过同群落中其它植物而不能持续定居, 如飞廉 (*Carduus nutans*)^[29], 适度火烧也可有效控制。

(4) 受火与竞争的双重抑制 当无抑制其生长的本地种存在时, 火很难或不能抑制其生长或使其种群减小, 但当抑制其生长的本地种存在时, 火烧可有效控制, 这种情况很常见, 如无芒雀麦 (*Bromus inermis*)^[30]。

(5) 一旦定居,就相对不受竞争的影响 如乳浆大戟^[19]。此类入侵种常很难用化学防治或生物防治来控制,单独用火烧或土著种很难阻止它定植和入侵,有效控制的方法就是在它定居的早期竞争能力弱时采取人工防治或其它防治措施。

(6) 火促进入侵 特别是当火仅对土著种有影响,而不影响入侵种时,有些入侵种又可改变燃料结构促进火的发生和增加火的强度,如早雀麦^[19]。这时就不能用火烧的方法来控制入侵。

(7) 入侵种抑制火的发生 因为入侵种本身含水量高,持续产生的枯枝落叶层较少,这样可减少火的发生频率及降低火的强度,如乌桕、冰草和散矢车菊 (*Centraurea diffusa*) 等,这类植物其自身不着火,而且可抑制其它着火植物的生长^[19]。

当然,还有一些入侵种可能不完全适合以上某种类型,而且,火只是影响入侵种定居和传播的因素之一,其它如放牧、水淹、干旱和动物对土壤的作用等也可影响植物的入侵。火对不同的入侵种所起的作用也因物种的生物学特性、火烧的时间及其它因素的不同而异。

3.3 地中海性气候环境

在地中海性气候环境地带,火在生产力较低的灌丛群落被外来草本植物入侵的过程中起着重要作用,因为草本植物,尤其是一年生草本植物比木本植物更能增加火发生的频度,而外来一年生草本比土著草种更能适应高强度的火干扰^[31]。当灌木丛群落转变成灌木丛和草本植物混生群落,再转变成草本植物群落后,由于可燃物结构的改变,火的强度和温度会逐渐降低。一年生草本植物可增加火发生的频度,从而抑制灌木植物的定植;而由于草本植物数量的增加,火的强度下降,又增加了入侵种繁殖体的存活率,从而促进外来种的入侵。持续的火烧会导致灌木群落向草本群落的完全转变,即被外来草本植物成功入侵并替代^[32]。在森林群落中也有类似情况,如火有利于外来种早雀麦的入侵^[33]。

另一方面,火也可在本气候带群落恢复和外来种控制中起着积极的作用,如在草地群落,季节性火烧可促进草地群落由入侵种占优势恢复为由土著种占优势,但火烧季节十分关键;如春季火烧比秋季火烧能更好地提高本地草本植物的盖度和丰富度,而且在下一年通过火烧控制外来种 *Centaurea solstitialis* 中起着积极的作用^[34]。在森林群落,火对森林植被的恢复过程具有两面性,火一方面可促进

森林植被的恢复,抑制一些外来种的生长和定植,低强度的火可减少外来种入侵的潜力;另一方面火也可抑制一些本地种幼苗的生长,又可促进外来种的生长和定植^[33,35]。

3.4 温带和极地针叶林

近一个世纪来,在温带和极地针叶林生态系统中的入侵种受到土地管理者广泛关注,火与森林砍伐、放牧、采矿、休闲和农业等因素一起,不仅加剧了外来种的定居和传播,同时也受到外来种的影响。在森林生态系统中,排斥火一方面使枯枝落叶等可燃物越积越多,有可能导致灾难性的野火,从而为一些外来种入侵提供条件,另一方面还可能改变生态系统的功能。但是,清除枯枝落叶和人为火烧也可以促进其它一些入侵种的定居和传播^[36,37]。因此,如何科学地控制和使用火,在生态系统恢复过程中就显得非常重要。

在温带和极地针叶林,火与其它方式的干扰常可促进外来种的入侵^[38],人为火烧和其它一些复垦工作又有助于阻止入侵种的定居。Convington 认为在干旱的森林中,间伐和火烧可增加土著植物群落的生物多样性和生产力,还将使它对入侵种有更好的抵抗力^[39]。植物在长期的进化中形成了一些生物学特性(或生活史特性),使它们能在频繁火烧环境中存活^[39]。另外,森林防火措施在西方已有近一个世纪的历史^[40],但是为建森林防火带而进行的干扰活动及人为火烧都可能为入侵种提供更合适的生境,从而使它先于土著种定居。

入侵种不仅受火的影响,反过来入侵种也会影响火^[39]。入侵种对火的影响也很复杂,一些入侵种(如早雀麦)可增加火发生的频率,在开阔的松树林和附近的空旷地,它可使火发生间隔缩短到每5年一次或更短时间,从而增加火发生的频率^[41],以它占优势的生态系统及与其相连的茂密森林可能发生更频繁和强烈的野火。画眉草属的 *Eragrostis lehmanniana* 也有类似特性^[42]。而其它一些入侵种如散矢车菊,却可减少火发生的频率。由于散矢车菊可分泌化学他感物质抑制其它植物的生长,它存在的群落周围很少有其它植物生长,植被稀疏,因此使发生火的可能性大大减小^[43]。

3.5 温带落叶林

在温带落叶林中,人为火烧常会造成负作用,因为火烧常发生在入侵植物的休眠季节,虽然植物

树冠层将短期减少,但会使入侵种的枝条快速增长,有利于入侵。而一些灌木植物的入侵会改变火发生的机制(可燃物组成),如减少草本可燃物的量,增加木本植物可燃物的量,从而增加潜在的火强度,使其生态系统功能退化。如果用机械法(人为砍除)或化学法(用除草剂)杀死外来入侵植物,又将会产生大量的可燃物,从而增加发生火的潜在性和提高火的强度。因此,对于这种情况最好寻求生物控制或其它控制方法^[44]。

3.6 热带亚热带环境

3.6.1 森林植被

在热带亚热带森林,物种多样性丰富,但火与入侵种同样不可避免。火是造成热带亚热带环境中物种灭绝和杂草入侵的重要因素^[17]。由于全球环境变化,大气中 CO₂ 含量升高,也可促进生物入侵和火的发生,这可通过以下 3 个假设来说明^[17]:

(1) 大气中 CO₂ 含量升高,植物新陈代谢加强,促进植物叶组织及整株植物的生长,这相当于增加了树冠的生物量和枯枝落叶的积累量,从而促进火的发生。

(2) 大气中 CO₂ 含量升高,特别有利于藤本植物的生长(由于缺少枝叶,营养更易集中)和入侵,而藤本植物在森林里起着连接地表和树冠的导火索的作用,从而导致高强度火的发生^[19]。

(3) 大气中 CO₂ 含量升高,可弥补水分减少或土壤干旱对植物生长造成的损失,促进草本植物的生活型的转变(C₃→C₄)。在热带地区,以 C₄ 植物占优势,而它们的水利用效率会随着 CO₂ 含量升高而提高,这样将可以部分地解释森林火烧后 C₄ 植物的爆发^[10,45]。

在本地区,外来草种入侵到土著木本植物群落,增加了很好的生物燃料。一旦发生火烧,树冠层变疏,利于杂草的入侵,产生“草-火-草”循环,进而导致生物多样性减少。

3.6.2 草灌植被

在热带亚热带地区,草本及灌木植被也常受入侵种和火的影响。在美国西部 11 个州(除阿拉斯加州外),有大面积的杂草地,很多入侵草种在火烧后快速产生种子,使入侵杂草在与土著种的竞争中占优势。火一般是有益的,但杂草是无益的,火的负作用是短期的,而杂草的负作用是长期的,甚至是永久的。

木本植物白千层属的 *Melaleuca quinquenervia*

是南佛罗里达州的草地、灌木丛和草本沼泽的入侵树种,它适应火的特性包括:树皮厚、可进行无性繁殖(嫩枝发芽)和具有耐火的种子外壳等,火可以通过引发其种子散发而促进它的传播(或蔓延),人为火烧仅能杀死大多数株高低于 50 cm 的幼苗,短时间内再次火烧可杀死大部分头一次火烧后重新长出的幼苗,但不能抑制其种子散布。因此,通常火烧很难控制该物种入侵,但排除火也不是一个长久之计。实验结果表明,虽然火烧不能彻底杀死幼苗及成熟植株,但通过用除草剂破坏种子和幼苗的传播后,再用火烧可比较有效地控制该入侵种^[46]。

在热带亚热带地区,入侵植物通过多种方式改变生态系统的结构和功能,对于不同生活型的植物,对火的发生及火烧后的反应会不同。如外来木本植物入侵到草本群落将根本改变火的特性,相对频繁、低强度的火被不频繁、高强度的火所替代,或者不发生火;外来草本入侵到草原或草地将以轻微的方式改变火发生的机制,如增加燃料,改变火发生或蔓延的季节;外来木本植物入侵到本地木本植物群落也有类似结果。外来草本入侵到木本植物群落,将增加草本植物生物量,使可燃物增加,从而增加火发生的频率^[17,46]。

4 展望

综上所述,火与入侵种的关系与物种的生物学特性及火作用的时间、频度、强度、温度及其它环境因素有关,火对入侵种的作用可归纳为:

1) 促进入侵 如一些耐火的入侵种,其自身的一些生物学特性使其适合于在火烧后环境中生长和传播,对此类入侵种的控制,采用火烧是不可取的,应尽量避免火的发生,寻求化学、生物等其它防治方法。

2) 一定程度抑制入侵 如一些种在特定时期(如苗期、花期、种子成熟期或其它生长发育期)对火敏感,此时用适度的火烧或者再结合其它控制方法可有效地控制入侵种定植,另外,火的频率、强度也需要科学控制,因为不同的入侵种对火的耐性不同,有时需要高频度、高强度的火才能杀死入侵种及其繁殖体,从而达到有效控制的目的。

3) 极有效地抑制入侵 如一些不耐火的入侵种,不具备适应火烧后环境的特性,人为火烧将是一个非常有效的控制方法。

当然,由于火烧也会对土著植物及其生态系统

产生影响,对于耐火的土著种群,火烧可适度地使用;但对于不耐火或对火烧敏感的土著种,又不适应火烧后生境,火烧甚至可能导致物种灭绝,应尽量避免火烧,只能寻求其它的控制方法。

由于外来种的入侵常要经过引入(import)、逃逸(escape)、种群建立(establish)和危害(pest)等几个阶段,通常当外来种在入侵地能够繁殖传播时,才能造成危害。因此尽量在外来种能够繁殖之前或在外来种的滞后期和其达到关键面积之前进行控制。因此说,控制入侵种重在防治,对火的应用应从阻止或防止入侵种定居和繁殖考虑,以对生态系统不造成损害。在用火来控制外来种之前,应该对外来种的生物学特性(如生长发育、繁殖等)、耐火性、对环境的适应性、原栖息地的生态情况及与其它生物的关系等进行分析,再确定是否采用火烧处理。对于适合火烧处理的,应进一步确定火烧的时间、地点(区域)、频度、强度和方式等,从而最有效地控制入侵种和尽量减少对本地物种及生态系统的危害。对于不适合火烧处理的,应在其能够繁殖之前及时采取其它控制方法进行防治。

目前,火对很多入侵种的作用还知之甚少,可以在物种水平和景观水平进行相关的研究。在物种水平上,主要是对入侵种生物学特性,如耐火性、种子萌发、生长发育、对环境的适应性等,以及原栖息地的生态情况及与其它生物的关系等进行研究。景观水平上,则主要是研究入侵种对火的影响及二者对生态系统和环境的影响。

消灭和控制外来种是一项长期而艰巨的工作,要建立一个长期的预警系统,进行长期的追踪监控,还要有相关研究的指导和政策的有力控制。

参考文献

- [1] Din J Q (丁建清), Xie Y (解焱). Invasive strategy and control of alien species in China [A]. In: Wan S (汪松), Xie B D (谢彼德), Xie Y (解焱). Conservation of Biodiversity in China [M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1996. 107-128. (in Chinese)
- [2] Nichols F J, Thompson J K, Schemel L E. Remarkable invasion of San Francisco Bay (California, USA) by the Asian clam *Potamocorbula amurensis*. 2. Displacement of a former community [J]. Marine Ecol (Progress Series), 1990, 66:95-101.
- [3] Levine J M. Species diversity and biological invasions: relating local process to community pattern [J]. Science, 2000, 288: 852-854.
- [4] Curnutt J L. Host-area specific climatic-matching: similarity breeds exotics [J]. Biol Conserv, 2000, 94: 341-351.
- [5] Xu C Y (徐承远), Zhang W J (张文驹), Lu B R (卢宝荣), et al. Progress in studies on mechanisms of biological invasion [J]. Biodiv Sci (生物多样性), 2001, 9: 430-438. (in Chinese)
- [6] Ren H (任海), Peng S L (彭少麟). Introduction to Restoration Ecology [M]. Beijing: Science Press, 2001. 86-99. (in Chinese)
- [7] Vasseur L, Potvin C. Natural pasture community response to enriched carbon dioxide atmosphere [J]. Plant Ecol, 1998, 135: 31-41
- [8] Maron J L, Connors P G. A native nitrogen-fixing shrub facilitates weed invasion [J]. Oecologia, 1996, 105: 302-312.
- [9] Smith S D, Huxman T E, Zitzer S F, et al. Elevated CO₂ increase productivity and invasive species success in arid ecosystem [J]. Nature, 2000, 408: 79-82.
- [10] Dukes J A, Mooney H A. Does global change increase the success of biological invaders? [J] Trends Ecol Evol, 1999, 14(4): 135-139.
- [11] McPherson G R. Invasive plants and fire: integrating science and management [A]. In: Proceedings of the Invasive Species Workshop: The Role of Fire in the Control and Spread of Invasive Species. Vol.11 [C]. Lawrence: Tall Timbers Research, Allen Press, Inc, 2001. 141-147.
- [12] Miller R F, Tausch R J. The role of fire in juniper and pinyon woodlands: a descriptive analysis [A]. In: Proceedings of the Invasive Species Workshop: The Role of Fire in the Control and Spread of Invasive Species. Vol.11 [C]. Lawrence: Tall Timbers Research, Allen Press, Inc, 2001. 15-30.
- [13] Drewa P B, Peters D P C, Harstad K M. Fire, grazing, and honey mesquite invasion in black grama-dominated grasslands of the Chihuahua Desert: a synthesis [A]. In: Proceedings of the Invasive Species Workshop: The Role of Fire in the Control and Spread of Invasive Species. Vol.11 [C]. Lawrence: Tall Timbers Research, Allen Press, Inc, 2001. 31-40.
- [14] Yang Y X (杨永兴), Yang Y J (杨玉娟), Pang Z P (庞志平), et al. Forest fire ecological effect on forest mire ecosystem in the Daxinganling mountains [J]. Oceanol Limnol Sin (海洋与湖泊), 1995, 26: 610-617. (in Chinese)
- [15] Bao Y J (鲍雅静), Li Z H (李政海), Liu Z L (刘钟龄). The study on the effects of fire on species diversity of *Leymus chinensis* community [J]. Acta Sci Natl Univ NeiMongol (内蒙古大学学报), 1997, 4:516-520. (in Chinese)
- [16] Bao Y J (鲍雅静), Nin Z (宁柱), Li Z H (李政海), et al. Influence of fire factor on *Stipa gaudis* population [J]. Grassland China (中国草地), 2001, 23:17-22. (in Chinese)
- [17] Mueller-Dombois D. Biological invasion and fire in tropical biomes [A]. In: Proceedings of the Invasive Species Workshop: The Role of Fire in the Control and Spread of Invasive Species. Vol.11 [C]. Lawrence: Tall Timbers Research, Allen Press, Inc, 2001. 112-121.
- [18] Wirawan N. The hazard of fire [A]. In: Brookfield H, Byron Y. South-East Asia's Environmental Future: the Search for Sustainability [M]. Singapore: United Nations University Press, New York: Oxford University Press, 1993. 242-260.
- [19] Grace J B. The role of community biomass and species pools in the regulation of plant diversity [J]. Oikos, 2001, 92: 191-207.
- [20] D' Antonio C M, Vitousek P M. Biological invasions by exotic grasses, the grass/fire cycle, and global change [J]. Ann Rev Ecol

- System, 1992, 23: 63–87.
- [21] Walker L R, Smith S M. Impacts of invasive plants on community and ecosystem properties [A]. In: Luken J Q, Thierit J W. Assessment and Management of Plant Invasion [M]. New York: Springer-Verlag, 1997. 59–85.
- [22] Brooks M L, Pake D A. Invasive plants and fire in the deserts of North American [A]. In: Proceedings of the Invasive Species Workshop: The Role of Fire in the Control and Spread of Invasive Species. Vol.11 [C]. Lawrence: Tall Timbers Research, Allen Press, Inc, 2001. 1–14.
- [23] Bock C E, Bock J H. Effects of fire on wildlife in southwestern lowland habitats [A]. In: Krammes J S. Proceedings of the Symposium on Effects of Fire Management of Southwestern Natural Resources [C]. General Technical Report RM-191, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Fort Collins, CO, 1990. 50–64.
- [24] Liu Y J (刘永江), Liu X M (刘新民), Wu N (乌宁), et al. The study of relationship between fire and soil animals [J]. J Arid Land Res Envir (干旱区资源与环境), 1996, 10: 67–73. (in Chinese)
- [25] James B G, Melinda D S, Susan L G, et al. Interactions between fire and invasive plants in temperate grasslands of North American [A]. In: Proceedings of the Invasive Species Workshop: The Role of Fire in the Control and Spread of Invasive Species. Vol.11 [C]. Lawrence: Tall Timbers Research, Allen Press, Inc, 2001. 40–66
- [26] Kline V M. Response of sweet clover (*Melilotus alba* Desr.) and associated prairie vegetation to seven experimental burning and mowing treatments [A]. In: Proceedings of the Ninth North American Prairie Conference. Vol.9 [C], Fargo: North Dakota State University, ND, 1986. 149–152.
- [27] Whisenant S G. Postfire population dynamics of *Bromus japonicus* [J]. Amer Midland Natl, 1990, 123: 301–308.
- [28] Hastings M S, DiTomaso J M. Fire controls yellow star thistle in California grasslands [J]. Restor Manag Notes, 1996, 14: 124–128.
- [29] Hulburt L C. Fire effects on tallgrass prairie [A]. In: Proceedings of North American Prairie Conference. Vol.9 [C]. Minnesota: Tri-college University Centre for Environmental Studies, 1986. 138–142.
- [30] Willson G D, Stubbendieck J. A provisional model for smooth brome management in degraded tallgrass prairie [J]. Ecol Restor, 2000, 18: 34–38.
- [31] Sampson A W. Plant Succession and Burned Chaparral Lands in Northern California [M]. Bulletin 685, Agricultural Experiment Station, University of California, Berkeley, 1944.
- [32] Minnich R A, Dezzani R J. Historical decline of coastal sage scrub in the Riverside-Perris Plain. Vol.29 [M]. California: Western Birds, 1998. 366–391.
- [33] Keeley J E. Fire and invasive species in Mediterranean-climate ecosystems of California [A]. In: Proceedings of the Invasive Species Workshop: The Role of Fire in the Control and Spread of Invasive Species. Vol.11 [C]. Lawrence: Tall Timbers Research, Allen Press, Inc, 2001. 81–94.
- [34] DiTomaso J M, Kyser G B, Hastings M S. Prescribed burning for control of yellow starthistle (*Centaurea solstitialis*) and enhanced native plant diversity [J]. Weed Sci, 1999, 47: 233–242.
- [35] Turner M G, Romme W H, Gardner R H, et al. Effects of fire size and pattern on early succession in Yellowstone National Park [J]. Ecol Monog, 1997, 67:411–433.
- [36] Harrod R J, Reichard S. Fire and invasive species within the temperate and boreal coniferous forests of western North America [A]. In: Proceedings of the Invasive Species Workshop: The Role of Fire in the Control and Spread of Invasive Species. Vol.11 [C]. Lawrence: Tall Timbers Research, Allen Press, Inc, 2001. 95–101.
- [37] Asher J A, Dewey S, Johnson C, et al. Reducing the spread of invasive exotic plants following fire in western forests, deserts, and grasslands [A]. In: Proceedings of the Invasive Species Workshop: The Role of Fire in the Control and Spread of Invasive Species. Vol.11 [C]. Lawrence: Tall Timbers Research, Allen Press, Inc, 2001. 102–103.
- [38] Hobbs R J, Huenneke L. Disturbance, diversity and invasion: implications for conservation [J]. Conserv Biol, 1992, 6: 324–337.
- [39] Covington W W, Fule P Z, Moore M M, et al. Restoring ecosystem health in ponderosa pine forests of the Southwest [J]. J For, 1997, 95: 23–29.
- [40] Pyne S J, Andrews P L, Laven R D. Introduction to Wildland Fire [M]. Second edition, New York: John Wiley & Sons, 1996. 769.
- [41] Anable M E, Mcclaran M P, Ruyle G B. Spread of introduced Lehmann lovegrass *Eragrostis lehmanniana* Nees. in Southern Arizona, USA [J]. Biol Conserv, 1992, 61: 181–188.
- [42] Billings W D. Ecological impacts of cheatgrass and resultant fire on ecosystems in the Western Great Basin [A]. In: Monsen S B, Kitchen S G. Proceedings-ecology and Management of Annual Rangelands [C]. General Technical Report INT-GTR-313, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station, Ogden, UT, 1994. 12–30.
- [43] Muir A S, Majak W. Allelopathic potential of diffuse knapweed (*Centaurea diffusa*) extracts [J]. Can J Plant Sci, 1983, 63: 989–996.
- [44] Richburg J A, Dibble A C, Patterson W A. Woody invasive species and their role in altering fire regimes of the Northeast and Mid-Atlantic states [A]. In: Proceedings of the Invasive Species Workshop: The Role of Fire in the Control and Spread of Invasive Species. Vol.11 [C]. Lawrence: Tall Timbers Research, Allen Press, Inc, 2001. 104–111.
- [45] Jackson R B, Sala O E, Field C B, et al. CO₂ alters water use, carbon gain, and yield for dominant species in a natural grassland [J]. Oecologia, 1994, 98: 257–262.
- [46] Myers R L, Belles H A, Snyder J R. Prescribed fire in the management of *Melaleuca quinquenervia* in subtropical Florida [A]. In: Proceedings of the Invasive Species Workshop: The Role of Fire in the Control and Spread of Invasive Species. Vol.11 [C]. Lawrence: Tall Timbers Research, Allen Press, Inc, 2001. 132–140.