

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*

焦菊英^{1,2} 马祥华¹ 白文娟¹ 焦峰^{1,2} 温仲明^{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)

摘要 根据在黄土高原丘陵沟壑区安塞 33 个退耕地自然恢复植被样方的调查数据, 采用对应分析 (Correspondence Analysis) 和典范对应分析 (Canonical Correspondence Analysis) 进行了植物群落排序和植物群落与土壤环境因子的对应分析。结果表明: 在 40 a 的演替过程中, 退耕地植被大体上依次经历了猪毛蒿 (*Artemisia scoparia*) 为优势种的群落、达乌里胡枝子 (*Lespedeza davurica*) 和长芒草 (*Stipa bungeana*) 为优势种的群落、铁杆蒿 (*Artemisia gmelinii*) 为优势种的群落和白羊草 (*Bothriochloa ischaemum*) 为优势种的群落, 4 个群落的物种组成表现出较强的延续性和递进性。4 个植物群落的土壤特性有明显的差异, 对于 0~60 cm 土层的土壤养分和 0~500 cm 土层的土壤水分, 群落 1 的土壤水分和速效磷含量较高; 群落 2 的全氮、速效氮含量较高; 群落 3 的全磷和 200~500 cm 土层的水分含量较高; 群落 4 的速效钾、土壤有机质含量较高。全磷、速效磷、土壤有机质和 0~200 cm 土层的土壤水分含量是显著影响黄土丘陵沟壑区退耕地植物群落变化的主要因子。要加速退耕地植被恢复和有效防止土壤流失, 人工引种补播适宜物种和施肥值得重视。

关键词 退耕地; 植被恢复; 植物群落排序; 土壤因子; 对应分析; 黄土高原

中图分类号 S152.7

文献标识码 A

气候条件、土壤状况与植物群落之间存在着密切的关系。在群落演替的前期阶段, 以土壤性质的内因动态演替为主, 土壤的性质影响着植被的变化, 同时也因植被的变化而发生改变。植物群落与土壤这种彼此影响相互促进的作用, 是植被恢复演替的动力。当这种作用达到一定程度时, 土壤和植物群落都受气候的限制, 达到顶级群落阶段, 而顶级群落则为生态平衡的标志^[1, 2]。可见, 退化土地在植被恢复的早期阶段, 很大程度上受土壤环境因素的制约。土壤状况不仅影响着植物群落的发生、发育和演替的速度, 而且决定着植物群落演替的方向^[3]。通过运用排序技术进行梯度分析, 能够揭示群落的连续性、相似性、多样性, 群落及其组分的分布, 群落及其组分与环境因子间的复杂关系等^[4]。因此, 采用植物群落的排序方法, 来探讨黄土高原退耕地植物群落的组成特征, 进而解释退耕地植物群落的变化与土壤环境之间的关系, 对该地区退耕地植被的恢复以及土壤侵蚀的防治具有重要的科学指导

意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为处于典型梁峁状丘陵沟壑区的安塞, 位于 105°51'44"~109°26'18"E, 36°22'40"~36°32'16"N, 海拔高度变化在 997~1 731 m。安塞属暖温带半干旱气候区, 年平均降水量 500 mm 左右, 年平均蒸发量 1 000 mm 左右, 无霜期 160~180 d, 年日照时数 2 352~2 573 h, ≥ 10 °C 积温平均 2 866 °C, 年均气温 8.9 °C^[5]。安塞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

* 国家自然科学基金项目(40271074)“黄土丘陵沟壑区退耕地植被恢复与土壤环境的互动效应”资助

作者简介: 焦菊英(1965~), 女, 研究员, 博士, 从事水土保持环境效应评价研究。E-mail: jiaojuying@yahoo.com.cn

收稿日期: 2004-11-11; 收到修改稿日期: 2005-04-11

坡因过度放牧成为退化草地^[6]。土壤类型为黄绵土,其中粉粒占 64%~73%,粘粒占 17%~20%,土质疏松,抗蚀抗冲性差,水土流失严重^[7]。

1.2 样地调查与采样

对不同退耕年限自然恢复的植物群落,及其土壤环境特征进行了调查与采样(2003年7月),共调查样地 33 个,分布在 36°44'~37°9'N、109°4'~109°20'E 的区域内,海拔高度变化在 1 115~1 392 m 之间,坡度在 3°~37°之间,退耕年限变化在 1~40 a 之间(退耕年限通过询问当地的村长或长者得到)。

植被样方的大小为 2 m×2 m,调查内容包括植物的种类、盖度、数量、高度、地上生物量和频度等。物种盖度采用目测法;物种出现的频度是在样方周围选择 10 个 1 m×1 m 的小样方来调查不同物种出现的数量;主要物种地上部分生物量的测定是沿样地对角线采取 1/4 样带回室内称重,并取一定比例的样品放入纸袋,在 80℃ 恒温下经 12 h 烘至恒重,以获取生物量干重。

土壤分析样品的采集分 3 个层次进行,即 0~20、20~40、40~60 cm,每个样点按 S 形采样混合,样品风干后分别过 1 mm 和 0.25 mm 筛孔。采用土钻法调查 0~500 cm 土层的土壤水分,每隔 20 cm 取样,采用烘干法测定。

1.3 土壤样品分析^[8,9]

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;速效磷采用 0.5 mol L⁻¹碳酸氢钠($NaHCO_3$)浸提—钼锑抗比色法;速效钾采用原子吸收光谱法(NH_4OAc 浸提法)。

1.4 统计分析

利用 CANOCO FOR WINDOWS 4.5 软件(由英国帝国理工学院农业科学系提供),采用对应分析(Correspondence Analysis, CA)以物种的盖度信息对退耕地自然恢复植物群落进行分类排序,分析植物群落的组成变化;在 CA 分析中,降低稀少物种的全重,其他选项为默认值。然后采用典范变量分析(Canonical Variate Analysis, CVA)来研究植物群落与土壤环境因子之间的对应关系^[10]。分别运行了两组 CVA 分析,一是所有选用的土壤因子参与分析(Do not use forward selection),以描述植物群落各土壤环境因子的状况(即 CVA1);二是采用手动选择(Manual selection),以期找到显著影响植物群落间

变化的主要土壤环境解释因子,显著水平采用 $p < 0.05$ (即 CVA2)。利用“Monte Carlo permutation test”来检验 CVA 排序轴特征值的显著性,采用的置换次数为 999。

用于 CVA 分析的土壤环境因子为 0~60 cm 土层的土壤有机质含量、全氮、全磷、速效氮、速效磷、速效钾、0~200 cm 和 200~500 cm 土层的土壤水分含量 8 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^[11],所以在分析中选择 0~200 cm 和 200~500 cm 土层的土壤水分含量作为土壤水分因子。

2 结果与分析

2.1 CA 排序

样方与物种的 CA 的排序结果见图 1,可以看出,CA 对植物样方和物种的排序清楚,即退耕地的植物群落可分成 4 组:群落 1—猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)为优势种的群落、群落 2—以达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)和长芒草(*Stipa bungeana*)为优势种的群落、群落 3—以铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)为优势种的群落、群落 4—白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)为优势种的群落。第一排序轴将群落 1、群落 2 和群落 3、群落 4 分开,第二排序轴将群落 2 和群落 3 分开。在群落的物种组成上,群落 1 和群落 2 较为均匀,而群落 3 和群落 4 的差异较大。群落 1 和群落 4 分别分布在第一排序轴的两端,表明群落 1 和群落 4 物种组成的相似性小;群落 1 出现在近期的退耕地上(平均年龄 5.2 a),群落 4 出现在较老的退耕地上(平均年龄 26.0 a),也就是说第一排序轴主要代表了退耕的时间梯度。CA 四个排序轴的特征值分别为 0.819、0.702、0.666 和 0.468,前 2 个排序轴解释了 35.3% 的植被物种变化,4 个排序轴解释了 61.7% 的植被物种变化。

2.2 CVA 分析

CVA1 的 Monte-Carlo permutation test 检验结果表明所有的排序轴都是显著的(p 值 = 0.001)。由表 1 可以看出,排序轴 1 解释了 21.6% 的植物群落变化,与土壤环境因子之间的相关系数为 0.805,即解释了植物群落与土壤环境之间关系的 45.6%。排序轴 2 进一步解释了 18.1% 的植物群落变化,与土壤环境因子之间的相关系数为 0.737,解释了植物群落与土壤环境之间关系的 38.2%,即排序轴 1 和排序轴 2 解释了 83.8% 的植物群落与土壤环境之

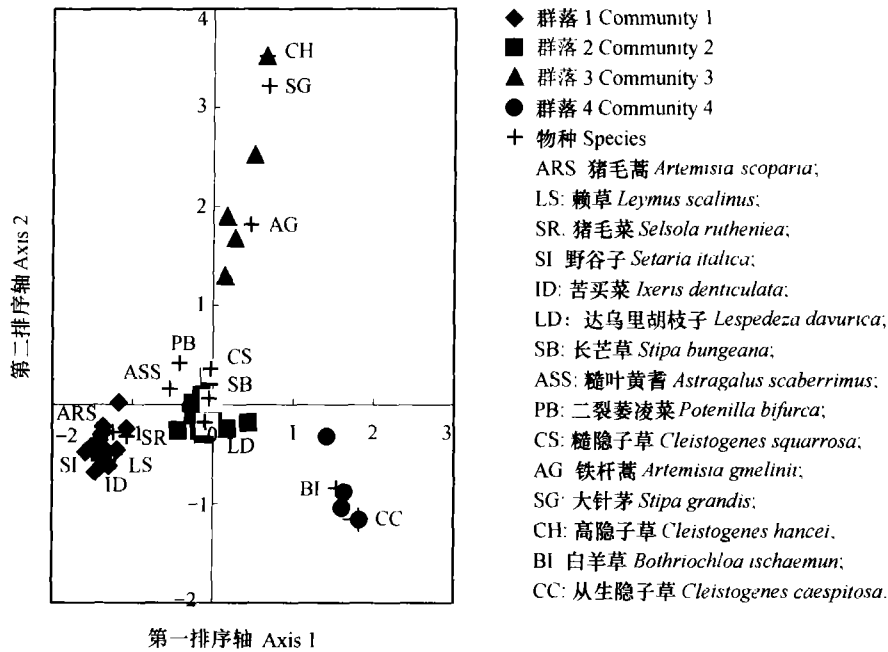


图1 样方和物种的 CA 二维排序图

Fig. 1 CA dimensional ordination of quadrates and species

表1 CVA 的排序结果

Table 1 CVA ordination

结果信息 Result information	CVA1		CVA2	
	排序轴 1 Axis 1	排序轴 2 Axis 2	排序轴 1 Axis 1	排序轴 2 Axis 2
特征值 Eigenvalues	0.649	0.543	0.586	0.443
物种与环境间的相关系数 Species-environment correlations	0.805	0.737	0.765	0.665
物种数据变化的累积比例 Cumulative percentage variance of species data	21.6	39.7	19.5	34.3
物种与环境关系变化的累积比例 Cumulative percentage variance of species-environment relation	45.6	83.8	48.6	85.3
特征值总和 Sum of all eigenvalues	3.000		3.000	
典范特征值总和 Sum of all canonical eigenvalues	1.423		1.206	

间的关系。图2反映了退耕地4个植物群落与土壤各因子的对应关系。在4个群落中,群落1的土壤水分和速效磷含量较高;而其他因子的含量则较低。群落2的土壤有机质、全氮、全磷、速效氮和速效钾含量较高;但土壤水分和速效磷含量较低。群落3的全磷和200~500 cm土层的水分含量较高;其他因子处于平均水平。群落4的速效钾、土壤有机质、全氮、速效氮含量较高;而土壤水分、速效磷、全磷含量比其他的群落都低。

CVA2的结果表明,在 $p < 0.05$ 的显著水平上,土壤有机质、全磷、速效磷和0~200 cm土层的土壤水分

含量是影响退耕地植物群落变化的最主要土壤因子(图3)。速效磷和0~200 cm土层的土壤水分含量将群落1与其他群落区别开来,土壤有机质将群落4分离出来,而全磷使群落3区别与其他群落。这4个因子解释了40.2%的总特征值,而所选的8个土壤因子解释了47.4%。这是因为土壤全氮、速效氮和速效钾与土壤有机质相互之间具有较强的相关性,0~200 cm土层的土壤水分含量与200~500 cm土层的土壤水分含量之间也存在着较高的相关关系(表2)。可见,土壤有机质、全磷、速效磷和0~200 cm土层的土壤水分含量可以作为解释退耕地植物群落变化的主要土壤因子。

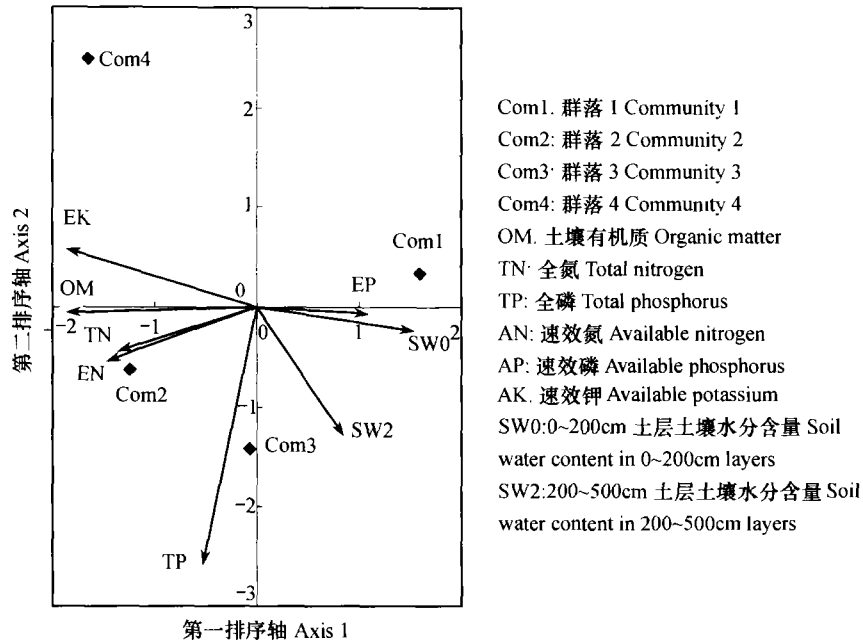


图 2 群落的 CVA1 二维排序图

Fig. 2 CVA1 dimensional ordination of communities

表 2 土壤因子间的相关性

Table 2 Correlativity between soil factors

变量 Variable	OM	TN	TP	AN	AP	AK	SW0	SW2
OM	1							
TN	0.875**	1						
TP	0.526*	0.426	1					
AN	0.885**	0.959**	0.488	1				
AP	0.255	0.281	0.227	0.200	1			
AK	0.730**	0.748**	0.176	0.706**	0.344	1		
SW0	-0.028	-0.011	0.323	0.065	-0.091	-0.233	1	
SW2	-0.031	-0.178	0.522	-0.104	-0.090	-0.255	0.638**	1

注:**:极显著($p < 0.001$);*:显著($p < 0.01$); OM:有机质 Organic matter; TN:全氮 Total nitrogen; TP:全磷 Total phosphorus; AN:速效氮 Available nitrogen; AP:速效磷 Available phosphorus; AK:速效钾 Available potassium; SW0:0~200 cm 土层水分含量 Soil water content in 0~200 cm layers; SW2:200~500 cm 土层水分含量 Soil water content in 200~500 cm layers

3 讨论

3.1 退耕地的植物群落特征

通过 CA 和 CVA 排序分析,黄土高原丘陵沟壑区退耕地植被恢复过程中,大体上经历了猪毛蒿 (*Artemisia scoparia*) 为优势种的群落、达乌里胡枝子 (*Lespedeza davurica*) 和长芒草 (*Stipa bungeana*) 为优势种的群落、铁杆蒿 (*Artemisia gmelinii*) 为优势种的群落和白羊草 (*Bothriochloa ischaemum*) 为优势种的群落,这 4 个植物群落可依次代表退耕地植被演替的 4 个阶

段^[12,13]。4 个植物群落的平均年龄分别为 5.2 a、16.3 a、23.3 a 和 26.0 a,坡度平均为 13.6°、19.6°、23.0° 和 31.0°,反映了由陡坡到缓坡地的退耕过程。4 个群落主要物种的生物特征统计值见表 3。可以看出,群落 1 中,猪毛蒿、赖草 (*Leymus scalinus*) 的盖度、频度、高度、重要值和地上部分生物量远远高于其他伴生种,平均盖度分别为 16.1% 和 15.0%。群落 1 还可以划分出一个由 5 个样方组成的以赖草为优势种的亚群落,赖草的再生途径 (Regeneration strategy) 为侧根繁殖 (Lateral spread),因此,退耕地赖草的出现与其周围群落中赖草的有否有很大的关系。在群落 2 中,

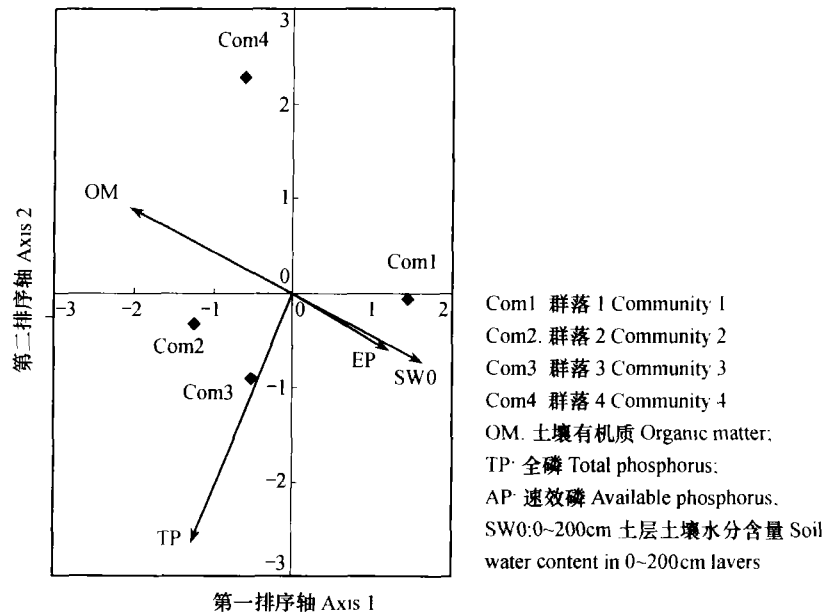


图3 群落的CVA2二维排序图

Fig.3 CVA2 dimensional ordination of communities

达乌里胡枝子和长芒草的平均盖度分别为 32.9% 和 15.3%;猪毛蒿、赖草和铁杆蒿尽管盖度低,但由于具有较高的高度和频度,它们在群落中的重要值较高。群落3优势种铁杆蒿的平均盖度为 26.0%,群落4优势种白羊草的平均盖度为 59.3%。同时可以看出,4个群落的物种组成不是完全不同的,群落1中就有群落2的达乌里胡枝子等物种出现,群落2中依然保留有群落1的猪毛蒿和赖草等物种,同时群落3的铁杆蒿也有少量出现,群落3中保留着群落2的达乌里胡枝子和长芒草,群落4中保留着群落3的铁杆蒿和群落2的达乌里胡枝子和长芒草,反映了一个连续与递进的演替过程。

3.2 退耕地的土壤养分与水分特征

对于土壤养分状况,33个样方 0~60cm 土层土壤有机质含量变化在 2.06~9.85 g kg⁻¹之间,全氮含量变化在 0.15~0.59 g kg⁻¹之间,速效氮含量在 10.23~39.02 mg kg⁻¹之间,全磷含量在 0.46~0.66 g kg⁻¹之间,速效磷在 0.31~1.37 mg kg⁻¹之间,速效钾在 24.81~70.93 mg kg⁻¹之间。与我国肥力等级比较^[14],速效钾处于等级4水平,有机质处于等级4或5水平,全氮、速效氮和速效磷均处于等级5水平;土壤有机质、全氮、速效氮、速效磷和速效钾等级1的下限值分别是33样方 0~60 cm 土层平均值的 3.1、4.6、8.3、66.7 和 4.4 倍,最大值的 1.5、2.1、3.8、28.6 和 2.8 倍。可见黄土丘陵沟壑区退耕地土

壤的肥力水平在我国处于低水平,特别是磷素匮乏严重,而土壤养分是影响植物群落结构非常重要的因子^[15]。

就土壤水分含量来说,黄绵土的凋萎湿度为 3%~4%,田间持水量 20%~23%^[16]。33个样方的土壤水分含量在 0~200 cm 土层变化在 4.1%~11.3%,200~500 cm 土层变化在 5.5%~13.2%,0~500 cm 土层变化在 5.3%~11.7%。可见,退耕地 0~500 cm 土层的土壤水分含量变化在凋萎湿度和 50%的田间持水量之间,处于亏缺状态^[17]。

3.3 植物群落与土壤环境因子的关系

不同的土壤养分状况影响植物的生物量,进而影响植物物种的组成和多样性^[18],土壤氮素是决定植物群落生产量、多样性和入侵的重要因子^[19~21];而磷素在许多土壤类型中是个限制性因子^[12,22~25],决定着群落的生物量与物种组成^[23];钾素也影响着植物的生物产量^[24,26]。在干旱和半干旱地区,土壤水分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^[27,28]。黄土丘陵沟壑区植物耗水几乎完全依赖土壤供给,其土壤水分对大部分地区来说完全依靠大气降水补充^[29],年降雨下渗深度仅在 2 m 以上^[11],2 m 以下土层的土壤水一旦耗用,难以补充(补充需要很长的时间)^[30],人工油松林、天然灌丛和荒坡草地对土壤水

表 3 植物群落主要物种的特征

Table 3 Characteristics of main species in the 4 communities

主要物种 Key species	科 Family	生活型 Life history	物种数 No.	盖度 Cover (%)	频度 Frequency (%)	高度 Height (m)	重要值 IV	生物量 Biomass (g m ⁻²)
群落 1 Community 1								
猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	菊科 Compositae	一年生 Annual	13	16.1 ± 9.3	96.2 ± 7.5	0.45 ± 0.16	99.4 ± 44.0	35.7 ± 23.1
赖草 <i>Leymus scalinus</i>	禾本科 Gramineae	多年生 Perennial	5	15.0 ± 5.0	70.0 ± 42.4	0.58 ± 0.15	112.1 ± 42.8	20.9 ± 18.2
达乌里胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>	豆科 Leguminosae	多年生 Perennial	12	2.3 ± 2.8	66.4 ± 34.7	0.20 ± 0.18	29.1 ± 17.7	7.1 ± 9.3
苦苣菜 <i>Ixeris denticulata</i>	菊科 Compositae	多年生 Perennial	5	1.8 ± 2.2	51.7 ± 40.7	0.18 ± 0.11	26.0 ± 19.2	4.0 ± 4.5
分枝鸦葱 <i>Scorzonera divaricata</i>	菊科 Compositae	多年生 Perennial	5	1.5 ± 2.2	55.0 ± 35.4	0.15 ± 0.05	20.0 ± 16.7	4.5 ± 5.7
阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>	菊科 Compositae	多年生 Perennial	9	1.1 ± 1.5	41.7 ± 25.5	0.21 ± 0.11	23.5 ± 14.4	4.5 ± 5.0
群落 2 Community 2								
达乌里胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>	豆科 Leguminosae	多年生 Perennial	11	32.9 ± 28.7	96.4 ± 8.1	0.33 ± 0.07	88.4 ± 44.3	42.7 ± 45.0
长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	禾本科 Gramineae	多年生 Perennial	11	15.3 ± 11.8	87.0 ± 17.1	0.18 ± 0.04	59.1 ± 29.9	6.1 ± 4.0
猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	菊科 Compositae	一年生 Annual	4	3.3 ± 2.3	67.1 ± 29.3	0.31 ± 0.17	40.9 ± 26.6	3.0 ± 1.7
糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	禾本科 Gramineae	多年生 Perennial	7	2.7 ± 2.9	57.8 ± 26.4	0.15 ± 0.06	24.9 ± 8.5	2.5 ± 2.3
赖草 <i>Leymus scalinus</i>	禾本科 Gramineae	多年生 Perennial	5	2.2 ± 1.8	66.7 ± 36.7	0.59 ± 0.11	49.1 ± 24.0	4.9 ± 3.9
铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i>	菊科 Compositae	多年生 Perennial	4	2.1 ± 2.0	36.7 ± 34.5	0.53 ± 0.16	36.5 ± 14.3	8.1 ± 1.7
二裂萎陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	蔷薇科 Rosaceae	多年生 Perennial	5	1.5 ± 1.4	51.4 ± 30.4	0.08 ± 0.02	19.2 ± 8.9	4.1 ± 6.5
糙叶黄耆 <i>Astragalus scaberrimus</i>	豆科 Leguminosae	多年生 Perennial	5	1.2 ± 1.6	32.5 ± 12.8	0.03 ± 0.02	9.6 ± 4.4	0.9 ± 0.4
群落 3 Community 3								
铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i>	菊科 Compositae	多年生 Perennial	5	26.0 ± 13.9	80.0 ± 30.8	0.49 ± 0.19	104.1 ± 15.4	28.3 ± 16.7
萎陵菜 <i>Potentilla chinensis</i>	蔷薇科 Rosaceae	多年生 Perennial	2	2.8 ± 3.2	45.0 ± 40.4	0.25 ± 0.14	31.8 ± 24.4	
达乌里胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>	豆科 Leguminosae	多年生 Perennial	4	2.5 ± 1.9	87.5 ± 25.0	0.19 ± 0.08	36.3 ± 12.6	21.3 ± 11.2
长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	禾本科 Gramineae	多年生 Perennial	4	2.3 ± 2.2	75.0 ± 43.6	0.21 ± 0.13	34.0 ± 16.9	3.3 ± 3.8
糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	禾本科 Gramineae	多年生 Perennial	4	1.6 ± 2.3	46.0 ± 25.1	0.16 ± 0.05	22.8 ± 14.8	7.4
二裂萎陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	蔷薇科 Rosaceae	多年生 Perennial	3	1.3 ± 1.4	50.0 ± 56.6	0.06 ± 0.03	14.0 ± 8.0	5.0 ± 0.5
群落 4 Community 4								
白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i>	禾本科 Gramineae	多年生 Perennial	4	59.3 ± 17.8	100.0 ± 0.0	0.29 ± 0.03	125.9 ± 21.5	55.2 ± 20.2
铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i>	菊科 Compositae	多年生 Perennial	3	6.0 ± 7.9	83.3 ± 15.3	0.41 ± 0.21	43.3 ± 18.5	9.7 ± 8.6
芨芨草 <i>Artemisia gralaii</i>	菊科 Compositae	多年生 Perennial	2	5.0 ± 0.0	33.3 ± 32.2	0.21 ± 0.01	25.2 ± 2.1	3.7
达乌里胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>	豆科 Leguminosae	多年生 Perennial	4	4.0 ± 1.4	100.0 ± 0.0	0.40 ± 0.11	56.8 ± 30.4	13.8 ± 14.4
大针茅 <i>Stipa grandis</i>	禾本科 Gramineae	多年生 Perennial	2	1.1 ± 1.3	80.0	0.78 ± 0.04	44.4 ± 1.3	8.8
长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	禾本科 Gramineae	多年生 Perennial	2	1.1 ± 1.3	66.7 ± 11.6	0.18 ± 0.04	30.8 ± 17.5	5.3 ± 6.1

注:表中数字为平均值 ± 标准偏差;重要值 = 相对盖度 + 相对频度 + 相对高度 Note: mean ± standard deviation; IV = relative cover + relative frequency + relative height

分的利用深度都超过了9~10 m^[31,32]。可见,土壤水分是黄土丘陵沟壑区植被恢复的限制因子^[33]。

对于退耕地4个植物群落的土壤特性,群落1的土壤水分和速效磷含量较高,这是由于受前期耕作的影响,而且植物群落盖度较低,植被消耗的土壤水分和磷素也就较低;而随着植被的演替,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,而致使其成为限制植被恢复的主要因子^[34,35];群落2和群落4的土壤有机质、速效氮和速效钾含量较高,群落2优势种达乌里胡枝子为豆科植物,具有培肥土壤的作用,土壤氮含量较高。白羊草作为群落4的优势种,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为演替最后阶段的优势种^[13]。调查所得的以白羊草为优势种样地均在坡度为25°~35°的阳坡上;同时群落4的土壤有机质、氮素和钾素的含量也较高。因此,在退耕地的植被恢复中,人工引种补播C4及达乌里胡枝子等适宜物种可以加快退耕地植被的恢复。同时,人工施肥也是一个值得考虑的问题,施肥方法、土壤微生物对土壤养分植物有效性的影响,土壤养分的相互作用与比例等^[36~38]的进一步分析与研究可为退耕地植被的快速恢复提供科学的干预对策。

4 结 论

1) 黄土高原丘陵沟壑区退耕地植被恢复演替过程中,退耕地植被大体上经历了猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)为优势种的群落、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)和长芒草(*Stipa bungeana*)为优势种的群落、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)为优势种的群落和白羊草(*Bothriochloa ischaemun*)为优势种的群落,4个群落的物种组成表现出较强的延续性和递进性。

2) 土壤有机质、全磷、速效磷和0~200 cm土层的土壤水分含量是显著影响黄土丘陵沟壑区退耕地植物群落变化的主要土壤因子。群落1的土壤水分和速效磷含量较高;群落2的全氮、速效氮含量较高;群落3的全磷和200~500 cm土层的水分含量较高;群落4的速效钾、土壤有机质含量较高。总的来说,退耕地植物群落的演替过程中,土壤有机质、全氮、速效氮、速效钾呈现增加的趋势,速效磷、土壤水分则呈现递减的趋势。

3) 黄土丘陵沟壑区退耕地0~500 cm土层的土

壤水分含量变化在凋萎湿度和50%田间持水量之间,而且随着退耕地植被的演替,土壤水分含量逐渐减少,特别是深层土壤水分,而土壤水分的补偿能力很低。退耕地土壤的肥力水平在我国处于最低水平,特别是磷素含量非常低。因此,土壤水分含量和土壤磷素水平是黄土丘陵沟壑区植被恢复的两个非常重要的限制性因子。

4) 要加速退耕地植被恢复和有效防止土壤流失,在退耕地的植被恢复中,人工引种补播适宜物种和施肥值得考虑与重视。

致 谢 承蒙中国科学院安塞水土保持生态试验站提供野外工作条件,徐朗然、张桂英、卜耀军、赫晓惠和史婉丽等同志参与了野外调查工作,伦敦帝国理工大学的 Jonathan Mitchley 和 Joseph Tzanopoulos 为本文的分析提供了帮助,在此特表感谢。

参 考 文 献

- [1] 朱志诚 陕北黄土高原植被基本特征及其对土壤性质的影响. 植物生态学与地植物学学报,1993,17(3):280~286 Zhu Z C. The basic characteristics of vegetation and its effect on soil properties on the Loess Plateau of north Shaanxi (In Chinese) Acta Phytocologica & Geobotany Sinica, 1993,17(3):280~286
- [2] 朱志诚,黄可. 陕北黄土高原森林草原地带植被恢复演替初步研究. 山西大学学报(自然科学版),1993,16(1):94~100. Zhu Z C, Huang K. Recovering succession of vegetation on forest zone of Loess Plateau in north Shaanxi Province (In Chinese) Journal of Shanxi University (Nat. Sci. Ed.), 1993,16(1):94~100
- [3] 杨小波,吴庆书 海南岛热带地区弃荒农田次生植被恢复特点. 植物生态学报,2000,24(4):477~482 Yang X P, Wu Q S. The characteristics of secondary vegetation restoration on abandoned cropland in Hainan island tropical region (In Chinese) Acta Phytocologica Sinica, 2000,24(4):477~482
- [4] 关文彬,曾德慧,范志平等. 中国东北西部地区沙质荒漠化过程与植被动态关系的生态学研究:植被的排序. 应用生态学报,2001,12(5):687~691 Guan W B, Zeng D H, Fan Z P, et al. Ecological studies on relationship between the process of desertification and vegetation dynamics in the west of north east China: Vegetation ordination (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2001,12(5):687~691
- [5] 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. 自然资源学报,2003,18(2):182~188. Gao W S, Dong X B. Evaluation on the services of fragile agricultural ecology system in the hilly and gully region on the Loess Plateau—Case study in Ansai (In Chinese) Journal of Natural Resources, 2003,18(2):182~188
- [6] 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. 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 Plateau (In Chinese). Research of Soil and Water Conservation, 1996, 3(2): 66 ~ 74
- [7] 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.生态学报,2002,22(8):1 173 ~ 1 178. Wang J, Fu B J, Qiu Y, *et al.* Spatial heterogeneity of soil nutrient in small catchments of the Loess Plateau (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(8): 1 173 ~ 1 178
- [8] 南京农业大学主编.土壤农化分析.北京:农业出版社,1986. Nanjing Agricultural University. ed. Analysis of Soil and Agricultural Chemistry (In Chinese). Beijing: Agricultural Press, 1986
- [9] 中国土壤学会农业化学专业委员会编.土壤农业化学常规分析方法.北京:科学出版社,1984. Agricultural Chemistry Committee of Chinese Soil Academy. ed. Conventional Analysis Methods of Soil and Agricultural Chemistry (In Chinese). Beijing: Science Press, 1984
- [10] Ter Braak C J F, Smilauer P. CANOCO Reference Manual and CanoDraw for Windows User's Guide, Software for Canonical Community Ordination (version 4.5). Biometris, Wageningen and České Budějovice, 2002
- [11] 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.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 (In Chinese). Journal of Beijing Forestry University, 1998, 20(3): 7 ~ 14
- [12] Wang G H. Plant traits and soil chemical variables during a secondary vegetation succession in abandoned fields on the Loess Plateau. Acta Botanica Sinica, 2002, 44(8): 990 ~ 998
- [13] Wang G H. Differences in leaf $\delta^{13}\text{C}$ among four dominant species in a secondary succession sere on the Loess Plateau of China. Photosynthetica, 2003, 41(4): 525 ~ 531
- [14] 李宝林,李香兰.黄土高原林区土壤肥力综合评价排序方法探讨.水土保持学报,1995,9(1): 64 ~ 70. Li B L, Li X L. Approach on the comprehensive evaluation method of soil fertility in the forest area of Loess Plateau (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 9(1): 64 ~ 70
- [15] Grime J P, Thompson K, Hunt R, *et al.* Integrated screening validates primary axes of specialization in plants. Oikos, 1997, 79: 259 ~ 281
- [16] 胡定宇主编.土壤学.陕西杨陵:天则出版社,1992. 179 ~ 182. Hu D Y. ed. Pedology (In Chinese). Yangling, Shaanxi: Tianze Press, 1992. 179 ~ 182
- [17] 杨新民,杨文治.陕北黄土丘陵沟壑区土壤水分物理特性及土壤水分资源特征研究.西北水资源与水工程,1996(1):48 ~ 52. Yang X M, Yang W Z. Property of soil water-physics and soil moisture resources in the loess hilly region of north Shaanxi (In Chinese). Water Resources & Water Engineering, 1996(1): 48 ~ 52
- [18] Critchley C N R, Chambers B J, Fowbert J A, *et al.* Association between lowland grassland plant communities and soil properties. Biological Conservation, 2002, 105: 199 ~ 215
- [19] Chapin F S, Vitousek P M, Van Cleve K. The nature of nutrient limitation in plant communities. American Naturalist, 1983, 127: 48 ~ 88
- [20] Wedin D A, Tilman D. Influence of nitrogen loading and species composition on the carbon balance of grasslands. Science, 1996, 274: 1 720 ~ 1 723
- [21] Matthew L B. Effects of increased soil nitrogen on the dominance of alien annual plants in the Mojave Desert. Journal of Applied Ecology, 2003, 40: 344 ~ 353
- [22] Janssens F, Peeters A, Tallowin J R B, *et al.* Relationship between soil chemical factors and grassland diversity. Plant and Soil, 1998, 202: 69 ~ 78
- [23] 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. Journal of Applied Ecology, 1996, 33: 1 013 ~ 1 029
- [24] Oomes M J M, Olf H, Altena H J. Effects of vegetation management and raising the water table on nutrient dynamics and vegetation change in a wet grassland. Journal of Applied Ecology, 1996, 33: 576 ~ 588
- [25] Willems J H, Peet R K, Bik L. Changes in chalk grassland structure and species richness resulting from selective nutrient additions. Journal of Vegetation Science, 1993, 4: 203 ~ 212
- [26] Van der Woude B J, Pegtel D M, Bakker J P. Nutrient limitation after long-term nitrogen fertiliser application in cut grasslands. Journal of Applied Ecology, 1994, 31: 405 ~ 412
- [27] Noy-Meir I. Desert ecosystems: Environment and producers. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 25 ~ 52
- [28] 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. Journal of Arid Environments, 2002, 50: 167 ~ 183
- [29] 王经民,戴海燕,韩冰.黄土丘陵区土壤水分研究.农业系统科学与综合研究,2000,16(1): 53 ~ 56. Wang J M, Dai H Y, Han B. Soil moisture in loess hilly region (In Chinese). System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2000, 16(1): 53 ~ 56
- [30] 张信宝.黄土高原植被建设的科学检讨和建议.中国水土保持,2003,(1):17,32. Zhang X B. Scientific review and suggestion on vegetation construction on the Loess Plateau (In Chinese). Chinese Soil and Water Conservation, 2003,(1):17,32
- [31] 王志强,刘宝元,海春兴,等.晋西北黄土丘陵区不同植被类型土壤水分分析.干旱区资源与环境,2002,16(4):53 ~ 58. Wang Z Q, Liu B Y, Hai C X, *et al.* Analysis of soil water content of different vegetation types in the north-western part of Shanxi Province (In Chinese). Journal of Arid Land Resource and Environment, 2002, 16(4): 53 ~ 58
- [32] 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.土壤学报,2003,40(2):210 ~ 217. Mu X M, Xu X X, Wang W L, *et al.* Impact of artificial forest on soil moisture of the deep soil layer on Loess Plateau (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(2): 210 ~ 217
- [33] 郭忠升,邵明安.雨水资源、土壤水资源与土壤水分植被承载力.自然资源学报,2003,18(5):522 ~ 528. Guo Z S, Shao M A. Precipitation, soil water and soil water carrying capacity of vegetation (In Chinese). Journal of Natural Resources, 2003, 18(5): 522 ~ 528

- [34] 许明祥, 刘国斌, 卜崇峰. 黄土丘陵区人工林地土壤肥力评价. 西北植物学报, 2003, 23(8): 1 367 ~ 1 371. Xu M X, Liu G B, Bo C F. Soil fertility evolution of planted forest land on the hilly-gullied Loess Plateau (In Chinese). Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003, 23(8): 1 367 ~ 1 371
- [35] 王国梁, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应. 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 (In Chinese) Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 22(1): 1 ~ 5
- [36] Tong Y A, Enteryd H G, Lu D Q. Soil NH_4^+ fixation and fertilizer N recovery as affected by soil moisture and fertilizer application methods. Pedosphere, 2004, 14(2): 247 ~ 252
- [37] 来璐, 郝明德, 彭令发, 等. 黄土高原旱地长期施肥条件下土壤有机磷的变化. 土壤, 2003, 35(5): 413 ~ 418. Lai L, Hao M D, Peng L F, et al. Variation of organic phosphorus in soil under long-term fertilization on Loess Plateau (In Chinese) Soils, 2003, 35(5): 413 ~ 418
- [38] 何振立. 土壤微生物量及其在养分循环和环境质量评价中的意义. 土壤, 1997, 29(2): 61 ~ 69. He Z L. Soil microbial biomass and its significance in nutrients circulation and assessment of environmental quality (In Chinese). Soils, 1997, 29(2): 61 ~ 69

CORRESPONDENCE ANALYSIS OF VEGETATION COMMUNITIES AND SOIL ENVIRONMENTAL FACTORS ON ABANDONED CROPLAND ON HILLY-GULLIED LOESS PLATEAU

Jiao Juying^{1,2} Ma Xianghua¹ Bai Wenjuan¹ Jiao Feng^{1,2} Wen Zhongming^{1,2}

(1 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract Based on observation of 33 plots of abandoned farmland in Ansai, a loess region of hills and gullies, sequence of vegetation communities and their relationships with soil environmental factors in these fields were analyzed through Correspondence Analysis and Canonical Correspondence Analysis. The results show that there are mainly 4 vegetation communities during 40 years of succession: *Artemisia scoparia* dominated community (I), *Lespedeza davurica* and *Stipa bungeana* dominated community (II), *Artemisia gmelinii* dominated community (III) and *Bothriochloa ischaemum* dominated community (IV). The species compositions of the 4 communities displayed relatively strong continuity and progressiveness. In comparison, the soil under Community I was higher in soil moisture content in 0 ~ 200 cm layers and available phosphorus content, Community II in total nitrogen and available nitrogen content, Community III in total phosphorus content and soil water content in 200 ~ 500 cm layers, and Community IV in available potassium and organic matter content. Organic matter, total phosphorus, available phosphorus and soil water content in 0 ~ 200 cm layers are important factors significantly affecting variation of vegetation on abandoned cropland in the hilly-gullied Loess Plateau. To revegetate the land quickly and control soil erosion effectively, it is essential to take measures such as transplanting or sowing C4 plants and applying fertilizers.

Key words Abandoned cropland; Vegetation restoration; Vegetation community ordination; Soil factors; Correspondence analysis; Loess Plateau