

# 黄土高原北部紫花苜蓿草地退化过程 与植物多样性研究\*

李裕元<sup>1,2,\*</sup> 邵明安<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室,北京 100101;<sup>2</sup>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,杨凌 712100)

**【摘要】** 以陕西省神木县六道沟小流域为研究区域,探讨了黄土高原北部紫花苜蓿人工草地退化过程中植物多样性的变化.结果表明,在黄土高原北部森林草原气候区,紫花苜蓿人工草地的退化演替过程可以划分为3个阶段:紫花苜蓿草地阶段(1~6年)、人工草地向天然草地演替的过渡阶段(6~10年)与长芒草次生天然草地阶段(10年以上).在1~30年的演替过程中,调查样方内共出现高等植物32种,分属于13科28属,其中90%以上出现在前6年.植被演替过程中累积出现的植物科属种数的动态变化可以用对数函数进行较好地描述.在群落演替过程中,物种丰富度指数、多样性指数和Pielou均匀度指数的变化趋势基本一致,在演替前期(第1个阶段)增加较快,在第2个阶段(过渡阶段)达到最高,然后有所降低并渐趋稳定.种植紫花苜蓿可显著地加快植被的自然演替进程,这与人工草地水分消耗强烈加速了土壤的旱化过程密切相关.发展人工草地是黄土高原北部加速天然植被恢复与发展畜牧业、增加农民收入的有机结合点,是西部生态环境建设中生态效益与经济效益兼顾的良好范式.

**关键词** 黄土高原北部 紫花苜蓿 人工草地 群落演替 植物多样性 森林草原带  
**文章编号** 1001-9332(2005)12-2321-07 **中图分类号** Q948.5;S541 **文献标识码** A

**Degradation process and plant diversity of alfalfa grassland in North Loess Plateau of China.** LI Yuyuan<sup>1,2</sup>, SHAO Ming'an<sup>1,2</sup> (<sup>1</sup>Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; <sup>2</sup>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 712100, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2005, 16(12):2321~2327.

Vegetation recovery and reconstruction is the key of ecosystem restoration in the North Loess Plateau. With the Liudaogou catchment of Shenmu County, Shaanxi Province as test area, this paper studied the dynamics of the plant diversity of artificial alfalfa (*Medicago sativa*) grassland during its degradation process. The results showed that the degradation process of the grassland could be divided into three stages, i. e., artificial alfalfa grassland stage (1~6 yrs), transitional stage from artificial to natural grassland (6~10 yrs), and secondary natural grassland stage dominated by *Stipa bungeana* (> 10 yrs). In the whole degradation process from 1-to 30-yrs, 32 species belonging to 13 families and 28 genera were found, of which, 90% appeared in the initial 6-yrs. The dynamics of accumulatively appeared family, genus, and species in the vegetation succession process were well described by logarithmic function. During the process of community succession, the species richness (Gleason index and Margalef index), plant diversity (Shannon-Wiener index), and Pielou evenness index were changed with a similar tendency, i. e., increased more rapidly at the first stage, and the climax phase appeared in the second stage. The plant diversity and evenness decreased slightly, and gradually became stable later. Planting alfalfa could markedly accelerate the natural vegetation succession process in the forest-steppe ecotone of Loess Plateau, mainly due to the intensive soil water consumption of artificial grassland, which accelerated the process of soil aridification. To develop artificial grasslands in the Loess Plateau is an optimal joint between accelerating natural vegetation recovery and increasing farmers' income by stockbreeding, and is also a favorable paradigm both for the ecological and for the economic benefits in the eco-environmental construction in West China.

**Key words** North Loess Plateau, Alfalfa (*Medicago sativa*), Artificial grassland, Community succession, Plant diversity, Forest-steppe ecotone.

## 1 引 言

植被的恢复与重建是遏制黄土高原地区土壤退化以及加速该地区退化生态系统恢复的关键<sup>[16,25,26]</sup>.在气候干旱、土地沙化严重的西北地区,

草地植被的恢复与重建对于该地区的生态与经济起

\* 国家重点基础研究发展规划项目(2002CB111502)、国家自然科学基金项目(40371074)和中国博士后科学基金资助项目(2003033023).

\*\* 通讯联系人.

2004-10-08收稿,2005-08-20接受.

着举足轻重的作用.从长远的战略定位来看,西北地区的农业终将以草地畜牧业为主,依赖于草地的畜牧业及其相关产业将成为西部地区的支柱产业,西部地区生态环境的改善与优化也在很大程度上有赖于对草地植被的保护、发展与建设<sup>[24]</sup>.人工草地建设是加速植被恢复的重要途径,同时也是畜牧业发展与生态环境建设的关键环节<sup>[2,17,21]</sup>.紫花苜蓿(*Medicago sativa*)人工草地是黄土高原地区广泛分布的人工植被类型,由于其耐贫瘠、多年生、适口性好、营养丰富等特点,长期以来已被西北地区群众广泛接受.紫花苜蓿在播种当年地表郁蔽度可接近100%,对于有效控制坡地土壤侵蚀、防治土壤退化有着重要作用.但在野外考察中发现,在黄土高原北部年降水量450 mm左右的半干旱地区,紫花苜蓿草地生长盛期持续时间一般仅为3~5年,到6~7年之后草地产草量迅速下降,乃至基本丧失利用价值,自然演化为牧荒坡.因此,如何延长紫花苜蓿草地的有效使用寿命,是该地区人工草地管理的核心内容.紫花苜蓿人工草地退化以后可以自然过渡演化为地带性的天然草地,因此种植紫花苜蓿也是通过人为措施加速天然植被恢复的好方法.基于此,我们采用时空互代的方法,研究了不同生长年限紫花苜蓿草地群落的物种组成与植物多样性特征,旨在探讨紫花苜蓿草地的退化过程和人工草地向天然草地演替的机制,以期为人工草地的科学经营与合理利用、指导黄土高原北部的生态环境建设提供科学依据.

## 2 研究地区与研究方法

### 2.1 研究地区概况

研究区位于黄土高原北部陕西省神木县城西14 km处的六道沟小流域内,地处毛乌素沙地的东南缘(110°21'~110°23'E,38°46'~38°51'N,海拔高度1 081.0~1 273.7 m).本区年均气温8.4℃,月平均最低气温-9.7℃(1月)、最高气温23.7℃(7月),≥10℃年积温3 232℃,无霜期169 d;盛行风向为NW,年平均风速为2.2 m·s<sup>-1</sup>;年均降水量437.4 mm,6~9月降水量占全年降水量的77.4%,年蒸发量785.4 mm,平均干燥度为1.8,属于中温带半干旱气候类型区<sup>[18]</sup>.该区虽然属于森林草原区<sup>[29]</sup>,但是由于人为频繁的耕垦,水土流失与土地沙化现象十分严重,天然植被多已遭到严重破坏,次生的地带性植被以旱生禾草群落与旱中生蒿类群落为主,其中常见的主要有长芒草(*Stipa bungena*)群落、大针茅(*S. grandis*)群落、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)群落、芨芨蒿(*Artemisia giraldii*)群落、铁杆蒿(*A. gmelinii*)群落等<sup>[27]</sup>,表现出典型草原区的植被特征.研究区

土地利用方式多以坡耕地为主,属于一年一熟轮作制.当地群众有长期种植紫花苜蓿人工草地的习惯,由于地广人稀,人工草地退化以后很少重新耕垦,而是自然演化为牧荒坡(天然草地).

研究区黄土层厚度一般在30 m以上,在一些沟道内可以见到下伏基岩.流域内由于水蚀、风蚀作用强烈,地形极其破碎,但相对高差一般在100 m以下.紫花苜蓿主要种植于流域内黄土母质发育的土壤,土壤类型为侵蚀砂壤质新成土,多分布于梁峁坡地,土层较厚,但因整个土壤剖面(0~400 cm)砂礓含量相对较高,加之土壤侵蚀的影响,土壤耕性及肥力状况均较差,产量水平较低.随着紫花苜蓿生长时间的延长,表层0~20 cm土壤的有机质、全N、有效N、P、K含量、阳离子代换量等均有显著提高.受人为耕作的影响,表层(0~20 cm)土壤容重在紫花苜蓿播种初期相对较低,但种植紫花苜蓿1~6年以后显著增大,随着紫花苜蓿的生长以及土壤养分状况的改善,在后期其有较显著的降低.

### 2.2 研究方法

采用陆地生物多样性研究的标准方法<sup>[4]</sup>进行野外调查与数据分析.样方设置在立地条件接近的阴坡或半阴坡、不同生长年限(1~30年)的人工草地上,样方面积为2 m×2 m,重复10次.为了保证样地间的可比性,通过走访当地居民确定紫花苜蓿人工草地的准确种植年限,保证在种植紫花苜蓿之前均为长期耕种的坡耕地,海拔、坡度、坡向等立地条件以及土壤条件尽量接近(表1~2),以减小样地立地条件

表1 神木六道沟阴坡不同生长年限紫花苜蓿草地表层(0~20 cm)土壤的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of surface soils(0~20 cm) of *Medicago sativa* grasslands with different ages on the northern slope in Liudaogou catchment in Shenmu county

生长年限 Age (yr)	容重 BD (g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度 TP (%)	pH	有机质 O. M. (g·kg <sup>-1</sup> )	阳离子代换量 CEC (mmol·kg <sup>-1</sup> )
1	1.29	51.31	8.56	4.36	76.5
6	1.40	47.04	8.78	3.19	66.1
14	1.39	47.46	8.95	3.33	72.9
30	1.35	48.96	8.80	6.43	89.8
全氮 Total N (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total P (g·kg <sup>-1</sup> )	全钾 Total K (g·kg <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N+ NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Available P (mg·kg <sup>-1</sup> )	有效钾 Available K (mg·kg <sup>-1</sup> )
0.27	0.38	20.44	7.52	0.70	47.4
0.24	0.40	21.24	9.04	0.79	59.0
0.23	0.49	19.86	10.17	0.90	63.8
0.43	0.52	20.59	8.78	1.86	108.8

表2 神木六道沟不同生长年限紫花苜蓿草地方立地条件\*

Table 2 Site characteristics of quadrats of *Medicago sativa* grasslands with different ages in Liudaogou catchment in Shenmu, Shaanxi

生长年限 Age (yr)	地点 Location	海拔 Altitude (m)	坡度 Slope (°)	坡向 Aspect (°)
1	闹泥渠 Naoniqu	1191	12.5~15.5	NE43
4	闹泥渠 Naoniqu	1207	17.5~19.0	NE78
6	木瓜畔 Muguapan	1233	7.0~10.0	NW28
10	榆树耳子 Yushuerzi	1233	10.0~14.5	NE21
14	水保所试验站 Experimental Station	1214	8.0~14.1	NE21
30	北屹坝 Beigeiba	1230	19.0~25.0	NW6

\* 样方所处的地形均为梁坡 All of the quadrats were in the landform of less girder.

差异带来的影响. 调查项目主要包括植物种名、数量、高度与盖度. 对于丛生植物(如紫花苜蓿、长芒草等)均以每丛记为一个个体. 群落种群组成测度采用重要值(IV), 物种多样性测度采用物种丰富度指数(Gleason 指数与 Margalef 指数)、多样性指数(Shannon-Wiener 指数)和 Pielou 均匀度指数 3 类指标<sup>[4, 22]</sup>.

重要值(IV)

$$IV = RHI + RCO + RFE \quad (1)$$

式中, RHI 为相对高度, RCO 为相对盖度, RFE 为相对频度. RHI 的计算方法为:

$$RHI = 100 \times H_i / \sum H_i \quad (2)$$

式中,  $H_i$  为野外实测的某种群的平均高度,  $\sum H_i$  为样方中所有种群平均高度之和. RCO 与 RFE 的计算方法与此类似.

Gleason 指数( $I_{Gl}$ ):

$$I_{Gl} = S / \ln A \quad (3)$$

式中, S 为物种数目, A 为样方面积( $m^2$ ).

Margalef 指数( $I_{Ma}$ ):

$$I_{Ma} = (S - 1) / \ln N \quad (4)$$

Shannon-Wiener 指数( $I_{sw}$ ):

$$I_{sw} = - \sum P_i \times \ln P_i \quad (5)$$

式中,  $P_i = N_i / N$ ,  $N_i$  指样方中第  $i$  种物种的个体数, 并且

$$\sum N_i = N.$$

Pielou 均匀度指数( $J$ ):

$$J = (- \sum P_i \times \ln P_i) / \ln S \quad (6)$$

### 3 结果与分析

#### 3.1 紫花苜蓿草地的退化过程与群落演替

表 3 列出了 6 个演替阶段种重要值(IV)排序的前 5 种植物的种群密度、相对测度与 IV 的计算值. 由表 3 可以看出, 随着紫花苜蓿生长年限的延长, 紫花苜蓿在群落中的优势度呈先增加后降低的变化趋势, 在 4 年左右达到最高(草地生产力最高阶段), 之后紫花苜蓿种群开始衰败, 重要值开始逐渐降低, 到 10 年左右群落优势种由紫花苜蓿更替为长芒草(*Stipa bungeana*), 标志着紫花苜蓿人工草地完全演替为长芒草次生天然草地. 从相对测度值在演替过程中的动态变化来看, 受自身生物学特性等的影响, 紫花苜蓿的相对高度在演替过程中的变化相对较小, 而相对频度则基本没有变化, 因此导致紫花苜蓿 IV 值降低的原因主要在于相对盖度的显著降低. 另外, 紫花苜蓿种群密度的降低也十分显著, 对紫花苜

表 3 神木六道沟阴坡紫花苜蓿草地群落主要物种组成与群落特征

Table 3 Dominant species and community characteristics of *Medicago sativa* grassland in Liudaogou catchment in Shenmu, Shaanxi

生长年限 Year (yr)	种名 Species	密度 Density ( $\times 10^3$ ind. $\cdot$ hm $^{-2}$ )	相对高度 Relative height	相对盖度 Relative coverage	相对频度 Relative frequency	重要值 IV
1	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	117.8	9.8	80.1	12.0	102.0
	白香草木樨 <i>Melilotus albus</i>	5.00	23.2	10.0	12.0	45.2
	黄香草木樨 <i>Melilotus faccilinalis</i>	2.00	22.1	3.9	8.4	34.4
	沙打旺 <i>Astragalus adsurgens</i>	5.00	3.5	2.4	12.0	18.3
	苦菜 <i>Lectuce tatarica</i>	59.3	1.3	0.3	10.8	17.9
4	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	61.50	24.0	85.9	12.3	122.2
	茵陈蒿 <i>Artemisia capillaris</i>	269.8	8.7	9.4	12.3	30.4
	草木樨状黄芪 <i>Astragalus melilotoides</i>	4.50	12.5	1.1	8.6	22.2
	山苦荬 <i>Izeris chinensis</i>	10.50	4.6	0.4	12.3	17.4
	达乌里胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>	7.25	6.4	0.9	9.9	17.2
6	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	58.0	16.4	49.5	6.8	72.7
	草木樨状黄芪 <i>Astragalus melilotoides</i>	33.5	10.3	20.2	6.8	37.2
	山苦荬 <i>Izeris chinensis</i>	32.0	3.5	5.8	6.8	16.1
	沙茴香 <i>Ferula bungeanum</i>	4.75	9.8	2.2	2.7	14.7
	砂珍珠豆 <i>Oxytropis racemosa</i>	61.5	2.8	4.4	6.8	14.0
10	长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	165.3	18.3	47.6	10.0	75.9
	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	50.8	14.9	17.2	10.0	42.1
	达乌里胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>	96.5	3.2	18.7	10.0	31.9
	草木樨状黄芪 <i>Astragalus melilotoides</i>	21.0	12.7	5.5	9.0	27.2
	叉枝鸭葱 <i>Crepis flexuosa</i>	32.0	9.6	2.0	8.0	19.6
14	长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	197.0	13.5	45.8	11.6	70.9
	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	47.3	14.8	35.9	11.6	62.3
	草木樨状黄芪 <i>Astragalus melilotoides</i>	29.3	10.6	7.2	11.6	29.5
	远志 <i>Polygala tenuifolia</i>	6.75	7.4	3.3	11.6	22.4
	茵陈蒿 <i>Artemisia capillaris</i>	70.0	6.4	3.4	11.6	21.4
30	长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	261.8	8.0	59.7	11.2	78.9
	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	34.5	13.1	27.8	11.2	52.2
	茵陈蒿 <i>Artemisia capillaris</i>	195.3	7.9	5.1	11.2	24.2
	硬质早熟禾 <i>Poa sphondylodes</i>	11.3	15.4	0.8	6.7	22.9
	草木樨状黄芪 <i>Astragalus melilotoides</i>	14.3	10.1	1.9	10.1	22.1

覆盖度具有直接影响。随着生长时间的延长,由于紫花苜蓿不能进行自我繁殖更新,其种群密度由最初的  $1.178 \times 10^5$  丛· $\text{hm}^{-2}$  (1年)降至  $3.45 \times 10^4$  丛· $\text{hm}^{-2}$  (30年),降低了 70.7%。长芒草种群密度的动态变化则呈现出增加趋势,由 1 年的 500 丛· $\text{hm}^{-2}$  增加到 30 年的  $2.618 \times 10^5$  丛· $\text{hm}^{-2}$ ,增加了 523.6 倍。在 6 年左右,紫花苜蓿与长芒草的种群密度基本持平,均为  $6.0 \times 10^4$  丛· $\text{hm}^{-2}$  左右。很显然,长芒草与紫花苜蓿具有相互消长的种群动态关系(图 1),表明长芒草对紫花苜蓿群落具有很强的侵入能力,随着时间的延长逐渐替代紫花苜蓿成为群落的优势种,经过 6~10 年即可形成代表该地区顶极群落的长芒草优势种群,以后随着演替时间的进一步延长逐渐形成长芒草优势群落,与侯扶江等<sup>[6]</sup>的观点相一致。根据上述群落优势种的更替过程,可以将紫花苜蓿草地的演替过程划分为 3 个明显的阶段:紫花苜蓿草地阶段(1~6 年)、人工草地向天然草地演替的过渡阶段(6~10 年)与长芒草草地阶段(10 年以上)。第一个阶段为人工草地利用价值较高的阶段,对草地的管理也主要集中在这个阶段。随着紫花苜蓿生长年限的延长,由于受土壤水分状况逐渐变差、苜蓿新枝萌生能力不断降低以及天然杂草的入侵等多种因素的影响,人工草地退化以后再进行复壮的难度一般比较大。

对弃耕地植被的调查结果表明,新弃耕地首先出现猪毛菜(*Salsola collina*)、苦菜(*Lectuce tatarica*)、田旋花(*Convolvulus arvensis*)等为主要成分的先锋群落,经过 3 年时间演替为苦菜或草木樨状黄芪等单优草地群落,在 10 年左右演替为“达乌里胡枝子-长芒草+草木樨状黄芪”群落,之后逐渐向顶极群落——长芒草草地阶段演替。而对人工草地的调查结果则表明,紫花苜蓿草地向长芒草群落的演替一般不经过以猪毛菜等为主要优势种的先锋群落阶段和以达乌里胡枝子、草木樨状黄芪等为优势种的中间过渡群落阶段,而是经过 6~10 年的时间直接向顶极群落阶段演替。相关研究结果也表明,在飞播或者人工种植的沙打旺(*Astragalus adsurgens*)人工草地上植被演替过程也具有相似的变化规律<sup>[13, 14, 28]</sup>。由此可见,在黄土高原北部半干旱气候区种植人工草地可以在一定程度上加快植被的自然演替进程。旱生演替序列中(次生演替)的先锋植物一般为阳性较强的植物<sup>[15]</sup>,出现于弃耕地或裸地上,而紫花苜蓿由于生长初期覆盖度高,抑制了先锋植物群落的发展,因此人工草地群落演替序列中不

会出现弃耕地演替序列中的先锋群落阶段。人工草地加快群落自然演替进程的原因可能主要在于人工草地对土壤水分状况的改变。研究表明,多年生豆科牧草的根系主要分布在深层,而人工草地生物量与群落密度远远高于天然草地,因此人工草地的水分消耗十分强烈,从而导致了土壤水分的严重亏缺<sup>[5, 7, 30]</sup>,进一步引起人工草地的自然衰退。与此同时,根系分布相对较浅、耐旱性又相对较强的禾本科天然牧草——长芒草等植物开始迅速繁育并逐渐取代紫花苜蓿成为草地群落的优势种。而自然演替条件下处于先锋群落与顶极群落之间的过渡群落类型,如当地常见的草木樨状黄芪群落、达乌里胡枝子群落等在紫花苜蓿草地演替序列中均没有出现,其原因主要在于这些物种也具有深根性、耗水多等与紫花苜蓿相对接近的生物学特性,对于水分条件已经严重旱化的退化紫花苜蓿人工草地,长芒草表现出更强的竞争优势。因此,人工草地退化以后不经过次生演替序列中的先锋群落与演替(过渡)群落阶段,而直演替进入顶极群落阶段,演替进程相对加快,并逐渐形成次生硬梁天然草地<sup>[23]</sup>。

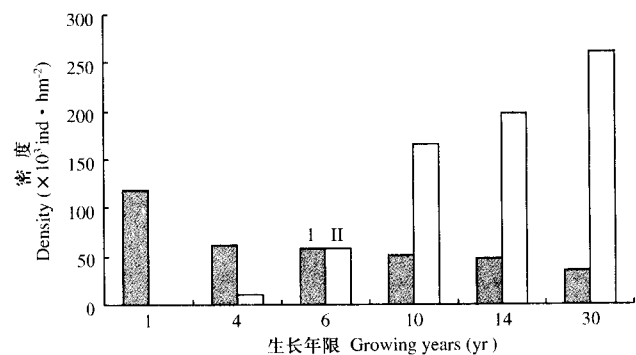


图 1 不同生长年限紫花苜蓿人工草地紫花苜蓿(I)与长芒草(II)种群密度的动态变化

Fig. 1 Dynamics of group densities of *Medicago sativa* (I) and *Sipa bugeana* (II) in alfalfa artificial grassland with different growing ages.

### 3.2 不同演替阶段群落的物种构成

统计结果表明,不同生长年限(1~30年)紫花苜蓿草地调查样方内共出现高等植物 32 种(含 4 个栽培种:紫花苜蓿、沙打旺、黄香草木樨与白香草木樨),分属于 13 科 28 属,其中豆科 6 属 9 种、菊科 6 属 7 种、禾本科 5 属 5 种、三大科合计 17 属 21 种,分别占属种总数的 60.7% 与 65.6%,说明三大科植物在紫花苜蓿草地自然演替过程中占据着重要地位。其余各科除了藜科为 2 属 2 种外均为单属单种,如百合科、唇形科、大戟科、蒺藜科、萝藦科、伞形科、旋花科、远志科和紫草科等 9 个科。该区域内植物物种构成是多数种属于少数科,少数种属于多

数的科,多数的种属于单属种,反映了西北干旱荒漠区的植物区系特征<sup>[3]</sup>.

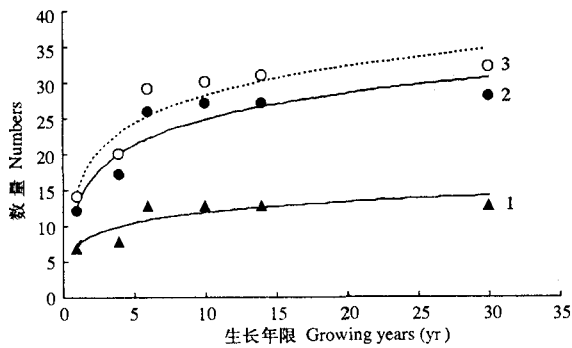


图2 紫花苜蓿草地退化演替过程中植物科属种数量的动态变化  
Fig.2 Dynamics of accumulated numbers of family, genus and species during degraded succession process of *Medicago sativa* grassland.  
1)种 Species;2)属 Genus;3)科 Families.

对不同生长年限群落物种构成的统计结果表明,随着紫花苜蓿生长年限的延长,样方中累计出现的植物科属种的数量表现为典型的对数函数变化特征(图2):

$$F = 2.0731 \ln(t) + 7.1861$$

$$n = 6, R = 0.8488^{**} \quad (7)$$

$$G = 5.2228 \ln(t) + 12.805$$

$$n = 6, R = 0.9154^{**} \quad (8)$$

$$S = 5.8247 \ln(x) + 14.816$$

$$n = 6, R = 0.9344^{**} \quad (9)$$

式中,  $F$ 、 $G$  与  $S$  依次为样方中累计出现的高等植物科、属、种的数目,  $t$  为植被恢复演替时间(1~30年), 回归方程的相关系数  $R$  均达到极显著水平( $\alpha = 0.01$ ). 由方程(7)~(9)可以看出, 种与属的变化趋势较为接近, 这与样方中单属种较多有关. 回归方程与图2均表明, 样方中科属种的变化过程具有两个明显的阶段, 即在6年以前增加速度较快, 之后则明显变缓. 前一阶段出现的高等植物合计为13科26属29种, 分别占物种总数的100%、92.9%与90.6%, 表明紫花苜蓿草地退化过程中群落外来物种的侵入过程在6年左右基本上完成, 以后则主要是种群数量的发育与优势度的变化. 这意味着对紫花苜蓿草地管理的关键期也主要在播种之后的6年之内. 如果在这一时期内能够采取一些有效措施控制或延缓天然杂草对紫花苜蓿人工群落的侵入速度, 就能够适当延长人工草地的使用寿命. 群众通过中耕除草的方法可以使草地寿命延长2~3年. 施用氮磷等化肥也可以有效地延长苜蓿旺盛生长期的时间<sup>[10]</sup>, 因为施肥改善了土壤营养条件, 增强了紫花

苜蓿的种间竞争能力.

### 3.3 不同演替阶段植物多样性的变化

植物多样性与群落稳定性密切相关<sup>[1,9,19]</sup>. 由图3可以看出, 物种丰富度指数无论是以样方面积(A)为基数的 Gleason 指数, 还是以调查群落中出现的高等植物个体总数(N)为基数 Margalef 指数, 均具有完全一致的变化规律, 即在演替初期略有降低, 然后开始升高, 在6年左右达到最高, 然后又开始降低, 在10年以后基本上趋于稳定. 演替初期物种丰富度指数的降低与紫花苜蓿群落中混播的其它牧草种(黄香草木樨与白香草木樨)的迅速衰退有关. 多样性指数(Shannon-Wiener 指数)以及 Pielou 均匀度指数变化特征基本一致, 即在群落演替前期快速增加, 在6年左右达到最高, 然后降低并逐步趋于稳定. 在紫花苜蓿人工草地退化过程中, 物种多样性与均匀度基本上呈现为单峰曲线变化特征, 在演替前期(1~6年)增加较快, 以后逐渐降低并渐趋稳定.

由表3可以看出, 6~10年为紫花苜蓿人工草地群落向长芒草天然草地群落演替的过渡时期. 在这一阶段, 人工草地的优势植物紫花苜蓿逐渐被天然丛生禾草长芒草所取代. 这标志着人工草地完全退化为次生天然草地. 在该演替过程的初期, 一些种子易于传播的天然植物, 如茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)、山苦荬(*Ixeris chinensis*)等首先侵入紫花苜蓿群落, 残留的农田杂草如苦菜(*Lectuce tatarica*)、小山蒜(*Albium pallasii*)等因疏于管理而大量繁殖. 2年以后大量天然植物种如达乌里胡枝子、草木樨状黄芪、长芒草等也相继侵入, 群落内种的多样性以及群落密度迅速增加, 种间竞争加剧, 紫花苜蓿的优势地位被动摇, 优势种与伴生种的优势度差异逐渐降低, 而群落的均匀度则有所增加. 6~10年是紫花苜蓿向长芒草演替的过渡时期, 也是群落内种间竞争最为激烈的时期, 由于种的生态适应性、个体繁殖能力等原因, 紫花苜蓿逐渐衰退, 而长芒草优势度明显升高(图1). 伴随着群落优势种的替代过程, 群落内伴生种也发生着相应的变化, 茵陈蒿、早熟禾(*Poa* spp.)等耐旱性较强的物种优势度不断增强, 成为主要的伴生植物, 而草木樨状黄芪、达乌里胡枝子等的优势度则有所降低, 群落构成逐渐趋于稳定, 形成长芒草次生草原群落景观. 由于经过了前一阶段种群间的激烈竞争, 部分物种被淘汰, 群落优势种逐渐向少数物种集中, 从而导致了物种多样性与均匀度的降低.

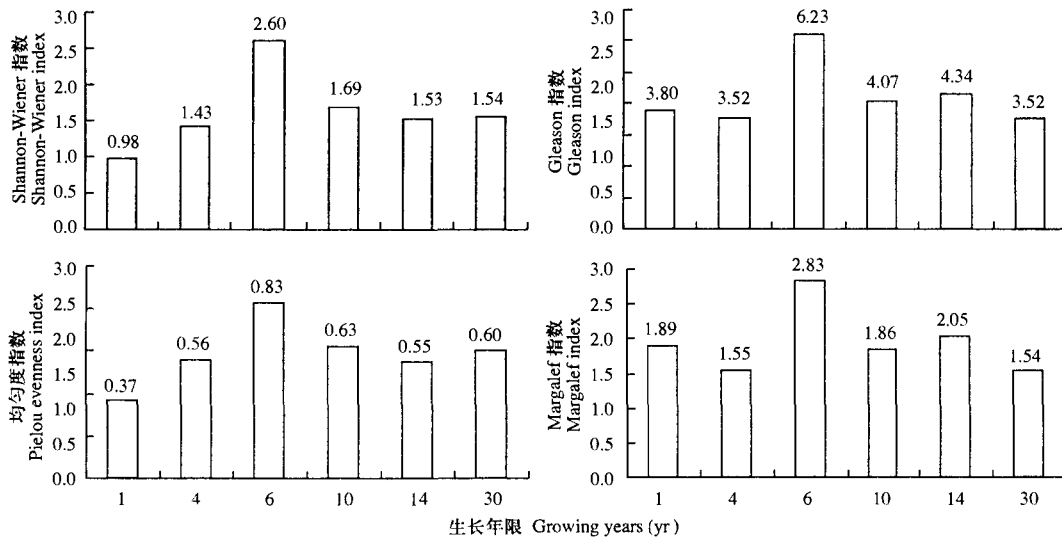


图3 不同生长年限紫花苜蓿草地植物多样性指数的动态变化

Fig. 3 Dynamics of plant diversity index of *Medicago sativa* grassland for different growing ages.

研究表明,紫花苜蓿草地退化过程中,植物多样性与均匀度均表现出先增加后降低的变化趋势,高峰阶段出现在紫花苜蓿群落向长芒草群落演替的过渡阶段,在顶极群落阶段植物多样性与均匀度均比前一阶段有所降低,这与黄土高原其它地区植被演替过程中植物多样性变化的规律相一致<sup>[11,12,29]</sup>。尽管稳定群落的多样性并不是演替过程中的最高阶段,但是物种多样性却是群落稳定性的重要基础<sup>[9,20]</sup>。紫花苜蓿人工草地是单一外来物种构成的人工群落,从群落学角度来讲本身就存在着不稳定性的内在因素,因此紫花苜蓿人工草地的退化具有必然性,土壤的旱化以及乡土草种的入侵加速了紫花苜蓿人工草地的退化过程。

#### 4 讨 论

在黄土高原北部森林草原气候区,根据群落优势种与植物多样性的变化,紫花苜蓿人工草地的退化演替过程可以划分为3个明显的阶段:紫花苜蓿草地阶段(1~6年)、人工草地向天然草地演替的过渡阶段(6~10年)与长芒草次生天然草地阶段(10年以上)。

在紫花苜蓿人工草地退化演替过程中,植物多样性与均匀度指数呈现出一致的变化规律,在演替前期(第一个阶段)增加较快,在第二个阶段(过渡阶段)达到最高,然后有所降低并渐趋稳定。

紫花苜蓿人工草地退化演替过程中,调查样方内共出现高等植物32种,分属于13科28属,其中豆科、菊科、禾本科三大科合计17属21种,分别占

到总数的60.7%与65.6%,表明三大科植物在紫花苜蓿草地退化演替过程中居于重要地位。在紫花苜蓿草地植被演替过程中,样方中累积出现的植物科属种数随时间的变化可以用对数函数进行较好地描述: $y = a \ln(t) + b$ ,在演替前期物种增加较快,90%以上的科属种出现在前6年,表明防止人工草地退化的关键期在前6年之内,如果在这一时期内能够采取一些有效措施控制或延缓天然杂草的入侵,就能够有效延长人工草地的使用寿命。

种植紫花苜蓿可以显著加快植被的自然演替进程,紫花苜蓿人工草地大约经过6~10年左右的时间即可以演替到以长芒草为优势种群的天然次生草原植被。由于人工草地群落组成单一,植物多样性低,群落稳定性差,因此人工草地本身就存在着自然衰退的潜在因素,加之草地生长过程中对土壤水分消耗强烈以及乡土草种的入侵,从而加速了紫花苜蓿人工草地的退化过程。如果能在草地生长的前期(1~6年)采取适当措施进行科学管理,如降低种群密度、人工施肥、及时清除杂草等,也可以在一定程度上延长人工草地的使用寿命。种植人工草地的主要目的在于发展畜牧业,而以退耕还林还草为主要内容的西部生态环境建设的目的则主要在于保护生态环境,人工草地自身的水土保持作用及其加速天然植被恢复的作用将农民的经济利益与国家的生态环境建设需求有机结合。这既可以在一定程度上弥补农民因退耕带来的经济损失、提高他们支持国家生态环境建设的积极性,也可以在一定程度上减轻国家经济补偿的负担<sup>[8]</sup>。因此,种植人工草地是黄

土高原北部加速天然植被恢复与发展畜牧业、增加农民收入的有机结合点,是西部生态环境建设中生态效益与经济效益兼顾的良好范式。

致谢 承蒙西北农林科技大学吴振海教授鉴定部分植物标本。

#### 参考文献

- Baskin YE. 1995. Ecosystem function of biodiversity. *Biol Sci*, **44**: 657~660
- Cheng J-M(程积民), Wan H-E(万惠娥). 2003. The Vegetation Constructions and Soil and Water Conservation in the Loess Plateau of China. Beijing: China Forestry Press. 275~304 (in Chinese)
- Dang R-L(党荣理), Pan X-L(潘晓玲), Gu X-F(顾雪峰). 2002. Floristic analysis of spermatophyte genera in the arid deserts area in North-west China. *Guihaia* (广西植物研究), **22**(2): 121~128 (in Chinese)
- Dong M(董 鸣). 1997. Survey, Observation and Analysis of Terrestrial Biodiversities. Beijing: China Standards Press. 3~23 (in Chinese)
- Guan X-Q(关秀琦), Zou H-Y(邹厚远), Lu Z-Y(鲁子瑜), et al. 1994. Study on the sustainable development of grassland production in Loess Plateau I. Grass varieties alternation in the declined artificial grassland of *Astragalus adsurgens*. *Res Soil Water Cons* (水土保持研究), **1**(3): 56~60 (in Chinese)
- Hou F-J(侯扶江), Xiao J-Y(肖金玉), Nan Z-B(南志标). 2002. Eco-restoration of abandoned farmland in the Loess Plateau. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **13**(8): 923~929 (in Chinese)
- Hu L-J(胡良军), Shao M-A(邵明安). 2002. Review on water eco-environment in vegetation restoration in Loess Plateau. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **13**(8): 1045~1048 (in Chinese)
- Huang F-X(黄富祥), Kang M-Y(康慕谊), Zhang X-S(张新时). 2002. The economic compensation strategy in the process of turning cultivated land back into forests and grasslands (TCFG). *Acta Ecol Sin* (生态学报), **22**(4): 471~478 (in Chinese)
- Lehman CL, Tilman D. 2000. Biodiversity, stability, and productivity in competitive communities. *The Amer Nat*, **156**: 534~542
- Li Y-S(李玉山). 2002. Productivity dynamics of alfalfa and its effects on water eco-environment. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), **39**(3): 404~411 (in Chinese)
- Li Y-Y(李裕元), Shao M-A(邵明安). 2003. Natural succession and evolution of structural characteristics of forest community in Zi-wuling area on the Loess Plateau. *Acta Bot Boreal-Occident Sin* (西北植物学报), **23**(5): 693~699 (in Chinese)
- Li Y-Y(李裕元), Shao M-A(邵明安). 2004. The change of plant diversity during natural recovery process of vegetation in Zi-wuling area. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **24**(2): 252~260 (in Chinese)
- Liang Y-M(梁一民), Li D-Q(李代琼), Cong X-H(丛心海). 1990. Study on the characteristics soil water and productivity of *Astragalus adsurgens* grassland in Wuqi county, Shaanxi Province. *Bull Soil Water Cons* (水土保持通报), **10**(6): 113~118 (in Chinese)
- Liang Y-M(梁一民). 2003. Vegetation Construction on the Loess Plateau. Zhengzhou: Yellow River Water Conservation Press. 86~93 (in Chinese)
- Qu Z-X(曲仲湘), Wu Y-S(吴玉树), Wang H-X(王焕校), et al. 1983. Plant Ecology. 2nd edition. Beijing: Higher Education Press. 118~129 (in Chinese)
- Su Y-Z(苏水中), Zhao H-L(赵哈林). 2003. Effects of land use and management on soil quality of Herqin sandy land. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **14**(10): 1681~1686 (in Chinese)
- Tang HP, Zhang XS. 2003. Establishment of optimized eco-productive paradigm in the farming-pastoral zone of northern China. *Acta Bot Sin*, **45**(10): 1166~1173
- Tang K-L(唐克丽), Hou Q-C(侯庆春), Wang B-K(王斌科), et al. 1993. The environment background and administration way of wind-water erosion crisscross region and Shenmu experimental area on the Less Plateau. *Memoir NISWC, Acad Sin Minist Water Resour* (中国科学院-水利部西北水土保持研究所集刊), **18**: 2~15 (in Chinese)
- Tilman D, Doering JA. 1994. Biodiversity and stability in grasslands. *Nature*, **367**: 363~365
- Wang G-H(王国宏). 2002. Further thoughts on diversity and stability in ecosystems. *Biodiv Sci* (生物多样性), **10**(1): 126~134 (in Chinese)
- Wang GH, Zhang XS. 2003. Supporting of potential forage production to the herbivore-based pastoral farming industry on the Loess Plateau. *Acta Bot Sin*, **45**(10): 1186~1194
- Zhang J-T(张金屯). 1995. Method of Quantitative Plant Ecology. Beijing: China Science and Technology Press. (in Chinese)
- Zhang X-S(张新时). 1994. Principles and optimal models for development of Maowusu sandy grassland. *Acta Phytocool Sin* (植物生态学报), **18**(1): 1~16 (in Chinese)
- Zhang X-S(张新时). 2000. Eco-economic functions of the grassland and its patterns. *Sci Technol Review* (科技导报), (8): 3~7 (in Chinese)
- Zheng F-L(郑粉莉). 1996. Impact of vegetation destruction and restoration on soil evolution in Ziwu Mountain forest area. *Bull Soil Water Cons* (水土保持通报), **16**(5): 41~44 (in Chinese)
- Zhu X-M(朱显谟). 1999. Rapid and overall recovery of vegetation cover is the foundation of eliminating river disasters. *Soil Water Cons China* (中国水土保持), (10): 29~31 (in Chinese)
- Zhu Z-C(朱志诚), Yue M(岳 明). 2001. Features of grassland zones in the Qingling Mountains and its northern Loess Plateau. *Grassl China* (中国草地), **23**(3): 58~63 (in Chinese)
- Zou H-Y(邹厚远), Cheng J-M(程积民), Zhou L(周 麟). 1998. Natural recovery succession and regulation of the prairie vegetation on the Loess Plateau. *Res Soil Water Cons* (水土保持研究), **5**(1): 126~138 (in Chinese)
- Zou H-Y(邹厚远), Guan X-Q(关秀琦), Han R-L(韩蕊莲), et al. 1995. The probe of ecological basis of vegetation-renewing in Loess Plateau. *J Soil Water Cons* (水土保持学报), **2**(4): 1~4 (in Chinese)
- Zou H-Y(邹厚远), Lu Z-Y(鲁子瑜), Liu K-J(刘克俭), et al. 1991. Effect of *Astragalus adsurgens* population in soil moisture and its adjustment. *Chin J Ecol* (生态学杂志), **10**(3): 15~17 (in Chinese)

作者简介 李裕元,男,1965年生,博士,副研究员.主要从事土壤学与环境生态学研究,发表论文30余篇. Tel: 010-64879749; E-mail: liyy@igsrr.ac.cn.