

DOI: 10.5846/stxb201502020266

王钰莹,孙娇,刘政鸿,乔亚玲,张泉将,李凤姣,郝文芳.陕南秦巴山区厚朴群落土壤肥力评价.生态学报,2016,36(16): - .

Wang Yuying¹, Sun Jiao¹, Liu Zhenghong², Qiao Yaling¹, Zhang Xiaojiang¹, Li F J, Hao W F. Soil fertility quality assessment of *Magnolia officinalis* communities in Qinba mountains. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(16): - .

陕南秦巴山区厚朴群落土壤肥力评价

王钰莹¹, 孙 娇¹, 刘政鸿², 乔亚玲¹, 张泉将¹, 李凤姣¹, 郝文芳^{1,*}

1 西北农林科技大学生命科学学院, 杨凌 712100

2 陕西省水土保持生态环境监测中心, 西安 710004

摘要:本文以秦巴山区 7 个厚朴群落为对象,分析土壤养分含量的变化规律,同时对各群落土壤肥力进行评价,以期为该区土壤肥力的提高和厚朴群落配置模式的筛选提供理论依据和实践指导。结果表明,秦巴山区厚朴群落间土壤养分含量差异显著;除全磷和全钾外,随土层深度的增加,土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾含量逐渐减小。厚朴群落土壤肥力综合指数从大到小依次为:4a 凹叶厚朴(1.054)>2a 凹叶厚朴(0.882)>山茱萸-凹叶厚朴混交林(0.673)>7a 尖叶厚朴(-0.243)>7a 凹叶厚朴(-0.713)>杜仲-凹叶厚朴(-0.812)>11a 凹叶厚朴(-0.840)。因此随着林龄的增大,厚朴群落土壤肥力有下降的趋势。结合厚朴群落土壤养分差异分析和厚朴群落土壤肥力评价结果,得出山茱萸-凹叶厚朴混交林的土壤肥力相对较好,为该区植被恢复的最佳营造模式。

关键词:秦巴山区;厚朴群落;土壤养分;肥力综合指数

Soil fertility quality assessment of *Magnolia officinalis* communities in Qinba mountains

WANG Yuying¹, SUN Jiao¹, LIU Zhenghong², QIAO Yaling¹, ZHANG Xiaojiang¹, LI Fengjiao¹, HAO Wenfang^{1,*}

1 Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 Soil and Water Conservation and Ecological Environment Monitoring Center of Shaanxi Province, Xi'an 710004, China

Abstract: Soil fertility is a reflection of the basic properties and essential features of the soil, and fertile soils can provide indispensable nutrients for plant growth. Soil nutrients are one of the most important parameters for the evaluation of soil fertility. Spatial orientation and distribution of soil nutrients directly affect the level of soil fertility and ecological restoration. *Magnolia officinalis* is a traditional medicinal tree species in China, and it is often used as the preferred tree on Qin-Ba Mountain. In order to clarify the distribution of soil nutrients and soil fertility status of different *Magnolia officinalis* communities on Qin-Ba Mountain, five communities were analyzed: 2-year-old, 4-year-old, 7-year-old, and 11-year-old *Magnolia officinalis* and 7-year-old *Magnolia officinalis officinalis*. Two other plant communities were also selected: *Eucommia ulmoides*-*Magnolia officinalis* and *Macrocarpium officinale*-*Magnolia officinalis*. The soil nutrients of the seven communities were determined using one-way analysis of variance, and the soil integrated fertility index of the seven communities was evaluated using the improved analytic hierarchy process. The results showed that the soil nutrients of the seven communities in the same soil layers were significantly different ($p < 0.05$). In addition, the parameters in different soil layers also differed remarkably. Soil organic matter, total N, available N, available P, and available K in the seven communities decreased with soil depth in the profile distribution; however, total P and total K did not show any specific

基金项目:陕西省农业攻关项目(2013K01-06);中医药行业科研专项(201207002);中医药公共卫生专项(财社[2011]76号)

收稿日期:2015-02-02; **网络出版日期:**2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: haowenfang@nwsuaf.edu.cn

characteristics. A comprehensive evaluation showed that the soil integrated fertility index of 4-year-old *Magnolia officinalis* was the highest (1.054) among the seven communities, while that of 11-year-old *Magnolia officinalis* was the lowest (-0.840). With the growth of plantations, soil fertility of *Magnolia officinalis* communities has declined. Soil fertility of *Macrocarpium officinale*-*Magnolia officinalis* (0.673) was higher than that of 7-year-old *Magnolia officinalis*, whereas the soil fertility of *Eucommia ulmoides*-*Magnolia officinalis* (-0.812) was lower than that of 4-year-old *Magnolia officinalis*. Therefore, *Macrocarpium officinale*-*Magnolia officinalis* could improve soil fertility on Qin-Ba Mountain.

Key Words: Qin-Ba Mountain; *Magnolia officinalis*; soil nutrient; integrated fertility index

土壤肥力是土壤的基本属性和本质特征的反映,可为植物生长提供必需的营养物质^[1]。不同的植被恢复类型必然影响到土壤结构与养分组成,土壤肥力可以作为度量退化生态系统生态恢复功能的关键指标^[2]。影响土壤肥力的土壤因子很多,主要包括养分因素、化学因素和生物因素^[3-5]。其中土壤养分是土壤肥力的重要方面,土壤养分的空间分布特征直接影响着该地区土壤肥力的高低和生态恢复的途径和方向,其含量大小主要取决于土壤矿物质及有机质的数量和组成,包括土壤有机质、氮、磷、钾等指标^[6]。土壤肥力综合指数(integrated fertility index, IFI)可以全面反映土壤肥力的状况,其大小表示土壤肥力的等级^[7]。学者们把聚类分析、因子分析、主成分分析和模糊数学等方法应用于土壤肥力综合指数的计算^[4, 8-10]。其中主成分分析法(principle component analysis, PCA)是土壤肥力定量评价中应用较广泛的数理统计方法,能够客观的反映土壤肥力状况^[11-16]。

随着退耕还林还草等一系列西部大开发战略的实施,人工林在水土保持及生态环境建设中的作用日益突出。研究证明,随着植被的恢复,地表覆盖度增大,可有效地防止或减轻水蚀和风蚀的形成和程度,减少土壤养分的流失,因此对土壤养分有效的增源节流是人工林改善土壤特性、维持肥力的主要原因^[17]。学者对植被恢复后土壤养分及水盐动态研究表明,林龄不同、林分树种组成以及结构配置不同,人工林的土壤肥力差异显著^[18-19]。不同林龄马尾松土壤有机质、总氮、有效磷含量均表现出近熟林<中龄林<成熟林^[20]。山地黄壤上土壤肥力研究表明,自然林土壤肥力大于松林土壤肥力,大于西南桦林土壤肥力^[21]。湘南红壤丘陵区乔、灌、草等不同植被类型土壤养分差异显著,枫树和梓树提高土壤综合肥力的效果较好^[22]。人工林在防止土壤侵蚀和提高土壤肥力方面的研究主要集中在黄土丘陵区^[23-25]、三峡库区^[15]和东北过伐林区^[26]。目前对于秦巴山区土壤养分的研究较少,尤其对不同厚朴群落土壤肥力评价的研究尚未见报道。本研究拟以秦巴山区 2a、4a、7a、11a 厚朴纯林和杜仲-凹叶厚朴、山茱萸-凹叶厚朴混交林为研究对象,分析其土壤养分含量变化规律,利用主成分分析法对不同群落土壤肥力综合指标进行评价,筛选出最佳种植模式,为秦巴山区土壤肥力提高和树种选择提供支持。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西洋县,属于秦巴山区,地理坐标为 E107°11'—108°33', N33°02'—33°43', 最高海拔 3071m,最低海拔 389m,形成东高南低中平的地势,山地面积占全县总面积的 72.2%,成土母质主要为坡积母质,土壤类型为黄棕壤^[27]。属北亚热带内陆性季风气候,年平均气温 14.5℃;年平均日照 1752.2h,日照率 39%;年平均降水量 839.7mm,最多 1376.1mm,最少 533.2mm,年平均降雨 120d,月平均降雨 10d,9、10 月份的降雨最多^[28]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择

通过走访和实地调查,在洋县的金水镇选取 7 个厚朴群落(均未施肥)为研究对象,分别为:凹叶厚朴(*Magnolia officinalis*)纯林(2a,4a,7a,11a)、7a 尖叶厚朴、杜仲-凹叶厚朴混交林(*Eucommia ulmoides*-*Magnolia*

officinalis)、山茱萸-凹叶厚朴混交林(*Macrocarpium officinale* -*Magnolia officinalis*)。其中杜仲-凹叶厚朴混交林中 4a 杜仲与 4a 凹叶厚朴的株数比为 5:1,山茱萸-凹叶厚朴混交林中 13a 山茱萸与 7a 凹叶厚朴的株数比为 1:1。样地面积为 50m×50m。样地信息详见表 1。

表 1 样地概况
Table 1 The general situation of sample plots

群落类型 Community types	地理位置 Latitude and longitude	海拔/m Altitude	坡向 Aspect	坡度/(°) Slope	密度/(株/hm ²) Density	植被盖度/% Vegetation coverage
2a 凹叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> (2a)	N33°22.767' E107°55.871	1521	半阳坡	40	3 70	85
4a 凹叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> (4a)	N33°22.796' E107°55.96'	1518	阳坡	42	760	90
7a 凹叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> (7a)	N33°23.176' E107°55.53'	1527	半阳坡	45	330	95
11a 凹叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> (11a)	N33°22.878' E107°56.075	1522	半阳坡	48	240	95
7a 尖叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> . subsp. <i>Officinalis</i> (7a)	N33°23.152' E107°55.64'	1560	阳坡	40	500	85
杜仲-凹叶厚朴混交林 <i>Eucommia ulmoides</i> - <i>Magnolia officinalis</i>	N33°22.860' E107°56.06'	1513	半阳坡	35	310	45
山茱萸-凹叶厚朴混交 <i>Macrocarpium officinale</i> - <i>Magnolia officinalis</i>	N33°23.177' E107°55.53'	1570	阳坡	20	440	80

1.2.2 样品采集与分析

于 2013 年 7—8 月采集土样,按 S 形选取 5 个样点,取 0—60cm 深度,每 10cm 一层,同层混匀,风干、研磨、过筛(1.00mm 和 0.25mm)备用。土壤有机质采用重铬酸钾氧化—外加热法(油浴)测定^[29];全氮采用半微量凯氏法—流动分析仪测定^[29];全磷采用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法测定^[29];全钾采用氢氧化钠熔融—火焰光度法测定^[29];碱解氮采用碱解扩散法测定^[29];有效磷采用 0.5mol/L NaHCO₃法^[29];速效钾采用醋酸铵浸提—火焰光度法^[29]。

1.2.3 数据处理

数据处理采用 SPSS 20.0 和 Excel 2003 软件。通过单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Duncan 差异显著性检验各群落土壤养分含量差异,并采用主成分分析法对土壤肥力综合指数进行计算。

本研究以土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷及速效钾等作为土壤肥力评价的基本指标。由于这些评价指标量纲的不同,在数值上差异较大,研究前对各指标进行标准化处理。经主成分分析,得到主成分公因子方差、载荷矩阵和贡献率;主成分特征向量等于对应的载荷矩阵值除以该成分特征值的平方根^[30]。将主成分特征向量与标准化数据相乘得到各群落主成分因子得分。采用加权法计算土壤肥力综合指数,其表达式为^[31]:

$$IFI = \sum W_i \times F_i$$

式中, W_i 为各主成分贡献率, F_i 为各群落主成分因子得分。

2 结果分析

2.1 陕南秦巴山区厚朴群落土壤养分差异分析

厚朴群落土壤有机质含量随土层深度增加而显著减小;在同一土层,厚朴群落间土壤有机质含量差异显著($P<0.05$)。在 0—60cm 土层深度,4a 凹叶厚朴、2a 凹叶厚朴等低林龄群落土壤有机质含量高于 7a 凹叶厚朴、11a 凹叶厚朴土壤有机质含量,山茱萸-凹叶厚朴混交林的土壤有机质含量也相对较高,杜仲-凹叶厚朴混交林有机质含量最低。

表 2 秦巴山区厚朴群落间土壤有机质含量差异分析

Table 2 The soil organic matter of *Magnolia officinalis* communities in Qin-Ba mountain areas

指标 Index	土层深度/cm Soil depth/cm	2 年生 凹叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> (2a)	4 年生 凹叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> (4a)	7 年生 凹叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> (7a)	11 年生 凹叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> (11a)	7 年生 尖叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> , subsp. <i>Officinalis</i> (7a)	杜仲-凹 叶厚朴 <i>Eucommia ulmoides- Magnolia officinalis</i>	山茱萸- 凹叶厚朴 <i>Macrocarpium officinale- Magnolia officinalis</i>
土壤有机质	0—10	45.68a	42.91b	33.61d	39.05c	33.28e	35.77d	29.22f
Organic matter/ (g/kg)	10—20	37.57b	41.88a	30.09c	16.17f	24.01d	17.35e	30.08c
	20—30	30.99b	37.72a	24.21d	9.45f	28.08c	10.75e	26.66c
	30—40	26.68b	34.47a	15.97c	6.47d	18.05c	8.33d	25.58b
	40—50	25.70b	34.32a	10.56d	5.76e	15.98c	6.42e	24.58b
	50—60	26.44a	22.72b	8.12d	5.47e	15.04c	6.28e	15.50c

同一土层的群落间进行单因素方差分析,小写字母(a、b、c、d)不同代表差异显著($P<0.05$)

厚朴群落土壤全氮含量随土层深度增加而减小;同一土层厚朴群落间土壤全氮含量差异显著($P<0.05$)。在 0—60cm 土层,4a 凹叶厚朴的全氮含量最高,11a 凹叶厚朴和杜仲-厚朴混交林的土壤全氮含量最低。可以看出,与土壤有机质含量变化规律一致,4a 凹叶厚朴和 2a 凹叶厚朴等低林龄厚朴群落土壤全氮含量比 7a 凹叶厚朴和 11a 凹叶厚朴全氮含量要高;山茱萸-凹叶厚朴土壤全氮含量大于杜仲-凹叶厚朴全氮含量。

表 3 秦巴山区厚朴群落间土壤全氮含量差异分析

Table 3 The soil total N of *Magnolia officinalis* communities in Qin-Ba mountain areas

指标 Index	土层深度/cm Soil depth/cm	2 年生 凹叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> (2a)	4 年生 凹叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> (4a)	7 年生 凹叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> (7a)	11 年生 凹叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> (11a)	7 年生 尖叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> , subsp. <i>Officinalis</i> (7a)	杜仲-凹 叶厚朴 <i>Eucommia ulmoides- Magnolia officinalis</i>	山茱萸- 凹叶厚朴 <i>Macrocarpium officinale- Magnolia officinalis</i>
土壤全氮	0—10	3.23a	3.09a	2.64c	2.82b	1.96e	2.29d	1.95e
Total N/(g/kg)	10—20	2.96a	3.14a	2.04b	1.16e	1.85c	1.41d	1.78c
	20—30	2.02b	2.68a	1.97b	0.80e	1.92b	0.93d	1.52c
	30—40	1.76b	2.33a	1.69b	0.83d	1.57c	0.81d	1.78b
	40—50	2.28b	2.57a	1.13d	0.63e	1.35c	0.73e	1.33c
	50—60	1.60b	1.93a	1.21c	0.60d	1.21c	0.65d	1.17c

随土层深度增加,厚朴群落土壤全磷和全钾含量无明显变化规律;同一土层厚朴群落间土壤全磷和全钾含量差异显著($P<0.05$)。在 0—60cm 土层,7a 凹叶厚朴的土壤全磷含量最高(0.94 g/kg),2a 凹叶厚朴(0.63 g/kg)的全磷含量最低,杜仲-凹叶厚朴和山茱萸-凹叶厚朴土壤全磷平均含量相对较低。2a 凹叶厚朴、4a 凹叶厚朴、7a 凹叶厚朴、11a 凹叶厚朴、7a 尖叶厚朴、杜仲-厚朴混交林和山茱萸-厚朴混交林 0—60cm 土壤全钾含量平均值大小分别为:8.03、8.55、6.88、8.98、7.22、9.24、9.37g/kg。

随土层深度的增加,厚朴群落土壤速效养分含量逐渐降低;同一土层群落间土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量差异显著($P<0.05$)。在 0—60cm 土层深度,2a 凹叶厚朴(172.13 mg/kg)土壤碱解氮含量最高,是杜仲-凹叶厚朴碱解氮含量的 3 倍;杜仲-凹叶厚朴混交林(56.18 mg/kg)碱解氮含量最低。山茱萸-凹叶厚朴混交林(21.34 mg/kg)的土壤速效磷含量最高,杜仲-凹叶厚朴混交林(4.79 mg/kg)速效磷含量最低。4a 凹叶厚朴(161.81 mg/kg)土壤速效钾含量最高,杜仲-厚朴混交林(65.76 mg/kg)土壤速效钾含量最低。由此看出,2a、4a 凹叶厚朴和山茱萸-凹叶厚朴混交林的土壤速效养分含量相对较高,7a 尖叶厚朴次之,而 7a 凹叶厚朴和 11a 凹叶厚朴土壤速效养分相对较低。相对同林龄纯林,山茱萸-凹叶厚朴的土壤速效养分含量有所提高,但杜仲-凹叶厚朴速效养分含量远低于 4a 凹叶厚朴速效养分含量。

表 4 秦巴山区厚朴群落间土壤全磷和全钾含量差异分析

Table 4 The soil total P and total K of *Magnolia officinalis* communities in Qin-Ba mountain areas

指标 Index	土层深度/cm Soil depth/cm	2 年生 凹叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> (2a)	4 年生 凹叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> (4a)	7 年生 凹叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> (7a)	11 年生 凹叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> (11a)	7 年生 尖叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> subsp. <i>officinalis</i> (7a)	杜仲-凹 叶厚朴 <i>Eucommia ulmoides</i> - <i>Magnolia officinalis</i>	山茱萸- 凹叶厚朴 <i>Macrocarpium officinale</i> - <i>Magnolia officinalis</i>
土壤全磷 Total P/(g/kg)	0—10	0.65e	1.23b	1.53a	0.92c	0.87c	0.84d	0.66e
	10—20	0.74b	0.69bc	0.94a	0.67c	0.74b	0.70bc	0.65c
	20—30	0.76ab	0.72b	0.86a	0.77ab	0.63c	0.59d	0.62d
	30—40	0.54c	0.67b	0.78a	0.86a	0.62c	0.59c	0.60c
	40—50	0.55d	0.61c	0.71b	0.94a	0.53d	0.52d	0.68b
	50—60	0.53d	0.63c	0.83b	0.92a	0.69c	0.67c	0.67c
土壤全钾 Total K/(g/kg)	0—10	8.39bc	8.84ab	7.52c	9.52a	7.83c	9.11b	9.37b
	10—20	8.02c	8.34c	6.83d	8.60b	7.34d	8.91b	9.50a
	20—30	7.77c	8.52b	6.93e	8.75b	7.30d	9.38a	9.43a
	30—40	8.15b	8.44b	7.21c	8.66ab	7.16c	9.37a	8.59ab
	40—50	8.12c	8.50c	6.38e	9.42b	7.01d	9.22b	10.14a
	50—60	7.72c	8.63b	6.42e	8.93ab	6.69d	9.45a	9.17ab

表 5 秦巴山区厚朴群落间土壤速效养分含量差异分析

Table 5 The soil available nutrient index of *Magnolia officinalis* communities in Qin-Ba mountain areas

指标 Index	土层深度/cm Soil depth/cm	2 年生 凹叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> (2a)	4 年生 凹叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> (4a)	7 年生 凹叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> (7a)	11 年生 凹叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> (11a)	7 年生 尖叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> subsp. <i>officinalis</i> (7a)	杜仲-凹 叶厚朴 <i>Eucommia ulmoides</i> - <i>Magnolia officinalis</i>	山茱萸- 凹叶厚朴 <i>Macrocarpium officinale</i> - <i>Magnolia officinalis</i>
土壤碱解氮 Available N/(mg/kg)	0—10	223.49a	96.88d	92.80d	128.05c	133.33c	127.95c	174.92b
	10—20	184.34a	84.17e	56.00f	97.66d	118.69c	80.60e	147.62b
	20—30	189.28a	79.36c	48.52d	86.62c	116.30b	52.20d	109.42b
	30—40	167.03a	69.65c	35.61e	60.73d	108.45b	30.58e	60.19d
	40—50	143.66a	68.12c	24.96f	36.82e	104.62b	26.24f	55.91d
	50—60	125.00a	52.37c	24.65f	28.40e	96.80b	19.54f	43.22d
土壤速效磷 Available P/(mg/kg)	0—10	11.01c	9.91c	6.60d	16.11b	6.21d	6.33d	30.04a
	10—20	6.41c	6.80c	6.13c	18.13b	6.38c	4.27d	26.99a
	20—30	8.21c	8.91c	6.51d	17.52b	6.56d	4.69e	21.78a
	30—40	5.79d	8.70c	5.34d	10.49b	5.54d	4.28e	16.88a
	40—50	6.26b	6.29b	5.43c	6.35b	5.69c	4.33c	18.16a
	50—60	6.30b	6.94b	3.78d	7.14b	5.26c	4.88c	14.18a
土壤速效钾 Available K/(mg/kg)	0—10	156.12c	186.86b	262.84a	133.07f	115.99g	145.88e	151.00d
	10—20	67.33e	167.22b	180.03a	58.79f	89.53d	64.77e	133.07c
	20—30	69.89d	161.24a	123.68b	48.55f	88.67c	51.11e	90.38c
	30—40	68.18d	164.66a	94.65b	49.40f	57.08e	43.42g	83.55c
	40—50	80.14b	144.17a	49.40e	50.25e	69.89d	44.28f	75.01c
	50—60	64.77c	146.73a	39.16e	44.28d	63.92c	45.13d	75.01b

2.2 陕南秦巴山区厚朴群落土壤肥力评价

各指标的公因子方差较大,有机质的公因子方差最大,为 0.999,速效磷的公因子方差最小,为 0.769。按照特征值>1 的原则,抽取了 3 个主成分,其特征值分别为 2.864、2.087、1.325。这 3 个主成分的累计贡献率达 97.546%,即这 3 个主成分反映出原始数据提供的信息总量的 97.546%,根据累计贡献率达 85%的原则,故对前 3 种主成分作进一步分析。主成分的初始因子载荷矩阵是原始指标与各主成分的相关系数。第一主成分

的贡献率达 40.920%,为最重要的影响因子,与全氮、有机质显著相关,载荷系数较大。第二主成分的贡献率为 29.808%,该主成分在碱解氮上的负载较大。第三主成分的贡献率为 18.935%,主要受土壤速效磷的支配。

表 6 秦巴山区厚朴群落初始因子载荷矩阵及主成分的贡献率

Table 6 Component matrix and contribution rate of principal components in Qin-Ba mountain areas

指标 Index	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2	主成分 3 Principal component 3	公因子方差 Communality
土壤有机质 Organic matter	0.964	0.232	0.129	0.999
土壤全氮 Total N	0.990	-0.010	0.061	0.984
土壤全磷 Total P	-0.107	-0.875	0.237	0.833
土壤全钾 Total K	-0.386	0.610	0.555	0.828
土壤碱解氮 Available N	0.455	0.681	-0.469	0.890
土壤速效磷 Available P	-0.163	0.525	0.683	0.769
土壤速效钾 Available K	0.750	-0.396	0.505	0.974
特征值 Eigenvalues	2.864	2.087	1.325	
贡献率 Contribution rate/%	40.920	29.808	18.935	
累计贡献率 Accumulative contribution rate/%	40.920	70.727	97.546	

表 7 主成分特征向量

Table 7 Eigenvector matrix

指标 Index	主成分 1 PC ₁	主成分 2 PC ₂	主成分 3 PC ₃
土壤有机质 Organic matter	0.570	0.161	0.112
土壤全氮 Total N	0.585	-0.007	0.053
土壤全磷 Total P	-0.063	-0.606	0.206
土壤全钾 Total K	-0.228	0.422	0.482
土壤碱解氮 Available N	0.269	0.472	-0.407
土壤速效磷 Available P	-0.096	0.364	0.593
土壤速效钾 Available K	0.443	-0.274	0.439

经因子分析,各群落的主成分因子得分(F_i)和方差贡献率(W_i)加权得到土壤肥力综合指数函数^[30]。厚朴群落土壤肥力综合指数由大到小依次为:4a 凹叶厚朴(1.054)>2a 凹叶厚朴(0.882)>山茱萸-凹叶厚朴混交林(0.673)>7a 尖叶厚朴(-0.243)>7a 凹叶厚朴(-0.713)>杜仲-凹叶厚朴(-0.812)>11a 凹叶厚朴(-0.840)。可以看出,与土壤养分变化规律一致,4a 凹叶厚朴、2a 凹叶厚朴等幼林龄群落土壤肥力综合指数大于 7a 尖叶厚朴、7a 凹叶厚朴和 11a 凹叶厚朴等土壤肥力综合指数;山茱萸-凹叶厚朴混交林土壤肥力综合指数明显高于 7a 凹叶厚朴纯林土壤肥力综合指数,但杜仲-凹叶厚朴土壤肥力综合指数低于 4a 凹叶厚朴纯林土壤肥力综合指数。

表 8 不同群落主成分因子得分及土壤肥力综合指数

Table 8 Factor scores of principal components and integrated fertility index of different communities

群落类型 Community types	因子得分 Factor score			肥力综合指数 IFI
	因子 1 Factor ₁	因子 2 Factor ₂	因子 3 Factor ₃	
2a 凹叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> (2a)	1.695	1.463	-1.309	0.882
4a 凹叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> (4a)	2.426	-0.556	1.201	1.054
7a 凹叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> (7a)	0.187	-2.643	-0.011	-0.713
11a 凹叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> (11a)	-2.093	-0.208	0.411	-0.840
7a 尖叶厚朴 <i>Magnolia officinalis</i> . subsp. <i>Officinalis</i> (7a)	0.093	-0.0345	-1.432	-0.243
杜仲-凹叶厚朴混交林 <i>Eucommia ulmoides</i> - <i>Magnolia officinalis</i>	-1.976	0.2473	-0.412	-0.812
山茱萸-凹叶厚朴混交 <i>Macropodium officinale</i> - <i>Magnolia officinalis</i>	-0.333	1.7319	1.552	0.673

3 讨论

不同土层之间土壤性质的差异反映出土壤性质在垂直剖面上的空间变异程度^[32]。厚朴群落的土壤养分含量随土层深度的增加而减小,表现出表聚性特征,这主要取决于土壤腐殖质和凋落物的分解及有机物质不断的淀积、迁移、淋溶的过程^[26];同时,植物根系不断吸收土壤中的养分,向下迁移的养分变少,所以土壤养分集中在表层,向下逐渐减少^[33]。受土壤质地、土壤类型、母质风化程度等条件影响较大^[34],厚朴群落土壤全磷和全钾含量具有一定稳定性,随土层加深,其含量变化规律不明显。土壤养分是土壤肥力的综合反映,是评价土壤肥力的重要因子^[35]。研究表明,不同植被类型土壤养分含量不同,如对马尾松(*Pinus massoniana*)^[36]、木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)^[37]、银杏(*Ginkgo biloba*)^[38]等群落土壤养分的研究。受基质质量、凋落物产量、养分年归还量、养分周转率等因素影响,本研究中各厚朴群落土壤养分含量差异显著。

厚朴群落土壤肥力指数和土壤养分关系紧密且变化规律保持一致,即土壤养分高,土壤肥力综合指数大,土壤养分贫瘠,土壤肥力综合指数小。不同林龄群落土壤有机质、速效养分增加量不同,导致土壤肥力大小不同^[24, 39-40]。据笔者调查,4a 凹叶厚朴密度大(见表 1),土壤环境处于半封闭状态,具有较好的光照和水热条件,植物凋落物在微生物作用下分解,土壤有机质大量积累,且有机质被微生物矿化和腐殖质化速度慢^[39],土壤氮、磷、钾积累量多,土壤养分较好,土壤肥力综合指数最大。2a 凹叶厚朴郁闭度较低,个体间竞争平缓,加上人工抚育措施,土壤微生物活动表现活跃,促进了枯落物的分解,使得土壤有机质、氮、磷、钾等养分含量高,但其凋落物少于 4a 凹叶厚朴,土壤有机质、全氮、全磷和速效钾等含量稍低于 4a 凹叶厚朴,土壤肥力仅次之。研究表明,随着林木的生长,郁闭度增大,养分竞争激烈,高林龄落叶松(*Larix gmelinii*)土壤的肥力较低林龄土壤肥力要低^[26]。在本研究中 7—11a 凹叶厚朴较 2—4a 凹叶厚朴植被盖度大(见表 1),林下植被不断减少,枯落物数量明显减少,加之群落本身生长对养分的需求变大,土壤养分利用率升高,造成土壤养分“供”大于“还”,导致土壤肥力有所下降,建议通过保护林地枯枝落叶,适当增施有机肥等途径培肥土壤,提高土壤肥力水平。

研究表明,混交林能够有效的提高土壤肥力,改善土壤养分分布格局^[41-43]。如檀香(*Santalum album*)与降香黄檀(*Dalbergia odorifera*)混交后土壤养分含量和土壤细菌数量显著升高,能提高土壤的持水能力,改善土壤的结构,促进有机质的转化以及氮磷的循环^[33]。本研究中取得相似结果。山茱萸-凹叶厚朴混交林土壤养分含量较 7a 凹叶厚朴纯林养分含量显著升高,土壤肥力明显提高。在山茱萸-凹叶厚朴混交林中,山茱萸根系发达,能疏松土壤,加快腐殖质分解,为混交林提供大量有机质,达到保肥蓄水的作用^[44];加之山茱萸-凹叶厚朴混交林坡度小,密度为 440 株/hm²,较 7a 凹叶厚朴纯林密度(330 株/hm²)大,山茱萸和凹叶厚朴形成垂直分布格局,能够充分利用空间、光照和营养,有利于土壤肥力的改善,可作为退耕还林实践中的优选配置模式。但是杜仲-凹叶厚朴混交林土壤肥力一般,这是由于杜仲-凹叶厚朴混交林盖度为 45%,林地凋落物少,通过凋落物分解向土壤返还养分不足,供给的功能较低,土壤肥力明显低于 4a 凹叶厚朴纯林土壤肥力,由此看出土壤肥力大小与植被盖度密切相关。

4 结论

秦巴山区厚朴群落间土壤养分含量差异显著;随土层深度的增加,土壤养分含量逐渐减小,全磷和全钾的变化规律不明显。厚朴群落土壤肥力指数从大到小顺序为:4a 凹叶厚朴(1.054)>2a 凹叶厚朴(0.882)>山茱萸-凹叶厚朴混交林(0.673)>7a 尖叶厚朴(-0.243)>7a 凹叶厚朴(-0.713)>杜仲-凹叶厚朴(-0.812)>11a 凹叶厚朴(-0.840)。2—4a 凹叶厚朴土壤肥力较 7—11a 凹叶厚朴土壤肥力好,山茱萸-凹叶厚朴混交林的土壤肥力较 7a 凹叶厚朴纯林土壤肥力好。因此,在秦巴山区厚朴种植区,应对 7—11a 凹叶厚朴纯林增施肥,以补充生长造成的养分亏缺;可营造较多的山茱萸-凹叶厚朴混交林,发挥更好的培肥保水的作用。目前对于厚朴土壤肥力评价方面的研究尚属空白,还未建立完善的土壤肥力评价指标体系,本文中选取的厚朴群落土壤肥

力评价指标能否应用于其它群落,还需进一步实践和验证。

参考文献(References):

- [1] Gilliam F S, Dick D A. Spatial heterogeneity of soil nutrients and plant species in herb-dominated communities of contrasting land use. *Plant Ecology*, 2010, 209(1): 83-94.
- [2] 龚霞, 牛德奎, 赵晓蕊, 鲁顺保, 刘苑秋, 魏晓华, 郭晓敏. 植被恢复对亚热带退化红壤区土壤化学性质与微生物群落的影响. *应用生态学报*, 2013, 24(4): 1094-1100.
- [3] 刘世梁, 傅伯杰, 刘国华, 马克明. 我国土壤质量及其评价研究的进展. *土壤通报*, 2006, (1): 137-143.
- [4] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 朱永官. 土壤质量与土壤质量指标及其评价. *生态学报*, 2006, 26(3): 901-913.
- [5] Brady N C, Weil R R. *Elements of the nature and properties of soil*. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2009.
- [6] Bai L Y, Chen Z Q, Chen Z B. Soil fertility self-development under ecological restoration in the Zhuxi Watershed in the Red Soil Hilly Region of China. *Journal of Mountain Science*, 2014, (5): 1231-1241.
- [7] Wang Y J, Zhou J H, Lu X L, Chen L J, Wang C, Yang J M. Evaluation of soil fertility suitability of Yiliang Tobacco-growing Areas in Yunnan Province. *Agricultural Science & Technology*, 2014, 15(12): 2150-2155.
- [8] Doran J W, Parkin T B. *Defining and Assessing Soil Quality*. SSSA Special Publication, 1994, 35: 3-3.
- [9] 王建国, 单艳红. 模糊数学在土壤质量评价中的应用研究. *土壤学报*, 2001, 38(2): 176-183.
- [10] 张华, 张甘霖. 土壤质量指标和评价方法. *土壤*, 2001, 33(6): 298-302, 333-333.
- [11] 孙波, 张桃林, 赵其国. 我国东南丘陵山区土壤肥力的综合评价. *土壤学报*, 1995, 32(4): 362-369.
- [12] Mukhopadhyay S, Maiti S K, Mastro R E. Development of mine soil quality index (MSQI) for evaluation of reclamation success: A chronosequence study. *Ecological Engineering*, 2014, 71(10): 10-20.
- [13] Rosa D de la. Soil quality evaluation and monitoring based on land evaluation. *Land Degradation & Development*, 2005, 16(6): 551-559.
- [14] 黄婷, 岳西杰, 葛玺祖, 王旭东. 基于主成分分析的黄土沟壑区土壤肥力质量评价——以长武县耕地土壤为例. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(3): 141-147, 187.
- [15] 廖晓勇, 陈治谏, 刘邵权, 王海明. 三峡库区小流域土地利用方式对土壤肥力的影响. *生态环境*, 2005, 14(1): 99-101.
- [16] Wang J, Fu B, Qiu Y, Chen L. Soil nutrients in relation to land use and landscape position in the semi-arid small catchment on the loess plateau in China. *Journal of Arid Environments*, 2001, 48(4): 537-550.
- [17] 薛蕊, 刘国彬, 戴全厚, 卫伟, 侯喜禄. 侵蚀环境生态恢复过程中人工刺槐林(*Robinia pseudoacacia*)土壤微生物量演变特征. *生态学报*, 2007, 27(3): 909-917.
- [18] 李静鹏, 徐明锋, 苏志尧, 孙余丹, 胡砚秋. 不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价. *生态学报*, 2014, 34(9): 2297-2307.
- [19] 刘艳, 宋同清, 蔡德所, 曾馥平, 彭晚霞, 杜虎. 喀斯特峰丛洼地不同土地利用方式土壤肥力特征. *应用生态学报*, 2014, 25(6): 1561-1568.
- [20] 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 黄志霖, 付甜, 封晓辉. 不同林龄马尾松凋落物基质质量与土壤养分的关系. *生态学报*, 2012, 32(3): 852-862.
- [21] 刘永贤, 熊柳梅, 韦彩会, 谭宏伟, 杨尚东, 农梦玲, 曾艳, 黄国勤, 赵其国. 广西典型土壤上不同林分的土壤肥力分析与综合评价. *生态学报*, 2014, 34(18): 5229-5233.
- [22] 张璐, 文石林, 蔡泽江, 黄平娜. 湘南红壤丘陵区不同植被类型下土壤肥力特征. *生态学报*, 2014, 34(14): 3996-4005.
- [23] 董莉丽, 郑粉莉. 黄土丘陵沟壑区植被类型对土壤质量的影响. *干旱区研究*, 2011, 28(4): 616-621.
- [24] 巩杰, 陈利顶, 傅伯杰, 李延梅, 黄志霖, 黄奕龙, 彭鸿嘉. 黄土丘陵区小流域土地利用和植被恢复对土壤质量的影响. *应用生态学报*, 2004, (12): 2292-2296.
- [25] 张俊华, 常庆瑞, 贾科利, 陈涛, 岳庆玲, 李云驹. 黄土高原植被恢复对土壤肥力质量的影响研究. *水土保持学报*, 2003, (4): 38-41.
- [26] 杨晓娟, 王海燕, 刘玲, 李旭, 任丽娜. 东北过伐林区不同林分类型土壤肥力质量评价研究. *生态环境学报*, 2012, 21(9): 1553-1560.
- [27] 郭兆元, 黄自立, 冯立孝. *陕西土壤*. 北京: 科学出版社, 1992.
- [28] 李智, 张福盈. *洋县志*. 西安: 三秦出版社, 1996.
- [29] 鲍士旦. *土壤农化分析*. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [30] 张子龙, 王文全, 缪作清, 李世东, 杨建忠. 主成分分析在三七连作土壤质量综合评价中的应用. *生态学杂志*, 2013, 32(6): 1636-1644.
- [31] Jin Z Z, Lei J Q, Xu X W, Li S Y, Zhao S F, Qiu Y Z, Xu B. Evaluation of soil fertility of the shelter-forest land along the Tarim Desert Highway. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(S2): 125-136.
- [32] Guo X, Fu B, Ma K, Chen L. Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics combined with GIS—a case study in Zunghua City of Hebei

- Province. The Journal of Applied Ecology, 2000, 11(4): 557-563.
- [33] 黄馨, 刘君昂, 周国英, 吴毅, 徐睿, 陈彧. 降香黄檀不同混交模式土壤肥力的比较研究. 土壤通报, 2014, (5): 1130-1136.
- [34] 黄巧云. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [35] 罗歆, 代数, 何丙辉, 刘秀华, 唐寅. 缙云山不同植被类型林下土壤养分含量及物理性质研究. 水土保持学报, 2011, 25(1): 64-69, 91-91.
- [36] 马雪华, 杨光滢. 杉木, 马尾松人工林土壤物理性质及水分含量变化的研究. 林业科学研究, 1990, 3(1): 63-69.
- [37] 徐馨, 王法明, 邹碧, 李钦禄, 王刚, 李应文, 凌清云, 李志安. 不同林龄木麻黄人工林生物多样性与土壤养分状况研究. 生态环境学报, 2013, 22(9): 1514-1522.
- [38] 汪贵斌, 曹福亮, 程鹏, 陈雷, 刘婧, 李群. 不同银杏复合经营模式土壤肥力综合评价. 林业科学, 2010, 46(8): 1-7.
- [39] 常超, 谢宗强, 熊高明, 赵常明, 申国珍, 赖江山, 徐新武. 三峡库区不同植被类型土壤养分特征. 生态学报, 2009, 29(11): 5978-5985.
- [40] Gaston L, Locke M, Zablotowicz R, Reddy K. Spatial variability of soil properties and weed populations in the Mississippi Delta. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(2): 449-459.
- [41] 谢友森, 周东雄. 杉木厚朴混交林生态经济功能研究. 福建林业科技, 1996, 23(3): 7-11.
- [42] 王清奎, 汪思龙. 杉木纯林、混交林土壤微生物特性和土壤养分的比较研究(英文). Journal of Forestry Research, 2008, 19(2): 131-135.
- [43] 黄金桃, 叶功富, 田有圳, 林照授, 涂育合. 凹叶厚朴材药两用林混交造林效果研究. 西北林学院学报, 2003, 18(2): 44-46.
- [44] 宋婕, 梁亮, 闫亚平, 王喆之, 田先华, 张利云, 刘小峰. 陕西佛坪山茱萸规范化种植基地适宜性研究. 现代中药研究与实践, 2004, 18(5): 9-13.