

黄土丘陵沟壑区退耕地土壤种子库对植被恢复的影响

白文娟^{1,2} 焦菊英^{1,3} 张振国^{1,2}

(1 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室

2 中国科学院研究生院 3 西北农林科技大学水土保持研究所)

摘要:为了探讨土壤种子库对植被恢复的影响,该文在野外调查和室内试验的基础上,采用典范变量分析,研究了黄土丘陵沟壑区退耕地土壤种子库密度、土壤水分和养分、地形因子以及退耕年限对植物群落变化的影响,量化了土壤种子库对植被恢复的贡献。结果表明:影响植物群落变化的因子有土壤水分、速效磷、土壤种子库和坡向;仅用土壤种子库只可解释植物群落变化的32.1%;由于退耕地土壤种子库的优势种主要为猪毛蒿,其植被恢复潜力与速度比较小。黄土丘陵沟壑区退耕地植被恢复需要适度的人为干预,有必要适当引进一些演替后期物种,如白羊草、铁杆蒿、长芒草等物种,以缩短演替时间,加速退耕地植被恢复进程,促进黄土丘陵沟壑区水土流失的防治。

关键词:土壤种子库;立地环境;植被恢复;典范变量分析;黄土丘陵沟壑区

中图分类号:S714.3 文献标识码:A 文章编号:1000-1522(2008)04-0065-07

BAI Wen-juan^{1,2}; JIAO Ju-ying^{1,3}; ZHANG Zhen-guo^{1,2}. **Effects of soil seed bank on vegetation restoration in abandoned croplands on the hilly-gullied Loess Plateau.** *Journal of Beijing Forestry University* (2008) 30(4) 65-71 [Ch, 35 ref.]

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi Province, 712100, P. R. China;

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, P. R. China;

3 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi Province, 712100, P. R. China.

In order to identify the potential significance of soil seed bank for vegetation restoration, the authors studied the influences of density of soil seed bank, soil water content, soil nutrient, topography and time on vegetation community in abandoned croplands on the hilly-gullied Loess Plateau and quantified the contribution of the soil seed bank to vegetation restoration through field survey, lab experiments and canonical variate analysis. The results show that the most important variables were soil water content, extractable P, soil seed bank density and slope aspect. Soil seed bank explained 32.1% of the standing vegetation community variation alone. The potential of vegetation restoration was limited and restoration process was slow because the dominant species of soil seed bank in abandoned cropland was *Artemisia scoparia*. It is recommended to transplant late successional species such as *Bothriochloa ischaemum*, *Artemisia gmelinii*, *Stipa bungeana* into abandoned croplands to accelerate vegetation succession and prevent soil loss on the hilly-gullied Loess Plateau.

Key words soil seed bank; site environment; vegetation restoration; canonical variate analysis; hilly-gullied Loess Plateau

黄土高原丘陵沟壑区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,已成为我国水土流失最严重和生态环境最脆弱的地

收稿日期:2007-03-03

http://www.bjfujournal.cn, http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(40571094, 40271074)、西北农林科技大学“青年学术骨干支持计划”项目(01140301)、西北农林科技大学“创新团队建设计划”项目(01140202)。

第一作者:白文娟, 博士生。主要研究方向:生态恢复与环境效应评价。电话:13630225904 Email:wenjuelucky@yahoo.com.cn 地址:712100 陕西杨凌西农路26号中国科学院水利部水土保持研究所。

责任作者:焦菊英, 博士, 研究员。主要研究方向:水土保持环境效应评价。Email:jyjiao@ms.iswc.ac.cn 地址:同上。

区之一。目前,通过恢复植被改善生态环境,治理水土流失已成为该地区最重要的治理措施之一^[1]。植物群落是植物与环境相互作用的产物,有关植物群落与环境关系的研究已非常多^[2-6],但针对黄土丘陵沟壑区的研究还比较薄弱^[7-8],尤其是结合土壤种子库的研究很少。本文运用典范变量分析(Canonical Variate Analysis, CVA)研究土壤种子库密度、土壤特性(土壤水分和养分)、地形因子(坡度、坡向)以及退耕年限对植物群落变化的影响,量化土壤种子库对植被恢复的贡献,为该地区植被恢复和生态建设提供依据。

1 研究区概况

研究区位于黄土丘陵沟壑区的典型地区安塞县(36°22'40"~36°32'16"N, 105°51'44"~109°26'18"E),属暖温带半干旱气候区,年平均降水量505.3 mm,年平均蒸发量1 000 mm,无霜期160~180 d左右,年日照时数2 352~2 573 h,10℃积温2 866,年均气温8.9℃^[9]。该地区处于暖温带森林草原区,天然森林已全遭破坏,人工林以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、小叶杨(*Populus simonii*)、柠条(*Caragana intermedia*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)为主;荒坡主要为铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、芨蒿(*Artemisia giraldii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)等组成的处于不同演替阶段的草本植物群落,多数荒坡因过度放牧成为退化草地^[10]。土壤类型主要为黄绵土,其中粉粒占64%~74%,黏粒占17%~20%,土质疏松,抗蚀抗冲性差,水土流失严重^[11]。

2 研究方法

2.1 土壤种子库的调查与鉴定

土壤种子库的取样是在种子萌发前的早春进行(2005年3月29日—4月3日),选择位于中国科学院安塞水土保持生态试验站人工干扰较少的不同坡向、不同退耕年限的典型退耕地作为样地,其中阳坡6个,退耕年限分别为3、6、12、17、25和30年;阴坡6个,退耕年限分别为4、7、12、17、25和30年。采用样线法^[12-14],在样地的中心部位平行设置两条10 m长的样线,样线间隔5 m,在样线上每隔3 m设1个10 cm×10 cm的小样方,共计6个小样方。在各小样方内,用自制的方形铁质土壤种子库取样器(容积为10 cm×10 cm×10 cm,5 cm处有刻度线),分两层采集土样,第1层为0~5 cm,第2层为5~10 cm,共计144个土样。

采用幼苗萌发技术^[15]鉴定土壤种子库的大小

与组成。这部分种子为可萌发种子库,对退化生态系统植被恢复具有重要的作用^[16],进行种子库萌发更具实践意义^[17]。具体方法为:将土样在室温条件下自然干燥后,过筛剔除杂物并手工把土样碾开,使其尽量分散,并保证种子的完整性。然后将土样置于铺垫沙子(沙子置于115℃烘箱中处理48 h)的塑料盘中,浇足水,置于实验室工作台上让其自然萌发,定期适时浇水,保持盆内湿度,室内平均温度25℃,相对湿度变化平均60%。每2 d观测种子萌发状况,对已萌发的幼苗进行种类鉴定;幼苗鉴定后及时清除,暂时不能鉴定的幼苗进行标记后移栽至盘外,直至幼苗长到能鉴定为止;整个过程持续至盆中不再有幼苗长出,然后将土样搅拌混合,继续观测,直至土样中不再有种子萌发后结束。种类鉴定主要以植物的形态特征为主,大部分幼苗的鉴定是通过采集所取生境地上的植被成熟种子在实验室进行种植后所建立的幼苗标本库进行;部分幼苗请相关专家鉴定。本萌发试验从2005年4月23日~12月31日,历时250 d左右。土壤种子库密度用单位面积一定土层土壤内所含有的活力种子数量来表示^[18],分别计算0~5 cm、5~10 cm土层的土壤种子库的种子密度,用平均值±标准误差来表示。

2.2 植被与立地条件调查

2005年7月31日—8月9日,在所选样地内的6个土壤种子库萌发土样取样点附近设6个1 m×1 m的样方,进行地上植被调查,详细记录其种类组成、个数和盖度;并用GPS确定样地经纬度、海拔高程和坡向,用自制的坡度仪测量样地的坡度;同时,采用土钻法和烘干法对0~500 cm土层的土壤水分进行测定(每20 cm取样);采取S形取样法(6个取样点的混合样品)采集了0~10 cm土层的土样测定土壤有机质、全氮、全磷、速效氮、速效磷、速效钾。土壤有机质的测定采用重铬酸钾($K_2Cr_2O_7$)容量法-外加热法;全氮采用半微量开氏法(K_2SO_4 - $CuSO_4$ -Se蒸馏法);全磷采用钼锑抗比色法($HClO_4$ - H_2SO_4 法);速效氮采用碱解扩散法(康惠法)测定;速效磷采用0.5 mol/L碳酸氢钠($NaHCO_3$)浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾采用原子吸收光谱法(NH_4OAc 浸提法)^[19-20]。

2.3 数据处理

分析因子包括退耕年限、0~5 cm和5~10 cm土层的土壤种子库密度、土壤有机质、全氮、全磷、速效氮、速效磷、速效钾、0~200 cm、200~500 cm和0~500 cm土层的土壤水分含量、坡度、坡向共5组变量14个因子。土壤水分因子的选择是基于年降雨下渗深度在2 m以上^[21],所以在分析中选择0~200 cm、200~500 cm和0~500 cm土层的土壤水分含量

作为土壤水分因子。

数据采用典范变量分析在植物群落水平上显著影响植物变化的主要解释因子,采用手动选择,显著水平 $P < 0.05$ 。采用偏典范变量分析 (Partial Canonical Variate Analysis, PCVA) 在植物群落水平上对不同组变量进行分离,分析退耕年限、土壤种子库密度、土壤养分、土壤水分和地形因子 5 组变量对退耕地植被变化的影响。并利用“Monte Carlo Permutation Test”来检验不同变量对植被变化影响的显著性。

3 结果与分析

3.1 土壤种子库特征

土壤种子萌发试验结果表明:12 个样地土样中共萌发了 28 种 2 442 株幼苗,隶属于 11 科 23 属;猪

毛蒿 (*A. scoparia*) 是土壤种子库的优势物种,占总幼苗数的 65.2%,而植被演替后期即当地生态系统中的一些关键种和建群种如白羊草、铁杆蒿、长芒草、达乌里胡枝子 (*Lespedeza davurica*) 等的种子密度很小,变化在 16.7~300 粒/m²;0~5 cm 土层的土壤种子库密度 (900.1 ±351.3) 粒/m² ~ (6 466.8 ±1 708.4) 粒/m²,5~10 cm 土层的土壤种子库密度 (116.7 ±61.4) 粒/m² ~ (2 466.7 ±914.4) 粒/m²,0~5 cm 土层的土壤种子库密度远大于 5~10 cm,平均是其 3.6 倍。随着退耕年限的增加,土壤种子库的总密度呈明显的递减趋势;阳坡退耕地的土壤种子库密度为阴坡的 2.2~3.4 倍。退耕地 0~10 cm 土层的土壤种子库密度平均为 3 503 粒/m²,为中等土壤种子库^[22]。12 个样地的土壤种子库密度及立地环境因子如表 1 所示。

表 1 样地土壤种子库与环境因子特征

TABLE 1 Characteristics of soil seed bank and environmental factors in sample plots

环境因子样地	样地						
	1	2	3	4	5	6	
退耕年限	3	6	12	17	25	30	
坡度/(°)	22	26	28	35	30	30	
坡向	阳坡	阳坡	阳坡	阳坡	阳坡	阳坡	
土壤种子库密度/(粒 m ⁻²)	0~5 cm	5 750.2 ±1 273.1	6 466.8 ±1 708.4	983.4 ±389.0	4 883.4 ±2 074.9	1 000.0 ±407.9	900.1 ±351.3
	5~10 cm	1 400.0 ±392.9	1 966.7 ±762.5	166.7 ±66.7	2 466.7 ±914.4	283.4 ±121.6	166.6 ±110.0
土壤有机质/(g kg ⁻¹)	6.612	7.108	8.424	12.120	6.744	11.040	
全氮/(mg kg ⁻¹)	0.475	0.448	0.558	0.731	0.479	0.687	
全磷/(mg kg ⁻¹)	0.687	0.705	0.665	0.733	0.669	0.657	
速效氮/(mg kg ⁻¹)	33.62	28.63	35.96	54.93	25.97	44.28	
速效磷/(mg kg ⁻¹)	1.688	2.013	1.742	2.094	1.363	0.876	
速效钾/(mg kg ⁻¹)	112.00	124.60	112.10	186.90	154.40	112.10	
土壤水分含量/%	0~200 cm	10.73	8.71	8.35	10.37	10.68	11.32
	200~500 cm	12.38	12.55	10.87	7.41	10.77	10.07
	0~500 cm	11.72	10.88	9.86	8.59	10.73	10.57

环境因子样地	样地						
	7	8	9	10	11	12	
退耕年限	4	7	12	17	25	30	
坡度/(°)	15	20	14	12	12	33	
坡向	阴坡	阴坡	阴坡	阴坡	阴坡	阴坡	
土壤种子库密度/(粒 m ⁻²)	0~5 cm	2 600.1 ±704.8	2 950.0 ±555.5	2 916.8 ±941.2	1 449.9 ±391.2	1 950.1 ±882.5	1 100.1 ±478.3
	5~10 cm	900 ±213.4	116.7 ±61.4	750.1 ±308.2	266.7 ±90.7	316.7 ±203.4	283.3 ±60.1
土壤有机质/(g kg ⁻¹)	7.938	7.324	8.429	8.103	8.429	7.172	
全氮/(mg kg ⁻¹)	0.559	0.469	0.426	0.517	0.426	0.493	
全磷/(mg kg ⁻¹)	0.726	0.684	0.662	0.702	0.662	0.744	
速效氮/(mg kg ⁻¹)	33.62	29.30	37.95	37.62	37.95	31.96	
速效磷/(mg kg ⁻¹)	0.930	0.605	1.552	1.228	1.552	2.581	
速效钾/(mg kg ⁻¹)	115.40	73.64	95.58	141.30	95.58	108.80	
土壤水分含量/%	0~200 cm	12.11	10.24	9.11	10.51	8.83	9.42
	200~500 cm	14.12	13.03	10.13	11.22	12.48	9.65
	0~500 cm	13.31	11.91	9.72	10.93	11.02	9.56

3.2 地上植被特征

在 12 个退耕地植被样方中共有 54 种植物,分别属于 16 科 43 属,其中主要是草本植物有 48 种,占 88.89%,且 68.5% 的植物属于菊科、豆科和禾本科。若以生活型划分,1、2 年生草本植物共 14 种,占 25.93%,多年生草本植物 34 种,占 62.96%。

表 2 列出了平均盖度大于 5% 的主要物种,可以看出,样地的主要物种为猪毛蒿、达乌里胡枝子、阿尔泰狗娃花 (*Heteropappus altaicus*)、长芒草、铁杆蒿、白羊草、硬质早熟禾 (*Poa sphondylodes*)、赖草 (*Leymus scalinus*) 等;同时可以看出,退耕 30 多年以内样地的主要物种组成差异不是非常的明显,只是盖度或多

或少而已,从一定程度上说明了退耕地植被演替过程中物种组成结构的延续性和递进性,表明在黄土丘陵沟壑区的生态环境条件下,自然植被的恢复演替是缓慢的。以猪毛蒿、达乌里胡枝子和长芒草、铁杆蒿、白羊草为优势种的群落代表了黄土丘陵沟壑区退耕地的主要植物群落类型^[23]。

表2 样地地上植被的主要物种 %

TABLE 2 The main species of aboveground vegetation of the plots

样地号	物种	科属	频度	盖度
1	猪毛蒿	菊科蒿属	100	19.7
	阿尔泰狗娃花	菊科狗娃花属	66.7	5.0
2	猪毛蒿	菊科蒿属	100	12.5
	硬质早熟禾	禾本科早熟禾属	66.7	5.2
3	达乌里胡枝子	豆科胡枝子属	100	9.2
	猪毛蒿	菊科蒿属	100	9.2
	阿尔泰狗娃花	菊科狗娃花属	100	8.3
4	长芒草	禾本科针茅属	100	19.2
	达乌里胡枝子	豆科胡枝子属	100	12.5
	阿尔泰狗娃花	菊科狗娃花属	83.3	7.0
5	达乌里胡枝子	豆科胡枝子属	100	15.8
	长芒草	禾本科针茅属	100	14.2
	白羊草	禾本科孔颖草属	83.3	10.3
6	白羊草	禾本科孔颖草属	100	16.7
	丛生隐子草 (<i>Cleistogenes caespitosa</i>)	禾本科隐子草属	83.3	7.5
	猪毛蒿	菊科蒿属	83.3	15.0
7	阿尔泰狗娃花	菊科狗娃花属	100	7.2
	达乌里胡枝子	豆科胡枝子属	83.3	5.2
	铁杆蒿	菊科蒿属	66.7	10.0
8	猪毛蒿	菊科蒿属	100	7.8
	中华隐子草 (<i>C. chinensis</i>)	禾本科隐子草属	100	8.8
	阿尔泰狗娃花	菊科狗娃花属	100	6.8
9	铁杆蒿	菊科蒿属	66.7	17.5
	赖草	禾本科赖草属	50	12.5
	阿尔泰狗娃花	菊科狗娃花属	100	8.7
10	达乌里胡枝子	豆科胡枝子属	83.3	5.0
	铁杆蒿	菊科蒿属	83.3	12.5
	达乌里胡枝子	豆科胡枝子属	100	10.2
11	长芒草	禾本科针茅属	83.3	7.2
	阿尔泰狗娃花	菊科狗娃花属	83.3	6.5
	猪毛蒿	菊科蒿属	100	5.2
12	达乌里胡枝子	豆科胡枝子属	100	9.7
	长芒草	禾本科针茅属	83.3	8.8
	猪毛蒿	菊科蒿属	83.3	6.5
12	铁杆蒿	菊科蒿属	66.7	10.0
	长芒草	禾本科针茅属	50	5.8

3.3 影响群落变化的显著因子

根据黄土丘陵沟壑区退耕地植被演替规律以及样地的物种组成^[23],把12个样地划分为4个群落:群落1为以猪毛蒿为优势种的群落,包括样地1、2、7;群落2为以达乌里胡枝子为优势种的群落,包括样地3、4、5、11;群落3为以铁杆蒿为优势种的群落,包括样地8、9、10、12;群落4为以白羊草为优势种的

群落,包括样地6。通过CVA分析,在 $P < 0.05$ 的显著水平上,200~500 cm土层的土壤水分含量、0~10 cm土层速效磷、0~5 cm和5~10 cm土层的土壤种子库、坡向是显著影响退耕地植物群落变化的最主要因子(见图1)。CVA模型的第1轴和第2轴的特征值分别为0.956和0.884,第1排序轴可以解释物种数据变化的31.9%,与环境因子之间的相关系数为0.978,解释了植物群落与环境之间关系的35.8%;第2排序轴进一步解释了29.4%的植物群落变化,与环境因子之间的相关系数为0.94,解释了群落与环境之间关系的33.1%,即排序轴1和排序轴2解释了68.9%的群落与环境之间的关系。坡向、200~500 cm土层的土壤水分含量、0~10 cm土层速效磷、0~5 cm和5~10 cm土层的土壤种子库5个因子解释了89.1%的总特征值(见表3)。

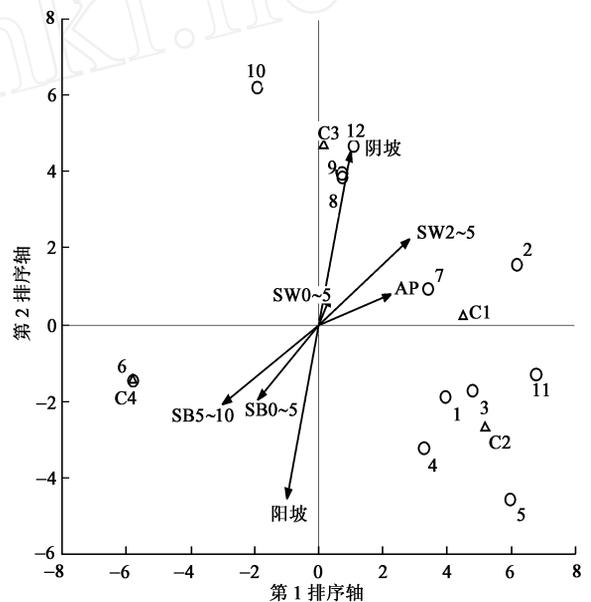


图1 样方、植物群落与主要环境因子的CVA排序图

FIGURE 1 Ordination diagram based on the CVA of the plots, communities and main affecting variables

注:“ ”为群落:C1:以猪毛蒿为优势种的群落;C2:以达乌里胡枝子为优势种的群落;C3:以铁杆蒿为优势种的群落;C4:以白羊草为优势种的群落;“ ”为样地,1~12为样地号;SW2~5:200~500 cm土层土壤水分含量;SB0~5:0~5 cm土层土壤种子库密度;SB5~10:5~10 cm土层土壤种子库密度。

从图1可以看出,沿CVA第1排序轴由右向左,200~500 cm土层的土壤水分含量和0~10 cm土层速效磷含量依次递减,0~5 cm和5~10 cm土层的土壤种子库密度依次递增,说明以猪毛蒿和铁杆蒿为优势种的群落多生长在阴坡和土壤水分、速效磷含量较高的环境下;以达乌里胡枝子为优势种的群落多生长在阳坡和土壤水分、速效磷含量较高的环境下;以白羊草为优势种的群落多出现在阳坡和土壤水分和速效磷含量较低的环境下。在黄土丘

表 3 CVA 排序结果

TABLE 3 The results of CVA ordination

结果信息	第 1 排序轴	第 2 排序轴	第 3 排序轴	第 4 排序轴
特征值	0.956	0.884	0.832	0.168
物种与环境之间的相关系数	0.978	0.940	0.912	0.000
物种数据变化的累积比例	31.9	61.3	89.1	94.7
物种与环境关系变化的累积比例	35.8	68.9	100.0	0.0
特征值总和		3.000		
典范特征值总和		2.672		

陵沟壑区 40 年的演替过程中,退耕地植被大体上经历了以猪毛蒿为优势种的群落(平均年龄为 5.2 年)、以达乌里胡枝子和长芒草为优势种的群落(平均年龄为 16.3 年)、以铁杆蒿为优势种的群落(平均年龄为 23.3 年)和以白羊草为优势种的群落(平均年龄为 26.0 年)^[23]。由于受退耕前耕作和施肥以及植物群落盖度较低的影响,植被消耗的土壤水分和磷素也就较低;而后群落盖度和生物量增加,土壤水分含量和速效磷含量逐渐消耗降低,加上黄土高原干旱的气候条件和黄土母质缺磷的特点,土壤水分和磷素的补充能力较低,所以在植被演替的后期土壤水分和磷素含量较低^[24-25]。而白羊草属于 C4 植物,C4 植物的水分利用效率最高,在严重缺水的生境下易成为演替最后阶段的优势种^[26]。

3.4 不同变量对植被变化的解释比例

对 5 组因子即退耕年限、土壤种子库密度(0~5 cm、5~10 cm 土层)、土壤水分(0~200 cm、200~500 cm、0~500 cm 土层)、土壤养分(0~10 cm 土层的土壤有机质、全氮、速效氮、全磷、速效磷、速效钾)和地形(坡度、坡向)在退耕地植被变化中的作用进行定量分解(表 4),结果表明:在植物群落水平上,退耕年限、土壤水分和土壤种子库密度对植物群落变化的影响显著,分别可解释植物群落变化的 25.6%、46.2%和 32.1%,表明土壤水分对退耕地植物群落变化的影响较大。在分别剔除其他 4 个因子的作用下,土壤种子库对植物群落变化的解释比例在 11.7%~29.5%变化;在分别剔除退耕年限和地形因子的作用下土壤种子库对植物群落变化的影响也是显著的,可分别解释 25.3%和 29.5%的植被变化。总体上来说,若只用土壤种子库来解释退耕地植被的变化情况,可解释植物群落变化的 32.1%,这个比例中包含了土壤种子库与其他因子的相互作用。

表 4 土壤种子库对植被变化的解释比例

TABLE 4 The proportion of soil seed bank on the explanation of vegetation variation

分析模型	CVA/PCVA 分析(群落水平)			
	可解释的惯量	占总惯量的比例	显著性检验 P 值	
			第 1 轴	所有轴
退耕年限	0.767	25.6		0.006**
土壤种子库	0.964	32.1	0.044*	0.069
土壤养分	1.539	51.3	0.107	0.493
土壤水分	1.385	46.2	0.003**	0.035*
地形	0.818	27.3	0.121	0.109
土壤种子库/退耕年限	0.760	25.3	0.038*	0.068
土壤种子库/土壤养分	0.556	18.5	0.439	0.489
土壤种子库/土壤水分	0.352	11.7	0.494	0.520
土壤种子库/地形	0.885	29.5	0.014*	0.040*

注:CVA 总惯量为 3.000;"/"表示变量的剔除;""表示极显著相关($P < 0.01$);*表示显著相关($P < 0.05$)。

4 结论与讨论

综上所述,影响植物群落变化的因子除土壤水分和养分(速效磷)外,土壤种子库也是显著因子。若只用土壤种子库来解释退耕地植被的变化情况,只可解释植物群落变化的 32.1%。本研究所选取的影响黄土丘陵沟壑区退耕地植被变化的主要显著因子具有非常重要的生态意义。磷素在许多土壤类型中是个限制性因子^[8,27-30],决定着群落的生物量与物种组成^[28];土壤水分是黄土高原干旱、半干旱、半湿润地区的主要生态限制因子^[31],而且对植物的有效性是决定植物的生产力、植物分布的异质性和生活型的一个非常重要的因子^[32-33];坡向在一定程度上反映了土壤水分的变化;而退耕年限则与土壤养分的积累关系密切^[34];对于土壤种子库来说,即使微气候非常适宜,但如果缺乏种源的话,也很难进行植被恢复^[35]。土壤种子库对植被恢复的定量分解研究目前还不多见,本研究结果显示了土壤种子库对退耕地植物群落的解释比例可达 1/3,但由于退耕地土壤种子库的优势种为猪毛蒿,其植被恢复潜力还比较小。所以初步认为黄土丘陵沟壑区退耕地植被恢复需要适度的人为干预,有必要适当引进一些演替后期物种,如白羊草、铁杆蒿等物种,以缩短演替时间,来加速退耕地植被恢复进程,促进黄土丘陵沟壑区水土流失的防治。

致谢 本研究野外试验承蒙中国科学院安塞水土保持生态试验站的大力支持,幼苗鉴定得到了西北农林科技大学徐朗然研究员和中国科学院水利部水土保持研究所程积民研究员的帮助,在此特表感谢。

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,2003,23(12):2550-2557.
WANG G L, LIU G B, LIU F, et al. Changes in composition and structure of plant communities during the course of restoration at loess gully region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(12): 2550-2557.
- [2] 张文辉,卢涛,马克明,等.岷江上游干旱河谷植物群落分布的环境与空间因素分析[J].生态学报,2004,24(3):552-559.
ZHANG W H, LIU T, MA K M, et al. Analysis on the environmental and spatial factors for plant community distribution in the arid valley in the upper reach of Minjiang River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3): 552-559.
- [3] 郝占庆,郭水良.长白山北坡草本植物分布与环境关系的典范对应分析[J].生态学报,2003,23(10):2000-2008.
HAO Z Q, GUO S L. Canonical correspondence analysis on relationship of herbs with their environments on northern slope of Changbai Mountain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2000-2008.
- [4] 张元明,陈亚宁,张道远.塔里木河中游植物群落与环境因子的关系[J].地理学报,2003,58(1):109-117.
ZHANG Y M, CHEN Y N, ZHANG D Y. Plant communities and their interrelations with environmental factors in the middle reaches of the Tarim River [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(1): 109-117.
- [5] 谢小伟,郭水良,黄华.浙江金华市区地面苔藓植物分布与环境因子关系研究[J].武汉植物学研究,2003,21(2):129-136.
XIE X W, GUO S L, HUANG H. A study of relationships between terrestrial bryophytes and their environmental factors in Jinhua City, Zhejiang [J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2003, 21(2): 129-136.
- [6] 刘庆,周立华.青海湖北岸植物群落与环境因子关系的初步研究[J].植物学报,1996,38(11):887-894.
LIU Q, ZHOU L H. Primary study on interrelation between plant communities and environmental factors in the north shore of Qinghai Lake [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1996, 38(11): 887-894.
- [7] 焦菊英,马祥华,白文娟,等.黄土丘陵沟壑区退耕地植物群落与土壤环境因子的对应分析[J].土壤学报,2005,42(5):744-752.
JIAO J Y, MA X H, BAI W J, et al. Correspondence analysis of vegetation communities and soil environmental factors on abandoned cropland on hilly-gullied Loess Plateau [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(5): 744-752.
- [8] WANG G H. Plant traits and soil chemical variables during a secondary vegetation succession in abandoned fields on the Loess Plateau [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2002, 44(8): 990-998.
- [9] 高旺盛,董孝斌.黄土高原丘陵沟壑区脆弱农业生态系统服务评价——以安塞县为例[J].自然资源学报,2003,18(2):182-188.
GAO W S, DONG X B. Valuation of fragile agriculture ecosystem services in loess hilly-gully region: A case study of Ansai County [J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 182-188.
- [10] 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):66-74.
LI D Q, JIANG J, LIANG Y M, et al. Study on water use efficiency of the artificial grassland at Ansai County in the loess hilly region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1996, 3(2): 66-74.
- [11] 王军,傅伯杰,邱扬,等.黄土高原小流域土壤养分的空间异质性[J].生态学报,2002,22(8):1173-1178.
WANG J, FU B J, QIU Y, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients in a small catchment of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(8): 1173-1178.
- [12] 熊利民,钟章成,李旭光,等.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报,1992,16(3):249-257.
XIONGL M, ZHONG Z C, LI X G, et al. A preliminary study on the soil seed banks of different successional stages of subtropical evergreen broadleaved forest [J]. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1992, 16(3): 249-257.
- [13] 杨晓波,陈明智,吴庆书.热带地区不同土地利用系统土壤种子库的研究[J].土壤学报,1999,36(3):327-333.
YANG X B, CHEN M Z, WU Q S. Study on the soil seed banks of different land utilization system in the tropical area [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(3): 327-333.
- [14] 詹学明,李凌浩,李鑫,等.放牧和围封条件下克氏针茅草原土壤种子库的比较[J].植物生态学报,2005,29(5):747-752.
ZHAN X M, LI L H, LI X, et al. Effects of grazing on the soil seed bank of a *Stipa krylovii* steppe community [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(5): 747-752.
- [15] THOMPSON K, BAKKER J P, BEKKER R M. *The soil seed banks of North West Europe: Methodology, density and longevity* [M]. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 1997.
- [16] 苏德毕力格,李永宏,雍世鹏,等.冷蒿草原土壤可萌发种子库特征及其对放牧的响应[J].生态学报,2000,20(1):43-48.
SU D B, LI G L, LI Y H, YONG S P, et al. Germinable soil seed bank of *Artemisia frigida* grassland and its response to grazing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(1): 43-48.
- [17] 尚占环,龙瑞军,马玉寿,等.黄河源区退化高寒草地土壤种子库:种子萌发的数量和动态[J].应用与环境生物学报,2006,12(3):313-317.
SHANG Z H, LONG R J, MA Y S, et al. Soil seed banks of degraded alpine grassland in headwater region of the Yellow River: Quantities and dynamics of seed germination [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2006, 12(3): 313-317.
- [18] 杨跃军,孙向阳,王保平.森林土壤种子库与天然更新[J].应用生态学报,2001,12(2):304-308.
YANG Y J, SUN X Y, WANG B P. Forest soil seed bank and natural regeneration [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(2): 304-308.
- [19] 南京农业大学.土壤农化分析[M].北京:农业出版社,1986.
Nanjing Agricultural University. *Analysis of soil and agricultural chemistry* [M]. Beijing: Agricultural Press, 1986.
- [20] 中国土壤学会农业化学专业委员会.土壤农业化学常规分析方法[M].北京:科学出版社,1984.
Agricultural Chemistry Committee of Chinese Soil Academy. *Conventional analysis methods of soil and agricultural chemistry* [M]. Beijing: Science Press, 1984.

- [21] 孙长忠,黄宝龙,陈海滨,等.黄土高原人工植被与其水分环境相互作用关系研究[J].北京林业大学学报,1998,20(3):7-14.
SUN C Z, HUANG B L, CHEN H B, *et al.* Interaction between soil water condition and different kinds of artificial plant cover in the Loess Plateau [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1998, 20 (3): 7-14.
- [22] JENTSCH A, BEYSCHLAG W. Vegetation ecology of dry acidic grasslands in the lowland area of central Europe [J]. *Flora*, 2003 (198): 3-25.
- [23] 白文娟,焦菊英,马祥华,等.黄土丘陵沟壑区退耕地自然恢复植物群落的分类与排序[J].西北植物学报,2005,25(7):1 317-1 322.
BAI W J, JIAO J Y, MA X H, *et al.* Classification and ranking of the forae naturally recuperating on the farming-withdrawn land in the hilly and gully regions of the Loess Plateau [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2005, 25 (7): 1 317-1 322.
- [24] 许明祥,刘国彬,卜崇峰.黄土丘陵区人工林地土壤肥力评价[J].西北植物学报,2003,23(8):1 367-1 371.
XU M X, LIU G B, BU C F. Soil fertility evolution of planted forest land on the hilly-gullied Loess Plateau [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, 23 (8): 1 367-1 371.
- [25] 王国梁,刘国彬,许明祥.黄土丘陵区纸坊流域植被恢复的土壤养分效应[J].水土保持学报,2001,22(1):1-5.
WANG G L, LIU G B, XU M X. Effect of vegetation restoration on soil nutrient changes in Zhifangou watershed of loess hilly region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 22 (1): 1-5.
- [26] WANG G H. Differences in leaf ¹³C among four dominant species in a secondary succession sere on the Loess Plateau of China [J]. *Photosynthetica*, 2003, 41 (4): 525-531.
- [27] JANSSENS F, PEETERS A, TALLOWIN J R B, *et al.* Relationship between soil chemical factors and grassland diversity [J]. *Plant and Soil*, 1998, 202: 69-78.
- [28] KIRKHAM F W, MOUNTFORD J O, WILKINS R J. The effects of nitrogen, potassium and phosphorus addition on the vegetation of a somerset peat moor under cutting management [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33: 1 013-1 029.
- [29] OOMES M J M, OLFF H, ALTENA H J. Effects of vegetation management and raising the water table on nutrient dynamics and vegetation change in a wet grassland [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33: 576-588.
- [30] WILLEMS J H, PEET R K, BIK L. Changes in chalk grassland structure and species richness resulting from selective nutrient additions [J]. *Journal of Vegetation Science*, 1993, 4: 203-212.
- [31] 王新平,张志山,张景光,等.荒漠植被影响土壤水文过程研究综述[J].中国沙漠,2005,25(2):196-201.
WANG X P, ZHANG Z S, ZHANG J G, *et al.* Review to researches on desert vegetation influencing soil hydrological processes [J]. *Journal of Desert Research*, 2005, 25 (2): 196-201.
- [32] NOY-MEIR I. Desert ecosystems: Environment and producers [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 25-52.
- [33] SNYMAN H A. Short-term response of rangeland botanical composition and productivity to fertilization (N and P) in a semi-arid climate of South Africa [J]. *Journal of Arid Environments*, 2002, 50: 167-183.
- [34] 马祥华.黄土丘陵沟壑区退耕地植被恢复演替与土壤因子的关系研究[D].杨凌:中国科学院水土保持研究所,2005.
MA X H. *The relationships between vegetation succession and soil variables in abandoned croplands on the Hilly-gullied Loess Plateau* [D]. Yangling: Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [35] SINGARAYER K, FLORETINE M E. Restoration on abandoned tropical pasturelands—do we know enough? [J]. *Nature Conservation*, 2004, 12: 85-94.

(责任编辑 李 契 李 慧)