浙 江 农 林 大 学 学 报，2018，**35**(2)：227-234
Journal of Zhejiang A&F University
doi:10.11833/j.issn.2095-0756.2018.02.005

黄土区蔡家川流域刺槐人工林林下物种多样性

李敏敏[1,2,3]，魏天兴[1,2,3]，李信良[1,2,3]，葛海潮[4]

（1. 北京林业大学 地理系，北京 100083；2. 北京林业大学 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站，山西 吉县 042200；3. 北京林业大学 水土保持国家林业局重点实验室，北京 100083；4. 山西省吉县林业服务中心，山西 吉县 042200）

摘要：为了给晋西黄土区蔡家川流域刺槐 *Robinia pseudocacia* 人工林恢复状况评价以及植被配置提供理论依据，采用样地调查的方法，选取刺槐人工林为研究对象，对照当地油松 *Pinus tabulaeformis* 人工林和天然次生林，进行林下物种多样性研究。结果表明：①刺槐人工林林下物种共有 37 种，包括灌木 8 种，草本 29 种，灌木层以蔷薇科 Rosaceae 植物为主，草本层以菊科 Compositae 和禾本科 Gramineae 植物为主。②刺槐人工林林下 α 多样性小于天然次生林，与油松人工林之间的差异较小。③刺槐人工林林下草本层 β 多样性指数大于灌木层；刺槐林与天然林的 β 多样性大于刺槐林与油松林的。④刺槐人工林林下植被相似度不高，不同刺槐林样地之间物种种类存在较大的差异，尤其是草本层。晋西黄土区蔡家川流域刺槐人工林林下植被仍具有较大的生长繁殖空间，物种多样性还有待提高。图 4 表 3 参 26

关键词：森林生态学；刺槐人工林；物种组成；α 多样性；β 多样性；相似度
中图分类号：S718.5　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2095-0756(2018)02-0227-08

Species diversity in the understory of a *Robinia pseudoacacia* plantation in the Caijiachuan Watershed of the Loess Plateau

LI Minmin[1,2,3], WEI Tianxing[1,2,3], LI Xinliang[1,2,3], GE Haichao[4]

(1. Department of Geography, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Chinese National Ecosystem Observation and Research Station, Beijing Forestry University, Jixian 042200, Shanxi, China; 3. Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 4. Forestry Service Center of Jixian, Jixian 042200, Shanxi, China)

Abstract: To provide a theoretical basis for evaluating the restoration and vegetative allocation of a *Robinia pseudoacacia* plantation in the Caijiachuan Watershed on the Loess Plateau of western Shanxi Province, this research used the sample survey method to study species diversity of an understory. A *R. pseudoacacia* plantation was selected as the research object and compared to a *Pinus tabulaeformis* plantation and a natural secondary forest. This study used Shannon-Wiener index (H'), Simpson index (D) and Pielou evenness index (E) to determine the community α diversity. The β diversity of the community was determined by Whittaker index (β_W), Cody index (β_C), Routledge index (β_R), and the similarity of the community was determined by Jaccard index (q). Results showed (1) 37 understory species in the *R. pseudoacacia* plantation including 8 shrubs and 29 herbs. Rosaceae was the main contributor to the shrub layer with Compositae and Gramineae the main plants of the herb layer. (2) The α diversity of shrub layer is *R. pseudoacacia* plantation<*P. tabulaeformis* plantation<natural secondary forest. The α diversity of herb layer is *P. tabulaeformis* plantation<*R. pseudoa-*

收稿日期：2017-01-16；修回日期：2017-03-22
基金项目："十三五"国家重点研发计划项目(2016YFC0501705)；国家生态系统观测研究网络运行服务项目(2014-2015)
作者简介：李敏敏，从事自然资源监测与管理研究。E-mail：minmin@bjfu.edu.cn。通信作者：魏天兴，教授，博士生导师，从事自然资源监测与林业生态工程研究。E-mail：weitx@bjfu.edu.cn

cacia plantation<natural secondary forest. (3) The β diversity index between *R. pseudoacacia* plantation and *P. tabulaeformis* plantation <β diversity index between *R. pseudoacacia* plantation and natural secondary forest, the β diversity index of herb layer in *R. pseudoacacia* plantation>the β diversity index of shrub layer. (4) Among different sample plots of the *R. pseudoacacia* plantation, the shrub layer showed "medium dissimilarity" accounted for 49.52% of the total and "very similar" accounted for 1.90% of the total, the herb layer was "very similar" accounted for 66.67% of the total, "very similar" accounted for 0.95%, so there was a large difference in *R. pseudoacacia* plantation, especially in the herb layer. Overall, understory vegetation in the *R. pseudoacacia* plantation of the Caijiachuan Watershed on the Loess Plateau of western Shanxi Province still had areas for introducing new understory species to help improve species diversity. [Ch, 4 fig. 3 tab. 26 ref.]

Key words: forest ecology; *Robinia pseudoacacia* plantation; species composition; α diversity; β diversity; similarity

刺槐 *Robinia pseudoacacia* 原产于北美洲的亚热带和温带地区，适应性强、繁殖容易，被广泛引种[1]，已被全球入侵物种数据库定为入侵种[2]。20 世纪 60 年代以后，刺槐被作为黄土高原丘陵沟壑区人工林建设的主要造林树种，成为该地区造林面积最大的树种[1]。刺槐作为一种外来种，生长快、耗水强，在许多立地条件差的地方多形成低产林[3]。晋西黄土区处于干旱半干旱地区，侵蚀强烈，生态环境脆弱[4]，研究黄土区刺槐人工林林下多样性具有重要的实际意义。人工林群落物种多样性主要由林下植被反映，而且林下植被的生长发育，填补了地表空白[5]，对森林的生长繁殖以及森林结构的塑造有重要的影响[6]。从已有的研究中可知，刺槐林下阴坡物种多样性大于阳坡[7]；在相同林龄及立地条件下，刺槐林下林分密度越大，林下植被多样性越低[8]。总之，坡度、坡向、密度、林龄等都会对刺槐林下物种多样性产生一定的影响。因此，对于黄土丘陵区引种刺槐这种外来树种进行水土保持造林，会塑造成怎样的生物群落，能否促进生态系统向稳定、环境良好方向永续恢复，还需要进一步的跟踪和长期定位观测研究。本研究通过对晋西黄土区蔡家川流域长期固定观测样地刺槐人工林林下植被的分析，对比当地主要林地类型油松 *Pinus tabulaeformis* 人工林和天然次生林林下植被，揭示刺槐人工林林下结构特征、α 多样性、β 多样性及相似度等特征，以及与油松人工林和天然次生林存在的差异性，进一步揭示刺槐人工林形成的生物群落对当地水土保持和生态恢复的作用，旨在为晋西黄土区蔡家川流域刺槐人工林植被恢复提供基础数据，并为刺槐人工水土保持林管理提供借鉴。

1 研究方法

1.1 样地设置与调查

研究区位于晋西黄土区蔡家川流域，地理坐标为 36°14′27″~36°18′23″N，110°39′45″~110°47′45″E，海拔为 900~1 513 m，属于黄河的三级支流，呈东西走向，流域面积为 39.33 km^2[9]。该区属暖温带半干旱大陆性气候，年平均气温为 10.0 ℃，年平均降水量为 470.0~600.0 mm。该区土壤为褐土，黄土母质，土壤普遍呈碱性[9]。自 1990 年退耕还林还草以来，蔡家川流域植被覆盖率显著增加，其中人工林以刺槐、油松、侧柏 *Platycladus orientalis* 为主，天然次生林以山杨 *Populus davidiana*，白桦 *Betula platyphylla* 和辽东栎 *Quercus liaotungensis* 为主[10]。

选择蔡家川流域刺槐人工林作为研究对象，以当地另外 2 种主要林地类型油松人工林和天然次生林作为对照林地。研究样地的选择坚持代表性原则，能够代表区域内同种林型的整体情况。故根据研究内容和实地踏查情况，在研究区内共布设了 15 个 20 m × 20 m 的样地，其中包括 9 个刺槐人工林样地，3 个油松人工林样地和 3 个天然次生林样地，林龄都在 20 a 左右，每个样地内设置 3 个 5 m × 5 m 的灌木样方，3 个 1 m × 1 m 的草本样方。样地基本信息如表 1 所示。

1.2 数据处理

根据样地调查数据，分析群落结构特征及多样性，其中重要值采用 I_V=[(相对密度+相对显著度+相对频度)/3]×100 来计算。采用丰富度指数(S)，Shannon-Wiener 指数(H')，Simpson 指数(D)，Pielou 均匀度指数(E)来测定植物群落的 α 多样性；采用 Whittaker 指数(β_W)，Cody 指数(β_C)，Routledge 指数

表 1　样地基本信息

Table 1　Basic situation of sample plots

样地	海拔/m	坡度/(°)	坡向	郁闭度/%	样地	海拔/m	坡度/(°)	坡向	郁闭度/%
C1	1 132	22	阳坡	69	C9	1 338	17	阳坡	60
C2	1 154	20	阴坡	67	Y1	1 158	15	阳坡	67
C3	1 174	13	半阴坡	68	Y2	1 172	16	阳坡	70
C4	1 179	16	阴坡	63	Y3	1 358	20	阴坡	73
C5	1 210	18	阴坡	64	N1	1 109	11	半阳坡	72
C6	1 215	12	半阴坡	58	N2	1 137	10	阴坡	68
C7	1 238	18	阳坡	61	N3	1 152	17	阳坡	70
C8	1 289	32	半阴坡	59					

说明：C，Y，N 分别表示刺槐人工林、油松人工林、天然次生林

(β_R)测定植物群落的 β 多样性；采用 Jaccard 指数(q)测定植物群落的相似性，根据 Jaccard 相似性原理，$0.00 \leqslant q < 0.25$ 表示极不相似，$0.25 \leqslant q < 0.50$ 表示中等不相似，$0.50 \leqslant q < 0.75$ 表示中等相似，$0.75 \leqslant q \leqslant 1.00$ 表示极相似[11]。

2　结果与分析

2.1　群落结构特征

重要值是群落中物种生态适应能力和物种在群落中所处地位的综合指标，其大小是确定优势种和建群种的重要依据[12]。由表 2 可见：所有刺槐样地中共包含植物种类 37 种，其中灌木 8 种，草本 29 种。灌木层中黄刺梅 *Rosa xanthina* 出现频率为 100%，平均重要值为 53.11%；杠柳 *Periploca sepium* 出现频率为 22.22%，平均重要值为 9.78%；紫丁香 *Syringa oblata* 出现频率为 33.33%，平均重要值为 9.11%。草本层中蒙古蒿 *Artemisia monogolica* 出现频率为 22.22%，平均重要值为 14.11%；冰草出现频率为 55.56%，平均重要值为 10.22%；铁杆蒿 *Artemisia vestita* 出现频率为 66.67%，平均重要值为 5.22%。这一结果表明，蔡家川流域刺槐人工林下灌木层中黄刺梅为优势种，杠柳和紫丁香为次优种；草本层中蒙古蒿和冰草 *Agropyron cristatum* 为优势种，铁杆蒿 *Artemisia vestita* 为次优种。由此可知，刺槐林下灌木层以蔷薇科 Rosaceae 为主，草本层以菊科 Compositae 和禾本科 Gramineae 为主。高艳鹏等[13]指出晋西黄土丘陵沟壑区刺槐人工林下草本优势种主要为禾本科、菊科植物，与本研究所得结论一致。

2.2　群落 α 多样性分析

物种多样性是指群落中的物种数目、个体数及个体分配均匀度的综合。从图 1 可以看出：D 值灌木层和草本层的起伏波动比较大，没有明显的规律；H' 值在所有样地中灌木层小于草本层；E 值有 2/3 的样地灌木层小于草本层。相比灌木层，草本层多样性指数更高，多样性指数的最大值均出现在草本层，而且从平均值看，草本层的 D 值(0.73)，H' 值(1.67)和 E 值(0.77)均大于灌木层的 D 值(0.50)，H' 值(0.86)和 E 值(0.33)。总之，草本层 α 多样性大于灌木层的 α 多样性。卢宝明等[14]在研究北京山地植物群落的物种多样性中也得出，灌木层的 α 多样性指数明显小于草本层的 α 多样性指数。

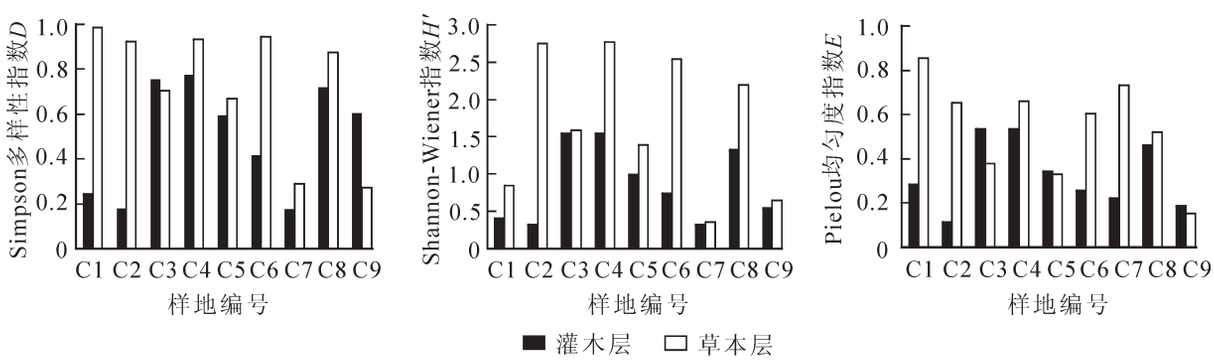

图 1　刺槐人工林林下 α 多样性指数

Figure 1　α diversity index in *Robinia pseudoacacia* plantation

表 2 刺槐样地内主要物种的重要值

Table 2 Importance values of the main species in sample plots of *Robinia pseudoacacia* plantation

层次	物种名	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
灌木层	紫丁香 *Syringa oblata*	–	–	33	29	–	–	–	20	–
	胡枝子 *Lespedeza bicolor*	–	–	–	14	18	–	–	–	–
	黄刺梅 *Rosa xanthina*	86	80	19	29	55	17	90	40	62
	灰栒子 *Cotoneaster acutifolius*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	沙棘 *Hippophae rhamnoides*	–	–	5	14	–	–	–	–	–
	山楂叶悬钩子 *Rubus crataegifolius*	–	7	11	20	–	–	9	–	9
	酸枣 *Ziziphus jujuba* var. *spinosa*	14	10	–	–	27	–	–	–	–
	杠柳 *Periploca sepium*	–	–	–	14	–	74	–	–	–
草本层	猪毛蒿 *Artemisia scoparia*	–	12	6	–	–	–	–	–	–
	碱菀 *Tripolium vulgare*	–	7	2	–	–	–	–	–	–
	莎草 *Cyperus rotundus*	3	9	–	–	–	–	–	–	–
	针茅 *Stipa capillata*	5	7	–	2	–	–	–	–	–
	甘草 *Glycyrrhiza uralensis*	–	1	–	–	7	–	–	–	–
	苦荬菜 *Ixeris denticulata*	–	3	1	–	–	6	–	10	–
	紫花地丁 *Viola philippica*	–	1	–	–	2	10	–	–	–
	委陵菜 *Potentilla chinensis*	–	3	–	11	7	10	–	7	–
	油蒿 *Artemisia ordosica*	–	4	–	–	–	–	–	–	–
	蒙古蒿 *Artemisia mongolica*	–	–	43	–	–	–	84	–	–
	乳浆大戟 *Euphorbia esula*	–	1	1	7	–	9	–	9	–
	早熟禾 *Poa annua*	–	–	32	–	–	–	–	–	–
	野豌豆 *Sesbania cannabina*	–	6	1	1	2	–	–	1	–
	铁杆蒿 *Artemisia vestita*	–	–	–	16	11	3	1	15	1
	艾蒿 *Artemisia vulgaris*	–	–	–	3	4	–	–	1	3
	白头翁 *Pulsatilla chinensis*	–	–	–	11	2	5	–	12	7
	黄花龙牙 *Patrinia scabiosaefolia*	–	1	–	3	7	1	3	5	1
	冰草 *Agropyron cristatum*	–	–	–	1	2	2	–	2	85
	蒲公英 *Taraxacum mongolicum*	–	3	–	5	2	5	–	7	–
	祁州漏芦 *Rhaponticum uniflorum*	–	–	–	6	–	2	–	4	–
	茵陈蒿 *Artemisia capillaris*	1	11	–	–	4	1	–	–	–
	长芒草 *Stipa bungeana*	5	13	–	3	2	2	–	11	–
	柴胡 *Bupleurum chinense*	–	–	–	7	2	–	–	2	–
	白羊草 *Bothriochloa ischaemum*	–	–	–	6	5	–	–	8	–
	矮薹草 *Carex supina*	–	–	–	–	5	–	–	–	–
	风毛菊 *Saussurea japonica*	–	1	–	–	5	–	–	–	–
	芦苇 *Phragmites australis*	–	–	–	–	4	–	–	–	–
	狭叶青蒿 *Artemisia dacunculus*	–	–	–	–	5	–	–	–	–
	茜草 *Rubia cordifolia*	7	9	3	7	4	11	1	1	1

说明："–"表示该样地内没有该种植物或者 $I_V<1$

结合对照组油松人工林和天然次生林的数据，分析 3 种林型之间的 D 值，H' 值和 E 值，从而研究刺槐人工林与其他林型之间 α 物种多样性的差异(图 2 和图 3)。图 2 分别描述了 3 种林型灌木层的 D 值，H' 值和 E 值，在灌木层，刺槐人工林的 3 个指数的均值、最小值都小于其他 2 种林型；从 3 个指数分布范围可以看出：灌木层的 α 多样性表现为刺槐人工林＜油松人工林＜天然次生林。

图 3 分别描述了 3 种林型草本层的 D 值，H' 值和 E 值。从 3 个指数集中范围可以看出：油松林草本层 α 多样性＜刺槐林＜天然林；刺槐林 D 值的均值与油松林较接近，都小于天然次生林；刺槐林 E 值的均值低于其他 2 种林型；H' 值的均值稍大于油松人工林，但仍小于天然次生林。即 2 种人工林灌木

层和草本层 α 多样性指数都小于天然林。通过对比图 2 和图 3 可以看出：同种林型之间，灌木层物种多样性指数小于草本层物种多样性指数。

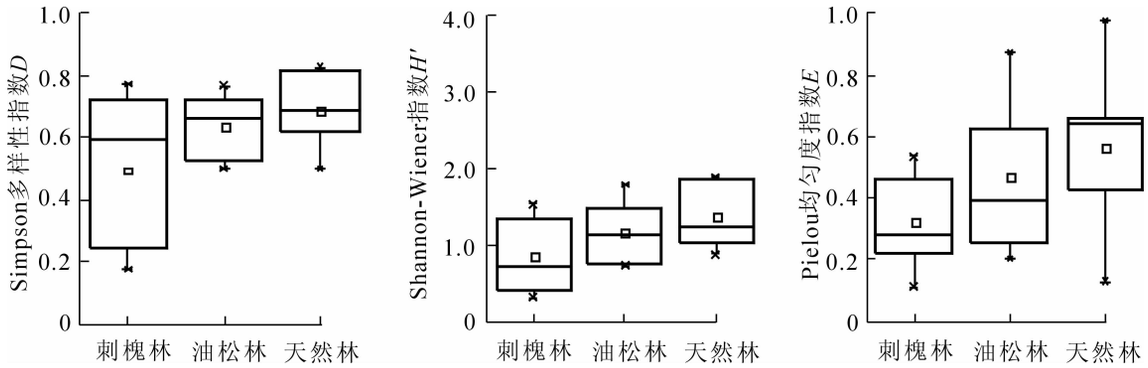

图 2　不同林型灌木层 α 多样性指数

Figure 2　α diversity index on shrub layer in different communities

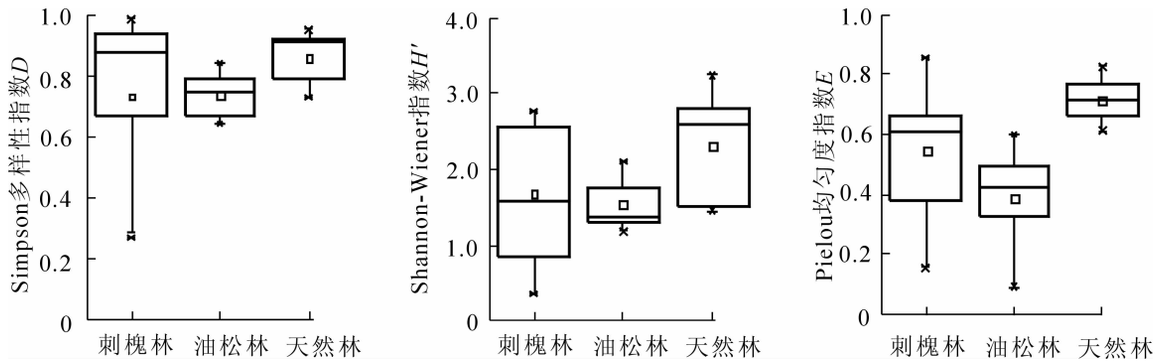

图 3　不同林型草本层 α 多样性指数

Figure 3　α diversity index on herb layer in different communities

2.3　群落 β 多样性分析

利用 Whittaker 指数(β_W)，Cody 指数(β_C)和 Routledge 指数(β_R)求 β 多样性，分别计算 C1~C9 与 Y1，Y2，Y3，N1，N2，N3 之间的 β 多样性指数，然后求各组的平均值，得到刺槐林与油松林、刺槐林与天然林之间的 β 多样性指数(表 3)，从而分析刺槐人工林、油松人工林和天然次生林之间的物种多样性差异。从表 3 可以得出：刺槐林与油松林之间的 β 多样性要小于刺槐林与天然林之间的 β 多样性。由此表明：刺槐林与天然林之间植被差异性要大于刺槐林与油松林之间的植被差异性。同时，分析刺槐人工林和油松人工林及天然次生林之间的 β 多样性得出，草本层 β 多样性指数＞灌木层 β 多样性指数。

2.4　群落相似性分析

采用 Jaccard 相似性系数作为不同样地相似性的度量标准，分析各样地之间灌木层相似性和草本层相似性(图 4)。从图 4 可以得知：在灌木层，各群落之间“中等不相似”出现概率最大，占总数的 49.52%，而“极相似”概率最小，仅占总数的 1.90%，所以，所调查的样地之间灌木层相似度处于中等偏低水平；在草本层，各群落之间“极不相似”占总数的 66.67%，“极相似”占 0.95%，所以，所调查样地之间的草本层相似度处于较低水平；同时，从图 4 可以得出，灌木层相似性＞草本层相似性。分别计算不同林型和不同林层之间相似性系数的平均值，得出灌木层相似性系数均值规律为：刺槐人工林与刺槐人工林之间的相似性系数＞刺槐人工林与油松人工林之间的相似性系数＞刺槐人工林与天然次生

表 3　刺槐人工林与其他林型之间β多样性指数

Table 3　β diversity index between *Robinia pseudoacacia* plantation and other communities

林型	层次	β_W	β_C	β_R	林型	层次	β_W	β_C	β_R
C-Y	灌木层	1.54	1.93	7.51	C-N	灌木层	1.20	2.22	7.53
	草本层	3.25	6.37	28.00		草本层	3.43	7.02	28.80

说明：C-Y 表示刺槐人工林与油松人工林之间的 β 多样性；C-N 代表刺槐人工林与天然次生林之间的 β 多样性

林之间的相似性系数；草本层也满足这一规律。

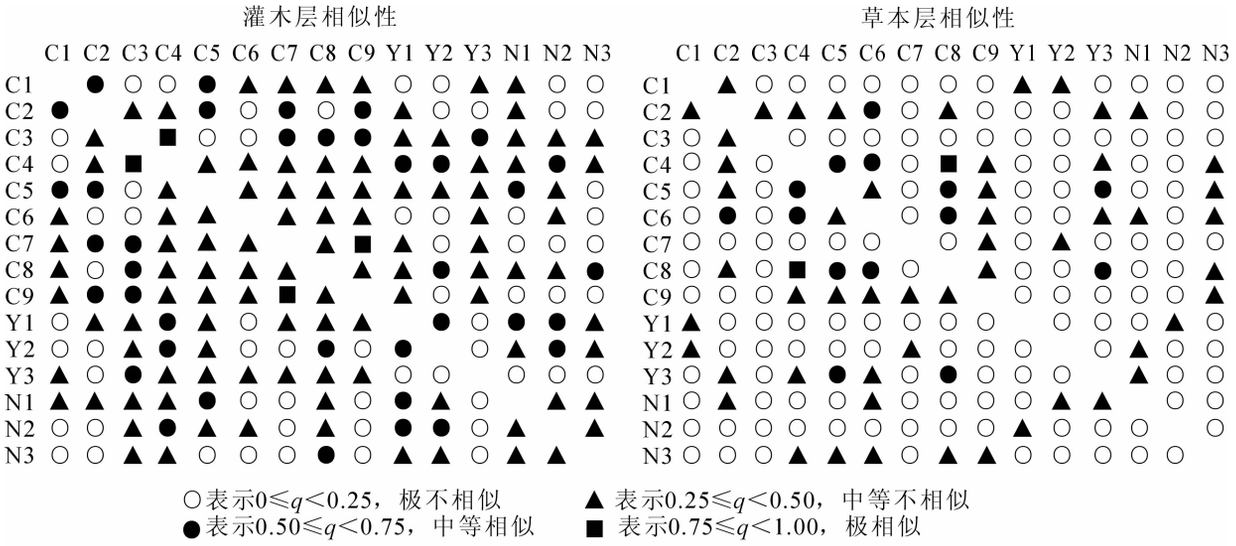

图 4 样地间林下群落相似性

Figure 4 The similarity index of understory communities in different sample plots

3 结果与讨论

揭示人工林林下物种组成，不仅是评估人工林生态功能的一个重要途径，也是判断人工林生态功能恢复效果的一个必要手段[15]。在本研究中，刺槐人工林林下灌木层中黄刺梅为优势种，杠柳和紫丁香为次优种；草本层中蒙古蒿和冰草为优势种，铁杆蒿为次优种；灌木层以蔷薇科为主，草本层以菊科和禾本科为主，与其他学者结论一致[16]。在杨晓毅等[17]的研究中，封山育林自然恢复 10 a 以后的刺槐人工林下共有 58 种植物，包括 12 种灌木和 46 种草本。本研究中的刺槐人工林均位于固定样地内，受到人为干扰，林下物种共有 37 种，包括灌木 8 种，草本 29 种，均低于封山育林后的物种数，所以适当地对人工林进行短期的封山育林可以改善林下群落结构，提高群落稳定性，其他学者也得出短期的封山育林会对林下植被的物种多样性及植被的生长产生显著的影响[18]。

本研究得出刺槐人工林林下物种 α 多样性、β 多样性均表现出草本层＞灌木层。其他学者在相关研究中也得出森林群落植物多样性在空间上的变化顺序表现为草本层＞灌木层[19]，如果这一趋势一直持续，容易造成刺槐人工林“乔—灌—草”复层稳定的层片结构被打破，使得刺槐群落自我调节能力弱化[20]，出现土壤干化、“小老头树”等一系列生态问题。而且本研究得出，灌木层相似性＞草本层相似性，因此，当地林业管理人员应加强维护“乔—灌—草”层片结构的稳定性，调整“灌—草”结构，增强人工林生态恢复效益，提高群落稳定性。

物种多样性是一个反映一定区域内物种丰富程度和物种分布均匀度的综合指标，物种多样性的高低取决于群落中物种的个数及个体在群落中的分布状况[21]。由于人工林单一的物种组成使得多样性与天然林相比有巨大差异。本研究中，刺槐人工林林下 α 多样性指数与油松人工林之间的差异较小，两者都小于天然次生林，与其他学者研究结果一致[22]。同时，刺槐林与油松林之间的 β 多样性指数要小于刺槐林与天然林之间的 β 多样性指数。由此可知，刺槐林与天然林对比，林下植物种类组成存在较大差异；刺槐人工林与油松人工林林下物种组成差异较小。闫东锋等[23]得出群落多样性的高低能在一定程度上反映出群落稳定性的大小，因此，蔡家川流域刺槐人工林的稳定性仍小于天然次生林的稳定性，林业管理人员应加强刺槐人工林林下植被养护，提高其物种多样性。

在本研究中，刺槐人工林林下植被相似度处于“中等不相似”，草本层相似度处于“极不相似”水平。由于相似性水平越低，说明各样地群落间具有较大的生境差异性[24]，所以蔡家川流域刺槐人工林之间生境差异较大。生境不同，林下植被生长状况不同，所以改善刺槐人工林林下生境条件是提高人工林林下植被多样性的有效手段。有研究表明：刺槐根系的化感作用能够改善土壤微生物环境[25]。刘海燕等[26]

研究得出相对于油松人工林，刺槐人工林下微生物群落多样性更丰富，刺槐的种植能够明显改善微生物群落结构，改善土壤质量，从而提高林下物种多样性。因此，引种刺槐在一定程度上可以改善区域的生态环境，提高流域内植被稳定性，起到防治水土流失的作用。

5　参考文献

[1] 张长庆，张文辉. 黄土高原不同立地条件下刺槐人工林种群的无性繁殖与更新[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2009，**37**(1)：135 – 144.
ZHANG Changqing, ZHANG Wenhui. A study on asexual reproduction and regeneration of *Robinia pseudoacacia* plantations in different habitats in hilly area of the Loess Plateau [J]. *J Northwest A&F Univ Nat Sci Ed*, 2009, **37**(1): 135 – 144.

[2] 王希才，王延玲. 药乡林场刺槐林的演替研究[J]. 河南林业科技，1996，**16**(3)：22 – 24.
WANG Xicai, WANG Yanling. Study on succession of *Robinia pseudoacacia* forest in Yaoxiang Forest Farm [J]. *J Henan For Sci Technol*, 1996, **16**(3): 22 – 24.

[3] 刘增文，李雅素. 刺槐人工林养分利用效率[J]. 生态学报，2003，**23**(3)：444 – 449.
LIU Zengwen, LI Yasu. A study on the efficiency of nutrient utilization in black locust plantation [J]. *Acta Ecol Sin*, 2003, **23**(3): 444 – 449.

[4] FU Bojie, LIU Yu, LÜ Yihe, *et al.* Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China [J]. *Ecol Complex*, 2011, **8**(4): 284 – 293.

[5] MORI A, TAKEDA H. Effects of undisturbed canopy structure on population structure and species coexistence of an old-growth subalpine forest in central Japan [J]. *For Ecol Manage*, 2004, **200**(1/3): 89 – 100.

[6] TAYLOR A H, JIANG Shiwei, ZHAO Lianjun, *et al*. Regeneration patterens and tree species coexistence in old-growth *Abies-Picea* forests in southwestern China [J]. *For Ecol Manage*, 2006, **223**(1): 303 – 317.

[7] 张晶晶，赵忠，宋西德，等. 渭北黄土高原人工刺槐林植物多样性动态[J]. 西北植物学报，2010，**30**(12)：2490 – 2496.
ZHANG Jingjing, ZHAO Zhong, SONG Xide, *et al.* Biodiversity dynamics of artificial *Robinia pseudoacacia* forest in Weibei Loess Plateau [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2010, **30**(12): 2490 – 2496.

[8] 刘建利，李凯荣，易亮，等. 黄土高原丘陵区人工刺槐林林分结构及林下植物多样性研究[J]. 水土保持通报，2008，**28**(3)：49 – 52，70.
LIU Jianli, LI Kairong, YI Liang, *et al*. Structure of *Robinia pseudoacacia* plantation and undergrowth plant diversity in the hilly area of the Loess Plateau [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2008, **28**(3): 49 – 52, 70.

[9] 杨帆，潘成忠，鞠洪秀. 晋西黄土丘陵区不同土地利用类型对土壤碳氮储量的影响[J]. 水土保持研究，2016，**23**(4)：318 – 324.
YANG Fan, PAN Chengzhong, JU Hongxiu. Effects of different land use types on storage of soil organic carbon and total nitrogen in western Shanxi hilly Loess Plateau region [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2016, **23**(4): 318 – 324.

[10] 徐舟，查同刚，张志强，等. 晋西黄土区蔡家川流域不同退耕林地的物种多样性研究[J]. 广东农业科学，2014(17)：170 – 175.
XU Zhou, ZHA Tonggang, ZHANG Zhiqiang, *et al.* Species diversities of vegetation communities of abandoned croplands in western Shanxi of the Loess Plateau [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2014(17): 170 – 175.

[11] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京：科学出版社，2011.

[12] 毕润成. 山西霍山山核桃群落生态特征及其区系分析[J]. 应用生态学报，1999，**10**(6)：650 – 656.
BI Runcheng. Ecological feature and floral analysis of *Juglans mandshurica* community in Huoshan Mountain of Shanxi Province [J]. *Chin J Appl Ecol*, 1999, **10**(6): 650 – 656.

[13] 高艳鹏，赵廷宁，骆汉. 晋西黄土丘陵沟壑区人工林下草本植物生物多样性研究[J]. 水土保持通报，2011，**31**(1)：103 – 108.
GAO Yanpeng, ZHAO Tingning, LUO Han. Biodiversity of herbaceous species under artificial forests in hill and gully region of western Shanxi Province [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2011, **31**(1): 103 – 108.

[14] 卢宝明，邢韶华，崔国发，等. 北京山地植物群落的物种多样性比较[J]. 北京林业大学学报，2010，**32**(增刊 1)：36 – 44.

LU Baoming, XING Shaohua, CUI Guofa, *et al*. Comparison of species diversity of plant communities in mountains of Beijing [J]. *J Beijing For Univ*, 2010, **32**(suppl 1): 36 – 44.

[15] 胡相明，程积民，万惠娥. 黄土丘陵区人工林下草本层植物的结构特征[J]. 水土保持通报，2006，**26**(3)：41 – 45.

HU Xiangming, CHENG Jimin, WAN Huie. Structure characteristics of herbages under five types of artificial forest plantations in loess hilly region [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2006, **26**(3): 41 – 45.

[16] 张桐，王玉杰，王云琦，等. 晋西黄土区不同森林群落类型植物多样性研究[J]. 北京林业大学学报，2015，**37**(11)：82 – 88.

ZHANG Tong, WANG Yujie, WANG Yunqi, *et al*. Plant diversity in various forest community types in the Loess Plateau of western Shanxi Province, northern China [J]. *J Beijing For Univ*, 2015, **37**(11): 82 – 88.

[17] 杨晓毅，李凯荣，李苗，等. 陕西省淳化县人工刺槐林林分结构及林下植物多样性研究[J]. 水土保持通报，2011，**31**(3)：194 – 201.

YANG Xiaoyi, LI Kairong, LI Miao, *et al*. Forest structure and diversity of *Robinia pseudoacacia* L. plantations in Chunhua County of Shaanxi Province [J]. *J Soil Water Conserv*, 2011, **31**(3): 194 – 201.

[18] 蔡道雄，卢立华，贾宏炎，等. 封山育林对杉木人工林林下植被物种多样性恢复的影响[J]. 林业科学研究，2007，**20**(3)：319 – 327.

CAI Daoxiong, LU Lihua, JIA Hongyan, *et al*. The influences of closing for afforestation on vegetation diversity restoration under Chinese fir plantation [J]. *For Res*, 2007, **20**(3): 319 – 327.

[19] 李裕元，邵明安. 子午岭植被自然恢复过程中植物多样性的变化[J]. 生态学报，2004，**24**(2)：252 – 260.

LI Yuyuan, SHAO Ming'an. The change of plant diversity during natural recovery process of vegetation in Ziwuling area [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, **24**(2): 252 – 260.

[20] 陈利云，王弋博. 麦积山草地植物群落物种多样性及结构相似性特征[J]. 干旱区资源与环境，2014，**28**(1)：148 – 152.

CHEN Liyun, WANG Yibo. Species diversity, community structure similarity of the grassland communities, Maiji mountain [J]. *J Arid Land Resour Environ*, 2014, **28**(1): 148 – 152.

[21] 王健敏，刘娟，陈晓鸣，等. 云南松天然林及人工林群落结构和物种多样性比较[J]. 林业科学研究，2010，**23**(4)：515 – 522.

WANG Jianmin, LIU Juan, CHEN Xiaoming, *et al*. Comparison of community structures and species diversity in natural forests and forest plantation of *Pinus yunnanensis* [J]. *For Res*, 2010, **23**(4): 515 – 522.

[22] 王力，邵明安，王全九，等. 黄土高原子午岭天然林与刺槐人工林地土壤干化状况对比[J]. 西北植物学报，2005，**25**(7)：1279 – 1286.

WANG Li, SHAO Ming'an, WANG Quanjiu, *et al*. Comparison of soil desiccations in natural and *Acacia* forests in the Ziwuling mountain of the Loess Plateau [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2005, **25**(7): 1279 – 1286.

[23] 闫东锋，朱滢，杨喜田. 宝天曼栎类天然林物种多样性与稳定性[J]. 浙江农林大学学报，2011，**28**(4)：628 – 633.

YAN Dongfeng, ZHU Ying, YANG Xitian. Species diversity and stability of a natural *Quercus* forest in Baotianman, Henan Province [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2011, **28**(4): 628 – 633.

[24] 沈蕊，张建利，何彪，等. 元江流域干热河谷草地植物群落结构特征与相似性分析[J]. 生态环境学报，2010，**19**(12)：2821 – 2825.

SHEN Rui, ZHANG Jianli, HE Biao, *et al*. The structure characteristic and analysis on similarity of grassland community in dry-hot valley of Yuanjiang River [J]. *Ecol Environ Sci*, 2010, **19**(12): 2821 – 2825.

[25] 王仙，魏天兴，朱金兆，等. 黄土丘陵区油松根系化感效应研究[J]. 北京林业大学学报，2015, **37**(4)：82 – 89.

WANG Xian, WEI Tianxing, ZHU Jinzhao, *et al*. Allelopathic effect of *Pinus tabuliformis* root in loess hilly area [J]. *J Beijing For Univ*, 2015, **37**(4): 82 – 89.

[26] 刘海燕，魏天兴，王仙. 黄土丘陵区人工林土壤微生物 PLFA 标记多样性分析[J]. 北京林业大学学报，2016，**38**(1)：28 – 35.

LIU Haiyan, WEI Tianxing, WANG Xian. Soil microbial community structure and functional diversity in typical plantations marked by PLFA in hilly loess region [J]. *J Beijing For Univ*, 2016, **38**(1): 28 – 35.