

doi: 10.11929/j.issn.2095-1914.2016.02.003

不同林龄华北落叶松人工林地土壤肥力评价

王玲玲¹ 徐福利² 王渭玲¹ 赵海燕³ 孙鹏跃¹ 白小芳²

(1. 西北农林科技大学生命科学学院 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所 陕西 杨凌 712100;
3. 西北农林科技大学资源环境学院 陕西 杨凌 712100)

摘要: 运用主成分分析与 Norm 值、隶属度函数结合的方法,分析评价秦岭地区不同林龄(5、10 和 20 年生)华北落叶松人工林土壤肥力的大小。结果表明:土壤有机碳、全氮、硝态氮、铵态氮、速效磷、速效钾、酸性磷酸酶、脲酶、蔗糖酶组成了土壤质量评价的最小数据集;速效磷隶属度数值最小,为 0.14,铵态氮、脲酶次之,为 0.26,速效钾与蔗糖酶的隶属度数值最大,分别为 0.75、0.74;不同林龄土壤综合质量指数数值为 0.43~0.57,随着林龄的增加,土壤肥力呈现降低的趋势,即 5a>10a>20a;华北落叶松人工林样地磷元素的消耗速率>氮元素,消耗速率分别为 9.94%、1.11%,磷在华北落叶松生长中的限制作用会日益凸显。

关键词: 华北落叶松;人工林;土壤肥力评价;主成分分析;隶属度函数

中图分类号: S714.8

文献标志码: A

文章编号: 2095-1914(2016)02-0017-08

Assessment of Soil Fertility in Different Aged *Larix principis-rupprechtii* Plantation

Wang Lingling¹, Xu Fuli², Wang Weiling¹, Zhao Haiyan³, Sun Pengyue¹, Bai Xiaofang²

(1. College of Life Sciences, Northwest Agriculture and Forest University, Yangling Shaanxi 712100, China;
2. Institute of Soil and Water Conservation of Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling Shaanxi 712100, China;
3. College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forest University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The level of soil fertility of different aged(5-, 10-, and 20-year-old) *Larix principis-rupprechtii* plantation was assessed by using the method of principal component analysis, Norm value and membership function of fuzzy mathematic. The study found that the minimum data set of soil assessment comprises organic carbon, total nitrogen, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, available phosphorus, available potassium, acid phosphatase, urease and invertase. The value of available phosphorus was the smallest, the number was 0.14, and the ammonium nitrogen and urease took the second place, the number was 0.26. On the contrary, the membership value of available potassium and sucrose were maximal, reach to 0.75 and 0.74, respectively; In different aged *Larix principis-rupprechtii* plantation, the value of soil comprehensive quality index fall in between 0.43 and 0.57. Soil fertility showed a declining trend with age, the sequence is 5a>10a>20a; The consumption rate of phosphorus was more quickly than that of nitrogen, the rate was 9.94% and 1.11% respectively, so the restriction of phosphorus on the growth of *Larix principis-rupprechtii* will increasingly prominent.

Key words: *Larix principis-rupprechtii*; plantation; soil fertility assessment; principal component analysis (PCA); membership function

收稿日期: 2015-11-25

基金项目: “十二五”国家重点基础研究发展计划项目(2012CB416902)资助。

第1作者: 王玲玲(1990—)女,硕士生。研究方向: 植物生理生态。Email: 15236193760@163.com。

通信作者: 王渭玲(1962—)女,教授,博士生导师。研究方向: 植物生理生态。Email: ylwwl@nwsuaf.edu.cn。

森林土壤是森林生态系统中维持林木健康生长的基质,其肥力质量影响着林木的健康状态^[1]。然而,目前中国大部分地区人工林地土壤均出现不同程度的肥力退化现象^[2-4],因此,科学、合理、实用地评价土壤肥力可以更好地利用土地资源,为科学施肥、植物布局调整以及土地开发等提供理论依据。影响土壤肥力高低的土壤属性指标有很多,其中使用频率最高且具有稳定性的土壤肥力因子包括有机碳、全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾、pH、CEC等^[5]。除此之外,土壤过氧化氢酶、磷酸酶、蔗糖酶等作为物质与土壤营养转换的媒介也受到广泛关注^[6]。土壤酶活性不仅能反映土壤生物活跃程度的高低、表征土壤养分转化的快慢,并且在一定程度上能反映土壤的肥力状况。因此,将土壤营养指标与土壤酶活性结合起来综合评价土壤肥力状况具有一定的合理性与必要性。目前,国内外关于土壤质量的评价方法有很多种,主要包括 Fuzzy 综合评判法^[7-8]、指数和法^[9-10]、灰色关联分析法^[11]、主成分分析法^[12]、投影寻踪模型法^[13]等。其中,主成分分析法是比较成熟的方法^[14-15],其在土壤质量定量评价中的广泛应用为科学合理地评价不同地区土壤肥力提供了帮助。

华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)为松科落叶松属植物,是我国东北、华北以及内蒙古林区、西南地区高山针叶林的主要组成树种。许多研究表明,由于华北落叶松造林密度单一,林下植被稀

疏,生物多样性匮乏等原因,林下土壤衰退严重^[2,16]。目前,关于华北落叶松林下土壤肥力衰退的研究多数局限于某些指标数值的下降^[17-18],而系统地研究秦岭地区不同林龄(幼龄到中龄)华北落叶松人工纯林土壤肥力的变化特征及土壤肥力限制原因尚未见详细的报道。本研究采用主成分分析法与隶属度函数相结合对土壤肥力进行综合评价,旨在了解秦岭不同林龄华北落叶松林下土壤肥力的变化,找出制约华北落叶松正常生长的限制性因子,为华北落叶松林地科学施肥及减缓林地土壤肥力退化提供参考依据。

1 研究方法

1.1 调查样地概况

调查样地位于陕西省秦岭北麓的太白县太白林业局南滩实验苗圃林场,地处东经 107°03'00" ~ 107°46'40" 北纬 33°38'13" ~ 34°09'55",年极端最高气温 32.8℃,最低气温 -25.0℃,年均气温 7.6℃,年均降水量 600 ~ 1 000 mm,年均无霜期约 158 d,林木生长期约 166 d,属秦岭谷地小气候带。林下土壤为山地棕壤,土层厚度 < 65 cm。林下草本植物有大油芒(*Spodiopogon sibiricus*)、披针薹草(*Carex lancifolia*)、铁杆蒿(*Artemisi asacrorum*)和黄精(*Polygonatum sibiricum*)等。2012年选取立地条件基本一致的 5、10、20 a 的华北落叶松人工林地,每个林龄设置 20 m × 20 m 的标准地 3 块,样地基本特征见表 1。

表 1 样地基本特征

Tab. 1 General characteristic of the sampling plots

林龄/a	林分类型	林分密度/(株·hm ⁻²)	坡向	坡位	坡度/(°)	海拔/m	平均树高/m	平均胸径/cm
5	幼龄林	3 050	东北	坡中	20 ~ 25	1 680 ~ 1 700	4.8	14.46
10	中幼林	2 780	东北	坡中	20 ~ 25	1 650 ~ 1 690	8.6	22.32
20	中龄林	2 500	西北	坡下	10 ~ 15	1 620 ~ 1 700	10.2	36.40

1.2 样品采集与处理

2012—2014年每年7月中旬对各标准样地进行土壤样品采集。取土用土钻法,在每个标准地沿“S”型采集5个点的0~20 cm新鲜土壤,挑去活体根系,装袋带回实验室风干。土壤风干后研磨过60目与18目筛装袋备用。

1.3 土样测定方法

1) 土壤养分测定方法:土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定;全氮采用半微量开氏法测定;全磷采用 HClO₄-H₂SO₄ 消煮,钼锑抗比色法测定;硝

态氮、铵态氮用 AA₃ 型连续流动分析仪测定;速效磷采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提,钼锑抗比色法测定;速效钾采用 1 mol/L 醋酸铵浸提,火焰光度计法测定;pH 用 1 mol/L KCl 浸提,DELTA-320pH 测量计测定^[19]。

2) 土壤酶活性测定方法:过氧化氢酶采用容量法,活性以 1 g 土消耗 0.1 mol/L KMnO₄ 的毫升数表示 (mL/(g·20 min));脲酶采用比色法,活性用 24 h 内 1 g 土壤铵态氮毫克数表示 (mg/(g·24h));蔗糖酶采用比色法,活性用 24 h 内 1 g 土壤葡萄糖毫克数表示

($\text{mg}/(\text{g} \cdot 24\text{h})$) ;酸性磷酸酶采用比色法,活性用 2 h 后 1 g 土壤五氧化二磷毫克数表示($\text{mg}/(\text{g} \cdot 2\text{h})$)^[20]。

1.4 数据分析方法

数据经 Excel 2013 整理后,利用 SPSS17.0 软件进行平均值、标准差、变异系数以及主成分分析,各指标雷达图利用 Excel 2013 绘制。

2 评价指标集合的建立与指标权重确定

2.1 土壤理化性质、酶活性统计特征

研究区土壤有机碳平均含量为 14.43 g/kg,全

氮含量为 0.95 g/kg,全磷含量为 0.49 g/kg。有机质含量水平处于中等肥力状况,全氮、全磷含量整体水平较低,小于全国平均含量标准^[21](表 2);速效磷、硝态氮、铵态氮、速效钾含量分别为 3.06、25.48、5.69、121.11 mg/kg;pH 均值为 6.35,土壤呈酸性;过氧化氢酶活性为 2.81 mL/(g · 20 min)、酸性磷酸酶含量为 0.25 mg/(g · 2 h)、脲酶含量为 0.33 mg/(g · 24 h)、蔗糖酶含量为 51.55 mg/(g · 24 h)。由变异系数可知,除 pH 外,土壤各指标整体变异较大。

表 2 土壤指标统计特征值

Tab.2 Statistical eigenvalues of soil indices

统计变量	有机碳 全氮 全磷			速效磷 硝态氮 铵态氮			速效钾			过氧化氢酶/	酸性磷酸酶/	脲酶	蔗糖酶
	(g · kg ⁻¹)			(mg · kg ⁻¹)			pH			(mL · g ⁻¹ · 20 min ⁻¹)	(mg · g ⁻¹ · 2 h ⁻¹)	(mg · g ⁻¹ · 24 h ⁻¹)	
极小值	10.15	0.75	0.40	1.84	0.30	2.29	83.00	5.93	1.10	0.12	0.14	19.82	
极大值	23.46	1.21	0.60	5.90	49.88	7.53	153.84	6.75	4.88	0.37	0.46	70.93	
均值	14.43	0.95	0.49	3.06	25.48	5.69	121.11	6.35	2.81	0.25	0.33	51.55	
标准差	4.40	0.12	0.06	1.32	19.19	1.58	23.17	0.25	1.68	0.08	0.10	15.48	
变异系数/%	30.47	13.02	11.22	43.19	75.32	27.86	19.13	3.97	59.93	32.55	30.00	30.03	

2.2 土壤肥力评价指标最小数据集建立

进行土壤质量评价必须从大量土壤理化指标中选出对土壤质量敏感的评价参数组成评价指标的最小数据集(MDS)。目前已知的方法中,主成分分析(PCA)法的应用最为广泛。主成分分析可以将多个指标化为少数几个,实现降维变换,并且还可以很好地处理变量间的多重相关性,使相互之间具有独立性^[22]。但是,其在进行数据分析时也存在着一一定的缺点,即减少参数因子的同时也会引起这些因子包含的土壤质量信息在一定程度上的缺失。为避免此缺陷可通过计算变量的 Norm 值^[23]来弥补。Norm 值的几何意义为该变量在由主成分组成的多维空间中的矢量常模的长度,长度越长,表明该变量对全部主成分的综合载荷越大,其解释综合信息的能力就越强。Norm 值的计算如下:

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_{j=1}^k (U_{ij}^2 \cdot \lambda_k)} \quad (1)$$

式中: N_{ik} 是第 i 个变量在特征值 ≥ 1 的前 k 个主成分上的综合载荷; U_{ik} 是第 i 个变量在第 k 个主成分上的载荷; λ_k 是第 k 个主成分的特征值。

运用 PCA 法对所测定的 12 项土壤属性指标(硝态氮、pH、酸性磷酸酶、全磷、速效钾、蔗糖酶、有

机碳、过氧化氢酶、脲酶、速效磷、全氮、铵态氮分别用 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_7 、 X_8 、 X_9 、 X_{10} 、 X_{11} 、 X_{12} 表示)进行主成分分析,结果表明(表 3):特征值 ≥ 1 的主成分有 4 个,前 4 个主成分累计贡献率为 87.38% ,>85.00% ,能够解释较多的变异性。同时依据土壤属性的分组原则进行分组^[22],将特征值 ≥ 1 和同一主成分因子载荷 ≥ 0.5 归为一组。分组后入选 MDS 的原则是:每组中每个参数的 Norm 值须在最高 Norm 值 10% 范围内,同时参评指标选取还应符合 MDS 中易测定性、重现性、主导性、稳定性、精确性、实用性等原则;最后分析每组中所选参数间的相关性,若高度相关($r > 0.5$),则选取总分值较高的参数进入最终的 MDS,若相关性很低,则全部进入最终的 MDS^[23]。由表 3 可知,硝态氮、pH、酸性磷酸酶、全磷、速效钾、蔗糖酶同属于第一主成分,但是,硝态氮与 pH、酸性磷酸酶、全磷有很高的相关性(表 4),同时 pH 的 Norm 值在 4 者中最大为 2.072,其 Norm 值 10% 范围为 1.864 8,也就是说 Norm 值 < 1.864 8 的指标将会被剔除,全磷 Norm 值为 1.754 因此,可将其剔除。故最终进入第 1 组 MDS 的参数指标包括硝态氮、pH、酸性磷酸酶、速效钾、蔗糖酶;第 2 组中,有机碳与过氧化氢酶具有很高的相关性(0.786),且有机碳的 Norm 值 > 过氧化

氢酶,则过氧化氢酶将被剔除;脲酶的 Norm 值虽不在最高 Norm 值的 10% 范围(大于 1.714)内,但是脲酶与有机碳的相关性很低,故脲酶也将选入第 2 组评价指标,所以第 2 组的指标参数为有机碳、脲酶;第 3 组速效磷与全氮相关性很低,二者同时作为评价指标进入 MDS;铵态氮进入第 4 组。此外,定

量评价土壤质量宜选择中度、高度敏感的指标,变异系数 < 10% 为不敏感界限^[24],由于 pH 的变异系数为 3.97%, < 10%, 故 pH 也应当被剔除。综上所述,本实验选取的 12 项土壤肥力评价指标最终进入 MDS 的为:硝态氮、酸性磷酸酶、速效钾、蔗糖酶、有机碳、脲酶、速效磷、全氮、铵态氮。

表 3 土壤属性因子载荷矩阵、公因子方差和 Norm 值

Tab. 3 Soil properties of factor pattern, common factor variance, and Norm values

土壤属性	分组	主成分				公因子方差	Norm 值
		PC-1	PC-2	PC-3	PC-4		
硝态氮(X_1)	1	0.827	0.481	-0.196	-0.097	0.963	2.033
pH(X_2)	1	0.899	-0.245	-0.225	-0.104	0.931	2.072
酸性磷酸酶(X_3)	1	0.908	0.161	-0.025	-0.273	0.925	2.061
全磷(X_4)	1	0.724	-0.186	-0.392	-0.373	0.789	1.754
速效钾(X_5)	1	0.565	-0.528	0.376	-0.322	0.836	1.865
蔗糖酶(X_6)	1	0.793	-0.429	0.288	0.144	0.917	1.948
有机碳(X_7)	2	0.234	0.945	0.076	-0.051	0.957	1.905
过氧化氢酶(X_8)	2	0.659	0.629	-0.078	0.220	0.967	1.709
脲酶(X_9)	2	0.563	-0.579	0.304	0.336	0.858	1.680
速效磷(X_{10})	3	0.382	0.596	0.606	0.298	0.957	1.545
全氮(X_{11})	3	0.179	-0.114	-0.671	0.543	0.789	1.084
铵态氮(X_{12})	4	0.422	-0.253	-0.033	0.539	0.534	1.157
主成分特征值		4.949	2.955	1.385	1.197		
主成分贡献率/%		41.242	24.628	11.539	9.972		
主成分累计贡献率/%		41.242	65.870	77.409	87.381		

表 4 参评指标的 Person 相关系数矩阵

Tab. 4 Pearson's correlation coefficient of the indices involved in soil quality assessment

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
X_1	1											
X_2	0.683**	1										
X_3	0.876**	0.824**	1									
X_4	0.589**	0.781**	0.678**	1								
X_5	0.135	0.575**	0.478*	0.465	1							
X_6	0.388	0.711**	0.589*	0.459	0.722**	1						
X_7	0.625**	-0.068	0.353	0.002	-0.295	-0.175	1					
X_8	0.868**	0.415	0.629**	0.294	-0.074	0.249	0.786**	1				
X_9	0.116	0.504*	0.313	0.275	0.554*	0.907**	-0.366	0.004	1			
X_{10}	0.424	0.037	0.327	-0.147	0.064	0.239	0.693**	0.669**	0.129	1		
X_{11}	0.144	0.247	-0.006	0.164	-0.145	0.150	-0.072	0.208	0.200	0.221	1	
X_{12}	0.180	0.439	0.223	0.245	0.158	0.341	-0.270	0.223	0.369	0.166	0.161	1

注: * 表示显著相关; ** 表示极显著相关。

2.3 土壤质量评价指标权重确定

权重是指某个指标在整体评价中的相对重要

程度,其系数的确定是评价结果是否准确的关键。基于土壤属性自身内在的关系,用表 3 初始因子载

荷矩阵中的数据除以相应主成分相对应的特征根开平方根便得到4个主成分中每个指标所对应的系数。得到的4个主成分如下:

$$\begin{aligned}
 F_1 &= 0.372 X_1 + 0.404 X_2 + 0.408 X_3 + 0.325 X_4 + \\
 & 0.254 X_5 + 0.356 X_6 + 0.105 X_7 + 0.296 X_8 + \\
 & 0.253 X_9 + 0.172 X_{10} + 0.080 X_{11} + 0.190 X_{12} \\
 F_2 &= 0.280 X_1 - 0.143 X_2 + 0.094 X_3 - 0.108 X_4 - \\
 & 0.307 X_5 - 0.250 X_6 + 0.549 X_7 + 0.366 X_8 - \\
 & 0.337 X_9 + 0.347 X_{10} - 0.066 X_{11} - 0.147 X_{12} \\
 F_3 &= -0.167 X_1 - 0.191 X_2 - 0.021 X_3 - 0.333 X_4 + \\
 & 0.319 X_5 + 0.245 X_6 + 0.006 X_7 - 0.066 X_8 + \\
 & 0.258 X_9 + 0.515 X_{10} - 0.570 X_{11} - 0.028 X_{12} \\
 F_4 &= -0.089 X_1 - 0.095 X_2 - 0.250 X_3 - 0.341 X_4 - \\
 & 0.294 X_5 + 0.132 X_6 - 0.047 X_7 + 0.201 X_8 + \\
 & 0.307 X_9 + 0.272 X_{10} + 0.496 X_{11} + 0.493 X_{12}
 \end{aligned}$$

用第一主成分 F_1 中每个指标所对应的系数乘以第一主成分 F_1 所对应的贡献率,再除以4个主成分的贡献率之和,加上第二主成分 F_2 中每个指标所对应的系数,乘以第二主成分 F_2 所对应的贡献率,再除以提取的4个主成分的贡献率之和,加上第三主成分 F_3 中每个指标所对应的系数,乘以第三主成分 F_3 所对应的贡献率,再除以提取的4个主成分的贡献率之和,最后加上第四主成分 F_4 中每个指标所对应的系数,乘上第四主成分 F_4 所对应的贡献率,再除以所提取4个主成分的贡献率之和,即可得到综合得分模型:

$$\begin{aligned}
 Y &= 0.222 X_1 + 0.114 X_2 + 0.188 X_3 + 0.040 X_4 + \\
 & 0.042 X_5 + 0.145 X_6 + 0.120 X_7 + 0.257 X_8 + \\
 & 0.384 X_9 + 0.278 X_{10} + 0.0005 X_{11} + 0.101 X_{12}
 \end{aligned}$$

上式每个指标对应的系数即每个指标的权重。

3 土壤因子隶属度与土壤肥力综合评价

3.1 土壤因子的隶属度分析

进行土壤肥力评价首先要对各评价指标的优劣进行分析。土壤属性指标具有时间与空间的变异性,对土壤质量的影响也处于动态变化之中,故引入隶属度函数对各指标进行模糊性评价。隶属度函数是评价指标与作物生长效应曲线之间关系的数学表达式,其隶属度值表明各指标在土壤中的状态,通过隶属度值的大小来体现各评价指标的优劣以及对土壤功能影响的贡献率,同时实现评价指标量纲归一化,使各评价指标之间具有可比性。常见隶属度函数有2种类型,即S型和抛物线型^[25]。

属于S型函数的土壤肥力指标有土壤有机质、全氮、全磷、有效磷、速效钾以及各微量元素养分等。相应的函数表达式为:

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & x < x_1 \\ 0.9(x-x_1)/(x_2-x_1) + 0.1 & x_1 \leq x < x_2 \\ 1.0 & x \geq x_2 \end{cases} \quad (2)$$

属于抛物线型函数的土壤肥力指标有土壤pH等。相应的函数表达式为:

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & x < x_1 \text{ 或 } x \geq x_4 \\ 0.9(x-x_1)/(x_2-x_1) + 0.1 & x_1 \leq x < x_2 \\ 1.0 & x_2 < x < x_3 \\ 1.0 - 0.9(x-x_3)/(x_4-x_3) & x_3 < x \leq x_4 \end{cases} \quad (3)$$

式中: x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 为土壤质量评价指标在曲线中的转折点。

依据研究区土壤理化特点参考相关研究^[26-30],曲线中转折点的相应取值见表5。

由各指标转折点取值代入公式(2),计算各指标的隶属度数值,各数值大小在雷达图中表示(图1)。雷达图常用于多项指标的全面分析,具有完整、清晰和直观的优点,雷达图坐标轴上各个点的值可以反映各指标的状态,距原点越近,代表其属性状态越差,相反距坐标原点越远,代表其属性状态越好。此外,坐标轴上各个点构成的多边形面积的大小可以代表由参评因子所组成的评价对象的整体状况,面积越大,整体的质量越高。本研究中,不同林龄华北落叶松人工林地土壤速效磷平均隶属度数值距原点最近,数值最小,为0.14,铵态氮、脲酶其次,均为0.26;而土壤蔗糖酶隶属度数值最大,达到0.75,速效钾次之,为0.74(图1);不同林龄间(图1a),各指标随林龄的变化其趋势不尽相同。速效磷、铵态氮、酸性磷酸酶、脲酶、蔗糖酶活性的隶属度数值随着林龄的增加有所降低,即5a > 10a > 20a;有机碳、速效钾随着林龄的增加表现为先增加后减小的趋势;全氮、硝态氮随着林龄的增加表现为先减小后增加的趋势。不同年份间(图1b),有机碳、速效磷、硝态氮的隶属度数值随着年份的增加表现为先增加后减小的趋势,全氮变化趋势则相反;而铵态氮、速效钾、酸性磷酸酶、脲酶、蔗糖酶随着年份的增加而降低。图1各指标组成的九边形面积比各指标处在最佳状态的九边形面积明显要小,说明研究区整体的土壤肥力质量不高。其中,20a华北落叶松人工林地土壤各指标组成的九边形面积最小(图1a),说明20a华北落叶松样地土壤肥力最差;同理(图1b)2014年华北落叶松人工林土壤肥力相比前2年较低,表现出了土壤肥力衰退的迹象。

表5 隶属函数曲线转折点取值
Tab.5 Values of turning point in membership function

转折点	有机碳	全氮	硝态氮	铵态氮	速效磷	速效钾	脲酶	蔗糖酶	酸性磷酸/(mg·g ⁻¹ ·24h ⁻¹)
	(g·kg ⁻¹)		(mg·kg ⁻¹)			(mg·g ⁻¹ ·24h ⁻¹)			
X ₁	6	0.5	7	0.5	3	50	0.16	6	0.10
X ₂	30	1.5	103	29.0	15	150	1.10	69	0.54

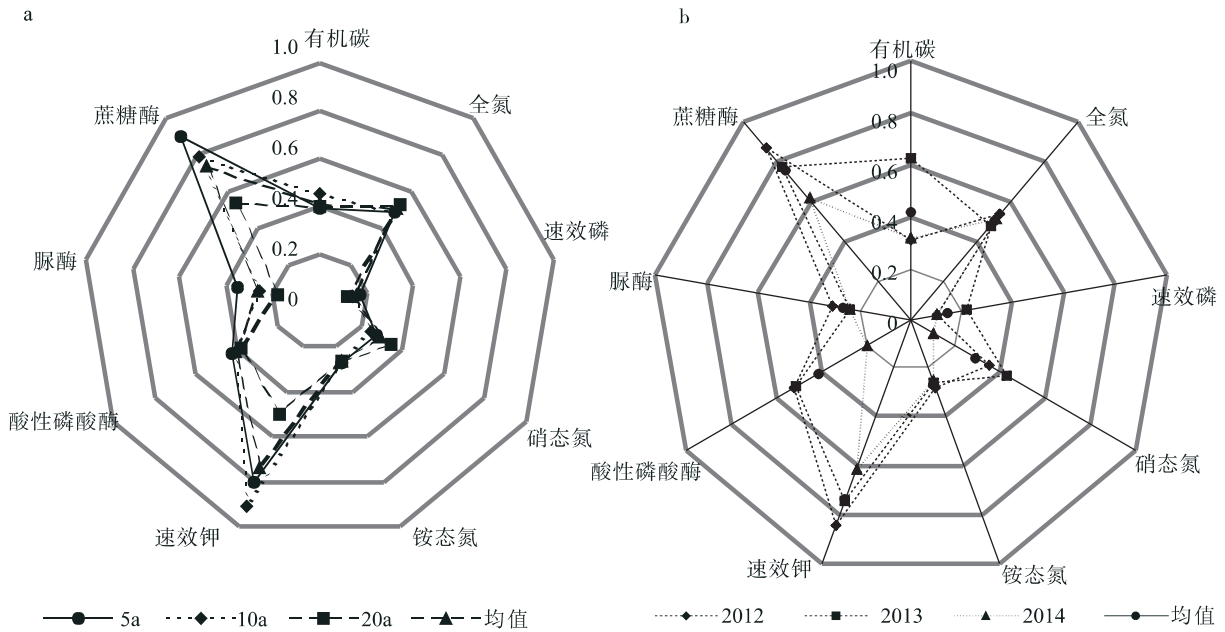


图1 各土壤肥力指标平均隶属度雷达图
Fig.1 Radar plot of average membership degree of each factor

3.2 土壤肥力评价

土壤肥力指数法是目前常用的一种定量评价土壤肥力的方法,土壤质量指数能够很好地反映土壤质量的变异信息。本研究采用加权求和指数 ADD FQI(additive fertility quality index) 对土壤肥力进行综合评价。ADD FQI 数学表达式为:

$$FQI = \sum_{i=1}^n W_i \cdot F_i \quad (4)$$

式中: W_i 、 F_i 分别是第 i 个因子的权重和隶属度; n 是参评因子数。

将前述土壤各指标权重与隶属度数值代入公式(4),计算得出本研究区土壤肥力的指数变化情况,结果见图2。不同林龄华北落叶松人工林地土壤肥力指数数值为 0.43 ~ 0.57,随着林龄的增加,土壤肥力总体呈现降低的趋势。连续3年的华北落叶松林下土壤肥力的研究结果显示,2013年相比于2012年土壤肥力有所增加,但增加不显著;2014年土壤肥力急剧下降。

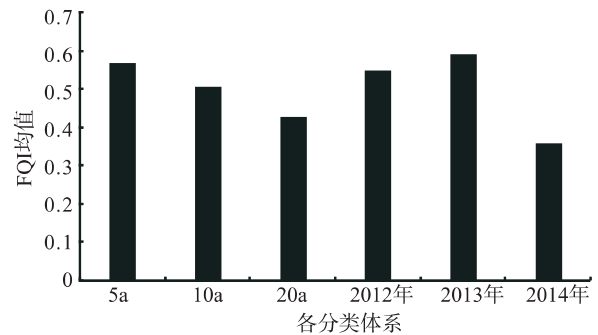


图2 FQI指数分布
Fig.2 The distribution of FQI index

3.3 氮、磷营养元素变化量比较

本研究选取12个土壤肥力指标评价不同林龄华北落叶松土壤肥力的大小。总体来说,12个指标大致归属于4大类,分别是与含碳物质相关(有机碳、蔗糖酶活性)、与氮类物质相关(全氮、硝态氮、铵态氮、脲酶活性)、与磷类物质相关(全磷、速效磷、酸性磷酸酶活性)以及与钾类物质相关(速效钾)。由土壤指标雷达图分析知,速效磷、脲酶隶属度数值最小,而蔗糖酶、速效钾的隶属度数值最大,表明氮、磷类物质是限制土壤

肥力增高最重要的因子,而有机碳、钾在土壤中大量存在。故本研究中,华北落叶松人工林土壤肥力的衰退与氮、磷营养元素的消耗与流失密切相关。分析连续3年土壤中全氮、全磷含量的变化量可知(图3),华北落叶松人工林地土壤全氮、全磷含量变化均呈下降趋势,2013年的下降量分别为6.63%、9.79%;2014年土壤全氮变化量相比于2013年略有回升,但全氮含量仍然低于2012年,全磷含量呈现持续降低的趋势,下降量为19.88%。此外,由氮磷含量的变化量数值计算可知,全氮、全磷下降量的斜率大小分别为1.11%、9.94%,表明全磷含量的下降趋势快于全氮。由此可知,华北落叶松人工林地土壤磷元素消耗较快,华北落叶松的生长会越来越受到磷元素的限制。

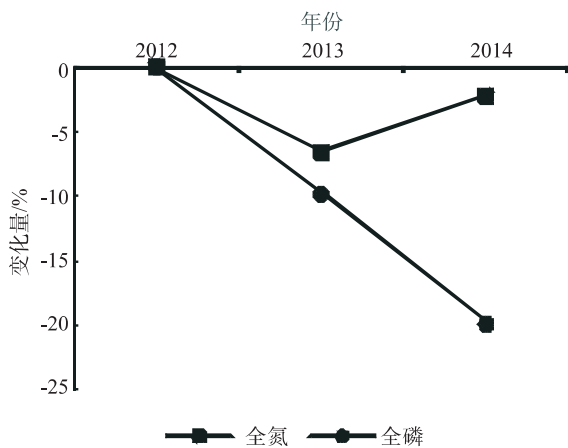


图3 土壤全氮、全磷含量的变化量
Fig.3 The variable quantity of total nitrogen and total phosphorus content in soil

4 结论与讨论

主成分分析与利用模糊数学法相结合建立各评价指标的隶属函数近年来被广泛应用于评价某一地区土壤肥力的高低^[12,31-32]。本研究运用主成分分析同时结合 Norm 值确定土壤肥力综合评价的最小数据集,筛选出土壤有机碳、硝态氮、铵态氮、速效磷、速效钾等9项作为评价秦岭地区华北落叶松人工林土壤肥力的指标。有机碳、全氮、硝态氮、铵态氮、速效磷、速效钾等指标反映了土壤的营养状况,其数值越大土壤肥力也越高。有机碳作为重要的营养物质,土壤的物理、化学、生物等许多特性都直接或间接地与其存在相关关系,而氮、磷、钾等营养物质为植物的生长代谢提供了物质保障。本研究中,各指标对土壤肥力贡献程度大小顺序为速效钾>全氮>有机碳>硝态氮>铵态氮>速效磷。速效磷隶属度数值最小,铵态氮、硝态氮次之,3者对土壤肥力的作用分值最小,是该研究区土壤肥力质量增高的最主要的限制因子。同时,它们是可被植物直

接吸收利用的营养物质,3者不足势必会对华北落叶松的生长造成影响,这与刘勇等^[16]、赵亚芳等^[33]的研究结果一致;速效钾隶属度数值较大,钾元素不是制约华北落叶松生长的因子,这与陈钦程等^[34]研究此地区华北落叶松得出的结论一致。脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶在土壤物质转化与能量代谢中发挥着重要的作用。脲酶是一种酰胺酶,可以使有机物分子中酰胺键水解,最终产生氨和碳酸,从而可以用来表征土壤中有机氮的转化状态。土壤脲酶与土壤有机质、全氮、全磷等均呈显著或极显著相关关系^[30];磷酸酶主要参与有机磷的转化过程,加速有机磷的分解,从而增加土壤中磷的有效性;蔗糖酶可加速蔗糖的分解,其产物是土壤中微生物能量的主要来源,最终有效增加土壤中易溶性营养物质。这3种酶在间接表征土壤肥力方面发挥着重要的作用。本研究中,3种酶对土壤肥力的贡献程度大小顺序为蔗糖酶>酸性磷酸酶>脲酶。脲酶是一种胞外诱导酶,能将不能被植物吸收的含氮有机物转化为小分子物质被植物利用,脲酶活性较小,间接表明土壤中含氮有机物较少。蔗糖酶隶属度数值较大,说明此地区土壤生物活性较强,土壤熟化程度较高。蔗糖酶反应底物为蔗糖,蔗糖主要来自于土壤有机物的分解,在一定程度上可以说明有机物质不会制约华北落叶松的正常生长。

20a 华北落叶松林多数土壤属性指标明显低于5a、10a 华北落叶松,各指标组成的九边形面积最小,表现出随着林龄的增加土壤肥力减弱的趋势。此结果与赵海燕等^[29]的研究结果一致。同时,通过对土壤肥力指数分析可知,此地区不同林龄华北落叶松人工林地土壤肥力指数数值为0.43~0.57,与叶回春等^[31]的研究结果相似,但是略低于吴玉红等^[12]研究的指数数值,原因主要是研究的地区、选取的指标以及权重的计算方法不同。在华北落叶松生长的幼、中龄时期,随着林龄的增加,林下土壤肥力表现出下降的趋势,即5a>10a>20a,并且相比于2012年及2013年的土壤肥力,2014年林下土壤肥力明显下降,这主要是由于硝态氮含量大幅度降低以及酸性磷酸酶的活性急剧下降造成的,这也从一方面阐明了随着华北落叶松的生长,氮、磷营养元素的限制作用日益明显。对不同林龄华北落叶松人工林地氮、磷元素的变化快慢比较,土壤全磷含量的衰退趋势高于全氮,磷元素在华北落叶松的生长中的限制作用会日趋凸显。因此,根据需要在华北落叶松人工林地适当补充氮、磷营养显得尤为重要。

[参 考 文 献]

- [1] 杨晓娟,王海燕,刘玲,等. 东北过伐林区不同林分类型土壤肥力质量评价研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1553-1560.
- [2] 何佩云,丁贵杰,谏红辉. 连栽马尾松人工林土壤肥力比较研究[J]. 林业科学研究, 2011, 24(3): 357-362.
- [3] 张晓曦,刘增文,郝源皓,等. 樟子松与其他10种凋落叶混合分解的养分释放特征[J]. 林业科学, 2014, 50(7): 149-156.
- [4] 田大伦,沈燕,康文星,等. 连栽第1和第2代杉木人工林养分循环的比较[J]. 生态学报, 2011, 31(17): 5025-5032.
- [5] 刘世梁,傅伯杰,刘国华,等. 我国土壤质量及其评价研究的进展[J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 137-143.
- [6] 贡璐,张海峰,吕光辉,等. 塔里木河上游典型绿洲不同连作年限棉田土壤质量评价[J]. 生态学报, 2011, 31(14): 4136-4143.
- [7] McBratney A B, Odeh I O. Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions [J]. Geoderma, 1997, 77(2): 85-113.
- [8] Wang J H, Lu X G, Jiang M, et al. Fuzzy synthetic evaluation of wetland soil quality degradation: A case study on the Sanjiang Plain, Northeast China [J]. Pedosphere, 2009, 19(6): 756-764.
- [9] 王勇,常江. 安徽省水旱轮作区土壤养分综合评价方法研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(12): 124-129.
- [10] Sun B, Zhou S, Zhao Q. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China [J]. Geoderma, 2003, 115(1): 85-99.
- [11] 杨奇勇,杨劲松,姚荣江,等. 基于GIS和改进灰色关联模型的土壤肥力评价[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 100-105.
- [12] 吴玉红,田雷鸿,同延安,等. 基于主成分分析的土壤肥力综合指数评价[J]. 生态学杂志, 2010, 29(1): 173-180.
- [13] 赵小勇,付强,邢贞相. 投影寻踪等级评价模型在土壤质量变化综合评价中的应用[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 164-168.
- [14] 陈留美,桂林国,吕家珑,等. 应用主成分分析和聚类分析评价不同施肥处理条件下新垦淡钙土土壤肥力质量[J]. 土壤, 2008, 40(6): 971-975.
- [15] Yemefack M, Jetten V G, Rossiter D G. Developing a Minimum data set for characterizing soil dynamics in shifting cultivation systems [J]. Soil & Tillage Research, 2006, 86: 84-98.
- [16] 刘勇,李国雷,林平. 华北落叶松人工幼、中龄林土壤肥力变化[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(3): 17-23.
- [17] 牛小云,孙晓梅,陈东升,等. 辽东山区不同林龄日本落叶松人工林土壤微生物、养分及酶活性[J]. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2663-2672.
- [18] 马云波,许中旗,张岩,等. 冀北山区华北落叶松人工林对土壤化学性质的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 165-170.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [21] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
- [22] 张润楚. 多元统计分析[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [23] 李桂林,陈杰,孙志英,等. 基于土壤特征和土地利用变化的土壤质量评价最小数据集确定[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 2715-2724.
- [24] 许明祥,刘国彬,赵允格. 黄土丘陵区土壤质量评价指标研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1843-1848.
- [25] 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[J]. 土壤学报, 1995, 32(4): 362-369.
- [26] 陕西省土壤普查办公室. 陕西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [27] 刘京,常庆瑞,刘森,等. 陕西省土壤信息系统的设计与建立[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(12): 129-132.
- [28] 王德彩,常庆瑞,刘京,等. 土壤空间数据库支持的陕西土壤肥力评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(11): 105-110.
- [29] 赵海燕,徐福利,王渭玲,等. 秦岭地区华北落叶松人工林地土壤养分和酶活性变化[J]. 生态学报, 2015, 35(4): 1086-1094.
- [30] 和文祥,朱铭莪. 陕西土壤脲酶活性与土壤肥力关系分析[J]. 土壤学报, 1997, 34(4): 392-398.
- [31] 叶回春,张世文,黄元仿,等. 北京延庆盆地农田表层土壤肥力评价及其空间变异[J]. 中国农业科学, 2013, 46(15): 3151-3160.
- [32] 黄婷,岳西杰,葛玺祖,等. 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[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 141-148.
- [33] 赵亚芳,徐福利,王渭玲,等. 华北落叶松针叶碳、氮、磷含量及化学计量比的季节变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1328-1335.
- [34] 陈钦程,徐福利,王渭玲,等. 秦岭北麓不同林龄华北落叶松土壤速效钾变化规律[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1243-1249.

(责任编辑 赵粉侠)

