

土壤种子库研究的热点问题及发展趋向^①

白文娟, 章家恩*, 全国明

(华南农业大学农业部生态农业重点开放实验室, 广东省高等学校农业生态与农村环境重点实验室, 广州 510642)

摘要: 土壤种子库是指存在于土壤上层凋落物和土壤中全部存活种子的总和。土壤种子库是种群定居、生存、繁衍和扩散的基础, 也是植被潜在更新能力的重要组成部分, 在植被的更新、演替和恢复过程中起着重要的作用。本文总结提出了土壤种子库研究的几个热点问题以及发展趋向, 包括土壤种子库的研究方法, 入侵植物的土壤种子库, 种子雨、种子库与地上植被的关系, 种子库在退化生态系统植被恢复和生物多样性保护中的作用, 土壤侵蚀对土壤种子库的影响, 全球变化对土壤种子库的影响。同时对这些领域的研究进展进行了综述, 旨在为进一步推动今后土壤种子库的研究工作提供参考。

关键词: 土壤种子库; 生态恢复; 生物入侵; 土壤侵蚀; 全球变化

中图分类号: Q948.1

土壤种子库是指存在于土壤上层凋落物和土壤中全部存活种子的总和^[1]。土壤种子库内所含的种子是特定生态系统的潜在种群, 是种群定居、生存、繁衍和扩散的基础^[2]。同时, 土壤种子库也是植被潜在更新能力的重要组成部分, 是植被动态的重要制约因素, 影响着生态系统的抗干扰能力和恢复能力^[3], 在植被的更新、演替和恢复过程中起着重要的作用。因此, 土壤种子库一直都是种群生态学和恢复生态学研究热点问题之一。目前土壤种子库的研究主要集中在土壤种子库的种类组成、密度大小、时空分布格局、动态、与地上植被的关系、影响因素以及作用功能等方面。但还需要在以下热点问题方面继续从深度和广度上进行研究, 并加强土壤种子库研究与其他研究领域的结合, 以进一步推动未来的土壤种子库研究工作。

1 土壤种子库的研究方法

土壤种子库的研究方法主要包括取样方法的选择、取样量的大小、取样时间和种类鉴定等方面。土壤种子库的研究方法是进行土壤种子库研究的基础和关键。国内现有文献中通过实验来探讨种子库研究方法的论文比较少^[4-5]。由于不同群落的土壤种子库内的种子具有多种生活型, 且不同物种的种子个体大小、密度、在土壤中的水平和垂直分布特征、以及萌发特

性等差异显著^[6], 所以不同研究者选用的取样时间和取样面积都不尽相同。取样时间和取样量的大小会直接影响到检测出的物种数量和种类。取样面积与物种数量之间有着密切的相关关系。目前, 很少有研究者考虑取样面积和取样时间等是否适合所研究的植被类型或生态系统。沈有信等^[4]对滇中喀斯特森林土壤种子库的研究表明, 总物种数的增加在面积位于 $0.15 \sim 0.2 \text{ m}^2$ ($15 \sim 20$ 个 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 土样) 时逐渐趋缓, 这一取样面积可作为同类地区种子库取样的参考。但种类鉴定的方法基本相同, 国内大约 80% 的研究均采用直接萌发法, 且很少在萌发前对土样进行水洗处理。但是, 国外很多研究在种子萌发试验以前, 都要进行浓缩处理以增加种子萌发数量并缩短萌发时间, 但筛洗方法有所不同^[7-11]。沈有信等^[5]对滇中岩溶山地多种样地的土壤种子库样品进行经水洗处理和不经水洗处理的对比研究, 发现水洗的方法能降低土壤的体积和萌发厚度, 增加多数物种的萌发, 是一种值得推荐并适用于大规模土壤种子库研究的方法。另外, 种子萌发法也有一定的缺点, 如同一萌发条件可能无法满足所有种子萌发所需要的条件, 因而可能会导致种子库物种组成和数量的偏差。为此国内有的研究者也提出了将物理法和种子萌发法结合起来进行种类鉴定, 但是目前种子萌发法仍是国内外应用最广的方法,

①基金项目: 国家自然科学基金项目 (40871118), 教育部博士点基金项目 (200805640012), 广东省自然科学基金项目 (8151064201000048、9451064201003801) 和广州市属高校科技计划项目 (08C008) 资助。

* 通讯作者 (jeanzh@scau.edu.cn)

作者简介: 白文娟 (1979—), 女, 山西榆次人, 博士后, 主要从事土壤生态学与农业生态学等方面的研究。E-mail: wenjuanlucky@yahoo.com.cn

它在物种检测的精度和准确度方面仍然具有其他方法不可比拟的优越性。

国外对土壤种子库研究方法的探讨较多。关于土壤种子库取样量的大小,不同的学者通过种-面积曲线得出单个物种和不同的生态系统取样量有较大的差异。Benoit 等^[12]在加拿大安大略省对于 *Chenopodium* spp. 土壤种子库的研究表明,60 个样本单元(直径为 1.9 cm 的土钻)可以量化其种子库特征。Gross^[13]在美国密西根西南部农地通过种-面积曲线得出,15 ~ 20 个取样点检测出的物种数量可以充分代表研究区种子库的特征。Forcella^[14]的研究认为澳大利亚草场种子库取样量的参数值为 1 000 cm²。Hayashi 和 Numata^[15]的研究认为日本草地和森林土壤种子库的取样量大小分别为 500 ~ 600 cm³ 和 4 000 ~ 6 000 cm³。Numata 等^[16]的研究得出日本草地演替前期的土壤种子库取样量大小为 400 cm³。可见,不同研究对象的土壤种子库适宜的取样面积均不同,所以在进行种子库研究前,需要建立其种-面积关系,以找到合适的取样面积,进而节省工作量且保证土壤种子库研究的准确性。

2 入侵植物的土壤种子库研究

随着经济全球化进程的加快,生物入侵已成为全球性的社会经济和环境问题。外来种入侵是除生境丧失外,威胁全球生物多样性的最重要因素之一,并导致两种值得关注的全球效应,即降低动植物区系的独特性和打破维持全球生物多样性的地理隔离^[17-18]。外来种对野生生物资源库产生了强烈的影响,并一直被认为是制定物种保护策略时应考虑的核心问题^[19]。因此,科学地管理外来入侵物种十分必要,而探究外来种成功入侵的机制是制定有效管理策略的前提。目前入侵植物成功入侵的机制研究主要从生物生态学特征、表型可塑性、遗传分化、天敌逃逸和化感作用等方面展开,且大多数集中在入侵植物地上部的入侵机制方面。而关于入侵植物地下部入侵竞争机制,特别是有关其土壤种子库特征的研究目前还较少。土壤种子库是植物潜在的种群,其时空分布格局对植物群落的动态与稳定性有着举足轻重的影响,尤其是在受外来物种入侵危害地区,土壤种子库结构的变化决定着入侵种未来的危害程度,而且对当地生态系统的演替和植物群落的结构、功能、组成与动态等的干扰影响更为重要^[20]。许多植物都具有持久性土壤种子库,这使其具有在承受了空间或时间上不可预测的干扰植被中发挥繁殖能力的潜势^[21],即使植物在某个年份因不

良环境条件而导致植物的种子产量大幅度下降或无种子生产时,植物种群也能利用持久性种子库中的种子繁殖后代,以避免灭绝的危险^[22]。入侵植物持久土壤种子库的存在使得入侵植物很难在短期内被消除,即使短时间被消除,一旦条件适宜,土壤种子库中的种子又会很快建立新的种群。所以,为有效地控制入侵植物,需揭示其土壤种子库特征,以便为制订其防治措施提供理论基础。另外,人类干扰也是入侵植物难以根除的原因之一。人类干扰使更多的入侵植物种子进入到土壤深层,形成持久种子库,使其入侵有了种源补充的保障,大大增加了其防治的难度。因此,在入侵植物的防治中还必须减少人类活动干扰,并保护原有生境,以达到长期有效治理外来入侵种的目的。目前,国内关于入侵植物的土壤种子库研究主要集中在紫茎泽兰^[4,20,23-24]、薇甘菊^[25]、裂叶月见草^[26]和阔叶丰花草^[27]这 4 种植物,其中对紫茎泽兰的研究相对较多。

3 种子雨、种子库与地上植被的关系研究

种子雨是指在特定的时间和空间从母株上散落的种子量^[28],是植物生命史动态过程中一个必不可少的环节,其研究对更好地了解种群和群落动态等具有重要意义,且可以预测土壤种子库的物种组成和大小以及植被演替的趋势。种子雨和种子库是密不可分的,具有一定的相似性,种子雨是种子库的主要来源,研究种子雨时一般都要与土壤种子库研究相结合^[29]。

种子雨和地上植被的物种组成具有较高的相似性^[30-31],因为地上植被是种子雨的潜在提供者^[27],而且也与地上植被大部分物种的种子扩散距离较小有关。

地上植被和土壤种子库有着密切的关系,一方面,地上植被的种子雨是土壤种子库的直接来源,地上植物种子的产量直接影响着土壤种子库的数量动态;另一方面,土壤种子库的种子通过参与群落的自然更新,又影响着地上植物群落结构与组成及物种多样性的维持^[32]。只有把地上植被与土壤种子库这两个过程有机联系起来进行耦合研究,才能更深刻和更全面地阐明植被退化过程及其受损机理,并为植被恢复重建寻求有效的技术途径^[33]。Whipple^[34]将一个植物群落地面现有种与土壤种子库的种类组成之间的关系划分为 4 种类型:第 1 种类型是地下种子和地面植株都存在;第 2 种类型是地下种子存在,但地面植株不存在;第 3 种类型是地面植株存在,但地下种子不存在;第 4 种类型是地下种子与地面植株均不存在。于顺利和蒋高

明^[35]认为土壤种子库和地上植被的关系大致有不相似性和相似性两种情况。这主要与群落类型有关,演替阶段和环境因子(如干燥度等)也影响二者的关系。有关土壤种子库和地上植被的关系争论较多,目前为止尚未得出统一的结论。有研究表明二者的相似性较低^[31,36-41]。而有研究表明二者的相似性较高,如李宁等^[42]在塔克拉玛干沙漠的研究表明土壤种子库和地上植被的相似性系数为 0.778;詹学明等^[43]的研究表明,围封与放牧条件下克氏针茅草原土壤种子库与地上植被的相似性较高,分别为 0.71 和 0.61;赵丽娅等^[44]在科尔沁沙地的研究得出,地上植被与土壤种子库群落组成上的相似性程度比较高,相似性系数平均为 0.63。这些研究结果的差异主要与群落类型有关。另外,有研究表明土壤种子库和地上植被的相似性在演替早期较高,随着演替的进行而降低^[41,45-46]。这可能是因为随着演替的进程,外来种子的比例逐渐增加的缘故。

4 种子库在退化生态系统植被恢复和生物多样性保护中的作用研究

土壤种子库是植被潜在更新能力的重要组成部分,可以为群落的演替、更新以及退化生态系统的恢复提供稳定的繁殖体^[37]。如果退化生态系统拥有丰富的种子库资源,在植被恢复过程中就会成为重要的种子来源^[47]。因此,研究退化生态系统种子库对于其植被恢复和管理具有非常重要的意义。

目前,关于土壤种子库在退化生态系统中的作用的研究较多,但结论不尽相同。Liu 等^[48]在内蒙古浑善达克沙地的研究表明,退化草地土壤种子库中含有大量的种子,可以实现自然恢复,没有必要引种。王增如等^[49]对塔里木河下游典型漫溢区土壤种子库的研究认为,塔里木河下游土壤种子库物种组成相对丰富,种子库密度较高,土壤种子库对受损植被恢复具有很大潜力。Benigno 等^[50]在尼加拉瓜退耕农田、Wang 等^[51]在广东鹤山南亚热带森林生态系统、白文娟等^[52]在黄土丘陵沟壑区退耕地、Kebrom 和 Tesfaye^[37]在埃塞俄比亚南沃洛地区退化山坡的研究均认为,由于土壤种子库密度总体上较低或者目标种密度较低,有必要人工引进一些目标种,以加快植被恢复进程。Bossuyt 等^[53]综述了 1990—2006 年关于欧洲植物群落(包括森林、湿地、草地和石楠地)土壤种子库的研究发现,土壤种子库中目标种缺失,主要以演替前期物种为主,说明仅仅依靠土壤种子库来实现目标植物群落的恢复是不可行的。Ma 等^[41]在青藏高原亚高山草甸的研究

表明,土壤种子库在退化生态系统植被演替前期起着重要的作用,但是在演替的后期贡献较小。演替后期物种更新主要依赖营养繁殖和扩散。由此可见,土壤种子库在不同生境植被恢复中的潜力是不同的,其潜力受到多种因素的影响,如土壤种子库特征(物种组成、密度、物种多样性、种子特性等)、立地条件、外部干扰等,且这些因素间相互制约。对于自然恢复来说,即使微气候非常适宜,但如果缺乏种源的话,也很难进行植被恢复^[54]。而在立地条件差、外部干扰严重的地方,其不利于种子萌发和幼苗建植,即使有丰富的种源,也很难进行自然恢复^[55]。因此,在退化生态系统植被恢复过程中,应结合各生境特征而采取相应的措施。

随着人口、经济、技术和社会压力的增加以及人类对土地资源的不合理利用,生态系统出现了不同程度的退化,生物多样性急剧丧失。近年来,很多学者都强调土壤种子库在生物多样性保护中的作用^[56-59],尤其是濒危物种的保护^[60-61]。因为有些物种的种子在土壤中可休眠很多年,受外界干扰较小,所以比地表植被具有较强的忍耐胁迫的能力。另外,种子库可能累积更多的在不同选择压力下产生的基因,所以在濒危物种的保护中具有非常重要的作用。

5 土壤侵蚀对土壤种子库的影响研究

土壤侵蚀给土壤生产力、粮食安全、生态环境、人居环境和社会经济发展等带来严重影响^[62],全球(除永冻地区外)均存在不同程度的土壤侵蚀,已成为当今世界资源和环境问题的重点^[63]。植被对降雨和径流侵蚀能量具有很大的减弱或消除作用,可以改变植株底部的土壤性质,改善其结构,进而降低土壤可蚀性,增加入渗能力,从而减轻土壤侵蚀程度^[64]。植被恢复已成为防治土壤侵蚀最有效的措施之一。土壤种子库作为植被潜在更新能力的重要组成部分,在植被自然恢复过程中起着重要的作用。它是植被重建与恢复的重要种源和模板,在很大程度上决定了植被恢复的进度和方向^[65-67]。因此,在土壤侵蚀严重的地区开展土壤种子库特征以及与植被恢复演替之间的相互作用机制研究,可为控制土壤侵蚀和土壤生态恢复提供理论依据和实践指导。

土壤侵蚀影响植被的恢复演替过程,这种影响始于种子的形成发育,且贯穿于植物的整个生长发育过程,干扰着种子数量、活性、萌发、再分布、定植、群落结构及植被的空间格局^[68-69]。土壤侵蚀可减少土

壤对种子的保持力,造成种子的流失,使土壤种子库密度减少^[70]。土壤侵蚀降低了土壤的持水能力和养分积累,进而影响种子的正常发育,不能形成受精胚芽,从而降低种子活性并影响种子的萌发^[71]。由土壤侵蚀引起的种子流失和种子活性降低可能会部分地解释土壤侵蚀严重地区植被盖度较低的原因,但还需要进一步的研究证实。土壤侵蚀造成的种子流失会引起种子的二次传播,改变种子的初始散落状态与存储状况而造成种子的再分布,从而影响幼苗更新的空间分布,进而影响植被的恢复演替过程^[72-73]。可见,土壤侵蚀可能会引起土壤种子库空间格局的变化^[68]。

目前国内对于土壤侵蚀对土壤种子库影响的研究还很少,现有研究主要集中在水蚀很严重的黄土丘陵沟壑区,如焦菊英在国家自然科学基金“黄丘区土壤种子库分布格局及植被恢复的土壤侵蚀解释”的支持下,在这方面开展了较多的工作。Jiao 等^[68]就土壤侵蚀对植被的影响研究进行了综述,其中特别提出在土壤侵蚀严重的地区,加强土壤侵蚀对土壤种子库研究的重要性。韩鲁艳等^[74]对于土壤侵蚀过程中种子流失与迁移的人工降雨模拟试验方法的探索,主要从实验过程中的土槽处理、种子处理、种子布设层次和种子布设方式等方面进行了总结,为以后不同形态的种子随土壤侵蚀流失特征的人工降雨模拟试验研究提供了方法上的参考。张小彦等^[69]研究了黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀对3种蒿属(猪毛蒿、铁杆蒿、芨蒿)种子有效性的影响,结果表明,土壤侵蚀程度对种子产量与萌发率的影响很大,土壤侵蚀越严重,种子的有效性越低。同时,关于风蚀对土壤种子库影响的研究也很少,主要集中在内蒙古沙丘生态系统,如Ma和Liu^[75]在内蒙古流动沙丘研究了沙生植物沙蓬种子库的时空格局,发现风蚀对形成流动沙丘种子库的时空格局起着关键的作用。这主要是因为沙丘生态系统中,种子的命运受风的影响较大,较小的种子易被强风吹走,且种子散布距离和种子重量之间有一种反向关系^[78]。关于风蚀对土壤种子库影响研究的室内模拟实验还鲜有报道。国外有关土壤侵蚀对土壤种子库影响的研究也较少,且主要集中在对种子流失的影响^[73,76-81]以及对种子活性的影响^[71]。土壤侵蚀对土壤种子库的影响可能成为土壤侵蚀严重地区未来研究的一个新趋向。

6 全球变化对土壤种子库的影响研究

全球变化特别是气候环境变化问题日益突出,已成为人类可持续发展面临的最严峻挑战之一和当今世

界关注的焦点,并被国际上多个科学计划列为新世纪学科前沿。目前,世界上很多国家均已开始了全球变化的相关研究。全球变化特别是温度升高、雨量变化和CO₂浓度的升高可能会对种子、植物的生长及土壤产生一定的影响,进而影响到土壤种子库的组成和密度大小。休眠和萌发机制促进了长久种子库的维持,以确保种子库萌发延迟直到遇到合适的条件或者不同时全部萌发^[82]。而种子休眠和萌发机制直接受温度影响。

目前,有关全球变化对土壤种子库影响的研究比较缺乏,现有的研究基本上集中在温度和雨量变化对土壤种子库的影响。Pakeman 等^[83]的研究表明,在英国较干燥和温暖的地区欧石楠土壤种子库密度较小。但由于该研究所选的各气候变量之间是互相联系的,没有办法决定哪个气候变量对土壤种子库密度的影响更大。Akinola 等^[9,84]对控制气候条件下草地和石灰质草地群落土壤种子库的研究表明,气候条件对土壤种子库的影响较小。一般认为,气候变暖和雨量增加有利于真菌病原体的存活^[85]。而真菌病原体可能会引起种子的腐烂,造成土壤种子库大小的衰减,同时还会影响幼苗的存活^[86],这方面需要根据种子的特征而定。小粒种子与老龄种子更容易受到病原真菌的威胁^[87],而休眠的种子一般不易被真菌感染^[88]。另外,病原真菌对种子的影响还表现为产生有毒代谢物而影响种子活力;加快种子代谢过程,缩短其存活时间^[89]。但Leishman 等^[85]研究了模拟气候条件下(冬季气候变暖和夏季雨量增多)英国4种植物持久种子库的命运和真菌病原体的作用,发现了真菌病原体对种子持久性的影响要根据具体的物种而定,而不具有普遍性。另外,模拟气候对于其研究中4个物种的种子持久性而言,均没有显著的影响,因而推断模拟气候条件并非促进真菌病原体的生长和存活。他们认为这一现象可能是因为所模拟的气候条件没有达到提高真菌活性的暖湿条件。Ooi 等^[90]研究了温度升高对澳大利亚干旱区8种植物持久种子库寿命和动态的影响。其研究发现,8个物种中有3个物种的萌发量显著增大,1个物种的种子活性出现显著的下降,而有4个物种完全不受影响,这可能是因为它们的萌发生态特性提前适应了较大的温度变化。这一结果会对种子库寿命和动态产生显著的影响,进而也会影响种子库双面下注(Bet-hedging)的功能(即一些物种通过种子分散在几年内萌发以增加其基因型保存的几率来度过不利环境的功能)。尽管上述有的研究认为,温度对某些物种

土壤种子库的影响较小,但温度影响种子休眠的潜力仍然存在^[90]。可见,目前对全球气候变化对土壤种子库的影响研究结论不尽相同,这可能与所选生境或物种有关。国内的相关研究还很少,因而有待开展这方面的工作。

7 结语

以上综述了土壤种子库几个热点领域的研究进展,也是目前该方面较为薄弱的研究领域,因此,今后需进一步强化这些方面的研究。归结起来,大致可从以下几个新领域加强对土壤种子库的研究,包括:

- ①全球变化等外界环境胁迫(如全球升温、酸雨、UV-B 辐射等)对土壤种子库的影响及其作用机制研究;
- ②土壤退化(如土壤侵蚀、土壤污染等)与生态恢复过程(如植被恢复、土壤恢复等)中土壤种子库的时空演变动态及其生态作用研究;
- ③外来有害植物(如飞机草、豚草等)入侵对本地土壤种子库的影响研究;
- ④地上部植物多样性与地下部土壤种子多样性之间的耦合模式与相互关系研究;
- ⑤植物种子在土壤中迁移、演变及其在土壤生态系统食物网中的转化及归宿研究;
- ⑥土壤种子库的研究方法与技术创新研究。

参考文献:

- [1] Simposon RL. Ecology of soil seed bank. San Diego: Academic Press, 1989
- [2] 李秋燕, 赵文智. 干旱区土壤种子库的研究进展. 地球科学进展, 2005, 20(3): 350-357
- [3] Pugnaire FI, lazaro R. Seed bank and understorey species composition in a semi-arid environment: The effect of shrub age and rainfall. *Annals of Botany*, 2000, 86: 807-813
- [4] 沈有信, 刘文耀, 崔建武. 滇中喀斯特森林土壤种子库的种-面积关系. 植物生态学报, 2007, 31(1): 50-55
- [5] 沈有信, 刘文耀, 官会林. 土壤种子库样品萌发的前处理方法: 水洗减量. 土壤学报, 2008, 45(6): 1 199-1 202
- [6] 沈有信, 赵春燕. 中国土壤种子库研究进展与挑战. 应用生态学报, 2009, 20(2): 467-473
- [7] Dessaint F, Chadoeuf R, Barralis G. Nine years' soil seed bank and weed vegetation relationships in an arable field without weed control. *Journal of Applied Ecology*, 1997, 34: 123-130
- [8] Pywell RF, Putwain PD, Webb NR. The decline of heathland seed populations following the conversion to agriculture. *Journal of Applied Ecology*, 1997, 34: 949-960
- [9] Akinola MO, Thompson K, Buckland SM. Soil seed bank of an upland calcareous grassland after 6 years of climate and management manipulations. *Journal of Applied Ecology*, 1998, 35: 544-552
- [10] Kalamees R, Zobel M. Soil seed bank composition in different successional stages of a species rich wooded meadow in laelatu, western Estonia. *Acta Oecologica*, 1998, 19: 175-180
- [11] Romermann C, Dutoit T, Poschlod P, Buisson E. Influence of former cultivation on the unique Mediterranean steppe of France and consequences for conservation management. *Biological Conservation*, 2005, 121: 21-33
- [12] Benoit DL, Kenkel NC, Cavers PB. Factors influencing the precision of soil seed bank estimates. *Canadian Journal of Botany*, 1989, 67: 2 833-2 840
- [13] Gross KL. A comparison of methods for estimating seed numbers in the soil. *Journal of Ecology*, 1990, 78: 1 079-1 093
- [14] Forcella F. A species-area curve for buried viable seeds. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1984, 35: 645-652
- [15] Hayashi I, Numata M. Viable buried-seed population in the *Misanthus* and *Zoysia* type grasslands in Japan-Ecological studies on the buried-seed population in the soil related to plant succession. VI. *Japanese Journal of Ecology*, 1971, 20: 243-252
- [16] Numata M, Hayashi I, Komura T, Oki K. Ecological studies on the buried-seed population in the soil as related to plant succession. I. *Japanese Journal of Ecology*, 1964, 14: 207-215
- [17] Lovei GL. Biodiversity: Global change through invasion. *Nature*, 1997, 388: 627-628
- [18] 徐海根, 强胜, 韩正敏, 郭建英, 黄宗国, 孙红英, 何舜平, 丁晖, 吴海荣, 万方浩. 中国外来入侵物种的分布与传入路径分析. 生物多样性, 2004, 12(6): 626-638
- [19] Lonsdale WM. Global patterns of plant invasions and the concept of invisibility. *Ecology*, 1999, 80: 1 522-1 536
- [20] 党伟光, 高贤明, 王瑾芳, 李爱芳. 紫茎泽兰入侵地区土壤种子库特征. 生物多样性, 2008, 16(2): 126-132
- [21] 闫巧玲, 刘志民, 李荣平. 持久土壤种子库研究综述. 生态学杂志, 2005, 24(8): 948-952
- [22] Thompson K, Grime JP. Seasonal variation in the seed banks of herbaceous species in ten contrasting habitats. *Journal of Ecology*, 1979, 67: 893-921
- [23] 王硕, 高贤明, 王瑾芳, 党伟光. 紫茎泽兰土壤种子库特征及其对幼苗的影响. 植物生态学报, 2009, 33(2): 380-386
- [24] 周世敏, 欧国腾, 李吉松, 江赢, 蔡卫东, 赵宇翔. 1 个物候期内紫茎泽兰土壤种子库活体动态调查. 安徽农业科学, 2010, 38(3): 1 373-1 374
- [25] 张炜银, 李鸣光, 臧润国, 咎启杰, 王伯荪. 外来杂草薇甘菊种群土壤种子库动态. 武汉植物学研究, 2005, 23(1): 49-52

- [26] 南康武, 吴庆玲, 胡仁勇, 陈素珍, 丁炳扬. 温州裂叶月见草入侵群落和土壤种子库种类组成的季节动态. 热带亚热带植物学报, 2009, 17(6): 535-542
- [27] 郑思思, 戴玲, 林培, 陈贤兴, 丁炳扬. 阔叶丰花草入侵群落物种组成及其土壤种子库季节动态. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2009, 35(6): 677-685
- [28] Harper JL. Population Biology of Plant. London: Academic Press, 1977
- [29] 于顺利, 郎南军, 彭明俊, 赵琳, 郭永清, 郑科, 张立新, 温绍龙, 李晖. 种子雨研究进展. 生态学杂志, 2007, 26(10): 646-652
- [30] Jensen K. Species composition of soil seed bank and seed rain of abandoned wet meadows and their relation to aboveground vegetation. *Flora*, 1998, 193: 345-359
- [31] 邓自发, 谢晓玲, 王启基, 周兴民. 高寒小嵩草草甸种子库和种子雨动态分析. 应用与环境生物学报, 2003, 9(1): 7-10
- [32] 刘建立, 袁玉欣, 彭伟秀, 马长明, 管伟. 河北丰宁坝上孤石牧场土壤种子库与地上植被的关系. 干旱区研究, 2005, 22(3): 295-300
- [33] 李锋瑞, 赵丽娅, 王树芳, 王先之. 封育对退化沙质草地土壤种子库与地上群落结构的影响. 草业学报, 2003, 12(4): 90-99
- [34] Whipple SA. The relationship of buried, germinating seeds to vegetation in an old-growth Colorado sub-alpine forest. *Canadian Journal of Botany*, 1978, 56: 1 505-1 509
- [35] 于顺利, 蒋高明. 土壤种子库的研究进展及若干研究热点. 植物生态学报, 2003, 27(4): 552-560
- [36] Bertiller MB. Seasonal variation in the seed bank of a Patagonian grassland in relation to grazing and topography. *Journal of Vegetation Science*, 1992, 3: 47-54
- [37] Kebrom T, Tesfaye B. The role of soil seed banks in the rehabilitation of degraded hillslopes in Southern Wello, Ethiopia. *Biotropica*, 2000, 32: 23-32
- [38] 韩丽君, 白军科, 李晋川, 崔艳, 岳建英. 安太堡露天煤矿排土场土壤种子库. 生态学杂志, 2007, 26(6): 817-821
- [39] 李吉玫, 徐海量, 张占江, 叶茂, 王增如, 李媛. 塔里木河下游不同退化区地表植被和土壤种子库特征. 生态学报, 2008, 28(8): 3 626-3 636
- [40] Rosef L. Germinable soil seed banks in abandoned grasslands in central and western Norway and their significance for restoration. *Applied Vegetation Science*, 2008, 11: 223-234
- [41] Ma MJ, Du GZ, Zhou XH. Role of the soil seed bank during succession in a subalpine meadow on the Tibetan Plateau. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2009, 41: 469-477
- [42] 李宁, 冯固, 田长彦. 塔克拉玛干沙漠北缘土壤种子库特征及动态. 中国科学(D 辑), 2006, 36(增刊 II): 110-118
- [43] 詹学明, 李凌浩, 李鑫, 程维信. 放牧和围封条件下克氏针茅草原土壤种子库的比较. 植物生态学报, 2005, 29(5): 747-752
- [44] 赵丽娅, 李锋瑞, 王先之. 草地沙化过程地上植被与土壤种子库变化. 生态学报, 2003, 23(9): 1 745-1 756
- [45] 唐勇, 曹敏, 张建侯, 盛才余. 西双版纳热带森林土壤种子库与地上植被的关系. 应用生态学报, 1999, 10(3): 279-282
- [46] 周先叶, 李鸣光, 王伯荪. 广东黑石顶自然保护区森林次生演替不同阶段土壤种子库的研究. 植物生态学报, 2000, 24(2): 222-230
- [47] 马妙君, 周显辉, 吕正文, 杜国帧. 青藏高原东缘封育和退化高寒草甸种子库差异. 生态学报, 2009, 29(7): 3 658-3 664
- [48] Liu MZ, Jiang GM, Yu SL, Li YG, Li G. The role of soil seed banks in natural restoration of the degraded Hunshandak sandlands, northern China. *Restoration Ecology*, 2009, 17: 127-136
- [49] 王增如, 徐海量, 尹林克, 李吉玫, 张占江, 李媛. 土壤种子库对漫溢区受损植被更新的贡献. 应用生态学报, 2008, 19(12): 2 611-2 617
- [50] Benigno GR, Mulualet T, Guillermo CM, Per Christer O. Soil seed bank assembly following secondary succession on abandoned agricultural fields in Nicaragua. *Journal of Forestry Research*, 2009, 20(4): 349-354
- [51] Wang J, Ren H, Yang L, Li DY, Guo QF. Soil seed banks in four 22-year-old plantations in South China: Implications for restoration. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258: 2 000-2 006
- [52] 白文娟, 焦菊英, 张振国. 黄土丘陵沟壑区退耕地土壤种子库对植被恢复的影响. 北京林业大学学报, 2008, 30(4): 70-76
- [53] Bossuyt B, Honnay O. Can the seed bank be used for ecological restoration? An overview of seed bank characteristics in European communities. *Journal of Vegetation Science*, 2008, 19: 875-884
- [54] Florentine SK, Westbrooke ME. Restoration on abandoned tropical pasturelands-Do we know enough? *Journal for Nature Conservation*, 2004, 12: 85-94
- [55] 张咏梅, 何静, 潘开文, 陈宏志, 赵云锋. 土壤种子库对原有植被恢复的贡献. 应用与环境生物学报, 2003, 9(3): 326-332
- [56] McCue KA, Holtsford TP. Seed bank influences on genetic diversity in the rare annual *Clarkia springvillensis* (*Onagraceae*). *American Journal of Botany*, 1998, 85(1): 30-36
- [57] 王俊, 白瑜. 土壤种子库研究的几个热点问题. 生态环境, 2006, 15(6): 1 372-1 379
- [58] Uesugi R, Nishihiro J, Tsumura Y, Washitani I. Restoration of genetic diversity from soil seed banks in a threatened aquatic

- plant, *Nymphoides peltata*. Conservation Genetics, 2007, 8: 111–121
- [59] 尚占环, 徐鹏彬, 任国华, 龙瑞军. 土壤种子库研究综述—植被系统中的作用及功能, 草业学报, 2009, 18(2): 175–183
- [60] 刘贵华, 肖葳, 陈漱飞, 张全发. 土壤种子库在长江中下游湿地恢复与生物多样性保护中的作用. 自然科学进展, 2007, 17(6): 741–747
- [61] 岳红娟, 仝川, 朱锦懋, 黄佳芳. 濒危植物南方红豆杉种子雨和土壤种子库特征. 生态学报, 2010, 30(16): 4 389–4 400
- [62] 郑粉莉, 王占礼, 杨勤科. 我国土壤侵蚀科学研究回顾和展望. 自然杂志, 2008, 30(1): 12–16
- [63] 唐克丽等编著. 中国水土保持. 北京: 科学出版社, 2004
- [64] 徐宪立, 马克明, 傅伯杰, 刘宪春, 黄勇, 祁建. 植被与水土流失关系研究进展. 生态学报, 2006, 26(9): 3 137–3 143
- [65] Jalili A, Hamzeh'ee B, Asri Y, Shirvany A, Yazdani S, Khoshnevis M, Zarrinkamar F, Ghahramani M A, Safavi R, Shaw S, Hodgson J G, Thompson K, Akbarzadeh M, Pakparvar M. Soil seed banks in the Arasbaran Protected Area of Iran and their significance for conservation management. Biological Conservation, 2003, 109: 425–431
- [66] Falinska K. Seed bank dynamics in abandoned meadows during a 20-year period in the Bialowieza National Park. Journal of Ecology, 1999, 87: 461–475
- [67] Peco B, Ortega M, Levassor C. Similarity between seed bank and vegetation in Mediterranean grassland: A predictive model. Journal of Vegetation Science, 1998, 9: 815–828
- [68] Jiao JY, Zou HY, Jia YF, Wang N. Research progress on the effects of soil erosion on vegetation. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29: 85–91
- [69] 张小彦, 焦菊英, 王宁, 贾燕锋. 黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀对 3 种蒿属种子有效性的影响. 水土保持研究, 2010, 17(1): 56–61
- [70] Jones FE, Esler KJ. Relationship between soil-stored seed banks and degradation in eastern Nama Karoo rangelands (South Africa). Biodiversity and Conservation, 2004, 13: 2 027–2 053
- [71] Renison D, Hensen I, Cingolani AM. Anthropogenic soil degradation affects seed viability in *Polylepis australis* mountain forests of central Argentina. Forest Ecology and Management, 2004, 196: 327–333
- [72] Hampe A. Extensive hydrochory uncouples spatiotemporal patterns of seedfall and seedling recruitment in a 'bird-dispersed' riparian tree. Journal of Ecology, 2004, 92: 797–807
- [73] Aerts R, Maes WH, November E, Behailu M, Poesen J, Deckers J, Hermy M, Muys B. Surface runoff and seed trapping efficiency of shrubs in a regenerating semiarid woodland in northern Ethiopia. Catena, 2006, 65: 61–70
- [74] 韩鲁艳, 焦菊英, 雷东. 种子流失与迁移的人工降雨模拟试验方法研究. 水土保持研究, 2010, 30(2): 220–224, 232
- [75] Ma JL, Liu ZM. Spatiotemporal pattern of seed bank in the annual psammophyte *Agriophyllum squarrosum* Moq. (Chenopodiaceae) on the active sand dunes of northeastern Inner Mongolia, China. Plant and Soil, 2008, 311: 97–107
- [76] Cerdà A, Garcia-Fayos P. The influence of slope angle on sediment, water and seed losses on badland landscapes. Geomorphology, 1997, 18: 77–90
- [77] Cerdà A, Garcia-Fayos P. The influence of seed size and shape on their removal by water erosion. Catena, 2002, 48: 293–301
- [78] Garcia-Fayos P, Cerdà A. Seed losses by surface wash in degraded Mediterranean environments. Catena, 1997, 29: 73–83
- [79] Rey F, Isselin-Nondedeu F, Bedecarrats A. Vegetation dynamics on sediment deposits upstream of bioengineering works in mountainous marly gullies in a Mediterranean climate (Southern Alps, France). Plant and Soil, 2005, 278, 149–158
- [80] Isselin-Nondedeu F, Bedecarrats A. Soil microtopographies shaped by plants and cattle facilitate seed bank formation on alpine ski trails. Ecological Engineering, 2007, 30: 278–285
- [81] Isselin-Nondedeu F, Rey F, Bedecarrats A. Contributions of vegetation cover and cattle hoof prints towards seed runoff control on ski pistes. Ecological Engineering, 2006, 27: 193–201
- [82] Fenner M, Thompson K. The Ecology of Seeds. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005
- [83] Pakeman RJ, Cummins RP, Miller GR, Roy DB. Potential climatic control of seedbank density. Seed Science Research, 1999, 9: 101–110
- [84] Akinola MO, Thompson K, Hillier SH. Development of soil seed banks beneath synthesized meadow communities after seven years of climate manipulations. Seed Science Research, 1998, 8: 493–550
- [85] Leishman MR, Masters GJ, Clarke IP, Brown VK. Seed bank dynamics: the role of fungal pathogens and climate change. Functional Ecology, 2000, 14: 293–299
- [86] Augspurger CK. Seed dispersal of the tropical tree, *platypodium-elegans*, and the escape of its seedlings from fungal pathogens. Journal of Ecology, 1983, 71: 759–771
- [87] 侯金伟, 南志标. 植物病原真菌对土壤种子库的影响. 草业学报, 2009, 18(4): 241–250
- [88] 孙书存, 陈灵芝. 东灵山地区辽东栎种子库统计. 植物生态学报, 2000, 24(2): 215–221

- [89] Burdon JJ. Diseases and plant population Biology. Cambridge: Cambridge University Press, 1987
- [90] Ooi MKJ, Auld TD, Denham AJ. Climate change and bet-hedging: Interactions between increased soil temperatures and seed bank persistence. *Global Change Biology*, 2009, 15: 2 375–2 386

Hot Topics and Developing Trends in Soil Seed Bank

BAI Wen-juan, ZHANG Jia-en, QUAN Guo-ming

(Key Laboratory for Ecological Agriculture of Ministry of Agriculture, South China Agricultural University, Key Laboratory for Agro-ecology and Rural Environment of Guangdong Regular Higher Education Institutions, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Soil seed bank constitutes all diverse seeds presented on or in soil and the associated litters. It is not only a basis of plant population establishment, survival, reproduction or dispersal, but also plays an important role in vegetation regeneration, succession and restoration. This paper summarized some hot topics and trends in the studies of soil seed bank, which included: 1) research methods of soil seed bank, 2) soil seed bank characteristics of invasive plants, 3) relationships among seed rain, soil seed bank and the related standing vegetation, 4) roles of soil seed bank in vegetation restoration of degraded ecosystems and biodiversity conservation, 4) effects of soil erosion on soil seed bank, 5) influences of global change on soil seed bank. Meanwhile, some related research progress was reviewed with an attempt to provide references for future research of this area.

Key words: Soil seed bank, Ecological restoration, Biological invasion, Soil erosion, Global change