

三峡库区消落带回水区水淹初期土壤种子库特征*

王晓荣 程瑞梅* 封晓辉 郭泉水 肖文发

(中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091)

摘要 将三峡库区消落带回水区次生灌丛和弃耕地分成水淹区段、未水淹区段和对照样带,通过萌发法对其土壤种子库进行研究.结果表明:两种植被类型的土壤种子库储量存在极显著差异,次生灌丛种子密度为(6991 ± 954)粒·m⁻²、弃耕地种子密度为(26193 ± 6928)粒·m⁻².3种生境中,水淹区段的种子密度最低,未水淹区段最高.随着土层加深,种子库密度逐渐下降.土壤种子库萌发试验出现的物种分属45科97属118种,以一年生和多年生草本植物为主,其中菊科、禾本科、玄参科和十字花科为优势科;个体数量占土壤种子库总储量小于0.01%的物种有34种,占28.8%.两种植被类型的土壤种子库中物种数较接近,物种多样性指数和均匀度较高,但优势物种组成差异很大,生态优势度较低.3种生境中,未水淹区段的生物多样性最高,水淹区段的生态优势度最高,而水淹区段和未水淹区段相似性指数最大.

关键词 三峡库区 消落带 回水区 土壤种子库 水淹初期

文章编号 1001-9332(2009)12-2891-07 中图分类号 Q948.1 文献标识码 A

Characteristics of soil seed banks in backwater area of Three Gorges Reservoir water-level-fluctuating zone at initial stage of river-flooding. WANG Xiao-rong, CHENG Rui-mei, FENG Xiao-hui, GUO Quan-shui, XIAO Wen-fa (State Forestry Administration Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2009 20(12): 2891-2897.

Abstract: A germination test was made to study the characteristics of soil seed banks in the backwater area (including the flooded, non-flooded, and control areas of secondary bush and abandoned farmland) of Three Gorges Reservoir water-level-fluctuating zone. There existed significant differences in the soil seed banks between secondary bush and abandoned farmland, with an average seed density being 6991 ± 954 seed per m² and 26193 ± 6928 seed per m², respectively. Flooded area had the lowest seed density, while non-flooded area had the highest one. The seed density decreased with soil depth. A total of 118 species belonging to 45 families and 97 genera were detected in the soil seed banks of secondary bush and abandoned farmland, most of which were annual and perennial herbage species, belonging to Asteraceae, Poaceae, Scrophulariaceae, and Cruciferae. Among the 118 species, there were 34 species (occupying 28.8%) whose individuals accounted for less than 0.01% of the total. In the soil seed banks of secondary bush and abandoned farmland, the species number was similar, species diversity index and evenness index were relatively high, but the dominant species differed greatly, and the ecological dominance was relatively low. The species diversity in non-flooded area and the ecological dominance in flooded area were the highest, and the similarity index between the flooded and non-flooded areas was the highest.

Key words: Three Gorges Reservoir; water-level-fluctuating zone; backwater area; soil seed bank; initial stage of river-flooding.

人类通过筑坝、修建水库、引水分洪和河道渠化

等活动对流域生态水文特征进行人工调控,导致原有生态系统发生退化甚至消失,由此产生了一系列的生态环境问题.消落带作为水位周期性变化的干湿交替区,是水域生态系统和陆地生态系统交互过渡的地带^[1-2].季节性的水位涨落,导致区域生物多

* 中国林业科学研究院公益基金项目(CAFYBB2007023)和国家林业科技支撑计划项目(2006BAD03A1302/03 2006BAD03A07)资助.

* * 通讯作者. E-mail: chengrm@forestry.ac.cn.

2009-06-30 收稿 2009-09-18 接受.

样性、生态系统结构和功能发生极大变化^[3]。如何快速恢复和重建消落带植被,保证其生态功能的良好运行,是当今急待解决的重要科学问题。

土壤种子库指存在于土壤上层凋落物和土壤中的全部存活种子^[4]。由于土壤种子库中积累了不同时期和环境条件下地表植物产生的种子,在一定程度上反映了以往植被的状况,也预示了未来的植被结构和演替动态。在干扰严重和频繁的区域,土壤种子库对地表植被具有显著的影响^[5],在植被重建过程中起着重要的作用^[6-8]。国内外学者就消落带种子库在植被发展的应用^[9]、入侵植物对种子库的特征变化^[10]、水文变化对种子库的影响等方面进行了研究^[11],但对消落带水淹初期土壤种子库的变化却鲜见报道。

三峡大坝的修建,形成了人类历史上最大的水库型消落带,水位具有反季节性涨落的特点,导致不同海拔高程的土壤在水中浸泡时间的差异,长期淹水和季节性干湿交替的回水区,形成了以水分、海拔和坡度等为主要因素的异质性层次梯度,能够改变土壤的氧气、营养和光照条件^[12],从而显著影响土壤种子库的物种组成和种子萌发格局^[5]。水淹初期的消落带土壤生境承受了由干到湿的剧烈变化,土壤种子库势必会对生境产生响应,从而对未来地上植被的物种组成将产生重大的影响。为此,本文通过分析此阶段消落带土壤种子库的数量、组成和分布的变化特征,旨在为消落带植被的恢复和重建提供理论依据,对土壤种子库长期动态研究具有重要的理论和现实意义。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于湖北省秭归县,紧邻三峡大坝,地理位置在 $30^{\circ}38'14''-31^{\circ}11'31''$ N, $110^{\circ}00'04''-110^{\circ}18'41''$ E。该地区气候属亚热带大陆性季风气候,四季分明,雨热同季,热量充沛。年平均气温为 17.9°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 5723.6°C ,年均降水量为 1006.8 mm ,年日照时数 1631.5 h ,年均无霜期在 260 d 左右。消落带回水区内地形起伏较大,易风化岩层出露较多,降雨多且集中,水土流失极其严重。

按照三峡水库预定运行调度方案,每年汛期(6—9月),三峡水库水位降至最低(145 m),于10月底开始蓄水到最高水位(175 m),并保持到12月,而后水位又重新逐次降低。由此库区周围形成垂直距离为 30 m 的消落带区域^[13]。2006年试验性蓄

水位为 156 m ,消落带未完全淹没,暂时形成以已淹没的消落带、未淹没的消落带、原生植被缓冲带等区带生境类型。另外,蓄水所产生的消落带回水区受水位冲刷相对较弱,其土壤厚度较大,地形坡度较缓,植被覆盖度相对较好,对研究消落带变化具有典型性。样地的海拔在 $145\sim 185\text{ m}$,平均坡度为 32° ,土壤为黄壤和黄棕壤,土层厚度平均为 40 cm 以上。原生植被类型为针阔混交林和针叶林。其中,乔木以马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、白栎(*Quercus fabri*)和欆木(*Loropetalum chinense*)等为主,灌木主要有牡荆(*Vitex negundo* var. *cannabifolia*)和山胡椒(*Lindera glauca*)等,草本主要有芒(*Miscanthus sinensis*)和栗褐苔草(*Carex brunnea*)等。受人为种植、清库和初期水淹等因素影响,消落带内原生植被已消失殆尽,产生了以次生灌丛和弃耕地为主的植被类型。

1.2 试验方法

1.2.1 样地设置及取样 2008年7月,选取湖北省秭归县消落带的回水区作为试验点,进行土壤种子库采样和地上植被调查。

不同海拔高程消落带水淹的时间周期不同。以海拔 145 m 、 155 m 、 165 m 、 175 m 和 185 m 为分界线,将消落带划分为:水淹区段(海拔 $145\sim 155\text{ m}$);未水淹区段(海拔 $155\sim 165\text{ m}$ 和 $165\sim 175\text{ m}$)3段高程,且将存有原生植被的缓冲带(海拔 $175\sim 185\text{ m}$)作为对对照样带。选取生长类型相似的次生灌丛和弃耕地样地各2块,其中次生灌丛海拔 $145\sim 185\text{ m}$,弃耕地海拔 $145\sim 175\text{ m}$ (弃耕地 175 m 以上多为人类居住地,故比次生灌丛少取一个区段)。

在每个样地内,沿水面平行设置宽 20 m ,随地形坡度保证垂直高程 40 m ,以海拔 145 m 、 155 m 、 165 m 、 175 m 和 185 m 为分割线,在其上、下两侧各设置4个 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 样方,进行乔、灌木调查;同时,在每个灌木样方中央设置1个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的草本样方,调查地表现存植被种类和生长情况。在每个 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 样方的中心位置取一个 $20\text{ cm}\times 20\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 土柱,分为 $0\sim 2\text{ cm}$ 、 $2\sim 5\text{ cm}$ 和 $5\sim 10\text{ cm}$ 3层取样,将同一区段内相向的4个土柱同层土样混合作为一份样品,共4次重复,共取84份土样。

1.2.2 种子萌发试验 种子库萌发试验在中国林业科学研究院自动控温温室内进行。将采集的土样过 4 mm 筛,除去石块和杂质后,混合均匀,分为2份,平铺于装有约 3 cm 厚的干沙作为基质、 $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}$ 的萌发盘内,厚度约为 $1\sim 2\text{ cm}$ 。干沙经过 120°C

高温烘烤 12 h, 确保其内的种子已死亡. 温室内光照充足, 温度为 20 °C ~ 25 °C, 每天适时浇水, 以保持土壤表面湿润, 使土壤中的种子能够充分萌发. 以 4 d 为一个统计周期, 鉴定幼苗的种类, 记录萌发数量, 并将记录后的幼苗去除. 对于种类尚难以辨别的幼苗, 移栽到单个花盆, 待其长大直至可以鉴定为止. 当连续 2 周无种子萌发时视为试验结束. 萌发试验于 2008 年 8 月 17 日开始, 2009 年 2 月 11 日结束, 历时近 6 个月.

1.3 数据分析

参考文献[14-15], 选取 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数、Simpson 优势度指标, 分析不同生境类型内土壤种子库的物种组成; 选取 Czekanowski 相似性系数来表征相邻 3 种生境内物种相似度, 探讨不同干扰状况下种子库的变化.

Shannon-Wiener 多样性指数:

$$H = - \sum_{i=1}^s P_i \lg P_i$$

Pielou 均匀度指数:

$$E = H / \ln S$$

Simpson 优势度指标:

$$C = \sum n_i (n_i - 1) / (N(N - 1))$$

式中: P_i 为第 i 个物种种子数占总种子数的比例; S 为种子库的物种总数; N 是样方所有物种的个体数; n_i 是第 i 个物种的个体数.

Czekanowski 相似性系数:

$$CC = 2a / (2a + b + c)$$

式中: a 为样带 A 和样带 B 共有的物种; b 为样带 A 中出现的物种; c 为样带 B 中出现的物种.

将取样面积内的种子数量换算成 1 m² 的数量, 以 $\log(x + 1)$ 进行对数转换后, 利用 SPSS 16.0 软件进行单因素方差分析 (one-way ANOVA), 计算不同样带不同植被类型种子库密度的差异, 并进行多重 LSD 检验.

2 结果与分析

2.1 水淹初期土壤种子库数量特征

2.1.1 土壤种子库储量 土壤种子库储量用种子密度来表达, 即单位面积上 10 cm 深土壤中储藏的活力种子数, 以试验中萌发的幼苗来推算^[16]. 比较消落带内两种植被类型土壤种子库储量可知, 弃耕地的种子密度 (26193 粒 · m⁻²) 高于次生灌丛的种子密度 (6991 粒 · m⁻²), 二者存在显著差异 ($P < 0.01$).

在所选的 4 个区段内, 已水淹的 145 ~ 155 m 区

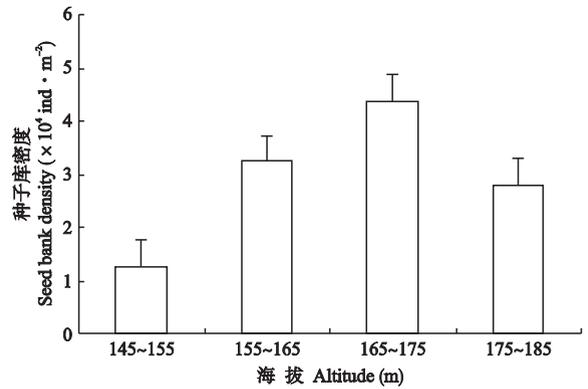


图 1 土壤种子库密度沿海拔梯度的变化

Fig. 1 Change of soil seed bank density along altitude gradient (mean ± SE, $n = 28$)

段种子储量最低, 分别比其他 3 个区段降低 60.87%、70.98% 和 54.78%, 表明特定物种对淹没同期的忍耐力不同^[17], 长期的水淹不利于种子的储藏, 从而改变着种子萌发的数量. 这与王正文等^[18]的研究结果相一致, 但与 Capson 等^[11]的水淹能够增加种子库密度结论不同. 在已清库而未水淹的 155 ~ 165 m 和 165 ~ 175 m 区段, 其种子库储量比对照样带平均增加了 35.69% (图 1), 可能是由于地上植被郁闭度减少, 空间相对较开阔, 使更多数量的种子进入此区段, 从而导致其种子储量增加.

2.1.2 土壤种子库密度的垂直分布 由图 2 可以看出, 随着土层的加深, 次生灌丛和弃耕地在垂直分布上均呈下降趋势. 其中, 次生灌丛 0 ~ 2 cm、2 ~ 5 cm 和 5 ~ 10 cm 层土壤种子库密度分别为 3736、2247 和 1600 粒 · m⁻², 前两层土壤种子库的储量占垂直层次分布的 78.90%, 且表层分别与中、下层具有极显著差异; 弃耕地 0 ~ 2 cm、2 ~ 5 cm 和 5 ~ 10 cm 层土壤种子库密度分别为 10363、7696 和 4523 粒 · m⁻², 前二层种子库的储量占垂直层次分布的 79.97%, 三层之间没有显著差异. 这与先前的人为耕作翻土有很大的关系.

2.2 土壤种子库物种种类

2.2.1 物种种类组成 由表 1 可以看出, 消落带土壤种子库萌发出的物种分属 45 科 97 属 118 种, 菊科 (占 15.65%)、禾本科 (7.83%)、玄参科 (7.83%) 和十字花科 (6.09%) 在种类组成中占优势, 其中优势物种数量大于 1% 的有 27 种. 鼠曲草 (*Gnaphalium affine*) 的种子密度最大 (2882.3 粒 · m⁻²), 母草 (*Lindernia crustacea*) 最小 (140.66 粒 · m⁻²). 除了雾水葛 (*Pouzolzia zeylanica*) 和婆婆纳 (*Veronica didyma*) 没有在水淹环境中出现外, 其余

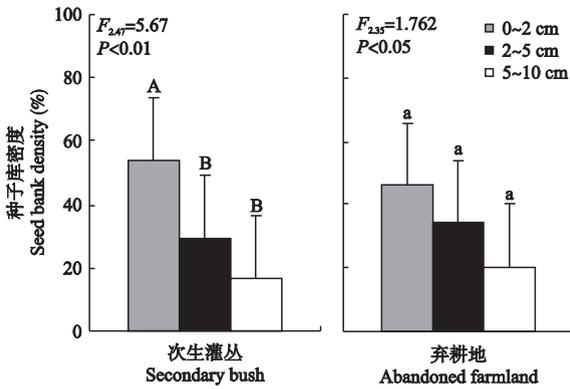


图2 消落带土壤种子库垂直分布

Fig. 2 Vertical distribution of soil seed bank of water-level-fluctuating zone (mean \pm SE).

不同大、小写字母分别表示处理间差异极显著 ($P < 0.01$) 和显著 ($P < 0.05$) Different big letters meant the very significant difference at 0.01 level, small letters meant significant difference at 0.05 level.

25种植物在水淹和未水淹环境中都有出现。另外,在所有出现的物种中,萌发数量占总储量 $< 0.01\%$ 的物种有34种,占物种种类的28.8%。

次生灌丛中出现了95种植物,其优势物种

分别为:鼠曲草、细穗腹水草 (*Veronicastrum stenostachyum*)、香附子 (*Cyperus rotundus*)、毛马唐 (*Digitaria chrysoblephara*) 和黄鹌菜 (*Youngla japonica*), 分别占此种类型土壤种子总数的26.29%、17.23%、6.28%、5.63%和5.47%;弃耕地出现了98种植物,其优势物种分别为:鼠曲草、球序卷耳 (*Cerastium glomeratum*)、一年蓬 (*Erigeron annuus*)、天蓬草 (*Stellaria uliginos*)、匍茎通泉草 (*Mazus miquelii*) 和知风草 (*Eragrostis ferruginea*), 分别占此种类型土壤种子总数的19.56%、7.99%、6.48%、6.30%、6.12%和5.51%。说明两种植被类型土壤种子库中物种数量变化不大,但是物种组成差异较大,优势物种明显。

对比分析发现,已水淹区段、未水淹区段和对照样带分别出现了79种、108种和70种物种。其中,已水淹区段以鼠曲草、毛马唐、水田碎米荠 (*Cardamine lyrata*)、细穗腹水草和巴东过路黄 (*Lysimachia patungensis*) 为优势种,占此生境类型的52.80%;未水淹区段以鼠曲草、球序卷耳、一年蓬、

表1 消落带土壤种子库优势物种组成和密度

Tab. 1 Density and composition of dominant species of soil seed bank of water-level-fluctuating zone

编号 Number	物种 Species	科 Family	种子密度 Seed bank density (mean \pm SE 粒 \cdot m ⁻²)	百分比 Percent (%)
1	鼠曲草 <i>Gnaphalium affine</i>	菊科 Asteraceae	2882.30 \pm 723.97	20.57
2	球序卷耳 <i>Cerastium glomeratum</i>	石竹科 Caryophyllaceae	999.00 \pm 289.89	7.13
3	一年蓬 <i>Erigeron annuus</i>	菊科 Asteraceae	701.41 \pm 205.32	5.01
4	匍茎通泉草 <i>Mazus miquelii</i>	玄参科 Scrophulariales	647.77 \pm 287.37	4.62
5	知风草 <i>Eragrostis ferruginea</i>	禾本科 Poaceae	634.26 \pm 246.80	4.53
6	细穗腹水草 <i>Veronicastrum stenostachyum</i>	玄参科 Scrophulariales	622.92 \pm 213.14	4.45
8	天蓬草 <i>Stellaria uliginosa</i>	石竹科 Caryophyllaceae	612.14 \pm 477.29	4.37
9	水田碎米荠 <i>Cardamine lyrata</i>	十字花科 Cruciferae	524.14 \pm 175.56	3.74
10	具芒碎米莎草 <i>Cyperus microiria</i>	莎草科 Cyperaceae	460.83 \pm 133.84	3.29
11	黄鹌菜 <i>Youngla japonica</i>	菊科 Asteraceae	450.22 \pm 82.92	3.21
12	无瓣蔊菜 <i>Rorippa dubia</i>	十字花科 Cruciferae	416.03 \pm 245.27	2.97
13	巴东过路黄 <i>Lysimachia patungensis</i>	报春花科 Primulaceae	376.82 \pm 160.77	2.69
14	雾水葛 <i>Pouzolzia zeylanica</i>	荨麻科 Urticaceae	351.19 \pm 122.51	2.51
15	婆婆纳 <i>Veronica didyma</i>	玄参科 Scrophulariales	319.98 \pm 131.32	2.28
16	香附子 <i>Cyperus rotundus</i>	莎草科 Cyperaceae	311.35 \pm 80.34	2.22
17	漆姑草 <i>Sagina japonica</i>	石竹科 Caryophyllaceae	295.87 \pm 244.29	2.11
18	苎麻 <i>Boehmeria nivea</i>	荨麻科 Urticaceae	249.78 \pm 80.61	1.78
19	毛马唐 <i>Digitaria chrysoblephara</i>	禾本科 Poaceae	245.16 \pm 97.01	1.75
20	马兰 <i>Kalimeris indica</i>	菊科 Asteraceae	240.70 \pm 105.52	1.72
21	繁缕 <i>Stellaria media</i>	石竹科 Caryophyllaceae	188.76 \pm 77.59	1.35
22	酢浆草 <i>Oxalis corniculata</i>	酢浆草科 Oxalidaceae	188.65 \pm 39.41	1.35
23	地果 <i>Ficus tikoua</i>	桑科 Moraceae	184.96 \pm 34.66	1.32
24	反枝苋 <i>Amaranthus retroflexus</i>	苋科 Amaranthaceae	154.06 \pm 86.8	1.10
25	附地菜 <i>Trigonotis peduncularis</i>	紫草科 Boraginaceae	153.24 \pm 69.23	1.09
26	紫色翼萼 <i>Torenia violacea</i>	玄参科 Scrophulariales	142.34 \pm 71.20	1.02
27	母草 <i>Lindernia crustacea</i>	玄参科 Scrophulariales	140.66 \pm 73.98	1.00

表 2 消落带内不同取样带及植被类型土壤种子库多样性指数

Tab. 2 Diversity indices of soil seed bank in different sampling zones and vegetation types of water-level-fluctuating zone

类型 Types	物种数 Species	多样性 指数 Diversity	均匀度 指数 Evenness	生态 优势度 Dominant	
植被 Vegetation	次生灌丛 Secondary bush	95	2.856	0.627	0.117
	弃耕地 Abandoned farmland	98	3.203	0.699	0.070
样带 Transect	水淹区段 Flooded area	79	2.919	0.668	0.115
	未淹区段 Non-flooded area	108	3.266	0.697	0.068
	对照样带 Control area	70	2.856	0.709	0.080

匍茎通泉草、天蓬草和知风草为优势种,占 49.01%;对照样带以球序卷耳、鼠曲草、母草、紫色翼萼(*Torenia violacea*)和具芒碎米莎草(*Cyperus microiria*)为优势种,占 53.44%。3 种生境中共同出现的优势物种只有鼠曲草,并且所占的比例相差不大,说明鼠曲草的种子对环境的干湿变化有着较好的适应性。

2.2.2 种子库多样性 由表 2 可以看出,两种植被类型中,消落带土壤种子库的物种多样性较高,且弃耕地种子库的 Shannon-Wiener 多样性指数高于次生灌丛;次生灌丛的 Simpson 生态优势度高于弃耕地,是由于次生灌丛土壤种子库比弃耕地小,外来物种侵占相对较困难;Pielou 均匀度指数相差 0.6 左右,说明两种植被类型种子分布相对较均匀。

在消落带 3 种生境类型内,未水淹区段的多样性指数达 3.266,说明清库增加了外来物种进入土壤的机率,而长期水淹区段和森林郁闭度较好的对照区段对新物种的进入有一定的阻碍作用,但由于该区域早期存在丰富的土壤种子,导致其多样性指数相对较高,均匀度指数都在 0.7 左右,表明 3 种生境中种子分布的均匀度较好;而生态优势度以水淹区段最大,达 0.115,说明水淹条件可以增加某些适生性物种的比例,降低了不适物种的比例。

2.2.3 不同生境下土壤种子相似性 由表 3 可以看出,0~2 cm 层土壤在 I 与 II 间的相似性最高,达到 0.758,而 I、II 与 III 间的相似性相对较低,在 0.7 左右,说明初期的消落带和原生植被在此层的种子种

表 3 不同取样区段土层间种子库的物种相似性指数

Tab. 3 Soil seed bank similarity index in different sampling zones and depths

土层 Layer (cm)	相似性指数 Similarities index		
	I ~ II	II ~ III	I ~ III
0 ~ 2	0.758	0.662	0.683
2 ~ 5	0.735	0.657	0.607
5 ~ 10	0.732	0.702	0.702

I:水淹区段 Flooded area; II:未水淹区段 Non-flooded area; III:对照样带 Control area.

表 4 土壤种子库生活型分布

Tab. 4 Life form distribution of soil seed bank (%)

生活型 Life form	整个消落带 Water-level-fluctuating zone	水淹区段 Flooded area	未淹区段 Non-flooded area	对照样带 Control area
A	50.862	55.26	49.52	50.00
B	37.069	39.47	37.14	38.24
C	10.345	5.26	11.43	11.76
D	1.724	-	1.90	-

A:一年生草本 Annual; B:多年生草本 Perennial herbage; C:灌木或藤本 Shrub or fluorecence; D:乔木 Arbor; - 未出现 No occurrence.

类相似性较高;5~10 cm 层土壤中,三者间的相似性都很高,而且非常接近,这与种子不易进入深层次土壤有较大的关系。

2.2.4 土壤种子库种子生活型 由表 4 可以看出,土壤种子库内种子萌发所形成的植被,更有利于向原生植被方向恢复。试验结果表明,整个消落带内所萌发的物种中,一年生和多年生的草本植物分别占 51.72% 和 36.21%,灌木或藤本占 11.21%,乔木仅为 0.86%。

另外,水淹初期 3 种生境类型的种子库植物生活型组成没有较显著的差异。其中,已水淹区段一年生草本植物比对照样带增加了 23.5%,灌木或藤本植物则分别比未水淹区段和对照样带减少 66.67% 和 50%;未水淹区段乔木物种只占 1.90%,而在原生植被的土壤中没有乔木种子出现。

3 讨论

研究结果表明,次生灌丛土壤种子库储量小于弃耕地土壤种子库,这与李生等^[15]研究结果相一致。弃耕地由于过去耕作,地带性植物大量减少,取而代之的是大量的农田杂草,提高了土壤种子库储量。一般而言,种子数量比土壤物种组成对不同影响因素的响应更加明显。三峡库区消落带水位涨落具有冬水夏陆的反季节性特征,水淹时间长、水位变化幅度较大,极不利于种子存活。水淹区段种子储量最

低,平均为 $6346.3 \text{ 粒} \cdot \text{m}^{-2}$,分别比其他3个区段降低 60.81%、70.92% 和 32.23%。Peterson 等^[19]认为,水位波动不利于持久性种子库的建立。水位变化的强度、持续时间和变化频率都会显著影响土壤种子库^[4,20],长时间的积水环境不利于土层中种子的保存,水淹造成了种子库中物种的生理休眠,需要特殊的萌发条件^[21],从而导致种子库储藏量降低^[22]。然而,未水淹区段的种子库储量平均为 $19007 \text{ 粒} \cdot \text{m}^{-2}$,比对照样带 ($9364 \text{ 粒} \cdot \text{m}^{-2}$) 平均增加了 102%。其原因主要是随着地上植被的清库和干扰,覆盖度较大的高大乔木已消失,产生了许多裸露的土壤缀块,生境由低温阴湿变成干燥高温,极适合土壤物种萌发的条件,造成外来物种的入侵。同时,土壤表层枯枝落叶的减少,降低了附近植物繁殖体进入土壤的阻力,势必会增加土壤种子库储量。

已有研究表明,土壤种子库大部分集中分布在 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 层土壤, 5 cm 以下的种子库种子储量相对较少^[9,14,21]。对消落带土壤种子库分层研究发现,在弃耕地,由于以往的耕作活动打乱了种子在土壤中的分布格局,促进了下层土壤种子的分布,但表层种子数量依然占多数, $0 \sim 5 \text{ cm}$ 深度的种子含量占 79.97%。次生灌丛同样也遵循了这种规律。由此可见,消落带内物种萌发对干扰和演替过程物种再生策略的不同反应,造成了两种植被种子库分布格局的差异^[23]。

消落带土壤种子库中共出现有 45 科 97 属 118 种,菊科、禾本科、玄参科、十字花科为优势科。物种萌发数量占总储量小于 0.01% 的物种占物种种类的 28.8%,说明受水位变化、清库等因素的影响,许多物种数量急剧减少。次生灌丛和弃耕地土壤种子库中物种数量分别是 95 种和 98 种,优势物种明显,组成差别较大。水淹区段和未水淹区段内主要干扰因素的差异,导致各自生境下优势物种的带状分布,与 Bernhardt 等^[24]在河岸带种子库的研究结果相似。另外,鼠曲草作为主要的优势物种,在 3 种生境内都占有很大比例,这与鼠曲草具有较宽的生态位和较好的耐受性有关,能够适应各种生境,说明受干扰程度严重的消落带区域,土壤种子库只适合耐受范围较大的物种的生存。通常,物种多样性指数高的植被,其生态优势度较低。本研究中,以弃耕地的物种多样性和均匀度最高,次生灌丛的优势度高,但 3 种指数相差较小,可能由于消落带处于幼年期,高频率的人为活动干扰,使大量外来杂草物种储存于土壤。未水淹区段的生物多样性最高是由于植被经过

清库且未水淹,产生了异质性小环境,适合多种类型物种生存,尤其是喜阳性物种,而水淹区段经过长时间的水淹,使耐淹物种得以生存,喜干燥的种子消亡,从而降低了种子库中储存的物种种类。

与对照样带相比,水淹区段和未淹区段的相似性最高,主要是因为水淹和清库等干扰,增加了适应性较强的外来杂草种类。整体来看,消落带物种组成还没有形成稳定的群落,导致整体相似性较高。就土壤种子库组成种子的生活型而言,次生灌丛和弃耕地都主要以一年生草本和多年生草本为主,而灌木和乔木物种十分有限,属于恢复演替的早期阶段。植被调查时发现,样地经清库后,地表存在一定数量的乔灌木实生小苗,而实验室控制条件下湿度、温度、光照、盐分等与野外自然环境相差很大^[25],导致种子库内的灌木和乔木物种尚未能打破休眠而没有大量萌发。而经过水淹一年的消落带区段内,一年生草本明显增加,多年生草本数量和种类显著降低,灌木和藤本明显减少,这与李吉玫等^[26]在塔里木河下游荒漠河岸带内河水满溢区种子库的研究结果相一致。另外,消落带生态系统退化较严重,土壤种子库储量有限,且生境条件变化不稳定,Johnson^[27]认为,经过剧烈干扰的森林可能存在大规模的种子库,但其能否形成稳定的植物群落,与水位干扰的程度、微地形、人为干扰等有较大的关系^[28]。因此还有待于进一步的长期动态研究。

受三峡库区水位预定的特殊调度方式所限,无法在所有植物生长季开始之前或者植物生命周期结束之后进行采样。本研究于夏季采样,许多消落带以外生长周期较短的物种可能已经完成了生活史,土壤中一部分种子是外来进入的,此时的种子库不能全面正确的反映消落带土壤种子库的状况,但对未来消落带受水淹后土壤种子库的变化趋势还是有很好的指示作用。另外,本研究通过萌发法对种子的数量和种类进行了统计分析,受萌发条件或种子生理休眠作用的限制,土壤内一部分种子不能彻底萌发,尤其是土壤种子库中没有乔木物种出现。这有待开展深入的研究。

参考文献

- [1] Gregory SV, Swanson FJ, Mckee WA, et al. An ecosystem perspective of riparian zones: Focus on links between land and water. *BioScience*, 1991, **41**: 540-551
- [2] Tu JJ, Chen ZJ, Chen GJ, et al. A study on land consolidation and utilization of the water-level-fluctuating zone in the Three Gorges Reservoir: A case study of

- Kaixian County, Chongqing City. *Journal of Mountain Science* (山地学报), 2002, **20**(6): 712-717 (in Chinese)
- [3] Wu JG, Huang JH, Han XG, et al. The Three Gorges Dam: An ecological perspective. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2004, **2**: 241-248
- [4] Simpson RL. Ecology of Soil Seed Bank. San Diego: Academic Press, 1989: 149-209
- [5] Liu G-H (刘贵华), Xiao Z (肖 藏), Chen S-F (陈漱飞), et al. The role of soil seed bank in wetland restoration and biodiversity conservation in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Progress in Natural Science* (自然科学进展), 2007, **17**(6): 741-747 (in Chinese)
- [6] McDonald AW, Bakker JP, Vegelin K. Seed bank classification and its importance for the restoration of species-rich flood-meadows. *Journal of Vegetation Science*, 1996, **7**: 157-164
- [7] Yan Q-L (闫巧玲), Liu Z-M (刘志民), Li R-P (李荣平). A review on persistent soil seed bank study. *Chinese Journal of Ecology* (生态学报), 2005, **24**(8): 948-952 (in Chinese)
- [8] Marage D, Rameau JC, Garraud L. Soil seed banks and vegetal succession in the Southern Alps: Effects of historic and ecologic factors. *Canadian Journal of Botany*, 2006, **84**: 99-111
- [9] Liu WZ, Zhang QF, Liu GH. Seed banks of a river-reservoir wetland system and their implications for vegetation development. *Aquatic Botany*, 2009, **90**: 7-12
- [10] Vosse S, Esler KJ, Richardson DM, et al. Can riparian seed banks initiate restoration after alien plant invasion? Evidence from the Western Cape, South Africa. *South African Journal of Botany*, 2008, **74**: 432-444
- [11] Capson SJ, Brock MA. Flooding, soil seed bank dynamics and vegetation resilience of a hydrologically variable desert floodplain. *Freshwater Biology*, 2006, **51**: 206-223
- [12] Lieffers VJ. Emergent plant communities of oxbow lakes in Northeastern Alberta: Salinity, water-level fluctuation, and succession. *Canadian Journal of Botany*, 1984, **62**: 310-316
- [13] Su W-C (苏维词). Main ecological and environmental problems of water-level-fluctuation zone (WLFZ) in Three Gorges reservoir and their controlling measures. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute* (长江科学院院报), 2004, **21**: 32-34 (in Chinese)
- [14] Wang X-L (王相磊), Zhou J (周 进), Li W (李伟), et al. Seasonal dynamics of soil seed bank in Honghu wetland withdrawn from long-term rice culture. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2003, **27**(3): 352-359 (in Chinese)
- [15] Li S (李 生), Yao X-H (姚小华), Ren H-D (任华东), et al. Different land-used soil seed banks in karst rocky desertification area of middle Guizhou Province, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(9): 4602-4608 (in Chinese)
- [16] Li Q-F (李全发), Liu W-Y (刘文耀), Shen Y-X (沈有信), et al. Storage and distribution of soil seed banks in degraded mountainous area of dry-hot valley in Nanjian, Southwest China. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2005, **27**(5): 26-31 (in Chinese)
- [17] Katja G, Axel G. The impact of flooding and drought on seeds *Cnidium dubium*, *Gratiola officinalis*, and *Juncus atratus*, three endangered perennial river corridor plants of Central European lowlands. *Aquatic Botany*, 2008, **89**: 283-291
- [18] Wang Z-W (王正文), Zhu T-C (祝廷成). The seed bank features and its relations to the established vegetation following flooding disturbance on Songnen Steppe. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2002, **22**(9): 1392-1398 (in Chinese)
- [19] Peterson JE, Baldwin AH. Seedling emergence from seed banks of tidal freshwater wetlands: Response to inundation and sedimentation. *Aquatic Botany*, 2004, **78**: 243-254
- [20] Xiao DR, Zhang LQ, Zhu ZC. A study on seed characteristics and seed bank of *Spartina alterniflora* at salt marshes in the Yangtze Estuary, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, **83**: 105-110
- [21] Riddin T, Adams JB. The seed banks of two temporarily open/closed estuaries in South Africa. *Aquatic Botany*, 2009, **90**: 328-332
- [22] Xing F (邢 福), Wang Y (王 莹), Xu K (许坤), et al. Characteristics of soil seed banks of community successional series in marshes in the Sanjiang Plain. *Wetland Science* (湿地科学), 2008, **6**(3): 351-358 (in Chinese)
- [23] Smith NJC, Zahid DM, Ashwath N, et al. Seed ecology and successional status of 27 tropical rainforest cabinet timber species from Queensland. *Forest Ecology and Management*, 2008, **256**: 1031-1038
- [24] Bernhardt KG, Koch M, Kropf M, et al. Comparison of two methods characterising the seed bank of amphibious plants in submerged sediments. *Aquatic Botany*, 2008, **88**: 171-177
- [25] Chang W (苒 伟), Wu J-G (吴建国), Liu H-Y (刘艳红). Research advance in seed germination of desert woody plants. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(2): 436-444 (in Chinese)
- [26] Li J-M (李吉玫), Xu H-L (徐海量), Zhang Z-J (张占江), et al. Characteristics of standing vegetation and soil seed bank in desert riparian forest in lower reaches of Tarim River under effects of river-flooding. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(8): 1651-1657 (in Chinese)
- [27] Johnson EA. Buried seed populations in the subarctic forest east of Great Slave Lake, northwest territories. *Canadian Journal of Botany*, 1975, **53**: 2933-2941
- [28] Wang Z-R (王增如), Xu H-L (徐海量), Yi L-K (尹林克), et al. Contribution of soil seed bank to the regeneration of damaged vegetation on flood plain. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(12): 2611-2617 (in Chinese)

