

DOI: 10.5846/stxb201702160264

王子婷, 杨磊, 蔡国军, 莫保儒, 柴春山, 戚建莉, 张洋东. 半干旱黄土区坡面尺度柠条生长状况及影响要素分析. 生态学报, 2017, 37(23): 7872-7881.

Wang Z T, Yang L, Cai G J, Mo B R, Chai C S, Qi J L, Zhang Y D. Spatial patterns of *Caragana korshinskii* growth on hillslope scale and influencing factors in the semi-arid Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(23): 7872-7881.

## 半干旱黄土区坡面尺度柠条生长状况及影响要素分析

王子婷<sup>1</sup>, 杨磊<sup>2,\*</sup>, 蔡国军<sup>1</sup>, 莫保儒<sup>1</sup>, 柴春山<sup>1</sup>, 戚建莉<sup>1</sup>, 张洋东<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 甘肃省林业科学研究院, 兰州 730020

<sup>2</sup> 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

**摘要:**以半干旱黄土丘陵区典型小流域坡面大规模人工种植柠条林为例, 基于坡面不同部位柠条生长状况和生境条件调查, 定量分析了地形变化、土壤水分及灌木密度对柠条生长的直接、间接影响及其贡献率。结果表明: (1) 东坡大株柠条生长明显好于南坡, 下坡位柠条生长状况略好于中上坡位, 其他各坡位之间柠条生长状况差异较小; (2) 大株柠条生长与浅层土壤水分有正相关关系, 而与灌木密度和深层土壤水分则呈负相关关系; 大株柠条灌木高度、灌木纵截面积和冠幅体积对浅层土壤水分的响应敏感, 冠幅长度对坡向和坡位的响应较为敏感, 冠幅宽度对灌木密度的响应较为敏感; (3) 地形和土壤水分变化解释了 59.9% 的大株柠条生长变异, 其中坡向、坡位和浅层土壤水分是影响大株柠条生长的主导环境因子, 它们分别解释了 21.1%、16.0% 和 13.1% 的柠条生长变化。研究认为半干旱黄土区人工植被恢复既要重视空间布局, 也要在后期实施必要的管理措施以维持人工林地的稳定性。

**关键词:**黄土高原; 坡面尺度; 坡位; 人工柠条林; 土壤水分

## Spatial patterns of *Caragana korshinskii* growth on hillslope scale and influencing factors in the semi-arid Loess Plateau

WANG Ziting<sup>1</sup>, YANG Lei<sup>2,\*</sup>, CAI Guojun<sup>1</sup>, MO Baoru<sup>1</sup>, CHAI Chunshan<sup>1</sup>, QI Jianli<sup>1</sup>, ZHANG Yangdong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Gansu Academy of Forestry Science, Lanzhou 730020, China

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

**Abstract:** Topography and soil moisture are the key factors affecting the spatial growth patterns of artificial *Caragana korshinskii* shrubs in the semi-arid loess region. However, the recognition of the growth status of *C. korshinskii* shrubs affected by topographic variation, soil moisture content, and shrub density is limited on the hillslope scale. In this study, we selected a typical artificial *C. korshinskii* shrub on the hillslope as a research model, and the data on its growth status and habitat conditions under different (east- and south-facing) slope positions were collected. Furthermore, the relationships between the growth status of *C. korshinskii* shrubs and the shrub density, topographic variation, and soil moisture content were quantitatively analyzed using the Pearson correlation, path analysis, and RDA. The following results were obtained in this study. (1) The growth status of *C. korshinskii* shrubs on the east-facing slope was significantly better than that of the shrubs on the south-facing slope. Furthermore, the growth status of the *C. korshinskii* shrubs on the lower slope position was slightly better than that of the shrubs on the upper or middle slope positions, and no significant difference was observed between the other slope positions. (2) Shallow soil moisture content had a direct, positive effect on the growth

**基金项目:**国家自然科学基金项目(41401209, 41561112); 国家科技支撑计划课题(2015BAC01B02)

**收稿日期:**2017-02-16; **网络出版日期:**2017-07-03

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: leiyang@rcees.ac.cn

status of *C. korshinskii*, and the shrub density and deep soil moisture content had a negative relationship with the growth status of *C. korshinskii*. For the large *C. korshinskii* shrubs, the height, crown diameter multiplied by the height, and canopy volume showed sensitive responses to the shallow soil moisture content. The results also demonstrated that the crown length responded with more sensitivity to the slope aspect and slope position than the other factors did, and the crown width showed a sensitive response to shrub density. (3) The topographical features (slope aspect, position, and gradient) and soil moisture content (shallow and deep soil moisture contents) determined the growth status of *C. korshinskii* shrubs and explained the 59.9% variation in the growth changes. Furthermore, the variation of the growth changes in the slope aspect, slope position, and shallow soil moisture content were 21.1%, 16.0%, and 13.1%, respectively. Therefore, human-introduced vegetation restoration of the semi-arid loess regions should consider the spatial pattern of vegetation based on soil water conditions of the hillslope scale, and the scientific management of the middle and later periods of revegetation is also necessary to sustain the *C. korshinskii* shrub in the semi-arid loess region.

**Key Words:** Loess Plateau; hillslope scale; slope position; artificial *Caragana korshinskii* shrub; soil moisture content

半干旱黄土高原受区域自然条件和人类活动的双重影响,生态环境脆弱、土壤侵蚀严重,一直是我国植被恢复和生态建设的重点区域之一<sup>[1-3]</sup>,人工林草种植已经成为这一地区植被恢复的主要措施<sup>[4-6]</sup>,其中柠条是黄土高原地区人工种植最为广泛的灌木树种之一<sup>[7-8]</sup>。研究认为,黄土高原人工植被恢复需要遵循植被地带性规律<sup>[3-5]</sup>和水资源承载力<sup>[9-10]</sup>。黄土丘陵区地形破碎、沟壑纵横,坡面水热组合条件变化较大<sup>[11-12]</sup>,从而导致人工植被在空间配置中还需充分考虑非地带性因子<sup>[3,5]</sup>,如黄土的质地组成、坡向、坡度、坡位、坡面地形和水分条件的差异,因此在坡面尺度开展人工植被恢复须根据对应的生境条件进行科学配置,否则将不利于人工植被的稳定以及水土流失控制等生态功能的有效发挥<sup>[13]</sup>。关于黄土高原坡面尺度植被恢复的研究,不同的研究者选取了不同的植被类型以期探寻植被恢复与坡面地形环境的响应关系,其中王晶等<sup>[14]</sup>在陕北黄土区封禁流域坡面微地形内以经过自然恢复的植物群落为研究对象,分析其物种组成、数量特征及多样性与环境因子的关系;杨士俊等<sup>[15]</sup>在黄土丘陵区以自然植被为对象,分析植物各功能性状值在科属和群落水平上与环境因子的响应关系;胡婵娟等<sup>[16]</sup>在丘陵沟壑区小流域内,不同坡面上对不同退耕还林植被配置模式下植物物种组成与土壤环境的变化关系进行研究;胡相明等<sup>[17]</sup>在黄土丘陵区从坡面尺度以自然封育形成的天然草地为研究对象,对其结构与地形因素和土壤水分的关系进行了研究。然而,关于大规模植被恢复以后坡面尺度成熟柠条林生长状况及其影响因素的认识还很有限,其与环境因子的定量表达关系还有待进一步深入探讨。本文以黄土高原广泛分布的柠条为例,通过对半干旱黄土区坡面尺度不同部位柠条生长状况的分析与比较,探索坡面尺度柠条生长规律,确定地形、种植密度和土壤水分变化对柠条生长的直接、间接影响及其贡献率,以期对半干旱黄土丘陵区植被恢复模式及空间配置提供科学依据。

## 1 研究区概况

研究区位于甘肃省定西市龙滩小流域(104°27′—104°32′E, 35°43′—35°46′N),属典型半干旱黄土丘陵沟壑区,流域面积 16km<sup>2</sup>,平均海拔 1900m。研究区年平均气温 6.8℃,1 月份平均气温 -7.9℃,极端最高温 38.5℃,平均无霜期 152d,平均日照时数 2052h。多年平均降水量为 386mm,降雨主要集中在 7—9 月份,潜在蒸发量 1439mm。年平均相对湿度 72%,干燥度 1.9。流域内土壤以黄绵土为主,有机质含量低,土壤贫瘠且易侵蚀。天然植被以多年生草本为主,目前主要草本种类长芒草(*Stipa bungeana*)、赖草(*Leymus secalinus*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*),人工栽植的灌乔树种有柠条(*Caragana korshinskii*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)等,其中人工柠条林地面积较大且分布较广,林下草本物种主要有长芒草(*S. bungeana*)、灌木亚菊(*Ajania fruticulosa*)、阿尔泰狗娃花(*H. altaicus*)及骆驼蓬(*Peganum harmala*)等。

## 2 研究方法

### 2.1 监测样点布设

在研究区内依据坡向不同选取 5 个样带,其中东坡取两个样带分别命名为 E1 和 E2,南坡选取 3 个样带分别命名为 S1、S2 和 S3;每条样带自上而下依次选取上坡位、中上坡位、中坡位、中下坡位及下坡位 5 个坡位作为监测样点。坡面 5 条样带内的柠条以水平阶整地的造林方式栽植于 1984 年。

### 2.2 数据采集与分析

于生长季(8 月份)在各监测样点,对柠条林测定 20m×20m 样方内每株柠条的灌木高度、冠幅长度和冠幅宽度,用土钻采集 0—600cm 深度土壤样品,每隔 20cm 采集 1 个土样,利用烘干法测定土壤水分含量。有研究表明,黄土高原地区 0—200cm 深度土壤水分受降水影响相对较大,而 200cm 以下土壤水分受降水影响较小<sup>[18-20]</sup>。因而根据土壤水分对降雨的响应规律,本文选取 0—200cm 深土壤含水量作为浅层土壤水分,200—600cm 深土壤含水量作为深层土壤水分,东坡和南坡不同坡位浅层土壤水分和深层土壤水分含量见表 1。利用南方 S740 手持 GPS 记录各监测样点的经纬度及海拔信息,利用罗盘测定坡度和坡向。

表 1 东坡和南坡不同坡位浅层土壤水分和深层土壤水分

Table 1 Shallow soil moisture and deep soil moisture at different slope positions on east-facing and south-facing slopes

| 坡向<br>Slope<br>aspect | 坡位<br>Slope<br>position | 浅层土壤水分<br>Shallow soil<br>moisture/% | 深层土壤水分<br>Deep soil<br>moisture/% | 坡向<br>Slope<br>aspect | 坡位<br>Slope<br>position | 浅层土壤水分<br>Shallow soil<br>moisture/% | 深层土壤水分<br>Deep soil<br>moisture/% |
|-----------------------|-------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| E1                    | 上坡                      | 6.19                                 | 6.47                              | S1                    | 上坡                      | 5.91                                 | 7.58                              |
|                       | 中上坡                     | 6.25                                 | 6.47                              |                       | 中上坡                     | 6.34                                 | 7.78                              |
|                       | 中坡                      | 5.76                                 | 6.22                              |                       | 中坡                      | 5.96                                 | 7.30                              |
|                       | 中下坡                     | 5.94                                 | 6.40                              |                       | 中下坡                     | 6.24                                 | 6.71                              |
|                       | 下坡                      | 5.95                                 | 6.24                              |                       | 下坡                      | 5.94                                 | 6.65                              |
| E2                    | 上坡                      | 6.72                                 | 7.11                              | S2                    | 上坡                      | 5.64                                 | 8.05                              |
|                       | 中上坡                     | 6.90                                 | 5.77                              |                       | 中上坡                     | 6.08                                 | 7.37                              |
|                       | 中坡                      | 7.43                                 | 5.52                              |                       | 中坡                      | 6.01                                 | 7.22                              |
|                       | 中下坡                     | 8.19                                 | 5.92                              |                       | 中下坡                     | 5.17                                 | 7.34                              |
|                       | 下坡                      | 6.77                                 | 6.77                              |                       | 下坡                      | 6.04                                 | 6.28                              |
|                       |                         |                                      |                                   | S3                    | 上坡                      | 5.71                                 | 7.98                              |
|                       |                         |                                      |                                   |                       | 中上坡                     | 5.97                                 | 7.12                              |
|                       |                         |                                      |                                   |                       | 中坡                      | 4.98                                 | 7.38                              |
|                       |                         |                                      |                                   |                       | 中下坡                     | 5.56                                 | 7.44                              |
|                       |                         |                                      |                                   |                       | 下坡                      | 4.97                                 | 6.63                              |

E1: 东 1 坡, East slope 1; E2: 东 2 坡, East slope 2; S1: 南 1 坡, South slope 1; S2: 南 2 坡, South slope 2; S3: 南 3 坡, South slope 3

数据分析时为了避免样方内每株柠条样本因大小株差异而影响显著性及相关性分析结果,本文在分析统计时首先对样方内的柠条样本按株高将其分为小株( $0 < H \leq 50\text{cm}$ )、中株( $50\text{cm} < H \leq 100\text{cm}$ )和大株( $H > 100\text{cm}$ )<sup>[21]</sup>,在此基础上分别统计代表柠条生长的形态特征值并参考相关研究计算特征值来近似代表每株柠条地上生物量<sup>[21-23]</sup>,包括柠条灌木高度( $H$ )、冠幅长度( $C_L$ )、冠幅宽度( $C_W$ )、冠幅直径( $C$ )、冠幅横截面积( $A$ )、灌木纵截面积( $CH$ )及冠幅体积( $V$ ),其中:冠幅直径  $C = (C_L + C_W)/2$ ,冠幅横截面积  $A = \pi C^2/4$ ,灌木纵截面积  $CH = C \times H$ ,冠幅体积  $V = A \times H$ 。

利用相似性分析(Analysis of similarities, ANOSIM)检验坡向和坡位对大株柠条(中株和小株柠条数据较少不做分析)生长的影响,ANOSIM 分析使用 PRIMER 5.0<sup>[24]</sup>。运用单因素方差分析比较 5 条样带不同坡位对大株和中株柠条 7 个生长指标的影响,采用 Pearson 相关分析不同坡向和不同坡位与坡向大株和中株柠条灌木密度、浅层土壤水分和深层土壤水分与柠条生长的相关关系,利用通径分析确定灌木密度、浅层土壤水分

及深层土壤水分对柠条生长的直接和间接影响,统计分析使用 SPS S21.0。采用 RDA 和 pRDA 分析地形因子(坡向、坡位及坡度)和土壤水分(浅层土壤水分及深层土壤水分)对大株和中株柠条生长状况(灌木高度、冠幅宽度、冠幅长度、冠幅直径、冠幅横截面积、灌木纵截面积和冠幅体积)的影响及贡献率,排序分析使用 CANOCO 4.5<sup>[25]</sup>。

### 3 结果

#### 3.1 坡向和坡位对柠条生长的影响

柠条生长状况的相似性分析(ANOSIM)结果表明,坡向对柠条生长有显著影响(Global  $R = 0.267$ ,  $P = 0.014$ ),东坡柠条的生长好于南坡,东坡柠条的高度、冠幅长度及宽度均大于南坡。5 条样带综合分析的结果表明,坡位对柠条生长的影响较小(Global  $R = -0.054$ ,  $P = 0.676$ )。不同样带内柠条生长对坡位的响应可能存在一定差异,进而对 5 条样带内不同坡位柠条生长状况进行方差分析。结果表明,就大株柠条而言,坡位对大株柠条的生长有显著影响,但这种影响随坡向不同又存在一定变化(表 2)。东坡两条样带内下坡位柠条的平均高度要高于上坡位,其中 E1 样带内上坡和中上坡与下坡位柠条高度相差较小,E2 坡柠条的高度则自上而下逐渐增加(表 2)。东坡柠条冠幅长度对坡位变化的响应较冠幅宽度明显,下坡柠条的冠幅长度显著高于上坡,而上坡和下坡柠条冠幅宽度相差较小(表 2)。整体而言,在表征柠条生长的 7 个生长指标中,冠幅横截面积、灌木纵截面积和冠幅体积随坡位变化相比植株高度和冠幅明显,下坡位柠条的冠幅横截面积、灌木纵截面积和冠幅体积普遍高于中上坡位(表 2)。南坡 S1 和 S3 样带灌木高度及冠幅长度均表现为下坡位高于上坡位及中上坡位,柠条的冠幅横截面积、灌木纵截面积及冠幅体积变化表现更为明显(表 2)。S2 样带与 S1 和 S3 样带不同,S2 样带下坡位柠条的高度、冠幅长度、冠幅横截面积、灌木纵截面积及冠幅体积均低于中上坡位(表 2)。总之就大株柠条而言,下坡位柠条生长要好于其他坡位(S2 除外),而上坡和中下坡之间柠条生长差异较小。

表 2 东坡和南坡不同坡位大株柠条生长状况比较

Table 2 Growth status of big-sized *Caragana korshinskii* at different slope positions on east-facing and south-facing slopes

| 生长指标<br>Growth<br>indices | 样带<br>编号<br>Experimental<br>site | 上坡<br>Upper slope<br>position<br>Mean±S.E. | 中上坡<br>Upper-middle<br>slope position<br>Mean±S.E. | 中坡<br>Middle slope<br>position<br>Mean±S.E. | 中下坡<br>Middle-low<br>slope position<br>Mean±S.E. | 下坡<br>Low slope<br>position<br>Mean±S.E. | <i>P</i> |
|---------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------|----------|
| <i>H</i> /m               | E1                               | 1.38±0.02a                                 | 1.36±0.03a                                         | 1.26±0.02b                                  | 1.24±0.02b                                       | 1.42±0.04a                               | <0.001   |
|                           | E2                               | 1.50±0.04c                                 | 1.40±0.03c                                         | 1.49±0.03c                                  | 1.82±0.05b                                       | 2.21±0.03a                               | <0.001   |
|                           | S1                               | 1.33±0.02b                                 | 1.28±0.02b                                         | 1.32±0.02b                                  | 1.34±0.02ab                                      | 1.41±0.02a                               | <0.001   |
|                           | S2                               | 1.30±0.02ab                                | 1.29±0.02ab                                        | 1.31±0.02ab                                 | 1.37±0.03a                                       | 1.27±0.02b                               | =0.030   |
|                           | S3                               | 1.33±0.02b                                 | 1.27±0.02b                                         | 1.27±0.01b                                  | 1.28±0.02b                                       | 1.42±0.02a                               | <0.001   |
| <i>C<sub>L</sub></i> /m   | E1                               | 1.79±0.05b                                 | 1.93±0.06ab                                        | 1.87±0.03b                                  | 1.99±0.11ab                                      | 2.14±0.06a                               | =0.001   |
|                           | E2                               | 1.95±0.09c                                 | 1.65±0.06d                                         | 1.89±0.05c                                  | 2.27±0.07b                                       | 2.79±0.05a                               | <0.001   |
|                           | S1                               | 1.91±0.04b                                 | 1.93±0.03ab                                        | 1.95±0.04ab                                 | 2.08±0.06ab                                      | 2.09±0.03a                               | =0.002   |
|                           | S2                               | 1.82±0.05bc                                | 1.87±0.04abc                                       | 1.97±0.04ab                                 | 2.04±0.06a                                       | 1.79±0.06c                               | =0.002   |
|                           | S3                               | 1.91±0.04bc                                | 1.96±0.04b                                         | 1.81±0.03c                                  | 1.78±0.03c                                       | 2.23±0.06a                               | <0.001   |
| <i>C<sub>W</sub></i> /m   | E1                               | 1.44±0.04ab                                | 1.42±0.04ab                                        | 1.34±0.03b                                  | 1.53±0.04a                                       | 1.56±0.05a                               | =0.002   |
|                           | E2                               | 1.92±0.09a                                 | 1.19±0.04b                                         | 1.35±0.06b                                  | 1.65±0.06a                                       | 1.88±0.07a                               | <0.001   |
|                           | S1                               | 1.36±0.04b                                 | 1.35±0.03b                                         | 1.36±0.03b                                  | 1.51±0.05a                                       | 1.46±0.03ab                              | =0.007   |
|                           | S2                               | 1.49±0.04ab                                | 1.46±0.03ab                                        | 1.43±0.04ab                                 | 1.59±0.06a                                       | 1.39±0.04b                               | =0.030   |
|                           | S3                               | 1.48±0.03ab                                | 1.54±0.04ab                                        | 1.44±0.06b                                  | 1.43±0.03b                                       | 1.62±0.04a                               | <0.001   |
| <i>C</i> /m               | E1                               | 1.62±0.04b                                 | 1.68±0.04b                                         | 1.61±0.03b                                  | 1.76±0.06ab                                      | 1.85±0.05a                               | <0.001   |
|                           | E2                               | 1.93±0.09b                                 | 1.42±0.05d                                         | 1.62±0.05c                                  | 1.96±0.06b                                       | 2.34±0.05a                               | <0.001   |
|                           | S1                               | 1.65±0.03b                                 | 1.64±0.03b                                         | 1.65±0.03b                                  | 1.79±0.05a                                       | 1.77±0.03a                               | =0.001   |

续表

| 生长指标<br>Growth<br>indices | 样带<br>编号<br>Experimental<br>site | 上坡<br>Upper slope<br>position<br>Mean±S.E. | 中上坡<br>Upper-middle<br>slope position<br>Mean±S.E. | 中坡<br>Middle slope<br>position<br>Mean±S.E. | 中下坡<br>Middle-low<br>slope position<br>Mean±S.E. | 下坡<br>Low slope<br>position<br>Mean±S.E. | <i>P</i> |
|---------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------|----------|
| $A/m^2$                   | S2                               | 1.65±0.04ab                                | 1.66±0.03ab                                        | 1.71±0.03ab                                 | 1.82±0.05a                                       | 1.59±0.05b                               | =0.007   |
|                           | S3                               | 1.70±0.04bc                                | 1.75±0.04b                                         | 1.63±0.04bc                                 | 1.61±0.03c                                       | 1.92±0.05a                               | <0.001   |
|                           | E1                               | 2.12±0.09b                                 | 2.29±0.11b                                         | 2.07±0.07b                                  | 2.63±0.29ab                                      | 2.81±0.15a                               | <0.001   |
|                           | E2                               | 3.17±0.28b                                 | 1.66±0.11c                                         | 2.15±0.13c                                  | 3.20±0.20b                                       | 4.38±0.19a                               | <0.001   |
|                           | S1                               | 2.20±0.08bc                                | 2.15±0.06c                                         | 2.21±0.07bc                                 | 2.62±0.14a                                       | 2.53±0.08ab                              | =0.001   |
| $CH/m^2$                  | S2                               | 2.21±0.11b                                 | 2.21±0.07ab                                        | 2.39±0.10ab                                 | 2.72±0.15a                                       | 2.07±0.12b                               | =0.004   |
|                           | S3                               | 2.36±0.10bc                                | 2.51±0.12b                                         | 2.29±0.22bc                                 | 2.08±0.08c                                       | 3.08±0.16a                               | <0.001   |
|                           | E1                               | 2.25±0.07b                                 | 2.30±0.08b                                         | 2.05±0.06b                                  | 2.21±0.09b                                       | 2.67±0.12a                               | <0.001   |
|                           | E2                               | 2.99±0.18c                                 | 2.02±0.10d                                         | 2.48±0.12cd                                 | 3.70±0.20b                                       | 5.20±0.15a                               | <0.001   |
|                           | S1                               | 2.20±0.07bc                                | 2.11±0.05c                                         | 2.22±0.06bc                                 | 2.43±0.09a                                       | 2.52±0.07ab                              | <0.001   |
| $V/m^3$                   | S2                               | 2.19±0.09b                                 | 2.16±0.06b                                         | 2.28±0.07ab                                 | 2.51±0.10a                                       | 2.03±0.08b                               | =0.002   |
|                           | S3                               | 2.29±0.07b                                 | 2.26±0.08b                                         | 2.09±0.05b                                  | 2.09±0.07b                                       | 2.80±0.10a                               | <0.001   |
|                           | E1                               | 2.96±0.14b                                 | 3.15±0.17b                                         | 2.65±0.11b                                  | 3.33±0.39b                                       | 4.12±0.29a                               | <0.001   |
|                           | E2                               | 5.04±0.52b                                 | 2.40±0.20c                                         | 3.35±0.27c                                  | 6.23±0.53b                                       | 9.82±0.49a                               | <0.001   |
|                           | S1                               | 2.95±0.13bc                                | 2.79±0.11c                                         | 3.00±0.13bc                                 | 3.59±0.22a                                       | 3.63±0.16ab                              | <0.001   |
|                           | S2                               | 2.98±0.19b                                 | 2.89±0.12b                                         | 3.20±0.16ab                                 | 3.80±0.26a                                       | 2.67±0.17b                               | =0.002   |
|                           | S3                               | 3.22±0.16b                                 | 3.29±0.20b                                         | 2.95±0.24b                                  | 2.76±0.14b                                       | 4.57±0.28a                               | <0.001   |

表中不同小写字母表示同一坡面上不同坡位之间差异显著; *H*: 灌木高度, Height; *C<sub>L</sub>*: 冠幅长度, Crown length; *C<sub>W</sub>*: 冠幅宽度, Crown width; *C<sub>d</sub>*: 冠幅直径, Crown diameter; *A*: 冠幅横截面积, Crown cross sectional area; *CH*: 灌木纵截面积, Crown diameter×height; *V*: 冠幅体积, Canopy volume

5 条样带内中株柠条的密度较低,其生长状况与大株柠条相比对坡面变化响应较小。E1、E2 和 S1 样带内不同坡位柠条生长差异较小 ( $P>0.05$ ), S2 坡冠幅长度在坡位间的差异极显著 ( $P<0.001$ ), 冠幅直径 ( $P=0.002$ ) 和灌木纵截面积 ( $P=0.003$ ) 在坡位间也存在显著差异,且上述 3 个生长指标均表现为中上坡位好于下坡位,而其他生长指标在坡位间无明显差异; S3 坡仅灌木高度在坡位间存在极显著差异 ( $P<0.001$ ), 其他各生长指标均无明显差异。

### 3.2 土壤水分及灌木密度与柠条生长的关系

柠条生长与灌木密度的相关分析结果表明,大株柠条灌木密度与 7 个生长指标均表现为负相关关系,其中东坡和南坡灌木密度与各生长指标的相关性均较小(表 3)。柠条生长与浅层土壤水分的相关分析结果表明,浅层土壤水分与大株柠条各指标均表现为正相关关系,其中浅层土壤水分与灌木高度和灌木纵截面积呈显著正相关。就不同坡向而言,东坡浅层土壤水分与柠条各生长指标均呈正相关关系,而南坡浅层土壤水分与各生长指标均呈负相关关系,其中南坡浅层土壤水分与冠幅宽度显著负相关。柠条生长与深层土壤水分的相关关系表明,虽然深层土壤水分与柠条各生长指标的相关性较小,但不同坡向之间的表现存在差异。东坡深层土壤水分与柠条各生长指标表现为正相关关系,其中东坡深层土壤水分与冠幅宽度呈显著正相关,而南坡深层土壤水分与各生长指标呈负相关关系。中株柠条与大株柠条不同,其密度及土壤水分与中株柠条各生长指标的相关性不显著(表 3)。

进一步对大株柠条各生长指标与灌木密度、浅层土壤水分和深层土壤水分进行通径分析。结果表明,浅层土壤水分对大株柠条灌木高度、灌木纵截面积及冠幅体积均有直接的正影响(通径系数分别为 0.593、0.401 和 0.312),大株柠条密度对冠幅宽度有直接的负影响(通径系数为 -0.323),而深层土壤水分及大株柠条密度对灌木高度、灌木纵截面积和冠幅体积产生间接负影响(表 4)。

表 3 浅层土壤水分、深层土壤水分及灌木密度与柠条生长指标的相关分析

Table 3 Correlation analysis between shallow &amp; deep soil moisture content and plant density and growth status indices

| 土壤水分及<br>灌木密度<br>Soil moisture and<br>shrub density | 坡向<br>Slope<br>aspect | 灌木高度<br>Height<br>/m | 冠幅长度<br>Crown<br>length/m | 冠幅宽度<br>Crown<br>width/m | 冠幅直径<br>Crown<br>diameter<br>/m | 冠幅面积<br>Crown cross<br>sectional area<br>/m <sup>2</sup> | 灌木纵截面积<br>Crown<br>diameter<br>×height<br>/m <sup>2</sup> | 冠幅体积<br>Canopy<br>volume<br>/m <sup>3</sup> |
|-----------------------------------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 大株柠条 Big-sized plants                               |                       |                      |                           |                          |                                 |                                                          |                                                           |                                             |
| 灌木密度                                                | 东坡                    | -0.312               | 0.099                     | -0.283                   | -0.098                          | -0.142                                                   | -0.246                                                    | -0.241                                      |
| Shrub density                                       | 南坡                    | 0.073                | -0.032                    | -0.065                   | -0.038                          | 0.053                                                    | -0.009                                                    | 0.053                                       |
|                                                     | 合并                    | -0.328               | -0.097                    | -0.18                    | -0.159                          | -0.13                                                    | -0.276                                                    | -0.242                                      |
| 浅层土壤水分                                              | 东坡                    | 0.592                | 0.128                     | 0.122                    | 0.143                           | 0.184                                                    | 0.45                                                      | 0.396                                       |
| Shallow soil moisture                               | 南坡                    | -0.264               | -0.107                    | -0.559 *                 | -0.371                          | -0.461                                                   | -0.396                                                    | -0.473                                      |
|                                                     | 合并                    | 0.569 **             | 0.159                     | 0.032                    | 0.119                           | 0.118                                                    | 0.403 *                                                   | 0.332                                       |
| 深层土壤水分                                              | 东坡                    | 0.152                | 0.383                     | 0.733 *                  | 0.576                           | 0.568                                                    | 0.34                                                      | 0.411                                       |
| Deep soil moisture                                  | 南坡                    | -0.381               | -0.481                    | -0.147                   | -0.359                          | -0.371                                                   | -0.334                                                    | -0.35                                       |
|                                                     | 合并                    | -0.292               | -0.108                    | 0.158                    | -0.01                           | 0.011                                                    | -0.18                                                     | -0.145                                      |
| 中株柠条 Medium-sized plants                            |                       |                      |                           |                          |                                 |                                                          |                                                           |                                             |
| 灌木密度                                                | 东坡                    | 0.347                | 0.49                      | 0.415                    | 0.497                           | 0.62                                                     | 0.702                                                     | 0.819                                       |
| Shrub density                                       | 南坡                    | 0.087                | -0.414                    | -0.124                   | -0.28                           | -0.325                                                   | -0.193                                                    | -0.248                                      |
|                                                     | 合并                    | -0.073               | -0.414                    | -0.169                   | -0.318                          | -0.314                                                   | -0.273                                                    | -0.254                                      |
| 浅层土壤水分                                              | 东坡                    | -0.802               | -0.029                    | -0.176                   | -0.102                          | -0.292                                                   | -0.55                                                     | -0.568                                      |
| Shallow soil moisture                               | 南坡                    | 0.037                | 0.201                     | 0.093                    | 0.169                           | 0.157                                                    | 0.141                                                     | 0.184                                       |
|                                                     | 合并                    | 0.049                | 0.264                     | 0.134                    | 0.229                           | 0.196                                                    | 0.183                                                     | 0.194                                       |
| 深层土壤水分                                              | 东坡                    | -0.873               | 0.635                     | 0.492                    | 0.583                           | 0.402                                                    | 0.126                                                     | 0.116                                       |
| Deep soil moisture                                  | 南坡                    | 0.505                | 0.332                     | 0.321                    | 0.328                           | 0.245                                                    | 0.313                                                     | 0.224                                       |
|                                                     | 合并                    | 0.08                 | -0.079                    | 0.008                    | -0.101                          | -0.163                                                   | -0.117                                                    | -0.173                                      |

\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ 

表 4 大株柠条密度、浅层土壤水分及深层土壤水分对柠条生长的直接影响和间接影响

Table 4 Directly and indirectly effect of shallow & deep soil moisture content and plant density to growth status as big-size *Caragana korshinskii* shrubs

| 生长指标<br>Growth indices    | 变量<br>Variate   | 直接效应<br>Directly effect | 间接效应 Indirectly effect |          |          | 总效应<br>Total effect |
|---------------------------|-----------------|-------------------------|------------------------|----------|----------|---------------------|
|                           |                 |                         | 通过 $x_1$               | 通过 $x_2$ | 通过 $x_3$ |                     |
| 灌木高度<br>Height /m         | 大株柠条密度( $x_1$ ) | 0.018                   |                        | -0.356   | 0.011    | -0.328              |
|                           | 浅层土壤水分( $x_2$ ) | 0.593                   | -0.011                 |          | -0.014   | 0.569               |
|                           | 深层土壤水分( $x_3$ ) | 0.025                   | 0.007                  | -0.328   |          | -0.296              |
|                           | $R^2 = 0.325^*$ |                         |                        |          |          |                     |
| 冠幅长度<br>Crown length /m   | 大株柠条密度( $x_1$ ) | -0.001                  |                        | -0.083   | -0.013   | -0.097              |
|                           | 浅层土壤水分( $x_2$ ) | 0.139                   | 0.001                  |          | 0.017    | 0.156               |
|                           | 深层土壤水分( $x_3$ ) | -0.031                  | 0.000                  | -0.077   |          | -0.108              |
|                           | $R^2 = 0.025$   |                         |                        |          |          |                     |
| 冠幅宽度<br>Crown width/m     | 大株柠条密度( $x_1$ ) | -0.323                  |                        | 0.025    | 0.118    | -0.180              |
|                           | 浅层土壤水分( $x_2$ ) | -0.042                  | 0.194                  |          | -0.153   | -0.001              |
|                           | 深层土壤水分( $x_3$ ) | 0.277                   | -0.137                 | 0.023    |          | 0.163               |
|                           | $R^2 = 0.104$   |                         |                        |          |          |                     |
| 冠幅直径<br>Crown diameter /m | 大株柠条密度( $x_1$ ) | -0.165                  |                        | -0.035   | 0.040    | -0.159              |
|                           | 浅层土壤水分( $x_2$ ) | 0.058                   | 0.099                  |          | -0.052   | 0.105               |
|                           | 深层土壤水分( $x_3$ ) | 0.094                   | -0.070                 | -0.032   |          | -0.008              |
|                           | $R^2 = 0.032$   |                         |                        |          |          |                     |

续表

| 生长指标<br>Growth indices                               | 变量<br>Variate   | 直接效应<br>Directly effect | 间接效应 Indirectly effect |          |          | 总效应<br>Total effect |
|------------------------------------------------------|-----------------|-------------------------|------------------------|----------|----------|---------------------|
|                                                      |                 |                         | 通过 $x_1$               | 通过 $x_2$ | 通过 $x_3$ |                     |
| 冠幅横截面积<br>Crown cross sectional area /m <sup>2</sup> | 大株柠条密度( $x_1$ ) | -0.125                  |                        | -0.055   | 0.049    | -0.130              |
|                                                      | 浅层土壤水分( $x_2$ ) | 0.091                   | 0.075                  |          | -0.064   | 0.102               |
|                                                      | 深层土壤水分( $x_3$ ) | 0.116                   | -0.053                 | -0.050   |          | 0.013               |
|                                                      | $R^2 = 0.027$   |                         |                        |          |          |                     |
| 灌木纵截面积<br>Crown diameter×height /m <sup>2</sup>      | 大株柠条密度( $x_1$ ) | -0.063                  |                        | -0.241   | 0.028    | -0.276              |
|                                                      | 浅层土壤水分( $x_2$ ) | 0.401                   | 0.038                  |          | -0.036   | 0.403               |
|                                                      | 深层土壤水分( $x_3$ ) | 0.065                   | -0.027                 | -0.222   |          | -0.183              |
|                                                      | $R^2 = 0.167$   |                         |                        |          |          |                     |
| 冠幅体积<br>Canopy volume /m <sup>3</sup>                | 大株柠条密度( $x_1$ ) | -0.081                  |                        | -0.187   | 0.026    | -0.242              |
|                                                      | 浅层土壤水分( $x_2$ ) | 0.312                   | 0.049                  |          | -0.033   | 0.327               |
|                                                      | 深层土壤水分( $x_3$ ) | 0.060                   | -0.034                 | -0.172   |          | -0.146              |
|                                                      | $R^2 = 0.112$   |                         |                        |          |          |                     |

\*  $P < 0.05$ 

### 3.3 坡面柠条生长与环境因子的定量分析

利用 RDA 和 pRDA 分析 5 条样带不同坡位大株和中株柠条生长状况与 5 个环境因子(坡向、坡位、坡度、浅层土壤水分及深层土壤水分)的关系,确定影响大株和中株柠条生长的关键环境因子。大株柠条与环境因子的排序结果表明,第 1 轴解释了 58.0%的柠条生长变化(Eigenvalue=0.580,  $F=26.26$ ,  $P=0.018$ ),所有的排序轴解释了 59.9%的柠条生长变化(Eigenvalue=0.599,  $F=5.68$ ,  $P=0.015$ ),排序结果较好的反映了地形和土壤水分变化对大株柠条生长的影响。pRDA 分析结果表明,坡向对大株柠条的生长影响最大(解释了 21.1%的变异),其次是坡位(16.0%)、浅层土壤水分(13.1%)和深层土壤水分(9.6%),而坡度对大株柠条生长的影响解释量不足 0.1%(图 1)。中株柠条与环境因子的排序结果表明,第 1 轴解释了 29.5%的柠条生长变化(Eigenvalue=0.295,  $F=5.87$ ,  $P=0.339$ ),所有的排序轴解释了 30.6%的柠条生长变化(Eigenvalue=0.306,  $F=1.24$ ,  $P=0.340$ ),排序结果表明地形和土壤水分变化对中株柠条生长的影响较小。pRDA 分析结果表明,坡向对中株柠条生长影响较大(解释了 18.9%的变异),深层土壤水分、浅层土壤水分、坡度和坡位对中株柠条生长影响较小(解释量分别为:6%、3.2%、2%和 0.4%)(图 1)。

## 4 讨论

半干旱黄土区人工植被的生长受土壤水分、土壤养分及光热组合等因素的共同制约<sup>[12,26]</sup>,其中土壤水分是该区植被生长的主要限制因子<sup>[27-28]</sup>。坡面地形变化塑造的小生境决定了土壤水分条件,它与土壤养分相互作用共同影响植被的生长状况,从而改变坡面植被生长的空间分布格局<sup>[29-30]</sup>。本文的分析结果表明坡向对柠条植被生长的影响较大,区域内东坡柠条的生长明显好于南坡,这主要是因为研究区东坡的光照不如南坡的强烈,致使土壤蒸发相对较小从而使得浅层土壤水分较高(表 1),柠条生长表现为东坡好于南坡。研究区坡面的坡度大致都在 29°—32°之间,一般认为坡度越大,土壤容积含水率越低,同一坡面自坡顶到坡底,土壤含水率呈增加趋势<sup>[31]</sup>,但是坡面工程措施的改造及植被恢复生长影响了土壤水分及养分的再分配<sup>[32-33]</sup>。研究区柠条种植初期通过水平阶整地在坡面栽植柠条,试图削弱自然坡面径流从而实现降水汇集,为植被生长提供适宜条件。本文的分析结果表明,相对于坡向而言,坡位对柠条的生长影响不及坡向对柠条生长的影响大,样带内仅下坡位柠条生长状况略好于中上坡位(除 S2 样带),而其他各坡位之间柠条生长状况差异较小,表明水平阶整地在一定程度上削弱了坡面地形变化对柠条生长的限制。该结果与赵艳云等<sup>[34]</sup>在宁夏黄土区的研究结果相似,该研究发现在工程措施改造后的坡面,坡位对 17 年生柠条的分枝数影响较小,但对株高、根深、生物量均有显著影响,且中坡柠条的株高、根深、生物量明显高于上坡。程杰等<sup>[35]</sup>在宁夏黄土区对

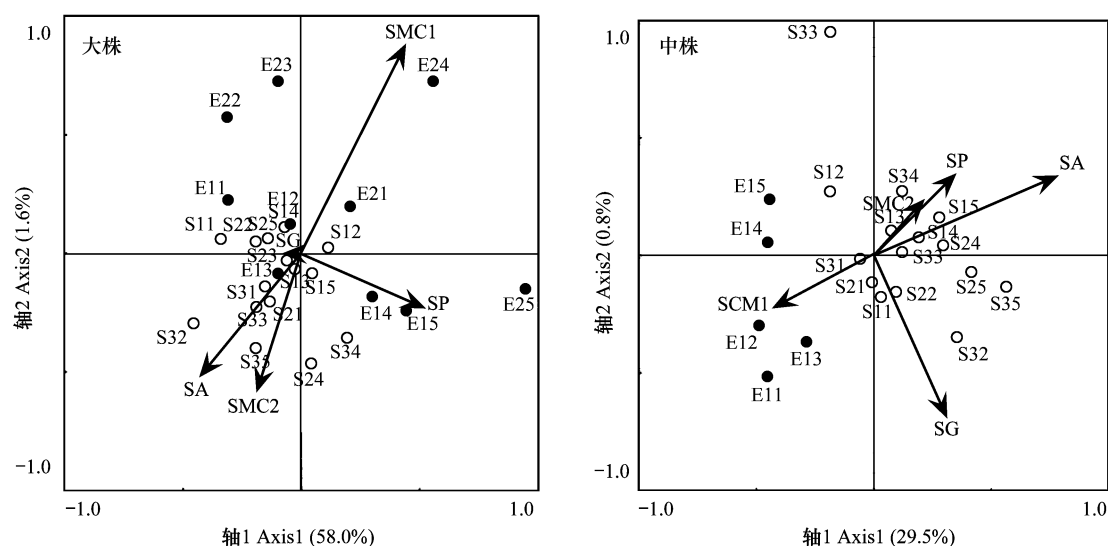


图 1 大株和中株柠条生长状况与环境因子的 RDA 排序图

Fig.1 RDA ordination figure of *Caragana korshinskii* growth indices and environmental factors at big-sized plants and medium-sized plants

SA:坡向,slope aspect;SP:坡位,slope position;SG:坡度,slope gradient;SMC1:浅层土壤水分,shallow soil moisture content;SMC2:深层土壤水分,deep soil moisture content;1:上坡位,upper slope position;2:中上坡位,upper-middle slope position;3:中坡位,middle slope position;4:中下坡位,middle-low slope position;5:下坡位,low slope position

不同栽植年限柠条生长的研究还发现,随着柠条栽植年限的增加坡位对柠条生长的影响存在明显变化,幼龄期(1—7年生)和老龄期(16—23年生)柠条株高表现为下坡>中坡>上坡,中龄期(8—15年生)表现为上坡>中坡>下坡。本研究也发现,下坡位大株柠条的灌木高度和冠幅长度高于中上坡位,而坡位对中株和小株柠条生长的影响较小。

坡面地形变化会通过改变土壤水分含量及养分条件对柠条生长产生影响,而在人工植被恢复的过程中随着生长年限的增加,种植密度对植被生长的制约会逐渐增强<sup>[36]</sup>。研究发现东坡柠条的密度低于南坡,东坡大株柠条的7个生长指标均高于南坡,而中株及小株柠条的生长受密度影响较小。以上结果与赵龙等<sup>[37]</sup>在宁夏黄土区的研究结果相近,柠条的成林密度显著影响其生长过程,低密度柠条林对其生长速率的制约强度小于高密度柠条林。此外,研究还发现大株柠条灌木高度、冠幅宽度和冠幅长度与灌木密度呈负相关,其中冠幅宽度与密度的相关性要大于冠幅长度与密度的相关性,这在东坡表现尤为明显;中株柠条灌木高度、冠幅宽度和冠幅长度与灌木密度亦呈负相关,但冠幅长度与密度的相关性要大于与冠幅宽度与密度的相关性,这在南坡表现的尤为明显。结果表明,对大株柠条而言灌木密度主要限制灌木高度和冠幅宽度的生长,对中株柠条而言灌木密度主要限制冠幅长度的生长。这可能与研究区大规模人工种植柠条林不同生长阶段柠条的生长策略有关,研究区坡面柠条为水平阶整地造林,各阶地之间坡面距离大于水平阶内柠条株间距,坡面地形变化影响了局部土壤水分状况进而决定了植被承载力,柠条密度和个体大小又影响了植物种间对水分及养分竞争的强弱,二者相互作用决定了区域柠条的生长状况<sup>[34,36]</sup>。最终在成熟柠条林中表现为随着柠条生长年限的增加,其水平方向的生长会受到相邻植株的制约,灌木密度主要通过限制柠条水平(沿等高线方向)冠幅即冠幅宽度的生长进而抑制柠条植株的生长。

坡面地形变化通过改变土壤水分状况,进而与灌木密度相互作用来共同调节坡面柠条生长,同时柠条生长也改变了土壤水分的存储。有研究发现在坡面尺度上植被的分布及其生物量与不同土层深度土壤水分含量存在耦合关系<sup>[38]</sup>,本研究发现浅层土壤水分与柠条各生长指标呈现正相关关系,深层土壤水分与柠条生长呈现负相关关系,该研究结果与郭忠升<sup>[27]</sup>和莫保儒等<sup>[39]</sup>的研究结论相近。同时在半干旱区植被类型的不同对土壤水分的消耗明显不同且存在显著的空间分异,而同一植被类型,生长年限及栽植密度的不同对土壤水

分的消耗亦有不同<sup>[18,36,40-41]</sup>。研究区坡面地带性植被是天然草本,人工植被超过了该区土壤水分的承载力,故柠条林地后期管理更需要考虑该区水分的承载力<sup>[9-10,42]</sup>,选择适宜的管理模式。研究发现,浅层土壤水分直接影响坡面柠条生长,而深层土壤水分和灌木密度则与柠条生长呈负相关关系。此外,研究还发现灌木密度低长势好的 E2 样带深层土壤水分低于浅层土壤水分,而其他样带柠条密度均高于 E2 样带且深层土壤水分高于浅层土壤水分,该结果与周萍等<sup>[43]</sup>在陕西纸坊沟流域的研究结果相似。以上结果揭示,柠条盖度或生物量的变化强烈影响浅层和深层土壤水分的关系,人工植被对土壤水分的过度消耗导致深层土壤水分的匮乏,是引起林地退化的原因之一<sup>[44]</sup>。坡面柠条的生长,既受土壤水分的影响,又受灌木密度的调控,随着柠条地上、地下生物量的增加对土壤水分抑制的程度也在增强,土壤水分的匮乏会导致柠条林地退化。因而,半干旱黄土区进行人工柠条植被恢复时既要结合立地条件选用不同的工程措施创造适宜植被生长的小生境,也要依据土壤水分的植被承载力在植株生长的不同阶段调控植株密度和空间配置,以维持人工植被恢复的可持续性。

## 5 结论

研究表明坡向对柠条生长有显著影响,东坡柠条的生长好于南坡,而相对于坡向而言,坡位对柠条生长的影响较小。浅层土壤水分对柠条生长有直接影响,而灌木密度和深层土壤水分则与柠条生长指标存在负相关关系。大株柠条灌木高度、灌木纵截面积和冠幅体积对浅层土壤水分的响应敏感,而冠幅长度对坡向和坡位的响应较为敏感,冠幅宽度对灌木密度的响应较为敏感。地形变化和土壤水分与柠条生长的 RDA 分析结果表明,地形和土壤水分变解释释了 59.9% 的大株柠条生长变异,其中坡向、坡位和浅层土壤水分是影响大株柠条生长的主要环境因子,它们分别解释了 21.1%、16.0% 和 13.1% 的柠条生长变化;地形和土壤水分变化对中株柠条生长的影响较小,它们仅解释了 30.6% 的柠条生长变异,其中坡向解释了 18.9% 的柠条生长变化,其他因子对柠条生长影响均较小。坡面地形、土壤水分及灌木密度互馈互作调节了柠条生长的空间分布格局。研究认为半干旱黄土区坡面人工植被既要结合地形条件选择适宜的工程措施,也需要在植被的不同恢复阶段依据土壤水分植被承载力实施必要的管理措施(如平茬、间伐等),这将有利于维持坡面人工植被的稳定,从而抑制因林地退化而造成的水土流失。

## 参考文献 (References):

- [1] 李凤民,徐进章,孙国钧. 半干旱黄土高原退化生态系统的修复与生态农业发展. 生态学报, 2003, 23(9): 1901-1909.
- [2] 杨荣金,傅伯杰,刘国华,马克明. 黄土丘陵沟壑区生态环境建设中的水问题——以延河流域为例. 环境科学, 2004, 25(2): 37-42.
- [3] 山仑,徐炳成. 黄土高原半干旱地区建设稳定人工草地的探讨. 草业学报, 2009, 18(2): 1-2.
- [4] 王哈生. 黄土高原植被恢复策略回顾. 中国水土保持科学, 2004, 2(1): 42-45.
- [5] 张金屯. 黄土高原植被恢复与建设的理论和技术问题. 水土保持学报, 2004, 18(5): 120-124.
- [6] 张文辉,刘国彬. 黄土高原植被恢复与建设策略. 中国水土保持, 2009, 2009(1): 24-27.
- [7] 程积民,杜峰,万惠娥. 黄土高原半干旱区集流灌草立体配置与水分调控. 草地学报, 2000, 8(3): 210-219.
- [8] 程积民,万惠娥,杜峰. 黄土高原半干旱区退化灌草植被的恢复与重建. 林业科学, 2001, 37(4): 50-57.
- [9] 郭忠升,邵明安. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力. 生态学报, 2003, 23(8): 1640-1647.
- [10] 郭忠升. 黄土高原半干旱区水土保持植被恢复限度——以人工柠条林为例. 中国水土保持科学, 2009, 7(4): 49-54.
- [11] 余冬立,邵明安,薛亚锋,俞双恩. 坡面土地利用格局变化的水土保持效应. 农业工程学报, 2011, 27(4): 22-27.
- [12] 李萍,朱清科,刘中奇,赵荟,邝高明,王晶. 半干旱黄土区地上生物量对立地因子的响应. 中国水土保持科学, 2012, 10(2): 50-54.
- [13] 程积民,万惠娥. 中国黄土高原植被建设与水土保持. 北京: 中国林业出版社, 2002: 140-300.
- [14] 王晶,朱清科,秦伟,张宏芝,云雷,谢静,邝高明. 陕北黄土区封禁流域坡面微地形植被特征分异. 应用生态学报, 2012, 23(3): 694-700.
- [15] 杨士梭,温仲明,苗连朋,戚德辉,花东文. 黄土丘陵区植物功能性状对微地形变化的响应. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3413-3419.
- [16] 胡婵娟,刘国华,陈利顶,吴雅琼. 黄土丘陵区坡面尺度上不同植被格局下植物群落和土壤性质研究. 干旱区地理, 2012, 35(5): 787-794.

- [17] 胡相明, 程积民, 万惠娥, 赵艳云. 黄土丘陵区地形、土壤水分与草地的景观格局. 生态学报, 2006, 26(10): 3276-3285.
- [18] 程积民, 万惠娥, 王静, 雍绍萍. 半干旱区柠条生长与土壤水分消耗过程研究. 林业科学, 2005, 41(2): 37-41.
- [19] Wang Z Q, Liu B Y, Zhang Y. Soil moisture of different vegetation types on the Loess Plateau. Journal of Geographical Sciences, 2009, 19(6): 707-718.
- [20] Wang Y Q, Shao M A, Shao H B. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China. Journal of Hydrology, 2010, 381(1): 9-17.
- [21] 李刚, 赵祥, 张宾宾, 刘碧荣, 董宽虎, 朱慧森. 不同株高的柠条生物量分配格局及其估测模型构建. 草地学报, 2014, 22(4): 769-775.
- [22] 李钢铁, 秦富仓, 贾守义, 董锦兰, 吉日格勒, 王满贵. 旱生灌木生物量预测模型的研究. 内蒙古林学院学报(自然科学版), 1998, 20(2): 25-31.
- [23] Ferreira J N, Bustamante M, Garcia-Montiel D C, Caylor K K, Davidson E A. Spatial variation in vegetation structure coupled to plant available water determined by two-dimensional soil resistivity profiling in a Brazilian savanna. Oecologia, 2007, 153(2): 417-430.
- [24] Clarke K R, Warwick R M. Change in Marine Communities: An Approach to Statistical Analysis and Interpretation. 2nd ed. Plymouth: Plymouth Marine Laboratory, 2001: 2-15.
- [25] Šmilauer P, Lepš J. Multivariate Analysis of Ecological Data Using CANOCO 5. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 193-193.
- [26] 保长虎, 张文辉, 何景峰. 黄土高原丘陵沟壑区 30 年柠条人工种群动态研究. 西北植物学报, 2010, 30(8): 1681-1688.
- [27] 郭忠升. 半干旱区柠条林利用土壤水分深度和耗水量. 水土保持通报, 2009, 29(5): 69-72.
- [28] Yang L, Wei W, Chen L D, Chen W L, Wang J L. Response of temporal variation of soil moisture to vegetation restoration in semi-arid Loess Plateau, China. Catena, 2014, 115(1): 123-133.
- [29] 孟庆华, 傅伯杰. 景观格局与土壤养分流动. 水土保持学报, 2000, 14(3): 116-121.
- [30] 卫伟, 余韵, 贾福岩, 杨磊, 陈利顶. 微地形改造的生态环境效应研究进展. 生态学报, 2013, 33(20): 6462-6469.
- [31] 李毅, 邵明安. 雨强对黄土坡面土壤水分入渗及再分布的影响. 应用生态学报, 2006, 17(12): 2271-2276.
- [32] 于洋, 卫伟, 陈利顶, 冯天骄, 杨磊, 张涵丹. 黄土丘陵区坡面整地和植被耦合下的土壤水分特征. 生态学报, 2016, 36(11): 3441-3449.
- [33] 冯天骄, 卫伟, 陈利顶, 于洋, 杨磊, 张涵丹. 陇中黄土区坡面整地和植被类型对土壤化学性状的影响. 生态学报, 2016, 36(11): 3216-3225.
- [34] 赵艳云, 程积民, 王延平, 万惠娥, 胡相明. 半干旱区环境因子对柠条灌木林结构的影响. 水土保持通报, 2005, 25(3): 10-14.
- [35] 程杰, 王吉斌, 程积民, 罗宗宽. 黄土高原柠条锦鸡儿灌木林生长的时空变异特征. 林业科学, 2013, 49(1): 14-20.
- [36] 张文文, 郭忠升, 宁婷, 白冬妹. 黄土丘陵半干旱区柠条林密度对土壤水分和柠条生长的影响. 生态学报, 2015, 35(3): 725-732.
- [37] 赵龙, 郭忠升, 郭满才, 袁志发, 王振凤. 黄土丘陵半干旱区柠条林生长过程研究. 水土保持通报, 2012, 32(6): 192-195.
- [38] Meerveld H J T V, McDonnell J J. On the interrelations between topography, soil depth, soil moisture, transpiration rates and species distribution at the hillslope scale. Advances in Water Resources, 2006, 29(2): 293-310.
- [39] 莫保儒, 王子婷, 蔡国军, 杨磊, 党宏忠, 王多锋, 薛睿. 半干旱黄土区成熟柠条林地剖面土壤水分环境及影响因子研究. 干旱区地理, 2014, 37(6): 1207-1215.
- [40] 徐学选, 刘江华, 高鹏, 王伟. 黄土丘陵区植被的土壤水文效应. 西北植物学报, 2003, 23(8): 1347-1351.
- [41] Vivoni E R, Rinehart A J, Méndez-Barroso L A, Aragón C A, Bisht G, Cardenas M B, Engle E, Forman B A, Frisbee M D, Gutiérrez-Jurado H A, Hong S H, Mahmood T H, Tai K, Wyckoff R L. Vegetation controls on soil moisture distribution in the Valles Caldera, New Mexico, during the North American monsoon. Ecohydrology, 2008, 1(3): 225-238.
- [42] 郭忠升. 水资源紧缺地区土壤水分植被承载力论述. 林业科学, 2011, 47(5): 140-144.
- [43] 周萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区侵蚀环境不同坡面及坡位土壤理化特征研究. 水土保持学报, 2008, 22(1): 7-12.
- [44] 邵明安, 贾小旭, 王云强, 朱元骏. 黄土高原土壤干层研究进展与展望. 地球科学进展, 2016, 31(1): 14-22.