

陕北黄土高原丘陵区撂荒演替及其过程中 主要乡土牧草的确定与评价

唐 龙, 梁宗锁*, 杜 峰, 郝文芳

(中国科学院 水利部水土保持研究所, 西北农林科技大学生命学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:用系统聚类、撂荒年限两种方法对陕北黄土高原丘陵区撂荒演替序列进行分析, 结果基本一致: 1~6a, 1 年生杂草类群落 → 1 年生杂草类 + 丛生禾草群落 → 1 年生杂草类 + 根茎禾草群落或多年生草本群落 → 7~16a, 多年生草本群落 → 多年生草本 + 小灌木群落 → 17~42a: 根茎丛生型禾草 + 小灌木群落或小灌木 + 多年生草本群落 → 小灌木群落或多年生草本 + 丛生禾草群落, 代表性群落依次为猪毛蒿 (*Artemisia scoparia* Waldstet. et kit) 群落或猪毛蒿 + 长芒草 (*Stipa bungeana* Trin.) 群落 → 猪毛蒿 + 铁杆蒿 (*Artemisia sacrorum* Ledeb.) 群落或冰草 (*Agropyron cristatum* (L.) Gaertn) 群落 → 铁杆蒿群落 → 铁杆蒿 + 达乌里胡枝子 (*Lespedeza* var. *dahurica* (Laxm.) Schindl) 群落 → 白羊草 (*Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng) + 达乌里胡枝子群落或达乌里胡枝子 + 铁杆蒿群落或铁杆蒿 + 硬质早熟禾 (*Poa sphondylodes* Trin. et Bge) 群落。在此基础之上, 提出将各物种在演替过程中重要值之和按大小排序, 对前 35 位草种经适口性试验初步筛选后进行以粗蛋白、粗纤维等为指标的化学成分及以有效植被盖度为指标的生态效益的分析、评价, 并依据两种评价结果对陕北黄土高原主要乡土牧草进行了综合评定, 得出黄土高原 23 种乡土牧草具备较高的改良潜质, 分为 4 类, 主要归属于豆科 (Leguminosae)、禾本科 (Gramineae)、菊科 (Compositae) 等, 并进一步探讨了黄土高原人工草场改良过程中不同荒地上草种的合理搭配。

关键词:黄土高原; 撂荒演替; 乡土牧草; 营养成分; 有效植被盖度

文章编号:1000-0933(2006)04-1165-11 **中图分类号:**X53 **文献标识码:**A

Vegetation succession of arable old land after being abandoned in Loess Plateau hilly region & ascertaining dominant native herbages in the process, analyzing their chemical nutrient composition

TANG Long, LIANG Zong-Suo*, DU Feng, HAO Wen-Fang (College of Life Science, Northwest Sic-Tech University of Agriculture and Forestry; Institute Water and soil Conversation, Shanxi, Yangling, 712100, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 1165 ~ 1175.

Abstract: A 2-year experiment was carried out in the Loess Plateau to better understand vegetation succession of arable old land after being abandoned in Loess hilly region. Based on 2 kinds of ways, one was quantitative classification using system clustering, the other was abandoned year. Again with the overall understood of 25 sample plots research, the result showed that: from 1 to 6 years, annual weeds community → annual weeds + tuft grass community → annual weeds + perennial herbage community or rhizome grass → from 7 to 16 years, perennial herbage community → perennial grass + undershrub community → from 17 to 42 years, rhizome tuft grass + undershrub community or undershrub + perennial grass community → undershrub community or perennial grass + tuft grass community. The representative communities were: *Artemisia scoparia* Waldstet. et kit community or

基金项目:国家自然科学基金西部生态建设计划资助项目(90302005); 中国科学院知识创新基金资助项目(KZCX01-06-2-4)

收稿日期:2005-01-30; **修订日期:**2005-09-10

作者简介:唐龙(1976~), 男, 陕西人, 博士生, 主要从事干旱地区植物生理生态及生物入侵生态学研究。

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: Liangzs@ms.iswc.ac.cn

Foundation item: The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 90302005) and Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of sciences (No. KZCX01-06-2-4)

Received date: 2005-01-30; **Accepted date:** 2005-09-10

Biography: TANG Long, Ph.D. candidate, mainly engaged in botanical physiological ecology in the arid zone and ecology of biological innovation.

A. scoparia Waldstet. et kit + *Stipa bungeana* Trin. community → *A. scoparia* Waldstet. et kit + *Artemisia sacrorum* Ledeb. community (or *Agropyron cristatum* (L.) Gaertn community) → *Artemisia sacrorum* Ledeb. community → *A. sacrorum* Ledeb. + *Lespedeza* var. *dahurica* (Laxm.) Schindl community → *Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng + *Artemisia sacrorum* Ledeb. community Or *Lespedeza* var. *dahurica* (Laxm.) Schindl + *Artemisia sacrorum* Ledeb. community or *Artemisia sacrorum* Ledeb. + *Poa sphondylodes* Trin. et Bge community.

In order to restore the degraded environment in the arid zone, it was important to know how to collocate kinds of pastures with wild grasses. There is a new way: first, based on the result of the investigation into succession, all kinds of wild grasses were arranged in order of their important values, 1 ~ 35th herbage was warranted that being able to yield more quantity production than from 36 to the last grass according with the model of important value, this character was the most important not only for the ecological benefit but also for the economic effectiveness; second, according as the result of palatability experiment, 23 kinds of pastures were selected from the 1 ~ 35th grasses to be analyzed their chemical nutrient composition, then, they were graded excellent, fine, good and inferior by the score that gained appraisal by chemical nutrient composition in accordance with the pasture's quality standard; third, these kinds of pasture community's ecological benefit was analyzed, then, they were graded excellent, fine, good and inferior too; ultimately, over efficacy of 23 kinds of herbage community was ascertained.

To summarize: 23 kinds of pastures were classified into 3 groups according to their site quality of locality in the community in the succession process. One was constructive or dominant species in the period of succession process, but in the other times there were not these herbages, such as *Sophora vicifolia* Hance, *Phragmites communis* Trin; Two was subdominant or companion species in the whole period of succession process, such as *Gueldenstaedtia multiflora* Bunge, *Potentilla bifurca* L.; Three was those grasses that transform their site quality of locality in the community in the succession process from constructive or dominant species into subdominant or companion species, or reverse, for example *Lespedeza* var. *dahurica* (Laxm.) Schindl, *Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng. Besides, chemical nutrient compositions of these pastures have shown much variation, so, we should be attach importance to this phenomenon. When these conclusions being have applied, it appears important to repair vegetation based on the community structure in the succession process of different abandoned lands, the different pastures that should have overwhelming chemical nutrient composition will be selected from the grasses in the corresponding nature communities.

Key words: Loess Plateau; succession; native herbage plant; nutrient composition; effective coverage

演替是合理经营、利用自然资源的理论基础之一,研究演替有助于人们对自然、人工生态系统进行有效地控制、管理,并指导退化生态系统恢复和重建^[1-6],Odum 认为“生态演替的原理同人与自然之间的关系密切相关,是解决当代人类环境危机的基础”^[7]。撂荒演替作为植被次生演替的一个重要类型,许多学者都对此进行过探索^[8-12]。研究生态脆弱、生境复杂的陕北黄土丘陵区的撂荒演替,在此基础上对演替过程中产草量大的草种进行适口性试验,确定主要的乡土牧草,并对其营养成分及生态效益比较、评价后综合排序,从而筛选出改良潜质高的草种,以期为该地区植被恢复过程中牧草选育、草种合理搭配提供理论基础,从而加快因气候、立地条件、植物繁殖体来源等问题而制约的植被自然恢复的进程^[13-19]。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地区概况

延安市安塞县高桥试验区地处黄土高原丘陵沟壑区,属中温带半干旱大陆性季风气候,多年平均气温 8.8℃,≥0℃的活动积温 3824.1℃,≥10℃有效积温 3524.1℃;年平均日照时数 2397.3h,总辐射量 117.74 × 4.18J·cm⁻²;多年平均降雨量 513mm,年际变化较大,多集中在 7、8、9 三个月,占全年降雨量 60%;土壤类型主要为黄绵土,质地为轻壤。区内水土流失严重,生境恶化,自然灾害频繁。植被类型主要为人工林和天然草地,覆盖程度较低。

1.2 研究方法

1.2.1 群落调查 在野外调查与当地居民访问结果的基础上,根据植物群落组成、结构选定不同撂荒年限样

地共 25 块。其中 1~19 号样地位于高桥乡朱塌山;19~25 号样地位于老半山,山下有较大面积的次生刺槐 (*Robinia pseudoacacia* L.) 林;山顶的中心地理位置分别为: E 36°40.479、N109°13.071 和 E 36°41.064、N109°14.034;各样地土壤(0~40cm 土层)养分基本一致,速效磷、速效钾、全氮、有机质及碳酸钙(CaCO₃)含量范围分别为:1.270~1.440mg/kg、61.050~59.950mg/kg、0.045%~0.072%、0.030%~1.200%及 12.065%~14.125%。试验在 2003、2004 年 7~9 月进行,每月取 3 个典型样方(1m×1m),各样地共 18 个样方,记载样方内各种植物名称、高度、盖度和地上生物量。

表 1 样地概况

Table 1 Distribution district of sample plot

样地 Sample plot	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
坡向 Aspect	阳	阳	阳	阳	半阳	山顶	阳	半阳	阳	半阳	阳	半阳	半阳
坡度 Slope(α/°)	17°	25°	30°	25°	23°	3°	3°	10°	4°	10°	5°	17°	12°
海拔 Altitude(m)	1190	1240	1250	1260	1280	1290	1290	1270	1190	1240	1190	1240	1270
撂荒年限 Abandonment time(a)	5	8	12	17	7	4	30	25	14	3	3	4	20
样地 Sample plot	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
坡向 Aspect	阳	阴	半阴	半阴	阳	阴	阴	阴	半阴	阴	半阳	阳	
坡度 Slope(α/°)	17°	4°	25°	5°	7°	12°	4°	4°	7°	10°	9°	13°	
海拔 Altitude(m)	1270	1280	1300	1300	1280	1150	1160	1240	1220	1205	1270	1210	
撂荒年限 Abandonment time(a)	5	8	27	5	19	16	33	2	4	40	4	3	

1.2.2 牧草的化学成分评价 在群落调查的基础之上,将各物种在各样地的重要值相加并按大小排序,前 35 种植物进行适口性评价实验,按取食价评定方法中适口性评价初步排序,并将其中“丙”级以上的牧草进行化学成分分析,分别用凯氏定氮、索氏提取、重量、灰化、原子吸收、比色等方法测量各牧草粗蛋白、粗纤维、粗脂肪、粗灰分、钙、磷含量,后依据牧草化学成分等级法分级^[20],精确排序。

1.2.3 牧草的生态效益评价 以第 2 步试验中适口性评价结果为基础,对其中“丙”级以上的牧草进行生态效益评价,方法为:以有效盖度为指标,据焦菊英等^[21]提出的黄土高原草地有效盖度计算方法即不同坡度、降雨强度及时间条件下草地水土保持临界有效盖度对照表与牧草群落生长旺盛期平均盖度进行比对从而确定各牧草群落的生态效益。

1.2.4 综合评定及最终排序 依据化学成分与生态效益评价的结果采用加权系数再次评价,精确排序。

1.2.5 数据处理 群落中种群大小采用自然高度、盖度和地上生物量综合计算,用相对重要值表示。计算公式如下:

相对重要值 = 相对盖度 + 相对生物量 + 相对高度

式中,相对高度、相对盖度和相对生物量分别为各草种的高度、盖度和生物量与群落中所有种的高度、盖度和生物量之和的百分比值。以撂荒年限划分演替阶序列数据处理方法为:将各样地 18 个样方中各物种的相对重要值平均后作为该样地物种的标准相对重要值,按照大小排序,然后比较不同样地的标准值,相差小于各自值 10% 的物种视为等同,如果排序前 13 的物种均被视为等同,即可认为群落建群种、优势种差异较小,群落类型相同,将此类群落所处的样地归为一类,并将此类样地中的各物种标准相对重要值平均作为其最终相对重要值。

系统聚类分析法划分演替序列数据处理方法为:以群落内各物种的相对重要值为数量指标,用系统聚类对各样地上的群落进行分类和排序,从而划分演替阶段。该过程首先计算样地间的 Bray-Curtis 距离系数,然后进行类平均法系统聚类,截取值的选取以划分到同一群丛为原则。

Bray-Curtis 距离系数计算式为:

$$D_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^p |x_{ij} - x_{ik}|}{\sum_{i=1}^p (x_{ij} + x_{ik})}$$

式中, $i = 1, 2, \dots, P$ 种数; $j = 1, 2, \dots, N$ 样方数。

牧草化学成分评价利用公式: $V = \text{粗蛋白} \times \text{粗纤维} \times \text{粗脂肪} \times \text{无氮浸出物} \times \text{钙} \times \text{磷等级数}$ 。

牧草综合评定利用公式: $E = 0.50 \times \text{化学成分分级} + 0.50 \times \text{有效盖度分级}$

其中两种评价的分级数值分别为: 甲、乙、丙及劣等依次为 5、4、3 及 2。

数据处理过程中涉及 SAS8.1 数据处理系统^[22]、EXCEL 表格软件和 MATLAB6.5.1 作图系统。

2 结果与分析

2.1 演替序列

调查表明, 弃耕农田经过 40a 左右的演替发展, 群落类型从起始的先锋草种群落到后期的草本或小灌木群落共出现植物 67 种, 其中归属于豆科 (Leguminosae)、禾本科 (Gramineae)、菊科 (Compositae)、蔷薇科 (Rosaceae) 物种占全部种数的 60.0% 以上, 表明该 4 种植物在研究地区撂荒演替过程中作用最大^[23], 且在此地区植物区系中地位重要^[24], 此结论与邵明安等人研究陕北富县子午岭地区撂荒演替的结果一致^[25]。

2.1.1 以撂荒年限划分演替阶序列 表 1 可得出以下明确结论: 陕北黄土丘陵区撂荒演替中的 25 个样地的群落特征可分为 3 个大类, 一类为撂荒年限为 5a 及以下的样地, 其中主要为 1 年生植物和杂草类, 如猪毛蒿 (*Artemisia scoparia* Waldstet. et kit)、狗尾草 (*Setaria viridis* (L.) Beauv.)、苣荬菜 (*Sonchus arvensis* L.)、苦苣菜 (*Sonchus oleraceus* L.) 等, 次要种为刺儿菜 (*Cephalanoplos Segetum* (Bunge) Kitam)、二列菱陵菜 (*Potentilla bifurca* L.)、山苦卖 (*Ixeris chinensis* (Thunb.) Nakai)、田旋花 (*Convolvulus arvensis* L.)、香青兰 (*Dracocephalum moldavica* L.)、阿尔泰狗娃花 (*Heteropappus altaicus* (Wild.) Novopokr) 等, 其它隐性、伴生植物有芦苇 (*Phragmites communis* Trin.)、叉枝鸦葱 (*Scorzonera divaricata* Turcz.)、草麻黄 (*Ephedra sinica* Stapf)、灌木铁线莲 (*Clematis fruticosa* Turcz.)、山野豌豆 (*Vicia amoena* Fisch.) 和大果鹤虱 (*Cynoglossum divaricatum* Steph) 等。演替早期植物种类成分相对较少, 多年生植物不具优势, 12 个样地平均地上生物量为 110.75FWg/m²。此类样地细分为两个小类: 1、6、10、12、14、17、21、22、24 号样地一类, 主要分布猪毛蒿占绝对优势的群落, 11、25 号样地为另一类, 11 号样地为猪毛蒿 + 狗尾草群落, 25 号为铁杆蒿 (*Artemisia sacrorum* Ledeb.) + 芦苇群落, 这是由于撂荒前种植作物不同, 耕作方式相异造成的。第 2 类为撂荒 6 ~ 16a 样地: 2、3、5、9、15、19 号, 随着时间增加到第 6 年, 1 年生植物逐渐减少, 多年生植物开始占优势, 群落种类和地上生物量增加, 平均生物量达到 115.46FWg/m², 群落优势种为铁杆蒿、茼蒿 (*Artemisia giraldii* Pamp.)、达乌里胡枝子 (*Lespedeza* var. *dahurica* (Laxm.) Schindl)、白羊草 (*Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng), 次要种为阿尔泰狗娃花、白草 (*Pennisetum flaccidum* Griseb.)、米口袋 (*Gueldenstaedtia multiflora* Bunge)、狭叶米口袋 (*Gueldenstaedtia stenophylla* Bunge)、山苦卖、二色棘豆 (*Oxytropis bicolor* Bunge.)、二列菱陵菜、无芒隐子草 (*Kengia songorica* (Roshev.) Ohwi)、硬质早熟禾 (*Poa sphondylodes* Trin. et Bge) 和华隐子草 (*Cleistogenes chinensis* (Maxim.) Keng) 等, 伴生植物有茜草 (*Rubia cordifolia* L.)、祁洲漏芦 (*Rhaponticum uniflorum* (L.) DC.)、凤毛菊 (*Saussurea japonica* (Thunb.) DC.)、角蒿 (*Incarvillea sinensis* Lam.) 和牛皮消 (*Cynanchum auriculatum* Royle ex Wight) 等。群落类型包括铁杆蒿 + 茼蒿群落、达乌里胡枝子 + 铁杆蒿群落、达乌里胡枝子 + 长芒草 (*Stipa bungeana* Trin.) 群落、冰草 (*Agropyron cristatum* (L.) Gaertn) 群落和白羊草 + 达乌里胡枝子群落。第 3 类撂荒 17 ~ 40a 样地, 分为两个小类: 样地 4、7、8、13、16 号为一类, 此时, 植物种类组成开始逐渐减少, 主要为达乌里胡枝子群落、白羊草群落、达乌里胡枝子 + 铁杆蒿群落、达乌里胡枝子 + 白羊草群落和白羊草 + 达乌里胡枝子群落, 平均地上生物量为 241.01FWg/m²; 20、23 号为一类, 由于处于阴坡林间, 以铁杆蒿 + 硬质早熟禾群落和茼蒿群落为主, 平均地上生物量 295.28FWg/m²。

2.1.2 系统聚类分析法划分演替序列 从图 1 可以明确得出系统聚类分析划分演替阶段的结果: 撂荒年限为 5a 及以下, 样地 1、6、10、12、14、17、21、22、24 号和 11 号为一类, 群落建群、优势植物为 1 年生植物猪毛蒿、狗尾草、阿尔泰狗娃花, 群落 11 号为芦苇群落; 撂荒 6a 及以上, 2、3、4、6、5、6、8、9、13、15、16、18、19、23 号和 20 号样地为一类, 群落主要种为多年生植物铁杆蒿、白羊草、茼蒿和达乌里胡枝子。3、4 类划分与 2 类划分区别在于 11 号和 20 号被单独分为一类, 20 样地处于林下, 建群种为铁杆蒿和硬质早熟禾, 并出现了偶见种如大针茅

表 2 各样地群落物种重要值
Table 2 The importance value of the plant species in the all sites

物种 Species	重要值 Important value				
	撂荒年限 Abandonment time(a)				
	≤5	6~16	17~42		
	1、6、10、12、14、17、21、22、24	11、25	2、3、5、9、15、19	4、7、8、13、16	20、23
阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i> (Wild)Novopokr	4.67	7.13	3.18	2.23	1.25
艾蒿 <i>Artemisia argyi</i> Level. et Vant	0.95	—	1.17	—	0.49
白草 <i>Pennisetum flaccidum</i> Griseb.	1.63	1.12	3.47	1.31	3.17
白头翁 <i>Pulsatilla chinensis</i> (Bge.) Regel	—	—	—	—	0.13
白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i> (L.)Keng	0.52	0.20	6.63	17.60	—
冰草 <i>Agropyron cristatum</i> (L.)Gaertn	2.20	2.26	16.30	2.55	0.22
苍耳 <i>Xanthium sibiricum</i> Patrín.	0.24	0.30	—	—	—
草麻黄 <i>Ephedra sinica</i> Stapf	1.66	—	0.52	—	0.98
草木樨状黄芪 <i>Astragalus melilotoides</i> Pall.	0.14	1.07	1.43	1.66	5.40
叉枝鸦葱 <i>Scorzonera divaricata</i> Turcz.	1.05	—	—	—	—
长芒草 <i>Stipa bungeana</i> Trin.	4.35	1.65	8.93	7.35	—
常春藤叶天剑 <i>Calystegia hederacea</i> Wall	0.28	—	—	—	0.09
刺儿菜 <i>Cephalanoplos Segetum</i> (Bunge) Kitam	3.31	0.35	1.48	0.73	—
臭蒿 <i>Artemisia annua</i> L.	2.17	1.02	—	—	—
达乌里胡枝子 <i>Lespedeza</i> var. <i>dahurica</i> (Laxm.) Schindl	3.37	1.54	15.35	36.49	8.83
大果鸢虱 <i>Cynoglossum divaricatum</i> Steph	0.09	0.08	—	—	—
大针茅 <i>Stipa grandis</i> P. Smirn.	0.06	—	—	—	2.26
地锦 <i>Euphorbia humifusa</i> Willd.	0.49	1.05	0.03	—	—
点地梅 <i>Androsace umbellata</i> (Lour.) Merr.	0.07	—	—	—	—
鹅观草 <i>Roegneria kamoji</i> Ohwi	—	—	—	—	2.81
二列委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i> L.	1.84	1.89	1.23	0.40	0.81
二色棘豆 <i>Oxytropis bicolor</i> Bunge.	0.40	—	1.40	1.84	0.13
牛皮消 <i>Cynanchum auriculatum</i> Royle ex Wight	0.13	—	—	—	—
披针叶黄华 <i>Thermopsis lanceolata</i> R.Br.	—	—	0.15	0.43	—
蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i> Hand.-Mazz.	0.89	0.22	0.16	0.27	—
祁洲漏芦 <i>Rhaponticum uniflorum</i> (L.) DC.	1.50	0.34	0.30	0.27	—
狭叶米口袋 <i>Guelldenstaedtia stenophylla</i> Bunge	0.57	—	1.00	0.46	0.16
茜草 <i>Rubia cordifolia</i> L.	—	0.17	—	—	3.92
沙蓬 <i>Argiophyllum arenarium</i> Bieb.	0.62	0.68	0.37	—	0.41
山苦卖 <i>Ixeris chinensis</i> (Thunb.)Nakai	2.12	2.31	2.15	2.11	0.48
山野豌豆 <i>Vicia amoena</i> Fisch.	1.43	—	0.06	—	3.06
铁杆蒿 <i>Artemisia sacrorum</i> Ledeb.	2.98	20.18	10.30	7.85	17.09
无芒隐子草 <i>Kengia songorica</i> (Roshev.) Ohwi	0.42	1.03	1.10	1.56	—
细叶远志 <i>Polygala tenuifolia</i> Wild	—	0.09	0.32	1.00	2.02
香青兰 <i>Dracocephalum moldavica</i> L.	0.85	—	0.21	0.25	—
鸦葱 <i>Scorzonera ruprechtiana</i> Lipsch. et Krasch	—	0.05	—	—	0.15
翻白委陵菜 <i>Potentilla discolor</i> Bunge	0.11	—	—	0.26	0.89
凤毛菊 <i>Saussurea japonica</i> (Thunb.) DC.	0.07	1.00	1.21	0.09	—
狗尾草 <i>Setaria viridis</i> (L.) Beauv.	1.14	3.41	0.70	0.18	0.82
狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pars.	—	—	—	0.15	4.43
灌木铁线莲 <i>Clematis fruticosa</i> Turcz.	1.11	—	0.52	—	—
华蒲公英 <i>Taraxacum sinicum</i> Kitag.	0.91	—	—	—	—
华隐子草 <i>Cleistogenes chinensis</i> (Maxim) Keng	0.93	0.46	1.43	1.55	0.57
黄花草木樨 <i>Melilotus . officinalis</i> (L.) Ders	—	0.31	0.05	—	—
黄花蒿 <i>Artemisia annual</i> L.	0.12	—	—	—	0.29
黄芩 <i>Scutellaria baicalensis</i> Georgi	—	—	0.09	0.21	—
火绒草 <i>Leontopodium leontopodioides</i> (Willd.)Beauv	—	—	—	0.16	0.28
鸡峰黄芪 <i>Astragalus kifonsanicus</i> Ulbr.	—	—	—	0.27	—
芡蒿 <i>Artemisia giraldii</i> Pamp.	1.49	14.47	8.24	3.20	12.80
角蒿 <i>Incarvillea sinensis</i> Lam.	0.57	0.55	0.07	—	0.29

续表 2

苣荬菜 <i>Sonchus arvensis</i> L.	3.41	—	0.92	—	—
杠柳 <i>Peripicca sepium</i> Bunge.	—	1.69	0.50	—	—
苦苣菜 <i>Sonchus oleraceus</i> L.	2.11	—	—	—	—
苦苣菜 <i>Ixeris denticulate</i> (Houtt.) Stobb	0.31	1.59	0.98	0.28	—
狼牙刺 <i>Sophora viciifolia</i> Hance	—	—	—	0.54	—
老鹳草 <i>Geranium wilfordii</i> Maxim.	0.41	0.26	0.07	—	—
芦苇 <i>Phragmites communis</i> Trin.	—	12.59	0.78	—	—
米口袋 <i>Gueldenstaedtia multiflora</i> Bunge	0.58	0.94	0.76	0.50	0.58
田旋花 <i>Convolvulus arvensis</i> L.	0.79	0.38	—	—	—
野亚麻 <i>Linum stelleroides</i> Planch	0.07	—	0.63	0.54	0.22
异叶败酱 <i>Patrinia heterophylla</i> Bunge	0.81	0.13	0.07	—	—
茵陈蒿 <i>Artemisia capillaris</i> Thunb.	0.43	0.39	—	—	—
硬质早熟禾 <i>Poa sphondylodes</i> Trin. et Bge	0.53	0.52	1.74	0.42	15.54
猪毛菜 <i>Salsola collina</i> Pall.	0.51	—	—	—	—
猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i> Waldstet. et kit	41.72	9.40	4.73	1.79	0.18
紫花地丁 <i>Viola philippica</i> Cav. ssp munda W. Beck	0.06	—	0.18	0.37	0.25
画眉 <i>Eragrostis pilosa</i> (L.) Beauv.	0.08	0.05	—	—	—

(*Stipa grandis* P. Smirn.)、大火草 (*Anemone tomentosa* (Maxim.) Pêi)、狗牙根 (*Cynodon dactylon* (L.) Pars.)等, 11 号样地主要分布芦苇群落,符合实地调查情况。在 4 类的基础上,5 类的划分结果为:2、3 和 5 被重新分为一类,其中 2 和 3 为冰草群落。最后,6 类的划分结果为:①样地 1、14、17、21:猪毛蒿 + 多年生杂草类群落;②样地 12、22、24:猪毛蒿群落;③样地 10、25:猪毛蒿 + 多年或 1 年生杂草类群落;④样地 11:芦苇 + 铁杆蒿群落;⑤样地 2、3:冰草群落;⑥样地 6:猪毛蒿 + 长芒草群落;⑦样地 4、9、15、18:铁杆蒿 + 茭蒿群落或达乌里胡枝子 + 铁杆蒿群落;⑧样地 23:茭蒿群落;⑨样地 5、8、16、13:达乌里胡枝子 + 丛生禾草群落;⑩样地 7、19:白羊草或白羊草 + 达乌里胡枝子群落;最后为铁杆蒿 + 硬质早熟禾群落,样地 20。

无论依据撂荒年限还是系统聚类划分演替阶段,演替前期群落类型基本一致,1~6a:1 年生杂草类群落→1 年生杂草类 + 丛生禾草群落→1 年生杂草类 + 多年生草本群落(或根茎禾草群丛)→7~16a:多年生草本群丛→多年生草本 + 小灌木群丛→17~42a:根茎丛生型禾草 + 小灌木群落或小灌木 + 多年生草本群落→小灌木群落或多年生草本 + 丛生禾草群落,代表性群落依次为猪毛蒿群落、猪毛蒿 + 长芒草群落→猪毛蒿 + 铁杆蒿群落或冰草群落→铁杆蒿群落→铁杆蒿 + 达乌里胡枝子群落→白羊草 + 达乌里胡枝子群落或达乌里胡枝子 + 铁杆蒿群落或铁杆蒿 + 硬质早熟禾群落。

2.2 演替过程中主要乡土牧草评价

2.2.1 演替过程中主要乡土牧草的确定、初步分级 依据本文的重要值计算公式确定的排名前 35 位的植物从生物量、盖度等指标均在所处群落中较其他物种更具优势,而这一特点是具备改良潜质的野生牧草所必需的。在此基础上,经适口性实验删去了“丙”级以下的苣荬菜、茜草、细叶远志 (*Polygala tenuifolia* Wild)、臭蒿 (*Artemisia annual* L.)、草麻黄、艾蒿 (*Artemisia argyi* Level. et Vant)、祁洲漏芦、风毛菊、狭叶米口袋、猪毛蒿等物种,其余的 23 种牧草分为 3 级:“丙”级,两种蒿类、二色棘豆;“乙”级,米口袋、达乌里胡枝子、长芒草、冰草、阿尔泰狗娃花、狗尾草、二列委陵菜,其余为“甲”级。

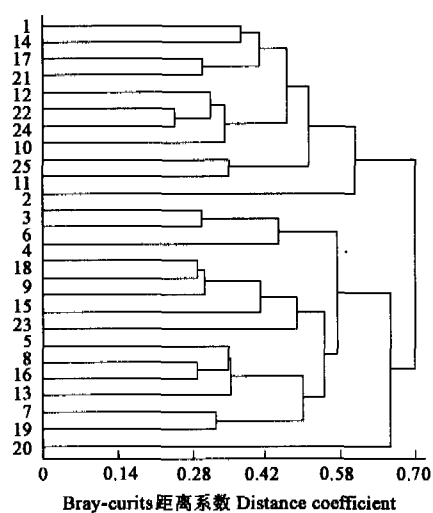


图 1 群落撂荒演替系统聚类

Fig. 1 The system clustering of communities succession of arable old land

2.2.2 演替过程中主要乡土牧草的化学成分及精确排序 从表 2 可知牧草化学成分差异较为显著。纵向比较而言,同一营养成分在不同物种间差异可达数十倍。例如:有机物营养物含量:粗脂肪 7.74%(茭蒿)~1.03%(狗牙根),相差 7.51 倍;无机营养物:钙 3.77(苦苣菜)~0.09mg/kg(茭蒿),差异可达 41.89 倍。横向比较而言,同一物种营养成分并不平衡,以总评分数最高的狼牙刺(*Sophora viciifolia* Hance)为例:尽管其它营养成分含量高居榜首,但粗脂肪含量属于中上水平,而总评分数较低的刺儿菜磷含量(2.02mg/kg)却远远高出其它物种(牧草平均含磷量在 0.55~1.20mg/kg)。暗示了在人工改良草场的过程中,合理的搭配草种从而为圈养家畜提供全面的营养至关重要。

依照方法中牧草等级评定公式对 23 种牧草精确排序结果见表 2 最后一列:23 种牧草排序为 1~13,总体可划分为四大类,甲等:总评分数≥54,排名在 1~3,归属于豆科;乙等:总评分数≥24,排名 4~8 之间,其中禾本科 3 种、豆科 3 种、菊科 4 种、蔷薇科 1 种;丙等:总评分数≥8,排名 9~11 之间,4 种牧草均归属于禾本科、其余为劣等牧草^[26]。

表 3 牧草化学成分分析及评价
Table 3 Chemical nutrient composition&general comment of herbages

物种名 Species	重要值 Important value	采样期 Sampling period	粗蛋白 Crude protein (DM %)	粗纤维 Crude fiber (DM %)	粗脂肪 Crude fat (DM %)	粗灰分 Coarse ash (DM %)	钙 Calcium (mg/kg)	磷 Phosphorus (mg/kg)	评价 V Estimate V	排序 Collate
达乌里胡枝子 <i>Lespedeza</i> var. <i>dahurica</i> (Laxm.) Schindl	68.58	盛花	15.86	30.11	2.51	8.17	1.15	0.09	36	5
铁杆蒿 <i>Artemisia sacrorum</i> Ledeb.	58.40	营养*	13.71	31.08	4.69	9.77	0.40	1.64	32	6
茭蒿 <i>Artemisia giraldii</i> Pamp.	40.20	营养*	11.57	25.68	7.74	6.71	0.09	0.91	36	5
白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i> (L.) Keng	24.95	盛花	7.86	32.59	3.13	6.04	0.46	0.79	32	6
冰草 <i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn	23.53	盛花	6.22	34.28	2.84	12.09	1.71	0.73	12	10
长芒草 <i>Stipa bungeana</i> Trin.	23.28	盛花	7.21	31.50	3.41	6.54	1.82	0.05	12	10
硬质早熟禾 <i>Poa sphondylodes</i> Trin. et Bge	18.75	营养*	8.67	32.97	3.01	8.74	0.17	0.14	4	13
阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus</i> <i>altaicus</i> (Wild)Novopokr	18.46	盛花	10.66	31.08	3.27	9.45	1.65	0.32	48	4
芦苇 <i>Phragmitas communis</i> Trin.	13.37	营养*	7.30	33.24	4.58	13.42	3.42	0.21	18	9
白草 <i>Pennisetum flaccidum</i> Griseb.	10.70	盛花	9.91	35.44	4.76	11.12	0.82	0.21	6	12
草木樨状黄芪 <i>Astragalus</i> <i>melilotoides</i> Pall.	9.70	营养*	23.34	32.67	2.74	5.27	0.50	1.27	72	2
狗尾草 <i>Setaria viridis</i> (L.) Beauv.	6.25	盛花	8.30	37.58	1.18	12.97	0.76	0.57	4	13
二列麦陵菜 <i>Potentilla bifurca</i> L.	6.17	盛花	10.31	31.08	2.59	6.08	4.78	0.07	48	4
刺儿菜 <i>Cephalanoplos Segetum</i> (Bunge) Kitam	5.87	盛花	4.81	2.49	4.12	9.61	0.10	2.02	27	7
华隐子草 <i>Cleistogenes chinensis</i> (Maxim) Keng	4.94	盛花	10.74	42.51	2.65	7.37	0.57	0.64	18	5
狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pars.	4.58	盛花	6.91	30.67	1.03	15.09	0.93	0.52	8	11
山野豌豆 <i>Vicia amoena</i> Fisch.	4.55	盛花	9.54	28.73	5.09	10.14	0.48	1.04	54	3
无芒隐子草 <i>Kengia songorica</i> (Roshev.) Ohwi	4.11	盛花	12.96	35.61	5.28	7.16	1.01	0.62	36	5
二色棘豆 <i>Oxytropis bicolor</i> Bunge.	3.77	盛花	15.86	30.11	2.5	8.17	1.15	0.09	24	8
米口袋 <i>Gueldenstaedtia multiflora</i> Bunge	3.36	盛花	16.26	29.12	3.5	11.74	0.32	0.94	24	8
苦苣菜 <i>Ixeris denticulate</i> (Houtt.) Stobb	3.16	营养*	7.64	16.03	6.6	21.36	3.77	0.19	27	7
狼牙刺 <i>Sophora viciifolia</i> Hance	2.76	盛花	17.87	27.31	2.8	6.54	1.21	0.55	108	1
大针茅 <i>Stipa grandis</i> P. Smirn.	2.32	盛花	8.42	34.18	2.6	4.56	0.22	0.05	4	13

* 幼嫩时适口性良好,开花后下降 Palatability is excellent or fine in the vegetative period, deteriorating with blossoming

2.2.3 演替过程中主要乡土牧草的生态效益评价 本研究以群落建群种的盖度作为基础,与焦菊英等在 2000 年提出的参照系对照,具体结果见表 4。经分析发现:临界有效盖度最低要求为 23.4%即坡度 $\leq 5^{\circ}$ 、次最大 30min 雨强与次降雨量的乘积 ≤ 5 的条件下保持水土的草地植被盖度,没有达到此要求或只在生长旺盛期勉强达到的群落属于劣等,例如最大盖度仅为 20.0%冰草群落,可以肯定的认为只要雨强稍大,其群落下土壤的可溶性养分便开始流失;达到丙等生态效益的草本群落一般可以在非洪水期间保持水土,例如刺儿菜群落,35%的平均盖度已经可以在 $\leq 20^{\circ}$ 的坡地、次最大 30min 雨强与次降雨量的乘积 ≤ 10 的情况下保持水土;归属于乙等及甲等的群落水土保持能力明显增强,该类群落即使生长在 30° 的坡地也可达到抵御每 10a 一遇的暴雨(次最大 30min 雨强与次降雨量的乘积 ≥ 70 的情况)的要求,既盖度 $\geq 71.1\%$,而盖度最大的达乌里胡枝子群落在雨季即生长旺盛期的盖度高达 95%左右,可以保证 35° 的坡地在次最大 30min 雨强与次降雨量的乘积为 120 的情况下水土不流失,即可抵抗每 20a 一遇的暴雨。

表 4 牧草群落生态效益分析及评价

Table 4 Ecological benefit of 23 kinds of herbage community	
排序 Collate	物种名 Species
甲等 Best	铁杆蒿 <i>Artemisia sacrorum</i> Ledeb., 白草 <i>Pennisetum flaccidum</i> Griseb., 二列菱陵菜 <i>Potentilla bifurca</i> L., 白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i> (L.) Keng, 芦苇 <i>Phragmitas communis</i> Trin., 狼牙刺 <i>Sophora viciifolia</i> Hance, 茭蒿 <i>Artemisia giraldii</i> Pamp., 大针茅 <i>Stipa grandis</i> P. Smirn., 达乌里胡枝子 <i>Lespedeza</i> var. <i>dahurica</i> (Laxm.) Schindl
乙等 Better	草木樨状黄芪 <i>Astragalus melilotoides</i> Pall., 长芒草 <i>Stipa bungeana</i> Trin., 华隐子草 <i>Cleistogenes chinensis</i> (Maxim), 狗尾草 <i>Setaria viridis</i> (L.) Beauv., 无芒隐子草 <i>Kengia songorica</i> (Roshev.) Ohwi, 狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pars.
丙等 Good	二色棘豆 <i>Oxytropis bicolor</i> Bunge., 苦荚菜 <i>Ixeris denticulate</i> (Houtt.) Stobb, 硬质早熟禾 <i>Poa sphondylodes</i> Trin. et Bge, 刺儿菜 <i>Cephalanoplos Segetum</i> (Bunge) Kitam
劣等 Worst	米口袋 <i>Gueldenstaedtia multiflora</i> Bunge, 山野豌豆 <i>Vicia amoena</i> Fisch., 冰草 <i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn

2.2.4 演替过程中主要乡土牧草的综合评价 比对乡土牧草的化学成分及生态效益评价的结果(表 4 及表 5),差异较大。以山野豌豆为例:依据营养成分评定为甲等,而依据水土保持效果评定为劣等。因此,只有综合经济(营养成分)及生态(水土保持能力)指标才可全面的评定牧草的品质。

依照本文综合评价方法,23 种主要乡土牧草的总评分与排序结果见表 5。23 种牧草排序为 1~8,总体可划分为 4 大类,甲等:总评分数 ≥ 4.45 ,排名在 1~3,其中豆科 2 种、禾本科 1 种、菊科 2 种、蔷薇科 1 种;乙等:总评分数 ≥ 3.65 ,排名 3~5 之间,其中禾本科 7 种、豆科 1 种;丙等:总评分数 ≥ 3.35 ,排名 6,其中豆科 2 种、菊科 3 种;其余为劣等牧草,总评分数 ≤ 3.10 。

表 5 牧草群落综合效益分析及评定

Table 5 Over efficacy of 23 kinds of herbage communit		
总评 E General comment	排序 Collate	物种名 Species
5.00	1	狼牙刺 <i>Sophora viciifolia</i> Hance
4.55	2	达乌里胡枝子 <i>Lespedeza</i> var. <i>dahurica</i> (Laxm.) Schindl, 二列菱陵菜 <i>Potentilla bifurca</i> L., 茭蒿 <i>Artemisia giraldii</i> Pamp., 白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i> (L.) Keng, 铁杆蒿 <i>Artemisia sacrorum</i> Leded.
4.45	3	草木樨状黄芪 <i>Astragalus melilotoides</i> Pall
4.10	4	芦苇 <i>Phragmitas communis</i> Trin., 华隐子草 <i>Cleistogenes chinensis</i> (Maxim) Keng, 无芒隐子草 <i>Kengia songorica</i> (Roshev.) Ohwi
4.00 3.65	5	白草 <i>Pennisetum flaccidum</i> Griseb., 大针茅 <i>Stipa grandis</i> P. Smirn., 长芒草 <i>Stipa bungeana</i> Trin., 狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pars
3.55 3.45	6	二色棘豆 <i>Oxytropis bicolor</i> Bunge., 苦荚菜 <i>Ixeris denticulate</i> (Houtt.) Stobb, 阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i> (Wild) Novopokr, 刺儿菜 <i>Cephalanoplos Segetum</i> (Bunge) Kitam, 山野豌豆 <i>Vicia amoena</i> Fisch
3.35 3.10	7	狗尾草 <i>Setaria viridis</i> (L.) Beauv 米口袋 <i>Gueldenstaedtia multiflora</i> Bunge
2.90 2.55 2.45	8	硬质早熟禾 <i>Poa sphondylodes</i> Trin. et Bge 冰草 <i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn

3 结论与讨论

3.1 本文采用的两种方法所得结果都表明了先锋群落(1~6a)演替的连续性较好,这是由于在演替初期群落组成主要取决于种的繁殖体散布能力^[27],而后期群落(6a以上)间连续性较差,这是由于撂荒演替虽然是从弃耕的次生裸地开始的,但也不可能完全排除原有植被的影响,并且受立地条件和群落周边环境的影响,如坡向、坡度、土壤理化性质、土壤水分、养分等,使群落演替速度和方向均有所不同^[28]即演替的方向和速度会因撂荒地立地条件的差异而发生改变^[29]。如样地15因开垦年限较短,再加上受周围邻近草地的影响,撂荒年限虽仅为6a,已演替到铁杆蒿+茭蒿群落;而前后期群落之间存在着较大的间断性是由于后期群落组成逐渐复杂及控制演替的因素较多有关^[30]。

3.2 草种的合理搭配兼顾生态、经济及社会效益等方面 近年来,随着黄土高原生态建设深入开展,植被恢复中的一些问题暴露出来:不区分立地条件,人工栽种过多耗水量大的木本植物将使蒸腾本已十分强烈的黄土中水分散失更快从而使得得不到充足雨水补给的土壤较深处形成干层^[31];从生物种入侵的角度出发,过多的引入外地树、草种将有可能破坏本地原有生态系统的稳定^[32]。另外,短期内,区域大气候和地区种分布比较固定,种的适应、繁殖、散布能力和相对竞争能力大致决定了一个地区群落演替的规律,这正是研究群落演替规律的可能性和必要性,同时也使利用演替规律成为可能。因此,研究、利用黄土高原半干旱地区森林—草原过渡带撂荒演替的规律为牧草筛选、育种提供理论基础及方向从而促进演替的速度、改变演替的方向,对于植被恢复与重建的生态环境治理过程中合理开发、利用自然资源,减少水土流失等问题的解决不但具有重要意义,也具有实现的基础。

本文依据演替过程中的草本植物重要值大小的排序的结果,从排名前35位的草种中筛选牧草的方法可使以下两点得到保证:①均为乡土草种,由于长期对环境的适应,可以有效的利用黄土高原贫瘠的资源、保护脆弱的生境;②本文采用的重要值计算公式使得排名较前的草种均为在群落中竞争能力强、生产力高、产草量大的牧草。在此基础上,经适口性试验再次淘汰确保保留的23种牧草作为圈养饲料源的宽度与放牧饲料源的基本一致,可为家畜提供全面的营养;而后,将23种牧草进行化学成分分析,依据牧草化学成分等级法分级,精确排序,并进一步分析了个牧草群落的水土保持能力;最终以两种评价结果为依据,评定了陕北黄土高原主要乡土牧草的综合效益,确保了排序结果的全面性,从而可为更加明确、详细的说明如何合理选育、搭配草种的工作提供基础。

本文结尾依照试验结果对研究地区草种可能的选育目标及搭配种植做出推测,见表6,期望抛砖引玉,有更合理的结果产生。总体而言,23种牧草可分为3类:一类为没有贯穿演替过程,只在某一阶段作为群落的建群或优势种,例如:狼牙刺、芦苇;另一类是贯穿演替过程,在整个过程以亚优势种或主要伴生种地位存在,例如:米口袋、二列菱陵菜;第3类为贯穿演替过程,并随着演替的进行而改变自身在群落中的重要性,或由建群种、优势种退居为亚优势种、主要伴生种,或相反,例如:达乌里胡枝子、白羊草。同时,各种牧草的营养成分含量及水土保持能力差异均较显著,搭配时应予以重视:处在坡度较大的山地的牧草采割困难,加之此类坡地

表 6 不同撂荒地牧草的搭配
Table 6 Herbage collocation on kinds of arable old land

撂荒年限 Period of arable old land	牧草 Kind of herbage
1~6a	二列菱陵菜 <i>Potentilla bifurca</i> L.,苦茺菜 <i>Ixeris denticulate</i> (Houtt.) Stobbs,刺儿菜 <i>Cephalanoplos Segetum</i> (Bunge) Kitam,芦苇 <i>Phragmitas communis</i> Trin.,山野豌豆 <i>Vicia amoena</i> Fisch.
7~17a	达乌里胡枝子 <i>Lespedeza</i> var. <i>dahurica</i> (Laxm.) Schindl,华隐子草 <i>Cleistogenes chinensis</i> (Maxim) Keng,二色棘豆 <i>Oxytropis bicolor</i> Bunge.,无芒隐子草 <i>Kengia songorica</i> (Roshev.) Ohwi,白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i> (L.) Keng,阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i> (Wild) Novopokr,草木樨状黄芪 <i>Astragalus melilotoides</i> Pall.
17~35a	长芒草 <i>Stipa bungeana</i> Trin.,冰草 <i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn,达乌里胡枝子 <i>Lespedeza</i> var. <i>dahurica</i> (Laxm.) Schindl,白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i> (L.) Keng
33~40a	狼牙刺 <i>Sophora vicifolia</i> Hance

比平缓的牧场在相同雨强条件下更易产生径流造成水土流失,故而在 $\geq 25^\circ$ 的坡地应以水土保持能力强的牧草为主;而平缓的山地应以营养高的牧草为主,以便为圈养家畜提供全面营养,从而增加以畜牧业为经济发展主要途径的该地区居民的收入。将此结果应用于实践,应在不同年限撂荒地上以演替中群落结构为基准,并尽量在相对应的自然群落中选取营养成分不同的牧草进行搭配,使生态、经济、社会复合系统建设符合以生产力、均衡性、稳定性、持续性等 4 项参数为指标的科学体系^[33]评估要求,做到治理、重建区域的持续、稳定和协调发展。

References:

- [1] Wang J J, Pei T F. Effects of climate change on forest succession. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(10): 1722 ~ 1730.
- [2] Elton C S. The reason of conservation. London: Chapman & Hall, 1958. 143 ~ 153.
- [3] Peng S L. Restoration ecology and recovery of degraded ecosystem. *Journal of Chinese Academy Science*, 2000, (3): 188 ~ 192.
- [4] Zhao S L. Studies of plant community succession. Shanxi Science & Technological Press, Xi'an, 1996. 106 ~ 164.
- [5] Bazzaz F A. Plant species diversity in old-field successional ecosystems in southern Illinois. *Ecology*, 1975, 56: 485 ~ 488.
- [6] Elton C S. The reasons of conservation. London: Chapman & Hall, 1958. 143 ~ 153.
- [7] Odum E P. Fundamentals of ecology. Philadelphia: Saunders Co, 1971.
- [8] Zhou X Y, Wang B S, Li M G, *et al.* Interspecies covariation analysis of domain tree species in secondary succession of forest community in Heishiding Nature Reserve, Guangdong Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(3): 367 ~ 371.
- [9] Xin X P, Xu B, Shan B Q, *et al.* Patch dynamic and scale-transition analysis of grassland in restoration succession. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(4): 587 ~ 593.
- [10] Almo Farina. Principle and Method in Landscape Ecology. Great Britain at University Press, Cambridge, 1998.
- [11] Wang G H. Plants 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.
- [12] Zhang J Y, Zhao H L, Zhang T Y, *et al.* Dynamics of species diversity of community in restoration processes in Horqin sandy land. *Acta Phytocologica sinica*, 2004, 28(1): 86 ~ 92.
- [13] Wen Z M, Jiao F, Zhang X P, *et al.* Impact of landscape changes on environment due to 60 years land use in a small catchment in Loess Hilly region on Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(9): 1903 ~ 1909.
- [14] Wu Q X, Yang W Z. The vegetation contraction and sustainable development on Loess Plateau. Beijing: Science Press, 1998.
- [15] Lovich J E, Bainbridge D. Anthropogenic degradation of the southern California desert ecosystem and prospect for nature recovery and restoration. *Environmental Management*, 1999, 24: 309 ~ 326.
- [16] Huang M B, Liu X Z. Regulation effect of forest vegetation on watershed runoff in the Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(9): 1057 ~ 1060.
- [17] Fu B J, Ma K M, Zhou H F, *et al.* The impact of land use structure on the distribution of soil nutrients in the Loess hilly region. *Bulletin of Science*, 1998, 43(22): 92 ~ 95.
- [18] Zhang X C, Shao M A, Huang Z B, *et al.* An experiment research on soil erosion and nitrogen loss under different vegetation cover. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(6): 1038 ~ 1044.
- [19] Wu Y Q, Zhang Q C, Zhang Y, *et al.* Crop characteristics and their temporal change on Loess Plateau of China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(1): 104 ~ 107.
- [20] Ren J Z. Research technique of grassland management. Beijing: Chinese Agricultural Press, 1998. 122 ~ 129.
- [21] Jiao J Y, Wang W Z, Ling J. Effective cover rate of woodland and grassland for soil and water conservation. *Acta Phytocool Sin*, 2000, 24(5): 608 ~ 612.
- [22] Hu X P, Wang C F. Basis of SAS and statistic examples. Xi'an: Xi'an map Publishing House, 2001. 51 ~ 84.
- [23] Sun R Y, Li Q F, Niu C J, *et al.* Ecology. Beijing: Higher Education Press, 2002. 137 ~ 176.
- [24] Zhu Z C. Features of vegetation zones in Qingling and its northern loess area. *Science Geographica Sinica*, 1991, 11(2): 157 ~ 163.
- [25] Li Y Y, Shao M A. The change of plant diversity during nature recovery process of vegetation in Ziwoing area. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(2): 252 ~ 260.
- [26] Min L Y. Pasture in Shanxi. Xi'an: Northwest University Press, 1985. 363 ~ 375.
- [27] Zhou H Y, Chen J M, Zhou L. Nature recovery succession and regulation of the prairie vegetation on the Loess Plateau. *Res. Soil Water Conser*, 1998, 5: 126 ~ 138.

- [28] Tilman D, Doeing J A. Biodiversity and in grasslands. *Nature*, 1994, 367: 363 ~ 365.
- [29] Hou F J, Xiao J Y, Nan Z B. Eco-restoration of abandoned farmland in the Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(8): 923 ~ 929.
- [30] He S H, Hao Z Q, Larsen DR, *et al.* A simulation study of landscape scale forest succession in Northeastern China. *Ecol Model*, 156: 153 ~ 166.
- [31] Wang L, Shao M A, Hou Q C. The primary research on dried soil layer in the Loess Plateau. *Journal of Northwest Sci-tech university Agriculture and Forest (Nature Science Edition)*, 2001, 29(4): 34 ~ 38
- [32] Zhang LY, Ye WH. Community invisibility and its influencing factors. *Acta Phytocool Sin*, 2002, 26(1): 109 ~ 1143.
- [33] Li Z K. Study on benefit evaluation and systematic appraisal of small watershed control in Loess Plateau; taking Huangjia ercha as example. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(3): 241 ~ 247.

参考文献:

- [1] 王纪军,裴铁璠. 气候变化对森林演替的影响. *应用生态学报*, 2004, 15(10): 1722 ~ 1730.
- [3] 彭少麟. 恢复生态学与退化生态系统的恢复. *中国科学院院刊*, 2000, (3): 188 ~ 192.
- [4] 赵松岭主编. 植物群落演替研究. 西安: 陕西科学技术出版社, 1996. 106 ~ 164.
- [8] 周先叶, 王伯荪, 李鸣光, 等. 黑石顶自然保护区森林次生演替过程中群落主要种的种的种间协变分析. *应用生态学报*, 2004, 15(3): 367 ~ 371.
- [9] 辛晓平, 徐斌, 单保庆, 等. 恢复演替中草地斑块动态及尺度转换分析. *生态学报*, 2000, 20(4): 587 ~ 593.
- [11] 王国宏. 黄土高原自然植被演替过程中的植物特征与土壤元素动态. *植物学报*, 2002, 44(8): 990 ~ 998
- [12] 张继义, 赵哈林, 张铜会, 等. 科尔沁沙地植被恢复系列上群落演替与物种多样性的恢复动态. *植物生态学报*, 2004, 28(1): 86 ~ 92.
- [13] 温仲明, 焦峰, 张晓萍, 等. 纸坊沟流域近 60 年来土地利用景观变化的环境效益. *生态学报*, 2004, 24(9): 1903 ~ 1909.
- [14] 吴钦孝, 杨文治. 黄土高原植被建设与持续发展. 北京: 科学出版社, 1998.
- [16] 黄明斌, 刘贤赵. 黄土高原森林植被对流域径流的调节作用. *应用生态学报*, 2002, 13(9): 1057 ~ 1060.
- [17] 傅伯杰, 马克明, 周华峰, 等. 黄土丘陵区土地利用结构对土壤养分分布的影响. *科学通报*, 1998, 43(22): 92 ~ 95.
- [18] 张兴昌, 邵明安, 黄占斌, 等. 不同植被对土壤侵蚀和氮素流失的影响. *生态学报*, 2000, 20(6): 1038 ~ 1044.
- [19] 伍永秋, 张清春, 张岩, 等. 黄土高原小流域植被特征及其季节变化. *水土保持学报*, 2002, 16(1): 104 ~ 107.
- [20] 任继周主编. 草业科学研究方法. 北京: 中国农业出版社, 1998. 122 ~ 129.
- [21] 焦菊英, 王万中, 李靖. 黄土高原林草水土保持有效盖度分析. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 608 ~ 612
- [22] 胡晓平, 王长发. SAS 基础及统计实例教程. 西安: 西安地图出版社, 2001. 51 ~ 84.
- [23] 孙儒泳, 李庆芬, 牛翠娟, 等. 基础生态学. 北京: 高等教育出版社, 2002. 137 ~ 176.
- [24] 朱志诚. 秦岭及其以北黄土区植被地带性特征. *地理科学*, 1991, 11(2): 157 ~ 163.
- [25] 李裕元, 邵明安. 子午岭植被自然恢复过程中植物多样性的变化. *生态学报*, 2004, 24(2): 252 ~ 260.
- [26] 闵乐园主编. 陕西牧草. 西安: 西北大学出版社, 1985. 363 ~ 375.
- [27] 邹厚远, 程积民, 周麟. 黄土高原植被的自然恢复演替及调节. *水土保持研究*, 1998, 5: 126 ~ 138.
- [29] 候扶江, 肖金玉, 南志标. 黄土高原退耕地的生态恢复. *应用生态学报*, 2002, 13(8): 923 ~ 929.
- [31] 王力, 邵明安, 候庆春. 黄土高原土壤干层. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2001, 29(40): 34 ~ 38.
- [32] 张林艳, 叶万辉. 群落可入侵性及其影响因素. *植物生态学报*, 2002, 26(1): 109 ~ 1143.
- [33] 李中魁. 黄土高原小流域治理效益评价与体系评估研究——以宁夏西吉县黄家二茬为例. *生态学报*, 1998, 18(3): 241 ~ 247.