

山西岚县皇姑梁小流域人工植物群落生态

王尚义¹, 李素清², 曹志敏¹, 赵海晓¹

(1. 太原师范学院历史地理与环境变迁研究所, 太原 030012; 2. 太原师范学院城市与旅游学院, 太原 030012)

摘要:应用双向指示种分析法(TWINSPAN)和除趋势对应分析(DCA)等数量分析方法,对山西岚县皇姑梁小流域人工植物群落生态关系进行研究,将该人工植被划分为 12 个群丛,分别位于不同的海拔高度和坡向。分类结果很好地反映了人工植物群落类型及优势种的分布与环境因子的关系,并在 DCA 二维排序图上得到了较好的验证。DCA 排序轴反映了群落土壤含水量、坡向、海拔高度、人工植被恢复时间和物种多样性的梯度变化,表明土壤含水量、坡向、海拔高度、物种类型及其配置模式是影响人工植物群落分布和变化的主要环境因子,不同物种配置模式对群落演替和物种多样性变化有重要影响,油松+华北落叶松-沙棘、小叶杨+油松、油松-沙棘、油松-柠条锦鸡儿等组成的乔灌混交林的物种多样性高于柠条锦鸡儿灌木纯林,并且油松+华北落叶松-沙棘混交林的物种多样性高于小叶杨+油松混交林,混交林的生态恢复效果优于纯林,并且对该小流域的生态恢复作用明显。华北落叶松适合在该小流域海拔较高的梁坡顶、半阳坡、半阴坡和阴坡生长,小叶杨适合在其海拔较低的沟底、半阳坡和半阴坡生长,而油松、沙棘、柠条锦鸡儿的生态适应性强,可在其不同海拔和坡向生长。人工植物群落的演替进程,遵循地带性植物群落演替规律。随着群落演替,野生植物不断侵入,油松、华北落叶松、小叶杨等人工林郁闭度增加,沙棘、柠条锦鸡儿等逐渐退化,油松、华北落叶松、小叶杨等出现枯枝、死株现象,这是自然稀疏的结果,亟待加强管理。

关键词:皇姑梁小流域;人工植被;生态关系分析;TWINSPAN 分类;DCA 排序;物种多样性

文章编号:1000-0933(2007)12-5098-12 中图分类号:Q948 文献标识码:A

The ecological relationships among artificial vegetation communities in Huangguliang small watershed, Lanxian County of Shanxi

WANG Shang-Yi¹, LI Su-Qing², CAO Zhi-Min¹, ZHAO Hai-Xiao¹

1 Institute of Historical Geography and Environmental Change, Taiyuan Normal University, Taiyuan 030012, China

2 College of Urbanism and Tourism, Taiyuan Normal University, Taiyuan 030012, China

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5098 ~ 5109.

Abstract: Ecological degradation is a critical problem faced by every country in the world. The study of restoration of degraded ecosystem has been recently considered as one of scientific issues and public focuses because drastic ecological degradation results in huge economic and ecological loss. Huangguliang small watershed of Lanxian County, located in the northwest of Shanxi province, is one of the most typical ecological frangible areas on the Loess Plateau in North China. Based on the field investigation, two-way indicator species analysis (TWINSPAN) and detrended correspondence analysis (DCA) were applied to the analysis of ecological relationships among artificial vegetation communities in Huangguliang small watershed. It was showed that: (1) One hundred-two samples located in different altitudes and aspects were classified into twelve associations by TWINSPAN and their characteristics, including distribution of dominant species and relationship with environmental factors, were described respectively. All results were confirmed by the two-dimensional

基金项目:国家自然科学基金项目(40471033)

收稿日期:2007-06-13; 修订日期:2007-10-31

作者简介:王尚义(1955~),男,山西交口人,博士,教授,主要从事区域历史地理和环境变迁研究. E-mail: wsy326@263.net

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40471033)

Received date: 2007-06-13; **Accepted date:** 2007-10-31

Biography: WANG Shang-Yi, Ph. D, Professor, mainly engaged in regional historical geography and environmental change. E-mail: wsy326@263.net

ordination diagram of DCA. (2) The environmental variables, such as soil moisture, altitude, aspect and succession time were the major environmental factors in affecting the change and distribution of the communities. The results of DCA ordination showed that the artificial associations have their difference distribution along environmental gradient. The first two axes of DCA reflect the gradient of soil moisture, altitude, aspect and succession time of the communities. (3) The distribution patterns of dominant species were highly similar to that of the communities. With the decrease of the altitude, the association of *Pinus tabulaeformis*, *Hippophae rhamnoides* and *Carex lanceolata* were gradually taking place by the association of *Caragana korshinskii*, *Carex lanceolata* and *Artemisia capillaris*, which showed that community distribution patterns were coordinating to the zonal vegetation distribution patterns due to the decrease of elevation and soil moisture. (4) The difference of species diversity of community has main closely correlation to soil moisture, altitude, aspect and succession time, meanwhile, also has closely correlation to the habitat. Species diversity of the artificial vegetation in semi-sunny slope, semi-shadow slope, shadow slope and higher altitude area with better water supply, was much richer than that in sunny slope and lower altitude area. Meanwhile, species diversity plays an important role in the development and distribution of the artificial vegetation communities. (5) Species types and their plant pattern have an obvious interruption effect to the succession of artificial vegetation communities in Huangguliang small watershed. The restoration effects of mixed forest, such as *Populus simonii* + *Pinus tabulaeformis*, *Pinus tabulaeformis* + *Larix principis-rupprechtii*-*Hippophae rhamnoides*, *Pinus tabulaeformis*-*Caragana korshinskii*, *Pinus tabulaeformis*-*Hippophae rhamnoides*, etc. are much better than that of *Caragana korshinskii* pure forest. And human interruption could accelerate the process of succession, which has validated the previous researchers' opinions. Moreover, *Larix principis-rupprechtii* is fit for growing in semi-sunny, semi-shadow slope, shadow slope at higher altitude. *Populus simonii* is fit for growing in valley and semi-sunny and semi-shadow slope at lower altitude, while *Pinus tabulaeformis*, *Hippophae rhamnoides* and *Caragana korshinskii* with strong ecological adaptability are fit for growing in any of altitude and aspect in Huangguliang small watershed. (6) The course of artificial vegetation community succession in Huangguliang small watershed follows the succession law of local zonal vegetation. With the community succession, the wild plants have continuously invaded and the canopy densities of *Pinus tabulaeformis*, *Larix principis-rupprechtii* and *Populus simonii* etc. forests have increased. While the shrubs of *Hippophae rhamnoides* and *Caragana korshinskii* have gradually degenerated. The forests of *Pinus tabulaeformis*, *Larix principis-rupprechtii* and *Populus simonii* etc. have occurred deadwoods, which are the results of self-thinning. So the effective forest management is urgently needed.

Key Words: Huangguliang small watershed; artificial vegetation; analysis of ecological relationships; TWINSpan classification; DCA ordination; species diversity

数量分类和排序是现代植被生态学研究应用最广泛的生态学技术,它为客观、准确的揭示植被与环境的生态关系提供了更为有效的途径^[1]。其中双向指示种分析(Two-way Indicator Species Analysis, TWINSpan)^[2]和除趋势对应分析(Detrended Correspondence Analysis, DCA)^[3, 4],为当今国际上占主导地位的数量分类和排序方法^[5~7]。20 世纪 80 年代以来,数量分类和排序被广泛应用于我国山地森林、草地、湿地等群落生态研究中,并被逐渐推广应用于植被群落演替阶段划分、植被区划、景观生态学、植被与环境关系分析、森林立地划分、生态型划分以及植被生活型谱划分等领域,但该方法目前在小流域人工植被生态恢复过程中的应用较少^[8~11]。

以小流域为单元进行综合治理已成为当今世界各国治理水土流失的主要形式,我国是世界上水土流失最为严重的国家之一,也是较早开始水土流失生态恢复实践和研究的国家之一。从 20 世纪 80 年代提出小流域综合治理模式以来,经过长期的实践探索,目前我国小流域综合治理方式已由单一防护型转变为综合开发、利用和保护型^[12],而加速人工植被恢复重建是实现小流域综合治理和可持续发展目标的关键^[13]。根据小流域

自然地理条件,快速建立自我维持的人工植被生态系统是当前小流域植被恢复的核心^[14~16]。地处晋西北汾河上游的皇姑梁小流域,属黄土高原典型生态脆弱区之一,经过近 20a 的重点治理,植被恢复成效显著。对该小流域人工植被进行数量生态分析,揭示其群落与环境因子间,群落内部种群间生态关系,对加速黄土高原小流域植被重建和生态恢复具有重要的参考价值,但目前这方面的研究尚少见报道^[17]。本文采用数量分类和排序等现代植被分析手段,对皇姑梁小流域人工植物群落生态关系进行研究,揭示其群落类型及优势种分布与环境因子之间的生态关系,为寻求小流域综合治理和植被恢复的有效途径及最佳物种配置模式提供理论依据。

1 研究区概况

皇姑梁小流域位于山西省汾河上游岚县县城北 3km 处,地理位置介于 38°17'57.3"~38°19'26.8"N,111°40'01.8"~111°41'17.4"E 之间,属黄土高原典型的黄土丘陵沟壑区,海拔 1200~1350m 之间,总流域面积 9.5km²,土壤为淡褐土。该小流域属半干旱大陆性季风气候区,夏季凉爽多雨,冬季寒冷干燥,年均温 6.7℃,1 月份均温 -8℃,7 月份均温 22℃,极端最高气温 36.1℃,极端最低气温 -29℃。年均降雨量 504mm,雨量集中在 7~9 月份,占年总雨量的 62.5%。年均蒸发量高达 1790mm,年均日照时数 2865.9h,日照率达 65%,年辐射总量 152.1kJ/cm²,无霜期 130d,≥10℃积温 2748.6℃,平均风速 2.2m/s。该小流域在治理前地形破碎,沟壑纵横,荒梁秃岭,植被极为稀少,水土流失严重,土壤年侵蚀模数 9600t/km²以上。1988 年以来通过近 20a 的连续治理,该小流域人工植被覆盖率达到 71%,土壤年侵蚀模数下降至 1000t/km²,水土流失基本控制,自然环境明显改善,已初具小流域生态公园雏形^[18]。

2 研究方法

2.1 取样

在皇姑梁小流域海拔 1200~1350m 之间,采用系统取样方法,根据海拔高度的变化从沟底到坡顶设置 10m×10m 乔木样方 83 个,5m×5m 灌木样方 19 个,共计 102 个样方。每个样方调查记录的内容主要包括:植物种的名称、盖度、高度、乔木的胸径和株数等数量指标及样方所在地的海拔高度、坡度、坡向等环境因子。同时在每个样方中用土钻采集 0~10cm 土层有代表性的新鲜土样约 20g,捏碎后迅速装入可封闭的铝盒,重复 3 次,用于测定土壤水分含量。102 个样方共记录 98 个植物种(表 1),得到 98×102 的数据矩阵。

表 1 皇姑梁小流域人工植被的 98 个植物种类组成与生态类型^[19~21]

Table 1 98 species and their ecotypes of artificial vegetation in Huangguliang small watershed, Shanxi^[19~21]

序号 No.	种名 Specific name	生态类型 Ecotype	序号 No.	种名 Specific name	生态类型 Ecotype
1	黄花铁线莲 <i>Clematis intricata</i>	MX	50	丝叶唐松草 <i>Thalictrum forniculaceum</i>	MX
2	芦苇 <i>Phragmites communis</i>	H	51	地烧瓜 <i>Cynanchum thesioides</i>	X
3	小红菊 <i>Dendranthema chanetii</i>	M	52	披针叶黄华 <i>Thermopsis lanceolata</i>	MX
4	白莲蒿 <i>Artemisia gmelinii</i>	MX	53	硬毛棘豆 <i>Oxytropis hirta</i>	XM
5	牛皮屑 <i>Cynanchum auriculatum</i>	M	54	猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	XM
6	柞州漏芦 <i>Rhaponticum uniflorum</i>	MX	55	猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	XM
7	阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>	X	56	山苦荚菜 <i>Ixeris chinensis</i>	MX
8	紫花地丁 <i>Viola philippica</i>	M	57	异叶败酱 <i>Patrinia heterophylla</i>	MX
9	苦苣菜 <i>Sonchus oleraceus</i>	M	58	香青兰 <i>Dracocephalum moldavica</i>	M
10	甘野菊 <i>Dendranthema lavandulaefolium</i>	M	59	碱蓬 <i>Suaeda glauca</i>	X
11	黄花菜 <i>Hemerocallis citrina</i>	M	60	歪头菜 <i>Vicia unijuga</i>	M
12	朝天萎陵菜 <i>Potentilla supina</i>	MX	61	砂珍棘豆 <i>Oxytropis racemosa</i>	X
13	茜草 <i>Rubia cordifolia</i>	M	62	胭脂花 <i>Primula maximowiczii</i>	M
14	野艾蒿 <i>Artemisia lavandulaefolia</i>	XM	63	大针茅 <i>Stipa grandis</i>	X
15	野韭 <i>Allium ramosum</i>	M	64	糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	MX
16	米口袋 <i>Oxytropis gueldenstaedtioides</i>	MX	65	芡蒿 <i>Artemisia giraldii</i>	XM

续表

序号 No.	种名 Specific name	生态类型 Ecotype	序号 No.	种名 Specific name	生态类型 Ecotype
17	蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>	M	66	打碗花 <i>Calystegia hederacea</i>	M
18	披碱草 <i>Elymus dahuricus</i>	MX	67	赖草 <i>Aneurolepidium dasystachys</i>	XM
19	鹅冠草 <i>Roegneria kamoji</i>	MX	68	直立黄芪 <i>Astragalus adsurgens</i>	MX
20	火绒草 <i>Leontopodium leontopodioides</i>	XM	69	虎尾草 <i>Chloris virgata</i>	M
21	茵陈蒿 <i>Artemisia capillaris</i>	MX	70	大车前 <i>Plantago major</i>	HM
22	车前 <i>Plantago asiatica</i>	M	71	金毛狗尾草 <i>Setaria glauca</i>	M
23	马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i>	M	72	茅香 <i>Hierochloe odorata</i>	M
24	小花鬼针草 <i>Bidens parviflora</i>	M	73	早熟禾 <i>Poa annua</i>	X
25	扁穗冰草 <i>Agropyron cristantum</i>	XM	74	地榆 <i>Sanguisorba officinalis</i>	MX
26	独苣荬 <i>Lepidium apetalum</i>	M	75	红纹马先蒿 <i>Pedicularis striata</i>	M
27	地锦 <i>Euphorbia humifusa</i>	M	76	野苜蓿 <i>Medicago falcata</i>	XM
28	黄花蒿 <i>Artemisia annua</i>	M	77	华北蓝盆花 <i>Scabiosa tschiliensis</i>	XM
29	丛生隐子草 <i>Cleistogens caespitosa</i>	MX	78	紫苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	M
30	小刺儿菜 <i>Cirsium setosum</i>	XM	79	钝裂银莲花 <i>Anemone obtusiloba</i>	M
31	并头黄芪 <i>Scutellaria scodifolia</i>	M	80	旋覆花 <i>Inula japonica</i>	M
32	野豌豆 <i>Vicia sepium</i>	M	81	翠雀 <i>Delphinium grandiflorum</i>	XM
33	益母草 <i>Leonurus artemisia</i>	M	82	北柴胡 <i>Bupleurum chinense</i>	M
34	二裂叶菱陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	MX	83	小丛红景天 <i>Rhodiola dumulosa</i>	X
35	耧斗菜 <i>Aquilegia viridiflora</i>	XM	84	野菊 <i>Dendranthema indicum</i>	M
36	老鹳草 <i>Geranium wifordii</i>	M	85	兴安胡枝子 <i>Lespedeza daurica</i>	MX
37	大丁草 <i>Leibnitzia anandria</i>	M	86	柠条锦鸡儿 <i>Caragana korshinskii</i>	XM
38	灰绿藜 <i>Chenopodium glaucum</i>	M	87	沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	MX
39	碱蒿 <i>Artemisia anethifolia</i>	XM-Ha	88	多花胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	XM
40	毛茛 <i>Ranunculus japonicus</i>	M	89	杠柳 <i>Periploca sepium</i>	XM
41	狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	M	90	枸杞 <i>Lycium chinense</i>	M
42	角蒿 <i>Incarvillea sinensis</i>	M	91	榆树 <i>Ulmus pumila</i>	M
43	地黄 <i>Rehmannia glutinosa</i>	M	92	华北落叶松 <i>Larix principis - rupprechtii</i>	M
44	牻牛儿苗 <i>Erodium stephanianum</i>	M	93	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	M
45	节节草 <i>Equisetum ramosissimum</i>	M	94	小叶杨 <i>Populus simonii</i>	M
46	细裂叶蒿 <i>Artemisia tanacetifolia</i>	XM	95	臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>	M
47	草地风毛菊 <i>Saussurea amara</i>	MX	96	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	M
48	抱茎苦卖菜 <i>Ixeris sonchifolia</i>	M	97	垂柳 <i>Salix babylonica</i>	M
49	瓣蕊唐松草 <i>Thalictrum petaloideum</i>	XM	98	山杏 <i>Armeniaca sibirica</i>	M

M 中生; XM 旱中生; MX 中旱生; X 旱生; H 湿生; Ha 盐生 M Mesophyte; XM Xero-mesophyte; MX Meso-xerophyte; X Xerophyte; H Hygrophite; Ha Halophyte

3.2 土壤水分测定

采用烘干法(105±2)℃^[22],测定土壤水分。将盛有新鲜土样的铝盒在分析天平上称重,准确至0.01g。揭开盒盖,放在盒底下,置于已预热至(105±2)℃的烘箱中烘烤12h。取出,盖好,在干燥器中冷却至室温(约需30min),立即称重。每一样方的新鲜土样的水分进行3次平行测定。土壤水分的计算公式为:

土壤水分 =
$$\frac{\text{烘干前铝盒及土样质量(g)} - \text{烘干后铝盒及土样质量(g)}}{\text{烘干后铝盒及土样质量(g)} - \text{烘干前铝盒质量(g)}} \times 100$$

3.3 数据分析

以重要值(IV)为数量指标来反映植物与环境的关系^[23],乔木种的重要值计算公式为:

$$IV(\text{乔木}) = (\text{相对密度} + \text{相对优势度} + \text{相对频度}) / 300$$

$$\text{相对密度} = (\text{某一种的个体数} / \text{全部种的个体总数}) \times 100$$

$$\text{相对优势度} = (\text{某一种的基面积之和} / \text{全部种的基面积之和}) \times 100$$

$$\text{相对频度} = (\text{某一种的频度} / \text{全部种的频度之和}) \times 100$$

灌木和草本植物种的重要值计算公式为:

$$IV(\text{灌木}) = (\text{相对盖度} + \text{相对高度}) / 200$$

$$\text{相对盖度} = (\text{某一种的盖度} / \text{全部种的盖度之和}) \times 100$$

$$\text{相对高度} = (\text{某一种的平均高度} / \text{全部种的平均高度之和}) \times 100$$

采用双向指示种分析(TWINSPAN)和除趋势对应分析(DCA)对皇姑梁小流域人工植被进行数量分类和排序分析。两种方法分别用国际通用软件 TWINSPAN 和 CANOCO 完成计算^[24]。每个样方中的物种多样性用 Shannon-Weiner 指数计算^[23]:

$$H' = - \sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i)$$

式中, H' 为样方(群落)的物种多样性指数, S 为物种数, P_i 为种 i 的重要值占有所有物种重要值之和的比例。

4 结果分析

4.1 TWINSPAN 分类

TWINSPAN 等级分类将皇姑梁小流域 102 个样方划分为 19 个组(图 1),但结合实际生态意义,最终将其归并为 12 组^[25],依据《中国植被》^[26]的分类原则和系统,12 个组分别代表 12 个植物群丛。图 1 是双向分类矩阵,矩阵上方是 102 个样方的序号,下方是样方分类的结果。其中“0”表示一次分划所得的一个组,“1”表示另一个组。矩阵左边是种类序号,右边是种类分类的结果,矩阵中央的数字表示植物种类的数量水平,“—”表示不存在。这一矩阵明显反映出一个综合环境梯度,即土壤含水量、坡向、海拔高度和人工植被恢复年限的梯度变化。矩阵从左向右,土壤含水量逐渐减少、坡向由北坡向南坡过渡、海拔逐渐降低和人工植被恢复年限逐渐变短,等级分类的结果比较客观地反映了植物与环境的生态关系^[23]。为了更清晰地反映 12 个群丛类型的划分情况,可将 TWINSPAN 的分类结果用树状图表示(图 2),图中 N 代表每一分组的样方数, D 代表分类, $D_1, D_2, \dots, D_5$ 分别为第 1, 2, $\dots$, 5 次划分。方框中的数字为每一群落类型所含样方的序号, I, II, $\dots$, XII 分别代表 12 个人工植物群丛类型^[10]。12 个群丛类型及其主要特征如下:

I 油松-沙棘-披碱草群丛(Ass. *Pinus tabulaeformis*-*Hippophae rhamnoides*-*Elymus dahuricus*) 该群丛包括样方 75、78、53、5、9、10、11、13、17、1、2、3、4、14,分布于海拔 1325 ~ 1350m 的皇姑梁北坡和梁坡顶部,坡向北东 5° ~ 正北,坡度为 15 ~ 0°,群丛总盖度为 85% ~ 98%,植被恢复时间 15 ~ 18a。该群丛主要栽培植物为油松、垂柳、沙棘、柠条锦鸡儿等,随着群落发育和进展演替,油松、沙棘、披碱草成为群丛优势种,垂柳逐渐退化,榆树、小叶杨、兴安胡枝子、枸杞、鹅冠草、白莲蒿、牛皮屑等不断侵入,物种多样性增加,人工群落向地带性植物群落方向快速演进。由于栽植过密,油松、华北落叶松等出现枯枝、死株现象,这是自然稀疏的结果。

II 油松-沙棘-野艾蒿群丛(Ass. *Pinus tabulaeformis*-*Hippophae rhamnoides*-*Artemisia lavandulaefolia*) 该群丛包括样方 39、46、64,分布于海拔 1250 ~ 1300m 的皇姑梁西北坡和北坡,坡向北西 20° ~ 正北,坡度为 10 ~ 0°,总盖度为 50% ~ 80%,植被恢复时间 14 ~ 16a。该群丛以栽培植物油松、沙棘和野生植物野艾蒿为优势种,主要伴生种为柠条锦鸡儿、茵陈蒿、阿尔泰狗娃花、披碱草、朝天萎陵菜等。

III 油松 + 华北落叶松-沙棘-披碱草群丛(Ass. *Pinus tabulaeformis* + *Larix principis-rupprechtii*-*Hippophae rhamnoides*-*Elymus dahuricus*) 该群丛包括样方 8、19、22、27、28、29、30、40、47、72、80,分布于海拔 1290 ~ 1330m 的皇姑梁东北坡和北坡,坡向北东 20° ~ 正北,坡度为 15 ~ 0°,群丛总盖度为 70% ~ 90%,植被恢复时间 14 ~ 16a。该群丛以栽培植物油松、华北落叶松、沙棘和野生植物披碱草为优势种,主要伴生种为小叶杨、

柠条锦鸡儿、兴安胡枝子、枸杞、白莲蒿、阿尔泰狗娃花、鹅冠草、茵陈蒿、丛生隐子草等,该群丛为乔灌混交林,植被成活率较高,群落物种多样性较高。但随着群落发育和进展演替,由于栽植过密,油松、华北落叶松等出现枯枝、死株现象。

IV 油松-柠条锦鸡儿+沙棘-披碱草群丛(Ass. *Pinus tabulaeformis*-*Caragana korshinskii*+*Hippophae rhamnoides*-*Elymus dahuricus*) 该群丛包括样方 6、7、18、20、25、26、49、58、70、73、74、77、81、82、85、87,分布于海拔 1270~1350m 的皇姑梁东坡和北坡,坡向北东 20°~正北,坡度为 30~0°,总盖度为 75%~98%,植被恢复时间 15~16a。该群丛以栽培植物油松、柠条锦鸡儿、沙棘和野生植物披碱草为优势种,主要伴生种为兴安胡枝子、枸杞、野艾蒿、茵陈蒿、白莲蒿、阿尔泰狗娃花、丛生隐子草等。随着群落发育和进展演替,沙棘、柠条锦鸡儿等逐渐退化,油松出现枯枝、死株现象。

V 油松-柠条锦鸡儿-鹅冠草群丛(Ass. *Pinus tabulaeformis*-*Caragana korshinskii*-*Roegneria kamoji*) 该群丛包括样方 31、33、34、42、43、48、50、56、59、61、62、84,分布于海拔 1260~1300m 的皇姑梁西南坡,坡向南西 10~0°,坡度为 20~0°,总盖度为 55%~75%,植被恢复时间 12~15a。该群丛以栽培植物油松、柠条锦鸡儿和野生植物鹅冠草为优势种,主要伴生种为兴安胡枝子、披碱草、茵陈蒿、野艾蒿、阿尔泰狗娃花等,随着群落演替,臭椿、小叶杨、榆树、紫花地丁等不断侵入,群丛物种多样性逐渐增加。

VI 油松-沙棘-披碱草+白莲蒿群丛(Ass. *Pinus tabulaeformis*-*Hippophae rhamnoides*-*Elymus dahuricus*-*Artemisia gmelinii*) 该群丛包括样方 32、35、36、37、44、60、71、83,分布于海拔 1260~1300m 的皇姑梁东北坡和北坡,坡向北东 15~0°,坡度为 25~0°,群丛总盖度为 45%~90%,植被恢复时间 12~15a。该群丛以栽培植物油松、沙棘和野生植物披碱草、白莲蒿为优势种,随着群落演替,小叶杨、柠条锦鸡儿、兴安胡枝子、枸杞、白莲蒿、鹅冠草、阿尔泰狗娃花等不断侵入,群丛物种多样性逐渐增加。

VII 柠条锦鸡儿-披碱草+茵陈蒿群丛(Ass. *Caragana korshinskii*-*Elymus dahuricus*+*Artemisia capillaris*):该群丛包括样方 54、63、101、66、76、79,分布于海拔 1200~1280m 的皇姑梁西南坡和西坡,坡向南西 15°~正西,坡度为 45~10°,群丛总盖度为 45%~75%,植被恢复时间 9~12a。该群丛以栽培植物柠条锦鸡儿和野生植物披碱草、茵陈蒿为优势种,随着群落演替,榆树、小叶杨、兴安胡枝子、赖草、碱蓬、野艾蒿、阿尔泰狗娃花等不断侵入,群丛物种多样性逐渐增高。

VIII 小叶杨-兴安胡枝子-披碱草群丛(Ass. *Populus simonii*-*Lespedeza daurica*-*Elymus dahuricus*):该群丛包括样方 94、96、45、57、65、67、68、69、100、102,分布于海拔 1200~1290m 的皇姑梁南坡和沟谷,坡向南东 10°~正南,坡度为 35~0°,群丛总盖度为 45%~90%,植被恢复时间 9~12a。该群丛以栽培植物小叶杨和野生植物兴安胡枝子、披碱草为优势种,随着群落演替,刺槐、柠条锦鸡儿、枸杞、阿尔泰狗娃花、野艾蒿、白莲蒿、茵陈蒿等不断侵入,群丛物种多样性增加。由于沟谷的土壤肥力高于南坡,小叶杨在沟谷中的长势明显优于南坡。

IX 小叶杨+油松-兴安胡枝子-白莲蒿群丛(Ass. *Populus simonii*+*Pinus tabulaeformis*-*Lespedeza daurica*-*Artemisia gmelinii*) 该群丛包括样方 15、38、41、51、52,分布于海拔 1280~1330m 的皇姑梁东南坡和南坡,坡向南东 45°~正南,坡度为 30~15°,群丛总盖度为 40%~90%,植被恢复时间 7~9a。该群丛以栽培植物小叶杨、油松和野生植物兴安胡枝子、白莲蒿为优势种,随着群落演替,枸杞、杠柳、阿尔泰狗娃花、白莲蒿、披碱草、鹅观草、茺蒿、野艾蒿等不断侵入,群丛物种多样性增加。

X 油松-柠条锦鸡儿-披碱草群丛(Ass. *Pinus tabulaeformis*-*Caragana korshinskii*-*Elymus dahuricus*):该群丛包括样方 21、23、24、55、86,分布于海拔 1280~1320m 的皇姑梁北坡,坡向北西 15°~正北,坡度为 15°~5°,群丛总盖度为 60%~85%,植被恢复时间 7~9a。该群丛以栽培植物油松、柠条锦鸡儿和野生植物披碱草为优势种,随着群落演替,小叶杨、杠柳、兴安胡枝子、枸杞、鹅观草、阿尔泰狗娃花、茵陈蒿等不断侵入,群丛物种多样性逐渐增高。

XI 油松+华北落叶松-沙棘-白莲蒿群丛(Ass. *Pinus tabulaeformis*+*Larix principis-rupprechtii*-*Hippophae rhamnoides*-*Artemisia gmelinii*) 该群丛包括样方 88、89、90、91、92、93、99、95、98、97,分布于海拔 1200~1230m

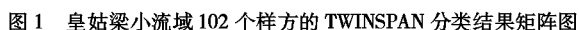


Fig. 1 Two-way table of species and quadrats classification produce by TWINSpan of 102 quadrats in Huangguliang small watershed, Shanxi

的皇姑梁北坡坡麓,坡向正北,坡度为 $35 \sim 15^\circ$,群丛总盖度为 $70\% \sim 90\%$,植被恢复时间 $3 \sim 6a$ 。该群丛以栽培植物油松、华北落叶松、沙棘和野生植物白莲蒿为优势种,随着群落演替,小叶杨、山杏、柠条锦鸡儿、兴安胡枝子、枸杞、白莲蒿、鹅冠草、阿尔泰狗娃花等不断侵入,群丛物种多样性不断增加。

XII 油松-碱蒿群丛(Ass. *Pinus tabulaeformis*-*Artemisia anethifolia*) 该群丛包括样方 12、16, 分布于海拔

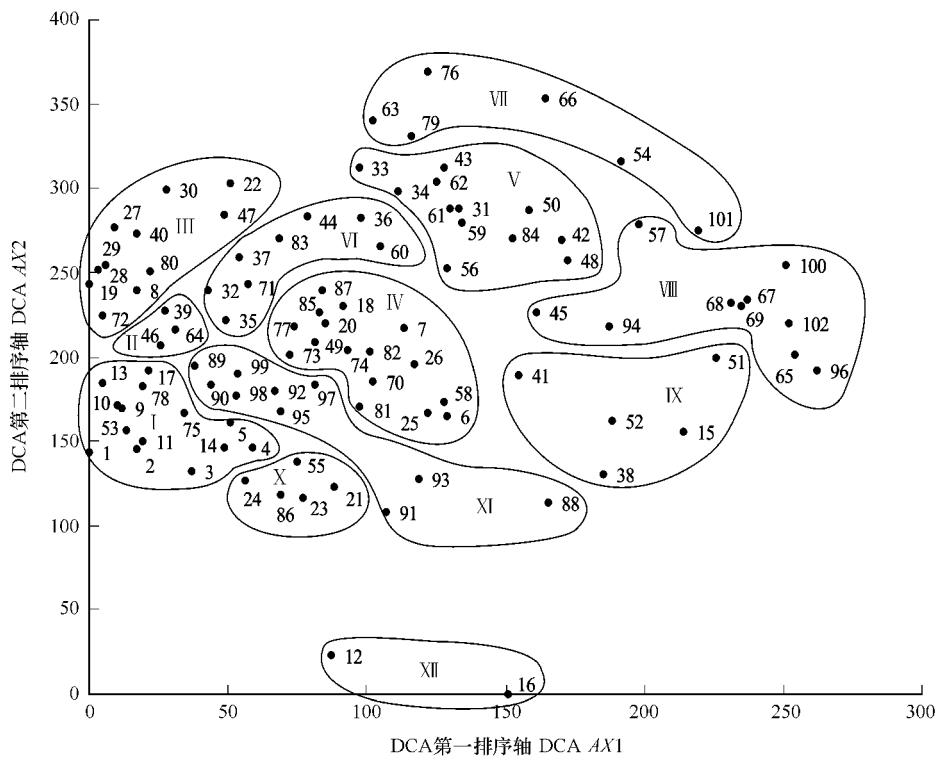


图3 皇姑梁小流域102个样方的DCA二维排序图

Fig. 3 Two-dimensional DCA ordination diagram of 102 quadrats in Huangguliang small watershed, Shanxi

I, II, III, …, XII represent 12 associations of artificial vegetation produced by TWINSpan

于海拔较低的阳坡,土壤水分含量较少,野生植物的侵入种类较少;而群丛 I、群丛 VI 和群丛 V 是由油松、沙棘、柠条锦鸡儿组成的混交林,位于海拔较高的半阴坡、阴坡和梁坡顶,土壤水分含量较高,野生植物的侵入种类较多,人工植物群落向地带性植物群落方向快速演进,群落物种多样性不断增加,说明混交林的生态恢复效果优于纯林,人类干预可加速人工植物群落的演替进程^[27],这一结论进一步验证了张金屯等关于人类的有益干预可以加快演替进程,但只能加快演替速度,不能改变演替方向的观点^[28]。从上述分析可见,DCA 第一、二轴与环境因子的关系密切,人工植物群落的分布明显受海拔、土壤水分、人为干扰等环境因子的制约^[29~31],说明 DCA 排序较好地反映了皇姑梁人工植物群落的生态关系。

表2 皇姑梁小流域12个人工植物群落的土壤含水量和物种多样性

Table 2 Soil moisture and species diversity of 12 associations of artificial vegetation in Huangguliang small watershed, Shanxi

群落类型序号 Community number	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
盖度 Average coverage (%)	84.50	65.33	75.73	86.19	59.17	82.13	65.00	62.50	60.40	70.40	72.10	43.50
土壤水分含量 Soil moisture (%)	10.331	10.314	9.226	9.034	9.643	9.263	6.790	9.087	8.195	9.198	10.733	8.713
香农-威纳指数 H' Shannon-Weiner index H'	2.198	1.778	2.077	1.927	1.796	1.776	1.732	1.853	1.938	1.969	2.160	1.747

土壤含水量为 0~10cm 土壤的含水量的平均值 Soil moisture is the average from 0~10cm soil moisture

4.3 群落的物种多样性

应用 Shannon-Weiner 指数计算每个样方的物种多样性指数 H' ,用 102 个样方的物种多样性指数 H' 与 DCA 第一、二轴的特征值作图(图 4),图中圆圈的大小表示多样性的值,圆圈越大,物种多样性的值就越高。从图中可以看出,物种多样性与 DCA 第一、二轴呈现较明显的相关关系,即从左到右、从下到上,随着土

壤含水量的减少,物种多样性逐渐降低。因为随着土壤水分含量的减少,植物的生境条件变差,群落物种多样性降低。也即分布在 DCA 第一轴左方的群丛 I、群丛 XI、群丛 III、群丛 X 的物种多样性较高,而分布在该排序轴的右方的群丛 VII 和群丛 VIII 物种多样性较低;分布在 DCA 第二轴下方的群丛 I、群丛 X 的物种多样性较高,而分布在该排序轴的上方的群丛 V、群丛 VII 的物种多样性较低。从生境特点看,分布在半阳坡、半阴坡、阴坡和海拔较高处的人工植物群落物种多样性较丰富,而分布在阳坡和海拔较低处的人工植物群落,由于土壤水分含量较少,植物生境条件恶劣,群落物种多样性降低。由此可见,DCA 第一、二排序轴与物种多样性的关系较为密切,说明人工植物群落的空间分异规律与物种多样性相关联,并且土壤含水量对皇姑梁人工植物群落的物种多样性影响显著。

5 结论与讨论

5.1 TWINSpan 分类客观地反映植物群落间的生态关系

TWINSpan 等级分类将皇姑梁人工植物群落 102 个样方 98 个种划分为 12 个植物群丛类型,其分类矩阵图反映出明显的综合环境梯度,即土壤含水量、坡向、海拔高度和栽培时间梯度。群落的排列从左向右,土壤含水量逐渐减少,植被类型由分布于海拔较高、土壤含水量较多的油松-沙棘-披碱草群丛向海拔较低、土壤含水量较少的柠条锦鸡儿-披碱草+茵陈蒿群丛过渡,分类结果比较客观地反映了植物群落类型及优势种的分布与环境因子之间的关系,并在 DCA 二维排序图上得到了较好的验证。DCA 排序表明群落生境所在地的土壤含水量、坡向、海拔高度、物种类型及其配置模式等是决定群落类型分布的主要因素。第一轴反映了群落土壤含水量、坡度和栽培时间的梯度变化,第二轴反映了海拔高度和植物生态生活型的变化,即从左到右群落土壤水分逐渐减少,干燥度增加,植物栽培时间变短,从下到上海拔高度逐渐降低,土壤水分逐渐减少,人工植物种类由乔木向灌木过渡。因此随着海拔高度和湿度等的环境因子的变化^[28, 32],皇姑梁人工植物群落的物种类型发生明显变化,在海拔较高的梁坡顶和阴坡,人工植被生长茂盛。

5.2 人工植物群落物种多样性差异与土壤含水量、坡向等因子有关

在半阳坡、半阴坡、阴坡和海拔较高处分布的人工植物群落,因其水分条件较为优越,物种多样性较为丰富,人工植物群落向地带性植物群落方向快速演进,而在阳坡和海拔较低处,由于土壤水分含量较少,植物生境条件差,群落物种多样性降低。

5.3 混交林的物种多样性高于纯林

在皇姑梁小流域,由油松+华北落叶松-沙棘、小叶杨+油松、油松-沙棘、油松-柠条锦鸡儿等组成的乔灌混交林的物种多样性高于柠条锦鸡儿灌木纯林,并且油松+华北落叶松-沙棘混交林的物种多样性高于小叶杨+油松混交林,说明不同物种及其配置模式,群落演替和物种多样性差异明显,混交林的生态恢复效果优于纯林^[33-35],人类干预可加速人工植物群落的演替进程,这一结论进一步验证了张金屯等关于混交林的物种多样性高于纯林及人类干预可以加快演替进程的观点。

5.4 强化人工植被的科学管理,提高生态恢复成效

皇姑梁小流域是黄土高原黄土丘陵沟壑区最典型的小流域之一,该小流域治理前水土流失严重,沟谷植被极少,土壤年侵蚀模数 9600t/km²以上,经过近 20a 的连续治理,该流域人工植被覆盖率达到 71%,土壤年侵蚀模数降至 1000t/km²,水土流失基本控制,自然环境明显改善,生态恢复效益非常明显。对皇姑梁小流域人工植物群落数量分析表明,人工植物群落的演替进程,遵循地带性植物群落演替规律。随着群落演替,野生

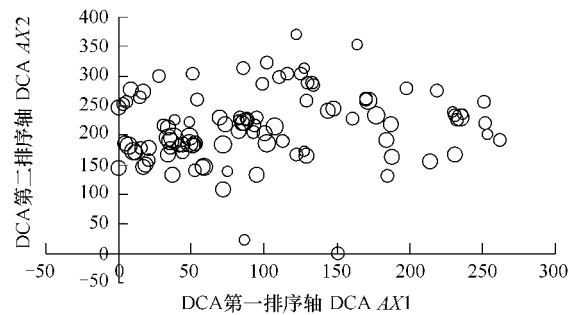


图4 皇姑梁小流域 102 个样方的物种多样性的空间变化
Fig. 4 Spatial characteristics of species diversity of 102 quadrats in Huangguliang small watershed, Shanxi

植物不断侵入,油松、华北落叶松、小叶杨等人工林郁闭度增加,沙棘、柠条锦鸡儿等逐渐退化,油松、华北落叶松、小叶杨等出现枯枝、死株现象,这是自然稀疏的结果。亟待加强管理,解决人工林种植过密及物种替代等问题。

5.5 加强小流域乡土树种选择、人工植被配置模式和恢复过程研究

皇姑梁小流域人工植被调查研究表明,在小流域植被恢复过程中,不同的物种选择和配置模式对人工植被的群落演替和物种多样性影响很大。华北落叶松适合在该小流域海拔较高的梁坡顶、半阳坡、半阴坡和阴坡生长,小叶杨适合在其海拔较低的沟底、半阳坡和半阴坡生长,油松、沙棘、柠条锦鸡儿的生态适应性强,可在其不同海拔和坡向生长。因此加强乡土树种选择、乡土树种造林群落学特性、人工植被配置模式和恢复过程研究^[36],揭示人工植被演替规律及与环境因子的关系,对快速建立自我维持的小流域人工植被生态系统,有效治理水土流失,具有十分重要的指导作用。

References:

- [1] Zhang J T. Fuzzy set ordination and its application. *Acta Ecologica Sinica*, 1992, 12(4): 325—331.
- [2] Hill M O. TWINSPLAN—a FORTRAN program for arranging multivariate data in an ordered two-way table by classification of the individuals and attributes. New York: Cornell University, 1979.
- [3] Braak C J F. CANOCO—a FORTRAN program for canonical community ordination by [Partial] [Detrended] [Canonical] correspondence analysis, principle component analysis and redundancy analysis. New York: Cornell University Press, 1991.
- [4] Hill M O. Reciprocal analysis, an eigenvector method of ordination. *Journal of the Ecology*, 1973, 61: 237—249.
- [5] Hill M O, Gauch H G. Detrended correspondence analysis, an improved ordination technique. *Vegetatio*, 1980, 42: 47—58.
- [6] Niu J M, Hu H. The review of study on relationship between vegetation and environments in China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis NeiMongol*, 2000, 31(1): 76—80.
- [7] Li S Q, Li B, Zhang J T. Study of numerical regionalization of vegetation in Loess Plateau. *Environmental Science & Technology*, 2005, 28(3): 60—62.
- [8] Zhang F, Zhang J T. Research progress of numerical classification and ordination of vegetation in China. *Journal of Shanxi University (Nat. Sci. Ed.)*, 2000, 23(3): 278—282.
- [9] Yu X H, Li X W, Bai J L. Research progress and development trend on numerical analysis of vegetation in China. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(4): 448—45.
- [10] Zhang J T, Mi X C, Zheng F Y, *et al.* Analyses of ecological relations of subalpine meadow Wutai Mountains. *Acta Agrestia Sinica*, 1997, 5(3): 181—186.
- [11] Li B, Zhang J T. Analysis of relationships between vegetation and climate variables in Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(1): 82—89.
- [12] Duan W B, Ren C M. Evaluation of sustainable development of typical small watershed in Lountainous area—A case study from Sanduhe small watershed in Beijing. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(4): 187—190.
- [13] Li S Q, Wu D M, Zhang J T. Effects of vegetation and fertilization on weathered particles of coal gob in Shanxi mining areas, China. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, 124: 209—216.
- [14] Liu Q J, Hu L L, Li X R. Plant diversity in Qianyanzhou after 20 years of small watershed treatment. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(5): 766—774.
- [15] Zhang K, Yang Z H, Chen Q B, *et al.* Study on vegetation restoration in Yangpaihe small watershed. *Journal of Yunnan University*, 2006, 28 (Suppl.): 311—313.
- [16] Gong J, Chen L D, Fu B J, *et al.* Effects of vegetation restoration on soil nutrient in a small catchment in hilly loess area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1): 93—96.
- [17] Quan H. A review of ecosystem restoration of small watershed in mountain area. *Science of Soil and Water Conservation*, 2006, 4(4): 103—108.
- [18] Small watershed treatment mode of Huangguliang. <http://news.sina.com.cn/o/2006-11-04/0440109632s.shtml/>.
- [19] Yan C H. Geobotany. Beijing: Science Press, 2003. 184.
- [20] Wang B S. Plant ecology. Beijing: Higher Education Press, 1988. 263—265.
- [21] Zhu J R, Lu L D, Chen Y L, *et al.* Dictionary of seed-plant names Latin-Chinese-English (2nd ed.). Beijing: Science Press, 2003.
- [22] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (3rd ed.). Beijing: China Agricultural Press, 2000. 22—24.
- [23] Zhang J T. Quantitative ecology. Beijing: Science Press, 2004. 20—220.
- [24] Greig-Smith P. Quantitative plant ecology (3rd ed.). Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1983. 54—104.

- [25] Guo X Y, Zhang J T, Gong H L, *et al.* Analysis of changes of the species diversity in the process of vegetation restoration in Antaibao Mining Field, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4): 763—770.
- [26] Compile committee of China Vegetation. China vegetation. Beijing: Science Press, 1983. 143—156.
- [27] Wang L, Zhang J T, Ou Y H. Ecological relationship in Lishan Mountain meadow. *Journal of Mountain Science*, 2004, 22(6): 669—674.
- [28] Zhang J T, Qiu Y, Chai B F, *et al.* Succession analysis of plant communities in Yancun low-middle hills of Luliang Mountains. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2000, 9(2): 34—39.
- [29] Zhang J T, Chai B F, Qiu Y, *et al.* Changes in species diversity in the succession of plant communities of abandoned land in Luliang Mountain, western Shanxi. *Chinese Biodiversity*, 2000, 8(4): 378—384.
- [30] Zhang J T, Ru W M, Li B. Relationships between vegetation and climate on the Loess Plateau in China. *Folia Geobotanica*, 2006, 41: 151—163.
- [31] Fan W, Wang X A, Guo H. Analysis of plant community successional series in the Ziwuling area on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 706—714.
- [32] Wang Y J, Tao J P, Zhang W Y, *et al.* Dynamics of species diversity in vegetation restoration on Tudiling of Mao County, Southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 1028—1036.
- [33] Hao R, Bai Z K, Zhao J K, *et al.* Vegetation dynamics during plant rehabilitation in degraded mined land of large opencast coal mine with in loess area. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(8): 1470—1476.
- [34] Wu Q X, Yang W Z. Vegetation restoration and sustainable development on the Loess Plateau. Beijing: Science Press, 1998. 231—254.
- [35] Cheng J M, Wan H E. Vegetation restoration and soil conservation on the Loess Plateau in China. Beijing: Forestry Press, 2002. 21—23.
- [36] Fu B J, Zhao W W, Chen L D. Progress and perspective of Geographical-ecological processes. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(11): 1123—1131.

参考文献:

- [1] 张金屯. 模糊数学排序及其应用. *生态学报*, 1992, 12(4): 325~331.
- [6] 牛建明, 呼和. 我国植被与环境关系研究进展. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2000, 31(1): 76~80.
- [7] 李素清, 李斌, 张金屯. 黄土高原植被数量区划研究. *环境科学与技术*, 2005, 28(3): 60~62.
- [8] 张峰, 张金屯. 我国植被数量分类和排序研究进展. *山西大学学报(自然科学版)*, 2000, 23(3): 278~282.
- [9] 庚晓红, 李贤伟, 白降丽. 我国植被数量分析方法的研究概况和发展趋势. *生态学杂志*, 2005, 24(4): 448~45.
- [10] 张金屯, 米湘成, 郑凤英, 等. 五台山亚高山草甸群落生态关系分析. *草地学报*, 1997, 5(3): 181~186.
- [11] 李斌, 张金屯. 黄土高原地区植被与气候的关系. *生态学报*, 2003, 23(1): 82~89.
- [12] 段文标, 任翠梅. 山区典型小流域可持续发展评价——以北京三渡河小流域为例. *中国生态农业学报*, 2005, 13(4): 187~190.
- [14] 刘琪璟, 胡理乐, 李轩然. 小流域治理 20 年后的千烟洲植物多样性. *植物生态学报*, 2005, 29(5): 766~774.
- [15] 张昆, 杨再鸿, 陈奇伯, 等. 姚安县洋派河小流域植被恢复效益研究. *云南大学学报(自然科学版)*, 2006, 28(Suppl.): 311~313.
- [16] 巩杰, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵区小流域植被恢复的土壤养分效应研究. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 93~96.
- [17] 全海. 山区小流域生态恢复研究进展. *中国水土保持科学*, 2006, 4(4): 103~108.
- [18] 岚县皇姑梁小流域治理开发模式. <http://news.sina.com.cn/o/2006-11-04/0440109632s.shtml/>.
- [19] 阎传海. 植物地理学. 北京: 科学出版社, 2003. 184.
- [20] 王伯荪. 植物群落学. 北京: 高等教育出版社, 1988. 263~265.
- [21] 朱家桢, 陆玲娣, 陈艺林, 等. 拉汉英种子植物名称(第 2 版). 北京: 科学出版社, 2006.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析(第 3 版). 北京: 中国农业出版社, 2000. 22~24.
- [23] 张金屯. 数量生态学. 北京: 科学出版社, 2004. 20~220.
- [25] 郭道宇, 张金屯, 宫辉力, 等. 安太堡矿区复垦地植被恢复过程多样性变化. *生态学报*, 2005, 25(4): 763~770.
- [26] 中国植被编辑委员会. 中国植被. 北京: 科学出版社, 1983. 143~156.
- [27] 王琳, 张金屯, 欧阳华. 历山山地草甸的生态关系. *山地学报*, 2004, 22(6): 669~674.
- [28] 张金屯, 邱扬, 柴宝峰, 等. 吕梁山严村低中山区植物群落演替分析. *植物资源与环境学报*, 2000, 9(2): 34~39.
- [29] 张金屯, 柴宝峰, 邱扬, 等. 晋西吕梁山严村流域撂荒地植物群落演替中的物种多样性变化. *生物多样性*, 2000, 8(4): 378~384.
- [31] 范玮熠, 王孝安, 郭华. 黄土高原子午岭植物群落演替系列分析. *生态学报*, 2006, 26(3): 706~714.
- [32] 王永健, 陶建平, 张炜银, 等. 茂县土地岭植被恢复过程中物种多样性动态特征. *生态学报*, 2006, 26(4): 1028~1036.
- [33] 郝蓉, 白中科, 赵景逵, 等. 黄土区大型露天煤矿废弃地植被恢复过程中的植被动态. *生态学报*, 2003, 23(8): 1470~1476.
- [34] 吴钦孝, 杨文治. 黄土高原植被恢复与持续发展. 北京: 科学出版社, 1998. 231~254.
- [35] 程积民, 万惠娥. 中国黄土高原植被恢复与水土保持. 北京: 林业出版社, 2002. 21~23.
- [36] 傅伯杰, 赵文武, 陈利顶. 地理-生态过程研究的进展与展望. *地理学报*, 2006, 61(11): 1123~1131.