

陕北黄土高原文冠果群落结构及物种多样性

康永祥, 康博文*, 刘建军, 李文华, 季志平

(西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100)

摘要:文冠果是我国北方地区生物质油料能源首选树种, 陕北黄土高原次生林区是其主要分布地域之一。通过黄土高原森林区和森林草原区 32 块文冠果群落标准地调查, 对该区域文冠果林群落结构、种类组成和物种多样性等进行了研究。结果表明, 文冠果在森林区既可以形成小乔木林, 也可以形成灌木林, 而在森林草原区只有灌木林。标准地内共有维管束植物 77 种, 隶属 27 科 65 属。乔木林乔木层以油松、文冠果为主, 灌木层以狼牙刺、黄蔷薇、葱皮忍冬等占优势, 草本层野菊、铁杆蒿、长芒草、披针苔草等占优势; 灌木林灌木层以文冠果、狼牙刺、荆条等为主, 草本层阿尔泰狗娃花、白草、披针苔草、铁杆蒿等占优势。群落丰富度指数 (S) 乔木林 21.2 ± 4.8 , 森林区灌木林 21.7 ± 5.7 , 森林草原区灌木林 12 ± 1.7 , 多样性指数 D 值与 H' 值乔木林为 0.933 ± 0.022 和 2.519 ± 0.023 , 森林区灌木林为 0.917 ± 0.040 和 2.755 ± 0.368 , 森林草原区灌木林是 0.861 ± 0.023 和 2.190 ± 0.126 ; 均匀度指数 J 值与 E 值乔木林是 0.837 ± 0.200 和 0.840 ± 0.257 , 森林区灌木林是 0.923 ± 0.047 和 0.806 ± 0.064 , 森林草原区灌木林是 0.885 ± 0.036 和 0.790 ± 0.083 ; 统计分析显示, S , D 和 H' 值森林区乔木林与灌木林差异不显著, 但都极显著 ($P < 0.01$) 高于森林草原区灌木林, J 和 E 值无显著差异, 其中丰富度指数变异系数森林区灌木林 > 乔木林 > 森林草原区灌木林, 而多样性指数和均匀度指数变异系数乔木林 > 森林草原区灌木林 > 森林区灌木林。群落不同层次 D 值和 H' 值乔木林乔木层、灌木层差异不显著, 但显著低于草本层, 其变异系数灌木层 > 乔木层 > 草本层; 灌木林草本层显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 高于灌木层, 其变异系数灌木层 > 草本层, J 值和 E 值在群落 (乔) 灌木层之间无显著差异。根据天然文冠果林的群落结构特征, 人工文冠果油料林营造和经营管理过程中应注意树种的混交搭配和地被植物多样性的培育, 以提高林地的生态功能。

关键词:文冠果; 群落结构; 物种多样性; 陕北; 黄土高原

Structure and species diversity of *Xanthoceras sorbifolia* community in the Loess Plateau of North Shaanxi

KANG Yongxiang, KANG Bowen*, LIU Jianjun, LI Wenhua, JI Zhiping

Forestry College of Northwest A & F University, Yangling 712100, China

Abstract: *Xanthoceras sorbifolia*, the most important seed oil tree for bioenergy in North China, mainly distributes in North Shaanxi Loess Plateau and other regions with similar environment. The research on the community structure of *X. sorbifolia* natural forest and its variations with locations could promote scientifically the construction and management of *X. sorbifolia* plantation in the future. The structure, species component and plant diversity of *X. sorbifolia* communities were studied based on 32 plots in forest and forest-prairie zone. The research concluded that *X. sorbifolia* exists in both forest and bush in forest area, while only bushes in forest-prairie zone. There are 77 species of vascular plants within all plots belonging to 27 families and 65 genera in total. For *X. sorbifolia* forest, *Pinus tabulaeformis* and *X. sorbifolia* are dominant tree species in upper layer, *Sophora viciifolia*, *Rosa hugonis* and *Lonicera ferdinandii* in shrub layer and *Dendranthema indicum*, *Artemisia gmelini*, *Stipa bungeana* and *Carex lanceolata* in herbage layer; for *X. sorbifolia* shrub forest, *X. sorbifolia*, *S. viciifolia*, *Vitex negundo* are dominant shrub species, while *Heteropappus altaicus*, *Pennisetum flaccidum*, *Carex lanceolata*, *Artemisia gmelini* etc. take majority in herbage layer. The Richness (S) indices describing the diversity of the communities

基金项目:国家“十一五”科技支撑项目(2006BAD03A0205); 西北农林科技大学博士科研启动经费项目(07-01140406); 国家林业局公益性行业专项项目(20080410)

收稿日期:2010-01-07; **修订日期:**2011-05-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bowenkang@sina.com

respectively are 21.2 ± 4.8 for arbor forest, 21.7 ± 5.7 for bush type in forest area, 12.0 ± 1.7 for bush type in forest-prairie area; Simpson's diversity indices (D), Shannon-Wiener's diversity indices (H') are respectively 0.933 ± 0.022 and 2.519 ± 0.023 in forest; 0.917 ± 0.040 and 2.755 ± 0.368 for bush type in forest area, 0.861 ± 0.023 and 2.190 ± 0.126 for bush type in forest-prairie zone; Pielou's evenness indices (J) and Alatalo evenness indices (E) are respectively 0.837 ± 0.200 and 0.840 ± 0.257 in forest, 0.923 ± 0.047 and 0.806 ± 0.064 for bush type in forest area, and 0.885 ± 0.036 and 0.790 ± 0.083 for bush type in forest-prairie zone. Meanwhile, the results from ANOVA showed that the values of S , D and H' reveal no significant difference between forest and bushes in forest area but are much higher than those in forest-prairie area with significant difference among them ($P < 0.01$). J and E have no significant difference. The order of Richness variance is: bushes in forest area > forest > bushes in forest-prairie zone, whereas variation coefficient of diversity indices and evenness follows the order: forest > bushes in forest-prairie zone > bushes in forest area. The values of D and H' of arbor and shrub layers in arbor forest show no significant differences but are much lower than that in herbage one, of which the order of variance is: bushes > forest > herbage. For the bush forest, values of D and H' in herbage layer are significantly higher than those in shrub layer ($P < 0.05$) or much more significantly higher ($P < 0.01$), of which the order of variation coefficient follows the order: bush layer > herbage layer; and there are no significant difference among different layers regarding J and E . According to the natural structures of *X. sorbifolia* forest, attentions should be paid the arrangement of tree species and the development of plant diversity in herb layer in the oil plantation of *Xanthoceras sorbifolia* so as to enhance the ecological function of the forest land.

Key Words: *Xanthoceras sorbifolia*; community structure; species diversity; North Shaanxi; the Loess Plateau

植物群落外貌、种类组成和结构既是群落生态环境的反映,也是植物生物学特征和生态学特性的表现,通过研究天然植物群落结构特征,可以为人工群落生境确定、树种选择与搭配等提供依据和参考。陕北黄土高原是我国典型生态脆弱区和退化区之一,自 20 世纪末期开始实施退耕还林、封山育林等生态恢复工程以来,植被和生态环境明显改善^[1],科技工作者也先后对植被恢复过程中的物种组成^[2-4]、多样性变化^[5-9]、修复模式对群落多样性影响^[10-11]等问题进行了大量研究,为揭示生态系统规律、指导生态修复起到了重要作用。目前林业建设面临的关键问题是如何提高生态林经济效益,以巩固和提高既有建设成果,而以往研究都以地带性典型植被类型——直接经济效益极度低下的生态防护林为对象,没有涉及生态服务功能和经济价值都较高的生态经济林,无法满足林业建设的后续需要。

文冠果 (*Xanthoceras sorbifolia*) 是我国特有的珍贵树种和北方地区主要生物质能源植物,天然分布于 $N28^{\circ}34'—47^{\circ}20'$, $E73^{\circ}20'—120^{\circ}25'$ 之间的广大地区,遍及华北、华东及西北地区等 14 个省区,陕北黄土高原次生林区是其主要分布地域之一。自 20 世纪 60 年代开始,青海、陕西、江苏、黑龙江等地区进行了引种、栽培试验和大面积栽植,因适生条件限制、栽培管理等原因,除内蒙、陕西等地小面积栽培成功外,普遍出现了树木生长势差、经济产量低、大面积引种失败等问题。近年来随着我国中长期能源发展战略的调整,文冠果再次受到普遍重视和关注,成为北方地区生物质油料能源首选树种,人工林面积不断扩大。因此,在文冠果天然群落结构、物种多样性以及人工半人工林群落营建技术研究鲜见报道的情况下,本研究以其集中分布区陕北黄土高原为研究区域,对文冠果天然林结构特征、物种组成与多样性及其在不同环境的变化进行了研究,以期为大面积文冠果人工栽植在地域选择、树种配置、林地经营管理和效益提升等方面提供参考,推进北方能源林建设,维护林业生态建设成果。

1 研究地概况

本研究在文冠果天然分布区陕北黄土高原进行,该地域为黄土高原中心地带,地理坐标 $N 34^{\circ}21'34"—N39^{\circ}35'00"$, $E 106^{\circ}26'32"—E 111^{\circ}14'30"$,主要包括丘陵沟壑、高原沟壑、土石低山等地貌单元,大部分为 50—150m 的黄土覆盖,海拔一般 800—1300m,植被由东南向西北分为森林区、森林草原区和干草原区等,典型

地带植被类型有辽东栎 (*Quercus liaotungensis*)、侧柏 (*Platyeladus orientalis*) 林、油松 (*Pinus tabulaeformis*) 林、白桦 (*Betula platyphylla*) 林、辽东栎 (*Quercus liaotungensis*) 林、山杨 (*Populus davidiana*) 林、狼牙刺 (*Sophora viciifolia*)、黄蔷薇 (*Rosa hugonis*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、胡榛子 (*Ostryopsis davidiana*)、北京丁香 (*Syringa pekinensis*) 灌丛、长芒草 (*Stipa bungeana*)、白羊草 (*Bothriochloa ischaemum*)、茭蒿 (*Artemisia giraldii*)、铁杆蒿 (*Artemisia gmelini*) 等草原。文冠果在这些区域都有分布。气候由南向北依次分为暖温带半湿润、暖温带半干旱、温带半干旱大陆性季风气候区, 年日照 1900—2900h, 年均气温 7—13.3℃, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温 2800—4110℃, 1 月份和 7 月份平均气温分别为 -0.8—-9.9℃ 和 22.2—25.5℃, 无霜期 130—230d, 年均降水 320—730mm, 7—9 月降水量占全年的 50%—60%。土壤以黄土性土、褐土、黑垆土等为主。文冠果群落生境概况如表 1 (为缩短篇幅并概括反映群落生境, 选取 10 个代表性样地介绍)。

2 研究方法

2.1 调查方法

调查、测定时, 在踏查和访问基础上, 沿水热条件变化方向, 由南向北分布路线, 选择分布相对集中的典型地段进行抽样调查, 共调查 32 个样地。乔木林样地面积 20m × 20 m, 乔木进行每木检尺, 记录内容包括地点、地理位置、地质地貌、海拔、坡度、坡向、坡位、土壤、群落外貌、层次情况、郁闭度, 及每种乔木的名称、株数、高度、胸径、冠幅、枝下高等。乔木样地中灌木样方按样地对角线分别设置 5 个 2 m × 2 m 灌木样方, 再在灌木样方四角设置 1 m × 1 m 草本样方, 灌木及草本进行实测并记录其种类、丛(株)数、单丛分枝数、高度、盖度、频度、鲜重。灌丛样地面积 10 m × 10 m, 灌丛进行每株实测, 记录内容同于乔木林样地。灌丛样地中按对角线分别设置 5 个 1 m × 1 m 草本样方, 草本样方面积和观测记录内容同于乔木林样地。

表 1 典型代表性样地基本情况
Table 1 General information of the study sites

植被区 Vegetation zone	样地号 No. of plots	地点 Site	地理位置 Latitude (N), longitude (E)	海拔/m Elevation	坡度/(°) Slope	坡向 Direction	坡位 Location of slope	盖度/% Coverage	文冠果生活型 Life form of <i>X. sorborifolia</i>
森林区 Forest zone (I)	9	洛川县厢寺川 林场	N35°56'55.8" E109°38'44.3"	1214	48	南偏东 25°	上中	30	乔木
	2	富县吉子现镇弥 家川村	N 35°49'17.4" E 109°13'22.2"	945	35	南偏西 45°	下	30	乔木
	11	富县直罗镇安家 川村	N 35°58'51.3" E 108°58'03"	1000	12	东	中	80	灌木
	15	富县茶坊镇回回 庄村	N 36°06'25.7" E 109°25'52.5"	1030	41	南偏西 65°	沟谷	40	灌木
	16	富县牛武镇屈家 湾村	N 36°06'16.0" E 109°38'44.4"	1190	50	南偏东 35°	中下	35	灌木
	19	甘泉县道镇清 泉村	N 36°16'33.7" E 109°30'54.1"	1270	5	南偏西 45°	上	18	灌木
	22	宝塔区柳林镇沟 门村	N 36°29'32.9" E 109°26'52.5"	1130	50	东	中上	15	灌木
森林草原区 Forest-steppe zone (II)	23	清涧县宽周镇朱 家沟村	N 37°08'22.0" E 110°08'06.4"	990	18	南	上	25	灌木
	25	延川县文安驿镇 马家沟村	N 36°53'22.8" E 110°06'16.8"	915	75	西	上	18	灌木
	28	绥德县四十里铺 镇雷家岔村	N 37°40'02.0" E 110°13'10.4"	1050	65	西偏北 35°	上	15	灌木

2.2 数据分析

(1) 重要值

分别计算乔木、灌木和草本植物重要值, 计算公式为:

乔木重要值 $IV_{tr} = (\text{相对密度} + \text{相对高度} + \text{相对盖度})/3$

灌木重要值 $IV_{sh} = (\text{相对密度} + \text{相对高度} + \text{相对盖度} + \text{相对重量})/4$

草本重要值 $IV_{gr} = (\text{相对密度} + \text{相对高度} + \text{相对盖度} + \text{相对重量} + \text{相对频度})/5$

(2) 植物多样性丰富度指数

植物丰富度指数 $S = \text{出现在样方的物种数}$

(3) 多样性指数

Simpson 多样性指数
$$D = 1 - \sum_{i=1}^s \frac{Ni(Ni-1)}{N(N-1)}$$

Shannon-Wiener 多样性指数
$$H' = - \left(\sum_{i=1}^s Pi \ln Pi \right)$$

(4) 均匀度指数

Pielou 均匀度指数
$$J = \frac{\left(\sum_{i=1}^s Pi \ln Pi \right)}{\ln S}$$

Alatalo 均匀度指数
$$E = \frac{\left[\left(- \sum_{i=1}^s Pi^2 \right)^{-1} - 1 \right]}{\left[\exp \left(- \sum_{i=1}^s Pi \ln Pi \right) - 1 \right]}$$

式中, Ni 为第 i 个种的重要值, N 为所有种的重要值之和, Pi 为第 i 个种的重要值占所有种重要值之和的比例, 即 $Pi = Ni/N, i = 1, 2, 3, \dots, S, S$ 为物种数。

3 结果与分析

3.1 群落垂直结构及其物种组成

植物群落的生活型及其群落结构是植物与其生长环境相互作用的结果。由于生境条件的差异, 文冠果群落既有乔木林, 也有灌丛, 乔木林分布于洛川、富县等黄土高原阔叶落叶森林区 (I 区, 下同), 灌丛群落和乔木型孤树在森林区和森林草原区 (II 区, 下同) 都有分布, 干草原、沙化草原区以灌木型孤树或乔木型孤树分布较多。据统计陕北黄土高原文冠果群落调查样方内出现植物 77 种, 隶属 27 科 65 属, 其中禾本科 9 属 11 种, 菊科 7 属 12 种, 豆科 9 属 11 种, 蔷薇科 13 属 13 种, 共计 38 属 47 种, 分别占调查植被属、种总数的 58.5% 和 61.0%, 物种构成表现为多数种属于少数科, 少数种属于多数科, 很多种为单属种, 呈现西北荒漠区的植物区系特征^[12] 和本区植被恢复演替中的一般物种组成变化规律^[9]。乔木林与灌木林、森林区灌木林与森林草原区灌木林在物种组成也存在差异 (表 2)。

文冠果乔木林多为次生混交林, 分布在阳坡、半阳坡、半阴坡, 林相疏散, 具有乔灌草层次, 建群种或优势种不明显。乔一层一般高 3.5—4.5m, 郁闭度 0.15 上下, 以油松为主; 乔二层高度 2.5—3m (文冠果高度 2—2.3m), 郁闭度 0.15—0.2, 主要有文冠果、山桃 (*Amygdalus davidiana*)、西北栒子 (*Cotoneaster zabelii*)、毛樱桃 (*Cerasus tomentosa*)、杜梨 (*Pyrus betulaefolia*) 等, 乔木层树木单株之间很少树冠重叠, 林内阳光充足, 文冠果等乔二层树种可获得充分的光照; 灌木层盖度一般 30%—40%, 高度 0.5—1.8m, 主要有山桃、黄蔷薇、狼牙刺、葱皮忍冬 (*Lonicera ferdinandii*)、北京丁香、土庄绣线菊 (*Spiraea pubescens*) 等; 草本层盖度 40%—60%, 高度 40—60cm, 主要是披针苔草 (*Carex lanceolata*)、铁杆蒿、中华隐子草 (*Cleistogenes chinensis*)、野菊 (*Dendranthema indicum*)、尖叶胡枝子 (*Lespedeza juncea*)、茼蒿 (*Artemisia giraldii*) 等。文冠果与油松、侧柏等地域性优势树种形成混交林时, 其他伴生乔木树种较少, 原因是文冠果为非优势树种, 尽管分布较广, 但很难自然形成以其为建群种或优势种的地域性优势森林群落, 即使形成也带有极大的偶然性, 且环境较为特殊, 与之伴生的树种也就不多。文冠果乔木纯林一般面积不大, 分布在半阴坡下部, 林相整齐, 乔木层只混生有个别臭椿 (*Ailanthus altissima*), 高度 3.8—4.2m, 郁闭度 0.3 左右, 平均胸径 5.5cm, 冠幅 1.8m, 密度 1670 株 · hm⁻² 左右, 灌木层和草本层稀少, 灌木层盖度约 5%, 高度 0.9m 左右, 主要有狼牙刺、酸枣, 草本层盖度 30%—

40%, 高度 25—30cm, 主要是披针苔草、铁杆蒿、长芒草、草地凤毛菊 (*Saussurea amara*)、多花胡枝子 (*Lespedeza floribunda*)、野菊等。

文冠果灌木林一般分布在侵蚀沟头、崩坎、沟底缓坡等光照条件较好的地段, 高度 2.6—2.8m, 盖度 50%—80%, 其他优势种有牛奶子 (*Elaeagnus umbellata*)、荆条 (*Vitex negundo*)、杜梨等, 伴生有土庄绣线菊、黄蔷薇、葱皮忍冬、榆叶梅 (*Amygdalus triloba*)、山桃、榆树 (*Ulmus pumila*)、杠柳等, 其中文冠果一般高度 1.5—2.2m, 单株分枝 2—5 个, 冠幅 0.8—4.5m, 长势健壮。草本层一般高度 30—40cm, 盖度 20%—35%, 主要有铁杆蒿、野菊、牡蒿 (*Artemisia japonica*)、披针苔草、异叶败酱 (*Patrinia heterophylla*)、艾蒿 (*Artemisia argyi*)、广布野豌豆 (*Vicia cracca*)、冰草 (*Agropyron cristatum*)、披针叶茜草 (*Rubia lanceolata*) 等。无论在森林区还是在森林草原区, 狼牙刺、酸枣、榆树、山桃等灌木以及铁杆蒿、中华隐子草、达乌里胡枝子、阿尔泰狗娃花、白羊草等草本, 构成了灌木林优势种或主要伴生种, 而有一些植物如荆条、胡颓子、北京丁香、土庄绣线菊、黄蔷薇、毛樱桃、野菊、异叶败酱、北柴胡、猪毛蒿等仅出现于森林区, 说明不同植被区文冠果群落植物组成既有联系也有差异, 与群落演替阶段尤其是环境条件关系密切。

3.2 群落植物物种重要值

由表 2 可以看出, 在落叶阔叶林区, 乔木林中乔木层重要值介于 (11.32 ± 2.15)—(55.31 ± 7.38) 之间, 油松最大, 文冠果次之; 灌木层重要值为 (1.22 ± 0.89)—(61.66 ± 7.25), 狼牙刺最大, 黄蔷薇、葱皮忍冬等也占有优势; 草本层重要值为 (0.83 ± 0.23)—(34.13 ± 5.67), 野菊、铁杆蒿、异叶败酱、长芒草、披针苔草等的重要值较高。油松、狼牙刺、野菊等这些在各层中占相对优势的植物, 都是旱中生或中生, 尤其在乔木层和灌木层旱生植物优势较为明显, 而在草本层尽管仍以旱中生植物占优势, 但野菊、山苦菜 (*Ixeris chinensis*) 等多年生中生植物的比例和重要值明显提高, 既是陕北黄土高原总体干旱环境的反映, 也说明经过相对较长时间的恢复演替, 乔木林环境尤其是土壤水分环境已有所改善; 灌木林中灌木层重要值为 (6.32 ± 7.12)—(2.86 ± 3.57), 文冠果、狼牙刺、牛奶子、茅莓等较大, 草本层重要值介于 (2.68 ± 1.87)—(40.36 ± 1.99) 之间, 其中白草、披针苔草、铁杆蒿、阿尔泰狗娃花等重要值较高, 同时, 杜梨、猪毛蒿等旱生先锋植物在灌木层或草本层也占据比较重要的地位, 和灌木林在落叶阔叶林区植物群落演替系列中的过渡性位置相符。森林草原区, 灌木林灌木层树种较少, 重要值介乎 (13.96 ± 2.11)—(55.36 ± 4.87) 之间, 旱生植物文冠果、狼牙刺的地位异常突出, 草本层重要值为 (7.81 ± 2.11)—(44.58 ± 7.57), 阿尔泰狗娃花、铁杆蒿、茺蒿等较高。可以看出文冠果在陕北黄土高原典型地带性群落演替过程中尽管只是伴生种, 但在小环境中既可以和其他乡土植物形成天然群丛, 还可以处于相对重要的位置, 形成以文冠果为优势种的群落。

表 2 文冠果群落主要物种组成及其重要值
Table 2 Species and its importance values of *X. sorbifolia* communities

层次 Layer	种名 Species	森林区 Forest zone		森林草原区 Forest-steppe zone
		乔木林 Tree	灌木林 Shrubby	灌木林 Shrubby
乔木层 Tree layer	文冠果 <i>Xanthoceras sorbifolia</i>	42.51 ± 6.45		
	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	55.31 ± 7.38		
	山桃 <i>Amygdalus davidiana</i>	22.81 ± 4.27		
	杜梨 <i>Pyrus betulaefolia</i>	18.90 ± 3.91		
	毛樱桃 <i>Cerasus tomentosa</i>	19.40 ± 2.57		
	臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>	11.32 ± 2.15		
灌木层 Shrub layer	狼牙刺 <i>Sophora viciifolia</i>	61.66 ± 7.25	27.94 ± 5.89	49.64 ± 9.26
	黄蔷薇 <i>Rosa hugonis</i>	42.30 ± 3.46		
	西北栒子 <i>Cotoneaster zabelii</i>	14.89 ± 3.58		
	荆条 <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i>	16.78 ± 3.46	25.7 ± 4.23	
	酸枣 <i>Ziziphus jujuba</i> var. <i>spinosa</i>	5.45 ± 2.23	15.53 ± 2.49	25.68 ± 3.73
	土庄绣线菊 <i>Spiraea pubescens</i>	28.53 ± 4.29	17.2 ± 2.39	

续表

层次 Layer	种 名 Species	森林区 Forest zone		森林草原区 Forest-steppe zone
		乔木林 Tree	灌木林 Shrubby	灌木林 Shrubby
草本层 Herbaceous layer	葱皮忍冬 <i>Lonicera ferdinandii</i>	35.28 ± 2.45	14.38 ± 2.03	
	茅莓 <i>Rubus parvifolius</i>	16.64 ± 3.59	23.73 ± 1.54	
	杠柳 <i>Periploca sepium</i>	1.22 ± 0.89	6.32 ± 7.12	18.26 ± 4.64
	蛇葡萄 <i>Ampelopsis bodinieri</i>	6.23 ± 1.27		
	牛奶子 <i>Elaeagnus umbellata</i>		20.14 ± 3.43	
	文冠果 <i>Xanthoceras sorbifolia</i>		32.86 ± 3.57	55.36 ± 4.87
	杜梨 <i>Pyrus betulaefolia</i>		19.41 ± 3.12	
	沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>		7.26 ± 0.12	
	灌木铁线莲 <i>Clematis fruticosa</i>		16.53 ± 2.47	13.96 ± 2.11
	榆树 <i>Ulmus pumila</i>			25.97 ± 6.13
	披针苔草 <i>Carex lanceolata</i>	15.34 ± 3.15	33.68 ± 3.89	17.9 ± 3.55
	铁杆蒿 <i>Artemisia gmelini</i>	27.94 ± 6.45	31.24 ± 5.03	44.58 ± 7.57
	野菊 <i>Dendranthema indicum</i>	34.13 ± 5.67	24.77 ± 4.17	
	多花胡枝子 <i>Lespedeza floribunda</i>	4.87 ± 1.41	23.17 ± 1.15	
	广布野豌豆 <i>Vicia cracca</i>	7.09 ± 3.25	9.2 ± 3.2	18.14 ± 1.45
	长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	15.77 ± 5.48	24.24 ± 4.33	
	苦买菜 <i>Ixeris denticulata</i>	0.83 ± 0.23		
	紫菀 <i>Aster tataricus</i>	8.33 ± 2.69		
	深山堇菜 <i>Viola selkirkii</i>	1.68 ± 0.23	2.68 ± 1.87	
	草地凤毛菊 <i>Saussurea amara</i>	2.79 ± 0.29		
	披针叶茜草 <i>Rubia lanceolata</i>	4.58 ± 0.39	14.19 ± 2.86	
	异叶败酱 <i>Patrinia heterophylla</i>	14.89 ± 2.76	22.51 ± 3.50	
	中华隐子草 <i>Cleistogenes chinensis</i>	6.22 ± 2.47	26.81 ± 2.35	32.73 ± 2.37
	山苦菜 <i>Ixeris chinensis</i>	2.1 ± 0.34	7.2 ± 0.57	7.81 ± 2.11
	阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>	6.1 ± 1.89	29.89 ± 4.29	57.05 ± 6.79
	野青茅 <i>Deyeuxia sylvatica</i>	4.68 ± 1.21		
	达乌里胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>		19.23 ± 3.43	24.82 ± 2.44
	糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>		11.32 ± 2.61	
	狗尾草 <i>Setaria viridis</i>		20.00 ± 1.57	
	白草 <i>Pennisetum flaccidum</i>		40.36 ± 1.99	23.37 ± 6.45
	香青兰 <i>Dracocephalum moldavica</i>		17.7 ± 3.68	
	甘草 <i>Glycyrrhiza uralensis</i>		21.2 ± 5.24	
	猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>		49.5 ± 3.10	
	老鹳草 <i>Geranium wilfordii</i>		15.46 ± 1.27	
	艾蒿 <i>Artemisia argyi</i>		24.16 ± 2.12	24.18 ± 3.37
	大油芒 <i>Spodiopogon sibiricus</i>		27.62 ± 1.58	
	冰草 <i>Agropyron cristatum</i>		14.54 ± 2.42	
	北柴胡 <i>Bupleurum chinensis</i>		22.17 ± 2.66	
	尖叶胡枝子 <i>Lespedeza juncea</i>		17.05 ± 2.57	15.58 ± 2.33
	五叶草莓 <i>Fragaria pentaphylla</i>		10.37 ± 2.85	
	草木樨黄芪 <i>Astragalus melilotoides</i>		19.85 ± 0.50	
	野韭 <i>Allium ramosum</i>		16.37 ± 2.35	
	狭叶米口袋 <i>Gueldenstedtia stenophylla</i>		4.21 ± 0.93	9.35 ± 2.63
	白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i>		16.8 ± 2.48	
	鹅绒委陵菜 <i>Potentilla anserina</i>		20.29 ± 5.73	
	芡蒿 <i>Artemisia giraldii</i>		33.09 ± 4.84	35.34 ± 1.93

3.3 群落物种丰富度

从表3、表4可以看出,文冠果群落物种丰富度Ⅰ区乔木林为 21.2 ± 4.8 ,灌木林为 21.7 ± 5.7 ,Ⅱ区灌木林 12 ± 1.7 ,Ⅱ区乔木林和灌木林差异不显著,它们都极显著高于Ⅱ区灌木林($P < 0.01$),物种丰富度变异系数Ⅱ区灌木林 $<$ 乔木林 $<$ Ⅰ区灌木林。文冠果乔木林物种丰富度低于本区域山杨、辽东栎和山杨—辽东栎混交林^[8]以及白桦、侧柏、油松林^[13-14],原因可能是山杨林、辽东栎林等为地带性顶级群落或处在森林植被保存较为完好的次生林区,经过更长时间的演替群落结构愈趋复杂,或侵入群落的植物种类较多。文冠果灌木林物种丰富度与同地域茶条槭(*Acer ginnala*)、狼牙刺、沙棘等灌木林^[6,9,15]相当。说明文冠果虽然不是地带性顶级群落及演替阶段代表性群落的建群种或优势种,但以其为优势种在一些狭小特殊生境形成的群落,物种丰富度并没有降低,同时,群落物种丰富度指数也主要受群落所处地的水热条件制约,随生境水热条件变差而降低^[16],物种丰富度越低物种数量相对越稳定,对维护群落的相对稳定有利。

表3 文冠果群落物种多样性的变化

Table 3 Change in species diversity in the *Xanthoceras sorhorifoluz* community

项目 Item		乔木林 Tree		灌木林 1 Shrubbery 1		灌木林 2 Shrubbery 2	
		$\bar{X}$	CV	$\bar{X}$	CV	$\bar{X}$	CV
群落 Community	S	$21.2 \pm 4.8a$	0.225	$21.7 \pm 5.7a$	0.264	$12.0 \pm 1.7b$	0.139
	D	$0.933 \pm 0.022a$	0.024	$0.917 \pm 0.040a$	0.043	$0.861 \pm 0.023b$	0.026
	H'	$2.519 \pm 0.023ab$	0.028	$2.755 \pm 0.368a$	0.133	$2.190 \pm 0.126b$	0.057
	J	$0.837 \pm 0.200a$	0.239	$0.923 \pm 0.047a$	0.049	$0.885 \pm 0.036a$	0.041
	E	$0.840 \pm 0.257a$	0.254	$0.806 \pm 0.064a$	0.079	$0.790 \pm 0.083a$	0.105
乔木层 Tree layer	S	4.8 ± 1.9	0.401				
	D	0.694 ± 0.158	0.228				
	H'	1.369 ± 0.463	0.338				
	J	0.918 ± 0.021	0.023				
	E	0.869 ± 0.031	0.035				
灌木层 Shrub layer	S	$5.6 \pm 2.3ab$	0.411	$7.6 \pm 3.4a$	0.452	$3.8 \pm 1.2b$	0.305
	D	$0.685 \pm 0.247a$	0.361	$0.773 \pm 0.117a$	0.151	$0.635 \pm 0.083a$	0.131
	H'	$1.437 \pm 0.596a$	0.415	$1.730 \pm 0.501a$	0.29	$1.170 \pm 0.239a$	0.204
	J	$0.849 \pm 0.144a$	0.169	$0.863 \pm 0.134a$	0.155	$0.895 \pm 0.041a$	0.046
	E	$0.836 \pm 0.110a$	0.131	$0.835 \pm 0.117a$	0.137	$0.823 \pm 0.155a$	0.188
草本层 Herbaceous layer	S	$10.8 \pm 1.6ab$	0.152	$13.5 \pm 4.0a$	0.293	$8.2 \pm 1.2b$	0.143
	D	$0.873 \pm 0.028a$	0.032	$0.868 \pm 0.070a$	0.081	$0.782 \pm 0.044b$	0.056
	H'	$2.194 \pm 0.190a$	0.082	$2.270 \pm 0.371a$	0.164	$1.762 \pm 0.144b$	0.087
	J	$0.926 \pm 0.039a$	0.042	$0.893 \pm 0.084a$	0.094	$0.843 \pm 0.057a$	0.067
	E	$0.877 \pm 0.035a$	0.04	$0.800 \pm 0.146a$	0.174	$0.761 \pm 0.103a$	0.135

灌木林 1 和灌木林 2 分别表示森林带灌木林和森林草原带灌木林;S:丰富度指数,D:Simpson 指数,H':Shannon-Wiener 指数,J:Pielou 指数,E:Alatalo 指数

灌木层和草本层的物种丰富度指数在不同区域群落之间变化趋势相同,即Ⅰ区灌木林 $>$ Ⅱ区灌木林,差异显著($P < 0.05$),乔木林与Ⅰ区灌木林和Ⅱ区灌木林差异都不显著,丰富度变异系数也都是Ⅰ区灌木林 $>$ 乔木林 $>$ Ⅱ区灌木林;群落各层次之间物种丰富度特征是,草本层所占比例最大,分别占乔木林、Ⅰ区灌木林和Ⅱ区灌木林总物种数的50.9%、62.2%和68.3%,显著($P < 0.05$)高于灌木层和乔木层,且变异系数也最小;乔木林的灌木层与乔木层之间差异不显著。进一步证明了文冠果生活型及其是否和其他乡土乔木树种混生对群落物种丰富度影响不大,草本层物种数量对群落物种丰富度作用十分重要。这种结果不仅与黄土高原地区典型森林群落小叶杨林^[17]、山杨林、辽东栎林、山杨—辽东栎混交林等^[8]一致,也与北京东灵山^[18]、河南秦岭东段^[19]温带落叶阔叶林物种多样性特点类似,而与黄土高原油松林^[20-21]、秦岭东段常绿针叶林^[22]、亚热带常绿阔叶林^[23]、热带地区季雨林和季节性雨林^[24]区别明显,是温带落叶阔叶林物种多样性特点的反映。

表 4 文冠果群落垂直结构上物种多样性的变化

Table 4 Change in species diversity in the *Xantoceras sorhorifoluz* community along vertical structure

项目 Item		乔木林 Tree forest			灌木林 1 Shrubbery 1	灌木林 2 Shrubbery 2
		乔木-灌木 Tree-Shrub	乔木-草本 Tree-Herb	灌木-草本 Shrub-Herb	灌木-草本 Shrub-Herb	灌木-草本 Shrub-Herb
S	F	0.356	28.125 **	16.900 **	12.689 **	41.220 **
	P	0.568	0.001	0.0031	0.002	0.000
D	F	0.005 *	6.270 *	2.847	4.902 *	14.493 *
	P	0.048	0.037	0.130	0.040	0.003
H'	F	0.040	13.582 **	7.323 *	7.494 *	26.997 **
	P	0.8463	0.0062	0.0268	0.0135	0.000
J	F	1.132	0.173	1.349	0.357	3.178
	P	0.318	0.688	0.279	0.557	0.105
E	F	0.419	0.157	0.640	0.005	0.679
	P	0.536	0.703	0.447	0.946	0.4295

F:差异显著性 *F* 检验值,*P*:*F* 检验的误差概率

3.4 文冠果群落植物多样性和均匀度

3.4.1 文冠果群落植物物种多样性

群落的多样性及均匀度不仅反映了群落发育的阶段和稳定性,也反映了群落的生境特性,演替过程中多样性指数和均匀度指数越高,群落越稳定,生境越适于群落生存^[25-27]。由表 3、表 4 可以看出,陕北文冠果群落物种多样性指数 *D* 值为(0.861 ±0.023)—(0.933 ±0.022), *H'* 值为(2.190 ±0.126)—(2.755 ±0.368), I 区乔木林与灌木林差异不显著,它们都显著(*P* < 0.05)高于 II 区灌木林,与水热条件尤其是土壤水分含量变化趋势吻合。*D* 值及 *H'* 值变异系数乔木林 < II 区灌木林 < I 区灌木林。说明(1)群落物种组成及其个体相对多度受文冠果生活型影响不显著;(2)与灌木林相比,经过更长时间(25a 左右)演替的乔木林稳定性增强,而处在水热条件较好 I 区的灌木林与 II 区灌木林相比,稳定性较差或者演替到同等稳定状态需要更长的时间;(3) I 区乔木林物种多样性与灌木林无显著差异,甚至稍低,同群落结构越复杂,物种多样性指数就越大的结论^[28]不一致,这可能主要由文冠果群落乔木层郁闭度较大引起:当乔木层盖度超过一定程度后,林下光环境恶化,影响林下灌木、草本的生长,群落物种数及其个体数量就会大幅下降,而灌木林光照条件较好,对植物生存有利,物种数及其个体数量增加,物种多样性指数就较高,也反映了群落物种多样性变化的复杂性。

灌木层 *D* 值、*H'* 值乔木林、I 区灌木林、II 区灌木林之间差异不显著,变异系数 II 区灌木林 < I 区灌木林 < 乔木林,即灌木层物种多样性森林草原区最稳定,原因可能是水热条件尤其是土壤水分条件的恶化,降低了群落的物种数量及其不确定性;草本层 *D* 值、*H'* 值 I 区乔木林、灌木林之间差异不显著,它们都高于 II 区灌木林(*P* < 0.05),变异系数乔木林 < II 区灌木林 < I 区灌木林。表明 I 区文冠果群落多样性指数显著高于 II 区主要由草本层植物引起;草本层物种多样性的稳定性乔木林 > II 区灌木林 > I 区灌木林,也是水热条件和演替进程共同作用的结果。

群落各层次之间物种多样性指数,乔木林 *D* 值草本层显著(*P* < 0.05)高于乔木层,灌木层与乔木层和草本层差异都不显著,*H'* 值草本层分别极显著(*P* < 0.01)和显著(*P* < 0.05)高于乔木层和灌木层,乔木层、灌木层差异不显著,*D* 值和 *H'* 值变异系数草本层 < 乔木层 < 灌木层,表明文冠果乔木林草本层多样性指数最大也最稳定,灌木层多样性指数与乔木层差异不明显且最不稳定,和黄土高原落叶阔叶小叶杨人工林^[17]以及北京东灵山温带阔叶林群落层次梯度间物种多样性特点相似^[18],区别于陕北黄土高原油松林^[20-21]以及亚热带常绿阔叶林^[23],与丰富度指标反映黄土高原文冠果群落及其他落叶阔叶林物种多样性特征变化趋势一致。灌木林不论在 I 区还是 II 区,草本层 *D* 值和 *H'* 值都显著(*P* < 0.05)或极显著(*P* < 0.01)高于灌木层,多样性比

灌木层稳定,这也是温带灌木林的一个显著特征。另外, D 值与 H' 值反映文冠果乔木林灌木层与乔木层、草本层物种多样性差异的结果不尽一致,可能和它们与物种丰富度的密切程度不同有关^[18],但从实际情况来看 H' 值反映的结果似乎与现状更为接近。

3.4.2 文冠果群落物种均匀度

从表3、4可以看出,文冠果群落物种均匀度指数 J 值为 (0.837 ± 0.200) — (0.923 ± 0.047) , E 值为 (0.790 ± 0.083) — (0.840 ± 0.257) ,物种均匀度指数 J 值和 E 值在不同群落、不同群落层次以及相同层次的不同群落之间都无显著性差异,不同本区域的小叶杨林^[17]、山杨林、辽东栎林、山杨—辽东栎混交林^[8]、油松林^[20-21]等乔木林和茶条槭、狼牙刺、沙棘等灌木林^[6,9,15]。 J 值和 E 值变异系数在不同群落之间表现为Ⅱ区灌木林<Ⅰ区灌木林<乔木林,草本层乔木林<Ⅱ区灌木林<Ⅰ区灌木林,它们二者反映其他状况下物种均匀度稳定性结果不尽一致,可能也是 J 值和 E 值反映群落物种均匀度侧重点不同的表现^[18]。表明文冠果群落不仅在Ⅰ区与Ⅱ区之间、乔木林与灌木林之间物种均匀度接近,而且群落乔木层、灌木层和草本层内物种均匀度也差异不明显,即物种间重要值相差较小,与群落结构越复杂,物种均匀度指数越小结论^[22]不一致,可能与文冠果群落尚处在演替动态中有关,即不能满足讨论群落多样性与稳定性的前提条件——生物群落充分发育成熟^[29]。另外,在乔木林草本层与乔木层和灌木层,灌木林草本层与灌木层的物种丰富度指数差异都较大情况下,均匀度指数无显著差异也说明了乔木林草本层、乔木层和灌木层、灌木林草本层与灌木层的多度分布都比较接近,乔木层已经进入一个相对稳定的状态。

4 结论与讨论

模仿自然群落结构是建立具有最大适应性和相对稳定植物群落的最简捷途径。陕北黄土高原森林区文冠果天然群落既有小乔木林,也有灌木林,森林草原区只有灌木片林。群落植物组成符合本区植被恢复演替过程中的植物组成变化规律和西北荒漠区的植物区系特征。物种重要值森林区乔木林油松最大,文冠果次之,灌木层狼牙刺最大,黄蔷薇、葱皮忍冬等也占有优势;草本层野菊、铁杆蒿、异叶败酱占优势;灌木层灌木层重要值文冠果、狼牙刺、茅莓等较大,草本层白草、披针苔草、铁杆蒿等地位较高,杜梨、猪毛蒿等旱生先锋植物也占据比较重要的地位。森林草原区灌木林文冠果、狼牙刺、阿尔泰狗哇花、铁杆蒿、芡蒿等旱生植物地位异常突出。文冠果虽然不是本区地带性优势种或建群种,但耐旱性强,在某些小环境可以天然形成以其为优势种的小片林。模拟文冠果天然林结构,通过补栽、抚育等轻度人为干扰措施,在森林区营建小乔木林或灌木林,在森林草原区营建文冠果灌木林,并达到群落层次结构与天然林相同或接近的水平不仅必要,而且可能。

物种丰富度指数与多样性指数是群落稳定性的重要指标,一定程度上决定于群落上层物种组成及其配比与空间配置(配置方式、盖度等),而群落的稳定性与其密切相关,一般情况下群落结构越复杂,群落越稳定,生态服务功能和生产力水平越高,抵御不良环境或外部干扰的能力愈强^[14,28,30-32]。陕北黄土高原文冠果群落物种丰富度指数和多样性指数变化趋势基本一致,Ⅰ区乔木林与灌木林差异不显著,都极显著($P < 0.01$)高于Ⅱ区灌木林,均匀度指数无显著差异,丰富度指数变异系数Ⅰ区灌木林>乔木林>Ⅱ区灌木林,多样性指数和均匀度指数变异系数乔木林>Ⅱ区灌木林>Ⅰ区灌木林。群落层次间多样性指数 D 值和 H' 值乔木林乔木层、灌木层差异不显著,显著低于草本层,变异灌木层>乔木层>草本层;灌木林草本层显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)高于灌木层,变异系数灌木层>草本层,物种均匀度指数 J 值和 E 值在群落(乔)灌木层之间无显著差异。文冠果群落既有温带落叶阔叶林物种多样性特征^[6,18-19],也显示出特殊性,是以文冠果为主、处在群落上层的树种作用于群落的结果,预示了选择适宜树种并采取人工干预措施,促进树种间合理生长,对提高文冠果人工林物种多样性与群落稳定性很有必要。同时在营建文冠果乔木林时应加强灌木层物种配置及多样性维护。根据调查在森林区营建小乔木林或灌木林,纯林或混交林时,应注意和油松、荆条等冠幅较小、冠层较稀树种搭配;森林草原区栽植文冠果纯灌木林或文冠果-狼牙刺混交灌木林,应注意保护草本植物。

选择适宜生境并建立与之适应的群落层次,对林地经营管理和提高林地效益同样至关重要。有研究认为

黄土高原适宜的群落层次结构为乔灌草复层结构,各层不同植物种混生^[33-35]。本研究发现尽管文冠果抗旱耐瘠薄,在陕北黄土高原分布较广,但其群落多集中在侵蚀沟头、崩坎、沟底缓坡等光照与水分条件较好的地段,且这种林地树木长势优于其它地段。同时,有些群落如样地 2,乔木层虽然几近纯林,林下灌木层高度、盖度分别约是周围其它乔木林的 1/5—1/3 和 1/7—1/5、灌木林的 1/4—1/2 和 1/8—1/5,草本层高度、盖度、生物量与周围其它群落相近,但却没有发生土壤侵蚀迹象,说明文冠果纯林可以维持相对高效、稳定的固持水土效益,且和地带性顶级群落辽东栎林一样会随着演替时间的延长,群落优势种向少数种集中^[6]。因此,根据本区地形破碎,小生境复杂多样,造林小班面积一般较小(小于 3hm²),营建文冠果人工林也可以优先选择缓坡、崩坎等光照和土壤水分、地力较好的地段,形成以小班为单位的文冠果纯林斑块,并与其他天然林或人工林呈镶嵌状分布,以增加中小尺度地域群落水平空间异质性和生物多样性,维持以水土保持为主的防护效益和群落稳定性,降低人工经济林造林和经营成本。林下可配置狼牙刺、酸枣等灌木,增加群落地上部层次性和地下根系空间分布的均匀度,进一步提升群落固持水土的能力。

References:

- [1] Zhang W H, Liu G B. Review on vegetation restoration in Loess Plateau. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(1): 102-106.
- [2] Wang G L, Liu G B, Liu F, Hou X L, Zhou S L. Changes in composition and structure of plant communities during the course of restoration at loess gully region. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(12): 2550-2557.
- [3] Wen Z M, Jiao F, Liu B Y, Bu Y J, Jiao J Y. Natural vegetation restoration and soil nutrient dynamics of abandoned farmlands in forest-steppe zone on Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(11): 2025-2029.
- [4] Tang L, Liang Z S, Du F, Hao W F. Vegetation succession of arable old land after being abandoned in Loess Plateau hilly region & ascertaining dominant native herbages in the process, analyzing their chemical nutrient composition. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 1165-1175.
- [5] Li Y Y, Shao M A. Degradation process and plant diversity of alfalfa grassland in North Loess Plateau of China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(12): 2321-2327.
- [6] Li Y Y, Shao M A. The Change of plant diversity during natural recovery process of vegetation in Ziwuling area. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(2): 252-260.
- [7] Bai W J, Jiao J Y. Analyses on diversity of primary natural restoration vegetation communities in abandoned croplands in the Hilly-gulled region of the Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(3): 140-145.
- [8] Qin J, Wang K B, Shangguan Z P. Change of plant diversity of *Populus davidiana*, *Quercus liaotungensis* and their mixed forest in Ziwuling area of Loess Plateau. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2007, 35(3): 131-136.
- [9] Qi W, Zhu Q K, Zhang Y Q, Zhao L L. Dynamics of plant community species diversity in the process of ecological rehabilitation in north Shaanxi loess area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(2): 403-409.
- [10] Bo Y J, Wen Z M, Jiao F, Jiao J Y, Zhang G J. Yangou watershed the research on bio-diversity under ways of vegetation restoration. *Journal of Northwest Forestry University*, 2005, 20(1): 6-9.
- [11] Jia J S, Li W Z, Gao G X, Li D Q, Li Y L, Zhou X C. Species diversity of different species arrangement models in converting cropland to forest in Datong, Qinghai. *Journal of Northwest Forestry University*, 2006, 21(3): 1-6.
- [12] Dang R L, Pan X L. Floristic analysis of seed plant families in West-North Desert of China. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 2002, 22(1): 24-32.
- [13] Yue M, Cui Y T, Wang S F. Analysis of species diversity on forest community in the Loess Plateau of north Shaanxi Province. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2003, 23(1): 39-41, 45.
- [14] Kang B W, Hou L, Liu J J, Wang D X, Han L M. Physiognomy structure and species diversity of herb and shrub of rural protection forests in Yan an City. *Journal of Central South Forestry University*, 2005, 25(5): 15-21.
- [15] Wang G L, Liu G B, Hou X L. The research of species diversity after the vegetation restoration in Loess Hilly region. *Journal of Mountain Research*, 2002, 20(2): 182-187.
- [16] Wang E P. Plant Species diversity of artificial recovered *Pinus Massoniana* community in Bashilihe watershed of Fujian Province. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2002, 22(1): 14-18.
- [17] Zhang T, Zhang W H, Guo L J, Liu G B. Species diversity and community stability of *Populus simonii* plantations in different habitats in hilly area of the Loess Plateau. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, 27(2): 340-347.

- [18] Ma K P, Huang J H, Yu S L, Chen L Z. Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China II. Species richness, evenness and species diversities. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15(3): 268-277.
- [19] Shi Z M, Cheng R H, Liu S R, Jiang Y X, Chen B J. Study on species diversity of plant communities in Baotianman. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(6): 17-23.
- [20] Wang C, Wang X A, Wang L. Plant species diversity of different age *Pinus tabulaeformis* plantations and its relations with soil fertility. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(8): 1182-1186.
- [21] Hou L, Lei R D, Kang B W, Wang D X. Traits of plant diversity in a hillclosing and afforestation sequence of *Pinus tabulaeformis* stands in Huanglong Mountains. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 2004, 24(7): 1165-1172.
- [22] Zhu X H, Liu G W, Ru G X, Chen C, Zhao W H, Wang S K. The species diversity and stability of *Abies chensiensis* community in Shiren Mountain Nature Reserve. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2007, 31(5): 57-61.
- [23] Ma J M, Liu S R, Shi Z M, Zhang Y D, Kang B, Chen B Y. Changes of species composition and diversity in the restoration process of Sub-Alpine dark brown coniferous forests in western Sichuan, China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(5): 17-23.
- [24] Huang J H, Gao X M, Ma K P, Chen L Z. A comparative study on species diversity in zonal forest communities. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(6): 611-618.
- [25] Elton C S. The Reasons of Conservation. London: Chapman & Hall, 1958: 143-153.
- [26] Tilman D, Doering J A. Biodiversity and stability in grasslands. *Nature*, 1994, 367: 363-365.
- [27] Baskin Y. Ecosystem function of biodiversity. *Biological Science*, 1995, 44: 657-660.
- [28] Zhang F, Zhang J T, Shanguan T L. Interpretation of the main tree species in the forest communities of Zhouweigou in Lianshan Mountain Nature Reserve. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(S): 46-51.
- [29] Wang G H. Further thoughts on diversity and stability in ecosystems. *Chinese Biodiversity*, 2002, 10(1): 126-134.
- [30] Huang J H, Bai Y F, Han X G. Effects of species diversity on ecosystem functioning: mechanisms and hypotheses. *Chinese Biodiversity*, 2001, 9(1): 1-9.
- [31] Wang L, Sun S C, Gao X M. Community spatial structure of a chinese *Pine* plantation in the upper reaches of the Minjiang River: Species richness and coverage. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(6): 8-12.
- [32] Wang Z H, Duan C Q, Hou Y P, Yang J S. The relationship of plant species diversity to ecosystem function in relation to soil conservation in semi-humid evergreen forests, Yunnan Province, China. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(3): 392-402.
- [33] Wei T X, Zhu J Z, Zhu Q K, Zhang Z S. Design of integral agro-forestry and its benefits of soil and water conservation in loess steep slope land. *Journal of Soil Water Conservation*, 1998, 4(4): 82-87.
- [34] Han R L, Hou Q C. On the problem of vegetation reconstruction in the typical area of Loess Gully and Valley II Distinguishing of the types of standing conditions and modes of afforestation and grass planting in small watershed. *Research of Soil and Water Conservation*, 2000, 7(2): 111-118.
- [35] Fu M S, Gao D K, Ma X Z, Liu H M. The deposition model of grass and forest in slope land. *Research of Soil and Water Conservation*, 1998, 5(4): 93-97.

参考文献:

- [1] 张文辉, 刘国彬. 黄土高原植被生态恢复评价、问题与对策. *林业科学*, 2007, 43(1): 102-106.
- [2] 王国梁, 刘国彬, 刘芳, 侯喜禄, 周生路. 黄土沟壑区植被恢复过程中植物群落组成及结构变化. *生态学报*, 2003, 23(12): 2550-2557.
- [3] 温仲明, 焦峰, 刘宝元, 卜耀军, 焦菊英. 黄土高原森林草原区退耕地植被自然恢复与土壤养分变化. *应用生态学报*, 2005, 16(11): 2025-2029.
- [4] 唐龙, 梁宗锁, 杜锋, 郝文芳. 陕北黄土高原丘陵区撂荒演替及其过程中主要乡土牧草的确定与评价. *生态学报*, 2006, 26(4): 1165-1175.
- [5] 李裕元, 邵明安. 黄土高原北部紫花苜蓿草地退化过程与植物多样性研究. *应用生态学报*, 2005, 16(12): 2321-2327.
- [6] 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. *生态学报*, 2004, 24(2): 252-260.
- [7] 白文娟, 焦菊英. 黄土丘陵沟壑区退耕地主要自然恢复植被群落的多样性分析. *水土保持研究*, 2006, 13(3): 140-145.
- [8] 秦娟, 王凯博, 上官周平. 子午岭林区山杨林辽东栎林及其混交林植物多样性的变化. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(3): 131-136.
- [9] 秦伟, 朱清科, 张宇清, 赵磊磊. 陕北黄土区生态修复过程中植物群落物种多样性变化. *应用生态学报*, 2009, 20(2): 403-409.
- [10] 卜耀军, 温仲明, 焦峰, 焦菊英, 张广军. 燕沟流域不同植被恢复重建途径下物种多样性研究. *西北林学院学报*, 2005, 20(1): 6-9.
- [11] 贾俊姝, 李文忠, 高国雄, 李得庆, 李永良, 周心澄. 大通县退耕还林不同配置模式物种多样性的研究. *西北林学院学报*, 2006, 21(3): 1-6.
- [12] 党荣理, 潘晓玲. 西北干旱荒漠区种子植物科的区系分析. *西北植物学报*, 2002, 22(1): 24-32.

- [13] 岳明,崔延棠,王双峰. 陕北黄土高原森林群落物种多样性分析. 水土保持通报,2003,23(1):39-41(45).
- [14] 康博文,侯琳,刘建军,王得祥,韩黎明. 延安城郊防护林外貌结构及林下植物的多样性. 中南林学院学报,2005,25(5):15-21.
- [15] 王国梁,刘国彬,侯喜禄. 黄土高原丘陵沟壑区植被恢复重建后的物种多样性研究. 山地学报,2002,20(2):182-187.
- [16] 王二朋. 福建八十里河流域人工恢复马尾松群落植物多样性. 水土保持通报,2002,22(1):14-18.
- [17] 张婷,张文辉,郭连金,刘国彬. 黄土高原丘陵区不同生境小叶杨人工林物种多样性及其群落稳定性分析. 西北植物学报,2007,27(2):340-347.
- [18] 马克平,黄建辉,于顺利,陈灵芝. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II. 丰富度、均匀度和物种多样性指数. 生态学报,1995,15(3):268-277.
- [19] 史作民,程瑞海,刘世荣,蒋有绪,陈宝金. 宝天曼植物群落物种多样性研究. 林业科学,2002,38(6):17-23.
- [20] 汪超,王孝安,王玲. 不同种植年代油松林植物多样性及土壤养分变化研究. 生态学杂志,2007,26(8):1182-1186.
- [21] 侯琳,雷瑞德,康博文,王得祥. 黄龙山林区油松林封育过程中植物物种多样性特征. 西北植物学报,2004,24(7):1165-1172.
- [22] 朱秀红,刘光武,茹广欣,陈晨,卓卫华,王苏珂. 石人山自然保护区秦岭冷杉群落物种多样性和稳定性研究. 南京林业大学学报:自然科学版,2007,31(5):57-61.
- [23] 马姜明,刘世荣,史作民,张远东,康冰,陈宝玉. 川西亚高山暗针叶林恢复过程中群落物种组成和多样性的变化. 林业科学,2007,43(5):17-23.
- [24] 黄建辉,高贤明,马克平,陈灵芝. 地带性森林群落物种多样性的比较研究. 生态学报,1997,17(6):611-618.
- [28] 张峰,张金屯,上官铁梁. 历山自然保护区猪尾沟森林群落植物多样性研究. 植物生态学报,2002,26(增刊):46-51.
- [29] 王国宏. 再论生物多样性与生态系统稳定性. 生物多样性,2002,10(1):126-134.
- [30] 黄建辉,白勇飞,韩兴国. 物种多样性与生态系统功能:影响机制及有关假说. 生物多样性,2001,9(1):1-9.
- [31] 王磊,孙书存,高贤明. 岷江上游人工油松林群落空间结构物种丰富度和盖度. 林业科学,2004,40(6):8-12.
- [32] 王震洪,段昌群,侯永平,杨建松. 植物多样性与生态系统土壤保持功能关系及其生态学意义. 植物生态学报,2006,30(3):392-402.
- [33] 魏天兴,朱金兆,朱清科,张占忠. 黄土陡坡地农林复合经营经营设计与水土保持效益研究. 水土保持学报,1998,4(4):82-87.
- [34] 韩蕊莲,侯庆春. 黄土丘陵典型地区植被建设中有关问题的研究——立地条件类型划分及小流域造林种草布局模式. 水土保持研究,2000,7(2):111-118.
- [35] 付明胜,高登宽,马小哲,刘红梅. 山坡地林草植被配置模式研究. 水土保持研究,1998,5(4):93-97.