

引用格式:高若允,杨柳生,罗清虎,王雪,林勇明. 洪涝灾害致损森林在自然恢复过程中的土壤种子库变化[J]. 山地学报,2022,40(2):183-195.

GAO Ruoyun, YANG Liusheng, LUO Qinghu, WANG Xue, LIN Yongming. Variation of soil seed bank in natural restoration processes of different forest types disturbed by flood [J]. Mountain Research, 2022, 40(2):183-195.

洪涝灾害致损森林在自然恢复过程中的土壤种子库变化

高若允^{1,2,3}, 杨柳生^{1,2,3}, 罗清虎¹, 王雪¹, 林勇明^{1,2,3*}

(1. 福建农林大学 林学院, 福州 350002; 2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041; 3. 福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室, 福州 350002)

摘要: 受损生态系统自然恢复过程中的土壤种子库变化规律, 可以用来预测植被演替的进度与方向, 指导生态系统的恢复与重建。2010年6月福建省南平市特大暴雨诱发大面积滑坡、泥石流等自然灾害, 当地林地受损严重。本文选取受损严重的米槠次生阔叶林、毛竹林、杉木林为研究对象, 基于野外取样调查和室内试验, 分析不同样地(受损样地、自然恢复样地、未受损样地)土壤种子库的萌发动态、数量特征和物种组成。结果显示:(1)土壤种子库的萌发过程包括快速增长、缓慢增长和稳定3个阶段。3种林型土壤种子库平均密度均随土层深度的增加而减少, 存在明显的表聚现象。(2)种子库萌发物种以易于传播的菊科和禾本科植物为主, 3种林型土壤种子库萌发物种均以多年生和一年生草本占据主要优势。(3)种子库物种多样性指数表现为杉木林优于次生阔叶林, 毛竹林多样性指数最低, 3种林型 Margalef 丰富度指数与杉木林 Shannon-Wiener 多样性指数由大到小依次为未受损样地、自然恢复样地、受损样地。(4)相关性分析表明3种林型土壤种子库密度主要受全氮、全磷、水解氮、有效磷和 pH 的影响, 土壤种子库物种多样性均受到土壤理化性质的影响。以上结果表明洪涝诱发的灾害严重破坏土壤种子库, 种子库自然恢复进程较慢且效果较差, 后期应通过人工引种本土优势物种、提高土壤养分含量等措施促进灾区土壤种子库恢复, 加快受损森林生态系统的恢复和重建进程。本研究可为洪涝灾害致损森林的生态恢复与重建提供理论参考。

关键词: 洪涝灾害; 土壤种子库; 自然恢复; 物种多样性; 福建; 南平

中图分类号: S154.1

文献标志码: A

近年来, 随着干旱、暴雨等极端气候事件发生频次和强度的增加^[1], 滑坡、泥石流、洪涝等一系列诱发灾害频繁发生, 导致区域内生态系统结构和功能严重受损, 生态环境退化严重。土壤种子库作为受损生态系统迅速恢复的潜在植被和重要物源, 其在

自然恢复进程中的变化规律, 可用来预测植被演替的进度与方向, 进而指导受损生态系统的恢复与重建^[2-4]。土壤种子库的变化对外界环境的破坏作用具有一定的滞后性, 能够较好地保留土壤种子库群落的原有种源^[5-6], 影响植被的演替及扩散、更新与

收稿日期 (Received date): 2021-09-24; **改回日期** (Accepted date): 2022-04-06

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金(42071132); 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室开放研究基金(20190402); 福建农林大学杰出青年科研人才计划项目(xjq2017016)。[National Natural Science Foundation of China (42071132); Research Fund of Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Chinese Academy of Sciences (20190402); Outstanding Young Scientific Research Project of Fujian Agriculture and Forestry University (xjq2017016)]

作者简介 (Biography): 高若允(1998-), 女, 河南商丘人, 硕士研究生, 主要研究方向: 植物地理学。[GAO Ruoyun (1998-), female, born in Shangqiu, Henan province, M. Sc. candidate, research on phytogeography] E-mail: 18339160891@163.com

* **通讯作者** (Corresponding author): 林勇明(1982-), 男, 福建福安人, 博士, 副教授, 主要研究方向: 区域资源优化、生态学。[LIN Yongming (1982-), male, born in Fu'an, Fujian province, Ph. D., associate professor, research on optimization of regional resources and ecology] E-mail: monkey1422@163.com

恢复、生物多样性的保存与维护等全过程^[7]。

20 世纪 70 年代以来,土壤种子库迅速成为恢复生态学和植物生态学研究的重点领域^[3]。国内外学者已对洪涝灾害致损生态系统土壤种子库进行研究,主要集中于洪涝前后种子库萌发特征^[8-9]、种子库年际变化特征^[10]及土壤种子库与地上植被的关系^[11]等方面,但对于洪涝灾害干扰下不同致损森林土壤种子库在自然恢复过程中的研究鲜见报道,不同林型、不同恢复阶段及土壤理化性质是否影响受损生态系统的土壤种子库等问题尚不明瞭。

2010 年 6 月 13—25 日,福建省南平市发生特大暴雨,形成百年一遇的特大洪水,诱发大面积滑坡、泥石流等地质灾害,当地林地受损严重。南平市洪涝灾后 3 种受损森林生态系统在自然恢复初期土壤理化性质和土壤微生物群落变化特征不同。例如,米楮次生阔叶林和杉木林由于植被覆盖度较高,枯枝落叶层和根系的存在可有效抑制地表径流侵蚀,影响土壤容重、含水率、孔隙度等物理性质,进而改善土壤质地^[12];3 种林型土壤养分在自然恢复过程中均得到改善,且杉木林土壤养分整体恢复状况优于米楮次生阔叶林、毛竹林,但均未恢复到灾前水平^[13-14];受损程度影响微生物碳源代谢活性,毛竹林因受损严重,土层发生扰动,导致微生物生存的生境发生变化,抑制了微生物碳源代谢活性^[15]。然而,以上研究主要关注土壤理化性质及微生物群落在恢复初期的变化特征,自然恢复过程中土壤种子库变化特征鲜见报道,难以判断土壤种子库随自然恢复过程的演变趋势,进而无法确定植被演替规律及制定合理的灾后恢复措施。

本文选择福建省南平市为研究区,以 3 种主要受损林地(米楮次生阔叶林、毛竹林、杉木林)为研究对象,在受损、自然恢复及未受损 3 种典型样地,分层采集土壤样品进行种子萌发实验,分析土壤种子库特征及其与土壤理化性质的关系,加深自然恢复对灾害受损生态系统修复作用的认识,为该地区受损生态系统的恢复与重建提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省南平市延平区及顺昌县,地

理位置介于东经 117°00′~119°17′、北纬 26°15′~28°19′,属亚热带季风湿润气候,年均温 17.9℃~21.2℃,年降雨量 1430~2032 mm,且多集中在 3—7 月。南平市作为中国南方重点林区,区内植被覆盖率高达 76.46%。在构造运动的强烈影响下,该区地貌高差悬殊,地表受构造运动切割影响强烈,河流水系发达、交错突出;在地形、气候等作用下,河流径流量大,水流急,容易暴涨暴落,从而导致洪涝灾害的发生。2010 年 6 月,南平市发生持续强降雨,造成严重的山洪泥石流滑坡灾害,林木损失严重。本文选取受损最严重的米楮(*Castanopsis carlesii*)次生阔叶林、毛竹林(*Phyllostachys heterocycla*)、杉木林(*Cunninghamia lanceolata*) 3 种林型为研究对象。

米楮次生阔叶林(后文简称为次生阔叶林)位于延平区茫荡镇上瓦村,其前身为天然常绿阔叶林,于 1958 年砍伐后经封禁自然演替至今形成,未受损样地海拔 188 m,现存植被类型丰富,具有较完善的乔灌木组合,主要植被有米楮、粗叶榕(*Ficus hirta*)、小叶荇草(*Arthraxon lancifolius*)、福建观音座莲(*Angiopteris fokiensis*)等,植被盖度为 88%;自然恢复样地海拔 173 m,主要植被有山苍子(*Litsea cubeba*)、油桐(*Vernicia fordii*)等,植被盖度为 60%。

毛竹林位于延平区水南街道红星村上墩自然村,于 2001 年对荒山改造时人为移植毛竹形成,未受损样地海拔 365 m,2017 年毛竹林林龄约 16 年,以生长发育良好的毛竹林纯林为主,主要植被有小叶荇草、蕨(*Pteridium aquilinum*)、玉叶金花(*Mussaenda pubescens*)等,植被盖度为 65%;自然恢复样地海拔 367 m,主要植被有山苍子、木荷(*Schima superba*)等,植被盖度为 35%。

杉木林位于顺昌县元坑镇宝庄村,于 1995 年砍伐后经人工造林形成,未受损样地海拔 238 m,2017 年杉木林林龄约 22 年,林缘偶见人工种植的柑橘(*Citrus reticulata*),主要植被有矮冷水花(*Pilea peploides*)、滇鸡血藤(*Kadsura caulis*)、鱼腥草(*Houttuynia cordata*)等,植被盖度为 72%;自然恢复样地海拔 226 m,以灌木和草本为主,主要植被有尖叶菝葜(*Smilax arisanensis*)、山乌柏(*Sapium discolor*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、葛藤(*Argyrea seuginii*)等,植被盖度为 52%。

受 2010 年 6 月洪涝灾害影响,诱发的滑坡严重干扰 3 种林型,地表大面积裸露,植被盖度小于

10%,本研究将严重干扰林地定义为受损样地,受损样地中残存植被主要为山黄麻(*Trema tomentosa*)、五节芒等,自然恢复样地为受损样地自然恢复7年后形成。具体样地概况见表1。

1.2 土样采集

已有研究^[16]发现持久土壤种子库的土样应采集于夏季,此时种子已完成萌发但尚未成熟和开始散布,因此本文土样采集均在7月进行。2010年7月在受损严重的次生阔叶林、毛竹林、杉木林分别设置1个30 m×40 m的受损样地,同时在各林型受损样地附近设置1个林龄和面积均相同的未受损样地(2010年未采样)。沿坡向以12 m为间距将样地分为上、中、下坡位,每个坡位随机设置2个2 m×2 m的小样方,随后在小样方中分3层(0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm)利用10 cm×20 cm×10 cm(长×宽×高)的取样框进行取样。2017年7月,利用上述方法在未受损样地和自然恢复样地(原受损样地自然演替7年后形成)进行土样采集。所有样地土壤样品共计3×3×3×2×3=162个。

1.3 种子萌发试验

分别于2010年9月和2017年9月在福建农林大学森林生态研究所田间实验室进行种子萌发试验(两次试验条件保持一致),具体方法为:将取回的土样自然风干,去除杂物并将板结团状的土样碾开,将土样混合均匀后平铺在铺有2 cm厚苗床土(苗床土采集自闽江河道,经过150℃高温处理)的花盆中,土壤厚度约为5~6 cm,放置于室温25℃~30℃的环境中。同时设置5个装有灭活河沙苗床

土的花盆作为对照,监测空中传播种子的影响。种子发芽期间,定时浇水保持土壤湿润,记录种子萌发情况,根据《中国植物志》《福建植物志》《福建植被》对已萌发幼苗进行鉴定,记录后从花盆内小心拔掉,暂不能鉴定的幼苗继续培养至可鉴定状态。两次种子萌发实验周期均为4个月。

1.4 计算方法

土壤种子库密度:将花盆中土样与取样框所取土样按照1 m²面积大小进行换算,然后计算土壤中种子萌发的幼苗数量。

土壤种子库多样性指数:利用Margalef丰富度指数,Shannon-Wiener多样性指数,Simpson优势度指数和Pielou均匀度指数衡量土壤种子库物种多样性,计算公式详见参考文献[10]。

1.5 数据处理

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)分析不同样地土壤种子库差异,多重比较选择LSD多重比较,利用SPSS 22.0进行单因素方差分析和Pearson相关性分析,利用R 4.1.1作不同样地土壤种子库萌发图。

2 结果与分析

2.1 土壤种子库数量特征

由图1可知,各样地土壤种子库的萌发动态整体上符合S型曲线,可分为快速增长、缓慢增长和平缓稳定3个阶段。在未受损样地和自然恢复样地,毛竹林不同土层土壤种子萌发密度均小于次生阔叶

表1 样地基本概况

Tab. 1 Characteristics of sample plots

林型	样地类型	经度	纬度	海拔/m	坡度/(°)	坡向	盖度/%
次生阔叶林	未受损样地	118°08'31"	26°41'42"	188	36	NW	88
	自然恢复样地	118°08'35"	26°41'39"	173	38	NE	60
	受损样地	118°08'35"	26°41'39"	173	38	NE	5
毛竹林	未受损样地	118°15'05"	26°39'16"	365	30	NW	65
	自然恢复样地	118°14'59"	26°39'23"	367	43	SE	35
	受损样地	118°14'59"	26°39'23"	367	43	SE	8
杉木林	未受损样地	117°39'44"	26°50'36"	238	34	NE	72
	自然恢复样地	117°39'45"	26°50'33"	226	32	NE	52
	受损样地	117°39'45"	26°50'33"	226	32	NE	10

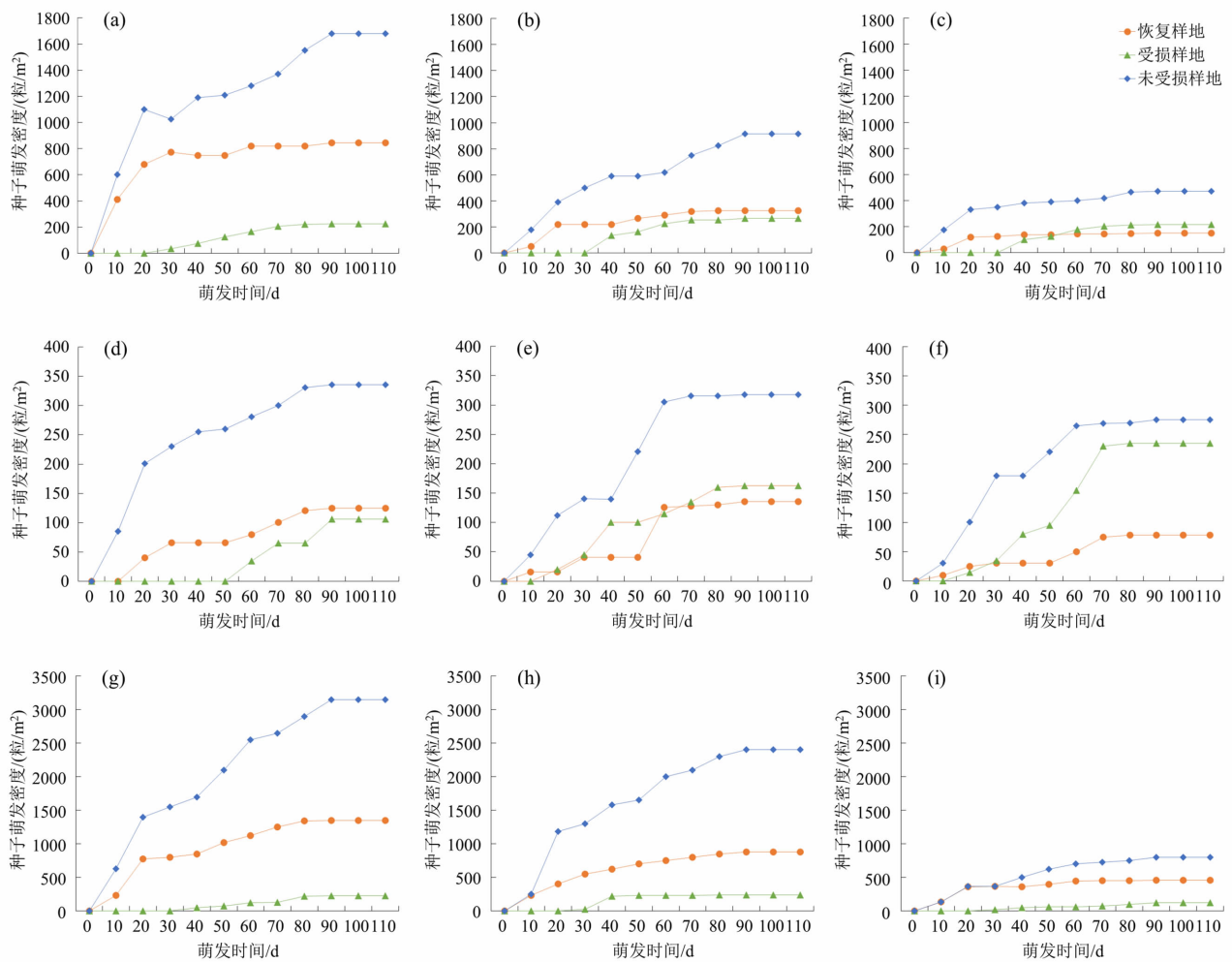


图 1 各样地不同土层土壤种子库萌发动态: (a)、(b)、(c) 分别对应次生阔叶林 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm; (d)、(e)、(f) 分别对应毛竹林 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm; (g)、(h)、(i) 分别对应杉木林 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm

Fig. 1 Soil seed bank germination dynamic of different layers in different sample plots:

(a), (b) and (c) indicate 0~10 cm, 10~20 cm and 20~40 cm in secondary broad-leaved forest, respectively;

(d), (e) and (f) indicate 0~10 cm, 10~20 cm, and 20~40 cm in bamboo forest, respectively;

(g), (h), and (i) indicate 0~10 cm, 10~20 cm, 20~40 cm in Chinese fir forest, respectively

林和杉木林,在受损样地,3 种林型没有明显差异。除毛竹林外,其余样地的种子萌发密度由大到小依次为 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm,具有明显的表聚现象。在 0~10 cm 土层,土壤种子库萌发密度由大到小依次为未受损样地、自然恢复样地、受损样地,未受损样地和自然恢复样地在萌发初期(0~20 天)均处于一个短暂的萌发高峰期,约 20~30 天之后,未受损样地进入第 2 次萌发高峰期,自然恢复样地进入平稳阶段。在 10~20 cm 土层,除毛竹林外,其余样地种子萌发生长规律与 0~10 cm 相似。在 20~40 cm 土层中,种子库萌发密度均比较小。

由表 2 可知,3 种林型样地间土壤种子库平均密度存在差异。自然恢复样地与未受损样地土壤种子库平均密度由大到小依次为杉木林、次生阔叶林、毛竹林,杉木林自然恢复样地与次生阔叶林和毛竹林自然恢复样地存在显著差异。3 种林型未受损样地土壤种子库平均密度存在显著差异,受损样地由于受灾干扰严重,3 种林型受损样地土壤种子库平均密度均较小。其次,各样地土壤种子库密度总体上呈现随土层深度增加而递减的规律,但仅次生阔叶林未受损样地、杉木林未受损样地不同土层种子库密度差异显著。3 种林型 0~10 cm 土壤种子库密度由大到小依次为未受损样地、自然恢复样地、

受损样地,且差异显著。次生阔叶林、杉木林 10 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 土壤种子库密度由大到小依次为未受损样地、自然恢复样地、受损样地,与表层土壤种子库密度具有相同规律,且未受损样地显著高于受损样地和自然恢复样地。毛竹林 10 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 土层种子库密度为受损样地大于自然恢复样地。

2.2 土壤种子库物种组成

由表 3 可知,3 种林型土壤种子库共计萌发 35 科 59 种植物,一年草本植物共计 15 种,多年生草本植物 27 种,灌木 15 种,乔木 2 种。杉木林、毛竹林、次生阔叶林自然恢复样地分别为 29、4、18 种;未受损样地分别为 45、10、23 种,受损样地分别为 10、5、8 种。3 种林型萌发物种均以草本植物占绝对优势,乔木数量较少。次生阔叶林自然恢复样地(CH)苳草(*Arthraxon hispidus*)、牛叠肚(*Rubus crataegifolius*)、过路黄(*Lysimachia christinae*)具有较高相对多度,分别为 50.68%、6.85%、5.48%,次生阔叶林未受损样地(CW)苳草、苎麻(*Boehmeria nivea*)、芒(*Miscanthus sinensis*)具有较高相对多度,分别为 46.00%、5.44%、4.57%,次生阔叶林受损样地(CS)铁苳菜(*Acalypha australis*)、矮冷水花、繁缕(*Stellaria media*)、苳草和荫地蓼(*Polygonum umbrosum*)相对多度均为 12.58%。毛竹林自然恢复样地(MH)萌发物种过路黄、牛叠肚、野牡丹(*Melastoma candidum*)具有较高相对多度,分别为

50.00%、16.67%、16.67%,毛竹林未受损样地(MW)过路黄、苎麻(*Urtica fissa*)、积雪草(*Centella asiatica*)、商陆(*Phytolacca acinosa*)具有较高相对多度,分别为 20.29%、17.44%、14.57%、14.57%,毛竹林受损样地(MS)苎麻、繁缕、苳草、戟叶蓼(*Polygonum thunbergii*)具有较高相对多度,均为 20.15%。杉木林自然恢复样地(SH)芒、香附子(*Cyperus rotundus*)、过路黄具有较高相对多度,分别为 16.80%、10.40%、7.20%,杉木林未受损样地(SW)矮冷水花、藿香蓟(*Ageratum conyzoides*)、繁缕具有较高相对多度,分别为 13.42%、8.22%、7.18%,杉木林受损样地(SS)牛叠肚、苎麻相对多度较高,均为 10.20%。

对 3 种林型的土壤种子库物种生活型占比分析可知(表 4),不同样地萌发物种均以草本植物为主,分别在 CW、CH、CS、MW、MH、MS、SW、SH 和 SS 样地占 74%、67%、75%、70%、50%、100%、85%、79%、80%;灌木在除 MS 外的其余样地均有出现,分别在 CW、CH、CS、MW、MH、SW、SH 和 SS 样地占 26%、28%、25%、30%、50%、15%、17%、20%;乔木少量出现,仅在 CH 和 SH 样地占 5%、4%。

2.3 土壤种子库物种多样性分析

由表 5 可知,次生阔叶林和杉木林 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数总体上均显著大于毛竹林,Pielou 均匀度指数、Simpson 优势度指数则相反,表现为毛竹林显著大于次生阔叶林和

表 2 不同土层土壤种子库密度及平均密度

Tab. 2 Density and average density of soil seed bank in different soil layers

(单位:粒/m²)

林型	样地类型	不同土层种子库密度			平均密度
		0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	
次生阔叶林	CW	1657.1 ± 359.8 Ab	916.7 ± 202.4 Bb	471.4 ± 128.6 Ba	1014.7 ± 229.5 a
	CH	842.9 ± 405.8 Aa	316.7 ± 160.0 Aa	150.0 ± 28.9 Aa	436.5 ± 134.9 a
	CS	216.7 ± 47.7 Ac	260.0 ± 51.0 Aa	220.0 ± 49.0 Aa	232.2 ± 20.0 a
毛竹林	MW	333.3 ± 84.3 Ab	314.3 ± 59.5 Ab	266.7 ± 40.0 Ab	304.8 ± 53.3 b
	MH	120.0 ± 20.0 Aa	128.6 ± 18.4 Aa	75.0 ± 25.0 Aa	107.9 ± 17.8 a
	MS	100.0 ± 25.0 Aa	160.0 ± 84.3 Aa	233.3 ± 55.8 Aab	164.5 ± 17.2 a
杉木林	SW	3125.0 ± 462.4 Ab	2433.3 ± 487.6 ABb	800.0 ± 110.2 Ca	2119.4 ± 269.7 c
	SH	1333.3 ± 352.8 Aa	933.3 ± 237.6 Aa	480.0 ± 124.1 Aab	915.5 ± 213.3 b
	SS	200.0 ± 70.7 Ac	225.0 ± 62.9 Aa	125.0 ± 25.0 Ab	183.3 ± 55.7 a

注:小写字母表示各林型不同样地同一土层土壤种子库密度差异显著;大写字母表示同样地不同土层土壤种子库密度差异显著。

表 3 灾害干扰受损生态系统土壤种子库物种组成及其占比

Tab.3 Species composition of soil seed bank in the damaged ecosystem by disasters and their percentage

科	种	生活型	物种组成百分比/%								
			CW	CH	CS	MW	MH	MS	SW	SH	SS
大麻科 <i>Trema tomentosa</i>	山黄麻 <i>T. tomentosa</i>	T								0.80	
大戟科 <i>Euphorbiaceae</i>	山乌柏 <i>S. discolor</i>	S			12.38					0.80	
	山麻杆 <i>A. davidii</i>	S		1.37						0.80	
豆科 <i>Fabaceae</i>	胡枝子 <i>L. bicolor</i>	S							0.63		
	山蚂蝗 <i>D. racemosum</i>	S		1.37							
	黄檀 <i>D. hupeana</i>	T		1.37							
锦葵科 <i>Malvaceae</i>	梵天花 <i>U. procumbens</i>	S							0.43		
马鞭草科 <i>Verbenaceae</i>	牡荆 <i>V. negundo</i>	S		1.37							
	紫珠 <i>C. bodinieri</i>	S	1.63							0.80	
蔷薇科 <i>Rosaceae</i>	茅莓 <i>R. parvifolius</i>	S	1.63						0.63		
	牛叠肚 <i>R. crataegifolius</i>	S	3.53	6.85	12.38	8.85	16.67		1.67	6.40	10.20
	山莓 <i>R. corchorifolius</i>	S	2.90						0.43		
黄杨科 <i>Buxaceae</i>	雀舌黄杨 <i>B. bodinieri</i>	S	1.63								
桑科 <i>Moraceae</i>	葡蟠 <i>B. kaempferi</i>	S				3.14					
野牡丹科 <i>Melastomataceae</i>	野牡丹 <i>M. malabathricum</i>	S					16.67				
	地苎 <i>M. dodecandrum</i>	S				11.72			0.43		
酢浆草科 <i>Oxalidaceae</i>	酢浆草 <i>O. corniculata</i>	P							1.47		
胡椒科 <i>Piperaceae</i>	豆瓣绿 <i>P. tetraphylla</i>	P	1.63						5.62		
堇菜科 <i>Violaceae</i>	堇菜 <i>V. verecunda</i>	P							1.47	0.80	
梧桐科 <i>Sterculiaceae</i>	马松子 <i>M. corchorifolia</i>	P							0.43		
仙茅科 <i>Hypoxidaceae</i>	仙茅 <i>C. orchiodes</i>	P							0.84		
三白草科 <i>Saururaceae</i>	鱼腥草 <i>H. cordata</i>	P							2.71		
伞形科 <i>Umbelliferae</i>	积雪草 <i>C. asiatica</i>	P		2.74		14.57			2.23	4.80	
	天胡荽 <i>H. sibthorpioides</i>	P							1.67	2.40	
毛茛科 <i>Ranunculaceae</i>	毛茛 <i>R. japonicus</i>	P	1.63						0.63		
茜草科 <i>Rubiaceae</i>	茜草 <i>R. cordifolia</i>	P	1.63						0.84	0.80	
	蛇莓 <i>D. indica</i>	P							0.43		
卷柏科 <i>Selaginellaceae</i>	卷柏 <i>S. tamariscina</i>	P							1.05	0.80	
商陆科 <i>Phytolaccaceae</i>	商陆 <i>P. acinosa</i>	P	2.26			14.57			0.43		
十字花科 <i>Cruciferae</i>	败酱 <i>P. scabiosifolia</i>	P							0.84	0.80	
石竹科 <i>Caryophyllaceae</i>	雀舌草 <i>S. alsine</i>	P							2.72		
报春花科 <i>Primulaceae</i>	过路黄 <i>L. christiniae</i>	P	2.90	5.48		20.29	50.00	19.40	4.68	7.20	
唇形科 <i>Labiatae</i>	筋骨草 <i>A. ciliata</i>	P	2.26						0.43		
	牛至 <i>O. vulgare</i>	P		5.48					1.88	6.40	
	铁苋菜 <i>A. australis</i>	A	2.26		12.58				2.23	2.40	9.99
荨麻科 <i>Urticaceae</i>	荨麻 <i>U. fissa</i>	P		2.74		17.44		20.15	2.71	4.80	
	苎麻 <i>B. nivea</i>	S	5.44	5.48					2.51	4.00	10.20
	矮冷水花 <i>P. peploides</i>	A	2.26		12.58				13.42	0.80	
石竹科 <i>Caryophyllaceae</i>	繁缕 <i>S. media</i>	A	2.90	1.37	12.58	3.14		20.15	7.18	2.40	9.99

续表 3

科	种	生活型	物种组成百分比/%								
			CW	CH	CS	MW	MH	MS	SW	SH	SS
禾本科 <i>Gramineae</i>	芒 <i>M. sinensis</i>	P	4.57	2.74		3.14			6.66	16.80	9.70
	淡竹叶 <i>L. gracile</i>	P							1.47	2.40	
	荩草 <i>A. hispidus</i>	A	46.00	50.68	12.58			20.15			
	马唐 <i>D. sanguinalis</i>	A		1.37					4.59	4.00	9.99
菊科 <i>Compositae</i>	大丁草 <i>G. anandria</i>	P							1.47	0.80	
	飞蓬 <i>E. acris</i>	P							0.63		
	野茼蒿 <i>C. crepidioides</i>	A	1.63	1.37					0.43	1.60	9.99
	藿香蓟 <i>A. conyzoides</i>	A							8.22	6.40	
	马兰 <i>K. indicus</i>	P							0.63		
	鼠曲草 <i>P. affine</i>	A		1.37					1.47	7.20	9.99
苋科 <i>Amaranthaceae</i>	凹头苋 <i>A. blitum</i>	A							2.09		
玄参科 <i>Scrophulariaceae</i>	通泉草 <i>M. japonicus</i>	A				3.14			2.51		
藜科 <i>Chenopodiaceae</i>	土荆芥 <i>Y. ambrosioides</i>	A	2.26						0.84		9.99
马齿苋科 <i>Portulacaceae</i>	马齿苋 <i>P. oleracea</i>	A							0.63		
茄科 <i>Solanaceae</i>	龙葵 <i>S. nigrum</i>	A	2.90							0.80	
蓼科 <i>Polygonaceae</i>	蒺藜 <i>P. umbrosum</i>	P	1.63		12.58						
	戟叶蓼 <i>P. thunbergii</i>	A	2.26				16.67	20.15			
莎草科 <i>Cyperaceae</i>	红鳞扁莎 <i>P. sanguinolentus</i>	A							1.26	0.80	9.99
	黑莎草 <i>G. tristis</i>	P	2.26	4.11	12.38				2.23	0.80	
	香附子 <i>C. rotundus</i>	P		2.74					2.23	10.40	

注:A 代表一年生草本;T 代表乔木;P 代表多年生草本;S 代表灌木。

表 4 土壤种子库物种生活型占比

Tab.4 Proportion of life forms in soil seed bank (单位:%)

生活型	次生阔叶林			毛竹林			杉木林		
	CW	CH	CS	MW	MH	MS	SW	SH	SS
一年生草本	35	28	63	20	25	80	27	31	70
多年生草本	39	39	12	50	25	20	58	48	10
灌木	26	28	25	30	50	0	15	17	20
乔木	0	5	0	0	0	0	0	4	0

表 5 各样地土壤种子库物种多样性指数

Tab.5 Species diversity index of soil seed bank in each sample plot

样地类型	Margalef 丰富度指数	Pielou 均匀度指数	Simpson 优势度指数	Shannon-Wiener 多样性指数
CW	4.74 ± 0.29Ba	0.66 ± 0.05Cc	0.24 ± 0.05Ab	2.13 ± 0.11Cb
CH	3.96 ± 0.16Bb	0.69 ± 0.04Cb	0.28 ± 0.04Ba	2.00 ± 0.09Bc
CS	1.37 ± 0.04Ac	1.00 ± 0.03Ba	0.11 ± 0.02Cc	2.20 ± 0.03Ba
MW	2.81 ± 0.24Ca	0.90 ± 0.03Ac	0.14 ± 0.03Bc	2.15 ± 0.07Ba
MH	1.67 ± 0.12Cb	0.90 ± 0.04Ab	0.33 ± 0.04Aa	1.24 ± 0.10Cc
MS	1.12 ± 0.06Cc	1.00 ± 0.09Aa	0.17 ± 0.07Ab	1.79 ± 0.13Cb
SW	7.45 ± 0.33Aa	0.86 ± 0.09Bc	0.05 ± 0.0Cc	3.32 ± 0.22Aa
SH	5.80 ± 0.31Ab	0.87 ± 0.04Bb	0.07 ± 0.0Cb	2.92 ± 0.16Ab
SS	1.21 ± 0.05Bc	1.00 ± 0.12Ca	0.12 ± 0.02Ba	2.49 ± 0.13Ac

注:大写字母表示不同林型相同样地显著差异;小写字母表示相同林型不同样地差异显著。

杉木林。就样地而言,3 种林型 Margalef 丰富度指数由大到小依次为未受损样地、自然恢复样地、受损样地,Pielou 均匀度指数由大到小依次为受损样地、自然恢复样地、未受损样地,差异均显著。次生阔叶林和毛竹林自然恢复样地的 Simpson 优势度指数显著大于受损、未受损样地,而 Shannon-Wiener 多样性指数显著小于受损、未受损样地。

2.4 土壤种子库与土壤理化性质的关系

不同林型土壤理化性质的差异特征详见参考文献[12-14],本文不再赘述。通过分析不同林型土壤种子库密度与土壤理化性质的关系(表 6)发现,次生阔叶林土壤种子库密度与水解氮呈极显著正相关($P<0.01$),与全氮、全磷、有效磷、含水量、孔隙度呈显著正相关($P<0.05$),与 pH 呈显著负相关($P<0.05$);毛竹林土壤种子库密度与有效磷呈极显著正相关($P<0.01$),与有机碳、全氮、全磷、水解氮呈显著正相关($P<0.05$),与 pH 呈显著负相关($P<0.05$);杉木林土壤种子库密度与有机碳、全

氮、全磷、水解氮、有效磷、速效钾和 pH 呈极显著正相关($P<0.01$),与含水量、孔隙度呈显著正相关($P<0.05$)。

由不同林型土壤种子库物种多样性指数与土壤理化性质的相关分析(表 7)可知,除毛竹林 Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数外,3 种林型多样性指数均与有机碳、全氮相关性显著($P<0.05$);仅次生阔叶林 Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数与水解氮、有效磷、速效钾分别呈极显著正相关、极显著负相关($P<0.01$),次生阔叶林和毛竹林 Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数分别与水解氮、有效磷、速效钾呈极显著正相关、极显著负相关($P<0.01$),杉木林多样性指数与水解氮、有效磷、速效钾相关性不显著($P>0.05$);次生阔叶林和毛竹林 Margalef 丰富度指数均与含水量、孔隙度和 pH 呈极显著相关性($P<0.01$),与杉木林多样性指数均与含水量、孔隙度和 pH 呈极显著相关性($P<0.01$)。

表 6 不同林型土壤种子库密度与土壤理化性质的相关性

Tab. 6 Correlation between soil seed bank density and soil physicochemical properties in different forest types

林型	TOC	TN	TP	TK	AN	AP	AK	含水量	孔隙度	pH
次生阔叶林	0.58	0.75 *	0.70 *	-0.15	0.81 **	0.80 *	0.59	0.71 *	0.74 *	-0.71 *
毛竹林	0.77 *	0.78 *	0.76 *	-0.21	0.70 *	0.93 **	0.31	0.37	0.04	-0.69 *
杉木林	0.95 **	0.92 **	0.85 **	-0.07	0.93 **	0.88 **	0.82 **	0.76 *	0.70 *	0.82 **

注: * 表示在 $P<0.05$ 水平相关性显著; ** 表示在 $P<0.01$ 水平相关性显著。TOC 代表有机碳;TN 代表全氮;TP 代表全磷;TK 代表全钾;AN 代表水解氮;AP 代表有效磷;AK 代表速效钾。

表 7 不同林型土壤种子库多样性指数与土壤理化性质的相关性

Tab. 7 Correlation between soil seed bank diversity index and soil physicochemical properties in different forest types

林型	指标	TOC	TN	TP	TK	AN	AP	AK	含水量	孔隙度	pH
次生阔叶林	M	0.91 **	0.96 **	0.59	-0.31	0.81 **	0.86 **	0.84 **	0.95 **	0.96 **	-0.99 **
	P	-0.96 **	-0.91 **	-0.70 *	0.17	-0.89 **	-0.92 **	-0.91 **	-0.89 **	-0.92 **	0.96 **
	S	1.00 **	0.74 *	0.88 **	0.12	0.98 **	0.99 **	0.99 **	0.72 *	0.76 *	-0.83 **
	H	-0.88 **	-0.35	-1.00 **	-0.56	-0.96 **	-0.93 **	-0.94 **	-0.33	-0.38	0.49
毛竹林	M	-0.04	-0.04	-0.95 **	0.15	-0.02	0.23	0.02	0.77 *	0.99 **	-0.88 **
	P	-0.62	-0.62	0.51	0.53	-0.64	-0.81 **	-0.65	-0.17	-0.78 *	0.98 **
	S	0.95 **	0.95 **	0.63	-0.98 **	0.95 **	0.84 **	0.94 **	-0.86 **	-0.31	-0.15
	H	-0.85 **	-0.85 **	-0.80 *	0.90 **	-0.84 **	-0.68 *	-0.83 **	0.96 **	0.53	-0.10
杉木林	M	-0.84 **	0.79 *	-0.26	-0.48	0.38	0.04	0.23	0.99 **	0.96 **	0.99 **
	P	0.94 **	-0.91 **	0.48	0.67 *	-0.58	-0.27	-0.45	-0.99 **	-0.99 **	-0.94 **
	S	0.80 **	-0.74 *	0.19	0.41	-0.31	0.03	-0.15	-0.97 **	-0.93 **	-0.99 **
	H	-0.69 *	0.61	-0.02	-0.25	0.15	-0.20	-0.01	0.91 **	0.86 **	0.99 **

注: * 表示在 $P<0.05$ 水平相关性显著; ** 表示在 $P<0.01$ 水平相关性显著。M、P、S、H 分别代表 Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数、Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数。

3 讨论

3.1 土壤种子库萌发数量特征

种子萌发作为植物生命周期中的开始阶段^[17],对实现种群更新和物种延续具有重要的生物学意义^[18-19]。种子萌发动态反映了种子萌发随时间的变化特征及其对生境的适应策略,通过观察种子萌发动态有助于预测退化生态系统演替、发展的方向^[20]。本研究中土壤种子库的萌发分为快速增长、缓慢增长和稳定3个阶段,这主要是因为实验室条件优越,土壤中存活的种子在适宜的环境条件下再生能力很强并迅速萌发,随着种子萌发过程中对有限资源的竞争,种子萌发数量逐渐减少直至趋于稳定状态^[8]。前人研究发现先锋物种更能适应当地生境特点和物候节律,具有更高的萌发能力^[21]。本研究中未受损样地与自然恢复样地的种子萌发格局有较大差异,主要表现为未受损样地的土壤种子库有2个萌发高峰,自然恢复样地只有1个萌发高峰,而且其持续时间和规模远小于未受损样地的第1个萌发高峰,与陈颖颖^[22]、尚占环等^[23]的研究结果一致。这是因为自然恢复样地土壤种子库主要为外界随机输入,其对环境的适应能力较弱,而未受损样地土壤种子库内的先锋物种在土壤结构稳定时,更适应外界环境,萌发能力较高。本研究中毛竹林受损样地20~40 cm种子萌发密度大于0~10 cm种子库萌发密度,这是由于毛竹林受灾严重,导致土体结构不稳定,不同土层土壤发生扰动,埋藏大量种子的0~10 cm、10~20 cm表层土壤变为20~40 cm土壤,而20~40 cm底层土壤变为0~10 cm土壤。

样地受损情况、环境条件和土壤因子共同影响土壤种子库的萌发密度^[8]。本研究中3种林型土壤种子库密度由大到小依次为未受损样地、自然恢复样地、受损样地,主要原因有以下几点:(1)未受损样地植被类型丰富,具有较完善的乔灌草或灌草组合,植被覆盖率较高,种子库来源丰富;(2)自然恢复样地在长达7年的恢复时间后,植被生态系统得到一定的恢复,但尚未恢复至灾前水平;(3)受损样地刚发生崩塌滑坡,流水侵蚀比较严重,地表大面积裸露,植被覆盖率较低,种子库来源少且不利于种子的保存^[24],因此未受损样地、自然恢复样地种子库密度大于受损样地。本研究中,通过3种林型种

子萌发密度与土壤理化性质的相关分析发现,土壤全氮、全磷、水解氮和有效磷均显著影响种子萌发密度,例如,杉木林和次生阔叶林因灾害发生前受到人工施肥的影响,土壤养分含量高于毛竹林,有利于种子萌发植物过程中所需矿质元素的吸收、转化和积累,进而导致其种子萌发密度高于毛竹林^[25]。3种林型物种多样性指数与土壤理化性质的相关分析表明,不同土壤理化因子对种子库物种多样性指数具有一定程度的影响,这是因为不同物种种子萌发所需的外界环境条件不同,养分、含水量、孔隙度和pH高低均会影响种子萌发,从而引起物种多样性差异。因此对于土壤较为贫瘠的样地,后期恢复中可采取适当施肥的手段改善土壤养分,有利于土壤种子库的萌发。

3.2 土壤种子库物种组成及多样性

本研究中,3种林型共计萌发37科61种植物,萌发物种以菊科和禾本科草本植物为主,这是因为菊科和禾本科植物种子较小,极易传播,是典型的先锋植物物种,在植被恢复中占据主导优势^[26]。相关研究表明乔木是群落功能维持的主要承担者,灌木和草本均次于乔木^[28],但本研究中种子库萌发物种以多年生草本为主,乔木较少出现,仅在次生阔叶林和杉木林自然恢复样地占6%、3%,这与赵凌平等^[27]的研究成果一致。这种情况的出现与乔木种子的萌发时间和繁殖策略有关,乔木种子萌发时间较长且萌发格局为缓慢萌发型^[29],而此次种子萌发实验周期较短,未能达到让乔木物种全部顺利萌发的条件。

物种多样性是生态系统的重要特征,提供了生态系统功能运行和维持的生物基础和支撑条件^[30],土壤种子库物种多样性指数通过综合反映物种丰富度和均匀性的大小,代表着群落更新与恢复能力的大小。本研究中次生阔叶林和杉木林Margalef丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数总体上均显著大于毛竹林,这表明次生阔叶林和杉木林群落更新和恢复力较大,毛竹林群落更新与恢复力最低。这主要是由海拔高度、地形坡度及植被覆盖度等因素造成的^[31]。毛竹林因坡度较陡、植被覆盖度低,极易在强降雨作用下诱发滑坡等自然灾害,导致土壤种子库而大量流失;同时前人发现海拔高度显著影响土壤种子库物种丰富度和密度,呈现随海拔升高而逐渐减少的规律^[32],由此推测海拔较高的毛竹林

种子库物种丰富度和密度下降。此外,3 种林型 Margalef 丰富度指数与杉木林 Shannon-Wiener 多样性指数由大到小依次为未受损样地、自然恢复样地、受损样地,差异显著。这是因为受损样地土壤结构被完全破坏,土壤种子库严重丧失,虽然经过长达 7 年的自然恢复,种子库得到了一定恢复,但未达到未受损阶段的初始水平,这表明研究区土壤种子库自然恢复速度较慢且效果较差,后期应对受损森林尤其是毛竹林采取人为引种和工程措施等手段促进灾区受损森林生态系统恢复。

本文分析了洪涝灾害 3 种致损森林土壤种子库的动态萌发数量特征、物种多样性特征及其与土壤理化性质间的关系,但缺乏种子萌发与地上植被、土壤酶活性等因子的相关性研究,下一步可以具体分析土壤酶活性等环境因子与土壤种子库演替的作用机制,以期对灾区生态恢复提供理论与数据支撑,从而促进灾区受损植被生态系统的恢复与重建。

4 结论

本文通过研究洪涝灾害 3 种致损森林土壤种子库自然恢复过程中的变化特征,得出如下结论:

(1) 3 种林型土壤种子库萌发数量不同,由大到小依次为未受损样地、自然恢复样地、受损样地,这表明在自然恢复进程中,受损样地植被生态系统得到一定的恢复但尚未恢复到初始水平。

(2) 3 种林型不同样地萌发物种均以易传播的菊科和禾本科为主,表明菊科和禾本科是研究区典型的先锋植物物种,在植被恢复中占据主导优势。

(3) 毛竹林由于受洪涝灾害影响较杉木林、次生阔叶林严重,其土壤种子库 Margalef 丰富度指数与 Shannon-Wiener 多样性指数均最低。

(4) 土壤种子库密度、物种多样性与土壤理化性质密切相关,3 种林型种子库密度均受到全氮、全磷、水解氮和有效磷等土壤养分的显著影响,物种多样性均受到土壤理化性质变化的影响,因此可通过改善土壤养分对研究区进行植被恢复。

后期在对研究区进行治理时,可对研究区自然恢复样地人为输入乔木种子雨,形成更为稳定的生态系统,促进其自然恢复进程;同时加强对毛竹林的恢复治理,采取人为引种先锋物种和梯级平整、降低坡度等工程措施对毛竹林进行恢复,以促进其生态

系统功能与环境的修复。

参考文献 (References)

- [1] 慎璐璐,杨艳芬,吴晶,等. 黄河流域极端气候事件时空变化规律[J]. 水土保持研究, 2022, **29**(2): 231 - 242. [SHEN Lulu, YANG Yanfen, WU Jing, et al. Spatial and temporal variation characteristics of extreme climate events in the Yellow River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, **29**(2): 231 - 242] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2022.02.015
- [2] 李国旗,邵文山,赵盼盼,等. 封育对荒漠草原两种植物群落土壤种子库的影响[J]. 草业学报, 2018, **27**(6): 52 - 61. [LI Guoqi, SHAO Wenshan, ZHAO Panpan, et al. Effects of enclosure on the soil seed bank of two plant communities on the desert steppe [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, **27**(6): 52 - 61] DOI: 10.11686/cyxb2017274
- [3] WANG Ning, HE Xinyue, ZHAO Fuwang, et al. Soil seed bank in different vegetation types in the Loess Plateau region and its role in vegetation restoration [J]. Restoration Ecology, 2020, **28**(S1): A5 - A12. DOI: 10.1111/rec.13169
- [4] ESMAILZADEH O, HOSSEINI S M, TABARI M, et al. Persistent soil seed banks and floristic diversity in fagus orientalis forest communities in the hyrcanian vegetation region of Iran [J]. Flora, 2011, **206**(4): 365 - 372. DOI: 10.1016/j.flora.2010.04.024
- [5] 赵盼盼,李国旗,邵文山,等. 围封对荒漠草原区沙芦草群落土壤种子库及地上植被的影响[J]. 草业学报, 2018, **27**(1): 42 - 52. [ZHAO Panpan, LI Guoqi, SHAO Wenshan, et al. Influence of herbivore exclusion on the soil seed bank and the aboveground vegetation characteristics of *Agropyron mongolicum* dominant desert steppe grassland [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, **27**(1): 42 - 52] DOI: 10.11686/cyxb2017101
- [6] GIORIA M, PYŠEK P. The legacy of plant invasions: Changes in the soil seed bank of invaded plant communities [J]. BioScience, 2016, **66**(1): 40 - 53. DOI: 10.1093/biosci/biv165
- [7] 牛瑞芳,吴铁航,柴宝峰. 黄土高原亚高山草地退化对土壤种子库的影响[J]. 草地学报, 2021, **29**(5): 972 - 981. [NIU Ruifang, WU Tiehang, CHAI Baofeng. Effects of subalpine grassland degradation on soil seed bank in Loess Plateau [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, **29**(5): 972 - 981] DOI: 10.11733/j.issn.1007 - i0435.2021.05.014
- [8] BAO F, ELSEY - QUIRK T, ASSIS M D, et al. Seed bank of seasonally flooded grassland: Experimental simulation of flood and post - flood [J]. Aquatic Ecology, 2017, **52**(1): 93 - 105. DOI: 10.1007/s10452 - 017 - 9647 - y
- [9] GE Xiuli, LIU Jian, WANG Renqing. Effects of flooding on the germination of seed banks in the Nansi Lake wetlands, China [J]. Journal of Freshwater Ecology, 2013, **28**(2): 225 - 237. DOI: 10.1080/02705060.2012.729494

- [10] HOLZEL N, OTTE A. Inter - annual variation in the soil seed bank of flood - meadows over two years with different flooding patterns [J]. 2004, **174** (2): 279 - 291. DOI: 10.1023/B:VEGE.0000049108.04955.e2
- [11] LEE H, ALDAY J G, CHO K H, et al. Effects of flooding on the seed bank and soil properties in a conservation area on the Han River, South Korea [J]. Ecological Engineering, 2014, **70** (5): 102 - 113. DOI:10.1016/j.ecoleng.2014.04.014
- [12] 李松阳, 余杭, 罗清虎, 等. 灾害干扰受损区自然恢复初期土壤物理性质的变化特征[J]. 水土保持学报, 2020, **34** (5): 162 - 168. [LI Songyang, YU Hang, LUO Qinghu, et al. Change characteristics of soil physical properties at the initial natural recovery stage in disaster disturbed and damaged areas [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, **34** (5): 162 - 168] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2020.05.023
- [13] 罗清虎, 吴建召, 崔羽, 等. 洪涝灾害干扰下受损自然恢复林地土壤基本性状及分形维数特征[J]. 应用与环境生物学报, 2019, **25** (1): 29 - 37. [LUO Qinghu, WU Jianzhao, CUI Yu, et al. Characteristics of soil properties and fractal dimensions of destroyed and naturally restored forest land under flood disaster disturbance [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2019, **25** (1): 29 - 37] DOI: 10.19675/j.cnki.1006 - 687x.2018.04032
- [14] 余杭, 罗清虎, 李松阳, 等. 灾害干扰受损森林土壤的碳、氮、磷初期恢复特征与变异性[J]. 山地学报, 2020, **38** (4): 532 - 541. [YU Hang, LUO Qinghu, LI Songyang, et al. Initial recovery characteristics and variability of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in the damaged forests under disaster disturbance [J]. Mountain Research, 2020, **38** (4): 532 - 541] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 - 2786.000531
- [15] 崔羽, 贺静雯, 刘颖, 等. 红壤区灾害受损不同林型恢复过程中土壤微生物群落对碳源的利用[J]. 应用与环境生物学报, 2019, **25** (4): 831 - 837. [CUI Yu, HE Jingwen, LIU Ying, et al. Utilization of carbon sources by soil microbial communities of different forest types damaged by flood - induced disasters in red soil regions [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2019, **25** (4): 831 - 837] DOI: 10.19675/j.cnki.1006 - 687x.2018.12003
- [16] LOVELL M C, RIDEOUT - HANZAK S, RUPPERT D E, et al. Soil seed banks in stock - piled topsoils in the western Rio Grande Plains, Texas [J]. Ecological Restoration, 2018, **36** (3): 226 - 237. DOI: 10.3368/er.36.3.226
- [17] HUANG Xiaolong, TIAN Tian, CHEN Jingzhong, et al. Transcriptome analysis of *Cinnamomum migao* seed germination in medicinal plants of southwest China [J]. BMC Plant Biology, 2021, **21** (1): 270 - 290. DOI: 10.1186/s12870 - 021 - 03020 - 7
- [18] OLFF H, PEGTEL D M, VAN GROENENDAEL J M. Germination strategies during grassland succession [J]. Journal of Ecology, 1994, **82** (1): 69 - 77. DOI: 10.2307/2261387
- [19] MATHIAS A, KISDI É. Adaptive diversification of germination strategies [J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2002, **269** (1487): 151 - 155. DOI: 10.1098/rspb.2001.1867
- [20] 张起鹏, 王建, 赵成章, 等. 高寒干旱草原披针叶黄华植物群落土壤种子库与地上植被的关系[J]. 生态学报, 2017, **37** (14): 4619 - 4626. [ZHANG Qipeng, WANG Jian, ZHAO Chengzhang, et al. Relationships between the soil seed bank and above - ground vegetation of a *Thermopsis lanceolata* community in degraded alpine arid grasslands [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37** (14): 4619 - 4626] DOI: 10.5846/stxb201604100654
- [21] GARWOOD N C. Seed germination in a seasonal tropical forest in Panama: A community study [J]. Ecological Monographs, 1983, **53** (2): 159 - 181. DOI: 10.2307/1942493
- [22] 陈颖颖, 吴自荣, 潘萍, 等. 飞播马尾松林土壤种子库的萌发特征及其与土壤理化性质的关系[J]. 土壤通报, 2016, **47** (1): 92 - 97. [CHEN Yingying, WU Zirong, PAN Ping, et al. The germination characteristics of soil seed bank and its relationship with soil properties in aerially - seeded *pinus massoniana* plantations [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, **47** (1): 92 - 97] DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2016.01.015
- [23] 尚占环, 龙瑞军, 马玉寿, 等. 黄河源区退化高寒草地土壤种子库: 种子萌发的数量和动态[J]. 应用与环境生物学报, 2006, **12** (3): 313 - 317. [SHANG Zhanhuan, LONG Ruijun, MA Yushou, et al. Soil seed banks of degraded alpine grassland in headwater region of the Yellow River: Quantities and dynamics of seed germination [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2006, **12** (3): 313 - 317] DOI: 10.3321/j.issn:1006 - 687X.2006.03.004
- [24] 罗超, 郭小平, 冯昶栋, 等. 乌海周边土壤种子库特征及其与地上植被和土壤因子的关系[J]. 草业学报, 2021, **30** (11): 13 - 28. [LUO Chao, GUO Xiaoping, FENG Changdong, et al. The characteristics of the soil seed bank in Wuhai and surrounding areas and the relationship with vegetation and soil factors [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, **30** (11): 13 - 28] DOI: 10.11686/cyxb2020410
- [25] HE Mengxuan, LYU Lingyue, LI Hongyuan, et al. Analysis on soil seed bank diversity characteristics and its relation with soil physical and chemical properties after substrate addition [J]. PLoS ONE. 2016, **11** (1): e0147439. DOI: 10.1371/journal.pone.0147439
- [26] 张翔, 王庆安, 方自力, 等. 汶川地震灾区自然植被恢复的先锋植物特征分析[J]. 中国水土保持, 2011, **27** (4): 47 - 50. [ZHANG Xiang, WANG Qing'an, FANG Zili, et al. Analysis of pioneer plant characteristics for natural vegetation restoration in Wenchuan Earthquake areas [J]. Soil and Water Conservation in China, 2011, **27** (4): 47 - 50] DOI: 10.3969/j.issn.1000 -

- 0941.2011.04.019
- [27] 赵凌平, 程积民, 万惠娥. 黄土高原典型草原区草地土壤种子库的动态分析[J]. 水土保持通报, 2008, **28**(5): 60–65. [ZHAO Lingping, CHENG Jimin, WAN Huie. Dynamic analysis of the soil seed bank for grassland in a typical prairie on the Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, **28**(5): 60–65] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2008.05.036
- [28] 么旭阳, 胡耀升, 刘艳红. 长白山阔叶红松林典型森林群落功能多样性及其与地形因子的关系[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, **42**(10): 95–102. [YAO Xuyang, HU Yaosheng, LIU Yanhong. Functional diversity of typical broad-leaved Korean pine forest communities in Changbai Mountains and its relationship with topographical factors [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2014, **42**(10): 95–102] DOI: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.10.048
- [29] 冉春燕, 陶建平, 宋利霞. 亚热带常绿阔叶林几种乔木种子萌发特性研究[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2005, **27**(6): 753–756 + 776. [RAN Chunyan, TAO Jianping, SONG Lixia. A comparative study on seed germination characteristics of several tree species in subtropical evergreen broad-leaf forests [J]. Journal of Southwest Agriculture University (Natural Science), 2005, **27**(6): 753–756 + 776] DOI: 10.3969/j.issn.1673–9868.2005.06.002
- [30] 张继义, 赵哈林, 张铜会, 等. 科尔沁沙地植被恢复系列上群落演替与物种多样性的恢复动态[J]. 植物生态学报, 2004, **28**(1): 86–92. [ZHANG Jiyi, ZHAO Halin, ZHANG Tonghui, et al. Dynamics of species diversity of communities in restoration processes in Horqin sandy land [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, **28**(1): 86–92] DOI: 10.17521/cjpe.2004.0013
- [31] 孙超, 曹颀, 王昕洲, 等. 地形因素与地质灾害分布相关性分析[J]. 河北地质大学学报, 2020, **43**(1): 57–60. [SUN Chao, CAO Yi, WANG Xinzhou, et al. Analysis of correlation between topographic factors and distribution of geological hazards [J]. Journal of Hebei Geo University, 2020, **43**(1): 57–60] DOI: 10.13937/j.cnki.hbdzdx.2020.01.010
- [32] 于顺利, 方伟伟. 种子地理学研究的新进展[J]. 植物生态学报, 2012, **36**(8): 918–922. [YU Shunli, FANG Weiwei. New advances in seed geography [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, **36**(8): 918–922] DOI: 10.3724/SP.J.1258.2012.00918

Variation of Soil Seed Bank in Natural Restoration Processes of Different Types of Forests Disturbed by Floods

GAO Ruoyun^{1,2,3}, YANG Liusheng^{1,2,3}, LUO Qinghu¹, WANG Xue¹, LIN Yongming^{1,2,3*}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Conservancy, Chengdu 610041, China;

3. Key Laboratory for Forest Ecosystem Process and Management of Fujian Province, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Investigation on the changes in the processes of natural restoration from damaged ecosystems is a prerequisite for predicting the progress and direction of vegetation succession, and guiding the restoration and reconstruction of ecosystems. In June 2010, heavy floods in Nanping City, Fujian Province, China caused large scale landslides, debris flows and other natural disasters, resulting in serious damages in local forest lands. In this study, secondary broad-leaved forest, Chinese fir forest and bamboo forest were selected for investigation of soil seed bank changes after flood events. Field surveys and laboratory experiments were conducted and then it analyzed the germination dynamic, quantitative characteristics, species composition and diversity of soil seed banks in damaged plots, natural restoration plots, undamaged plots, separately. The results showed that: (1) The germination process of soil seed bank included three stages, which were defined as rapid, slow and stable processes. The average density of soil seed banks in all forest types decreased with the increase of soil depth, showing obvious surface accumulation. (2) The germinated species in the soil seed bank of three types of forests

were mainly composed of easily spread *Compositae* and *Gramineae*, and dominated by perennial and annual herbs. (3) The species diversity index was higher in Chinese fir forest than one in secondary broad-leaved forest, whereas it was the lowest in the bamboo forest. The Margalef richness index of all types of forest and the Shannon-Wiener diversity index of Chinese fir forest were highest in undamaged plot, intermediate in natural restoration plot, and lowest in damaged plot. (4) Correlation analysis showed that soil seed bank densities of all types of forest were mainly affected by total nitrogen, total phosphorus, hydrolyzed nitrogen, available phosphorus and pH, and soil bank species diversity of all forest types was affected by soil physicochemical properties. The results indicated that the disasters induced by flood seriously damaged soil seed bank, which was hard to recover during the natural recovery process. Artificial introduction of local dominant species and soil nutrients improvement should be used to promote the recovery of the soil seed bank in damaged area. This study provides a theoretical reference for the restoration and reconstruction of damaged forest ecosystem.

Key words: floods; soil seed bank; natural restoration; species diversity; Fujian; Nanping