

引用格式: 石成华, 李奇, 罗清虎, 过怡婷, 林勇明. 福建南平市洪涝灾害致损森林土壤种子库与地上植被及土壤性质的关系[J]. 山地学报, 2024, 42(5): 648-661.

SHI Chenghua, LI Qi, LUO Qinghu, GUO Yiting, LIN Yongming. Relationship between damaged soil seed bank and aboveground vegetation and soil properties in post-flooding forests in Nanping City, Fujian Province, China [J]. Mountain Research, 2024, 42(5): 648-661.

## 福建南平市洪涝灾害致损森林土壤种子库与地上植被及土壤性质的关系

石成华, 李奇, 罗清虎, 过怡婷, 林勇明\*

(福建农林大学 a. 菌草与生态学院; b. 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:** 土壤种子库是种子植物漫长进化历程中的一项生存策略。关于灾后土壤种子库的前期研究, 多侧重于地震、火灾、荒漠化等灾后各阶段种子库特征、时空变化、萌发特性及其与植被恢复的关联。洪涝灾害对生态系统中土壤种子库的破坏影响长期且持续, 导致种子存活与萌发能力受损, 相关研究难度、周期和成本的增加, 限制了洪涝灾害后生态系统中土壤种子库与地上植被及土壤因子的相关研究。本文以闽北森林的受损样地、自然恢复样地、未受损样地为研究对象, 利用相关性和典范对应分析法分析不同恢复程度样地的土壤种子库、地上植被群落以及土壤理化性质。研究结果表明: (1) 在不同恢复阶段中, 未受损样地的 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数均高于自然恢复样地与受损样地, Simpson 优势度指数则最低; 自然恢复样地与受损样地土壤种子库的相似性最高, 未受损样地与受损样地的相似性最低; 3 种样地土壤种子库与地上植被的相似性均较低, 但自然恢复样地相似性指数高于未受损样地及受损样地。 (2) 各样地土壤种子库密度与土壤因子的相关性存在差异, 但其与多数因子间具有显著的相关关系。 (3) 土壤种子库物种分布与土壤因子的典范对应分析 (Canonical Correspondence Analysis, CCA) 表明, 自然恢复样地对土壤种子库物种分布影响较大的环境因子依次为: 土壤有机碳、全磷、速效钾、黏粒含量; 未受损样地的则为全钾、全磷、水解氮、速效钾以及土壤有机碳含量。未受损样地土壤种子库分布与土壤因子的排序效果更好, 而自然恢复样地不理想。本研究可为预测受损森林的演变过程提供理论参考。

**关键词:** 土壤种子库; 洪涝灾害; 土壤性质; 地上植被; 典范对应分析 (CCA)

**中图分类号:** S718.5

**文献标志码:** A

土壤种子库, 即土壤表层及内部具有生命力的种子集合<sup>[1]</sup>。它是植被更新、演替的重要基础<sup>[2]</sup>, 构成了植物种群生命周期中的一个关键阶段。作为种子植物漫长进化历程中的一项生存策略, 当植被遭受外界剧烈干扰, 尤其是在生存环境遭遇重创后<sup>[3-4]</sup>, 土壤中潜藏的、具有恢复潜力的种子便成为

植被复苏与生长的物种源泉。土壤种子库对植被恢复、生物多样性保护、预测植被演替的过程和方向发挥关键指标性作用<sup>[5]</sup>, 是植被生态学和生态恢复研究的重点领域<sup>[6]</sup>。

土壤种子库的构成及其动态变化深受周边土壤环境因子的影响<sup>[7]</sup>。土壤质地与种子库呈显著正

**收稿日期** (Received date): 2023-11-07; **改回日期** (Accepted date): 2024-09-03

**基金项目** (Foundation item): 福建省自然科学基金 (2021J01060); 国家自然科学基金 (42071132) [Natural Science Foundation of Fujian Province (2021J01060); National Natural Science Foundation of China (42071132)]

**作者简介** (Biography): 石成华 (1998-), 男, 甘肃武威人, 硕士研究生, 主要研究方向: 自然资源管理。[SHI Chenghua (1998-), male, born in Wuwei, Gansu Province, M. Sc. candidate, research on natural resources management] E-mail: 2181035335@qq.com.

\* **通讯作者** (Corresponding author): 林勇明 (1982-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 恢复生态学。[LIN Yongming (1982-), male, Ph. D., professor, research on restoration ecology] E-mail: monkey1422@163.com.

相关,而土壤孔隙度则与种子库负相关<sup>[8-9]</sup>。土壤全氮(TN)、全磷(TP)等土壤养分含量与土壤种子库参数之间的关系更为复杂<sup>[10-12]</sup>。因此,深化土壤因子与种子库之间的关系研究,对理解土壤性质与土壤种子库的相互作用机制至关重要。

在全球气候变化的大背景下,极端气候事件如洪涝灾害频发<sup>[13]</sup>,干扰森林生态环境,造成严重的土壤侵蚀、植被破坏和种子库丧失,影响地上植被的恢复和多样性<sup>[14-15]</sup>。正确评估受损植被土壤种子库的自然恢复潜力,综合考虑多种环境因子,对于开展洪涝灾害后植被恢复工作至关重要。然而,国内外关于灾后土壤种子库的研究,前期主要集中于地震<sup>[16]</sup>、火灾<sup>[17]</sup>、荒漠化<sup>[18]</sup>等灾后不同时期种子库的特征、时空变化规律、萌发属性及其与地被植物的相互关系<sup>[19]</sup>等的探讨,而对洪涝灾害下受损生态系统的土壤种子库与植被及土壤间作用尚缺乏深入理解。

2010年6月,中国福建省南平市遭遇了百年一遇的持续性强降雨,导致严重洪涝灾害,并诱发山体滑坡、泥石流等地质灾害,森林资源遭受重创,其中以毛竹林、杉木林和次生阔叶林3种林型受损最为严重<sup>[20]</sup>。尽管已有研究涉及南平受灾区3种受损

林型生态恢复初期土壤理化性质<sup>[21]</sup>、土壤微生物群落变化<sup>[22]</sup>、土壤养分<sup>[23]</sup>等方面,但这些研究并未涉及土壤种子库与地表植被和土壤性质的关系,难以定量评估土壤种子库在植被更新演替中的作用,以及土壤性质在土壤种子库与植被恢复过程中的影响,从而限制了对受损植被恢复机制的深入理解及恢复策略的合理制定。

本研究以灾后南平市3种主要不同恢复程度森林为研究对象,通过设置标准样地,调查分析土壤理化性质和地上植被组成,运用相关性分析和典范对应分析等方法,探讨洪涝灾害后土壤种子库与地上植被、土壤性质之间的内在联系,揭示受损森林恢复时土壤种子库对地上植被和土壤性质动态变化的响应机制,进而加深对受自然灾害干扰后植被群落恢复过程的认识,研究结果可为南方地区遭受洪涝灾害影响的植被修复与重建工作提供理论支持。

## 1 研究方法

### 1.1 研究地概述

南平市位于福建省北部,武夷山北段东南侧,地理位置为26°15'~28°19'N, 117°00'~119°17'E(图

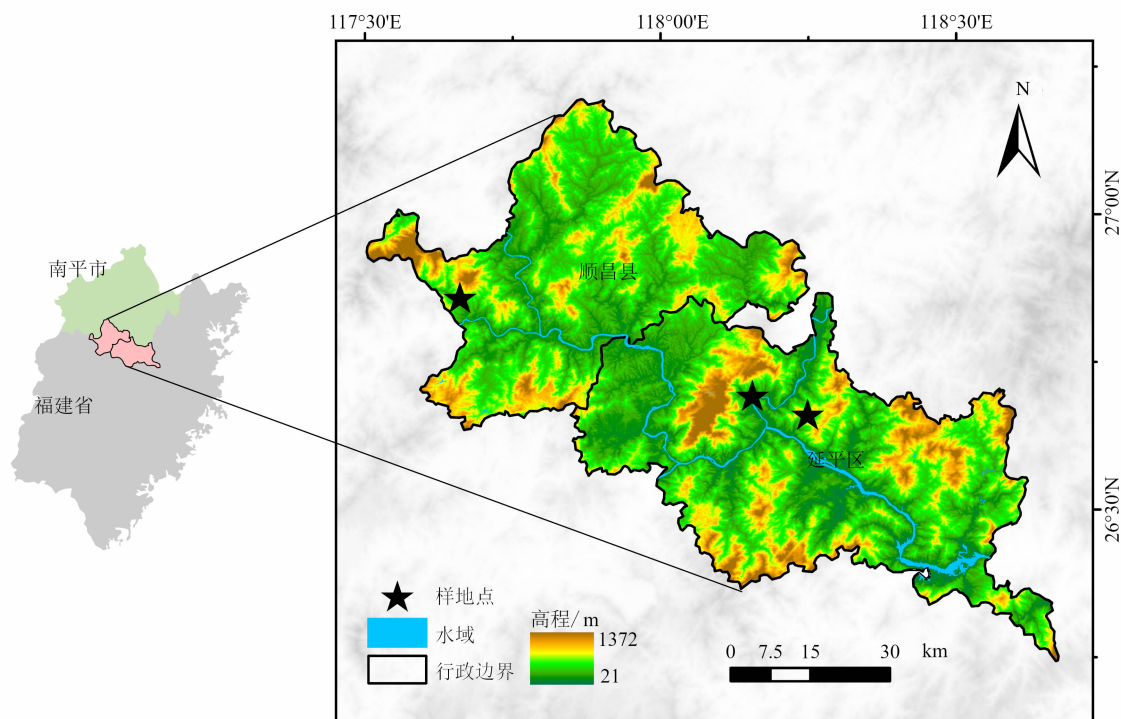


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of the research

1)。该研究区位于中亚热带季风湿润气候带,年平均气温 17.9℃~21.2℃,年均降水量为 1430~2032 mm,主要降水时段为 3—7 月。南平地区作为中国南部三大杉木主要林区之一,拥有极为丰富的植被资源,森林覆盖率超过 76.46%。在构造活动的影响下,区内地貌以山地和丘陵为主,山间盆地河谷交错分布,高差大;地表剖面切割剧烈,河流众多,水系发育良好;受地形、气候、植被等因素的影响,河流的径流速度快,易发生暴涨暴落。

1.2 样地设置

根据洪涝受灾区实地考察情况,本研究选取在南平市 2010 年受洪涝灾害干扰后的 3 种林型为研究对象<sup>[24]</sup>,于 2010 年 7 月分别设置 3 块长 40 m、宽 30 m 的受损样地,同时在邻近区域设置林分年龄和覆盖范围一致的未受损样地,自然恢复样地为受损样地自然更新演替 7 年后演变而成。用手持式 GPS 系统记录样地的基本信息,如经纬度、海拔、坡度、坡向等,样地基本概况详见课题组文献<sup>[25]</sup>。

1.3 地上植物群落调查

在不同恢复程度森林中,沿坡面各设 1 块 30 m×40 m 的样地<sup>[26-27]</sup>。按 12 m 长的间隔将样地分为上、中、下坡并分别设 10 m×10 m 样方。在每样方四角随机取 2 个 5 m×5 m 的样方做灌木调查,再选取 3 个 2 m×2 m 大小的样方调查草本植被。调查内容包括:(1)乔木样方,即乔木种及各种数量、胸径、盖度、平均高度;(2)灌木和草本样方,即植被种类、平均高度、平均盖度、株丛数、总体盖度。

1.4 土壤样品采集与处理

分别在自然恢复样地与未受损样地的 3 个草本

调查样方附近挖取 20 cm×40 cm(宽×深)的土壤切面,在受损样地的 2 个草本调查样方附近挖取同等大小的土壤切面,分 3 层进行土壤取样(0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm),并用 100 cm<sup>3</sup> 规格环刀取 0~20 cm 土层的环刀样(环刀样和土样均重复取样 3 个)。所有样地土壤样品共计取样 6×3×3×3+3×3×2×3=216 个,环刀共计取样 6×3×3+3×2×3=72 个。将所有取回的土样在实验室内经自然风干处理 7 天,然后将土样分为两份,分别用于做土壤种子库萌发实验和理化性质测定分析。

1.5 土壤种子库萌发

为保证种子萌发实验的可靠性,实验分别于 2010 年 9 月和 2017 年 9 月在学校所属田间实验场地进行(室温 25℃~30℃),实验场地能有效地遮风避雨,且无其他植被干扰,保证种子库萌发的准确性。萌发方法具体步骤详见课题组文献<sup>[28-30]</sup>。植物萌发数量在连续 20 天内保持稳定无变化则基本认定种子萌发结束,种子库萌发实验过程持续大约四个半月,土样品中萌发物种基本鉴定完毕。

1.6 土壤理化性质测定

利用环刀样测量土壤水分、土壤容重和孔隙度;采用马尔文激光粒度分析仪(MS2000),在中国科学院东川泥石流定位站进行了土壤颗粒组成测量;遵循国家行业标准<sup>[31]</sup>,分别测定了土壤有机碳(TOC)、总氮(TN)、总磷(TP)、总钾(TK)、水解氮(AN)、有效磷(AP)、速效钾(AK)的含量以及 pH 值。

1.7 数据处理

运用 Excel 进行数据处理和图表制作,利用

表 1 样地基本概况

Tab. 1 Basic situation of the sample plots

样地	经度	纬度	海拔/m	坡度/(°)	坡向	盖度/%
自然恢复 1 (H1)	118°08'35"E	26°41'39"N	173	38	NE	60
自然恢复 2 (H2)	118°14'59"E	26°39'23"N	367	43	SE	35
自然恢复 3 (H3)	117°39'45"E	26°50'33"N	226	32	NE	52
受损 1 (S1)	118°08'35"E	26°41'39"N	173	38	NE	5
受损 2 (S2)	118°14'59"E	26°39'23"N	367	43	SE	8
受损 3 (S3)	117°39'45"E	26°50'33"N	226	32	NE	10
未受损 1 (W1)	118°08'31"E	26°41'42"N	188	36	NW	88
未受损 2 (W2)	118°15'05"E	26°39'16"N	365	30	NW	65
未受损 3 (W3)	117°39'44"E	26°50'36"N	238	34	NE	72

注:H 表示自然恢复样地;S 表示受损样地;W 表示未受损样地。

SPSS 软件执行单因素方差分析和皮尔逊相关性分析,用典范对应分析<sup>[32]</sup>(CCA)对土壤种子库中的物种进行土壤环境梯度的排序分析。土壤种子库密度按照所取土样换算成每平方米面积后进行计算。

土壤种子库的物种多样性衡量指标包括: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;种子库物种与地被植物的相似性衡量指标为 SC (Sorensen) 相似性指数和 JC (Jaccard) 相似性指数(相似性系数值为 0 ~ 1,随数值的增大相似性增高,差异性降低)。主要计算公式详见参考文献[33]。

2 结果与分析

2.1 土壤种子库及与地上植被的关系

2.1.1 土壤种子库物种组成

对各样地土壤种子库中的物种生活型进行分析可知,草本植物在各样地种子库中占据主要地位且以多年生草本为主,灌木分布较少,乔木物种最少,且不同样地各生活型物种数量不相同。其中,乔木植物仅在自然恢复样地和受损样地中出现,数量相同但自然恢复样地占比高于受损样地(表 2)。

表 2 各样地土壤种子库物种生活型数量  
Tab.2 Number of the species life types in the soil seed bank of each plot

生活型	种子库物种生活型数量/种		
	自然恢复(H)	未受损(W)	受损(S)
一年生草本	11	16	10
多年生草本	14	26	14
灌木	8	11	7
乔木	2	0	2

2.1.2 各样地土壤种子库物种多样性

各样地的土壤种子库物种多样性指标如表 3 所示。总体而言,未受损样地的 Margalef 丰富度指数

最高,为 8.155;自然恢复样地次之,为 6.393;受损样地最低,为 5.964。Shannon-Wiener 多样性指数在各样地呈现出类似 Margalef 丰富度指数的变化趋势特征, $H$  值最大样地为未受损样地(3.366),最小值为受损样地(2.893)。三种恢复程度样地的 Pielou 均匀度指数  $J$  都达到 0.8 以上,说明种子库的物种均匀度都较好,其中未受损样地的 Pielou 均匀度指数  $J$  最高,优于自然恢复样地和受损样地。未受损样地的 Simpson 优势度指数  $D$  最低,说明该样地的种子库中优势物种很少或不明显;不同恢复程度样地的物种数  $S$  表现为未受损样地 > 自然恢复样地 > 受损样地,虽然自然恢复样地与受损样地种子库物种丰富度较低,但 Simpson 优势度指数相近且高于未受损样地,说明这两种样地内优势物种占比高于未受损样地。

2.1.3 土壤种子库之间及其与地上植被的相似性

通过图 2b 中不同恢复阶段样地的土壤种子库与地表植被相似性指数的对比分析,可知 SC 相似性指数为 0.2 ~ 0.263,JC 相似性指数为 0.111 ~ 0.151,且变化趋势基本一致,说明土壤种子库物种与地上植被物种差异性大。自然恢复样地土壤种子库与地上植被相似性最高,SC 相似性指数为 0.263,JC 相似性指数为 0.151,受损样地相似性次之,SC 相似性指数为 0.207,Jaccard 相似性指数为 0.115,未受损样地相似性最低,SC 相似性指数和 JC 相似性指数分别为 0.2 和 0.111。

在不同样地土壤种子库之间,自然恢复样地与受损样地土壤种子库的相似性最高,SC 相似性指数为 0.971,JC 相似性指数为 0.943;未受损样地与自然恢复样地的相似性和受损样地的相似性均低于自然恢复样地与受损样地的相似性,表现出一样的变化趋势且其大小相近。

2.1.4 土壤种子库与地上植被物种组成的关系

由表 4 和图 2a 可知,在不同恢复程度下自然恢

表 3 不同样地土壤种子库的物种多样性指标  
Tab.3 Species diversity indicators of the soil seed banks in different plots

种子库	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	物种数/种
自然恢复(H)	6.393	0.825	0.077	2.933	35
未受损(W)	8.155	0.848	0.052	3.366	53
受损(S)	5.964	0.827	0.077	2.893	33

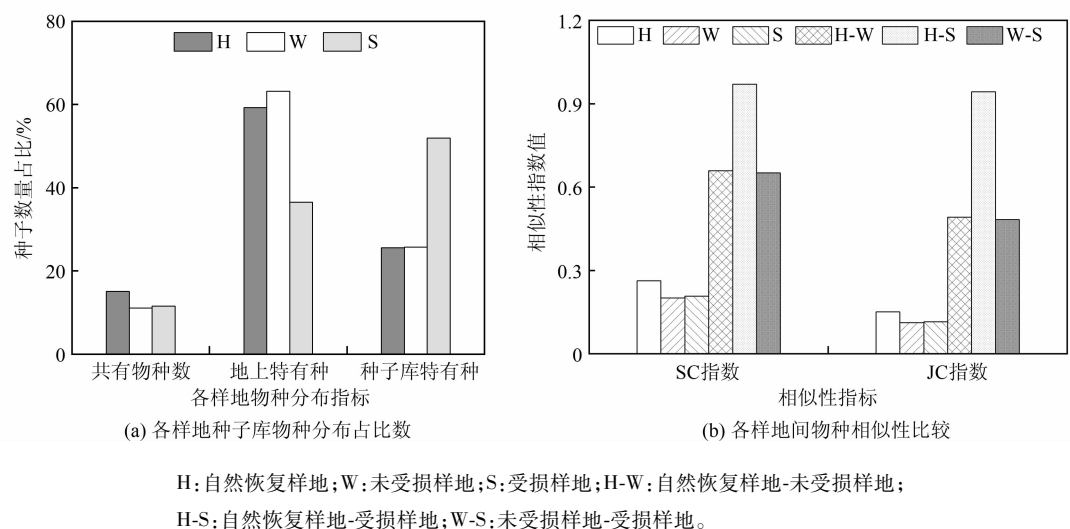


图 2 各样地土壤种子库之间及其与地上植被物种占比和相似性比较

Fig. 2 Comparison of the soil seed banks and their proportions and similarities with aboveground vegetation species in different plots

表 4 各样地土壤种子库与地上植被物种数对比

Tab. 4 Comparison of the soil seed bank and aboveground vegetation species in various plots

样地	地上物种		种子库物种数		共有物种数		地上特有种		种子库特有种	
	数量/个	占比/%	数量/个	占比/%	数量/个	占比/%	数量/个	占比/%	数量/个	占比/%
自然恢复样地(H)	64	74.4	35	40.7	13	15.1	51	59.3	22	25.6
未受损样地(W)	107	74.3	53	36.8	16	11.1	91	63.2	37	25.7
受损样地(S)	25	48.1	33	63.5	6	11.5	19	36.5	27	51.9

复样地及未受损样地均表现为地上植物特有种占比高于土壤种子库特有种,而受损样地土壤种子库特有种占地植物总数的 51% 以上,远高于地上植被特有种。共有物种数占比则是受损样地与未受损样地近似相等且均低于自然恢复样地,这与相似性指数的分析结果相一致。未受损样地地上植物特有种占比为 63.2%,远高于自然恢复样地与受损样地,受损样地种子库特有种占比显著高于自然恢复和未受损样地,说明受损样地在灾害植被受损植被生态恢复过程中种子库存在比自然恢复样地和未受损样地更大的萌发潜力,可在一定程度上促进植被的更新与恢复。

**2.2 土壤种子库密度与土壤各环境因子的相关性**

通过对不同处理样地土壤种子库密度与相应的各土壤性质进行相关性分析(表 5),自然恢复样地土壤种子库密度与 TN 含量、AN 含量、土壤含水量之间存在显著的正相关( $P < 0.05$ ),与土壤容重存在显著负相关关系( $P < 0.05$ );未受损样地土壤种子库密度与环境因素的相关性较小,仅与土壤有机

质含量显示出显著的负相关关系( $P < 0.05$ ),同时与土壤 pH 值呈显著的正相关性( $P < 0.05$ );在受损样地,种子库密度与 TN 和 AN 含量之间存在极显著的负相关( $P < 0.01$ ),与孔隙度呈显著负相关( $P < 0.05$ )。总体上,受损样地和未受损样地之间,各环境因素对土壤种子库密度的影响不明显,但对自然恢复样地的种子库密度有明显的影响。

对洪涝灾害致损森林各环境因子间及土壤种子库密度进行相关性分析(图 3),不同类型的土壤环境因子与土壤种子库密度均有明显的相关性( $P < 0.05$ )。除 TK 含量、砂粒含量和容重外,土壤种子库密度与 TOC 含量、TN 含量、TP 含量、AK 含量、粉粒含量、土壤含水量、孔隙度和 pH 值之间存在极显著的正相关关系( $P < 0.01$ ),而与土壤黏粒含量和分形维数  $D$  之间呈现极显著的负相关( $P < 0.01$ )。各类型土壤养分与土壤物理特性的相关性均较好,其中,TOC 含量与 TN 含量、AN 含量的相关性最高( $P < 0.01$ ),相关系数分别为 0.904 和 0.865;分形维

表 5 各样地土壤理化性质与土壤种子库密度的相关关系

Tab. 5 Correlation between soil physicochemical properties and soil seed bank density in different plots

样地	土壤理化性质与土壤种子库密度的相关系数								
	TOC	TN	TP	TK	AN	AP	AK	黏粒	粉粒
自然恢复样地	-0.106	0.630	0.739 *	0.417	-0.305	0.730 *	0.826 **	0.527	-0.519
未受损样地	-0.769 *	-0.118	0.491	0.175	-0.264	0.340	0.608	-0.500	-0.124
受损样地	-0.519	-0.805 **	0.120	-0.301	-0.848 **	-0.126	-0.572	-0.406	-0.095

样地	土壤理化性质与土壤种子库密度的相关系数							
	砂粒	D	含水量	容重	孔隙度	pH	地上生物量	地下生物量
自然恢复样地	0.337	-0.559	0.767 *	-0.699 *	0.657	0.411	-0.351	-0.230
未受损样地	0.282	-0.380	-0.316	0.637	-0.250	0.780 *	-0.494	-0.336
受损样地	0.201	-0.309	-0.486	0.664	-0.687 *	-0.351	0.397	0.299

注: \* 表示在 0.05 水平上相关性显著; \*\* 表示在 0.01 水平上相关性显著。

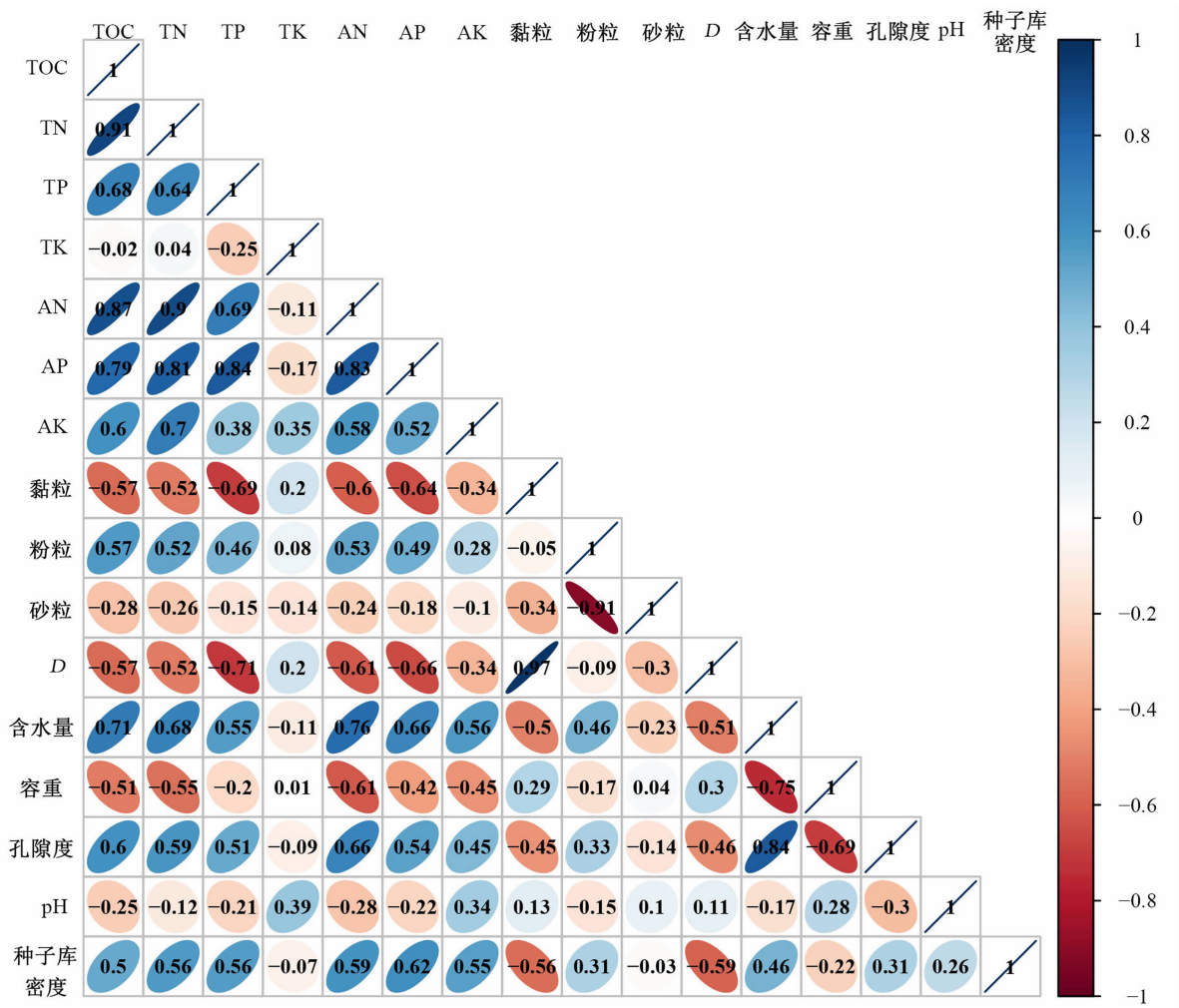


图 3 洪涝灾害致损森林土壤种子库密度与土壤性质的相关性

Fig. 3 Correlation between soil properties and soil seed bank density of the post-flooding forests

数  $D$  与黏粒含量有极显著的正相关( $P < 0.01$ ), 相关系数达 0.978。其他组的两两指数间也存在相关性, 但是相关性都很低。

2.3 土壤种子库物种与土壤环境变量的典范对应分析(CCA)

在典范对应分析(CCA)的排序图中, 箭头代表



土壤环境因素,箭头线条的长短反映了土壤种子库分布与相应土壤因素的相关程度,线条在排序图中的倾斜程度显示了土壤因素与排序轴的相关强度,而箭头所在的象限揭示了土壤因素与排序轴相关性的正负方向<sup>[34]</sup>。

对自然恢复样地土壤环境变量与 CCA 排序轴的相关系数进行分析(表 6):排序前 4 轴的特征值分别为 1.000、0.5685、0.4291 和 0.2730,前 4 轴方差累积贡献率为 38.10%、59.76%、76.10% 和 86.50%。

图 4 与表 6 显示,TN、TP 和黏粒与第 1 轴的相关性最大,相关系数依次是 -0.217、-0.387、0.202;与第 2 轴相关系数较大的是 TOC(-0.158)、TK(-0.023)、AK(-0.099)、AP(-0.123)和 AN(-0.103)。从土壤环境因子与种子库物种的空间分布来看,种子库物种在 CCA 排序图中分布较为集中,沿着第 2 轴分布较为显著,与 TN 的相关性较小于其他环境因子。

对未受损样地土壤环境因子与 CCA 排序轴的相关系数分析结果表明(表 7),排序轴前 5 轴的特征值分别为 0.639、0.589、0.416、0.350 和 0.252,前

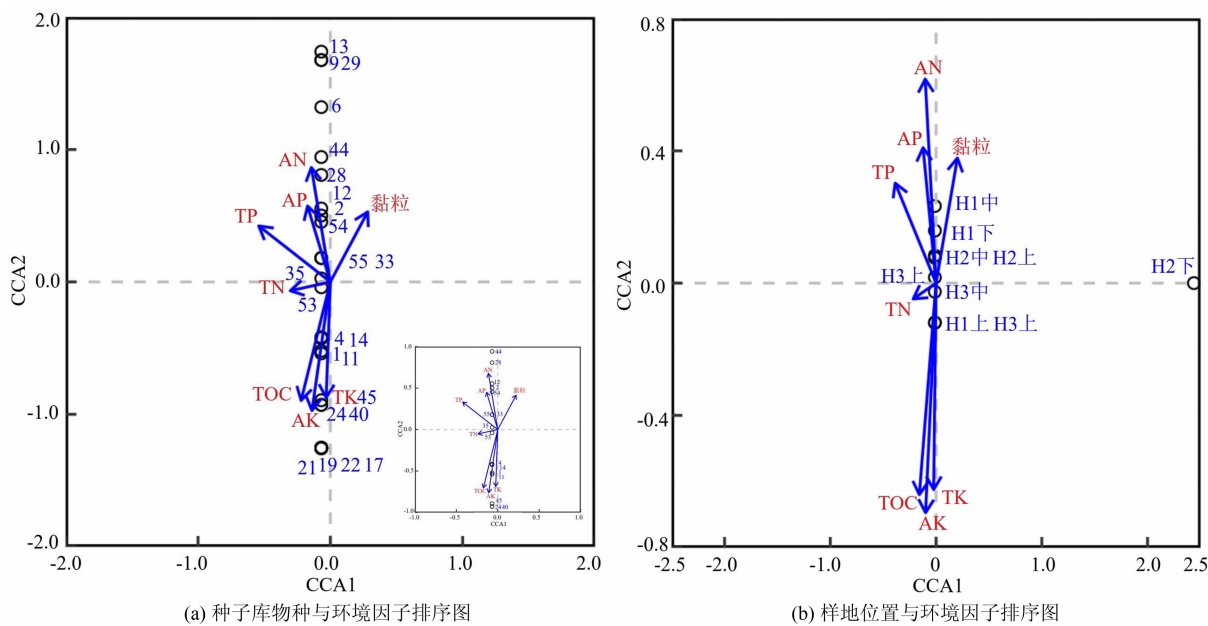
表 6 自然恢复样地土壤环境变量与 CCA 排序轴的相关性系数

Tab. 6 Correlation coefficient between soil environmental factors and CCA ranking axis in naturally recovered plots

环境因子	CCA1	CCA2	CCA3	CCA4
TOC	-0.158	-0.848	-0.254	-0.246
TN	-0.217	-0.063	-0.630	-0.461
TP	-0.387	0.401	-0.639	-0.380
TK	-0.023	-0.828	0.388	-0.094
AN	-0.103	0.818	-0.367	-0.080
AP	-0.123	0.543	-0.682	0.271
AK	-0.099	-0.921	0.126	-0.240
黏粒	0.202	0.501	0.738	0.287
特征值	1.000	0.569	0.429	0.273
物种-环境相关系数	0.381	0.217	0.164	0.104
物种-环境累积贡献率	38.100	59.760	76.100	86.500

4 轴方差累积贡献率为 77.42%,前 5 轴累积贡献率达 87.22%,物种与环境的相关性强,能够很好地解释未受损样地种子库物种分布与环境的关系。

表 7 及图 5 显示,第 1 轴与 TP、AN、黏粒、AK、



1:繁缕;2:过路黄;3:筋骨草;4:牛至;5:山乌柏;6:山麻杆;7:铁苋菜;8:胡枝子;9:山蚂蝗;10:黄檀;11:芒;12:淡竹叶;13:萵草;14:马唐;15:豆瓣绿;16:雀舌黄杨;17:堇菜;18:粗叶梵天花;19:大丁草;20:飞蓬;21:革命菜;22:藿香蓟;23:马兰;24:鼠曲草;25:卷柏;26:土荆芥;27:地蓼;28:戟叶蓼;29:牡荆;30:紫珠;31:马齿苋;32:毛茛;33:茜草;34:茅莓;35:牛叠肚;36:山莓;37:蛇莓;38:龙葵;39:鱼腥草;40:积雪草;41:天胡荽;42:匍匐;43:红鳞扁莎;44:黑莎草;45:香附子;46:商陆;47:败酱草;48:雀舌草;49:马松子;50:仙茅;51:凹头苋;52:通泉草;53:苧麻;54:苎麻;55:矮冷水花;56:野牡丹;57:地念;58:山黄麻;59:酢浆草。

文字:上指上坡;中指中坡;下指下坡;H、S、W 含义见表 1。

图 4 自然恢复样地种子库物种与土壤环境因子 CCA 排序图

Fig. 4 CCA ranking diagram of the species and soil environmental factors in seed bank of the naturally recovered plots

表 7 未受损样地土壤环境变量与 CCA 排序轴的相关性系数

Table 7 Correlation coefficient between soil environmental variables and CCA ranking axis in undisturbed plots

环境因子	CCA1	CCA2	CCA3	CCA4	CCA5
TOC	0.066	0.619	0.244	0.026	0.348
TN	0.260	0.210	0.009	0.782	-0.390
TP	-0.673	-0.377	-0.371	-0.463	-0.145
TK	0.877	0.360	-0.042	0.023	0.035
AN	-0.659	-0.113	-0.035	-0.101	-0.036
AP	-0.398	-0.196	-0.274	0.504	-0.292
AK	0.820	0.215	-0.173	0.216	-0.377
黏粒	0.615	0.358	0.395	0.267	0.460
特征值	0.639	0.589	0.416	0.350	0.252
物种-环境相关系数	0.248	0.229	0.162	0.136	0.098
物种-环境累积贡献率	24.810	47.690	63.840	77.420	87.220

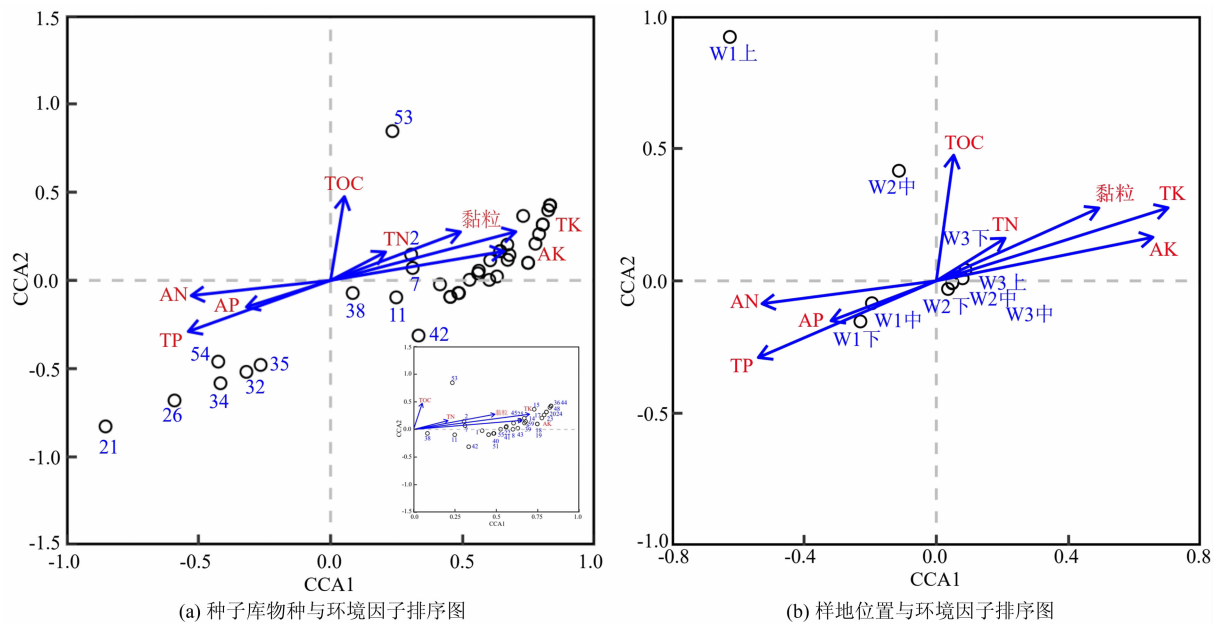


图 5 未受损样地种子库物种与土壤环境变量 CCA 排序图

Fig. 5 CCA ranking diagram of the species and soil environmental variables in seed bank of the undisturbed plots

TK 的相关性最大,其中 TP 和 AN 与轴 1 为负相关关系,TK、黏粒、AK 与第 1 轴具有正相关关系,从左往右 AN 和 TP 含量逐渐降低,土壤黏粒占比增加,TK、AK 含量逐渐增加,与 AP、TN 的相关性小于其他环境因子。TOC 与第 2 轴相关性最大,与之呈正相关关系,2 轴自下向上 TOC 含量升高。未受损样地种子库物种在 CCA 排序中位置分布差异较大,存在集中式分布与分散式分布共存现象,对土壤环境与分布区域具有一定的选择性。

对于受损样地,由于种子库物种种类极少,未能构建与环境因子的 CCA 排序,故未对受损样地做 CCA 分析。

3 讨论

3.1 土壤种子库及与地上植被的关系

土壤种子库是森林生态系统中的一个重要组成部分,在植物群落的物种组成、植被恢复以及更新演



替过程中具有重要的地位<sup>[28]</sup>。本研究表明,不同恢复程度样地土壤种子库之间的物种相似性为自然恢复样地(H)与受损样地(S)土壤种子库的相似性最高,说明受损样地中的植被在恢复过程中受外来种子库干扰较少,其主要依靠自身种子库进行更新演替,这些种子受滑坡覆土作用的影响从表层土壤转移至深层,在恢复过程中原有的深层土壤受土壤侵蚀发生流失,埋藏的种子又重新移动到表层,在适宜条件下萌发,从而导致自然恢复样地(H)与受损样地(S)土壤种子库的相似性最高。未受损样地(W)与自然恢复样地(H)和受损样地(S)相似性低且近似的原因可能是在遭受灾害干扰后,种子库物种在自身适应环境变化和物种竞争筛选下,较少适应受损环境的植物种子能够在该样地中存活和繁殖<sup>[29]</sup>。土壤种子库与地上植被的相似性大小受到植被类型、演替阶段、干扰方式等方面共同作用的影响<sup>[30,35]</sup>。前人研究表明,土壤种子库与地上植被的相似性受到特定环境条件限制和地上植被繁殖方式(营养繁殖体或种子繁殖)的影响<sup>[36]</sup>。本研究中,未受损样地种子库与地上植被相似性程度最低,自然恢复样地的相似性指数均高于未受损样地及受损样地,研究结果与王昌辉<sup>[37]</sup>在长汀红壤侵蚀区得出的种子库与地上植被的研究相似,说明灾害干扰后原有种子库物种组成遭到破坏,在恢复过程中土壤种子库中植物物种逐渐适应了环境演变,且基本不受外来因素干扰,形成稳定的生长环境,使得种子库植物能生长发育,从而与地上植被的相似程度增加。

物种多样性在维持生态系统功能、支持生态恢复等方面具有重要功能<sup>[38]</sup>。土壤种子库的物种多样性指数是衡量植物群落恢复和更新能力的重要指标<sup>[39]</sup>。本研究中不同恢复阶段样地在灾后的 Margalef 丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数从高到低依次为未受损样地、自然恢复样地和受损样地,存在显著差异,究其原因可能是受损样地(S)的种子库因土壤结构经历严重的摧毁而损失巨大,尽管 7 年来在自然条件下生长,种子库有所恢复,但与未受损样地相比仍有显著差距<sup>[39]</sup>,表明实验区的种子库自然修复的进程缓慢,作用不明显。因此,在后续的工作中,可以通过借助人造干预,如人工引种、生态工程等措施,使受灾区的森林生态系统得到更好恢复。

### 3.2 土壤种子库密度与土壤各环境因子的相关性

土壤种子库的结构和数量组成是植物自然恢复过程的重要物质基础,也是决定是否采用人工措施加快植被恢复的重要因素<sup>[8]</sup>。土壤环境因子为地上植被和种子库的生长和发育提供必要的养分和所需的条件,进而影响到土壤种子库物种组成<sup>[40]</sup>。本研究中通过对土壤种子库密度与环境因子的相关性研究发现,不同恢复阶段各样地土壤种子库密度与环境因子的相关性存在差异,但整体上土壤种子库密度与大多数环境因子具有显著的相关关系,研究结论与前人研究不一致<sup>[41-42]</sup>。这可能是由于影响土壤种子库密度的原因有许多,如土壤特性、人类活动、地形特征、海拔、地表植被构成类型等均会成为制约因素。此外,本研究结果表明,TP 含量、土壤黏粒含量、pH 值是土壤种子库密度的最大影响因素。前人研究表明,土壤酸碱度、土壤含水量、土壤微生物等均会对种子的生长产生一定的影响,进而影响种子的存活率<sup>[43]</sup>,在此基础上,由于灾情的干扰,受损生态系统土壤中 P 含量较低,土壤 pH 值较低,土壤结构遭到破坏,导致土壤孔隙度降低,透气性下降,紧实度上升,黏粒含量增大,土壤分形维数和容重都有所提高,造成种子数量降低,进而对种子库储量造成影响。这些土壤环境因子是影响植物种子库和植物自然恢复的重要因子,因此,在今后的植被恢复中需进行更深入的研究。

### 3.3 土壤种子库物种与土壤环境因子的 CCA 分析

CCA 排序可利用环境因素与次序轴线之间的相关性,找出决定植物群落空间分布格局的主要环境因素<sup>[44]</sup>。本研究通过 CCA 分析发现,影响自然恢复样地和未受损样地土壤种子库的主要环境因子为 TOC、TN、TP、TK、AN、AP、AK 和黏粒含量。这与前人研究结果相似,即氮、钾、有机质等是种子库物种多样性的主导因素<sup>[45]</sup>。CCA 的二维排序结果可以得出物种的聚集与分散规律,说明不同植物对不同生长环境的需要<sup>[46]</sup>。本研究 CCA 分析结果表明,自然恢复样地种子库物种分布均匀,受 TOC、TP、AK 和黏粒含量的影响较大;未受损样地种子库存在明显的集散分布,其中 TP、TK、AN、AK 和 TOC 含量为主要影响环境因子。这可能是因为自然恢复样地的种子库处于恢复阶段,种子主要由风、雨水冲刷和人为干扰等外界因素进行传播,传播阻力小,使

得种子库能在样地内均匀分布,而未受损样地生境稳定,物种间的竞争及冠幅的阻滞作用,导致某些物种在特定地区集中分布,从而种子库分布不均匀<sup>[47]</sup>。刘静逸<sup>[48]</sup>对南洞庭湖清理迹地土壤种子库和环境因子进行 CCA 分析,结果表明 TK 含量、TN 含量、TP 含量、AK 含量、PH 值等是土壤种子库物种分布的主要影响因子,与本研究结果相似;但翟付群等对天津蓟运河故道消落带<sup>[49]</sup>的研究中,发现有机质、全盐和含水率是土壤种子库分布的主要影响因子,与此次研究结果不同。这主要是因为不同地区的土壤和植被类型的差异,导致不同的植物适应策略和反应机制的差异,此外梯度、海拔、气候、生物等因素也影响植物群落物种分布。因此,通过对不同类型的环境因素进行综合研究分析,可以为灾后生态环境恢复提供一定的理论依据。

本研究分析了受损森林不同恢复阶段土壤种子库与地上植被及土壤因子间的关系,但土壤种子库样品仅采集单一月份,难以代表样地内的所有种子库,且未考虑土壤酶活性、微生物群落等环境因子,将来可进一步分析土壤种子库随季节的变化特征或年际变化特征与各环境因子之间的相互关系,以期更全面了解灾扰受损森林土壤种子库特征及其对自然植被恢复的贡献作用,进而为灾后生态系统恢复和管理提供科学依据。

## 4 结论

(1)在不同恢复阶段,各样地土壤种子库的 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、物种数  $S$  均表现为未受损样地最大,自然恢复样地次之,受损样地最小;各样地土壤种子库之间的相似性为自然恢复样地与受损样地的土壤种子库相似度高于与未受损样地的相似度,未受损样地与受损样地的相似度最低,不同恢复程度样地土壤种子库与地表植物相似度均较小,从大到小依次为:自然恢复样地、受损样地、未受损样地,这表明受损样地植被得到一定程度的恢复,但依靠自身种子库的恢复效果不明显,需采取人工干预的方式促进恢复。

(2)不同样地的土壤种子库密度与环境因子的相关性存在差异,但整体上土壤种子库密度与大多数环境因子具有显著的相关关系。不同恢复程度样

地土壤种子库密度均主要受 TN 含量、TP 含量、AN 含量、AP 含量和 PH 值的影响,其中 TP 含量、土壤黏粒含量、pH 值是土壤种子库密度的最大影响因素。

(3)土壤种子库和土壤性质的 CCA 分析表明土壤中 TOC、TN、TP、TK、AN、AP、AK 和黏粒的含量会直接影响种子库中不同物种的分布。自然恢复样地和未受损样地的影响因子不同,表明不同恢复阶段下,土壤性质对土壤种子库的影响会发生变化;由于受损样地的种子库数量不足,无法进行 CCA 的分析。在未受损样地中,对土壤种子库的分配和环境因素的排序有较好的效果,表明在相对稳定的环境中,土壤因子对土壤种子库的分布影响相对一致。

因此,在实际治理过程中,自然恢复样地可通过封禁自然演替的方式促进恢复进程;在受损样地可能需要采取更为积极的措施(如改良土壤、种植乡土植物物种)来增加土壤种子库的丰富度和多样性;另外应定期监测土壤种子库的组成和土壤因子的变化,及时调整管理策略促进森林生态系统的保护和恢复。

## 参考文献 (References)

- [1] 常选选. 腾格里沙漠东南缘不同固沙年限人工柠条林土壤种子库动态研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2023: 1-50. [CHANG Xuanxuan. Soil seed bank dynamics in planted Caragana stands with different years of sand fixation at the southeastern edge of the Tengger Desert [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023: 1-50] DOI: 10.27257/d.cnki.gnxhc.2022.000915
- [2] 王红利, 陈辅德, 李军辉. 小陇山林区土壤种子库物种组成与多样性[J]. 林业科技通讯, 2022(7): 67-69. [WANG Hongli, CHEN Fude, LI Junhui. Species composition and diversity of soil seed bank in Xiaolongshan forest area [J]. Forest Science and Technology, 2022(7): 67-69] DOI: 10.13456/j.cnki.lykt.2022.03.16.0002
- [3] ANJU M V, WARRIER R R, KUNHIKANNAN C. Significance of soil seed bank in forest vegetation—a review [J]. Seeds, 2022, 1(3): 181-197. DOI: 10.3390/SEEDS1030016
- [4] 李国旗, 邵文山, 赵盼盼, 等. 荒漠草原区4种植物群落土壤种子库特征及其土壤理化性质[J]. 生态学报, 2019, 39(17): 6282-6292. [LI Guoqi, SHAO Wenshan, ZHAO Panpan, et al. Soil seed bank characteristics and soil physical and chemical properties of four plant communities in desert steppe area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): 6282-6292] DOI: 10.5846/stxb201712112227

- [5] 李国旗, 王雅芳, 刘星, 等. 贺兰山低山区土壤种子库空间分布[J]. 西北植物学报, 2022, **42**(2): 301–311. [LI Guoqi, WANG Yafang, LIU Xing, et al. Spatial distribution characteristics of soil seed bank in low mountain area of Helan Mountain [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2022, **42**(2): 301–311] DOI: 10.7606/j.issn.1000–4025.2022.02.0301
- [6] 林勇明, 吴承祯, 洪伟, 等. 汶川地震灾区典型区不同植被类型土壤种子库特征——以北川县苏保河、魏家沟流域为例[J]. 中国生态农业学报, 2012, **20**(1): 99–104. [LIN Yongming, WU Chengzhen, HONG Wei, et al. Characteristics of soil seed bank of different vegetation types in the typical area of Wenchuan earthquake disaster area-taking Subao River and Weijiagou River Basin in Beichuan County as an example [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, **20**(1): 99–104] DOI: 10.3724/SP.J.1011.2012.00099
- [7] 李翠, 王庆海, 陈超, 等. 蔡家河湿地土壤种子库特征及其与地上植被和土壤因子的关系[J]. 生态科学, 2019, **38**(3): 133–142. [LI Cui, WANG Qinghai, CHEN Chao, et al. Characteristics of soil seed bank in Caijiahe wetland and its relationship with aboveground vegetation and soil factors [J]. Ecological Science, 2019, **38**(3): 133–142] DOI: 10.14108/j.cnki.1008–8873.2019.03.016
- [8] 刘瑞雪, 詹娟, 史志华, 等. 丹江口水库消落带土壤种子库与地上植被和环境的关系[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(3): 801–808. [LIU Ruixue, ZHAN Juan, SHI Zhihua, et al. Relationship between soil seed bank and aboveground vegetation and environment in hydro-fluctuation belt of Danjiangkou reservoir [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, **24**(3): 801–808] DOI: 10.13287/j.1001–9332.2013.0237
- [9] KÜROVÁ J. The impact of soil properties and forest stand age on the soil seed bank [J]. Folia Geobotanica, 2016, **51**(1): 27–37. DOI: 10.1007/s12224–016–9236–1
- [10] ZHAO Yao, LI Meng, DENG Jiayong, et al. Afforestation affects soil seed banks by altering soil properties and understory plants on the eastern Loess Plateau, China [J]. Ecological Indicators, 2021, **126**: 107670. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107670
- [11] MA Zhen, MA Miaojun, BASKIN J M, et al. Responses of alpine meadow seed bank and vegetation to nine consecutive years of soil fertilization [J]. Ecological Engineering, 2014, **70**(9): 92–101. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.04.009
- [12] SMITH R S, SHIEL R S, MILLWARD D, et al. Soil seed banks and the effects of meadow management on vegetation change in a 10-year meadow field trial [J]. Journal of Applied Ecology, 2002, **39**(2): 279–293. DOI: 10.1046/j.1365–2664.2002.00715.x
- [13] 鞠艳, 杨星, 王轶虹, 等. 里下河地区极端降水时空变化及未来趋势分析[J]. 水文, 2023, **43**(4): 104–110, 121. [JU Yan, YANG Xing, WANG Yihong, et al. Spatiotemporal characteristics of extreme precipitation and its future trend analysis in the Lixia river plain [J]. Journal of China Hydrology, 2023, **43**(4): 104–110, 121] DOI: 10.19797/j.cnki.1000–0852.20220220.
- [14] 郭文莉. 洪涝灾害后升金湖优先恢复的水生植物物种组成和群落结构[D]. 合肥: 安徽大学, 2022: 1–51. [GUO Wenli. Species composition and community structure of aquatic plants preferentially restored in Shengjin Lake after flood disaster [D]. Hefei: Anhui University, 2022: 1–51]
- [15] 张劲峰. 滇西北亚高山退化森林生态系统特征及恢复对策研究[D]. 昆明: 云南大学, 2012: 1–207. [ZHANG Jinfeng. Research on characteristics of degraded forest ecosystem and its restoration countermeasure in sub-alpine of Northwest Yunnan [D]. Kunming: Yunnan University, 2012: 1–207]
- [16] 彭贤锋, 史常青, 赵廷宁, 等. 汶川地震不同次生地质灾害类型区土壤种子库特征[J]. 水土保持通报, 2013, **33**(6): 192–197. [PENG Xianfeng, SHI Changqing, ZHAO Tingning, et al. Characteristics of soil seed bank in different secondary geological disaster areas of Wenchuan earthquake [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, **33**(6): 192–197] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2013.06.042
- [17] 梁琴. 林火对毕节岩溶山区土壤与种子萌发的生态效应及防火植物研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017: 1–93. [LIANG Qin. Ecological effects of forest fires on soil and seed germination and fire-resistant plants in Bijie karst mountainous area [D]. Chongqing: Southwest University, 2017: 1–93]
- [18] 马全林, 卢琦, 魏林源, 等. 干旱荒漠白刺灌丛植被演替过程土壤种子库变化特征[J]. 生态学报, 2015, **35**(7): 2285–2294. [MA Quanlin, LU Qi, WEI Linyuan, et al. Changes of soil seed bank during vegetation succession of Nitraria tangutorum shrubland in arid desert [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(7): 2285–2294] DOI: 10.5846/stxb201306041326
- [19] 于顺利, 蒋高明. 土壤种子库的研究进展及若干研究热点[J]. 植物生态学报, 2003(4): 552–560. [YU Shunli, JIANG Gaoming. The research development of soil seed bank and several hot topics [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2003(4): 552–560] DOI: 10.17521/cjpe.2003.0080
- [20] 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. Soil basic properties and fractal dimension characteristics of damaged natural restoration forest land under flood disturbance [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2019, **25**(1): 29–37] DOI: 10.19675/j.cnki.1006–687x.2018.04032
- [21] 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. Variation characteristics of soil physical properties in the early stage

- of natural restoration in disaster disturbed areas [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, **34**(5): 162 – 168] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2020.05.023
- [22] 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 source by soil microbial community during restoration of different forest types in red soil region [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2019, **25**(4): 831 – 837] DOI: 10.19675/j.cnki.1006 – 687x.2018.12003
- [23] 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. Early recovery characteristics and variability of carbon, nitrogen and phosphorus in forest soil disturbed by disaster [J]. Mountain Research, 2020, **38**(4): 532 – 541] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.000531
- [24] 余坤勇, 刘健, 杨平, 等. 森林经营过程对区域发生滑坡的影响关系研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, **36**(4): 5 – 10, 16. [YU Kunyong, LIU Jian, YANG Ping, et al. The impact of forest management forest management process on the landslide [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2016, **36**(4): 5 – 10, 16] DOI: 10.14067/j.cnki.1673 – 923x.2016.04.002
- [25] 李松阳, 余杭, 罗清虎, 等. 洪涝诱发灾害干扰下受损恢复林地土壤颗粒的组成变化特征及多重分形分析[J]. 北京林业大学学报, 2020, **42**(8): 112 – 121. [LI Songyang, YU Hang, LUO Qinghu, et al. Changes in soil particle composition and multifractal analysis of damaged and restored forest land under flood-induced disaster disturbance [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, **42**(8): 112 – 121] DOI: 10.12171/j.1000 – 1522.20190388
- [26] 王伯荪, 张志权, 蓝崇钰, 等. 南亚热带常绿阔叶林取样技术研究[J]. 植物生态学报, 1982(1): 51 – 61. [WANG Bosun, ZHANG Zhiquan, LAN Chongyu, et al. Studies on sampling techniques of the south-subtropical evergreen broad-leaf forest in Guangdong Province, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 1982(1): 51 – 61]
- [27] 游水生, 王小明, 王海为. 福建中亚热带常绿阔叶林(米槠林)最小面积的确定[J]. 武汉植物学研究, 2002(6): 438 – 442. [YOU Shuisheng, WANG Xiaoming, WANG Haiwei. Determination of the minimum sampling area for mid-subtropical evergreen broad-leaf forest (castanopsis carlesii forest) in Fujian Province, China [J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 2002(6): 438 – 442] DOI: 10.3969/j.issn.2095 – 0837.2002.06.010.
- [28] GRUBB P J. The maintenance of species-richness in plant communities: The importance of the regeneration niche [J]. Biological Reviews. 1977, **52**(1): 107 – 145. DOI: 10.1111/j.1469 – 185X.1977.tb01347.x
- [29] 王东丽. 黄土丘陵沟壑区植物种子生活史策略及种子补播恢复研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2014: 1 – 169. [WANG Dongli. Seed life-history strategies of plantss and restoration by seed addition in the hill-gully loess plateau region [D]. Xi'an: Northwest A&F University, 2014: 1 – 169]
- [30] 史军辉, 黄忠良, 欧阳学军, 等. 南亚热带森林土壤种子库与地上植被的组成特征及其关系[J]. 北京林业大学学报, 2006, **28**(4): 26 – 31. [SHI Junhui, HUANG Zhongliang, OUYANG Xuejun, et al. Composition and relationship between soil seed bank and aboveground vegetation in subtropical forest [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, **28**(4): 26 – 31] DOI: 10.13332/j.1000 – 1522.2006.04.005
- [31] 陈双双. 石漠化区樟树—马尾松人工混交林植物群落与土壤理化特征的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2023: 1 – 78. [CHEN Shuangshuang. Plant communities and soil physicochemical characteristics of camphor-pinuss artificial mixed forests in rocky desertification areas [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2023: 1 – 78] DOI: 10.27662/d.cnki.gznlc.2022.000130
- [32] 张天举, 陈永金, 刘加珍. 基于典范对应分析的滨海湿地土壤季节性盐渍化特征[J]. 生态学报, 2019, **39**(9): 3322 – 3332. [ZHANG Tianju, CHEN Yongjin, LIU Jiazheng. Seasonal salinization characteristics of coastal wetland soil based on canonical correspondence analysis [J]. Acta Ecologic Sinica, 2019, **39**(9): 3322 – 3332] DOI: 10.5846/stxb201806111305
- [33] 徐海量, 李吉玫, 叶茂. 塔里木河下游不同地下水水位土壤种子库特征[J]. 生态学杂志, 2008, **27**(3): 305 – 310. [XU Hailiang, LI Jimei, YE Mao. Characteristics of soil seed bank under different groundwater levels in the lower reaches of Tarim River [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, **27**(3): 305 – 310] DOI: 10.13292/j.1000 – 4890.2008.0108
- [34] 左小安, 赵学勇, 赵哈林, 等. 科尔沁沙质草地群落物种多样性、生产力与土壤特性的关[J]. 环境科学, 2007(5): 945 – 951. [ZUO Xiaolan, ZHAO Xueyong, ZHAO Halin, et al. Relationship between species diversity, vigour and soil characteristics of sandy grassland communities in Horqin [J]. Environmental Science, 2007(5): 945 – 951] DOI:10.13227/j.hjx.2007.05.003
- [35] 张广帅, 邓浩俊, 杜锟, 等. 汶川地震生态治理区土壤种子库及其与地上植被的关系[J]. 中国生态农业学报, 2015, **23**(1): 69 – 79. [ZHANG Guangshuai, DENG Haojun, DU Kun, et al. Soil seed bank and its relationship with aboveground vegetation in Wenchuan earthquake ecological control area [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, **23**(1): 69 – 79] DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.141103

- [36] 刘庆艳, 姜明, 吕宪国, 等. 湿地土壤种子库与地上植被相似性关系研究评述[J]. 生态学报, 2014, **34**(24): 7465–7474. [LIU Qingyan, JIANG Ming, LYU Xianguo, et al. A review of similarity between soil seed bank and aboveground vegetation in wetlands [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(24): 7465–7474] DOI: 10.5846/stxb201303120403
- [37] 王昌辉. 长汀红壤侵蚀区不同恢复阶段种子雨种子库特征[D]. 福州: 福建农林大学, 2020: 1–49. [WANG Changhui. Changting red soil erosion area characteristics of seed rain seed bank in different recovery stages [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2020: 1–49] DOI: 10.27018/d.cnki.gfjnu.2020.000664.
- [38] 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(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]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2004(1): 86–92] DOI: 10.17521/cjpe.2004.0013
- [39] 高若允, 杨柳生, 罗清虎, 等. 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, et al. Variation of soil seed bank in natural restoration processes of different types of forests disturbed by floods [J]. *Mountain Research*, 2022, **40**(2): 183–195] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.000664
- [40] 张雪, 董文婧, 申仕康, 等. 湖滨带土壤种子库研究进展[J]. 湿地科学, 2016, **14**(1): 97–102. [ZHANG Xue, DONG Wenjing, SHEN Shikang, et al. Studies on soil seed bank of lakeside zone: A review [J]. *Wetland Science*, 2016, **14**(1): 97–102] DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2016.01.015
- [41] 马金宝, 高凯, 孙忠林, 等. 科尔沁沙地 4 种生境地土壤种子库特征及其与土壤化学因子的关系[J]. 安徽农业科学, 2022, **50**(3): 65–68, 73. [MA Jinbao, GAO Kai, SUN Zhonglin, et al. Characteristics of soil seed bank in four habitats of Horqin sandy land and its relationship with soil chemical factors [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2022, **50**(3): 65–68, 73] DOI: 10.3969/j.issn.0517–6611.2022.03.017
- [42] 张冰. 大同矿区煤矸石山土壤种子库研究[D]. 太原: 山西师范大学, 2016: 1–43. [ZHANG Bing. Study on soil seed bank of coal gangue mountain in Datong mining area [D]. Taiyuan: Shanxi Normal University, 2016: 1–43]
- [43] WHITE E, TUCKER N, MEYERS N, et al. Seed dispersal to revegetated isolated rainforest patches in North Queensland [J]. *Forest Ecology and Management*. 2004, **192**(2): 409–426. DOI: 10.1016/j.foreco.2004.02.002
- [44] 郝翠, 梁耀元, 孟伟庆, 等. 天津滨海新区自然湿地植物分布与土壤理化性质的关系[J]. 湿地科学, 2009, **7**(3): 266–272. [HAO Cui, LIANG Yaoyuan, MENG Weiqing, et al. Relationship between distribution of natural wetland plants and soil physical and chemical properties in Tianjin Binhai New Area [J]. *Wetland Science*, 2009, **7**(3): 266–272] DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2009.03.003
- [45] 李佳奇, 李雨菲, 王晓静, 等. 桂北喀斯特石漠化地区不同植物群落土壤种子库特征及其与土壤养分关系[J]. 广西植物, 2023, **43**(3): 452–462. [LI Jiaqi, LI Yufei, WANG Xiaojing, et al. Characteristics of soil seed banks of different plant communities and their relationships with soil nutrients in karst desertification area, North Guangxi, China [J]. *Guihaia*, 2023, **43**(3): 452–462] DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202208003
- [46] 李吉玫, 徐海量. 塔里木河下游土壤种子库分布格局及其与环境因子的关系[J]. 水土保持通报, 2009, **23**(3): 88–93. [LI Jimei, XU Hailiang. Distribution pattern of soil seed bank and its relationship with environmental factors in the lower reaches of Tarim River [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, **23**(3): 88–93] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2009.03.019
- [47] 杨鹏, 何志, 胡军和, 等. 种子传播提高生物多样性的机制[J]. 植物保护学报, 2023, **50**(5): 1244–1253. [YANG Peng, HE Zhi, HU Junhe, et al. The mechanisms of seed dispersal in improving biodiversity [J]. *Journal of Plant Protection*, 2023, **50**(5): 1244–1253] DOI: 10.13802/j.cnki.zwbhxb.2023.2023004
- [48] 刘静逸, 牛艳东, 郭克疾, 等. 南洞庭湖杨树清理迹地恢复初期土壤种子库特征及其与土壤因子的关系[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(12): 4042–4050. [LIU Jingyi, NIU Yandong, GUO Keji, et al. Characteristics of soil seed bank and its relationship with soil factors in the early stage of restoration of poplar clearing sites in South Dongting Lake [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(12): 4042–4050] DOI: 10.13287/j.1001–9332.202012.005
- [49] 翟付群, 许诺, 莫训强, 等. 天津蓟运河故道消落带土壤种子库特征与土壤理化性质分析[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(1): 97–102. [ZHAI Fuqun, XU Nuo, MO Xunqiang, et al. Analysis of soil seed bank characteristics and soil physical and chemical properties in hydro-fluctuation belt of Ji Canal in Tianjin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(1): 97–102] DOI: 10.13198/j.res.2013.01.101.zhaifq.002

## Relationship between Damaged Soil Seed Bank and Aboveground Vegetation and Soil Properties in Post-Flooding Forests in Nanping City, Fujian Province, China

SHI Chenghua, LI Qi, LUO Qinghu, GUO Yiting, LIN Yongming<sup>\*</sup>

(a. College of Juncao Science and Ecology; b. Key Laboratory of Forest Ecosystem Process and Management of Fujian Province, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** Soil seed bank is a survival strategy in the long evolutionary process of seed plants. Antecedent research on post-disaster soil seed banks primarily conducted on the characteristics, spatiotemporal changes, germination traits of seed banks, and their association with vegetation restoration at various stages after disasters such as earthquakes, fires, and desertification. Flood disasters had long-term and persistent destructive effects on soil seed banks, resulting in impairment of seed survival and germination potential in damaged ecosystems; unfortunately, less research achievements were made regarding post-flooding soil seed banks in relation to aboveground vegetation and soil factors.

In this study, the post-flooding (damaged) plots, naturally recovered plots and undisturbed plots in the forests of northern Fujian Province of China were established for field survey. Soil seed banks, vegetation community and soil physicochemical properties under different degrees of recovery were analyzed by correlation and canonical correspondence analysis (Canonical Correspondence Analysis, CCA) methods.

(1) At different stages of recovery, the Margalef richness index, Shannon-Wiener diversity index, and Pielou evenness index were all higher in undisturbed plots than in naturally recovering and damaged plots, while the Simpson dominance index was the lowest in undisturbed plots. The soil seed banks in naturally recovered and damaged plots showed the highest similarity, while the similarity between undisturbed and damaged plots was lowest. The similarity between soil seed banks and aboveground vegetation was relatively low in the three types of plots, but the similarity index was higher in naturally recovering plots than in undisturbed and damaged plots.

(2) The correlation between soil seed bank density and soil factors varied with plots, but it was significantly correlated with most factors.

(3) By CCA, it suggested that in naturally recovering plots environmental factors had a comparable impact on soil seed bank species distribution in descending order: Total Organic Carbon (TOC), Total Phosphorus (TP), Available Potassium (AK), and clay content. For undisturbed plots, the factors were orderly sorted by Total Kjeldahl Nitrogen (TK), TP, Ammonia Nitrogen (AN), AK, and TOC content. The ordination effect of soil seed bank distribution with soil factors was better in undisturbed plots, but it was not ideal in naturally recovering plots.

This study can provide theoretical reference for prediction of evolutionary process of damaged forest communities.

**Key words:** soil seed bank; flooding disaster; soil property; aboveground vegetation; canonical correspondence analysis (CCA)