

# 荒漠草原弃耕恢复草地土壤与植被的 RDA 分析

王兴<sup>1</sup>, 宋乃平<sup>1</sup>, 杨新国<sup>1\*</sup>, 陈林<sup>1</sup>, 刘秉儒<sup>1</sup>, 曲文杰<sup>1</sup>, 杨明秀<sup>1</sup>, 肖绪培<sup>2</sup>

(1. 宁夏大学西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学资源环境学院, 宁夏 银川 750021)

**摘要:** 土壤质量变劣是沙化的本质, 核心内容为土壤物质流失, 理化性质和生物特性退化, 以及土体构型的变化。弃耕前土壤沙化程度和性质对弃耕地植被恢复进程、演替方向等产生重要影响。为了深入认识弃耕恢复草地不同覆沙厚度条件下, 土壤环境因子和植物之间的关系, 以宁夏盐池荒漠草原弃耕恢复草地为研究对象, 应用冗余分析 (redundancy analysis RDA), 研究弃耕恢复草地随地表覆沙厚度在空间上的连续变化, 植被分布及其多样性变化与主要土壤因子间的关系。结果表明, 1) 随着覆沙厚度的增加植被由达乌里胡枝子群落向苦豆子群落转变; 达乌里胡枝子的重要值由 0.334 降低到 0.104, 苦豆子的重要值由 0 增加到 0.404。2) 植物群落物种多样性指数从 0.32 增加到 0.79, 丰富度指数从 0.13 增加到 0.40, 均匀度指数从 0.11 增加到 0.22。3) 对弃耕地植物群落分布及其物种多样性变化有显著影响的主要土壤环境因子分别为碳酸钙和全盐 (0~10 cm)、碳酸钙 (10~40 cm)。表层土壤碳酸钙含量的变化表征了地带性灰钙土的沙化程度和退化阶段, 弃耕恢复草地当前植物分布格局的形成主要还是特定土壤退化状态约束下物种随机扩散竞争的适应性结果, 覆沙厚度所决定的表层土壤环境因子的直接或间接作用是主要的决定因子, 土壤养分对植被的直接作用尚未充分体现。

**关键词:** 荒漠草原; 弃耕恢复草地; 覆沙厚度; 冗余分析

**中图分类号:** S812.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1004-5759(2014)02-0090-08

**DOI:** 10.11686/cyxb20140211

弃耕地的植被恢复往往表现出较为复杂的演替进程与生物多样性变化特征<sup>[1-3]</sup>。张金屯等<sup>[2]</sup>研究发现, 黄土丘陵区弃耕地植被演替过程中, 物种丰富度显著提高, 均匀度逐渐下降, 综合多样性逐渐增加; 郝文芳等<sup>[4]</sup>发现, 随着黄土丘陵弃耕地演替, 物种丰富度指数、多样性指数和均匀度指数均呈现先增加后减小的趋势; 李进等<sup>[5]</sup>发现, 弃耕地植被演替受多种因素的影响, 弃耕地植物数量和种类的变化具有明显的波动特征。土壤退化状态是决定弃耕地恢复演替的重要因素, 也是影响植被分布格局的关键因子<sup>[6]</sup>。有研究表明, 植被恢复过程中, 土壤养分和有机质等含量有所改善, 而土壤养分的改善有助于植被的恢复<sup>[7-10]</sup>。土壤状况不仅影响着植物群落的演替方向<sup>[11]</sup>, 更进一步决定着植物群落的类型, 分布和动态<sup>[12-13]</sup>。覆沙厚度可能是决定沙化草地演替方向的关键因子<sup>[14]</sup>, 但是有关不同土壤因子在退化荒漠草原植被恢复中的相对重要性及其相互关系依然不甚明了。1961—1983 年, 宁夏盐池县共开垦天然草地  $6.7 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 是导致土地沙化退化的主要因素, 弃耕地治理在区域退化荒漠草原恢复中具有重要地位。本研究以宁夏盐池县杨寨子村弃耕恢复草地为对象, 采用冗余分析 (RDA) 方法, 研究植被分布及其多样性变化与土壤因子之间的关系, 以进一步深化对荒漠草原弃耕地恢复演替规律和约束机制的认识。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于宁夏盐池县柳杨堡乡杨寨子村 ( $37^{\circ}04' \sim 38^{\circ}10' \text{ N}$ ,  $106^{\circ}30' \sim 107^{\circ}41' \text{ E}$ ), 该区地处宁夏回族自治区东部, 北与毛乌素沙地相连, 南接黄土高原。气候属典型的中温带大陆性气候, 年均气温  $8.1^{\circ}\text{C}$ , 无霜期 120 d, 年降水量 250~350 mm, 主要集中在 7—9 月, 占全年降水量的 60% 以上, 且年际变率大, 年平均蒸发量 2710

收稿日期: 2013-04-09; 改回日期: 2013-05-13

基金项目: 国家 973 计划前期研究专项 (2012CB723206) 和国家自然科学基金 (41101301) 资助。

作者简介: 王兴 (1986-), 男, 陕西韩城人, 在读硕士。E-mail: shamohuyang.good@163.com

\* 通讯作者。E-mail: xinguoyang1976@163.com

mm。土壤类型以灰钙土为主,其次是黑垆土和风沙土,此外还有黄土及少量的盐土和白浆土等,表层土壤质地多为轻壤土、沙壤土和沙土,结构松散,肥力较低。该区主要植被类型有灌丛、草原、草甸、沙地植被和荒漠植被,其中人工灌丛、草原、沙地植被分布较广,当地荒漠草原典型建群种短花针茅(*Stipa breviflora*)呈散落的斑块化小面积分布,退化严重。主要草本植物有猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、白草(*Pennisetum centrasaticum*)、草木樨状黄芪(*Astragalus melilotoides*)、山苦荬(*Ixeris chinensis*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)等。

## 1.2 试验设计

2012 年 7 月在杨寨子村选取一处地势较平坦,面积约 5 hm<sup>2</sup> 弃耕恢复草地(1999 年弃耕)作为实验样地。土壤类型为沙化灰钙土,之前由于长期耕作,表土风蚀退化严重,并由西向东,形成一个自然的覆沙厚度递增梯度格局。植被分布也随之出现明显的空间变化。按照由西向东方向,平行设置 3 条调查取样样带,每条样带长 200 m,样带间相隔 20 m 以上,每条样带按覆沙厚度依次设置了 I(沙层厚度 5~8 cm)、II(沙层厚度 10~15 cm)、III(沙层厚度 25~30 cm)、IV(沙层厚度 35~40 cm)4 个调查区,分别进行植被调查和土壤取样。每个调查区内随机布设 1 m×1 m 样方,植被调查指标包括密度、盖度、高度等,同时在每个样方中心,土钻法取土,并按 0~10 cm,10~20 cm,20~40 cm 分层。

## 1.3 测定项目与方法

根据植被调查数据,计算重要值和群落结构特征指数。物种丰富度指数、Shannon—Wiener 多样性指数、均匀度指数的计算方法参照任继周<sup>[15]</sup>的《草业科学研究方法》一书。其中物种重要值的计算公式如下:

$$\text{种的重要值} = (\text{相对盖度} + \text{相对密度} + \text{相对株高}) / 3$$

$$\text{Margalef 丰富度指数}, R = (S - 1) / \ln n$$

$$\text{Shannon—Wiener 多样性指数}, H = -\sum_{i=1}^s (P_i \ln P_i) (i=1, 2, 3, \dots, s)$$

$$\text{Pielou 均匀度指数}, J = \sum P_i \ln P_i / \ln S$$

$$P_i = n_i / n$$

式中, $S$  为群落中的总物种数; $n_i$  为种  $i$  的个体数; $n$  为群落中全部种的总个体数。

土壤理化性质测定:土壤样品风干后过 1 mm 筛,pH 采用电位法;全盐采用电导法;有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化法、土壤活性有机碳采用高锰酸钾氧化法,速效磷采用双酸浸提钼锑抗比色法,碳酸钙采用气量法<sup>[16]</sup>。

## 1.4 数据处理与分析

常规数据统计分析利用 Excel 软件,采用 CANOCO 4.5 对植被与土壤对应关系进行 RDA 分析。

# 2 结果与分析

## 2.1 弃耕恢复草地植物物种组成及其数量特征

根据不同覆沙厚度区植物调查结果,得出物种组成及重要值分布(表 1)。I 区出现的植物有 5 种,分属 2 科 5 属,主要为猪毛蒿+达乌里胡枝子群落;II 区出现的植物有 8 种,分属 4 科 8 属,主要为猪毛蒿+达乌里苦豆子群落;III 区出现的植物有 11 种,分属 4 科 11 属,主要为猪毛蒿+苦豆子群落;IV 区出现的植物有 10 种,分属 5 科 10 属,主要为苦豆子群落。胡枝子、猪毛蒿和苦豆子可以看作弃耕地当前演替阶段的主要建群种,其中猪毛蒿在不同覆沙厚度区均占据重要地位,与其在丰水年份作为一种机会种的扩散行为有关;随着覆沙厚度的增加,达乌里胡枝子的重要值逐渐减小,苦豆子的重要值逐渐增加最终发展为群落建群种。

从 I 区到 IV 区,植物多样性指数均表现出较为一致的变化趋势(表 2),即  $I < II < III < IV$ 。说明随着覆沙厚度的增加,物种数量不断增加,群落结构也得以明显改善。

## 2.2 植物群落的 PCA 排序

为了更直观了解各植物群落空间上的分布格局,对 12 个样方和调查中出现的所有物种的重要值进行排序(图 1),其中前 2 个排序轴的特征值分别为 0.679 和 0.171,前两轴的累积贡献率为 85%。排序图将 12 个样方分

表 1 不同覆沙厚度下弃耕地植物群落物种组成及其重要值

Table 1 Species composition and their importance value of plant communities under different thickness of sand on abandoned cultivated land

| 植物群落组成<br>Species composition                | 重要值 Importance value |       |       |       | 科<br>Family       | 属<br>Genus                  |
|--|----------------------|-------|-------|-------|-------------------|-----------------------------|
|  | I                    | II    | III   | IV    |                   |                             |
| 白草 <i>Pennisetum centrasiaticum</i>          | 0                    | 0.008 | 0.019 | 0.026 | 禾本科 Gramineae     | 狼尾草属 <i>Pennisetum</i>      |
| 谷莠子 <i>Setaria viridis</i> var. <i>major</i> | 0                    | 0     | 0.009 | 0     | 禾本科 Gramineae     | 狗尾草属 <i>Setarla</i>         |
| 苦豆子 <i>Sophora alopecuroides</i>             | 0                    | 0.288 | 0.270 | 0.404 | 豆科 Leguminosae    | 槐属 <i>Sophora</i>           |
| 达乌里胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>              | 0.334                | 0.216 | 0.101 | 0.104 | 豆科 Leguminosae    | 胡枝子属 <i>Lespedeza</i>       |
| 草木樨状黄芪 <i>Astragalus melilotoides</i>        | 0                    | 0.031 | 0.123 | 0.056 | 豆科 Leguminosae    | 黄芪属 <i>Astragalus</i>       |
| 砂珍珠豆 <i>Oxytropis psammocharis</i>           | 0                    | 0     | 0     | 0.047 | 豆科 Leguminosae    | 棘豆属 <i>Oxytropis</i>        |
| 米口袋 <i>Gueldenstaedtia multiflora</i>        | 0.040                | 0.024 | 0.006 | 0.007 | 豆科 Leguminosae    | 米口袋属 <i>Gueldenstaedtia</i> |
| 披针叶黄华 <i>Thermopsis lanceolata</i>           | 0                    | 0.018 | 0.028 | 0     | 豆科 Leguminosae    | 黄华属 <i>Thermopsis</i>       |
| 猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>                | 0.547                | 0.405 | 0.396 | 0.351 | 菊科 Compositae     | 蒿属 <i>Artemisia</i>         |
| 山苦荬 <i>Ixeris chinensis</i>                  | 0.020                | 0     | 0.013 | 0.027 | 菊科 Compositae     | 苦荬菜属 <i>Ixeris</i>          |
| 叉枝鸦葱 <i>Scorzonera divaricata</i>            | 0.179                | 0     | 0     | 0     | 菊科 Compositae     | 鸦葱属 <i>Scorzonera</i>       |
| 阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>          | 0                    | 0     | 0.008 | 0     | 菊科 Compositae     | 狗娃花属 <i>Heteropappus</i>    |
| 绵蓬 <i>Corisprum chinganicum</i>              | 0                    | 0     | 0     | 0.280 | 藜科 Chenopodiaceae | 虫实属 <i>Corispermum</i>      |
| 乳浆大戟 <i>Euphorbia esula</i>                  | 0                    | 0.031 | 0     | 0.023 | 大戟科 Euphorbiaceae | 大戟属 <i>Euphorbia</i>        |
| 远志 <i>Polygala tenuifolia</i>                | 0                    | 0     | 0.019 | 0     | 远志科 Polygalaceae  | 远志属 <i>Polygala</i>         |

为 A、B、C 3 个生态功能区,A 代表Ⅳ区苦豆子+猪毛蒿群落;B 代表Ⅱ、Ⅲ过渡区,主要由猪毛蒿、苦豆子等优势植被以及山苦荬、阿尔泰狗娃花、绵蓬等杂类草组成;C 代表Ⅰ区胡枝子+猪毛蒿群落。整体来看,沿胡枝子+猪毛蒿群落向苦豆子+猪毛蒿群落方向,胡枝子优势度逐渐减小,苦豆子优势度不断增加,同时一些杂类草的种类和数量也明显增加,群落物种丰富度明显改善。如图 1 所示,物种箭头夹角余弦值代表了植物的种间关系,3 个建群种胡枝子、猪毛蒿和苦豆子之间存在不同程度的负相关关系,其中苦豆子与胡枝子和猪毛蒿负相关较强,胡枝子与猪毛蒿间较弱。说明伴随覆沙厚度的变化,弃耕恢复草地主要物种的生态位发生了明显的分化。

2.3 植物群落与土壤环境因子的 RDA 分析

由表 3 可知,植物群落及其多样性与 0~10 cm 和 10~20 cm 土壤环境因子的 RDA 排序结果中,前 2 个排序轴特征值分别为 0.825 和 0.174,植物群落及其多样性与土壤环境因子 2 个排序轴的相关性均为 1,前 2 个排序轴特征值占总特征值的 99.9%。前 2 个排序轴的物种环境相关系数很高,共解释物种和环境总方差的 99.9%。植物群落及其多样性指数与 20~40 cm 土壤环境因子的 RDA 排序结果中,前 2 个排序轴特征值分别为 0.739 和 0.078,植物群落及其多样性与土壤环境因子 2 个排序轴的相关性分别为 0.952 和 0.651,前 2 个排序轴特征值占总特征值的 81.70%。整体来看,植物群落及其多样性与不同层土壤环境因子间的 RDA 排序效果均较好。

0~10 cm 土壤与植物 RDA 分析中(表 4),第 1 排序主要反映了土壤全盐、碳酸钙和活性有机碳的变化趋

表 2 不同覆沙厚度下弃耕地植物多样性指数

Table 2 The diversity index of plant under different thickness of sand on abandoned cultivated land

| 不同覆沙厚度区<br>Area of different<br>sand bed<br>thickness | 丰富度指数<br>Richness<br>index<br>(R) | 多样性指数<br>Shannon—Wiener<br>index<br>(H) | 均匀度指数<br>Evenness<br>index<br>(J) |
|---|-----------------------------------|---|-----------------------------------|
| I   | 0.32±0.05                         | 0.13±0.04                               | 0.11±0.04                         |
| II  | 0.55±0.30                         | 0.17±0.07                               | 0.11±0.02                         |
| III   | 0.80±0.12                         | 0.33±0.15                               | 0.17±0.08                         |
| IV  | 0.79±0.15                         | 0.40±0.28                               | 0.22±0.15                         |

势,这3个因子与第1排序轴的相关系数分别为-0.5616、-0.5491和-0.3706;第2排序轴主要反映了土壤活性有机碳变化趋势,其与排序轴的相关系数为0.3846。10~20 cm土壤与植物RDA分析中,第1排序轴主要反映了土壤碳酸钙和有机碳变化趋势,这2个因子与第1排序轴的相关系数分别为-0.8680和-0.4430;第2排序轴主要反映了土壤有效磷的变化趋势,其与排序轴的相关系数为0.3297。20~40 cm土壤与植物RDA分析中,第1排序轴主要反映了土壤碳酸钙、活性有机碳和全盐的变化趋势,这3个因子与第1排序轴的相关系数分别为0.8679、0.7833和0.6724;第2排序轴主要反映了土壤pH变化趋势,其与排序轴的相关系数为0.3394。上述分析说明,影响植物群落及其多样性变化的主要土壤环境因子分别为0~10 cm土壤中的全盐、碳酸钙和活性有机碳;10~20 cm土壤中的土壤碳酸钙、有机碳和有效磷;20~40 cm中的土壤碳酸钙、活性有机碳、全盐和pH。0~40 cm土层,碳酸钙的重要性十分突出,对植被分布具有全局性的作用,土壤有机碳、活性有机碳、有效磷、全盐和pH则在不同土层表现出其对植被的相对作用。

并不是每个土壤因子对植物群落都有显著性影响。应用前向选择和蒙特卡罗(Monte Carlo permutation test)检验分析每个土壤因子对植物影响的显著性。结果表明,0~10 cm土壤全盐和碳酸钙共同对植物群落及其多样性变化有显著性解释作用( $P=0.048,F=3.536;P=0.040,F=3.798$ ),二者对植物多样性的解释量占有土壤环境因子解释量的73.8%;10~20 cm土壤碳酸钙对植物群落及其多样性有显著性影响( $P=0.020,F=16.439$ ),其贡献量占76.2%。20~40 cm土壤碳酸钙对植物群落及其多样性有显著性影响( $P=0.020,F=12.568$ ),其贡献量占60.1%。

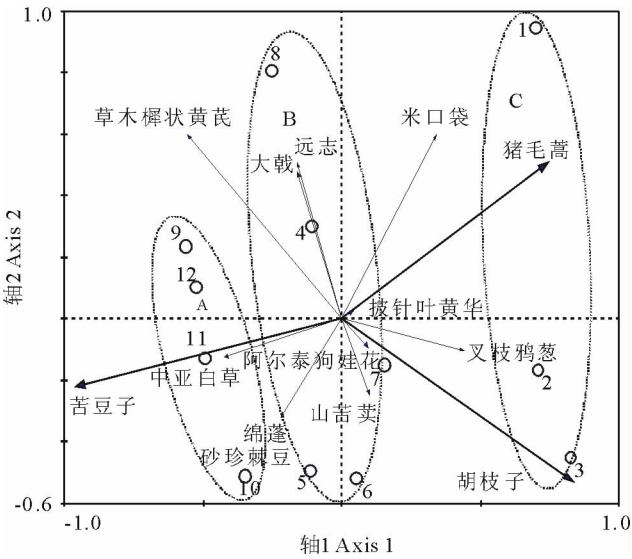


图 1 物种重要值 PCA 排序图

Fig. 1 PCA ordination of species importance value

草木樨状黄芪 *A. melilotoides*, 乳浆大戟 *E. esula*, 远志 *P. tenuifolia*, 苦豆子 *S. alopecuroides*, 白草 *P. centrasiaticum*, 绵蓬 *C. chinganicum*, 砂珍棘豆 *O. psammocharis*, 米口袋 *G. multiflora*, 猪毛蒿 *A. scoparia*, 披针叶黄华 *T. lanceolata*, 阿尔泰狗娃花 *H. altaicus*, 叉枝鸦葱 *S. divaricata*, 谷莠子 *S. viridis* var. *major*, 山苦荬 *I. chinensis*, 胡枝子 *L. bicolor*.

表 3 RDA 排序结果

Table 3 RDA ordination summary

| 参数<br>Parameters                               | 0~10 cm    |            | 10~20 cm   |            | 20~40 cm   |            |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|  | 轴 1 Axis 1 | 轴 2 Axis 2 | 轴 1 Axis 1 | 轴 2 Axis 2 | 轴 1 Axis 1 | 轴 2 Axis 2 |
| 特征值 Eigenvalues                                | 0.825      | 0.174      | 0.825      | 0.174      | 0.739      | 0.078      |
| 变量累积百分比 Cumulative percentage variance         |            |            |            |            |            |            |
| 物种数据 Species data                              | 82.5       | 99.9       | 82.5       | 99.9       | 73.9       | 81.7       |
| 物种—环境关系 Species-environment relationship       | 82.5       | 99.9       | 82.5       | 99.9       | 90.4       | 100.0      |
| 物种—环境相关性 Species-environment correlations      | 1          | 1          | 1          | 1          | 0.952      | 0.651      |
| 所有特征值之和 Sum of all eigenvalues                 | 1          |            | 1          |            | 1          |            |
| 所有典范特征值之和 Sum of all canonical eigenvalues     | 1          |            | 1          |            | 0.818      |            |
| 变量解释 Variance explain (%)                      | 99.90      |            | 99.90      |            | 81.70      |            |
| 蒙特卡罗检验 Summary of Monte Carlo test             |            |            |            |            |            |            |
| 第一典范轴 P 值 Significance of first canonical axis | 0.002      |            | 0.002      |            | 0.030      |            |
| 所有典范轴 P 值 Significance of all canonical axis   | 0.002      |            | 0.002      |            | 0.044      |            |

表 4 环境因子与 RDA 排序轴相关性分析

Table 4 Correlations between environmental factors with the ordination axis

| 土壤参数<br>Soil parameters          | 0~10 cm    |            | 10~20 cm   |            | 20~40 cm   |            |
|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                                  | 轴 1 Axis 1 | 轴 2 Axis 2 | 轴 1 Axis 1 | 轴 2 Axis 2 | 轴 1 Axis 1 | 轴 2 Axis 2 |
| pH 值 pH value                    | 0.1360     | 0.1173     | 0.0213     | 0.3041     | 0.1135     | 0.3394     |
| 土壤全盐 Soil salt                   | -0.5616    | 0.0736     | -0.2936    | 0.1622     | 0.6724     | -0.3097    |
| 土壤有机碳 Soil organic carbon        | -0.2993    | -0.2750    | -0.4430    | 0.1430     | 0.4371     | 0.2524     |
| 土壤活性碳 Soil activated carbon      | -0.3706    | 0.3846     | -0.3261    | 0.0576     | 0.7833     | 0.2533     |
| 土壤有效磷 Soil available phosphorous | 0.0208     | -0.2029    | -0.3452    | 0.3297     | 0.0173     | 0.1005     |
| 碳酸钙 Calcium carbonate            | -0.5491    | -0.1914    | -0.8680    | -0.0160    | 0.8679     | -0.0443    |

2.4 土壤与植被的 RDA 排序图

如图 2 所示,粗箭头代表土壤因子,小三角代表了样方。粗箭头越长表示某一土壤因子对植被的影响越大。箭头连线和排序轴夹角表示某一土壤因子与排序轴相关性大小,夹角越小相关性越高。0~10 cm 土层 RDA 排序图中(图 2A),丰富度指数、多样性指数和均匀度指数均与土壤全盐、碳酸钙、有机碳和活性有机碳呈负相关;与 pH 值和速效磷呈正相关。沿 RDA 第 1 排序轴,从左到右,随着显著性影响因子,土壤全盐和碳酸钙含量的降低,多样性指数均增加。沿第 2 排序轴从下到上,随着土壤速效磷含量的降低,丰富度指数逐渐减小;随着 pH 的增大,均匀度指数和多样性指数增加。排序结果表明,随着覆沙厚度的增加,土壤盐渍程度减弱,土壤养分和碳酸钙沉积量逐渐减少。10~20 cm 和 20~40 cm 土层 RDA 排序图中(图 2B,C),丰富度指数、多样性指数和均匀度指数均与显著性影响因子—碳酸钙呈负相关。图 2B 中,沿 RDA 第 1 排序轴,从左到右,随着碳酸钙含量的降低,多样性指数均增加。图 2C 中,从右到左,随着碳酸钙含量的降低,物种丰富度指数、多样性指数和均匀度指数均增加。排序结果表明,随着覆沙厚度的增加,10~40 cm 土层土壤中碳酸钙沉积量减少,植物群落多样性指数增加。RDA 排序图中植物群落分布特征均表现为:达乌里胡枝子+猪毛蒿群落分布于高碳酸钙沉积的侵蚀灰钙土斑块上,苦豆子+猪毛蒿群落分布于少量碳酸钙沉积的覆沙斑块上。

3 讨论

弃耕地植被演替属于次生演替,是群落内部关系与外界环境中各种生态因子的综合作用的结果。杜峰等<sup>[17]</sup>研究表明,土壤水分含量及变异量、有机质、速效磷等对黄土丘陵撂荒群落影响较大。白文娟等<sup>[18]</sup>研究表明,影响植物群落变化的因子有土壤水分、速效磷、土壤种子库。尚占环等<sup>[19]</sup>研究表明,山地荒漠植物多样性主要受土壤水分、有机质和盐分的影响。余伟莅等<sup>[20]</sup>在浑善达克沙地东南部退化草场的研究表明,土壤有机质,速效磷和水分对植物分布和物种组成有显著性影响。由此可见不同土壤因子在不同地区,不同的研究尺度下对植被的影响不同。

本研究中,对弃耕地植物群落及其多样性有显著性影响的土壤环境因子分别为 0~10 cm 土壤中的全盐、碳酸钙和 10~40 cm 土壤中的碳酸钙。土质是决定全盐含量的一个重要因素,全盐含量显著影响群落的分布则主要与建群种的生物学特性有关,同时,植被的恢复演替与植物种子的萌发密切相关<sup>[21]</sup>,苦豆子植株体及其种子的耐盐性较差,含盐量高的区域限制苦豆子种群的扩散<sup>[22]</sup>。程中秋等<sup>[23]</sup>对宁夏盐池植物生态位的研究表明,生态位宽度苦豆子最大,其次为阿尔泰狗娃花、乳浆大戟、细叶山苦荚等杂草,达乌里胡枝子相对较小,这与本研究的结果基本吻合。

本实验结果中,土壤碳酸钙对植物群落的作用尤为突出,这在以往的研究中尚未见报道。碳酸钙含量与原生境的灰钙土侵蚀退化程度直接相关,覆沙厚度较浅的斑块除表层呈现风蚀粗骨化特征外,通体维持较为典型的原始灰钙土特征,表层碳酸钙含量明显高于覆沙较厚的以苦豆子为建群种的草地斑块,其表层土质更接近于风沙土类型。说明调查区植物群落的分布主要是覆沙厚度所决定的表层土壤物理性质变化的结果。

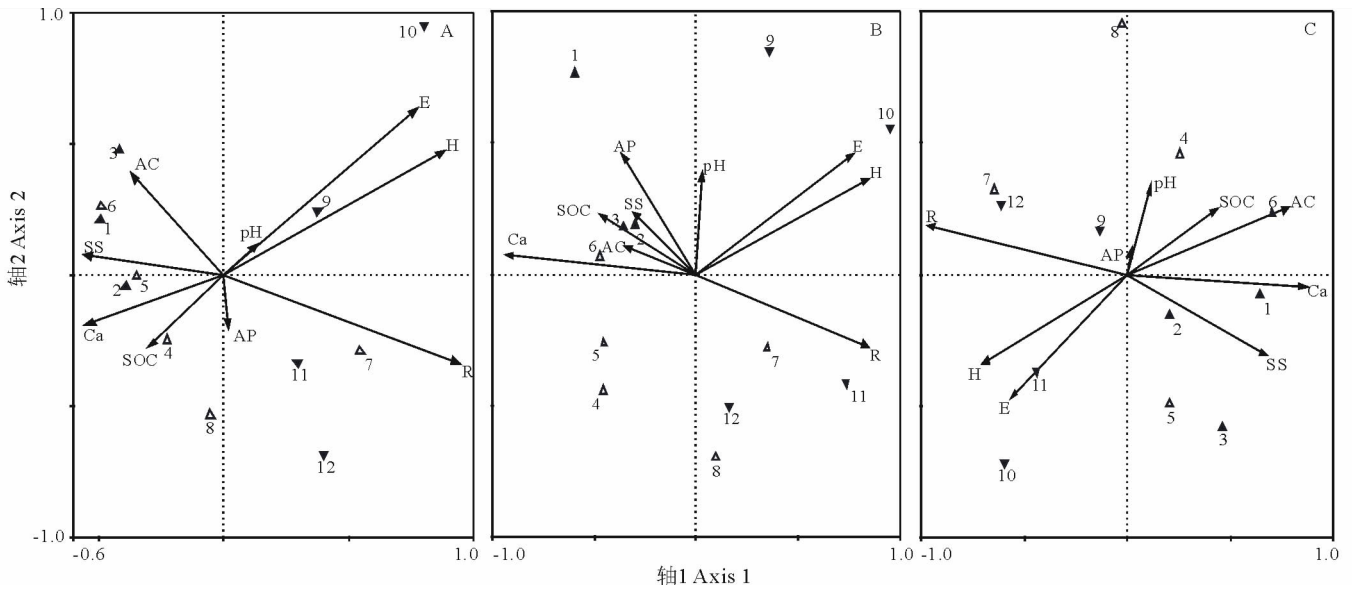


图 2 土壤与植被 RDA 排序图

Fig. 2 RDA ordination of soil factors and plant community

▲达乌里胡枝子+猪毛蒿群落 The plant community of *Lespedeza bicolor* and *Artemisia scoparia*. △苦豆子+猪毛蒿群落 The plant community of *Sophora alopecuroides* and *Artemisia scoparia*. ▼苦豆子群落 The plant community of *Sophora alopecuroides*.

SOC: 有机碳 Soil organic carbon content; AC: 土壤活性碳 Soil activated carbon; AP: 土壤速效磷 Soil available phosphorous; Ca: 碳酸钙 Calcium carbonate; R: 丰富度指数 Richness index; H: 香浓维纳指数 Shannon—Wiener index; E: 均匀度指数 Evenness index.

A: 0~10 cm 土壤因子与植物群落排序图 Ordination of soil factors and plant community of 0—10 cm. B: 10~20 cm 土壤因子与植物群落排序图 Ordination of soil factors and plant community of 10—20 cm. C: 20~40 cm 土壤因子与植物群落排序图 Ordination of soil factors and plant community of 20—40 cm. 1~12 为样方号 1—12 indicate quadrat number.

草地恢复过程中,土壤性状会发生一系列的演变,土壤养分含量显著增加<sup>[24]</sup>,植物群落演替与土壤养分的变化关系密切<sup>[25]</sup>,但两者的演替进程不尽相同。李永强<sup>[24]</sup>对弃耕地土壤特性研究表明,草原弃耕地演替过程中,土壤养分呈现先降低后升高趋势,土壤养分变化相对于植被变化具有滞后性。土壤养分与植被的相关性一般在演替后期逐渐加强<sup>[26,27]</sup>。调查区土壤养分对植物群落影响不显著,很可能与弃耕前土壤养分库大量流失有关<sup>[28]</sup>,导致土壤整体较为贫瘠,相对碳酸钙和全盐等土壤环境性因子,土壤主要养分与植被间的关系明显弱化。同时说明,研究区弃耕恢复草地整体尚处于演替的早中期,土壤质量并未发生显著的改善,土壤发育整体滞后于植被演替进程。

#### 4 结论

随着覆沙厚度的变化,荒漠草原弃耕恢复草地植物群落分布表现出由达乌里胡枝子群落向苦豆子群落演替的趋势,一年生植物猪毛蒿在丰水年大量发生,在研究区呈现一种蔓延趋势。弃耕地植物群落及其多样性的显著影响因素分别为 0~10 cm 土壤碳酸钙和全盐、10~40 cm 土壤碳酸钙含量,主要土壤养分因子则未表现出显著相关性。研究区弃耕演替草地尚处于演替早中期阶段,当前植物分布格局的形成主要还是特定土壤退化状态约束下,物种随机扩散竞争的适应性结果。覆沙厚度所决定的表层土壤环境因子的直接或间接作用是主要的决定因子,土壤养分对植被的直接作用尚未充分体现。

#### 参考文献:

- [1] 杜国祯,王刚. 亚高山草甸弃耕地群落演替的数量分析与排序[J]. 草业学报, 1990, 1(1): 108-116.
- [2] 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[J]. 生物多样性, 2000, 8(4): 378-384.

- [3] 郑翠玲, 曹子龙, 赵延宁, 等. 浑善达克沙地南缘农牧交错带弃耕地植被的演替规律[J]. 中国水土保持学报, 2005, 3(1): 72-76.
- [4] 郝文芳, 梁宗锁, 陈存根, 等. 黄土丘陵区弃耕地群落演替过程中的物种多样性研究[J]. 草业科学, 2005, 22(9): 2-8.
- [5] 李进, 赵雪, 宝音, 等. 河北坝上弃耕地植被的演替特征及环境因子的影响[J]. 中国沙漠, 1994, 14(4): 16-21.
- [6] 焦菊英, 马祥华, 白文娟, 等. 黄土丘陵沟壑区退耕地植物群落与土壤环境因子的对应分析[J]. 土壤学报, 2005, 42(5): 744-752.
- [7] 巩杰, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵区小流域土地利用和植被恢复对土壤质量的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2292-2296.
- [8] Gebhart D L, Johnson H B, Mayeux H S, *et al.* The CRP increases soil organic carbon[J]. Soil and Water Conservation, 1994, 49(5): 488-492.
- [9] 张俊华, 常庆瑞, 贾科利, 等. 黄土高原植被恢复对土壤肥力质量的影响研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 38-41.
- [10] Karlen D L, Rosek M J, Gardner J C, *et al.* Conservation reserve program effects on soil quality indicators[J]. Soil Water Conservation, 1999, 54(1): 439-444.
- [11] 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[J]. 植物生态学报, 2000, 24(4): 477-482.
- [12] 宋丽娟, 吴发启, 姚军, 等. 弃耕地植被恢复过程中土壤理化性质演变趋势研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3): 168-173.
- [13] 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[J]. 应用生态学报, 2001, 12(5): 687-691.
- [14] 陈一鹏, 刘康. 宁夏中东部沙漠化草原的植被演替[J]. 中国沙漠, 1995, 15(1): 54-59.
- [15] 任继周. 草业科学研究方法(第1版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析(第3版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 28-49.
- [17] 杜峰, 徐学选, 张兴昌, 等. 陕北黄土丘陵区撂荒群落排序及演替[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5418-5427.
- [18] 白文娟, 焦菊英, 张振国. 黄土丘陵沟壑区退耕地土壤种子库对植被恢复的影响[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(4): 65-71.
- [19] 尚占环, 姚爱兴, 龙瑞军, 等. 山地荒漠草原植物群落多样性与环境因子动态关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(2): 163-167.
- [20] 余伟莅, 郭建英, 胡小龙, 等. 浑善达克沙地东南部退化草场植物群落 DCCA 排序与环境解释[J]. 干旱区地理, 2008, 31(5): 759-762.
- [21] 焦菊英, 王宁, 杜华栋, 等. 土壤侵蚀对植被发育演替的干扰与植物的抗侵蚀性研究进展[J]. 草业学报, 2012, 21(5): 311-318.
- [22] 杨辉. 苦豆子种群扩散的生物生态学基础[D]. 新疆: 新疆大学, 2005.
- [23] 程中秋, 张克斌, 常进, 等. 宁夏盐池不同封育措施下的植物生态位研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1537-1542.
- [24] 李永强. 草地撂荒地演替过程中植被动态及土壤特性的研究[D]. 内蒙古: 内蒙古大学, 2003.
- [25] 单贵连, 初晓辉, 田青松, 等. 典型草原恢复演替过程中土壤性状动态变化研究[J]. 草业学报, 2012, 21(4): 1-9.
- [26] 张莉, 王长庭, 刘伟, 等. 不同建植期人工草地优势种植物根系活力、群落特征及其土壤环境的关系[J]. 草业学报, 2012, 21(5): 185-194.
- [27] 郑秋红, 张宏, 贾海坤, 等. 怀来盆地弃耕地自然恢复过程中土壤养分动态[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(1): 24-28.
- [28] 曲国辉, 郭继勋. 松嫩平原不同演替阶段植物群落和土壤特性的关系[J]. 草业学报, 2003, 12(1): 18-22.

**Redundancy analysis of soil and vegetation of recovered grassland on abandoned land in the desert steppe**WANG Xing<sup>1</sup>, SONG Nai-ping<sup>1</sup>, YANG Xin-guo<sup>1</sup>, CHEN Lin<sup>1</sup>, LIU Bing-ru<sup>1</sup>,QU Wen-jie<sup>1</sup>, YANG Ming-xiu<sup>1</sup>, XIAO Xu-pei<sup>2</sup>

(1. Breeding Base of State Key Laboratory for Preventing Land Degradation and Ecological Restoration, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. School of Resource and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** The essence of desertification is that soil quality deteriorates. Loss of soil materials, soil physical and chemical properties, deterioration of biological characteristics and the changing of soil structure are the principal features. The previous degrees and nature of soil desertification have important effects on the process of vegetation recovery and the direction of succession after land is abandoned. To develop a deeper understanding of the relationship between plant and soil environmental factors under different thicknesses of sand bed, we studied the relationship between plant distribution, diversity and major soil factors with the changing of surface sand bed thickness in space by redundancy analysis, taking a recovered grassland on abandoned cultivated land in the desert steppe region of Ningxia as the test area. With an increase of sand bed thickness, the *Lespedeza bicolor* plant community was substituted by that of *Sophora alopecuroides*, and the importance of *L. bicolor* decreased from 0.334 to 0.104 while the importance value of *S. alopecuroides* increased from 0 to 0.404. The plant diversity index of Margalef, Shannon—Wiener and Pielou were correspondingly increased; the plant diversity index of Margalef increased from 0.32 to 0.79, that of Shannon—Wiener from 0.13 to 0.40, and that of Pielou from 0.11 to 0.22. The main significant soil environment factors affecting plant distribution and diversity were soil salt and calcium carbonate in the 0—10 cm soil layer and soil calcium carbonate in the 10—40 cm soil layer. The change of soil calcium carbonate content on the surface represented the degree of desertification and the stage of degeneration of the zonal sierozem. At present, the form of plant distribution patterns on recovered grassland in abandoned lands, was mainly the result of adaptability of species diffusing and randomly competing under the given constraints of a specific state of soil degradation. The crucial factors were the direct or indirect effects of surface soil environmental factors decided by sand bed thickness, although the direct action of soil nutrients for vegetation were not fully reflected.

**Key words:** desert steppe; recovered grassland on abandoned land; sand bed thickness; redundancy analysis