

• 研究报告 •

元江流域干热河谷灌草丛土壤种子库与地上植物群落的物种组成比较

张志明¹ 沈蕊¹ 张建利² 徐倩¹ 罗园³遇翹楚¹ 张秋霞¹ 欧晓昆^{1*}¹ (云南大学生态学与地植物学研究所, 昆明 650091)² (贵州省山地资源研究所, 贵阳 550001)³ (云南省环境工程评估中心, 昆明 650032)

摘要: 土壤种子库与地上植被之间的关系和相似性是长期争议的群落生态学问题之一。本研究旨在通过比较元江流域干热河谷典型灌草丛群落与其土壤种子库的物种组成, 探讨土壤种子库与地上植物群落存在怎样的相似性关系。在元江干热河谷上、中、下游选取典型灌草丛群落, 采用典型样地调查法进行植物群落调查, 同时在样方内采集0–5 cm、5–10 cm、10–15 cm三层土壤样品, 采用萌发实验研究土壤种子库的种子数量和物种组成, 并与地上植物群落进行比较。结果表明: (1)全部调查样方的地上植被中共包含种子植物76种, 隶属于25科64属, 主要集中在豆科、禾本科、菊科、大戟科, 群落物种组成以多年生草本为主、灌木为辅; (2)土壤种子库中共发现33种植物, 隶属于14科32属, 以旱生型禾本科、豆科、菊科物种为主; (3)土壤种子库中的植物种子密度在表层土壤中最, 随着土层的加深而递减; (4)各样方的土壤种子库与地上群落共有物种数较少, 相似性较低; 土壤种子库密度与地上群落的种群密度没有显著的相关性。总体而言, 本研究发现元江流域干热河谷典型灌草丛群落其土壤种子库与地上群落之间没有显著的相关性, 并且地上群落和土壤种子库都有外来入侵种类。

关键词: 干热河谷; 土壤种子库; 地上植物群落; 物种组成; 相似性; 元江

Comparisons of species composition between soil seed banks and above-ground plant communities in the dry-hot valley of the Yuanjiang River

Zhiming Zhang¹, Rui Shen¹, Jianli Zhang², Qian Xu¹, Yuan Luo³, Qiaochu Yu¹, Qiuxia Zhang¹, Xiaokun Ou^{1*}¹ Institute of Ecology and Geobotany, Yunnan University, Kunming, 650091² Guizhou Provincial Mountain Resource Institute, Guiyang, 550001³ Yunnan Environmental Engineer Assessment Center, Kunming 650032

Abstract: The relationship between the seed bank and aboveground communities has attracted much interest among plant community ecologists. The objective of this study was to address the relationships between soil seed banks and aboveground plant communities by comparing the species composition in the dry-hot valley of the Yuanjiang River. Typical shrub-grass communities in the dry-hot valley were selected and five plots were established in upper, middle, and lower sections of the Yuanjiang River watershed. A total of 100 sampling quadrats were collected, and plant communities were surveyed. In addition, soil samples were collected in three layers (0–5 cm, 5–10 cm, and 10–15 cm) in each community sample. The seed banks from the soil samples were germinated in the lab and species were identified. The results showed that (1) 76 plant species belonging to 25 families and 64 genera were found in the aboveground plant communities. These species mainly belonged to Fabaceae, Poaceae, Asteraceae and Euphorbiaceae. (2) 33 plant species belonging to 14 families and 32 genera were found in the soil seed banks. These species mainly belonged to xeromorphy

收稿日期: 2015-09-18; 接受日期: 2016-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(31160101, 41371190, 41361046)、中国科学院“西部之光”人才培养项目, 贵州省社会攻关计划项目(黔科合SY[2015]3018)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xkou@ynu.edu.cn

Gramineae. (3) In three soil layers, the proportion of the surface soil seed banks was the largest, and the numbers of seeds decreased as the depth of soil increased. (4) For each plot, few common species were found between the soil seed banks and plant communities, and thus their similarity is low. In summary, there were no significant correlations between the soil seed banks and aboveground plant communities. Moreover, several invasive species can be found both in the seed banks and aboveground plant communities.

Key words: dry-hot valley; soil seed banks; above ground plant communities; species composition; similarity; Yuanjiang River

土壤种子库(soil seed bank)指存在于土壤上层凋落物内和土壤中全部存活种子的总和(Robers, 1981)。这些种子作为重要的种源储备库,萌发后参与地上植被的自然更新和演替,直接影响着群落的组成与结构,土壤种子库的种子储量、种类组成与结构对群落更新具有重要影响。因此土壤种子库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(Pugnaire & Lázaro, 2000; 白文娟等, 2012)。大多数情况下,当地上植物群落受到干扰、群落生境发生改变时,土壤种子库可以作为植物群落恢复的主要种源(马坚等, 2007)。

土壤种子库与地上植被之间的关系和相似性是长期争议的群落生态学问题之一(赵凌平等, 2008)。通常地上植被与土壤种子库有着密切的联系,土壤种子库的密度反映出土壤种子库的大小,同时也可以显示种子库的数量特征。一方面,地上植被的种子雨是土壤种子库的来源,地上植物种子的产量直接影响着土壤种子库的大小和动态;另一方面,土壤种子库的种子通过参与群落更新,进而影响地上植物群落结构与组成,乃至物种多样性的维持(刘建立等, 2005; 白文娟等, 2012)。相关研究显示,在不同的生境中土壤种子库与地上植被的相似关系存在较大差异(于顺利和蒋高明, 2003; 赵凌平等, 2008)。部分关于草地的研究结果显示种子库与地上群落物种组成的相关性微弱(孙建华等, 2005)或不显著(Falinska, 1999; Thompson, 2000; Olano et al, 2002; 李峰等, 2007),也有部分研究发现草地种子库与地上群落在组成上具有显著的相关性(赵丽娅等, 2003; 詹学明等, 2005)。这种关系主要受群落类型、演替阶段和环境因子(如干燥度等)等因素的影响,迄今尚未得出一致的结论(赵凌平等, 2008; 白文娟等, 2012)。

由于典型的干热生境和独特的地势地貌特征,

干热河谷有着以热带区系成分为主的耐干旱型植被,其群落外貌以稀树灌木草丛为主(金振洲, 2002)。此外干热河谷受人为干扰严重,植被普遍稀疏、低矮,表现为稀树草丛、稀灌草丛和草丛等外貌特征(金振洲, 2002),并处于脆弱退化状态(钟浩翔, 2000; 方海东等, 2009)。前人针对金沙江干热河谷土壤种子库特征以及种子库与地上植被之间的关系开展了许多研究(沈有信等, 2003; 罗辉和王克勤, 2006a, b; 张建利等, 2008; 张建利和毕玉芬, 2009),其结果也表现出明显的不一致(沈有信等, 2003; 罗辉和王克勤, 2006a; 张建利等, 2008)。

云南的干热河谷以元江流域的元江坝和金沙江流域的元谋龙江段气候最为典型。但迄今对元江干热河谷的土壤种子库的研究较少,关于种子库与地上植被之间的联系尚未见报道。元江干热河谷的土壤种子库与地上植被具有怎样的特征?两者之间存在怎样的关联?该关系是否存在一定的空间异质性?对这些问题的回答一方面有助于了解土壤种子库对地上植物群落结构与组成,乃至物种多样性维持的贡献,另一方面可以为干热河谷中严重退化的植被群落恢复提供参考依据。

本研究旨在通过调查元江流域干热河谷区典型灌草丛群落及其土壤种子库,了解土壤种子库的物种组成、数量和空间分布等特征及其与地上植物群落的相互关系,以完善元江流域干热河谷现有植被资料,为干热河谷环境演变、退化植被恢复和生物多样性保护提供理论依据,并希望能对生态工程和林业措施的实施提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

元江干热河谷呈西北-东南走向狭长斜贯于云南高原的中南部,经楚雄、双柏、新平、元江、红河、元阳至蒙自的曼耗河谷,约在23°12'-25°10' N和

100°30'–103°30' E范围之内(图1) (金振洲和欧晓昆, 2000), 海拔高度在300–1,400 m。属北热带特征的干热气候, 河谷地带的年平均气温23.8℃, 最冷月均温16.8℃, 最热月均温28.6℃, 全年日平均气温>10℃, ≥10℃年积温达8,700℃。年平均降水量600–800 mm, 干湿季节分明, 干季为11月至翌年4月, 雨季为5–10月。年内干燥度在0.94–7.94之间, 全年干燥度平均为1.89。太阳辐射充裕, 年日照总时数>2,291.7 h, 河谷年辐射量>126.495 kcal/cm², 有效生理辐射量63.248 kcal/cm²。全年盛行东南风, 年均大风(≥8级)天数为14.3天(何永彬, 2002)。河谷内土壤主要是燥红土, 土壤有机质分解快、含量低(朱华, 1990)。

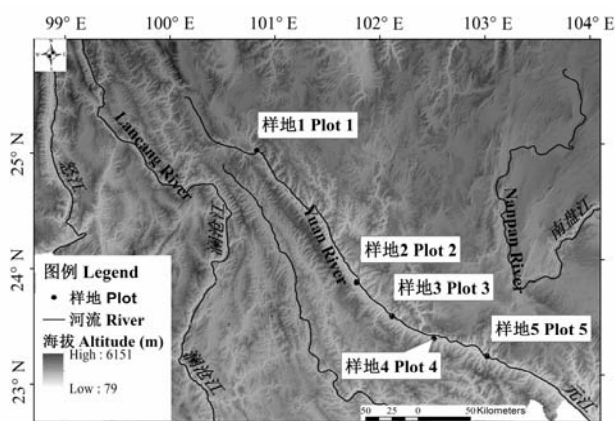


图1 研究样地的分布图

Fig. 1 Distribution of the sampling plots

1.2 样地设置及调查

根据环境和植被状况等特征, 沿元江流域干热河谷区域布设样点, 并选择典型样地(图1)。各个样地海拔差异较大, 样地1位于祥云县境内, 称为祥云样地, 海拔最高, 为1,396 m; 样地2为新平样地, 海拔为467 m; 样地3为元江样地, 海拔为402 m; 样地4位于红河县境内, 称为红河样地, 海拔为735 m; 样地5位于元阳县, 称为元阳样地, 海拔最低, 为241 m。取样均严格限制在干热河谷的灌草丛群落中, 因此取样在坡面上距江岸垂直距离0–200 m的地段内进行。

采用典型样地法(马克平和黄建辉, 1995; 贺金

生和江明喜, 1998)对元江干热河谷灌草丛群落进行调查。选取群落特征典型且分布较均匀、地形条件适宜的位置布设样地。各样地内随机设置5个5 m×5 m的样方调查灌木层, 15个1 m×1 m的小样方调查草本层, 5个样地一共设置100个样方。记录每个样方内的植物种类、数量、植株高度、盖度等指标, 并用GPS定位经、纬度和海拔高度。

1.3 土壤种子库野外取样

土壤种子库的取样于2010年5月初进行。在这个时段, 前一年进入土壤中的种子已经萌发, 而当年还未有新的种子输入, 因此土样中只包含持久土壤种子库, 为持久土壤种子库的较佳取样时间(Leckie et al, 2000; 罗辉和王克勤, 2006a)。

在上述5个样地中的每个5 m×5 m的样方中随机取3个重复(Lavorel et al, 1993)。然后利用土壤取样器, 在每个样点分0–5 cm、5–10 cm、10–15 cm三层采集土样, 分装于土壤袋中, 贴上标签, 带回实验室风干, 以防种子萌发。

1.4 土壤种子库萌发实验

采用幼苗萌发法对土壤种子库进行种类鉴定。具体步骤为: 将土样中的石块、枯枝落叶拣出, 风干后将土样中的结块部分用母锤轻轻破碎, 尽量不破坏土壤结构, 保证种子不受到损伤(Holzel & Otte, 2004; Adams et al, 2005)。将不同层的土样各自均匀地铺于直径约为13 cm的塑料花盆内, 每个花盆底部都预先填上5–6 cm厚的烘烤处理的无种子基质(无种子基质置于恒温150℃的鼓风干燥箱内烘4 h后得到)。于实验室的温室大棚里进行萌发, 温度在25℃–35℃之间, 花盆顶部用一层透光和透气性良好的密织白布遮盖, 防止其他种子进入污染。种子发芽期间, 每天适当浇水, 使花盆内土壤保持湿润。一旦有种子萌发, 则视为有活力的种子, 该植物即为土壤种子库植物。进行物种鉴定, 并统计数量, 随之将鉴别出的植物从花盆中拔除。整个过程持续至盆中不再有幼苗长出, 然后再将盆中土样进行搅拌混合, 继续进行萌发观测, 直至土样中不再有种子萌发后结束萌发实验(唐勇等, 1997)。

考虑到春季是植物萌发的季节, 所以采回的土壤样品风干20天左右后进行低温处理保存, 尽量避免种子萌发和失去活性。萌发实验从次年的春季3月份开始持续到6月份, 前后共持续了3个月。

1.5 数据处理

1.5.1 土壤种子库密度和地上植物群落密度测定

种子密度是指单位面积上的种子数量。本研究中根据萌发法统计的种子数量与样方面积的比即为土壤种子库的密度。群落密度一般是指主要层或者主要生长型种群个体在单位面积内的数目和分散的疏密程度(金振洲, 2009), 即单位面积(S)内植物个体数量(N), 即 $D = N/S$ (宋永昌, 2000)。法瑞学派少用密度指标描述植物群落, 多用“多度”, 而“密度”或者“相对密度”是英美学派的重要指标(金振洲, 2009)。本研究中的群落密度即调查样方内植物个体数量与样方面积的比。

1.5.2 相似性分析

本研究采用Jaccard相似性系数对元江干热河谷不同灌草丛群落的土壤种子库的相似性以及同一群落的土壤种子库与地上植物群落的相似性进行分析(张金屯, 2004)。

Jaccard相似性系数: $q_{jk} = c/(a+b+c)$; Sorensen相似性系数: $q_{jk} = 2c/(a+b)$ 。其中 c 为两个样方共有的物种数, a 为存在于样方 j 中但不存在于样方 k 中的种数, b 为存在于样方 k 中但不存在于样方 j 中的种数(张金屯, 2004)。

根据Jaccard相似性原理, 当 q 为0.00–0.25时为极不相似, 当 q 为0.25–0.50时为中等不相似, 当 q 为0.50–0.75时为中等相似, 当 q 为0.75–1.00时为极相似(谭速进等, 2010)。

1.6 数据统计分析

本研究采用SPSS 13.0对样方数据和实验数据进行分析。由于各组数据在以自然对数变换后仍旧不符合正态分布和方差齐性原则, 所以采用非参数Wilcoxon秩和检验方法进行方差分析及检验。此外通过线性回归分析土壤种子库密度与其萌发后形成的群落密度之间的相关性, 并进行Pearson相关性检验。

2 结果

2.1 地上植物群落种类组成

元江流域干热河谷灌草丛群落样地内共包含76种植物, 隶属于25科64属(附录1)。其中豆科21种, 占植物种类总数的27.63%; 禾本科10种, 占13.16%; 菊科9种, 占11.84%; 大戟科4种, 占5.26%。莎草科、茜草科、马鞭草科、锦葵科各含3

种, 各占3.95%; 唇形科、蔷薇科、桑科各含2种, 各占2.63%; 其余14科均只含1个物种, 共占18.42%。由此可见, 该流域的植物种类主要集中在少数科内, 如豆科、禾本科、菊科、大戟科等, 优势现象明显。

2.2 土壤种子库数量特征

样地中土壤种子库的密度特征如附录1所示。种子库密度自元江上游到下游逐渐减少, 呈现下降趋势。位于上游的祥云样地种子库密度最大, 为 $2,026.67 \pm 130.13$ 粒/ m^2 ; 而位于下游的元阳样地种子库密度最低, 仅为 486.67 ± 70.40 粒/ m^2 。土壤种子库密度方差分析结果表明, 祥云、新平、元江、红河和元阳的土壤种子库密度差异显著($\chi^2 = 12.703$, $P = 0.013$)。

此外, 不同样地的土壤种子库中各植物种群密度差异较大(附录2)。在祥云、新平、元江和红河的样地土壤种子库中扭黄茅(*Heteropogon contortus*)种群密度最大, 均占总密度的30%以上, 其中在元江的密度甚至达到了76.09%; 而飞机草的种群密度在元阳最大, 其在新平和红河也仅次于扭黄茅位居第二。其他物种的活性种子在数量上分配很不均匀, 种群密度之间差异显著。

2.3 土壤种子库种类组成

物种种类成分及生活型组成是土壤种子库的重要特征。调查的元江流域干热河谷灌草丛群落样方内土壤种子库中共发现33种植物, 隶属于14科32属。其中豆科和菊科各7种, 分别占植物种类总数的21.21%; 禾本科6种, 占18.18%; 锦葵科和大戟科各2种, 分别占6.06%; 其他9科各含1个物种, 共占27.27%。由此可见, 该区内土壤种子库的植物种类主要集中在豆科、禾本科、菊科(附录1)等少数科内, 优势现象明显。此外, 禾本科的臂形草(*Brachiaria eruciformis*)、菊科的飞机草、大戟科的飞扬草为外来物种。

2.4 土壤种子库垂直分布规律

调查的样方土壤种子库密度随土壤深度增加而减小, 土壤种子库中的种子主要集中分布在浅层土壤(0–5 cm)中, 该层中种子的数量达到种子总数的57.8%以上, 而5–10 cm、10–15 cm土层中分布的种子较少(表1)。

2.5 不同样地间土壤种子库差异

元江干热河谷不同样地灌草丛群落土壤种子

表1 元江干热河谷不同灌草丛群落土壤种子库密度(有活力种子数/m²)和种子密度百分比在不同土壤深度的垂直分布
Table 1 Vertical distribution and percentage of seed bank density (seeds/ m²) at different soil depth in grass and shrub communities in the dry-hot valley of Yuanjiang River

分层 Layer	祥云 Xiangyun	新平 Xinping	元江 Yuanjiang	红河 Honghe	元阳 Yuanyang	Chi-Square χ^2	<i>P</i>
0–5 cm	1,313.3±83.8	706.7±155.4	493.3±116.5	420.0±57.1	326.7±37.1	27.646	<0.01**
种子密度百分比 Seed density percentage	64.80%	65.43%	80.44%	57.80%	67.12%		
5–10 cm	426.7±41.9	240.0±52.4	100.0±23.9	193.3±50.2	106.7±33.0	26.822	<0.05*
种子密度百分比 Seed density percentage	21.05%	22.22%	16.30%	26.60%	21.92%		
10–15 cm	286.7±60.1	133.3±38.6	20.0±14.5	113.3±35.0	53.3±23.6	23.616	<0.05*
种子密度百分比 Seed density percentage	14.15%	12.35%	3.26%	15.60%	10.96%		

表2 元江干热河谷不同样地间土壤种子库的相似性指数
Table 2 Similarity index of soil seed bank among five different plots in the dry-hot valley of Yuan River

	祥云 Xiangyun	新平 Xinping	元江 Yuanjiang	红河 Honghe
新平 Xinping	0.292	–	–	–
元江 Yuanjiang	0.217	0.167	–	–
红河 Honghe	0.292	0.200	0.400	–
元阳 Yuanyang	0.208	0.222	0.462	0.467

库的Jaccard相似性系数在0.167–0.467之间(表2), 处于中等不相似水平。此外, 不同样地间土壤种子库的相似性大小显示出相邻样地的土壤种子库相似性相对较高, 间隔样地间的相似性偏低, 即距离越近的样地其土壤种子库相似性越高, 反之则相似性越低。

2.6 土壤种子库与地上群落的关系

2.6.1 土壤种子库与地上群落的相似性

由表3可知, 元江干热河谷灌草丛地上群落和土壤种子库共有植物种类较少, 土壤种子库与地上群落的Jaccard相似性系数介于0.083–0.167之间。说明地上群落对土壤种子库的形成虽然有一定的促进作用, 但是综合贡献不大。此外, 5个样地的调查

结果都显示出地上群落的植物种类多于土壤种子库的植物种类(附录1, 附录2)。不同的样地中, 元阳土壤种子库与地上群落的相似性最高, 其次为祥云、红河、新平, 在元江样地相似性最低(表3)。这说明灌草丛群落样方中, 地上群落与土壤种子库的物种组成有较大的差异, 处于不相似水平。

元江流域干热河谷祥云($P = 0.396$)、新平($P = 0.659$)、元江($P = 0.769$)、红河($P = 0.884$)和元阳($P = 0.156$)样地的土壤种子库密度与地上植物群落密度没有显著的相关性。

2.6.2 土壤种子库与地上群落的入侵植物种类

外来入侵种有6种, 即牛膝菊(*Galinsoga parviflora*)、小蓬草(*Conyza Canadensis*)、飞机草(*Chromolaena odorata*)、金腰箭(*Synedrella nodiflora*)、飞扬草(*Euphorbia hirta*)、大叶桉(*Eucalyptus robusta*)。其中地上群落有3种入侵种, 即臂形草、飞机草和飞扬草。土壤种子库中有6种, 即牛膝菊、小蓬草、飞机草、飞扬草、金腰箭, 以及大叶桉等种类。地上群落中的3种入侵植物除了臂形草外, 其他的在土壤种子库中都有贮存, 而另外3种(牛膝菊、小蓬草和大叶桉)则只在土壤种子库中有发现。

表3 土壤种子库与地上群落共有种比例以及其相似性系数
Table 3 The common species percentage and similarity index between soil seed banks and vegetation

样地 Plots	共有种 No. of common species	占地上植被种类百分比 % of common species in above-ground communities	占土壤种子库种类百分比 % % of common specie in seed banks	Jaccard 相似性系数 Jaccard similarity index
祥云 Xiangyun	7	22.58	36.84	0.163
新平 Xinping	4	13.79	33.33	0.108
元江 Yuanjiang	2	11.76	22.22	0.083
红河 Honghe	5	20.00	41.67	0.156
元阳 Yuanyang	5	20.00	50.00	0.167

3 讨论

3.1 土壤种子库密度差异

本研究结果显示元江干热河谷调查样地的土壤种子库密度介于486.67–2,026.67粒/m²之间。沈有信等(2003)在金沙江流域的东川干热退化恢复区的土壤种子库的统计结果为292–1,450粒/m²。罗辉和王克勤(2006a, b)针对金沙江流域元谋段的植被恢复区土壤种子库调查统计得出其密度为2,633–9,737粒/m²。相对而言,本研究结果与金沙江东川段的种子库密度较接近,而低于金沙江元谋段的植被恢复区。引起种子库密度和组成差异的原因多样,包括自然气候条件差异和生境条件的差异(沈有信等, 2003; 刘贵华, 2005)。人类干扰也是引起土壤种子库密度和组成差异的重要原因,无论是金沙江还是元江干热河谷人类干扰都比较严重(金振洲, 2002)。

此外,种子库密度随土壤深度增加而减小,可能是因为干热河谷主要以草本植物为主,草本植物的种子通常都较小较轻,大部分种子散落在表层土壤中,难以进入土壤深层。没有机会萌发或处于休眠状态的种子在经过一段时间后,在重力作用、下渗水、动物活动、地表径流、风等因素的带动下,少量种子下移进入土壤深层中;而越是下层的种子,在土壤中的时间越长,种子活力丧失也越多,这可能是导致深层土壤中能萌发的种子数量较少的原因(Donelan & Thompson, 1980; Milberg, 1995; 于顺利和蒋高明, 2003; 张玲等, 2004)。

3.2 土壤种子库与地上群落的关系

本研究结果表明元江干热河谷各调查样地的土壤种子库与地上群落共有物种数较少,相似性较低,并且土壤种子库密度与地上群落密度也没有显著相关性。该结果与前人相关研究有的一致(沈有信等, 2003; 李彦娇等, 2010),有的不一致(罗辉和王克勤, 2006a; 张建利等, 2008)。造成这种差异的原因很多,如群落类型差异、环境因子和演替阶段不同,研究方法的差异,也有物种本身的生物学特征所导致的差异(赵凌平等, 2008)。

本研究显示元江干热河谷地上群落的物种数均大于土壤种子库的物种数。Whipple (1977)将土壤种子库与地上群落的关系分为3种情况:(1)有种子,有植株;(2)有种子,没有植株;(3)有植株,没有种

子。本研究调查的元江干热河谷灌草丛群落样方中也发现类似的3种情况:

(1)扭黄茅、矛叶荩草(*Arthraxon lanceolatus*)、车桑子(*Dodonaea viscosa*)、飞机草等植物种类既出现在地上群落中,也存在于土壤种子库里,并且这些物种的种子产量很高。

(2)刺蒴麻(*Triumfetta rhomboidea*)这一灌木物种在祥云样地土壤种子库中普遍存在,但对地上群落的野外调查却没有发现该物种。同样,一些优势种草本植物,如绵毛挖耳草(*Carpesium cernuum* var. *lanatum*)、地耳草(*Hypericum japonicum*)、苍耳(*Xanthium sibiricum*)等,尽管在土壤种子库内也占有一定的比例,但在地上群落调查中未记录到。可能是这些种子受外界环境因子的影响或抑制萌发。影响种子萌发的因素多样,如土壤水分条件、温度、光照等(Fenner & Thompson, 2005)。

(3)有些种类广泛存在于植被中而未在种子库中发现或种子存量很少,如蔓草虫豆(*Cajanus scarabaeoides*)、类芦(*Neyraudia reynaudiana*)等。此外,样地内存在少量的灌木和乔木物种,如酸豆(*Tamarindus indica*)、余甘子(*Phyllanthus emblica*)等,在种子库萌发实验中没有发现其萌发的种子,这些物种是否具有持久土壤种子库?仍需深入研究。

总体而言,造成土壤种子库与地上群落的物种组成存在差异的原因是多方面的:(1)由于实验条件的局限性,很难在一个实验中满足所有植物种类种子萌发的最适条件(光照、温度、水分等),导致土壤种子库中的一些物种不能萌发,从而有可能低估了一些种子库的物种组成(Pekas & Schupp, 2013)。(2)土壤种子库中的种子并非全部来自现存群落,而是群落不同演替阶段的长期积累,因而种子库与现存群落必然会有一定的差异(刘济明和钟章成, 2000; Wang et al, 2015)。(3)用来与种子库进行比较的地上群落的物种组成只是一次调查的结果,不同物种生长时间存在差异,因此也可能低估了植被的物种组成,并且调查取样面积的大小也会影响土壤种子库和相应地上群落物种组成的相似性结果(刘建立等, 2005)。(4)人类的干扰作用也是影响土壤种子库与地上群落的物种组成差异的重要原因之一(Willems, 1984)。

3.3 土壤种子库中入侵种与本地种比较

该区的主要外来入侵物种有牛膝菊、小蓬草、飞机草、飞扬草等。地上群落只发现臂形草、飞机草和飞扬草3种, 而土壤种子库中发现有小蓬草、飞机草、飞扬草、牛膝菊、金腰箭以及大叶桉。地上群落中的3种入侵植物种除了臂形草外其他的种类在土壤种子库中都有贮存, 而另外3种(牛膝菊、小蓬草和大叶桉)则只在土壤种子库中有发现。由此可见, 一些入侵植物具有一定持久土壤种子库, 可以为这些物种入侵和定殖提供种源。

一些本地种, 如扭黄茅、马唐(*Digitaria sanguinalis*)、假蓬风毛菊(*Saussurea conyzoides*)、叶下珠(*Phyllanthus urinaria*)、矛叶荩草等通常种子体积小、数量多, 也能形成相对较大的持久土壤种子库密度, 萌发后形成的种群密度较大。但是, 相对而言, 研究区的本地适宜物种能形成持久土壤种子库的比例较小, 而入侵种能形成持久土壤种子库的比例较高。因此入侵种潜在的入侵能力及与本地草本灌木物种间的竞争能力等, 值得进一步开展深入研究。

参考文献

- Adams VM, Marsh DM, Knox JS (2005) Importance of the seed bank for population viability and population monitoring in a threatened wetland herb. *Biological Conservation*, 124, 425–436.
- Bai WJ, Zhang JE, Quan GM (2012) Hot topics and developing trends in soil seed bank. *Soils*, 44, 562–569. (in Chinese with English abstract) [白文娟, 章家恩, 全国明 (2012) 土壤种子库研究的热点问题及发展趋势. *土壤*, 44, 562–569.]
- Donelan M, Thompson K (1980) Distribution of buried viable seeds along a succession series. *Biological Conservation*, 17, 297–311.
- Falinska K (1999) Seed bank dynamics in abandoned meadows during a 20-year period in the Bialowieza National Park. *Ecology*, 87, 461–475.
- Fang HD, Duan CQ, Pan ZX, Sha YC, He L, Ji ZH (2009) Progress and perspectives on ecological restoration in the dry-hot valley of Jinsha River. *Environment and Ecology in the Three Gorges*, 2(1), 5–9. (in Chinese with English abstract) [方海东, 段昌群, 潘志贤, 沙毓沧, 何璐, 纪中华 (2009) 金沙江干热河谷生态恢复研究进展及展望. *三峡环境与生态*, 2(1), 5–9.]
- Fenner M, Thompson K (2005) *The Ecology of Seeds*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- He YB (2002) Environmental variation of dry and hot valley of Yuanjiang and countermeasures. *Yunnan Environmental Science*, 21(2), 26–28. (in Chinese with English abstract) [何永彬 (2002) 元江干热河谷环境变迁与适应对策研究. *云南环境科学*, 21(2), 26–28.]
- He JS, Jiang MX (1998) Plant species diversity of the degraded ecosystems in the Three Gorges Region. *Acta Ecologica Sinica*, 18, 399–407. (in Chinese with English abstract) [贺金生, 江明喜 (1998) 长江三峡地区退化生态系统植物群落物种多样性特征. *生态学报*, 18, 399–407.]
- Holzel N, Otte A (2004) Ecological significance of seed germination characteristics in flood-meadow species. *Flora*, 199, 12–24.
- Jin ZZ (2009) *Theory and Methods of Sociologic Geobotany*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [金振洲 (2009) 植物社会学理论与方法. 科学出版社, 北京.]
- Jin ZZ, Ou XK (2000) *Vegetation Of Yuan River, Nu River, Jinsha River, and Lancang River Dry-hot Valleys*. Yunnan University Press, Kunming. (in Chinese) [金振洲, 欧晓昆 (2000) 元江、怒江、金沙江、澜沧江干热河谷植被, pp. 285–286. 云南大学出版社, 昆明.]
- Jin ZZ (2002) *Flora Characteristics of the Dry-hot River Valley and Dry-warm Valley of Yunnan and Sichuan*. Yunnan Science and Technology Press, Kunming. (in Chinese) [金振洲 (2002) 滇川干热河谷与干暖河谷植物区系特征. 云南科学技术出版社, 昆明.]
- Lavored S, Debussche M, Lebreton JD, Lepart J (1993) Seasonal patterns in the seed bank of Mediterranean old-field. *Oikos*, 67, 114–128.
- Leckie S, Vellend M, Bell G, Waterway MJ (2000) The seed bank in an old growth, temperate deciduous forest. *Canadian Journal of Botany*, 78, 181–192.
- Li F, Liang SC, Wang LJ, Zhang ZH, Hu G (2007) Soil seed bank of *Cinnamomum burmannii* community on karst hills in Guilin. *Chinese Journal of Ecology*, 26, 1511–1515. (in Chinese with English abstract) [李峰, 梁士楚, 王丽君, 张忠华, 胡刚 (2007) 桂林岩溶石山阴香群落土壤种子库. *生态学杂志*, 26, 1511–1515.]
- Li YJ, Bao WK, Wu FZ (2010) Soil seed bank and natural regeneration potential of shrubland in dry valleys of Minjiang River. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 399–407. (in Chinese with English abstract) [李彦娇, 包维楷, 吴福忠 (2010) 岷江干旱河谷灌丛土壤种子库及其自然更新潜力评估. *生态学报*, 30, 399–407.]
- Liu GH (2005) *Wetland Seed Banks in the Middle to Lower Reaches of the Changjiang River*. PhD dissertation, Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan. (in Chinese with English abstract) [刘贵华 (2005) 长江中下游湿地的种子库研究. 博士学位论文, 中国科学院武汉植物园, 武汉.]
- Liu JM, Zhong ZC (2000) Seed rain, seed bank and regeneration of a *Castanopsis fargesii* community on Fanjing Mountain. *Acta Phytocologica Sinica*, 24, 402–407. (in Chinese with English abstract) [刘济明, 钟章成 (2000) 梵净山栲树群落的种子雨、种子库及更新. *植物生态学报*, 24,

- 402–407.]
- Liu JL, Yuan YX, Peng WX, Ma CM, Guan W (2005) Relationship between the soil seed banks and vegetation in Gushi Pasture, Bashang, Fengning, Hebei Province. *Arid Zone Research*, 22, 295–300. (in Chinese with English abstract) [刘建立, 袁玉欣, 彭伟秀, 马长明, 管伟 (2005) 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*, 22, 295–300.]
- Luo H, Wang KQ (2006a) Soil seed bank and aboveground vegetation in Jinshajiang dry-hot river valley hill slope vegetation restoration site. *Acta Ecologica Sinica*, 26, 2432–2442. (in English with Chinese abstract). [罗辉, 王克勤 (2006a) 金沙江干热河谷山地植被恢复区土壤种子库和地上植被研究. *生态学报*, 26, 2432–2442.]
- Luo H, Wang KQ (2006b) Soil seed bank of vegetation restoration region in mountainous area of Yuanmou dry-hot valley. *Science of Soil and Water Conservation*, 4(1), 87–91. (in Chinese with English abstract) [罗辉, 王克勤 (2006b) 元谋干热河谷山地植被修复区土壤种子库研究. *中国水土保持科学*, 4(1), 87–91.]
- Ma J, Beatrice V, Helge B, Yang YZ, Li L, Wang CL (2007) Basic characteristics of soil seed bank in Celei desert-oasis transitional zone. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 30(3), 53–59. (in Chinese with English abstract) [马坚, Beatrice V, Helge B, 杨远昭, 李利, 王纯利, 张希明 (2007) 策勒沙漠-绿洲过渡带土壤种子库的基本特征. *新疆农业大学学报*, 30(3), 53–59.]
- Ma KP, Huang JH (1995) Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China: II. Species richness, evenness and species diversity. *Acta Ecologica Sinica*, 18, 268–277. (in Chinese with English abstract) [马克平, 黄建辉 (1995) 北京东灵山地区植物群落多样性的研究: II. 丰富度、均匀度和物种多样性指数. *生态学报*, 18, 268–277.]
- Milberg P (1995) Soil seed bank after eighteen years of succession from grassland to forest. *Oikos*, 72, 3–13.
- Olano JM, Caballero I, Uskurain NA (2002) Seed bank spatial pattern in a temperate secondary forest. *Vegetation Science*, 13, 775–784.
- Pekas KM, Schupp EW (2013) Influence of above vegetation on seed bank composition and distribution in a Great Basin Desert sagebrush community. *Journal of Arid Environments*, 88, 113–120.
- Pugnaire FI, Lázaro R (2000) Seed bank and understorey species composition in a semi-arid environment: the effect of shrub age and rainfall. *Annals of Botany*, 86, 807–813.
- Qin L (2010) Statistical Ecology. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [覃林 (2010) 统计生态学. 中国林业出版社, 北京.]
- Shen YX, Liu WY, Zhang YD (2003) The effect of rehabilitation on vegetation species composition and soil seed bank at a degraded dry valley in Dongchuan, Yunnan Province. *Acta Ecologica Sinica*, 23, 1454–1460. (in Chinese with English abstract) [沈有信, 刘文耀, 张彦东 (2003) 东川干热退化山地不同植被恢复方式对物种组成与土壤种子库的影响. *生态学报*, 23, 1454–1460.]
- Song YC (2000) *Vegetation Ecology*. East China Normal University Press, Shanghai. (in Chinese) [宋永昌 (2000) 植被生态学. 华东师范大学出版社, 上海.]
- Sun JH, Wang YR, Zeng YJ (2005) Characteristics of the soil seed banks in degenerated grasslands under grazing and grazing suspension. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 25, 2035–2042. (in Chinese with English abstract) [孙建华, 王彦荣, 曾彦军 (2005) 封育和放牧条件下退化荒漠草地土壤种子库特征. *西北植物学报*, 25, 2035–2042.]
- Tan SJ, Wei HJ, Liu DB (2010) Study on fauna and similarity coefficients among communities of house and courtyard ants in Chengdu area. *Journal of Environmental Entomology*, 32(1), 11–19. (in Chinese with English abstract) [谭速进, 魏翰均, 刘丹碧 (2010) 成都地区居室庭院蚂蚁区系及群落相似性分析. *环境昆虫学报*, 32(1), 11–19.]
- Tang Y, Cao M, Zhang JH, Ren YH (1997) The impact of slash and burn agriculture on the soil seed bank of *Trema orientalis* forest. *Acta Botanica Yunnanica*, 19, 423–428. (in Chinese with English abstract) [唐勇, 曹敏, 张建侯, 任泳红 (1997) 刀耕火种对山黄麻林土壤种子库的影响. *云南植物研究*, 19, 423–428.]
- Thompson K (2000) The functional ecology of soil seed banks. In: *Seeds: The Ecology of Regeneration in Plant Communities* (eds Fenner M), pp. 215–235. CAB International eBooks, London.
- Wang YC, Ooi MKJ, Ren GH, Jiang DM, Musa A, Miao RH, Li XH, Zhou QL, Tang J, Lin JX (2015) Species shifts in above-ground vegetation and the soil seed bank in the inter-dune lowlands of an active dune field in Inner Mongolia, China. *Basic and Applied Ecology*, 16, 490–499.
- Whipple SA (1977) The relationship of buried, germination seed to vegetation in an old-growth Colorado subalpine forest. *Canadian Journal of Botany*, 6, 1506–1509.
- Willems ED (1984) Changes during 3 years in the size and composition of the seed bank beneath a long term pasture as influenced by defoliation and fertilize regime. *Applied Ecology*, 21, 603–615.
- Yu SL, Jiang GM (2003) The research development of soil seed bank and several hot topics. *Acta Phytocologica Sinica*, 27, 552–560. (in Chinese with English abstract) [于顺利, 蒋高明 (2003) 土壤种子库的研究进展及若干研究热点. *植物生态学报*, 27, 552–560.]
- Zhan XM, Li LH, Li X, Cheng WX (2005) Effects of grazing on the soil seed bank of a *Stipa krylovii* steppe community. *Acta Phytocologica Sinica*, 29, 747–752. (in Chinese with English abstract) [詹学明, 李凌浩, 李鑫, 程维信 (2005) 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*, 29, 747–752.]
- Zhang JL, Zhang W, Bi YF (2008) Soil seed bank and its rela-

- tions with vegetation on a grassland in Jinsha River dry-hot valley. *Chinese Journal of Ecology*, 27, 1908–1912. (in Chinese with English abstract) [张建利, 张文, 毕玉芬 (2008) 金沙江干热河谷草地土壤种子库与植被的相关性. *生态学杂志*, 27, 1908–1912.]
- Zhang JL, Bi YF (2009) The soil seed bank's temporal and spatial characteristics in the enclosed process of the mountain-grassland. *Ecology and Environmental Science*, 18, 1427–1432. (in Chinese with English abstract) [张建利, 毕玉芬 (2009) 金沙江干热河谷山地草地封育过程中土壤种子库时空特征. *生态环境学报*, 18, 1427–1432.]
- Zhang JT (2004) *Quantitative Ecology*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张金屯 (2004) 数量生态学. 科学出版社, 北京.]
- Zhang L, Fang JY (2004) Changes in soil seed banks and biodiversity along an altitude gradient in Taibai Mountain. *Acta Geographica Sinica*, 59, 880–888. (in Chinese with English abstract) [张玲, 方精云 (2004) 太白山土壤种子库储量与物种多样性的垂直格局. *地理学报*, 59, 880–888.]
- Zhao LY, Li FR, Wang XZ (2003) Characteristics of soil seed bank and standing vegetation change in sandy grasslands along a desertification gradient. *Acta Ecologica Sinica*, 23, 1745–1756. (in Chinese with English abstract) [赵丽娅, 李锋瑞, 王先之 (2003) 草地沙化过程中地上植被与土壤种子库变化特征. *生态学报*, 23, 1745–1756.]
- Zhao LP, Cheng JM, Wan HE (2008) Research progresses in the soil seed bank. *Science of Soil and Water Conservation*, 6(5), 112–118. (in Chinese with English abstract) [赵凌平, 程积民, 万惠娥 (2008) 土壤种子库研究进展. *中国水土保持科学*, 6(5), 112–118.]
- Zhu H (1990) A study on the thorny succulent shrubs in dry-hot valley of Yuanjiang County. *Acta Botanica Yunnanica*, 12, 301–310. (in Chinese with English abstract) [朱华 (1990) 元江干热河谷肉质多刺灌丛的研究. *云南植物研究*, 12, 301–310.]
- Zhong XH (2000) Degradation of ecosystem and ways of its rehabilitation and reconstruction in dry and hot valley: take representative area of Jinsha River, Yunnan Province as an example. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 9, 376–383. (in Chinese with English abstract) [钟祥浩 (2000) 干热河谷区生态系统退化及恢复与重建途径: 以云南金沙江典型区为例. *长江流域资源与环境*, 9, 376–383.]

(责任编辑: 沈泽昊 责任编辑: 时意专)

附录 Supplementary Material

附录1 元江干热河谷灌草丛群落密度特征

Appendix 1 Density of shrub and grass communities in the dry-hot valleys of the upper, middle and lower regions of Yuan River
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2015253-1.pdf>

附录2 元江干热河谷灌草丛群落土壤种子库密度特征

Appendix 2 Soil seed bank density of the shrub-grass community in dry-hot valley of Yuan River
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2015253-2.pdf>

张志明, 沈蕊, 张建利, 徐倩, 罗园, 遇翹楚, 张秋霞, 欧晓昆. 元江流域干热河谷灌草丛土壤种子库与地上植物群落的物种组成比较. 生物多样性, 2016, **24** (4): 431–439. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2015253>

附录1 元江干热河谷灌草丛群落密度特征

Appendix 1 Density of shrub and grass communities in the dry-hot valleys of the upper, middle and lower regions of the Yuanjiang River									
科		物种名称	地上植物群落密度(丛(株)/m ²)					Chi-Square	P
Family		Species	Aboveground vegetation density (plants/m ²)						
			祥云	新平	元江	红河	元阳		
			Xiangyun	Xinping	Yuanjiang	Honghe	Yuanyang		
植物总种数 Total number of species			31	29	18	25	25		
植物总密度 Total plant species density in each plot			91.75±7.78	99.54±15.87	113.06±18.68	98.28±11.22	109.94±9.45	1.888	0.756
禾本科	Gramineae	扭黄茅 <i>Heteropogon contortus</i>	52.60±1.88	33.00±5.45	79.13±12.41	83.33±13.64	45.93±4.35	14.516	0.006**
禾本科	Gramineae	白羊草 <i>Bothriochloa ischcemum</i>	0.06±0.06	—	—	3.33±2.56	—	9.063	0.060
禾本科	Gramineae	旱茅 <i>Eremopogon delavayi</i>	0.33±0.33	—	—	—	—	4.000	0.406
禾本科	Gramineae	矛叶荩草 <i>Arthraxon lanceolatus</i>	4.93±1.36	—	—	1.87±1.08	—	33.202	<0.001***
禾本科	Gramineae	拟金茅 <i>Eulaliopsis binata</i>	0.73±0.44	—	—	—	—	12.000	0.015*
禾本科	Gramineae	疏花野青茅 <i>Deyeuxia arundinacea</i> var. <i>laxiflora</i>	3.67±0.90	—	—	—	—	40.153	<0.001***
禾本科	Gramineae	扭鞘香茅 <i>Cymbopogon hamatulus</i>	—	0.13±0.13	—	0.13±0.13	—	3.041	0.551
禾本科	Gramineae	孔颖草 <i>Bothriochloa pertusa</i>	—	24.80±8.49	—	—	—	36.485	<0.001***
菊科	Compositae	牛膝菊 <i>Galinsoga parviflora</i>	—	—	—	0.06±0.06	—	4.000	0.406
菊科	Compositae	百能葳 <i>Blainvillea acmella</i>	0.13±0.13	—	—	0.13±0.13	0.40±0.40	3.645	0.456
菊科	Compositae	万丈深 <i>Crepis phoenix</i>	0.20±0.14	—	—	—	—	8.108	0.088
菊科	Compositae	小蓬草 <i>Conyza canadensis</i>	0.93±0.44	—	—	—	—	21.112	<0.001***
菊科	Compositae	飞机草 <i>Eupatorium odoratum</i>	—	0.67±0.67	—	0.40±0.19	0.33±0.16	10.582	0.032*
菊科	Compositae	金腰箭 <i>Synedrella nodiflora</i>	—	0.27±0.15	—	—	—	12.329	0.015*
菊科	Compositae	地胆草 <i>Elephantopus scaber</i>	—	—	—	0.47±0.35	—	8.108	0.088
菊科	Compositae	一点红 <i>Emilia sonchifolia</i>	0.13±0.13	—	—	—	0.06±0.06	3.041	0.551
菊科	Compositae	牡蒿 <i>Artemisia japonica</i>	—	—	—	0.33±0.23	—	8.108	0.088
豆科	Leguminosae	单叶木蓝 <i>Indigofera linifolia</i>	—	—	28.20±8.49	0.33±0.27	9.13±6.92	18.517	0.001***
豆科	Leguminosae	丁癸草 <i>Zornia gibbosa</i>	—	0.27±0.21	0.06±0.06	—	—	5.526	0.237
豆科	Leguminosae	灰色木蓝 <i>Indigofera cinerascens</i>	—	—	—	0.47±0.20	—	21.119	<0.001***
豆科	Leguminosae	假地蓝 <i>Crotalaria ferruginea</i>	—	—	—	1.00±1.00	—	4.000	0.406
豆科	Leguminosae	截叶铁扫帚 <i>Lespedeza cuneata</i>	2.93±0.64	—	—	—	—	50.466	<0.001***
豆科	Leguminosae	蔓草虫豆 <i>Cajanus scarabaeoides</i>	—	2.60±1.08	0.87±0.43	1.00±0.32	0.53±0.47	18.025	0.001***
豆科	Leguminosae	三点金 <i>Desmodium triflorum</i>	0.40±0.24	0.20±0.20	—	0.33±0.19	0.06±0.06	22.489	<0.001***
豆科	Leguminosae	小鹿藿 <i>Rhynchosia minima</i>	—	—	—	—	1.53±1.13	8.108	0.088
豆科	Leguminosae	小叶三点金 <i>Desmodium microphyllum</i>	—	—	—	0.53±0.27	0.67±0.67	12.337	0.015*
豆科	Leguminosae	圆锥山蚂蝗 <i>Desmodium elegans</i>	0.27±0.21	—	—	—	—	8.108	0.088

科 Family	物种名称 Species	地上植物群落密度(丛(株)/m ²) Aboveground vegetation density (plants/m ²)					Chi-Square	P
		祥云	新平	元江	红河	元阳		
		Xiangyun	Xinping	Yuanjiang	Honghe	Yuanyang		
豆科 Leguminosae	练荚豆 <i>Alysicarpus vaginalis</i>	0.27±0.21	23.73±11.56	—	—	0.73±0.54	16.932	0.020*
豆科 Leguminosae	肾叶山蚂蝗 <i>Desmodium renifolium</i>	—	0.20±0.20	—	—	—	4.000	0.406
豆科 Leguminosae	马棘 <i>Indigofera pseudotinctoria</i>	—	5.27±3.11	—	—	—	16.660	0.002**
豆科 Leguminosae	铁刀木 <i>Cassia siamea</i>	—	—	—	0.13±0.13	—	4.000	0.406
豆科 Leguminosae	狸尾豆 <i>Uraria lagopodioides</i>	—	—	—	0.13±0.13	—	4.000	0.406
豆科 Leguminosae	长波叶山蚂蝗 <i>Desmodium sequax</i>	—	—	—	0.80±0.50	—	12.327	0.015*
豆科 Leguminosae	深紫木蓝 <i>Indigofera atropurpurea</i>	—	1.27±1.02	1.13±0.93	—	1.40±1.26	5.445	0.245
豆科 Leguminosae	大叶千斤拔 <i>Flemingia macrophylla</i>	0.13±0.13	—	—	—	—	4.000	0.406
豆科 Leguminosae	元江杭子梢 <i>Campylotropis henryi</i>	—	—	—	—	0.06±0.06	4.000	0.406
大戟科 Euphorbiaceae	飞扬草 <i>Euphorbia hirta</i>	0.40±0.27	0.13±0.13	—	0.13±0.13	0.80±0.35	9.260	0.054
大戟科 Euphorbiaceae	算盘子 <i>Glochidion puberum</i>	—	0.27±0.21	—	—	—	8.108	0.088
大戟科 Euphorbiaceae	叶下珠 <i>Phyllanthus urinaria</i>	2.47±1.07	—	—	—	19.00±4.64	58.395	<0.001***
大戟科 Euphorbiaceae	余甘子 <i>Phyllanthus emblica</i>	1.00±0.41	0.06±0.06	—	—	—	21.500	<0.001***
莎草科 Cyperaceae	水蜈蚣 <i>Kyllinga brevifolia</i>	—	—	—	—	14.47±5.99	40.149	<0.001***
莎草科 Cyperaceae	滇飘拂草 <i>Fimbristylis yunnanensis</i>	—	—	—	—	1.47±1.33	8.108	0.088
莎草科 Cyperaceae	两歧飘拂草 <i>Fimbristylis dichotoma</i>	—	—	—	—	6.40±3.44	12.327	0.015*
锦葵科 Malvaceae	黄花稔 <i>Sida acuta</i>	0.13±0.13	4.33±1.80	1.13±0.65	0.06±0.06	—	31.355	<0.001***
锦葵科 Malvaceae	梵天花 <i>Urena procumbens</i>	—	—	—	—	1.40±1.33	8.108	0.088
锦葵科 Malvaceae	拔毒散 <i>Sida szechuensis</i>	0.20±0.20	0.53±0.29	—	—	—	12.500	0.014*
唇形科 Labiatae	野拔子 <i>Elsholtzia rugulosa</i>	1.40±0.52	—	—	0.13±0.13	—	25.689	<0.001***
唇形科 Labiatae	毛萼香茶菜 <i>Rabdosia eriocalyx</i>	—	—	—	0.06±0.06	—	60.000	<0.001***
茜草科 Rubiaceae	野丁香 <i>Leptodermis potanini</i>	—	—	—	—	1.27±1.27	4.000	0.406
茜草科 Rubiaceae	白花蛇舌草 <i>Hedyotis diffusa</i>	0.47±0.35	0.06±0.06	—	—	—	5.573	0.233
马鞭草科 Verbenaceae	牡荆 <i>Vitex negundo</i> var. <i>cannabifolia</i>	—	0.71±0.32	—	—	0.13±0.09	12.652	0.013*
马鞭草科 Verbenaceae	山牡荆 <i>Vitex quinata</i>	—	—	—	—	0.13±0.09	8.108	0.088
卷柏科 Selaginellaceae	卷柏 <i>Selaginella tamariscina</i>	—	—	0.13±0.13	—	—	4.000	0.406
萝藦科 Asclepiadaceae	牛角瓜 <i>Calotropis gigantea</i>	—	—	0.06±0.06	—	—	4.000	0.406
漆树科 Anacardiaceae	清香木 <i>Pistacia weinmannifolia</i>	—	0.13±0.13	0.06±0.06	—	—	3.041	0.551
蔷薇科 Rosaceae	黄果悬钩子 <i>Rubus xanthocarpus</i>	0.20±0.20	—	—	—	—	4.000	0.406
桑科 Moraceae	地石榴 <i>Ficus tikoua</i>	14.73±6.66	—	—	—	—	16.662	0.002**
无患子科 Sapindaceae	车桑子 <i>Dodonaea viscosa</i>	2.20±0.35	—	—	2.67±1.48	0.93±0.28	33.192	<0.001***
旋花科 Convolvulaceae	土丁桂 <i>Evolvulus alsinoides</i>	—	—	—	—	1.40±1.40	4.000	0.406
鸭跖草科 Commelinaceae	鸭跖草 <i>Commelina communis</i>	—	—	1.20±0.77	—	—	12.327	0.015*

张志明, 沈蕊, 张建利, 徐倩, 罗园, 遇翹楚, 张秋霞, 欧晓昆. 元江流域干热河谷灌草丛土壤种子库与地上植物群落的物种组成比较. 生物多样性, 2016, **24** (4): 431–439.
http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2015253

科 Family	物种名称 Species	地上植物群落密度(丛(株)/m ²) Aboveground vegetation density (plants/m ²)					Chi- Square	P
		祥云 Xiangyun	新平 Xinping	元江 Yuanjiang	红河 Honghe	元阳 Yuanyang		
紫茉莉科 Nyctaginaceae	黄细心 <i>Boerhavia diffusa</i>	—	—	0.33±0.27	0.33±0.27	0.73±0.60	5.583	0.233
防己科 Menispermaceae	毛木防己 <i>Cocculus orbiculatus</i> var. <i>mollis</i>	—	0.06±0.06	0.33±0.23	—	—	5.573	0.233
禾本科 Gramineae	扭鞘香茅 <i>Cymbopogon hamatulus</i>	—	0.24±0.10	—	—	—	18.147	0.001***
禾本科 Gramineae	蔗茅 <i>Erianthus rufipilus</i>	—	—	0.06±0.06	—	—	4.000	0.406
禾本科 Gramineae	类芦 <i>Neyraudia reynaudiana</i>	0.08±0.05	0.03±0.02	—	—	—	6.878	0.142
豆科 Leguminosae	酸豆 <i>Tamarindus indica</i>	—	—	0.01±0.01	—	—	4.000	0.406
豆科 Leguminosae	蔓草虫豆 <i>Cajanus scarabaeoides</i>	—	0.06±0.06	—	—	—	4.000	0.406
豆科 Leguminosae	马棘 <i>Indigofera pseudotinctoria</i>	—	0.28±0.27	—	—	—	8.333	0.080
豆科 Leguminosae	铁刀木 <i>Cassia siamea</i>	—	0.02±0.02	—	0.05±0.04	—	5.790	0.215
豆科 Leguminosae	白刺花 <i>Sophora davidii</i>	1.68±1.68	—	—	—	—	4.000	0.406
锦葵科 Malvaceae	拔毒散 <i>Sida szechuensis</i>	—	0.01±0.01	—	—	—	4.000	0.406
锦葵科 Malvaceae	黄花稔 <i>Sida acuta</i>	0.20±0.20	0.32±0.20	0.02±0.02	—	—	6.818	0.146
唇形科 Labiatae	毛萼香茶菜 <i>Rabdosia eriocalyx</i>	—	—	0.02±0.02	—	—	4.000	0.406
大戟科 Euphorbiaceae	余甘子 <i>Phyllanthus emblica</i>	0.07±0.03	—	—	—	—	13.091	0.011*
番荔枝科 Annonaceae	细基丸 <i>Polyalthia cerasoides</i>	—	0.02±0.02	—	—	—	4.000	0.406
含羞草科 Mimosaceae	山合欢 <i>Albizia kalkora</i>	—	0.01±0.01	—	—	—	4.000	0.406
菊科 Compositae	飞机草 <i>Eupatorium odoratum</i>	—	0.53±0.11	—	0.09±0.05	0.02±0.02	18.129	0.001***
蓼科 Polygonaceae	戟叶酸模 <i>Rumex hastatus</i>	0.09±0.04	—	—	—	—	13.028	0.011*
萝藦科 Asclepiadaceae	牛角瓜 <i>Calotropis gigantea</i>	—	—	0.02±0.01	0.03±0.02	0.03±0.02	6.685	0.154
漆树科 Anacardiaceae	清香木 <i>Pistacia weinmannifolia</i>	—	—	0.05±0.02	—	—	13.028	0.011*
千屈菜科 Lythraceae	虾子花 <i>Woodfordia fruticosa</i>	0.02±0.02	—	—	—	—	8.333	0.080
茜草科 Rubiaceae	水锦树 <i>Wendlandia uvariifolia</i>	0.05±0.03	—	—	—	—	8.333	0.080
蔷薇科 Rosaceae	华西小石积 <i>Osteomeles schwerinae</i>	0.02±0.02	—	—	—	—	4.000	0.406
桑科 Moraceae	构树 <i>Broussonetia papyifera</i>	—	0.16±0.16	—	—	—	4.000	0.406
柿科 Ebenaceae	云南柿 <i>Diospyros yunnanensis</i>	—	0.02±0.02	—	—	—	4.000	0.406
桃金娘科 Myrtaceae	大叶桉 <i>Eucalyptus robusta</i>	—	0.01±0.01	—	—	—	4.000	0.406
无患子科 Sapindaceae	车桑子 <i>Dodonaea viscosa</i>	—	—	0.03±0.03	0.11±0.05	0.29±0.03	17.862	0.001***
马鞭草科 Verbenaceae	疏序黄荆 <i>Vitex negundo</i> var. <i>negundo</i> f. <i>laxipaniculata</i>	—	0.03±0.02	0.19±0.08	—	—	14.801	0.005**

*** $P < 0.001$, ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$.

附录2 元江干热河谷灌草丛群落土壤种子库密度特征
Appendix 2 Soil seed bank density of the shrub-grass community in dry-hot valley of the Yuanjiang River

科 Family	植物名称 Speices	种子库密度(粒/m ²) Soil seed bank density (seeds/m ²)					Chi- Square	P
		祥云 Xiangyun	新平 Xinping	元江 Yuanjiang	红河 Honghe	元阳 Yuanyang		
物种总数量	Total number of species	19	12	9	12	10		
物种平均总密度	The mean species density in each plot	2026.67±130.13	1080.00±339.87	613.33±196.52	726.67±118.51	486.67±70.40	12.703	0.013*
禾本科	Gramineae 扭黄茅 <i>Heteropogon contortus</i>	633.33±114.02	373.33±112.25	466.67±222.86	240.00±75.57	40.00±12.47	12.893	0.012*
禾本科	Gramineae 矛叶荩草 <i>Arthraxon lanceolatus</i>	173.33±41.36	6.67±6.67	—	60.00±26.67	—	17.681	0.010**
禾本科	Gramineae 旱茅 <i>Eremopogon delavayi</i>	120.00±73.48	—	—	—	—	8.348	0.080
禾本科	Gramineae 臂形草 <i>Brachiaria eruciformis</i>	46.67±16.99	—	—	—	—	18.130	0.010**
禾本科	Gramineae 马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i>	326.67±92.73	—	—	—	—	23.659	<0.001***
禾本科	Gramineae 白草 <i>Pennisetum centrasiaticum</i>	—	160.00±48.76	—	—	—	18.113	0.001***
豆科	Leguminosae 响铃豆 <i>Crotalaria albida</i>	6.67±6.67	20.00±20.00	—	—	—	3.133	0.536
豆科	Leguminosae 狸尾豆 <i>Uraria lagopodioides</i>	6.67±6.67	—	—	—	—	4.000	0.406
豆科	Leguminosae 苍耳 <i>Xanthium sibiricum</i>	—	6.67±6.67	—	—	—	4.000	0.406
豆科	Leguminosae 猪屎豆 <i>Crotalaria pallida</i>	—	113.33±113.33	—	—	—	4.000	0.406
豆科	Leguminosae 绵三七 <i>Eriosema himalaicum</i>	—	—	—	13.33±8.16	—	8.438	0.080
豆科	Leguminosae 截叶铁扫帚 <i>Lespedeza cuneata</i>	—	—	—	6.67±6.67	—	4.000	0.406
豆科	Leguminosae 单叶木蓝 <i>Indigofera linifolia</i>	—	—	—	—	6.67±6.67	4.000	0.406
菊科	Compositae 假蓬风毛菊 <i>Saussurea conyzoides</i>	240.00±64.46	—	26.67±19.44	26.67±12.47	13.33±8.16	13.691	0.008
菊科	Compositae 苦蒿 <i>Artemisia codoncephala</i>	—	—	46.67±22.61	20.00±8.16	20.00±13.33	8.048	0.090
菊科	Compositae 飞机草 <i>Eupatorium odoratum</i>	26.67±16.32	173.33±140.39	—	193.33±66.16	140.00±48.76	14.952	0.005**
菊科	Compositae 鼠麴草 <i>Gnaphalium affine</i>	—	6.67±6.67	6.67±6.67	—	6.67±6.67	2.182	0.702
菊科	Compositae 豨薟 <i>Siegesbeckia orientalis</i>	53.33±45.46	—	—	—	—	8.330	0.800
菊科	Compositae 一点红 <i>Emilia sonchifolia</i>	—	—	6.67±6.67	—	—	4.000	0.406
菊科	Compositae 绵毛挖耳草 <i>Carpesium cernuum</i> var. <i>lanatum</i>	73.33±24.49	—	—	—	—	23.659	<0.001***
锦葵科	Malvaceae 黄花棂 <i>Sida acuta</i>	—	13.33±8.16	—	—	—	8.348	0.080
锦葵科	Malvaceae 拔毒散 <i>Sida szechuensis</i>	—	—	—	13.33±13.33	—	4.000	0.406
大戟科	Euphorbiaceae 飞扬草 <i>Euphorbia hirta</i>	180.00±59.25	—	20.00±20.00	46.67±29.05	166.67±59.62	11.347	0.230
大戟科	Euphorbiaceae 叶下珠 <i>Phyllanthus urinaria</i>	20.00±8.16	146.67±107.80	26.67±16.32	26.67±12.47	80.00±24.94	4.093	0.394
唇形科	Labiatae 香薷 <i>Elsholtzia ciliata</i>	—	—	6.67±6.67	—	—	4.000	0.406
萝藦科	Asclepiadaceae 牛角瓜 <i>Calotropis gigantea</i>	—	—	—	—	6.67±6.67	4.000	0.406
荨麻科	Urticaceae 红雾水葛 <i>Pouzolzia sanguinea</i>	13.33±8.16	—	6.67±6.67	66.67±29.81	—	11.550	0.210
椴树科	Tiliaceae 刺蒴麻 <i>Triumfetta rhomboidea</i>	13.33±13.33	—	—	—	—	4.000	0.406

张志明, 沈蕊, 张建利, 徐倩, 罗园, 遇翹楚, 张秋霞, 欧晓昆. 元江流域干热河谷灌草丛土壤种子库与地上植物群落的物种组成比较. 生物多样性, 2016, **24** (4): 431–439. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2015253>

科 Family	植物名称 Speices	种子库密度(粒/m ²) Soil seed bank density (seeds/m ²)					Chi-Square	P
		祥云 Xiangyun	新平 Xinping	元江 Yuanjiang	红河 Honghe	元阳 Yuanyang		
茜草科 Rubiaceae	白花蛇舌草 <i>Hedyotis diffusa</i>	6.67±6.67	53.33±45.46	—	—	—	5.948	0.203
茄科 Solanaceae	龙葵 <i>Solanum nigrum</i>	6.67±6.67	—	—	—	—	4.000	0.406
莎草科 Cyperaceae	水蜈蚣 <i>Kyllinga brevifolia</i>	46.47±20.00	6.67±6.67	—	—	—	10.352	0.035
藤黄科 Guttiferae	地耳草 <i>Hypericum japonicum</i>	33.33±10.54	—	—	—	—	18.182	0.001***
无患子科 Sapindaceae	车桑子 <i>Dodonaea viscosa</i>	—	—	—	13.33±8.16	6.67±6.67	5.818	0.213

****P* < 0.001, ***P* < 0.01, **P* < 0.05.