

晋西北丘陵风沙区坡面尺度下不同 固沙植物群落稳定性分析

陈蕴琳¹, 缙倩倩^{1,2*}, 王国华^{1,2,3}, 马改玲¹

(1 山西师范大学 地理科学学院, 临汾 041000; 2 中国科学院西北生态环境资源研究院临泽内陆河流域研究站, 兰州 730000; 3 中国科学院西北生态环境资源研究院, 沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000)

摘 要: 人工固沙植被群落的稳定是评价干旱半干旱风沙区植被恢复成功的重要标准。该研究运用模糊综合评判理论, 对晋西北丘陵风沙区坡面尺度下(坡上、坡中、坡下)7种人工固沙优势植物的稳定性进行分析, 选取优势植物生长状况、土壤质量、林下植物生物量和多样性以及 Godron 指数 4 项指标, 通过计算其隶属度平均值来评价植物的稳定性。结果表明: (1) 乔木油松枝叶生物量最大(1 457.1 g), 灌木柠条枝叶生物量最大(1 429.1 g), 各优势植物坡下枝叶生物量最大。(2) 灌木表层(0~20 cm)土壤水分优于各乔木表层土壤水分, 同时不同植物林均表现出坡下土壤水分最大; 各植物表层土壤有机质、解碱氮、速效钾、速效磷基本都远高于撂荒地, 其中乔木油松和灌木柠条各土壤养分指标显著高于其他植物, 且不同植物林下养分也表现为坡下最优。(3) 林下植物生物量乔木青杨最大(87.2 g), 灌木柠条最大(50.4 g), 坡下生物量最大; 林下植物丰富度指数乔木青杨最高, 林下植物多样性指数和均匀度指数乔木樟子松和油松最高, 灌木中林下植物各多样性指数基本相近。(4) Godron 指数: 乔木中刺槐的交点坐标离群落稳定点最近, 灌木中柠条交点坐标离群落稳定点最近。综合各指标的隶属度平均值得到乔木稳定性指数排序为: 油松(0.69) > 刺槐(0.67) > 青杨(0.66) > 樟子松(0.39) > 旱柳(0.28), 灌木稳定性排序为: 柠条(0.82) > 紫穗槐(0.64), 乔灌木植物稳定性均远高于撂荒地(0.20)。研究认为乔木油松和灌木柠条稳定性最高, 是西北丘陵风沙区适宜的造林树种, 而坡下则是更优的种植坡位选择。该研究结果可为晋西北丘陵风沙区域以至黄土高原人工固沙植被恢复和科学管理提供依据。

关键词: 晋西北丘陵风沙区; 坡面尺度; 隶属度; 群落稳定性

中图分类号: Q948.15⁺5

文献标志码: A

Stability Evaluation of Different Sand-fixing Plant Communities in Hilly Sandy Area of Northwest Shanxi

CHEN Yunlin¹, GOU Qianqian^{1,2*}, WANG Guohua^{1,2,3}, MA Gailing¹

(1 College of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041000, China; 2 Linze Inland River Basin Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3 Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The stability of artificial sand-fixing vegetation community is an important criterion to evaluate the success of vegetation restoration in arid and semi-arid sandy areas. In this paper, we used the fuzzy

收稿日期: 2021-09-12; 修改稿收到日期: 2021-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(41807518); 中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室开放基金(KLDD-2020-05); 山西省高等学校科技创新项目(2019L0457, 2019L0463)

作者简介: 陈蕴琳(1994—), 女, 在读研究生, 主要从事干旱半干旱风沙区植被恢复方面的研究。E-mail: chenyunlin0310@126.com

* 通信作者: 缙倩倩, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事退化生态系统修复研究。E-mail: gqqianqian@163.com

comprehensive evaluation theory to evaluate the stability of seven dominant plants of artificial sand fixation at the slope scale (upslope, midslope and downslope) in the wind-sand area of northwestern Shanxi Province. The growth status of dominant plants, soil quality, biomass and diversity of understory plants and Godron index were selected to evaluate the stability of plants by calculating the average membership degree. The results showed that: (1) the biomass of branches and leaves of *Pinus tabulaeformis* in trees was the largest (1 457.1 g), the biomass of branches and leaves of *Caragana korshinskii* in shrubs was the largest (1 429.1 g), and the biomass of branches and leaves of dominant plants was the largest under slope. (2) The soil moisture of shrub surface layer (0—20 cm) was better than that of tree surface layer, and different plant forests showed the largest soil moisture under slope. The soil organic matter, alkali-hydrolyzable nitrogen, available potassium and available phosphorus in the surface soil of each plant were much higher than those in the abandoned land. The soil nutrient indexes of *P. tabulaeformis* and *C. korshinskii* were significantly higher than those of other plants, and the nutrients under different plants were also the best in the slope. (3) The biomass of understory plants: *Populus cathayana* tree was the largest (87.2 g), *C. korshinskii* shrub was the largest (50.4 g), and the biomass of slope was the largest. The richness index of understory plants in tree was the highest in *P. cathayana*, the diversity index and evenness index of understory plants in tree were the highest in *Pinus sylvestris* and *P. tabulaeformis*, and the diversity index of understory plants in shrubs was basically similar. (4) Godron index: the intersection coordinates of *Robinia pseudoacacia* in trees were closest to the community stability point, and the intersection coordinates of *C. korshinskii* in shrubs were closest to the community stability point. Based on the average membership of each index, the order of tree stability index was as follows: *P. tabulaeformis* (0.69) > *R. pseudoacacia* (0.67) > *P. cathayana* (0.66) > *P. sylvestris* (0.39) > *Salix matsudana* (0.28). The order of shrub stability was as follows: *Caragana microphylla* (0.82) > *Amorpha fruticosa* (0.64). The stability of trees and shrubs was much higher than that of abandoned land (0.20). As a whole, *P. tabulaeformis* tree and *C. korshinskii* shrub have the highest stability, which are suitable for afforestation. Downhill is a better choice of slope position. This study can provide a basis for the restoration and scientific management of artificial sand-fixing vegetation in the wind-sand area of northwestern Shanxi and the Loess Plateau.

Key words: windy and sandy hilly area in northwest Shanxi; slope scale; membership degree; community stability

晋西北丘陵地区,作为环京津地区防风固沙的重要生态屏障^[1],区域内土壤沙化严重,是山西省最为典型的生态极度脆弱区^[2]。20 世纪 70 年代起,该地开展了一系列以人工植被建设为主要生态修复措施的生态建设工程,有效促进了局地生境恢复^[3]。然而由于气候恶劣,局地环境多样且复杂,尤其是黄土高原千沟万壑,支离破碎,由于树种选择不当、立地条件差的综合作用,人工固沙林出现了生长不良、功能低下的不稳定现象^[4-5]。

不同乔灌植物群落生活型和根系活动深度不同,改善生态环境的能力也不同,所以首先应该遵循适地适树的原则。选择适宜的造林树种,建立优化稳定的人工防护林结构,是植被恢复的关键,也是防护林生态效益发挥的基础。适地适树原则既要选择适宜成林物种,又要选择适宜立地条件^[6]。首先是选择适宜的成林植物,物种的选择不仅关系到植物的生长状况,而且关系到造林的成败。防护林体系建设中,较多人工林选择树种单一,而且多以纯林为

主,人工林形成了许多小老头树和退化残次林^[4-5],防护功能低。其次是选择适宜的立地条件,许多研究已经印证了坡位立地因子对植物生长和土壤养分有着重要影响^[7-9],根据造林地的立地条件选择适宜的树种^[10],使其正常发育生长,是建立稳定人工固沙系统的关键。晋西北丘陵风沙区是黄土高原生态环境最敏感地区之一,受到众多研究者的关注。古文婷^[11]对晋西北黄土丘陵区不同固沙植物林下土壤含水量进行了排序,其结果为:小叶杨(*Populus simonii*)>草地>撂荒地>柠条(*C. korshinskii*);梁海斌^[12]对晋西北黄土丘陵区不同林龄的柠条林下土壤水分研究发现,10a 柠条林土壤水分大于 20a 和 35a 的,且林龄大的柠条林下土壤水分亏缺比较严重;郭晋丽^[13]分析了晋西北丘陵风沙区 4 种植被的土壤容重,研究发现杨树林地土壤容重最优,其次为柠条地、蒿地和草地;李青^[14]分析了晋西北丘陵风沙区内小叶杨、樟子松(*P. sylvestris*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)等乔木和沙棘(*Hippophae rh-*

amnoides)、柠条、乌柳(*Salix cheilophila*)等灌木生态恢复效应,发现乔木樟子松和油松生态适应性很强,灌木柠条生态恢复效果最优。以往学者多关注于晋西北地区固沙植物的土壤状况,评价因子较为单一,对该区域优势植物生存稳定性的定量分析和综合性评价研究尚少,同时,晋西北丘陵风沙区位于黄土高原,陡坡众多,坡面上(尤其是15°以上坡度)的人工固沙植物研究是重点也是难点,而目前针对坡面尺度下不同坡位固沙植物稳定性评价的研究也还相对较少。

本研究通过对7种优势植物以及撂荒地的4类评价指标(优势植物生长状况、土壤质量、林下植物生物量和多样性、Godron指数),共计15个评价因子的计算,综合运用生物生态学和数学生态学方法隶属度评判法对其稳定性进行比较,对人工固沙植被的稳定性进行综合评选并排序,综合评选出稳定性最高的人工固沙植物,以期为晋西北丘陵风沙区人工固沙植被的恢复和科学管理提供科学依据和理论支撑。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于忻州市五寨县石咀头村(111.771°~111.789°E,38.962°~38.981°N,海拔1400 m左右),属于温带大陆性气候,冬长夏短,昼夜温差大,年均气温4.9℃,有效积温2452℃,年均日照时数为2872.1 h,年均无霜期约133 d,年平均降水量稀少(532.1 mm),全年降水量主要集中于7—8月。本区内乔木主要有:油松(*Pinus tabulaeformis*)、旱柳(*Salix matsudana*)、小叶杨(*Populus simonii*)和刺槐(*R. pseudoacacia*),灌木主要为人工柠条林(*C. korshinskii*),林下优势草本植物有米蒿(*Artemisia dalai-lamae* Krasch)、刺藜(*Chenopodium aristatum*)和狗尾草(*Setaria viridis*)等。研究区内风大沙多,是京津沙源地,其植被生态建设直接关系到当地、首都以及华北地区的生态安全。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与调查 2013年山西省科技厅在忻州市五寨县石咀头村建立了实验林地,为本实验提供了天然场所(各林地均为同龄纯林,栽种初始密度一致)。2020年8月我们在此实验林地中不同坡位选择了7种8年生优势种植物(油松、青杨、樟子松、刺槐、旱柳、柠条、紫穗槐),以邻近天然撂荒地作为对照,共设置了8种植物样地。8种植物样地分

别在上中下3个坡位,各设置3个10 m×10 m的样方作为重复,共72个样方,每个样方内采集0~20 cm的土壤,带回实验室进行理化实验,各样方地内用检尺实测长势均匀且良好的7种植物的数量、株高、冠幅并数分枝数,剪取均匀的3枝称其鲜重带回实验室,后80℃烘干至恒重,并称其干重。植物郁闭度使用目测法。样地植物基本情况见表1(撂荒地植被主要以草本植物为主,无乔灌木生长)。

7种植物样地以及撂荒地样地按照上中下三个坡位,各设置5个1 m×1 m的草本样方,共120个样方,记录各样方内林下植物物种数、高度、盖度,并称其鲜重带回实验室80℃烘干至恒重,获得林下植物生物量。

1.2.2 土壤样品测定 利用德国产 STEPS 土壤五参数分析仪(型号 COMBI 5000)的 SMT 100 传感器探头对土壤剖面的土壤水分含量进行测量;土壤有机质含量采用重铬酸钾氧化-硫酸亚铁滴定法测定,土壤碱解氮含量采用碱解扩散法测定,土壤速效钾含量采用1 mol/L 醋酸铵溶液浸提—火焰光度法测定,土壤速效磷含量采用0.5 mol/L 的 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定^[15]。

1.3 稳定性评价体系

1.3.1 稳定性评价指标和因子 (1)优势植物生长状况 参与评价的因子为:冠幅、株高和枝叶生物量。稳定性是植物群落结构与功能的一个综合性特征^[16],它首先体现优势植物的生长状况,其中植物枝叶生物量反映的是生态系统生产能力,对生态系统的稳定性具有指示作用。

(2)土壤质量 参与评价的因子为:表层土壤水分和土壤有机质、碱解氮、速效钾和速效磷含量。土壤质量的改善是固沙地区土地恢复的最终目标,土壤水分是生态系统功能和过程的关键驱动因子^[17],土壤养分在系统演替过程中的良化或恶化及其程度是评价稳定性的一个重要指标^[18]。

(3)林下植物生物量和多样性 参与评价的因子为:生物量、高度、密度、多样性指数、丰富度指数含量、均匀度指数。林下植物是林地生态系统生物多样性的的重要组成部分,林下植被的生长状况和结构特征反映了生态系统的健康,林下植物多样性也是维持植物群落稳定性的基本要求^[19]。

林下植物多样性采用α多样性指数综合评估群落物种多样性水平,公式如下:

物种丰富度指数(D): $D=S$ (1)

香农-威纳(Shannon-Wiener)多样性指数:

表 1 样地基本信息
Table 1 Basic information of sample plot

植物类型 Plant type	样地 Site	海拔 Elevation /m	坡位 Slope position	坡度 Slope/°	冠幅 Crown width /cm	株高 Plant height /cm	郁闭度 Canopy coverage
乔木 Tree	油松 <i>Pinus tabuliformis</i>	1 393. 65	上 Up	11	119. 17. 67±13. 32a	228. 00±17. 09b	0. 78±0. 03b
		1 391. 53	中 Middle	15	124. 67±11. 72a	250. 00±10ab	0. 86±0. 01ab
		1 388. 84	下 Down	26	143. 33±21. 89a	287. 67±33. 56a	0. 88±0. 03a
	青杨 <i>Populus cathayana</i>	1 393. 78	上 Up	10	96. 17±15. 63a	214. 50±10. 68b	0. 58±0. 09a
		1 391. 66	中 Middle	25	114. 83±1. 20a	354. 38±24. 53a	0. 62±0. 10a
		1 388. 29	下 Down	15	106. 17±4. 75a	418. 29±32. 04a	0. 65±0. 11a
	樟子松 <i>Pinus sylvestris</i>	1 389. 96	上 Up	8	96. 00±3. 79b	188. 10±16. 45a	0. 73±0. 05a
		1 387. 41	中 Middle	15	131. 00±6. 05a	189. 03±8. 37a	0. 80±0. 04a
		1 383. 83	下 Down	28	138. 00±5. 20a	241. 55±36. 50a	0. 82±0. 03a
	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	1 392. 47	上 Up	10	102. 83±10. 98a	342. 67±15. 67a	0. 64±0. 03a
		1 388. 18	中 Middle	16	83. 83±24. 66a	264. 47±9. 68b	0. 55±0. 11a
		1 385. 62	下 Down	13	93. 00±11. 63a	352. 83±27. 15a	0. 59±0. 10a
	旱柳 <i>Salix matsudana</i>	1 392. 06	上 Up	5	47. 17±15. 90a	191. 67±25. 66a	0. 28±0. 06a
		1 389. 77	中 Middle	15	26. 83±3. 42a	113. 33±20. 82b	0. 24±0. 05a
		1 386. 43	下 Down	10	54. 50±5. 48a	196. 67±35. 12a	0. 31±0. 09a
灌木 Shrub	柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	1 388. 18	上 Up	10	190. 67±61. 63a	142. 33±9. 29ab	0. 49±0. 10a
		1 386. 81	中 Middle	13	116. 67±6. 98a	112. 67±20. 4b	0. 57±0. 04a
		1 384. 15	下 Down	19	172. 33±18. 58a	177. 33±28. 31a	0. 58±0. 04a
	紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>	1 388. 31	上 Up	9	142. 83±14. 30a	146. 67±5. 77a	0. 46±0. 04a
		1 386. 15	中 Middle	16	152. 67±16. 36a	144. 67±8. 39a	0. 44±0. 08a
对照组 Control group	撂荒地 Abandoned land	1 383. 96	下 Down	22	139. 67±7. 22a	137. 33±2. 89a	0. 49±0. 04a
		1 386. 15	上 Up	10	—	—	—
		1 384. 97	中 Middle	25	—	—	—
		1 382. 49	下 Down	14			

注:不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平上具有显著差异
Note:Different normal letters indicate significant difference at the $P<0.05$ level

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \tag{2}$$

Pielou 均匀度指数: $J(J_{sw}) = (\sum P_i \ln P_i) / \ln S$
$$\tag{3}$$

式中 $P_i = n_i$ (第 i 种的个体数)/ n (调查物种的总个体数); S 为物种数。

(4)Godron 指数 Godron 指数是将不同优势种植物群落相对频度与种总数倒数累积一一对应,绘制散点图,将各点以一条平滑曲线拟合起来,同时做直线 $y = 100 - x$,直线与曲线的交点(x/y)作为稳定性的参考点,并求出交点坐标。Godron 指数得到的交点坐标,越接近群落稳定点 20/80,就越稳定^[20]。

1.3.2 稳定性评价方法 利用模糊隶属法综合评

价群落稳定性^[21-22],要求对参与评价的所有土壤和植被指标因子的权重都是相等的,首先对初始数据做标准化的处理,所采用的公式如下:

$$X_{jk}^* = X_{jk} / X_{kmax} \times 1000 \tag{4}$$

式中: X_{jk}^* 为 X_{jk} 的标准化值, X_{jk} 为第 j 项指标第 k 个评价因子的实测值, X_{kmax} 为第 k 个评价因子的最大值。

通过计算模糊数学中的隶属函数值对 7 种植物以及撂荒地进行综合评价,所采用的公式如下:

$$U(X_{ik}) = (X_{ik} - X_{kmin}) / (X_{kmax} - X_{kmin}) \tag{5}$$

其中, $U(X_{ik})$ 为第 i 种群落第 k 项指标的隶属度, X_{ik} 为评价指标的标准值或多项参评因子标准值的平均值; X_{kmax} 表示所有群落第 k 项指标的最

大值, X_{kmin} 表示所有群落第 k 项指标的最小值。

1.4 数据处理

实验数据使用 SPSS21.0 软件进行整理和分析, 采用单因素方差分析(One-Way ANOVA), 在 95% 的置信水平上, 用 Duncan 显著性检验方法比较不同优势植物的枝叶生物量、表层土壤水分和养分、林下植物生物量、林下植物高度和密度、林下植物多样性指数的差异, 以及比较同一优势植物不同坡位之间的枝叶生物量、表层土壤水分和养分、林下植物生物量的差异。文中所有图均利用 Origin8 软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同优势植物生长状况

图 1 显示, 不同优势植物的单枝枝叶生物量存在显著差异($P<0.05$)。从整个坡面来看, 乔木中单枝枝叶生物量平均值最高的是油松(1 457.1 g), 其次是樟子松(1 077.1 g)、青杨(892.5 g)、刺槐(847.1 g)、旱柳(47.37 g), 旱柳单枝生物量仅为油松的 1/30; 灌木中的柠条(1 429.1 g)单枝枝叶生物量最高, 约为紫穗槐(458.0 g)生物量的 3 倍; 从不同坡位来看, 多数优势植物在坡上、坡中、坡下的单枝枝叶生物量也存在显著差异($P<0.05$), 除了旱柳和紫穗槐, 其余都是坡下生物量值最大(图 1)。

2.2 不同优势植物表层土壤质量

2.2.1 土壤水分 图 2 显示, 不同优势植物的表层土壤水分显著差异($P<0.05$)。灌木(柠条 12.68% > 紫穗槐 12.09%)表层 0~20 cm 土壤平均水分含量高于乔木和撂荒地(青杨 11.9% > 撂荒地 11.8% > 油松 11.5% > 樟子松 10.9% > 刺槐 10.1% > 旱

柳 8.5%; 樟子松、刺槐、柠条和撂荒地不同坡位的表层土壤水分含量显著差异($P<0.05$), 所有植物土壤水分均表现为: 坡下大于坡中或坡上(图 2)。

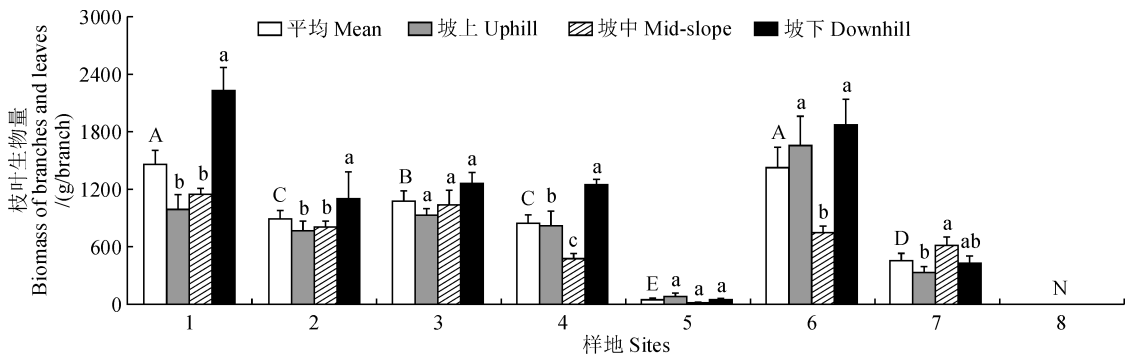
2.2.2 土壤养分 由图 3 可知, 不同优势植物的表层土壤养分均存在显著差异($P<0.05$)。乔木中表层土壤有机质含量平均值最高的植物是青杨(7.0 g/kg)和油松(6.9 g/kg), 其余乔木土壤有机质含量从高到低为: 樟子松(5.7 g/kg) > 刺槐(4.9 g/kg) > 旱柳(4.7 g/kg); 灌木中柠条(6.3 g/kg)大于紫穗槐(4.5 g/kg); 乔灌木各植物表层土壤有机质含量都高于撂荒地(3.8 g/kg)。

图 3 显示, 乔木中表层土壤碱解氮含量平均值最高的是旱柳(33.9 mg/kg), 其余乔木植物表层土壤碱解氮含量依次为: 油松(31.4 mg/kg) > 刺槐(27.5 mg/kg) > 撂荒地(26.4 mg/kg) > 青杨(26.0 mg/kg) > 樟子松(23.4 mg/kg); 灌木表层土壤碱解氮含量为柠条(36.2 mg/kg)大于紫穗槐(30.0 mg/kg)。

图 3 显示, 不同乔木植物表层土壤速效钾平均含量从多到少排序为: 青杨(70.5 mg/kg) > 油松(64.8 mg/kg) > 刺槐(53.3 mg/kg) > 旱柳(47.3 mg/kg) > 樟子松(44.2 mg/kg); 灌木中为柠条(52.3 mg/kg)大于紫穗槐(38.9 mg/kg); 乔灌木各植物表层土壤速效钾含量都高于撂荒地(36.4 mg/kg)。

图 3 显示, 不同植物表层土壤速效磷含量除了旱柳和撂荒地较低, 其他乔灌植物含量都相差很小, 约 12 mg/kg 左右。

撂荒地的 4 个土壤养分指标几乎都是最低。各优势植物在不同坡位的土壤养分也存在显著差异($P<0.05$), 油松、青杨、樟子松、旱柳、柠条的土壤有



1~8 为样地编号(1. 油松; 2. 青杨; 3. 樟子松; 4. 刺槐; 5. 旱柳; 6. 柠条; 7. 紫穗槐; 8. 撂荒地, 对照)

不同大写字母表示不同植物平均值间差异显著, 不同小写字母表示同一植物在不同坡位处理间差异显著 ($P<0.05$), 下同

图 1 不同样地植物枝叶生物量

1-8 indicate number of plant site (1. *P. tabulaeformis*; 2. *P. cathayana*; 3. *P. sylvestris*; 4. *R. pseudoacacia*; 5. *S. matsudana*; 6. *C. korshinskii*; 7. *A. fruticosa*; 8. Abandoned land, CK). Different uppercase letters indicated significant differences among different plant means, and different lowercase letters indicated significant differences among different slope treatments of the same plant ($P<0.05$). The same as below

Fig. 1 Biomass of plant branches and leaves in different places

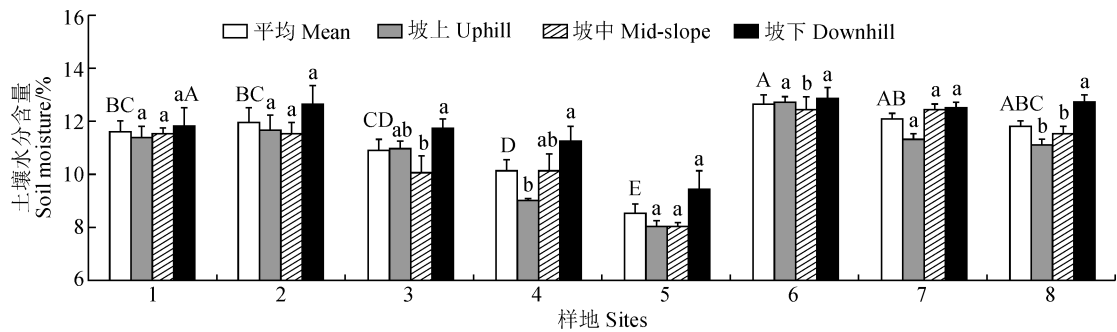


图 2 不同样地植物 0~20 cm 的土壤水分含量
Fig. 2 Soil moisture of 0~20 cm under different plant sites

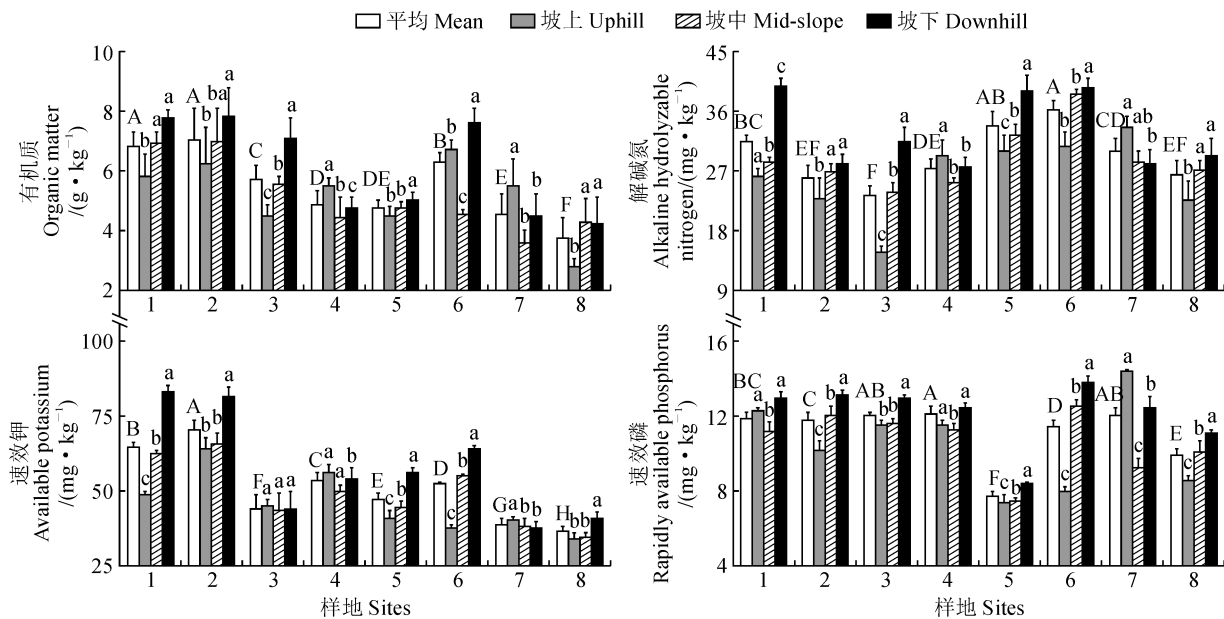


图 3 不同样地植物 0~20 cm 的土壤养分
Fig. 3 Soil nutrients of 0~20 cm under different plant sites

机质、解碱氮、速效钾、速效磷都是坡下大于坡中和坡上(图 3)。

2.3 不同优势植物林下植物生物量和多样性

2.3.1 林下植物生物量 由图 4 可知,不同优势植物的林下植物平均生物量存在显著差异 ($P < 0.05$)。乔木中青杨(87.2 g)的林下植物生物量最高,只有青杨生物量大于撂荒地(67.4 g),其次是刺槐(54.7 g)、旱柳(46.5 g)、油松(19.6 g)和樟子松(14.7 g),油松和樟子松林下植物生物量极少,不足青杨林下生物量的四分之一;灌木中柠条(50.4 g)大于紫穗槐(41.3 g);多数优势植物在不同坡位的林下植物生物量也存在差异性显著 ($P < 0.05$),旱柳是坡上生物量远大于坡中坡下,其余植物以及撂荒地基本是坡下生物量多(图 4)。

2.3.2 林下植物类群组成 不同优势植物林下草本植物共计 26 种,分属 17 科 25 属,其中菊科(4

种)、豆科(4 种)、禾本科(4 种)是主要的植物类群;林下灌木植物共计 2 种(表 2)。

7 种优势植物的林下植物都是以一年生草本植物为主,其次是多年生草本植物,一年到多年生草本植物和灌木很少(图 5,A)。各优势树种林下一年生草本植物类型数差异不显著,一年到多年生草本植物类型数差异显著 ($P < 0.05$),旱柳和撂荒地都是(1 种),其余植物都不足 1 种,油松和樟子松以及一年到多年生草本植物为零;各优势植物林下多年生草本植物类型数差异显著 ($P < 0.05$),青杨林下多年生草本植物最多(5.7 种),其次是刺槐(4.7 种)、旱柳(4.3 种)、柠条(4.3 种)、撂荒地(4.3 种)、油松(2.7 种)、紫穗槐(2.7 种),最少的是樟子松只有 1 种。

不同优势植物林下植物生长类型数差异显著 ($P < 0.05$),其中青杨林下草本植物类型数最多(11 种),樟子松草本植物类型数最少(5.7 种),其余植物

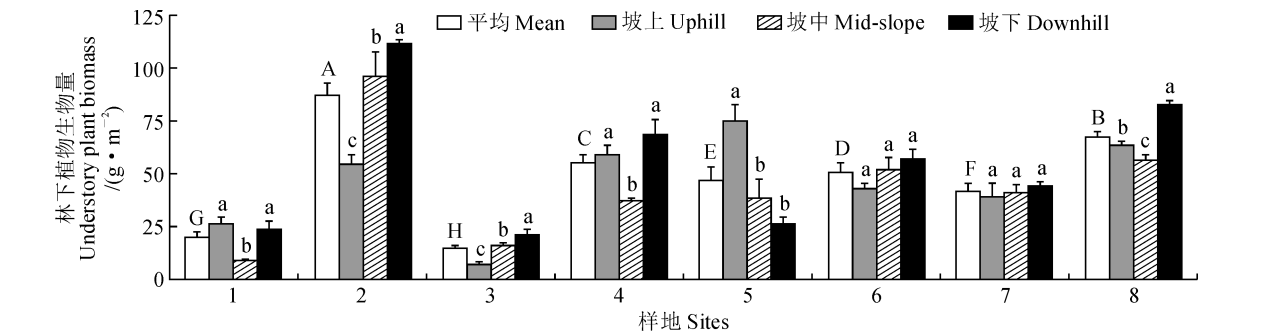


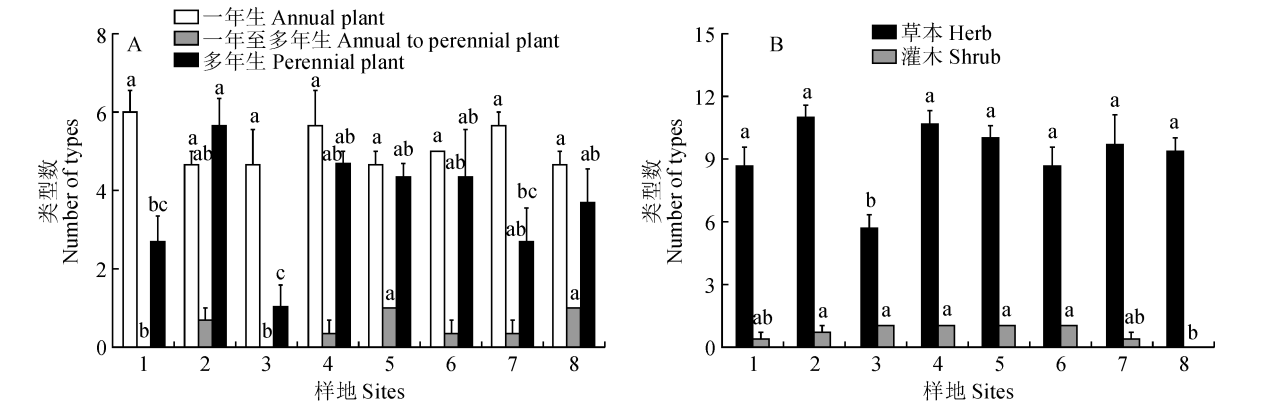
图 4 不同样地植物林下植物生物量

Fig. 4 Biomass of understory plants in different plots

表 2 人工林林下植物类群组成

Table 2 Composition of undergrowth plant groups in artificial forests

林下植物类群 Understory plant group	林下植物组成 Understory plant composition		
一年生草本植物 Annual herb	狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	刺藜 <i>Chenopodium aristatum</i>	米蒿 <i>Artemisia dalai-lamae</i>
	香青兰 <i>Dracocephalum moldavica</i>	早熟禾 <i>Poa pumila</i>	野燕麦 <i>Avena fatua</i>
	斑地锦 <i>Euphorbia maculata</i>	灰绿藜 <i>Chenopodium glaucum</i>	益母草 <i>Leonurus artemisia</i>
一年到多年生草本植物 Annual to perennial plants	角蒿 <i>Incarvillea sinensis</i>	狗娃花 <i>Heteropappus hispidus</i>	
多年生草本植物 Perennial herb	披碱草 <i>Elymus dahuricus</i>	木贼 <i>Equisetum hyemale</i>	老鹳草 <i>Geranium wilfordii</i>
	黄耆 <i>Astragalus propinquus</i>	披针叶苔草 <i>Carex lanceolata</i>	地角儿苗 <i>Oxytropis bicolor</i>
	蓝刺头 <i>Echinops sphaerocephalus</i>	少花米口袋 <i>Gueldenstaedtia verna</i>	茵陈蒿 <i>Artemisia capillaries</i>
	猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	地梢瓜 <i>Cynanchum thesiodes</i>	打碗花 <i>Calystegia hederacea</i>
	天门冬 <i>Asparagus cochinchinensi</i>	唐菰草 <i>Thalictrum aquilegifolium</i>	紫花地丁 <i>Viola philippica</i>
多年生灌木或半灌木 Perennial shrub or subshrub	胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	百里香 <i>Thymus mongolicus</i>	



不同小写字母表示林下植物在不同样地间差异显著 ($P < 0.05$)

图 5 不同样地植物林下植物生长型类型数

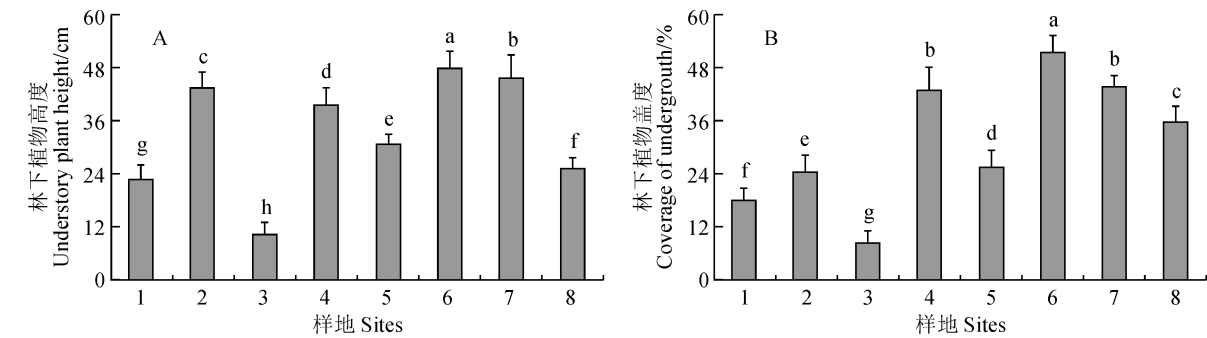
Different normal letters represented significant differences in understory plants among different sites ($P < 0.05$)

Fig. 5 Number of growth types of understory plants in different places

类型数相差较小。樟子松、刺槐、旱柳、柠条多年生小灌木类型数为 1 种,青杨为 0.67 种,其次是油松和紫穗槐(0.3 种),撂荒地没有灌木(图 5,B)。

2.3.3 林下植物高度和盖度 图 6 显示,不同优势植物的林下植物高度和盖度均存在显著差异($P <$

0.05)。灌木林下植物高度和盖度都高于各乔木。灌木中柠条林下植物高度为 47.7 cm,盖度为 51.3%,紫穗槐仅次于柠条,高度为 45.4 cm,盖度为 43.5%;乔木中青杨林下植物高度(43.13 cm)最高,刺槐林下植物盖度(42.67%)最大,樟子松的高度



不同小写字母表示指标在样地间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图6 不同样地植物林下植物高度和盖度

Different normal letters indicate significant differences between different plants sites ($P < 0.05$). The same as below

Fig. 6 Undergrowth height and coverage of different plants

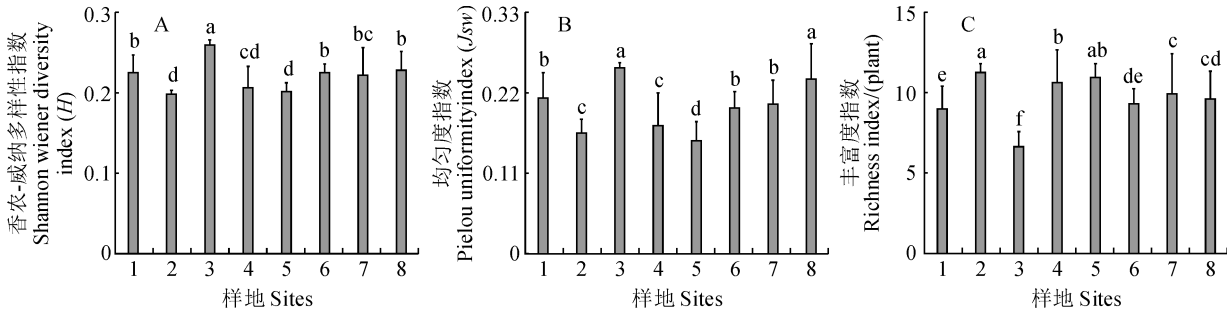


图7 不同样地植物林下植物多样性比较

Fig. 7 Comparison of undergrowth plant diversity in different plantations

(10.2 cm)和盖度(8.4%)都最小(图6)。

2.3.4 林下植物多样性 图7显示,不同优势种的林下植物多样性指数均存在显著差异($P < 0.05$)。乔木中樟子松、油松林下植物多样性指数(0.26和0.23)和均匀度指数(0.26和0.21)最高,丰富度指数(6.7和9)最低;青杨相反,物种丰富度指数最高(11.3),多样性指数(0.2)和均匀度指数(0.17)相对较低;刺槐和旱柳各指数均居中。灌木中,柠条各多样性指数和紫穗槐大致相同(图7)。

2.4 Godron 指数

乔木中刺槐交点坐标为 33.33/66.67,离群落稳定点最近,其次是旱柳(34.53/65.47)、油松(34.97/65.03)、樟子松(35.58/64.42)、青杨(36.33/63.67);灌木中柠条林的交点坐标为 32.24/67.76,离群落稳定点最近,其次为紫穗槐(35.74/64.25);撂荒地交点坐标为 37.97/62.03(图8)。

2.5 综合稳定性评价指标体系

由表3标准值和表4的评价结果得知,各植物群落的稳定性隶属度介于0.28~0.82间。乔木中油松的稳定性最高,隶属度为0.69,其次是刺槐、青杨,隶属度分别为0.67和0.66,樟子松、旱柳稳定

性最低,隶属度分别为0.39和0.28;灌木中柠条稳定性隶属度为0.82,远大于紫穗槐(0.64);乔灌木都高于撂荒地的隶属度(0.203)。

3 讨论

3.1 优势植物枝叶生产力

本研究发现在不同优势植物的枝叶生物量和同一种优势种在不同坡度之间的枝叶生物量都存在显著差异,这说明除了物种会影响优势种生物量的积累,坡位作为重要的立地因子也会对植物生物量产生较大影响。乔木中油松单枝生物量最大,灌木中柠条的单枝生物量最大。不同坡位的同种植物基本是坡下枝叶生物量值最大,与梁淑娟^[23]的研究结果基本一致,因为坡位影响着植物生长,下坡位的土壤水分、养分更好,从而促进了植物生长和有效成分积累^[24]。

3.2 土壤质量

本研究发现灌木林(柠条和紫穗槐)表层土壤水分要优于各乔木和撂荒地,这与张敏^[25]的研究相似。这主要是由于相较于乔木林,灌木林土壤水分入渗能力更强,蒸腾量较低^[26],其中灌木中蓄水作用

表 3 不同样地植物 4 项综合稳定性指标的标准值

Table 3 Standard values of 4 comprehensive stability indexes of different plants

评价指标 Evaluation Index	油松 <i>P. tabulaeformis</i>	青杨 <i>P. cathayana</i>	樟子松 <i>P. sylvestris</i>	刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	旱柳 <i>S. matsudana</i>	柠条 <i>C. korshinskii</i>	紫穗槐 <i>A. fruticosa</i>	撂荒地 Abandoned land
优势植物 生长状况 Growth status of dominant plants	冠幅 Crown width	809.41	642.16	584.66	268.64	1000.00	909.76	—
	株高 Plant height	775.75	1000.00	969.60	508.28	438.02	434.32	—
	枝叶生物量 Branch and leaf biomass	1000.00	612.55	581.39	32.51	979.44	314.34	—
	平均值 Mean	861.72	751.57	711.88	269.81	805.82	552.81	—
土壤质量 Soil quality	土壤水分 Soil moisture	913.36	942.44	799.56	670.74	1000	952.87	931.04
	有机质 Organic matter	973.48	1000	813.63	696.91	896.99	645.31	537.36
	碱解氮 Hydrolyzed nitrogen	867.57	718.27	645.39	757.51	1000	828.33	728.23
	速效钾 Available potassium	918.72	1000	627.03	756.18	741.41	551.35	516.02
	速效磷 Available phosphorus	976.99	971.25	992.57	1000	942.24	990.4	815.92
	平均值 Mean	930.02	926.39	787.78	802.03	916.13	793.65	705.71
林下植物 生物量和 多样性 Understory plant biomass and diversity	生物量 Biomass	224.46	577.41	168.37	626.8	1000	474.02	773.20
	高度 High	471.37	904.76	213.97	825.05	1000	951.96	522.13
	盖度 Coverage	349.31	473.99	163.65	831.29	1000	846.68	692.77
	多样性指数 Shannon wiener diversity index	921.2	749.72	847.95	806.33	1000	766.37	931.19
	均匀度指数 Pielou uniformity index	650.15	512.63	1000	546.16	564.63	528.18	625.36
	丰富度指数 Richness index	736.84	1000	526.32	894.74	684.21	947.37	789.47
	平均值 Mean	558.89	703.09	486.71	755.06	874.81	752.43	722.35
	曲线类型 Type of curve	$y = -0.0113x^2 + 2.0142x + 8.4046$ $y = -0.0107x^2 + 2.0129x + 4.6605$ $y = -0.0113x^2 + 2.0515x + 5.7343$ $y = -0.0122x^2 + 2.0561x + 11.697$ $y = -0.0112x^2 + 1.9822x + 10.378$ $y = -0.0114x^2 + 2.0725x + 4.7364$ $y = -0.0137x^2 + 2.1922x + 11.322$ $y = -0.0087x^2 + 1.789x + 6.6509$						
Godron 指数 Godron index	相关系数 Correlation coefficient	0.995	0.993	0.998	0.979	0.998	0.971	0.992
	交点坐标 Intersection coordinates	34.97/65.03	36.33/63.67	35.58/64.42	33.33/66.67	34.53/65.47	35.74/64.25	37.97/62.03
	标准值 Standard value	769.4	749.08	791.42	754.12	748.22	749.61	836.23

表 4 不同植物 4 项综合稳定性指标的隶属度和平均值

Table 4 The membership degree and average value of 4 comprehensive stability indexes of different plants							
	植物类型 Plant type	优势植物 生长状况 Growth status of dominant plants	土壤质量 Soil quality	林下植物 生物量和多样性 Understory plant biomass and diversity	Godron 指数 Godron index	平均值 Mean	排序 Sequence
乔木 Tree	油松 <i>Pinus tabuliformis</i>	1	1	0.19	0.55	0.69	1
	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	0.75	0.43	0.69	0.82	0.67	2
	青杨 <i>Populus cathayana</i>	0.81	0.98	0.56	0.30	0.66	3
	樟子松 <i>Pinus sylvestris</i>	0.74	0.37	0	0.44	0.39	4
	旱柳 <i>Salix matsudana</i>	0	0.06	0.43	0.62	0.28	5
灌木 Shrub	柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	0.91	0.94	1	0.41	0.82	1
	紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>	0.48	0.39	0.68	1	0.64	2
对照 Control group	撂荒地 Abandoned land	—	0	0.61	0	0.20	—

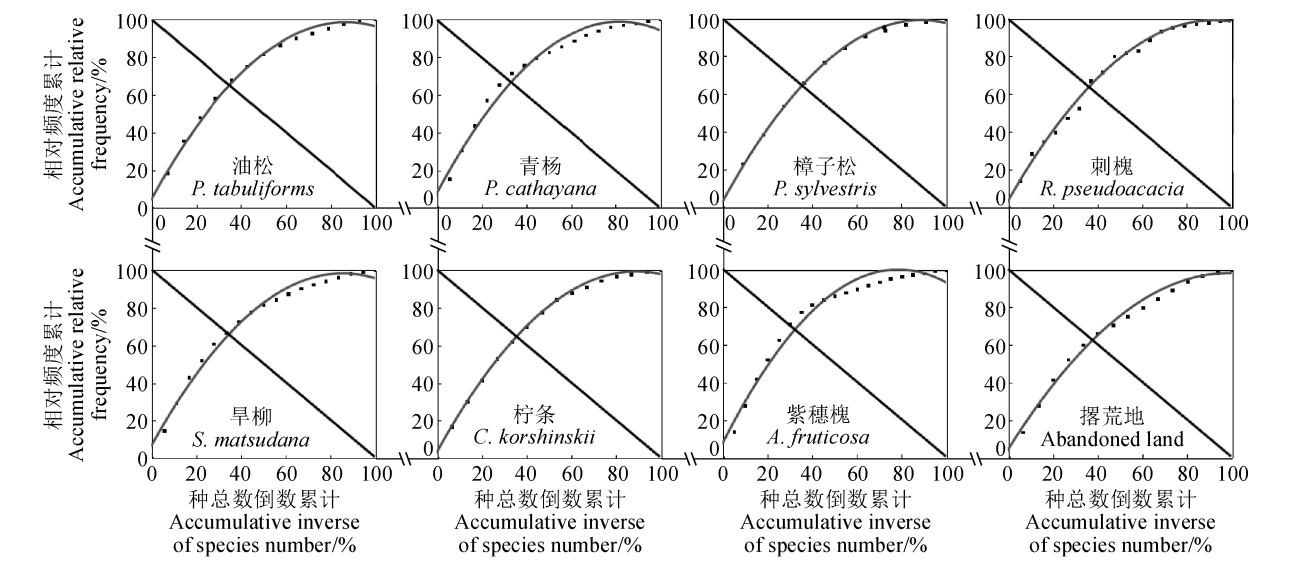


图 8 不同样地植物 Godron 散点图
Fig. 8 Different plant Godron scatter plots

最好的是柠条,因为柠条林地有大量枯枝落叶的存在,林地内土壤蒸发减弱,柠条林便有较高的保水功能。柠条林在不同坡位的表层土壤含水量显著不同,本研究的另 6 种植物和撂荒地土壤水分也都是坡下大于坡中或坡上,与郝振纯等^[27-28]的研究类似。坡底土壤含水量最大,中坡位和上坡位的土壤水分和凋落物由于坡度倾斜和风力作用,使土壤细小颗粒物和植物凋落物在下坡位产生集聚,因此下坡土壤水分条件更好。

本研究还发现人工林种植后土壤养分恢复明显,且具有明显的“沃岛”现象。撂荒地土壤有机质、碱解氮、速效钾、速效磷含量与其他 7 种植物相比均最低,这说明人工林种植比天然恢复更能够提高土壤的养分。与其他植物相比,乔木中的油松和灌木中的柠条表层土壤有机质和各速效养分含量基本是最

高的;而同种植物在不同坡位中,坡下植物养分基本上高于坡中或坡上植物,说明低坡位更能积累植物生长所需的养分,这与邓继峰等^[29-30]研究的结果一致。相较于中上坡位,下坡位土壤养分条件更优,一方面是由于大量凋落物在下坡集聚,腐化后产生养分富集于土壤的表层,另一方面雨水冲刷作用使土壤养分随着水分在下坡位汇集,同时还有研究表明坡位越低,根系分布越集中,土壤养分越有集聚的趋势^[31]。

3.3 林下植物生物量和多样性

本研究发现,植物的种类是影响林下植物生物量的首要因素,乔木中生物量最多的是青杨,最少的是油松和樟子松,不足青杨生物量的四分之一,是因为油松和樟子松的林分长期保持着最高的郁闭度,多个研究也表明植物的林下植物生物量与郁闭度呈负相关关系^[32-33],林下植被所获得的光资源少,产

生了较多苔藓,并且林内枯枝落叶全为针叶,不易分解,林下腐殖质较少,其林下植物生物量更少;影响林下植物生物量的因素还有植物的坡位,7种植物基本表现为下坡位林下植物生物量积累的更多,这与孙巧玉^[34]的研究结果相似。主要是由于下坡位水分的分配比较充足,养分积累较多,有利于林下植物的定殖和生长,促进了林下生物量的积累。

本研究还发现林下植物多样性最高的是樟子松,但综合其稳定性指标却很低,青杨林下植物多样性最低,但其稳定性却较高,这说明林下群落多样性和稳定性之间存在着较为复杂的关系,与刘晶和安丽娟^[35-36]的研究类似。林下植物多样性指数只是表现了植物的一方面的特征,而稳定性是由多种因素共同作用的结果,不能简单地断定两者的正负相关关系。稳定性与多样性之间可能存在一个多样性阈值,在阈值以下多样性的增加对植被和稳定性的维持和功能的提高是有利的,当多样性增加到一定程度后,它对植被稳定性和功能的作用就可能不再明显了^[36-37]。

3.4 不同优势种植物稳定性综合评价

本研究发现乔木中油松的稳定性最高,隶属度平均值为 0.69;灌木中柠条的稳定性最高,隶属度平均值为 0.82。本研究所得的结果基本符合当地植物群落发育状况和发展趋势,但与郭其强^[38]研究的黄土高原黄龙山乔木植物群落稳定性的结论略有不同,其中油松林的土壤养分、植物生产力、物种多

样性 3 项指标与本研究基本一致,但其隶属度平均值仅为 0.36,是由于本研究区内实验林地人为干扰少,未将人为干扰指标列为评价因子。本研究与郭伟^[39]研究结果相似,均为油松林和柠条林稳定性好和生态效应优。本研究还发现,7 种人工固沙优势植物群落稳定性均高于撂荒地,这与王改玲^[40]对晋北植被的研究结果相同,表明与自然撂荒地相比,人工林能更好地发挥环境恢复和维持生态稳定的作用。在进行生态恢复造林物种选择时,种植乔木油松和灌木柠条稳定性高,并可以有效增加植被稳定性和丰富度;在植物坡位选择时,可以选择条件更好的坡下种植,使植物群落的生态效应得到最大化可持续的发挥。

4 展 望

本研究既评价了植物群落的功能稳定性,又评价了植物群落的结构稳定性,对群落稳定性的评价相对完整。但由于生态系统功能和结构上的复杂性以及稳定性表达的多样性,至今还没建立起统一的稳定性评价体系,今后在植物与土壤的机理关系上,对评价指标因子进行模块化设定,建立统一的定量指标体系。同时群落稳定性是一个动态变化的过程,应该建立长久统一的观测体系(植物群落指标,优势种性状指标,土壤状况指标)可能会为今后固沙植被群落研究提供更加全面的数据支撑。

参考文献:

[1] 薛占金. 晋西北地区土地沙漠化的成因及其防治研究[D]. 太原: 山西大学, 2013.

[2] 李金峰, 杨智勇, 薛丽萍. 晋西北缓坡丘陵风沙区生态修复的主要途径和技术措施探讨[J]. 山西水土保持科技, 2009, (1): 8-11.

[3] 杨治平, 张 强, 王永亮, 等. 晋西北黄土丘陵区小叶锦鸡儿人工灌丛土壤水分动态研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18 (2): 352-355.

YANG Z P, ZHANG Q, WANG Y L, *et al.* Soil water dynamics under artificial *Caragana microphylla* shrub in the loess hilly region of Northwest Shanxi Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(2): 352-355.

[4] 程积民, 万惠娥, 王 静, 等. 半干旱区柠条生长与土壤水分消耗过程研究[J]. 林业科学, 2005, 41(2): 37-41.

CHENG J M, WAN H E, WANG J, *et al.* Growth of *Caragana korshinskii* and depletion process of soil water in semi-arid region[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(2): 37-41.

[5] 穆兴民, 徐学选, 王文龙, 等. 黄土高原人工林对区域深层土壤水环境的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 210-217.

MU X M, XU X X, WANG W L, *et al.* Impact of artificial forest on soil moisture of the deep soil layer on loess plateau [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(2): 210-217.

[6] 高城雄. 陕北榆林长城沿线风沙区防风固沙林结构与效益研究[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2008.

[7] 冯 云, 马克明, 张育新, 等. 坡位对北京东灵山辽东栎林物种多度分布的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(10): 2 137-2 144.

FENG Y, MA K M, ZHANG Y X, *et al.* Effects of slope position on species abundance distribution of *Quercus wutaishanica* community in Dongling Mountain of Beijing[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(10): 2 137-2 144.

[8] 张顺平, 乔 杰, 孙向阳, 等. 坡向、坡位对泡桐人工林土壤养分空间分布的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35 (1): 109-116.

ZHANG S P, QIAO J, SUN X Y, *et al.* Effects of slope aspect and slope position on spatial distribution of soil nutrients of *Paulownia fortunei* plantation[J]. *Journal of Central South Universi-*

- ty of Forestry & Technology, 2015, **35**(1): 109-116.
- [9] 吴 昊. 秦岭山地松栎混交林土壤养分空间变异及其与地形因子的关系[J]. 自然资源学报, 2015, **30**(5): 858-869.
- WU H. The relationship between terrain factors and spatial variability of soil nutrients for pine-oak mixed forest in Qinling mountains[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, **30**(5): 858-869.
- [10] 张景光, 王新平. 甘宁蒙陕退耕还林(草)中的适地适树问题[J]. 中国沙漠, 2002, **22**(5): 489-494.
- ZHANG J G, WANG X P. Issue on preferential species of certain soil in re-afforestation engineering of Gansu, Ningxia, Inner Mongolia and Shaanxi[J]. *Journal of Desert Research*, 2002, **22**(5): 489-494.
- [11] 古文婷, 史建伟, 牛俊杰, 等. 晋西北黄土丘陵区 4 种植被类型土壤水分含量的变化特征研究[J]. 西部林业科学, 2013, **42**(6): 69-74.
- GU W T, SHI J W, NIU J J, *et al.* Soil moisture characteristics of different vegetations in hilly region of loess plateau in northwest Shanxi[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2013, **42**(6): 69-74.
- [12] 梁海斌, 史建伟, 牛俊杰, 等. 晋西北黄土丘陵区不同林龄柠条地土壤水分变化特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, **28**(6): 143-148.
- LIANG H B, SHI J W, NIU J J, *et al.* Study on the characteristics of the soil moisture variation in different-aged *Caragana korshinskii* Kom in Loess hilly region, northwestern Shanxi[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, **28**(6): 143-148.
- [13] 郭晋丽, 刘 爽. 晋西北风沙区长期不同植被恢复类型下土壤物理特征分析[J]. 山西农业科学, 2017, **45**(11): 1 794-1 800.
- GUO J L, LIU S. Analysis of soil physical characteristics under different vegetation restoration types for a long time in the sandy area of northwest Shanxi Province[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2017, **45**(11): 1 794-1 800.
- [14] 李 青, 狄晓艳. 晋北丘陵风沙区不同植被恢复模式的土壤化学特征与生态恢复效应[J]. 水土保持研究, 2017, **24**(5): 88-92.
- LI Q, DI X Y. Soil chemical characteristics and ecological restoration effects of different revegetation patterns in the hilly sandy of north Shanxi Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, **24**(5): 88-92.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 34-58.
- [16] 刘方炎, 高成杰, 李 昆, 等. 西南干热河谷植物群落稳定性及其评价方法[J]. 应用与环境生物学报, 2021, **27**(2): 334-350.
- LIU F Y, GAO C J, LI K, *et al.* Stability and evaluation methods of plant communities in the dry-hot valleys of Southwest China[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2021, **27**(2): 334-350.
- [17] 莫保儒, 蔡国军, 杨 磊, 等. 半干旱黄土区成熟柠条林地土壤水分利用及平衡特征[J]. 生态学报, 2013, **33**(13): 4 011-4 020.
- MO B R, CAI G J, YANG L, *et al.* Soil water use and balance characteristics in mature forest land profile of *Caragana korshinskii* in Semiarid Loess Area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(13): 4 011-4 020.
- [18] 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 等. 沙漠化过程中植物的适应对策及植被稳定性机理[M]. 北京: 海洋出版社, 2004: 284-287.
- [19] 周文洁. 陕北黄土区沙棘林下植被特征及群落稳定性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [20] 郑元润. 森林群落稳定性研究方法初探[J]. 林业科学, 2000, **36**(5): 28-32.
- ZHENG Y R. Comparison of methods for studying stability of forest community[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, **36**(5): 28-32.
- [21] 王宇超, 李为民, 张 燕, 等. 秦岭大熊猫栖息地主要森林群落类型稳定性分析[J]. 西北植物学报, 2015, **35**(12): 2 542-2 551.
- WANG Y C, LI W M, ZHANG Y, *et al.* Analysis of stability evaluation about the main forest communities on the habitat of giant *Panda* in Qinling mountains[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2015, **35**(12): 2 542-2 551.
- [22] 高润梅, 石晓东, 郭跃东. 山西文峪河上游河岸林群落稳定性评价[J]. 植物生态学报, 2012, **36**(6): 491-503.
- GAO R M, SHI X D, GUO Y D. Community stability evaluation of riparian forest of the upper reaches of Wenyuhe in Shanxi, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, **36**(6): 491-503.
- [23] 梁淑娟, 潘 攀, 孙志虎, 等. 坡位对水曲柳及胡桃楸生长的影响[J]. 东北林业大学学报, 2005, **33**(3): 18-19.
- LIANG S J, PAN P, SUN Z H, *et al.* Influence of slope on the growth of *Fraxinus mandshurica* Rup. and *Juglans manshurica* Maxim. plantations[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2005, **33**(3): 18-19.
- [24] 胡永颜. 不同坡位对 11 年生厚朴人工林生物量及有效成分含量的影响[J]. 安徽农业科学, 2020, **48**(23): 170-174.
- HU Y Y. Effects of different slope positions on the accumulation of biomass and active ingredients in 11-year-old *Mag-nolia officinalis* plantation[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, **48**(23): 170-174.
- [25] 张 敏, 牛俊杰, 梁海斌, 等. 晋西北黄土高原沟壑区不同乔木类型土壤水分变化[J]. 生态学报, 2014, **33**(9): 2 478-2 482.
- ZHANG M, NIU J J, LIANG H B, *et al.* Changes in soil water under different macrophanerophyte covers in the gully region of Loess Plateau in northwest Shanxi[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(9): 2 478-2 482.
- [26] 夏江宝, 杨吉华, 李红云. 不同外界条件下土壤入渗性能的研究[J]. 水土保持研究, 2004, **11**(2): 115-117.
- XIA J B, YANG J H, LI H Y. The research of soil infiltration in different outside factors[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, **11**(2): 115-117.
- [27] 郝振纯, 吕美霞, 吕美朝, 等. 坡度作用下土壤水分时空异质性研究[J]. 水文, 2012, **32**(2): 5-10.
- HAO Z C, LÜ M X, LÜ M Z, *et al.* Study on temporal and spatial heterogeneity of soil moisture under slope effect[J]. *Journal of China Hydrology*, 2012, **32**(2): 5-10.
- [28] 赵 鑫, 翟 胜, 李建豹, 等. 不同坡位条件对毛乌素沙地长柄扁桃林地土壤水分的影响[J]. 水土保持通报, 2020, **40**

(4): 45-52.

ZHAO X, ZHAI S, LI J B, *et al.* Effects of different slope conditions on soil moisture of *Amygdalus pedunculate* woodland in Mu Us sandy land[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020,**40**(4): 45-52.

[29] 邓继峰, 李景浩, 宋依璇, 等. 油松和樟子松人工林不同坡位土壤养分特征及其与生长性状的关系——以辽东地区为例[J]. 沈阳农业大学学报, 2017,**48**(5): 522-529.

DENG J F, LI J H, SONG Y X, *et al.* Characteristics of soil nutrients and relations with stand growth of *Pinus tabulaeformis* and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations under different slopes in low mountains and hill district of eastern Liaoning Province[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2017,**48**(5): 522-529.

[30] 韦建宏, 侯 敏, 韦添露, 等. 不同坡位桉树人工林生长和土壤理化性质比较[J]. 安徽农业科学, 2017,**45**(5): 167-169.

WEI J H, HOU M, WEI T L, *et al.* Comparison on *Eucalyptus* spp. plantation growth and soil physicochemical properties in different slope position[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017,**45**(5): 167-169.

[31] 高 冉, 赵勇钢, 刘小芳, 等. 黄土丘陵区人工柠条种植年限和坡位对土壤团聚体稳定性的影响[J]. 生态学报, 2020,**40**(9): 2 964-2 974.

GAO R, ZHAO Y G, LIU X F, *et al.* Effects of stand age and slope position of *Caragana korshinskii* plantations on soil aggregate stability in the loess hilly region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020,**40**(9): 2 964-2 974.

[32] 陈昊泓, 朱 昕, 朱光玉, 等. 林分结构对湖南栎类天然次生林林下植被生物量的影响[J]. 应用生态学报, 2020,**31**(2): 349-356.

CHEN H H, ZHU X, ZHU G Y, *et al.* Effects of stand structure on understory biomass of the *Quercus* spp. secondary forests in Hunan Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020,**31**(2): 349-356.

[33] 李 芳. 黑河市不同郁闭度下草本植物生物量的比较[J]. 林业勘查设计, 2016,(3): 88-89.

LI F. Comparison of different canopy herbaceous plant biomass of Heihe[J]. *Forest Investigation Design*, 2016,(3): 88-89.

[34] 孙巧玉, 刘 勇, 李国雷, 等. 坡位对油松人工林地上生物量分配格局的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2012,**32**(9): 102-105.

SUN Q Y, LIU Y, LI G L, *et al.* Effect of slope position on above-ground biomass distribution pattern in *Pinus tabulaeformis* plantation[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2012,**32**(9): 102-105.

[35] 刘 晶, 杨 雪, 张 博, 等. 长期施肥对黄土高原典型草原群落稳定性的影响及机制研究[J]. 西北植物学报, 2021,**41**(2): 310-316.

LIU J, YANG X, ZHANG B, *et al.* Effect of long-term fertilization on community stability of typical steppe and the underlying mechanisms on the loess plateau[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021,**41**(2): 310-316.

[36] 安丽娟, 朱志红, 王孝安, 等. 子午岭马栏林区主要森林群落的稳定性分析[J]. 西北植物学报, 2007,**27**(5): 1 000-1 007.

AN L J, ZHU Z H, WANG X A, *et al.* Stability analysis of major communities in Malan forest region of Ziwuling Mountain[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007,**27**(5): 1 000-1 007.

[37] 张立敏, 陈 斌, 李正跃. 应用中性理论分析局域群落中的物种多样性及稳定性[J]. 生态学报, 2010,**30**(6): 1 556-1 563.

ZHANG L M, CHEN B, LI Z Y. Analysis of the species diversity and community stability in local-community using the Neutral Theory[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010,**30**(6): 1 556-1 563.

[38] 郭其强, 张文辉, 曹旭平. 基于模糊综合评判的森林群落稳定性评价体系模型构建——以黄龙山主要森林群落为例[J]. 林业科学, 2009,**45**(10): 19-24.

GUO Q Q, ZHANG W H, CAO X P. Establishment of an evaluation model of the forest community stability based on fuzzy synthetic evaluation: A case study of main forest communities in Huanglong Mountains[J]. *Scientia Silvae Sini-cae*, 2009,**45**(10): 19-24.

[39] 郭 伟. 晋北风沙区不同植被恢复模式生态效应研究[D]. 太原: 山西大学, 2018.

[40] 王改玲, 王青杵. 晋北黄土丘陵区不同人工植被对土壤质量的影响[J]. 生态学杂志, 2014,**33**(6): 1 487-1 491.

WANG G L, WANG Q C. Effects of artificial vegetation types on soil quality in loess hilly area in Northern Shanxi Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014,**33**(6): 1 487-1 491.

(编辑:潘新社)