

DOI: 10.5846/stxb201312253021

曾思齐, 甘静静, 肖化顺, 刘发林, 肖柏松, 彭其龙, 吴疆. 木荷次生林林木更新与土壤特征的相关性. 生态学报, 2014, 34(15): 4242-4250.

Zeng S Q, Gan J J, Xiao H H, Liu F L, Xiao B S, Peng Q L, Wu J. Changes in soil properties in regenerating *Schima superba* secondary forests. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(15): 4242-4250.

木荷次生林林木更新与土壤特征的相关性

曾思齐*, 甘静静, 肖化顺, 刘发林, 肖柏松, 彭其龙, 吴疆

(中南林业科技大学, 长沙 410004)

摘要:以湖南省青石冈林场木荷次生林为研究对象,在测定其土壤特征基础上,分析了林木天然更新指数和土壤理化性质的相关性。结果表明:1)8种林分更新状况有差异,更新状况由差到好的排序为:S-CP(0.46)<S-DC(0.52)<S-CD(0.64)<S-CL(0.68)<S-CM(0.69)<S-CQ(0.69)<S-PC(0.74)<S-CP(0.88),其中与针叶树种混交的林分更新效果好。2)酸性环境更有利于林分的更新,且林地养分含量越高林分更新效果越好,有机碳、全N以及全P的含量高的林分更新指数明显大于其含量低的林分,土壤pH值、容重与更新指数变化规律相反,全K的含量与更新指数没有明显联系。3)林木更新指数与土壤容重呈显著性负相关关系($r=-0.86^{**}$),与土壤含水量($r=0.93^{**}$)、有机碳($r=0.90^{**}$)、全N($r=0.88^{**}$)、水解性氮($r=0.83^{*}$)和全P($r=0.78^{*}$)呈显著正相关关系,相关性依次减弱,且相关性在不同林分有一定差异,更新状况属于中等水平的林分相关性强,且15—45cm土层土壤理化性质与更新指数的相关性最强;经主成分分析发现,在众多影响林分天然更新的土壤特性当中,含水量、有机碳和全N决定该地区木荷次生林更新的关键因素。研究的结果为森林可持续利用以及木荷次生林的恢复和管理提供科学依据。

关键词:木荷;次生林;土壤理化性质;天然更新;更新指数

Changes in soil properties in regenerating *Schima superba* secondary forests

ZENG Siqi*, GAN Jingjing, XIAO Huashun, LIU Falin, XIAO Bosong, PENG Qilong, WU Jiang

Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

Abstract: Soil physical and chemical properties may be altered in regenerating forests, which may affect site productivity and ecosystem services. In this study, soil physico-chemical characteristics were investigated in a series of regenerating *Schima superba* secondary forests in Qing Shigang Forest Farm, Hunan province. The correlations between the soil properties and the regeneration index were also examined in the studied sites. The result showed that the eight sampling stands were in different regenerating conditions with an order from poor to high condition as S-CP(0.46)<S-DC(0.52)<S-CD(0.64)<S-CL(0.68)<S-CM(0.69)<S-CQ(0.69)<S-PC(0.74)<S-CP(0.88). The best regenerating condition was found in the *Schima superba* and conifer mixed forests stands in the study area. Natural *Schima superba* regeneration was enhanced under acidic environments and in fertilized sites. The high regeneration indexes were found in those forest stands with high organic C, total N and total P contents in soils and low soil pH value and soil bulk density. No considerable relationship was found between the regeneration index and soil K content. The regeneration index was negatively related to soil bulk density ($r=-0.86^{**}$) and positively relative to soil water content ($r=0.93^{**}$), soil organic carbon ($r=0.90^{**}$), total nitrogen ($r=0.88^{**}$), hydrolyzable nitrogen ($r=0.83^{*}$) and total phosphorus ($r=0.78^{*}$). The results obtained from the use of principal component analysis indicated that water content, organic carbon and total nitrogen in soils were critical factors in determining natural regeneration of *Schima superba* forests in the study region. Our results provide scientific basis and reference for restoration and sustainable management of *Schima superba* secondary forests.

基金项目:林业公益性行业项目“南方集体林区次生林抚育间伐与高效利用技术研究”(201004032)

收稿日期:2013-12-25; **修订日期:**2014-03-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: csfuywd@hotmail.com

Key Words: *Schima superba*; secondary forest; soil physic-chemical properties; natural regeneration; regeneration index

天然更新是森林健康发展中一个非常重要和复杂的生态学过程,也是森林资源再生产的生物学过程^[1]。充足且有生命力的种子/种源,适宜的种子萌发、支持幼苗成活和生长以及幼树形成的环境条件是森林生态系统天然更新(有性繁殖)的必备条件^[2-5],土壤作为林木生长的重要生境^[5],其土层厚度等理化性质对林木更新产生显著影响^[7-8]。养分的含量以及空间分布特征等直接影响森林的更新过程^[8-9]。

我国南方次生林长时间存在人为不合理采伐、樵采、垦殖,同时遭受过严重冰雪灾害,林分结构也受到严重破坏,部分林地暴露,水土流失,林地水分蒸发,土壤性质发生改变。现存林分天然更新情况良莠不齐,更新能力弱化,林分生产力降低,抵抗力下降,生态效益减弱,严重影响了林分的健康发展和森林的可持续利用。在森林生态系统天然更新中,研究工作者在土壤空间变异规律、人为干扰、幼苗更新、物种空间分布格局等因素对自然更新影响方面做了研究^[10-12],但是对林木更新效果评价以及其与土壤理化性质相关性研究较少。

木荷(*Schima superba*)是我国东部亚热带和南方集体林区常绿阔叶林的主要优势树种之一^[13],常绿乔木,树冠浓密,花多肥厚,冬日叶色染红,可作庭荫树及风景林栽植,也是庭院背景树、主干树、观赏树、行道树的首选树种,木荷生长迅速,树干通直圆满,树皮和树叶含有鞣质,可提取单宁,为制革工业的原料,叶片革质,能耐火,可作为林区防火线树种,与马尾松混交能防止松毛虫发生,在纯林和混交林中都能发挥良好的生态效益。木荷次生林作为中亚热带重要的林分类型之一,在森林生态系统演替和天然更新中发挥着重要作用。本研究在林分更新和土壤理化性质调查基础上,计算木荷林林分更新指数,揭示土壤理化性质与天然更新的深层次关系,为有效增强林木天然更新能力、优化生态环境、提高林分生产率提供可靠数据,也为我国南方次生林高效利用和可持续发展提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

湖南省炎陵县青石冈国有林场位于罗霄山脉中

段,井冈山西麓,地处东经 113°34'45"—114°07'15",北纬 26°03'03"—26°38'30"之间。全场属中亚热带季风湿润气候区,年均气温 17.3℃,年均降雨量 1496.7mm,降雨集中期为每年的 4—9 月份,其降雨量约占全年降雨量的 67%—73%。林场内成土母岩主要是花岗岩,其次是板页岩。土壤垂直带谱明显,海拔 1200m 以下土壤的土层较深厚,层次完整,土壤肥力较高。本研究的样地所处的海拔在 1000—1200m 处,此海拔高度上主要是以黄棕壤为主。该研究区主要为天然次生林,主要树种有木荷、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、甜槠(*Castanopsis eyrei*)、香樟(*Cinnamomum camphora*)、樱桃(*Prunus pseudocerasus*)、檫木(*Sassafras tsumu*)、虎皮楠(*Daphniphyllum oldhamii*)、白栎(*Quercus fabri*)、合欢(*Albizia julibrissin*)、茅栗(*Castanea seguinii*)、细叶青冈(*Cyclobalanopsis gracilis*)、长叶石栎(*Lithocarpus henryi*)、栲(*Cyclobalanopsis glauca*)、山苍子(*Litsea cubeba*)、雷公鹅耳枥(*Carpinus viminea*)、红楠(*Machilus thunbergii*)、板栗(*Castanea mollissima* Blume)、漆树(*Rhus verniciflua*)等等为次生林中主要组成树种,主要分布在海拔为 1600m 以下的地区。样地立地情况和植被组成见表 1(样地号以每块样地 3 种主要组成树种拉丁名首字母组成,各样地树种组成见表 1“树种组成”栏)。

1.2 材料与方法

1.2.1 样地设置与数据采集

2012 年 7 月至当年 9 月,运用典型抽样技术在 8 种具有代表性的林分类型中分别设置 3 块 25m×25m 样地,进行地上的更新调查和地下的土样采集工作。将每个样地分为 100 个 2.5m×2.5m 的小样方,更新调查在小样方内进行,记录更新层(树高≤2.0m)幼苗、幼树树种、树高、地径(测量工具为电子游标卡尺),调查并记录灌木和乔木树种、胸径(或者地径)以及样地海拔、腐殖质厚度、草本覆盖度、灌木覆盖度、郁闭度、地形等基本情况。土样采集点设在各样地一条对角线的首末和中点,在 0—15cm、15—30cm、30—45cm 和 45—60cm 土层平行取样 3 个,分别称重装袋标号存放。

表 1 样地概况

Table 1 General situation of different sample plots

编号 Number	海拔 Altitude /m	腐殖质厚度 Humus thickness /cm	草本盖度 Herb Coverage /%	灌木盖度 Shrub coverage /%	郁闭度 Crown density	地形 Topography	树种组成 Tree species composition
S-SP	1196	0.42	10	2	0.82	山谷	木荷、檫木、樱桃
S-DC	1132	2.63	3	3	0.43	山坡	木荷、虎皮楠、甜槠、白栎、合欢
S-CD	1164	3.14	10	16	0.59	山坡	木荷、茅栗、虎皮楠、细叶青冈、杉木
S-CL	1160	1.72	2	17	0.78	山坡	木荷、甜槠、长叶石栎、细叶青冈
S-CM	1147	1.63	5	2	0.48	山坡	木荷、香樟、红楠、甜槠、桐
S-CQ	1013	2.51	40	10	0.73	山坡	木荷、杉木、白栎、细叶青冈、甜槠、合欢、 山苍子、雷公鹅耳枥
S-PC	1054	2.04	35	5	0.71	山坡	木荷、马尾松、甜槠、虎皮楠、红楠、山苍子
S-CP	1052	1.01	15	2	0.68	山坡	木荷、杉木、马尾松、板栗、漆树、雷公鹅耳 枥、樱桃、红楠、白栎、细叶青冈

1.2.2 更新指数调查与指数的计算

结合青石冈林场木荷林分的实际情况,结合本项目部分研究成果^[14],采用熵值法从分布情况、生长情况和年龄结构 3 个方面构建了木荷更新的评价指标体系,选取单位面积株树、频度、幼苗平均高、幼苗平均地径、大苗百分比等 5 个指标计算更新指数(表 2)。

表 2 木荷更新情况评价指标体系

Table 2 The evaluation index system of Schima superba regeneration situation

目标层 The target layer	准则层 Rule layer	指标层 Index layer
木荷更新状况评价 The evaluation index of <i>Schima superba</i> regeneration situation	分布情况 生长情况 年龄结构	单位面积株数 频度 平均高 平均地径 大苗百分比

(1) 权重的计算方法

用熵值法^[15]计算 5 个指标的权重。

1) 原始数据标准化

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \times \alpha + (1 - \alpha), \alpha \in (0, 1)$$

(1)

式中, X_{ij} 为去量纲化后的数据, x_{ij} 为第 i 个样本的第 j 个指标的原始数据, $x_{\min}$ 、 $x_{\max}$ 分别为 x_{ij} 对应的第 i 个样本的第 j 个指标的最小值和最大值。此外,本研究中的 α 取值 0.6。

2) 求取第 i 个样本的第 j 个指标的比重

$$y_{ij} = X_{ij} / \sum_{i=1}^m X_{ij}, j = 1, 2, 3, \dots, n$$

(2)

3) 求取第 j 个指标的信息熵

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m y_{ij} \ln y_{ij}, \text{其中 } k = 1/\ln m, 0 \leq e_j \leq 1$$

(3)

4) 求取第 j 个指标的变异系数

$$g_j = 1 - e_j$$

(4)

5) 求取第 j 个指标的权重

$$w_j = g_j / \sum_{j=1}^n g_j$$

(5)

(2) 更新指数的计算方法

$$U_{hi} = \sum_{j=1}^n W_j \cdot X_{ij}$$

(6)

$$G_i = \sum_{h=1}^n U_{hi}$$

(7)

式中, U_{hi} 为评价指标体系中准则层对应的分布状况系数、生长状况系数和年龄结构系数; h 取值为 1, 2, 3; W_j 为第 j 个评价指标的权重值, X_{ij} 为第 i 个样本第 j 个评价指标去量纲化后的数据, n 为第 h 准则层对应的评价指标个数; G_i 为评价林木更新状况的更新指数;在该公式中, n 为准则层的数目,即 $n=3$ 。

1.2.3 土样的预处理与测定

采回的土样一批烘干后挑出大的石块和植物根茎,过 100 目筛存放于铝盒保存到干燥器内备用,用于测定全 P 和全 K。另一批自然风干,过 60 目筛后存放于铝盒,用于测定有机碳、水解性氮和全 N。其中土壤含水量用烘干法测定;容重用环刀法测定;pH

用 25:1 水土比溶液,用酸度计测定;有机碳用重铬酸钾水合加热法测定;全 N 和水解性氮分别采用凯氏定氮仪法和扩散吸收发测定,土壤全 P 用钼锑抗显色后在 72 型光电分光光度计上测定,全 K 用火焰光度法测定^[16]。

1.2.4 数据处理

本实验所得数据,前期统计和计算在 Microsoft Excel2010 上完成,用 SPSS18.0 (中文版) 软件进行单因素方差分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同样地更新指数

更新指数是一个综合考虑更新层幼苗分布情况、生长情况和年龄结构等因子的数量指标,可定量描述天然更新效果,更新指数越大表明林地的更新效果越好,反之则越差。此指数采用熵值法计算单位面积株数、频度、平均高、平均地径和大苗百分比等 5 个指标层的权重(表 3),对设定分布情况、生长情况和年龄结构 3 个准则层以及单位面积株树、频度、幼苗平均高、幼苗平均地径、大苗百分比等 5 组原始数据进行标准化(表 4)。

表 3 木荷次生林更新指标计算参数表

类别 Category	分布状况 Distribution		生长状况 Growth		年龄结构 Age structure
	株数 Plant number	频度 Frequency	平均高 Average high	平均地径 Average diameter	大苗百分比 Percentage of seedlings
信息熵 Information entropy	0.97	0.98	0.98	0.99	0.98
变异系数 Coefficient of variation	0.04	0.02	0.02	0.01	0.02
权重 Weight	0.31	0.17	0.19	0.13	0.20

表 4 木荷次生林幼苗更新调查数据标准化表

类别 Category	分布状况 Distribution		生长状况 Growth		年龄结构 Age structure
	株数 Plant number	频度 Frequency	平均高 Average high	平均地径 Average diameter	大苗百分比 Percentage of seedlings
S-SP	0.42	0.40	0.48	0.50	0.53
S-DC	0.60	0.65	0.43	0.43	0.41
S-CD	0.57	0.56	0.67	0.58	0.82
S-CL	0.98	0.94	0.4	0.46	0.43
S-CM	1.00	1.00	0.41	0.40	0.40
S-CQ	0.40	0.43	0.84	1.00	1.00
S-PC	0.72	0.81	0.73	0.69	0.76
S-CP	0.91	0.84	0.89	0.75	0.92

表 5 木荷更新评价指标相关系数和更新指数表

编号 Number	更新评价相关系数 Regeneration evaluation index			更新指数 Regeneration evaluation
	分布状况系数 Distribution	生长状况系数 Growth	年龄结构系数 Age structure	
S-SP	0.20	0.16	0.10	0.46
S-DC	0.30	0.14	0.08	0.52
S-CD	0.27	0.20	0.17	0.64

续表

编号 Number	更新评价相关系数 Regeneration evaluation index			更新指数 Regeneration evaluation
	分布状况系数 Distribution	生长状况系数 Growth	年龄结构系数 Age structure	
S-CL	0.46	0.14	0.09	0.68
S-CM	0.48	0.13	0.08	0.69
S-CQ	0.20	0.29	0.20	0.69
S-PC	0.36	0.23	0.16	0.74
S-CP	0.42	0.27	0.19	0.88

由表 5 可直观地看出青石冈林场木荷的更新情况,其中 S-CP 样地更新指数最大,更新效果最好, S-CP样地更新指数最小,更新效果最差。各林分的更新状况由差到好的排序为:S-CP(0.46)<S-DC(0.52)<S-CD(0.64)<S-CL(0.68)<S-CM(0.69)<S-CQ(0.69)<S-PC(0.74)<S-CP(0.88),其中与针叶树种混交的林分更新效果好,更新效果最好的 S-CP 样地不仅树种种类丰富,且是以马尾松和杉木两种针叶树种为混交树种的针阔混交林。

2.2 不同林分土壤特性

对各样地土壤理化性质分别进行单因素方差分析,其 F 值依次为 6.29 ($P=0.01$)、4.03 ($P=0.01$)、3.42 ($P=0.05$)、4.05 ($P=0.01$)、3.47 ($P=0.05$)、4.16 ($P=0.01$)、4.69 ($P=0.05$)和 1.59,除了全 K 含量以外其他理化性质在不同林分的含量都有显著性差异,其中土壤含水量、容重、水解性氮、全 N 和全 P 都具有极显著性差异,说明不同林分土壤理化性质具有很大差异。经测定,其中 S-CP 林分土壤含水量最高,而 S-SP 林分含水量最低,低至 6.43%时,最大值和最小值相差 24.36%;土壤容重的变化趋势与含水

量的变化趋势相反,即土壤容重越小的林地土壤含水量越高。

表 6 不同样地土壤物理性质

Table 6 Soil physical properties in each Sample plot		
编号 Number	含水量 Water content/%	容重 Bulk density/(g/cm ³)
S-SP	6.43±6.53	1.53±0.13
S-DC	14.71±6.79	1.34±0.15
S-CD	22.82±2.54	1.25±0.03
S-CL	26.52±5.31	1.12±0.09
S-CM	29.30±0.62	1.05±0.04
S-CQ	27.92±2.72	1.05±0.07
S-PC	26.11±3.83	1.19±0.08
S-CP	32.79±1.25	1.03±0.12

均值±标准差 (Mean±SD)

对研究区不同林分土壤化学性质分析发现,该地区土壤呈弱酸性,土壤中水解性氮、有机碳、全 N 以及全 P 在 S-CP 林分中含量最高,分别达到 260.32 mg/kg、30.99g/kg、1.80 g/kg 和 0.22 g/kg,而在 S-SP 林分中含量仅 151.24 mg/kg、6.92 g/kg、0.37 g/kg 和 0.10 g/kg,且有机碳、全 N 以及全 P 的含量的变化也符合此规律,但全 K 的含量没有明显的变化规律。

表 7 不同样地土壤化学性质

Table 7 Soil chemical properties in each Sample plot						
编号 Number	pH	水解性氮 Hydrolyzable N/ (mg/kg)	有机碳 Organic C/ (g/kg)	全 N Total N/ (g/kg)	全 P Total P/ (g/kg)	全 K Total K/ (g/kg)
S-SP	4.74±0.06	151.24±29.41	6.92±4.70	0.37±0.23	0.10±0.03	7.14±0.52
S-DC	4.45±0.09	141.81±70.37	6.92±11.44	0.45±0.66	0.06±0.07	3.43±1.10
S-CD	4.21±0.04	166.74±25.27	13.37± 9.56	0.67±0.53	0.11±0.04	4.97±1.73
S-CL	4.39±0.02	217.97±58.96	15.39±7.55	1.17±0.35	0.18±0.04	8.85±2.60
S-CM	4.20±0.03	250.02±55.09	24.85±4.00	1.57±0.27	0.22±0.01	6.98±5.59
S-CQ	4.26±0.06	277.16±8.35	29.34±3.57	1.76±0.19	0.25±0.01	4.25±1.09
S-PC	4.36±0.16	260.39±15.03	23.15±4.91	1.43±0.16	0.22±0.01	2.73±0.95
S-CP	4.25±0.29	260.32±41.86	30.9±3.69	1.80±0.24	0.22±0.01	1.22±2.92

均值±标准差 (Mean±SD)

总体看来,酸性环境更有利于林分的更新,当 pH 值在 4.02—5.15 范围内,酸性越强的林分更新指数越大(表 7),即更新情况越好。土壤中水解性氮、有机碳、全 N 以及全 P 在更新效过最好的林地中含量分别达到 260.32 mg/kg、30.99g/kg、1.80 g/kg 和 0.22 g/kg,而在更新效果最差的样地仅 151.24 mg/kg、6.92 g/kg、0.37g/kg 和 0.10 g/kg,即林地养分含量越高林分更新效果越好,且有机碳、全 N 以及全 P 的含量高的样地更新指数明显大于其含量低的样地。而 K 的含量与更新没有明显的联系。

2.3 更新指数与土壤特性相关性分析

对不同林分更新指数与土壤理化性质做相关性分析,进一步了解土壤养分对林木更新的影响。

分析表明(图 1),更新指数与土壤特性关系密切。土壤两个物理指标与林分更新的相关系数的绝对值均大于 0.7,表明其与更新指数相关性强,含水量与林分更新指数的相关系数 $r=0.93(P=0.01)$,土壤容重与林分更新指数相关系数 $r=-0.86(P=0.01)$;更新指数与土壤 pH($P=0.05$)和全 K 两个化学性质呈负相关关系,其他化学性质呈正相关关系,

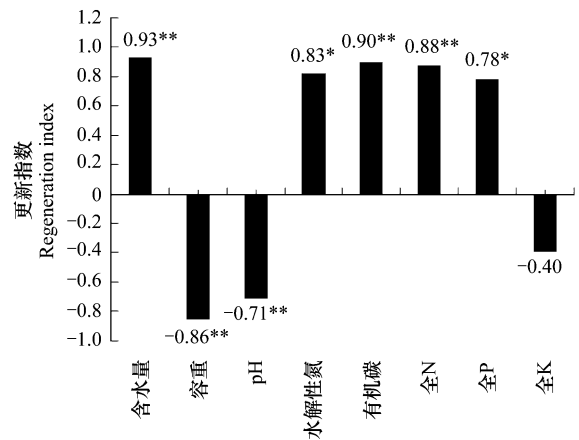


图 1 更新指数与土壤养分的相关性分析

Fig.1 The correlation coefficient between regeneration index and soil nutrient

* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关,** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

其中更新指数与有机碳、全 N、水解性氮和全 P 的含量的关相系数依次为 0.90 ($P=0.01$)、0.86 ($P=0.01$)、0.83($P=0.05$)、0.78($P=0.05$),均大于 0.7,可见土壤有机碳、全 N、水解性氮与更新的相关性是显著的,表明它们能显著影响木荷次生林天然更新。

表 8 不同林分更新指数与土壤养分的相关性分析

Table 8 The correlation coefficient between regeneration index and physical and soil nutrient

编号 Number	含水量 Water content/%	容重 Bulk density /(g/cm ³)	pH	水解性氮 Hydrolyzable N /(mg/kg)	有机碳 Organic C /(g/kg)	全 N Total N /(g/kg)	全 P Total P /(g/kg)	全 K Total K /(g/kg)
S-SP	0.96	-0.78	-0.88	0.79	0.80	0.71	0.70	-0.32
S-DC	0.96*	-0.85	-0.85	0.49	0.78	0.88	0.75	-0.24
S-CD	0.98*	-0.99	-0.77	0.73**	0.87	0.85	0.93*	-0.50
S-CL	0.97*	-0.79	-0.70	1.00	0.96	0.97	0.79	-0.28
S-CM	0.96	-0.81	-0.68	0.89	0.95	0.94	0.82	-0.44
S-CQ	0.99*	-0.94	-0.62	0.85	0.88	0.92	0.70	-0.29
S-PC	0.91	-0.84	-0.64	0.92	0.97	0.99	0.88	-0.70
S-CP	0.90	-0.79	-0.62	0.96	0.91	0.88	0.87	-0.50

* 表示在.05 水平(双侧)上显著相关,** 表示在.01 水平(双侧)上显著相关

对不同林分更新指数与土壤理化性质做相关性分析(表 8),二者的相关性与图 1 基本保持一致,其中林分更新指数与土壤含水量、水解性氮、有机碳、全 N 和全 P 均呈正相关关系,与土壤容重、pH 和全 K 呈负相关关系。在不同林分更新指数相关关系表现有差异,更新指数与土壤含水量、水解性氮、有机碳、全 N 和全 P 相关性强弱表现为重点强两头弱,与

土壤容重虽然呈现出负相关关系,但也符合中间强两头弱的特点,与 pH 的负相关关系在更新指数小的林分表现出较强的附相关性,在更新指数大的林分负相关性较弱,与全 K 的相关性很弱且没有明显的变化规律。总体看来,林分更新指数与土壤含水量、水解性氮、有机碳、全 N 和全 P 有很强的正相关关系,且与土壤含水量相关性最密切。

表 9 更新指数与各土层土壤养分的相关性分析

Table 9 The correlation coefficient between regeneration index and physical and soil nutrient in each layer

土层 Soil layer /cm	含水量 Water content /%	容重 Bulk density /(g/cm ³)	pH	水解性氮 Hydrolyzable N /(mg/kg)	有机碳 Organic C /(g/kg)	全 N Total N /(g/kg)	全 P Total P /(g/kg)	全 K Total K /(g/kg)
0—15	0.84 **	-0.78 *	-0.63	0.81 *	0.89 **	0.83 *	0.792 *	-0.23
15—30	0.90 **	-0.81 *	-0.68	0.75 *	0.92 **	0.940 *	0.85 **	-0.34
30—45	0.94 **	-0.89 **	-0.74 *	0.86 **	0.92 **	0.86 **	0.85 **	-0.48
45—60	0.94 **	-0.89 **	-0.68	0.72 *	0.78 *	0.77 *	0.72 *	-0.48

* 表示在.05 水平(双侧)上显著相关,** 表示在.01 水平(双侧)上显著相关

在天然更新中,由于种子和幼苗根系在土壤中所处的具体位置,不同土层的土壤理化性质对其生长发育的影响强弱不同,具体表现就是在不同土层土壤理化性质与更新指数相关性强弱不同。因此对不同土层土壤理化性质与林分更新指数做相关性分析,分析结果(表 9)表明,土壤的含水量与容重对更新指数的影响都随土层的加深而加大,其中土壤含水量与更新指数的相关系数由 0—15cm 的 0.838 ($P=0.01$) 增加到 45—60cm 的 0.942 ($P=0.01$),土壤容重与更新指数相关关系的数绝对值也随土层的加深而变大,在 0—30cm 土层上在 0.05 水平上显著负相关,在 30—60cm 土层上在 0.01 水平上显著负相关。在 15—30cm 和 30—45cm 两个土层上土壤的 6 个化学性质与更新指数的相关系数都大于其在 0—15cm 和 45—60cm 土层与更新指数的相关系数,也大于各土层土壤化学性质平均值与更新指数的相关系数。

2.4 影响更新的关键因子

经过以上分析发现,土壤的多种理化性质均与林分更新有紧密关系,可见许多变量之间相关性比较强,证明他们存在信息上的重叠,用 SPSS 软件对木荷次生林的理化性质进行数据降维的统计分析,即主成分分析,最终找出影响林分更新的主要因子。

由表 10 可以看出,木荷次生林不同更新指数下主成分前 3 项的特征根(Initial Eigenvalues)大于 1,并且累计百分比达到 98.477%,已经几乎包含了全部的信息,这时舍去其他 5 项主成分仅损失 1.523% 的信息,因此只需选择 3 个主成分。

从表 11 可以看出,对不同更新指数林分第一主成分影响较大的有含水量、容重、水解性氮、有机质、全 N 和全 P,第一主成分就可以看成是这些指标的综合因子,在第一主成分中全 N 的特征向量最大,说

表 10 木荷次生林不同林分方差主成分提取表

Table 10 Total variance explained of *Schima superba* secondary forest stand

主分量 Principal component	特征值 Total	贡献率 Rate of variance/%	累计贡献率 Contribution rate/%
1	6.248	68.101	78.101
2	3.952	17.898	85.999
3	1.678	12.478	98.477
4	0.072	0.905	99.382
5	0.032	0.395	99.777
6	0.017	0.211	99.988
7	0.001	0.012	100.000
8	0.000	0.000	100.000

表 11 木荷次生林不同更新样地主成分特征向量

Table 11 Principal component eigenvector in each *Schima superba* secondary forest Sample plot

变量 Principal component	主成分 Principal component		
	P1	P2	P3
含水量 Water content	0.956	0.013	-0.744
容重 Bulk density	-0.955	-0.094	0.229
pH	-0.792	0.132	0.574
水解性氮 Hydrolyzable N	0.951	0.117	0.272
有机碳 Organic C	0.973	-0.262	0.172
全 N Total N	0.981	0.065	0.165
全 P Total P	0.927	0.224	0.285
全 K Total P	-0.347	0.124	-0.159

明全 N 在林分更新中起到了极其重要的作用。在第 2 主成分中,pH、水解性氮、有机碳、全 N 和全 P 的特征向量较大,但有机碳的特征向量最大,说明有机碳是决定林木更新好坏的重要指标。在第 3 主成分中,含水量的特征向量最大,说明林分更新对土壤含水量要求较高。综上所述,影响林分更新最主要的因子为含水量、有机碳和 N。

3 结论和讨论

(1) 采用熵值法进行综合评价,方法和数据的客观性保证了结论的客观性^[17]。更新指数是一个综合性的评价指标,可以直观反映样地更新效果,经测定和计算,8种林分更新状况有差异,更新状况由差到好的排序为:S-CP(0.46) < S-DC(0.52) < S-CD(0.64) < S-CL(0.68) < S-CM(0.69) < S-CQ(0.69) < S-PC(0.74) < S-CP(0.88),其中与针叶树种混交的林分更新效果好,S-CP和S-PC样地中马尾松和杉木等针叶树种的混角度高,其更新效果明显好于其它样地的更新效果,这一结果也与张水松等^[18]研究结果吻合,即木荷的混交林比纯林发展得更好。

(2) 在不同林分中,更新指数与土壤特性的相关性强弱呈中间强两头弱的橄榄型,即更新状况属于中等水平的样地与林地土壤特性相关性更强,且随着土层的加深更新指数与含水量、有机碳、全N、水解性氮和全P的相关关系也越来越密切,然而该地区土层越深土壤含水量越低,因此土壤含水量成为该地天然更新的一个重要的限制因子;在不同土层中,林分更新指数与土壤理化性质的相关性的强弱表现不同,更新指数与土壤理化性质的相关系数在第3土层(30—45cm)最大,在第2土层(15—30cm)次之,在第1土层(0—15cm)相关性最弱,在深度最大的第4土层(45—60cm)次之,说明林木早期生长对中层土壤养分需求多于表层和深层土壤养分的需求,因此要对该地区林木进行施肥管理,埋施的施肥方式将起到很好的效果。

(3) 该地区酸性环境更有利于林分的更新。林地养分含量越高其更新效果越好,研究表明有机碳、全N以及全P的含量高的样地更新指数明显大于养分含量低的样地。而K的含量与更新没有明显的联系。有研究表明N作为自然生态系统中主要的限制性养分^[19],能够对植物群落的生物量形成、物种组成和群落演替产生等方面产生显著的影响^[20-21],本研究也表明全N和水解性氮含量变化与林地更新指数大小的变化均具有很强的相关性;含水量、有机碳、全P也表现出相同的特征,而pH值、土壤容重与更新指数变化规律相反。

(4) 更新指数与土壤理化性质相关性由强到弱依次为土壤含水量、有机碳、全N、水解性氮和全P,

可见含水量对林木更新起着至关重要的作用,而容重的增加对林木更新有不利影响,因为土壤的紧实度不仅影响植物的根系形态和地上部的生长还影响植物对水分和养分的吸收和利用^[22-23],杨勇等研究认为土壤容重的降低能促进根系和地上部的生长^[24]。在不同林分的3个主成分中,土壤含水量、有机碳和全N特征向量最大,说明土壤含水量、有机碳和全N决定该地区木荷次生林更新好坏的关键因素。因此,对于更新情况差的林地采取适当的水肥管理措施,将有效提高和改善该地区木荷次生林木的天然更新效果。

References:

- [1] Ma J M, Liu S R, Shi Z M, Zhang D Y, Liao N. Regeneration of *Acacia glauca* and *Leucaena leucacephala* plantations in Yuanmou dry and hot valley. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 33(4): 646-657.
- [2] Zhu J J, Matsuzaki T, Li F Q, Yutaka Conda. Effects of gap size created by thinning on seedling emergency, survival and establishment in a coastal pine forest. *Forest Ecology and Management*, 2003, 182: 339-354.
- [3] Li J Q, Li J W. Regeneration and restoration of broad-leaved Korean pine forests in Lesser Xing'an Mountains of Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(7): 1268-1277.
- [4] Liu Z G, Ji L Z, Zhu J J. Impact of cone-picking on seed banks and animals. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2005, 22(5): 596-603.
- [5] Chen Y F. Research Progress of Natural Regeneration Barrier of Forest. *World Forestry Research*, 2012, 2(25): 41-45.
- [6] Yu Z B, Dai L M, Chen J Q. Natural regeneration condition in *Pinus koraiensis* broad-leaved mixed forest. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(9): 1413-1420.
- [7] Ding S Y, Song Y C. Research advances in vegetation dynamic of evergreen broad-leaved forest. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 8(24): 1769-1779.
- [8] Kang B, Liu S R, Cai D X, Lu L H, He R M, Gao Y X, Di W Z. The soil physical and chemical properties under different vegetation restoration patterns in South subtropical area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(10): 2479-2486.
- [9] Su S J, Liu J F, He Z S, Hong W, Zhang J B. The spatial heterogeneity of soil nutrients in a mid-subtropical *Castanopsis kawakamii* natural forest. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(18): 5673-5682.
- [10] Yang X Q, Han Y Z, Li L, Chen X, You J. The effect of heterogeneous spatial distribution of soil nitrogen on regeneration of *Larix principisrupprechtii* seedlings in typical naturally-

- regenerated montane forests of Northern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(9): 4656-4664.
- [11] Sun Z H, Wang Q C. Study on spatial heterogeneity of topsoil nutrient in *Fraxinus Mandshurica* plantation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(2): 81-84.
- [12] Feng Y M, Tang S Z, Li Z Y. Application of spatial statistic analysis in forestry. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(3): 149-155.
- [13] Lin L, Zhou Z C, Fan H H, Jin G Q, Chen Y L, Hong G M. Provenance difference in stable carbon isotope discrimination of *Schima superba*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(4): 741-746.
- [14] Zeng S Q, Zhang M, Xiao H S, Huang Y J, Gan J J, Peng Q L. Study on regeneration and succession of *Schima superba* mixed forest on Qingshigang state-owned forest farm. *Central South University of Forestry and Technology*, 2013, 33(1): 1-6.
- [15] Yang X T, Zhou X H, Zhang W. Research of wildlife resources sustainable development based on entropy method in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(22): 7230-7238.
- [16] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Analysis of soil physico-chemical properties. Shanghai: Shanghai Scientific and Technology Press, 1977.
- [17] Wei X J, Deng Z Q, Wei G, Ding Z. Safety evaluation of foundation pits extension assessment method combined with entropy law. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(supplement): 672-676.
- [18] Zhang S S. The evolving pattern of tree species composition, number and vumber and volume proportions in evergreen broad-leaved forests. *Scientia Silvae Sinicae*, 1997, 33(4): 289-297.
- [19] Du F, Liang Z S, Xu X X. Spatial heterogeneity of soil nutrients and aboveground biomass in abandoned old-fields of Loess Hilly region in Northern Shanxi, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 13-22.
- [20] Barbara L B, Mark R W, Allison A. Patterns in nutrient availability and plant diversity of temperate North American wetlands. *Ecology*, 1999, 7: 2151-2169.
- [21] Mzal M, Adams W A. Heterogeneity of soil mineral nitrogen in pasture grazed by cattle. *Journal of Soil Science*, 1992, 56: 1160-1165.
- [22] Lessa L, Earnhart C G. Effects of soil compaction on root and root hair morphology: Implications for campsite rehabilitation. *USDA Forest Serv P*, 2000, 15(5): 99-104.
- [23] Ashraf T, Virginie G R, Sylvain P. Effect of soil compaction on photosynthesis and carbon partitioning within a maize soil system. *Soil Till Res*, 2003, 71(2): 151-161.
- [24] Yang Y, Jiang R F, Li H F, Wang W, Zheng R L. Effect of the Soil Bulk Density on the Root Morphology and Cadmium Uptake by *Thlaspi caerulescens* Grown on Cd-Contaminated Soil. *Environment Science*, 2010, 31(12): 3042-3049.
- 参考文献:**
- [1] 马姜明, 刘世荣, 史作民, 张远东, 缪宁. 川西亚高山暗针叶林恢复过程中岷江冷杉天然更新状况及其影响因子. *植物生态学报*, 2009, 33(4): 646-657.
- [4] 刘足根, 姬兰柱, 朱教君. 松果采摘对种子库及动物影响的探讨. *中国科学院研究生院学报*, 2005, 22(5): 596-603.
- [5] 陈永富. 森林天然更新障碍机制研究进展. *世界林业研究*, 2012, 25(2): 41-45.
- [6] 徐振邦, 代力民, 陈吉泉. 长白山红松阔叶混交林森林天然更新条件的研究. *生态学报*, 2001, 21(9): 1413-1420.
- [7] 丁圣彦, 宋永昌. 常绿阔叶林植被动态研究进展. *生态学报*, 2004, 24(8): 1769-1779.
- [8] 康冰, 刘世荣, 蔡道雄, 卢立华, 何日明, 高妍夏, 迪玮. 南亚热带不同植被恢复模式下土壤理化性质. *应用生态学报*, 2010, 21(10): 2479-2486.
- [9] 苏松锦, 刘金福, 何中声, 洪伟, 张金彪. 格氏栲天然林土壤养分空间异质性. *生态学报*, 2012, 32(18): 5673-5682.
- [10] 杨秀清, 韩有志, 李乐, 陈欣, 游静. 华北山地典型天然次生林土壤氮素空间异质性对落叶松幼苗更新的影响. *生态学报*, 2009, 29(9): 4656-4664.
- [11] 孙志虎, 王庆成. 水曲柳人工林土壤养分的空间异质性研究. *水土保持学报*, 2007, 21(2): 81-84.
- [12] 冯益明, 唐守正, 李增元. 空间统计分析在林业中的应用. *林业科学*, 2004, 40(3): 149-155.
- [13] 林磊, 周志春, 范辉华, 金国庆, 陈奕良, 洪桂木. 木荷稳定碳同位素分辨率的种源差异. *应用生态学报*, 2009, 20(4): 741-746.
- [14] 曾思齐, 张敏, 肖化顺, 黄炎俊, 甘静静, 彭其龙. 冈场木荷杉木混交林更新演替研究. *中南林业科技大学学报*, 2013, 33(1): 1-6.
- [15] 杨锡涛, 周学红, 张伟. 于熵值法的我国野生动物资源可持续发展研究. *生态学报*, 2012, 32(22): 7230-7238.
- [16] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1977.
- [17] 魏新江, 邓志秋, 魏纲, 丁智. 可拓评价方法和熵值法相结合的基坑安全评价. *岩土工程学报*, 2008, 30(增刊): 672-676.
- [18] 张水松. 常绿阔叶林树种组成、株数、比例和材积比例变化规律的研究. *林业科学*, 1997, 33(4): 28-98.
- [19] 杜峰, 梁宗锁, 徐学选. 陕北黄土丘陵区撂荒群落土壤养分与地上生物量空间异质性. *生态学报*, 2008, 28(1): 13-22.
- [24] 杨勇, 江荣风, 李花粉, 王巍, 郑瑞伦. 土壤容重改变对锌/镉超累积植物遏兰菜根系特征及吸镉的影响. *环境科学*, 2010, 31(12): 3042-3049.