

黄土丘陵沟壑区退耕地土壤 种子库特征与季节动态

王宁^{1,3}, 贾燕锋^{1,3}, 白文娟^{1,3}, 张振国^{1,3}, 焦菊英^{1,2*}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 采用野外样线取样与室内萌发相结合的方法研究了黄土高原丘陵沟壑区退耕地种子库的组成、密度、分布特征、季节动态、种子库类型。结果表明, 土壤种子库中共发现 50 种植物的种子, 隶属 15 个科, 39 个属, 主要物种组成与密度季节间差异不显著; 在演替过程中土壤种子库的物种数量与密度随退耕年限的增加表现出: 增加- 减少- 增加的趋势, 同时阳坡种子库密度波动较阴坡剧烈; 土壤种子库密度年内变化范围为 1 067~ 14 717 粒/ m², 土壤种子库平均密度是夏季> 秋季> 春季; 研究区域退耕地土壤种子库类型属于以猪毛蒿为优势种, 并具有其他一年生、多年生草本植物与灌丛种子的没有显著的季节动态的持久种子库, 是物种适应黄土丘陵沟壑区特有生态环境条件的繁殖更新策略; 从土壤种子库的物种组成、密度、类型来看, 黄土丘陵沟壑区退耕地具有一定的自然恢复潜力。

关键词: 土壤种子库; 物种组成; 种子库密度; 种子库动态; 土壤种子库类型; 黄土丘陵沟壑区

中图分类号: S154. 4; Q948. 1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-5759(2009)03-0043-10

黄土丘陵沟壑区位于黄土高原北部, 受地理位置的过渡性、气候变化的剧烈性、地形和地貌的复杂性、土壤的易蚀性以及人类活动对植被的破坏等多种因素的影响, 该区已成为黄土高原水土流失最严重的地区, 同时也是我国生态环境最为脆弱的地区之一^[1], 生态系统亟待修复。植被作为生态系统物质循环和能量交换的枢纽, 是防止生态退化的物质基础^[2]; 同时, 植被可从根本上控制水土流失。因此, 植被恢复是退化生态系统恢复的前提与关键。然而, 该区域植被恢复与建设已有 50 多年的历史, 但整体上效果不佳, 而且人工植被掠夺性地利用有限的土壤水资源, 出现了明显的土壤干层, 影响着生态系统的可持续发展^[3~5]。植被的自然恢复与其生态环境相适应而具有较高的生态功能, 并以其代价低而越来越受到人们的重视^[6,7], 而土壤种子库则是植被演替与恢复的基础^[8]。土壤种子库是指存在于土壤表面和土壤中的全部存活种子的总和, 是植物群落的一部分; 这些具有活力的种子当遇到合适的外部条件便会萌发成幼苗, 成为幼苗建立与植被更新的重要基础^[9~12]。可见土壤种子库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, 对植物物种和群落的恢复与保护具有重要的应用价值^[13,14]。因此对土壤种子库的认识是全面理解植被生态学特征的关键所在^[15], 有助于了解群落的演替趋势, 指导植被的更新与重建, 更可为生态恢复中的实践操作提供理论依据^[16]。所以加强生态脆弱区的土壤种子库数量与组成特征的研究, 对生态脆弱区的植被恢复与重建具有现实指导意义^[17]。但是在土壤侵蚀非常严重、植被演替恢复极度缓慢的黄土高原地区, 有关土壤种子库的研究非常有限。王辉和任继周^[18,19]对子午岭天然油松林、人工油松林、人工落叶松林、人工刺槐林 4 种林分的土壤种子库特征及其影响因子的研究, 认为土壤种子库能够为林分的天然更新提供基本条件; 陈智平等^[20]对子午岭辽东栎林土壤种子库特征, 以及萌发、虫蛀、生理死亡、动物摄食、霉变与种子大小对种子命运的影响研究, 得出储量和萌发条件不是幼苗更新的限制因子, 辽东栎种群更新限制主要在成苗阶段; 程积民等^[21]对宁夏云雾山典型草原本氏针茅(*Stipa bungeana*)、百里香(*Thymus monogolicus*)和铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)群落不同封禁期、不同坡位土壤种子库的物种变化特征进行研究, 认为放

*收稿日期: 20080201; 改回日期: 20081210

基金项目: 国家自然科学基金项目(40771126; 40571094)资助。

作者简介: 王宁(1982), 男, 河北保定人, 在读博士。E2mail: wangni012234@sohu.com

* 通讯作者。E2mail: jyjiao@ms.iswc.ac.cn

牧和人为活动的长期干扰可降低土壤种子库的物种密度,严重影响地上植被的自然更新与种群组成;有关黄土丘陵沟壑区退耕地恢复过程土壤种子库的研究还处于起步阶段,白文娟等^[22,23]对该区域安塞县墩滩山退耕地春季土壤种子库结构特征、土壤种子库与地表植被的关系以及种子库对退耕地植被恢复潜力进行了初步的研究,得出种子库与地上植被相似性较低,相关性较小,种子库在植被恢复中的潜力还比较小,植被恢复还需要适度的人为干预与调控。前人的研究中基本没有涉及土壤种子库的季节动态,但对其研究是植物种群生态学研究不可缺少的环节,在种群生态对策、物种进化方面具有重要学术价值^[24]。研究退耕地自然恢复过程中土壤种子库的特征及季节动态,将为黄土高原丘陵沟壑区退耕地植被恢复演替作出更深层次的生态学解释,为人工适度干预、调控、加速植被恢复的实践探索提供重要的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

研究区位于黄土丘陵沟壑区的典型区安塞县真武洞镇西沟流域的墩滩山。安塞县地处东经 108°51'44"~109°26'18",北纬 36°30'45"~37°19'31"。受基础地形和现代侵蚀的影响,境内地形破碎,沟壑纵横,水土流失严重。气候属于暖温带半干旱气候,年均降水量 505.3 mm,降水年内分布不均,7-9 月降水量占年降水量的 61.1%。土壤类型主要为黄绵土,其中粉粒占 64%~73%,黏粒占 17%~20%,土质疏松,抗蚀抗冲性差,水土流失严重。本区处于森林与典型草原间的过渡地带,植被人为破坏严重,生长稀疏。在中低山地局部还保存有极度残败的天然次生林,且大部分植被已旱化,植被类型已草原化^[25]。分布广泛的物种有猪毛蒿(*A. scoparia*),铁杆蒿(*A. giraldii*),达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*),长芒草(*Stipa bungeana*),白羊草(*Bothriochloa ischaemun*)等。土壤种子库调查取样在安塞真武洞镇西沟流域的墩滩山进行,共调查样地 12 个,样地基本情况如表 1 所示。

表 1 样地的基本情况

Table 1 Basic characteristics of the research plots

| 样地号 Plot No. | 坡向 Aspect | 群落优势种 Dominant species of vegetation community | 退耕年限 Year since abandonment (a) | 坡度 Slope (b) |
|--------------|-----------|---|---------------------------------|--------------|
| 1 | | 猪毛蒿 <i>A. scoparia</i> | 3 | 22 |
| 2 | 阳坡 | 猪毛蒿 <i>A. scoparia</i> | 6 | 26 |
| 3 | Sunny | 达乌里胡枝子 <i>L. davurica</i> , 猪毛蒿 <i>A. scoparia</i> | 12 | 28 |
| 4 | slope | 达乌里胡枝子 <i>L. davurica</i> | 17 | 35 |
| 5 | | 达乌里胡枝子 <i>L. davurica</i> , 长芒草 <i>S. bungeana</i> | 25 | 30 |
| 6 | | 白羊草 <i>B. ischaemun</i> | 30 | 30 |
| 7 | | 猪毛蒿 <i>A. scoparia</i> | 4 | 15 |
| 8 | | 铁杆蒿 <i>A. gmelinii</i> , 猪毛蒿 <i>A. scoparia</i> | 7 | 20 |
| 9 | 阴坡 | 铁杆蒿 <i>A. gmelinii</i> , 赖草 <i>Leymus secalinus</i> | 12 | 14 |
| 10 | Shady | 铁杆蒿 <i>A. gmelinii</i> , 达乌里胡枝子 <i>L. davurica</i> | 17 | 12 |
| 11 | slope | 达乌里胡枝子 <i>L. davurica</i> , 百里香 <i>T. mongolicus</i> , 长芒草 <i>S. bungeana</i> | 25 | 12 |
| 12 | | 铁杆蒿 <i>A. gmelinii</i> | 30 | 33 |

1.2 研究方法

1.2.1 取样方法 土壤种子库取样分 3 次进行:春季(2005 年 4 月 1-4 日),这时土样中包含持久种子库和短暂种子库;夏季(2005 年 8 月 1-5 日),这时土样中主要包含持久种子库;秋季(2005 年 10 月 27-30 日),土样中包含了新种子的补充^[26]。

土壤种子库的取样采用样线法,即选择不同坡向、不同退耕年限的典型退耕地作为样地,由于研究区域基础

地形破碎,农户以家庭为单位开垦坡地,后弃耕,所以退耕坡地面积相对较小。故在每个试验地平行设置 2 条 10 m 长的样线,样线间隔 5 m,在样线上每隔 5 m 利用 10 cm@10 cm 的取样器,分 2 层采集土壤,每个样地 6 个重复土样。土样带回实验室进行萌发试验。

1.2.2 种子库鉴定方法 土壤种子库的数量与组成采用萌发法^[27]进行鉴定。将风干土样平铺于置有灭活河沙的盘中,土层厚度不超过 1 cm,保持适宜湿度、温度,持续 6 个月以上的时间,以保证土壤中的种子充分地萌发,同时摆放 3 个只有灭活河沙的盘作为对照。当有种子萌发时开始记录幼苗数量,并做出标记,待幼苗长到能够鉴别时拔除,对难鉴定的移栽,待开花后鉴定。定期翻土,促进种子萌发,当连续 2 周没有种子萌发时,喷洒赤霉素打破休眠,尽量让土壤种子得以完全的萌发,直至连续 4 周土样中不再有种子萌发后结束萌发试验。

1.2.3 数据处理 利用 Shanon2wiener 指数和 Margalef 指数来分析各样地种子库的物种多样性。Shanon2wiener 指数(SW)计算公式:

$$SW = 3.3219[\log N - (1/N) \sum n_i \log n_i]$$

式中, N 为物种总个体数; n_i 为第 i 种的个体数。

丰富度指数 Margalef 指数(Ma)计算公式:

$$Ma = (S - 1) / \ln N$$

式中, S 为种子库物种总数; N 为种子库所有物种个体总数^[28]。

采用 Sorensen 相似系数计算不同土壤种子库的物种相似性,具体计算公式为:

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

式中, CC 为相似性系数; w 为 2 个样地共有种数; a 和 b 分别为 2 个样地各自拥有的物种数。

统计分析用 Excel 和 SPSS 软件处理。

2 结果与分析

2.1 土壤种子库物种组成特征

2.1.1 土壤种子库物种组成 12 个样地春季、夏季、秋季土壤样品萌发试验的幼苗鉴定结果见表 2。在这 3 组土壤种子库中, 9 885 个幼苗得以鉴定, 隶属 50 个种、39 个属、15 个科; 还有 28 个幼苗因为死亡而没有鉴定出其科、属、种。其中一年生草本 27 种, 种子数量达到土壤种子库总库容的 83.3%, 以猪毛蒿种子出现最多, 为 70.2%, 臭蒿(*A. hedini*) 达到 8.8%, 蚰果芥(*Torularia humilis*) 1.4%, 狗尾草(*Setaria viridis*) 1.5%, 画眉草(*Eragrostis pilosa*) 1.4%; 多年生草本 19 种, 种子数量达到土壤种子库总库容的 10.6%, 其中阿尔泰狗哇花(*Heteropappus altaicus*) 1.1%, 白羊草 4.4%, 硬质早熟禾(*Poa sphondylodes*) 2.3%; 半灌木占 3 种, 达乌里胡枝子 1.3%, 铁杆蒿 1.9%, 芡蒿为 1.1%; 灌木只有互生醉鱼草(*Buddleja alternifolia*) 出现, 仅有 3 棵幼苗。有些物种只有 1 棵幼苗出现, 如泥胡菜(*Hemistephalys lyrata*)、狭叶米口袋(*Gueldenstaedtia stenophylla*)、二色棘豆(*Oxytropis bicolor*) 等。

2.1.2 土壤种子库组成的季节变化 经过协方差分析得出, 研究区样地内种子库的物种数在相同的退耕年限和相同的季节不同坡向差异不显著, 而是随着退耕年限的变化具有极显著差异($P < 0.01$), 变化规律是退耕初期物种随退耕时间延长而增加, 到退耕 12 年达到最大平均 4.6 个物种(100 cm² 的取样面积内), 退耕 25 年左右物种数降到最低, 平均为 2.7 个物种。相同演替阶段不同坡向的物种数季节间的差异也不显著。春季、夏季、秋季土壤种子库的综合物种数分别为 27, 28 和 29, 其中, 有 12 个物种均出现在 3 个季节的土壤种子库中, 菊科 5 种))) 猪毛蒿、臭蒿、铁杆蒿、山苦荬、阿尔泰狗哇花, 豆科 2 种))) 达乌里胡枝子、沙打旺, 唇形花科 1 种))) 香青兰, 蔷薇科 1 种))) 菊叶委陵菜, 禾本科 3 种))) 狗尾草、白羊草、长芒草; 在春夏两季土壤种子库中同时出现的有 2 种, 芡蒿和硬质早熟禾; 春季与秋季土壤种子库同时出现的有 7 个物种, 分别为抱茎苦荬菜、地锦、灰条、败酱、砂引草、中华隐子草、画眉草; 只在春季土壤种子库出现的物种有 6 种, 分别是艾蒿、葶苈、地肤、百里香、鹤虱、紫草; 只在夏季土壤种子库中出现的有 14 种, 分别是茵陈蒿、小薊、狭叶米口袋、乳浆大戟、小藜、猪毛菜、委陵菜、蚰果芥、老鹳草、麦家公、多苞斑种草、角茴香、点地梅、拂子茅; 只在秋季土壤种子库中出现的有 9 种, 分别是苦菜、鬼针草、泥湖菜、芽葱、二色棘豆、= 牛儿苗、互生醉鱼草、亚麻、稗。

表2 2005年不同季节土壤种子库物种组成与密度

Table 2 Species composition and density of the seed bank in different seasons in year 2005

粒 Seed/m²

| 科 Family | 种 Species | 春季 Spring | | 夏季 Summer | | 秋季 Autumn | |
|--------------------|--|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| | | 0~ 5 cm | 5~ 10 cm | 0~ 5 cm | 5~ 10 cm | 0~ 5 cm | 5~ 10 cm |
| 菊科 Compositae | 猪毛蒿 <i>A. scoparia</i> | 3 589 | 1 849 | 3 353 | 731 | 2 521 | 803 |
| | 臭蒿 <i>A. hedinii</i> | 375 | 129 | 296 | 135 | 187 | 95 |
| | 铁杆蒿 <i>A. gmelinii</i> | 21 | 3 | 165 | 24 | 26 | 7 |
| | 茭蒿 <i>A. giraldii</i> | 1 | | 92 | 22 | | |
| | 艾蒿 <i>A. argyi</i> | 1 | 1 | | | | |
| | 茵陈蒿 <i>A. capillaris</i> | | | 3 | | | |
| | 阿尔泰狗娃花 <i>H. altaicus</i> | 10 | | 49 | 4 | 24 | 6 |
| | 山苦荬 <i>Ixeris chinensis</i> | 3 | | 39 | 7 | 12 | 10 |
| | 抱茎苦荬菜 <i>Ixeris sonchifolia</i> | 6 | | | | 3 | 1 |
| | 苦菜 <i>Sonchus oleraceus</i> | | | | | | 4 |
| | 小薊 <i>Cirsium setosum</i> | | | 4 | | | |
| | 鬼针草 <i>Bidens bipinnata</i> | | | | | 1 | 1 |
| | 鸦葱 <i>Scorzonera divaricata</i> | | | | | 11 | |
| | 泥胡菜 <i>H. lyrata</i> | | | | | | 1 |
| 豆科 Leguminosae | 达乌里胡枝子 <i>L. davurica</i> | 50 | 10 | 6 | | 68 | 38 |
| | 沙打旺 <i>Astragalus adsurgens</i> | 15 | 1 | 10 | 1 | 15 | 3 |
| | 狭叶米口袋 <i>G. stenophylla</i> | | | 1 | | | |
| | 二色棘豆 <i>O. bicolor</i> | | | | | 1 | |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 地锦 <i>Euphorbia humifusa</i> | 13 | 4 | | | 38 | |
| | 乳浆大戟 <i>Euphorbia esula</i> | | | 4 | | | |
| 藜科 Chenopodiaceae | 灰条 <i>Chenopodium album</i> | 17 | 3 | | | 24 | 6 |
| | 小藜 <i>Chenopodium serotinum</i> | | | 1 | | | |
| | 地肤 <i>Kochia scoparia</i> | 1 | | | | | |
| | 猪毛菜 <i>Salsola collina</i> | | | 1 | | | |
| 败酱科 Valerianaceae | 败酱 <i>Patrinia heterophylla</i> | 20 | | | | 4 | |
| 唇形科 Labiateae | 香青兰 <i>Dracocephalum moldavica</i> | 13 | | 19 | 1 | 26 | 7 |
| | 百里香 <i>T. mongolicus</i> | 1 | | | | | |
| 蔷薇科 Rosaceae | 菊叶委陵菜 <i>Potentilla tanacetifolia</i> | 11 | 4 | 19 | 14 | 6 | 1 |
| | 委陵菜 <i>P. chinensis</i> | | | 1 | 1 | | |
| 十字花科 Cruciferae | 葶苈 <i>Draaba nemorosa</i> | 1 | | | | | |
| | 虻果芥 <i>T. humilis</i> | | | 114 | 10 | | |
| = 忙儿苗科 Geraniaceae | 老鹳草 <i>Geranium wilfordii</i> | | | 26 | | | |
| | = 牛儿苗 <i>Erodium stephanianum</i> | | | | | | 1 |
| 马钱科 Loganiaceae | 互生醉鱼草 <i>B. alternifolia</i> | | | | | 6 | |
| 紫草科 Boraginaceae | 鹤虱 <i>Lappula myosotis</i> | 35 | 1 | | | | |
| | 砂引草 <i>Messerschmidia rosmarinifolia</i> | 1 | 1 | | | 1 | |
| | 紫草 <i>Lithospermum erythrorhizon</i> | 1 | | | | | |
| | 麦家公 <i>Lithospermum arvense</i> | | | 13 | 1 | | |
| | 多苞斑种草 <i>Bothriospermum secundum</i> | | | 3 | | | |
| 亚麻科 Linaceae | 亚麻 <i>Linum usitatissimum</i> | | | | | 4 | |
| 罂粟科 Papaveraceae | 角茴香 <i>Hypecoum erectum</i> | | | 1 | | | |
| 报春花科 Primulaceae | 点地梅 <i>Androsace umbellata</i> | | | 10 | | | |
| 禾本科 Gramineae | 画眉草 <i>E. pilosa</i> | 70 | 5 | | | 83 | 54 |
| | 狗尾草 <i>S. viridis</i> | 13 | 86 | 24 | 22 | 46 | 33 |
| | 白羊草 <i>B. ischaemun</i> | 42 | 5 | 269 | 47 | 250 | 39 |
| | 中华隐子草 <i>Cleistogenes chinensis</i> | 80 | 66 | | | 11 | |
| | 长芒草 <i>S. bungeana</i> | 17 | | 13 | | 1 | |
| | 硬质早熟禾 <i>P. sphondyloides</i> | 13 | 8 | 194 | 83 | | |
| | 拂子茅 <i>Calamagrostis epigaeos</i> | | | 6 | 3 | | |
| | 稗 <i>Echinochloa crusgalli</i> | | | | | 1 | |

3 个季节 0~ 10 cm 土层的土壤种子库物种组成相似性系数很低(表 3), 说明整体土壤种子库存在着较大的差异, 但是 0~ 5 和 5~ 10 cm 不同季节间的物种相似性系数较高, 说明不同物种的种子在土壤垂直剖面具有特定的分布范围。同时可以看出各层次春秋两季间的物种相似性系数较大。

2.1.3 土壤种子库物种多样性的季节变化 物种多样性是群落的重要特征, 为生态系统功能的运行和维护提供种源基础和支撑条件。对各样地土壤种子库的物种多样性指数和丰富度指数进行分析, 变化特征如图 1 和 2 所示。样地间的多样性指数和丰富度指数存在着差异, 同一样地不同季节也存在着差异。而且不同样地多样性指数与丰富度指数随时间的变化趋势也不相同。反映出不同恢复时期不同群落的特征。同时阴坡的多样性指数和丰富度指数普遍高于相同退耕年限的阳坡的多样性指数。

表 3 不同季节土壤种子库的物种相似性

Table 3 Species similarities of soil banks in different seasons

%

| 季节 Season | 0~ 5 cm | | 5~ 10 cm | | 0~ 10 cm | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 春季 Spring | 夏季 Summer | 春季 Spring | 夏季 Summer | 春季 Spring | 夏季 Summer |
| 夏季 Spring | 50.2 | | 50.0 | | 27.8 | |
| 秋季 Autumn | 73.1 | 45.3 | 58.8 | 45.3 | 32.1 | 25.6 |

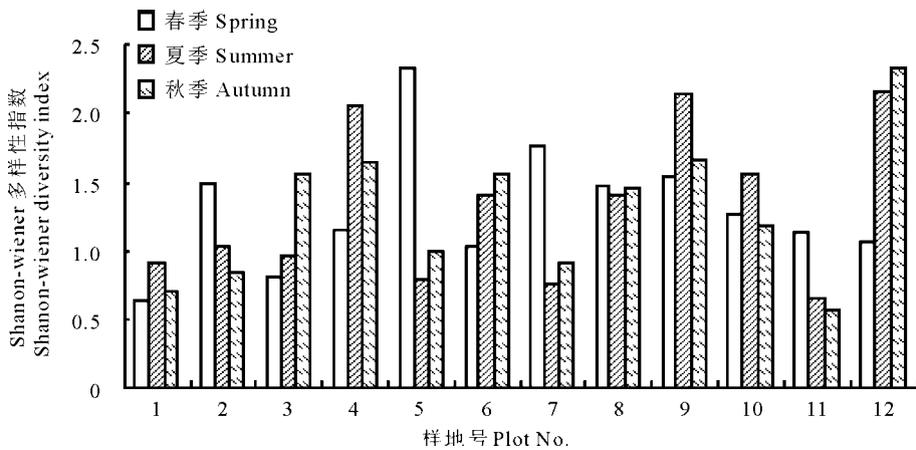


图 1 不同季节各样地的土壤种子库物种 Shannon-wiener 多样性指数的变化

Fig. 1 Shannon-wiener index of soil seed bank in different seasons

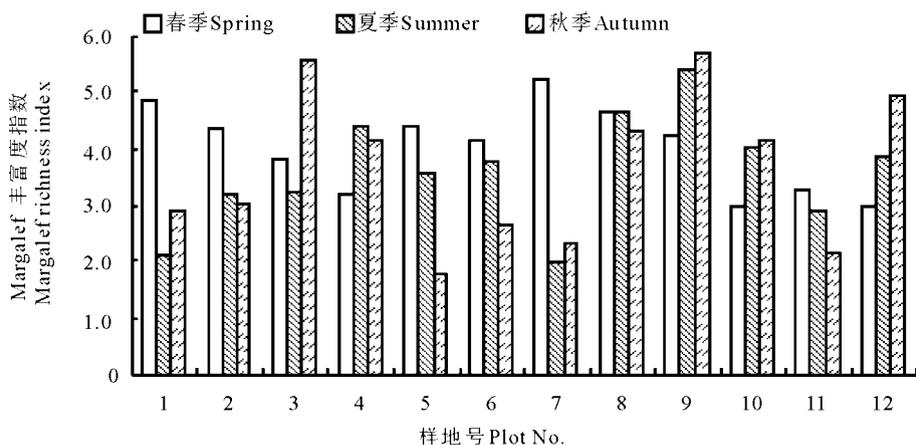


图 2 不同季节各样地土壤种子库物种 Margalef 丰富度指数的变化

Fig. 2 Margalef index of soil seed bank in different seasons

2.2 土壤种子库密度特征

2.2.1 种子库密度的季节变化 经过协方差分析得出,退耕年限对种子库密度影响达到了极显著($P < 0.01$),密度随退耕年限的增加表现出降低-增加-降低的趋势,在退耕 17 年左右的样地出现最高峰。而在阴阳坡不同样地种子库密度虽然有差异,但是总体差异不显著,只是个别样地间差异达到了显著水平,是受到季节和退耕年限的影响所致,而且阳坡种子库平均密度大于阴坡,但是最低值与最高值均出现在阳坡,说明阳坡在演替过程中种子库密度波动较大,而阴坡相对稳定。图 3 和 4 反映了 2005 年 12 个样地在春季、夏季、秋季 0~5, 5~10 cm 土层的土壤种子库密度变化特征。春季、夏季、秋季 0~5 cm 土层土壤种子库密度分布范围分别为 900~6467, 967~10500, 1850~9183 粒/ m^2 ; 5~10 cm 土层土壤种子库密度分布范围分别为 117~1967, 233~4216, 683~3217 粒/ m^2 , 3 个季节土壤种子库上下 2 层的种子库密度差异均达到了极显著水平,说明土壤种子库主要存留在 0~5 cm 土层中,占 80%左右。

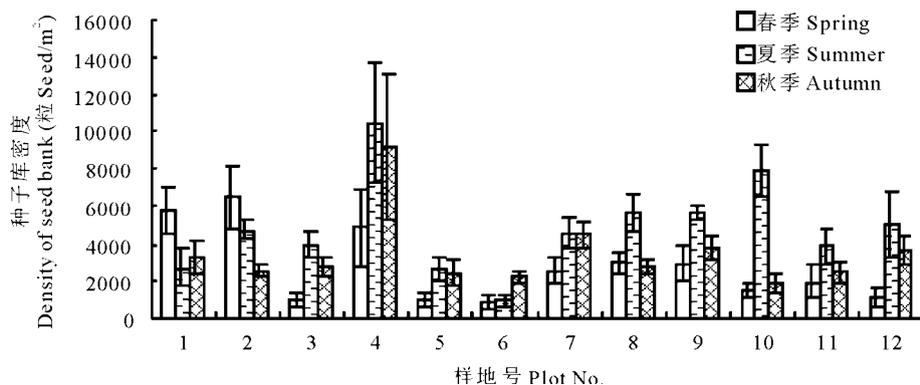


图 3 2005 年 0~5 cm 土层不同季节土壤种子库的密度特征

Fig. 3 Density of soil seed bank in 0-5 cm soil layer during different seasons in year 2005

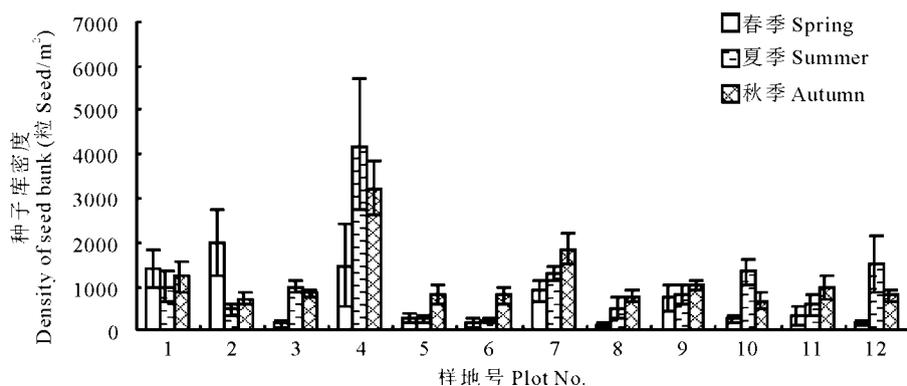


图 4 2005 年 5~10 cm 土层不同季节土壤种子库的密度特征

Fig. 4 Density of soil seed bank in 5-10 cm soil layer during different seasons in year 2005

2.2.2 主要物种种子库密度变化 研究区主要物种的土壤种子库密度差异很大,猪毛蒿具有最高的土壤种子库密度,其中各个时期的 0~5 cm 土层种子库密度均超过 1000 粒/ m^2 ,春季达到 3589 粒/ m^2 ;臭蒿春季 0~5 cm 土层密度最大为 375 粒/ m^2 ;白羊草和硬质早熟禾的种子库密度大于 200 粒/ m^2 ;铁杆蒿的种子库密度在夏季达到最高,0~5 cm 为 165 粒/ m^2 ;其他物种种子库密度在 100 粒/ m^2 以下,芨芨蒿夏季 0~5 cm 土层的密度为 92 粒/ m^2 ,画眉草秋季 0~5 cm 土层的密度为 83 粒/ m^2 ,狗尾草的最高密度出现在春季 0~10 cm 土层,为 86 粒/ m^2 ,中华隐子草的种子库密度为 80 粒/ m^2 ,达乌里胡枝子 68 粒/ m^2 。阿尔泰狗哇花、山苦荬密度小于 50 粒/ m^2 ,香青兰、菊叶委陵菜、长芒草的种子库密度小于 30 粒/ m^2 。猪毛蒿种子在总体土壤种子库中所占的比重

在各个季节均达到 70% 左右, 其他物种所占比重相对较小。

3 讨论

3.1 影响土壤种子库物种组成特征的因素分析

研究区域退耕地在植被恢复过程中主要存在猪毛蒿群落、达乌里胡枝子、长芒草群落、铁杆蒿群落、白羊草群落等。主要伴生物种有一年生生物种臭蒿、狗尾草、硬质早熟禾、香青兰等, 多年生物种芨蒿、阿尔泰狗娃花、菊叶委陵菜、山苦荬、中华隐子草等。所以这些物种的种子在土壤种子库中出现较多, 而且在各个季节均有出现。其中一年生物种 27 种, 种子数量达到土壤种子库总库容的 83.3%, 多年生草本 19 种, 种子数量达到土壤种子库总库容的 11.6%。原因是一年生物种依靠种子繁殖、传播和占领空间, 在每个生命周期都将大部分资源投入到种子的生产中, 进而产生数量庞大但个体较小的种子。小种子除了在传播扩散和存活上的优势以外, 还有可形成持久土壤种子库的优势, 在萌发生长对策上选择了年际间分摊风险对策^[29]。

在研究 3~30 年的退耕地演替过程中种子库物种数出现波动, 退耕 12 年, 物种数达到最大, 而退耕 25 年样地种子库物种数最低, 随退耕年限的延长, 物种数量又有增加趋势。造成这一现象的原因可能是演替中期环境异质性对群落组成影响较大^[30], 随退耕地演替时间延长土壤养分、水分环境发生较大变化, 一些对环境因子敏感的物种退出演替导致退耕 12 年后物种数量开始降低, 到退耕 25 年达到最低, 以后由于环境稳定^[31], 为一些新的物种进入提供了条件, 种子库中物种数又增加。在物种多样性指数和丰富度指数方面也表现出这种随退耕演替的波动性^[32]。

对 3 个季节土壤种子库的物种相似性进行分析得出, 3 个季节的土壤种子库物种组成存在着较大的差异。说明土壤种子库的组成随时间呈有规律的变化, 其物种组成具有季节动态^[33~35]。原因是样地内物种的开花、种子成熟时间不同, 而且成熟的种子脱落后, 有些被动物采食, 有些萌发成实生苗, 有些被微生物寄生感染失去活力, 有些种子则会因坡面侵蚀而流失。另一方面不同物种种子大小形状的差异使得种子在土壤中垂直分布具有相对集中的位置。种子落入土壤后, 较大种子则在表层的土壤中伺机萌发, 而相对较小的种子则会落入土壤空隙较深处, 形成不同类型的土壤种子库, 造成不同采样时间采得土壤中种子的物种组成发生变化。

3.2 影响土壤种子库密度特征的因素分析

通过对土壤样品萌发试验得出黄土高原丘陵沟壑区退耕地土壤种子库密度分布范围为 1 067~14 717 粒/m², 平均密度为 4 644 粒/m², 与世界其他草地的种子库密度比较, 美国 Illinois 草地的种子库密度为 2 019 粒/m², Missouri 草地的种子库密度为 6 470 粒/m², 加拿大 Alberta 草地的种子库密度为 204~12 342 粒/m², 英国草地的种子库密度为 1 400~3 600 粒/m², 南美 Patagonia 地区草地的种子库密度为 8 110 粒/m², 我国科尔沁沙地围封草地种子库密度为 3 314 粒/m²^[36], 科尔沁地区围封沙质草甸土壤种子库密度为 13 855 粒/m²^[37], 黄土高原干旱地区封禁草地种子库密度为 126~216 粒/m²^[21]。所以认为研究区域土壤种子库密度与其他草地处于同一数量级, 且处于中等水平。土壤种子库密度在演替过程中阴阳坡总体差异不明显, 但是最大与最小密度均出现在阳坡, 说明阳坡的种子库密度在演替过程中有相对剧烈的变化, 可能是由于阳坡水热条件变化剧烈, 侵蚀一般较阴坡更为强烈, 不同演替阶段由于环境因子的影响种子产量会有大的起伏。

研究区域土壤种子库密度夏季>秋季>春季, 表现出这种特征的原因是一方面种子具有休眠性, 前一年甚至更早的种子存在于土壤之中, 而且种子产量大小在年际间也有变化, 主要与降水量温度等气候因子变化、植被的演替以及植物结实的周期性变化有关; 同时也可能一些物种存在冠层种子库, 种子的散布推迟了; 此外试验条件的限制, 使得土壤样品中的种子不能充分的萌发, 萌发试验测得结果一般低于实际土壤中的种子含量。另外土壤种子库密度变化范围随样地退耕年限不同, 恢复演替阶段不同, 种子产量大小不同而发生变化。

土壤种子库中主要物种密度特征分析结果显示: 一年生物种猪毛蒿占 70.2%、臭蒿 8.8%, 其他主要物种种子库密度相对较小。这与土壤种子库中各种植物种子数量分配很不均匀, 与极少数物种的个体数量在种子库中含有很大比例的结果相吻合^[38]。种子库密度的大小与种子的大小有关, 研究区域大部分一年生物种的种子远远小于多年生物种的种子, 通常一些种子数量多而体积小的植物具有较大的土壤种子库。Greipsson 和 Davy^[39]的研究结果表明, 小种子种群的萌发百分数为大种子种群的 50%, 萌发所需时间为大种子种群的 10 倍; Happer

等^[40]研究也表明小种子萌发明显慢于大种子。本研究中猪毛蒿与臭蒿为一年生物种,种子个体小(猪毛蒿种子大小0.6~0.8 mm @0.2~0.3 mm,臭蒿种子大小0.5~1.0 mm @0.3~0.5 mm),种子库容量占到近80%。另外研究区域为退耕坡地,存在表层土壤侵蚀问题,也造成表层土壤中部分较大种子的流失;研究区生态脆弱,土壤水分养分条件差,植被生长环境条件恶劣,造成部分物种活性种子产量的降低。一些多年生物种具有营养繁殖能力,在繁殖策略的选择上也存在不同。

3.3 土壤种子库类型分析

土壤种子库分为瞬时种子库与持久种子库^[36],结合Thompson和Grime^[9]提出的分类系统和日本生态学家Nakagoshi的土壤种子库分类系统,对在该地区主要物种不同季节种子库进行分析表明,虽然季节间总体种子库密度存在显著差异但是主要物种不同季节种子库密度差异不显著;其中猪毛蒿为优势物种,在各个季节种子库密度都占到70%左右;通过物种相似性分析也得出,阴阳坡各个样地间的物种相似性系数在夏季普遍高,说明永久种子库中主要物种的一致性。基本上符合Thompson和Grime^[9]1979年提出的分类系统中的类型 $\hat{0}$:当年生产的种子大部分进入休眠状态,休眠期超过1年,进入持久土壤种子库,而仅有少量萌发,该类型特点是具有大量的一年生、多年生草本植物与灌丛种子的长久种子库^[41]。同时也符合日本生态学家Nakagoshi的土壤种子库分类系统的第3种类型即主要物种组成与密度没有显著的季节动态的持久土壤种子库。即黄土丘陵沟壑区退耕地土壤种子库为以猪毛蒿为优势物种的主要物种组成与密度没有显著的季节动态的持久土壤种子库。这种土壤种子库类型是植物对生态环境适应的结果,研究区内地形支离破碎,沟壑纵横,水土流失严重;气候属于暖温带半干旱气候,年均降水量505.3 mm,降水年内分布不均,7-9月降水量占年降水量的61.1%,而不利的地形条件使得大量的降水不能有效蓄积,再有该地区为深厚的黄绵土,地下水不能补给地表,加之地表强烈的蒸发造就了长期干燥的表层土壤,极不利于种子的萌发与幼苗的定植。所以这种没有显著季节动态的持久土壤种子库正好适应这种极端环境,在具有有效降水的生长季节内随时可以萌发。这样一来就能够使得物种适应环境,躲避风险,又能减少种内的空间竞争^[42]。在野外调查中也发现生长季节内雨后有大量种子萌发,如猪毛蒿、臭蒿、香青兰、达乌里胡枝子、狗尾草等。该区域土壤种子库的这种特征有利于退耕地植被的自然恢复。

此外,目前黄土高原地区关于土壤种子库的研究还很少,而且仅停留在种子库组成、密度等方面。而该地区特殊的地貌和土壤性质决定了土壤侵蚀是生态系统退化最主要的驱动力,严重影响和干扰着植被的发育演替过程,始于种子的形成发育,且贯穿于植物的整个生长发育过程,干扰着种子的活性、再分布、萌发、定植、群落结构、植被生态系列、以及植被的空间分布格局。但是目前我国有关坡面径流对种子移动、迁移和沉积的作用过程,土壤侵蚀造成的种子流失与再分布对土壤种子库、植物定植与分布的影响等方面的研究几乎还是空白。因此,在今后非常有必要在土壤侵蚀严重地区开展以下研究:一方面土壤侵蚀对植物种子产量与有效性的影响;另一方面土壤侵蚀对种子流失与再分布的影响,以及这种影响对土壤种子库分布格局及植被恢复的解释程度。分析土壤侵蚀-种子活性-种子流失与再分布-土壤种子库-幼苗萌发与定植-植被生态系列-植被分布格局的相互关系,研究土壤侵蚀、种子流失与植被恢复演替的相互作用机制,阐明土壤侵蚀引起的种子生产与活性、种子流失与再分布对土壤种子库空间格局及植被恢复的影响程度,更深层次地解释土壤侵蚀环境下植被自然恢复演替的现状与格局,为人工辅助黄土高原地区植被自然恢复提供科学参考。

致谢:野外调查承蒙中国科学院安塞水土保持生态试验站的大力支持,在此表示诚挚的谢意。在论文的写作过程中邹厚远研究员提出了宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 王国梁,刘国彬,刘芳,等.黄土沟壑区植被恢复过程中植物群落组成及结构变化[J].生态学报,2003,(12):255022557.
- [2] 吕仕洪,向悟生,李先琨,等.红壤侵蚀区植被恢复研究综述[J].广西植物,2003,23(1):8289.
- [3] Tian J L. Restoring the environment in conformity natural law: Some considerations on the vegetation restoration on the Loess Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2003,17(2):102106.

- [4] 穆兴民, 徐学选, 王文龙, 等. 黄土高原人工林对区域深层土壤水环境的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 210-217.
- [5] 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 422-432.
- [6] Prach K. Spontaneous succession in Central European man-made habitats: What information can be used in restoration practice[J]. *Applied Vegetation Science*, 2003, 6: 125-129.
- [7] Carla K, Arnaud M, Jacques M. Spontaneous vegetation dynamics and restoration prospects for limestone quarries in Lebanon[J]. *Applied Vegetation Science*, 2003, 6: 199-204.
- [8] Harper J L. *Population Biology of Plants* [M]. New York, USA: Academic Press, 1977.
- [9] Thompson K, Grime J E. Seasonal variation in the seed banks of herbaceous species in ten contrasting habitats[J]. *Journal of Ecology*, 1979, 67: 89-92.
- [10] Leishman W. Seed size and shape are not related to persistence in soil in Australia in the same way as in Britain[J]. *Functional Ecology*, 1998, 12: 480-485.
- [11] Angus D, Stephen W. The persistence of calcareous grassland species in the soil seed bank under developing and established scrub[J]. *Plant Ecology*, 1998, 136: 27-39.
- [12] Chang E R, Jefferies R L, Carleton T J. Relationship between vegetation and soil seed banks in an arctic coastal marsh[J]. *Journal of Ecology*, 2001, 89: 367-384.
- [13] Pugnaire F I, L zaró R. Seed bank and under storey species composition in a semi-arid environment: The effect of shrub age and rainfall[J]. *Annals of Botany*, 2000, 86: 807-813.
- [14] Akinola M O, Thompson K, Buckland S M. Soil seed bank of an upland calcareous grassland after 6 years of climate and management manipulations[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1998, 35: 542-552.
- [15] Tracy B F, Sanderson M A. Seed bank diversity in grazing lands of the Northeast United States[J]. *Journal of Range Management*, 2000, 53: 114-118.
- [16] 王俊, 白瑜. 土壤种子库研究的几个热点问题[J]. 生态环境, 2006, 15(6): 137-139.
- [17] 张咏梅, 何静, 潘开文, 等. 土壤种子库对原有植被恢复的贡献[J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9(3): 326-332.
- [18] 王辉, 任继周. 子午岭主要森林类型土壤种子库研究[J]. 干旱地区资源与环境, 2004, 18(3): 130-136.
- [19] 王辉, 任继周. 子午岭油松林土壤种子库研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2004, 39(1): 12-15.
- [20] 陈智平, 王辉, 袁宏波. 子午岭辽东栎林土壤种子库及种子命运研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2005, 40(1): 7-12.
- [21] 程积民, 王惠娥, 胡相明. 黄土高原草地土壤种子库与草地更新[J]. 土壤学报, 2006, 43(4): 679-683.
- [22] 白文娟, 焦菊英, 张振国. 安塞黄土丘陵沟壑区退耕地的土壤种子库特征[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(2): 65-72.
- [23] 白文娟, 焦菊英, 张振国. 黄土丘陵沟壑区退耕地土壤种子库与地上植被的关系[J]. 草业学报, 2007, 16(6): 30-38.
- [24] 冯秀, 仝川, 丁勇, 等. 土壤种子库在植被恢复与重建中的作用与潜力[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2007, 38(1): 102-108.
- [25] 李代琼, 姜峻, 梁一民, 等. 安塞黄土丘陵区人工草地水分有效利用研究[J]. 水土保持研究, 1996, 3(2): 60-74.
- [26] 张玲, 李广贺, 张旭. 土壤种子库研究综述[J]. 生态学杂志, 2004, 23(2): 114-120.
- [27] Thompson K, Bakker J P, Bekker R M. *The Soil Seed Banks of North West Europe: Methodology, Density and Longevity* [M]. London: Cambridge University Press, 1997.
- [28] 马克平. 群落多样性测定方法(Shannon's H') A 多样性测定[J]. 生物多样性, 1994, (2): 162-168.
- [29] 武高林, 杜国祯, 尚占环. 种子大小及其命运对植被更新贡献研究进展[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1969-1972.
- [30] 杜峰, 梁宗锁, 徐学选, 等. 陕北黄土丘陵区撂荒演替中期群落比较异质性研究[J]. 草业学报, 2007, 16(5): 40-47.
- [31] 温仲明, 焦峰, 赫晓慧, 等. 黄土高原森林边缘区退耕地植被自然恢复及其对土壤养分变化的影响[J]. 草业学报, 2007, 16(1): 16-23.
- [32] 周萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区铁杆蒿群落植被特性及土壤养分特征研究[J]. 草业学报, 2008, 17(2): 92-118.
- [33] Levassor C, Ortega M, Peco B. Seed bank dynamics of Mediterranean pastures subjected to mechanical disturbance[J]. *Journal of Vegetation Science*, 1990, (1): 33-34.
- [34] 李宁, 冯固, 田长彦. 塔克拉玛干沙漠北缘土壤种子库特征及动态[J]. 中国科学 D 辑(地球科学), 2006, 36(增刊 0): 110-118.

- [35] 燕雪飞, 杨允菲. 松嫩平原碱化草甸两个群落土壤种子库动态[J]. 生态学杂志, 2007, 26(6): 822-825.
- [36] 赵文智, 白四明. 科尔沁沙地围封草地种子库特征[J]. 中国沙漠, 2001, 6(2): 204-208.
- [37] 赵丽娅, 李锋瑞, 张华, 等. 科尔沁沙地围封沙质草甸土壤种子库特征的研究[J]. 生态学杂志, 2004, 23(2): 452-49.
- [38] 熊利明, 钟章成, 李旭光. 亚热带常绿阔叶林不同演替阶段土壤种子库的初步研究[J]. 植物生态学与地植物学学报, 1992, 16(3): 249-256.
- [39] Greipsson W, Davy A J. Seed mass and germination behavior in populations of the duneland building grass *Leymus arenarius*[J]. *Annals of Botany*, 1995, 76: 493-501.
- [40] Happer N W, Overholt J R, Martin J R. Effect of cultivar, temperature and seed size on the germination and emergence of soya beans(*Glycinemax* (L.) Merr.) [J]. *Annals of Botany*, 1979, 44: 302-308.
- [41] Rees M. Delayed germination of seeds: A look at the effects of adult longevity, the timing of reproduction, and population age/ stage structure[J]. *American Naturalist*, 1994, 144: 432-64.
- [42] 刘志民, 蒋德明, 高红瑛, 等. 植物生活史繁殖对策与干扰关系的研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(3): 418-422.

The character and dynamics with season of soil seed banks in abandoned croplands of loess gully region

WANG Ning^{1,3}, JIA Yanfeng^{1,3}, BAI Wenjuan^{1,3}, ZHANG Zhenqun^{1,3}, JIAO Juzying^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Science and Technology University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China; 3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Samples were collected along two 10 m sections and a germination experiment was carried out in the laboratory to investigate the composition, density, type, and distribution at different times and spaces of the seed bank. There were 50 species belonging to 39 genera and 15 families in the soil seed bank. The density and composition of the main species in the bank were not significantly different between seasons. During the succession, the number of species and the density of the bank initially increased, then declined, and finally increased again. However, the seed bank density changed more acutely during the year, ranging from 1 067 to 14 717 seed/m², with the maximum value in summer, the medium in autumn, and the minimum in spring. The soil seed bank in the study field was persistent with *Artemisia scoparia* the main species coexisting with other annual vegetation, perennials and shrubs. Additionally, in the field, the soil seed bank did not change notably with the season. There is some potential for vegetation restoration using the soil seed bank.

Key words: soil seed bank; species composition; density of seed bank; dynamics of seed bank; type of seed bank; loss hilly and gully area