

东北近天然落叶松云冷杉林不同间伐强度土壤肥力研究

李 旭^{1,2}, 王海燕^{1*}, 杨晓娟¹, 刘 玲¹, 李卫松¹, 王 岳¹

(1. 北京林业大学 林学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘 要:基于吉林省汪清林业局金沟岭林场 5 个区组共 20 块近天然落叶松云冷杉林样地 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 的土壤采集及理化性质测定,运用主成分分析法对不同间伐强度下(0%、20%、30%和 40%)的土壤肥力进行综合评价,分析讨论了间伐强度对各土壤肥力因子和综合土壤肥力的影响。结果表明,间伐强度对土壤 pH 值、有机质、全 N、全 P、全 K 和速效 K 影响显著($p<0.05$),而对土壤密度、含水量、有效 P 和 CEC 的影响不显著($p>0.05$);各土壤肥力因子之间具有一定的相关性,有机质、有效 P、速效 K、全 N 和全 P 各肥力因子之间均呈极显著正相关,全 K 与全 P 极显著正相关,而与有机质和全氮极显著负相关,CEC 与有机质和全 N 极显著正相关;根据不同间伐强度土壤肥力综合评价得分,土壤肥力状况由高到低依次为 30%、20%、对照、40%。

关键词:土壤肥力;间伐强度;主成分分析法

中图分类号:S718.516 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2015)02-0001-07

Soil Fertility in Semi-natural Mixed Larch-spruce-fir Stands
under Different Thinning Intensities

LI Xu^{1,2}, WANG Hai-yan^{1*}, YANG Xiao-juan¹, LIU Ling¹, LI Wei-song¹, WANG Yue¹

(1. School of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Twenty plots in five blocks were selected in Jingouling Forest Farm administrated by Wangqing Forestry Bureau, Jilin Province. Soil samples were collected at the depths of 0—10 cm, 10—20 cm, 20—40 cm and 40—60 cm for the determination of their physico-chemical properties. Comprehensive evaluation of soil fertility under different thinning intensities (0%, 20%, 30% and 40%) was made with principal component analysis method, and the effects of thinning intensity on soil fertility were analyzed. The results showed that thinning intensity had significant effects on soil pH, organic matter, total nitrogen, total phosphorus, total potassium and readily available potassium ($p<0.05$), but had no significant effects on soil bulk density, water content, available phosphorus and cation exchange capacity CEC ($p>0.05$). Certain correlations were found among soil fertility factors. There were very significant positive correlations between soil organic matter, available phosphorus, readily available potassium, total nitrogen and total phosphorus ($p<0.01$). Total potassium had a very significant positive correlation with total phosphorus, but very significant negative correlations with organic matter and total nitrogen; Very significant positive correlations were found between CEC and organic matter as well as total nitrogen. According to the comprehensive evaluation of soil fertility under different thinning intensities, soil fertility was from high to low in an order of 30%, 20%, control, 40%.

Key words: soil fertility; thinning intensity; principal component analysis

收稿日期:2014-05-13 修回日期:2014-06-27

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(TD2011-2);国家林业局林业公益性行业科研专项(20100400201)。

作者简介:李旭,男,在读硕士,研究方向:土壤及植物营养。E-mail:LXxiaoyao@126.com

* 通信作者:王海燕,女,博士,副教授,研究方向:土壤及植物营养。E-mail:haiyanwang72@aliyun.com

土壤肥力是土壤的基本属性和本质特征,它可以为植物正常生长提供并协调营养和环境条件^[1],是土壤物理、化学、生物等性质的综合反映^[2-3]。由于土壤肥力的高低直接影响植物生长,如何科学、合理、实用地评价土壤肥力,显得尤为重要。土壤肥力评价是一种运用数学方法对土壤的生产能力进行评价,可以通过简单的数值表示复杂的土壤肥力。土壤肥力评价的主要方法有:综合指数法^[4]、模糊综合评价方法^[5]、灰色聚类法^[6]、层次分析法^[7]、主成分分析法^[8],其中综合指数法、模糊综合评价方法和主成分分析法运用比较广泛。

在森林生态系统中,土壤通过水、肥、气、热等生态因子影响林木,林木则通过根系的吸收、穿透、菌根及地上部分的凋落物归还来影响土壤,森林和土壤之间是相互间物质和能量交换的关系^[9]。间伐是人类主动干预林分结构的营林措施,合理的间伐不仅能够促进林分生长和林地更新,同时能够改善林地内水肥的供应条件、森林环境和生物多样性,以充分发挥人工林的生态功能和经济效益^[10-11]。本研究主要采用主成分分析法对吉林省汪清林业局金沟岭林场内不同间伐强度的近天然落叶松云冷杉林土壤肥力进行评价,分析间伐强度对土壤肥力因子的影响,以期找到最适合当地森林和土壤的间伐强度,为东北近天然落叶松云冷杉林的健康经营提供理论基础。

1 研究区概况

研究区位于吉林省延边朝鲜族自治州东北部的汪清林业局金沟岭林场(43°06′—44°03′N、129°51′—130°56′E)。该区域属于吉林省东部山区长白山系老爷岭山脉雪岭支脉,海拔高度 550~1 100 m,阳坡较陡,阴坡平缓,自然坡度 10°~25°。属温带大陆性季风型气候,年平均气温约为 4℃,最冷月份为 1 月,平均气温-32℃,最热月份为 7 月,平均气温 32℃;年降水量 600~700 mm,主要集中在 7 月份。土壤类型主要以暗棕壤为主。调查样地内主要树种有长白落叶松(*Larix olgensis*)、云杉(*Picea jezoensis* var. *microsperma*)、冷杉(*Abies nephrolepis*)、红松(*Pinus koraiensis*)、色木(*Acer mono*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、白桦(*Betula platyphylla*)、椴树(*Tilia amurensis*)、枫桦(*Betula platyphylla*)和榆树(*Ulmus propinqua*)^[12]。

2 研究方法

2.1 土样采集

研究区内建立了 20 块样地(分 5 个区组),造林

时间均为 1962—1964 年间,1987 年对每个区组的 4 块样地进行了不同强度的间伐,间伐强度分别为 0%(对照)、20%、30%和 40%,间伐方式为下层抚育间伐,样地概况见表 1。经过多年的演变,研究区内大部分已成为落叶松云冷杉针阔混交林,具有天然林的部分特征,故称为近天然落叶松云冷杉林。2012 年 9—10 月,在样地内以 S 形路线选取 5~7 个采样点,用土钻分层(0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm)采集土样,将各层土样混匀后用四分法取约 1 kg 的待测土样,装入布袋内带回实验室分析。同时在样地中心附近挖取一个土壤剖面,将剖面分为 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm,用环刀分别取各层中间位置的土样,转移至铝盒中,用以测定土壤密度和自然含水量。

表 1 样地概况

Table 1 Characteristics of experimental plots					
区组	面积 /hm ²	海拔 /m	平均树高 /m	平均胸径 /cm	间伐强度 /%
I 区	0.077 5	760	19.6	21.6	40
	0.077 5	760	17.3	17.7	对照
	0.130 0	760	20.2	20.7	30
	0.097 5	760	20.4	21.4	20
II 区	0.200 0	780	16.9	18.4	30
	0.200 0	780	16.5	17.9	对照
	0.200 0	780	18.5	20.0	20
	0.200 0	780	15.1	16.3	40
III 区	0.250 0	660	15.2	16.3	对照
	0.250 0	670	19.0	22.0	30
	0.250 0	670	19.5	21.9	20
	0.250 0	680	17.2	20.2	40
IV 区	0.202 5	630	18.6	20.1	40
	0.202 5	640	21.0	22.5	30
	0.112 5	660	19.0	20.3	对照
	0.100 0	645	19.8	20.9	20
V 区	0.112 5	615	20.2	20.8	20
	0.112 5	610	23.4	23.0	40
	0.100 0	605	24.0	24.1	30
	0.099 0	600	20.1	21.2	对照

2.2 土壤理化性质的测定

将各层土样剔除植物根系和石砾等,风干、研磨、过筛(2、1 mm 和 0.25 mm)后进行土壤 pH、CEC 及养分含量的测定(有机质和全量元素分析样品过 0.25 mm 筛,有效养分过 1 mm 筛)。土壤密度采用环刀法;含水量采用烘干法;有机质采用重铬酸钾外加热法;有效磷采用氟化铵-盐酸浸提-钼锑抗比色法;速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度计法;全氮采用硫酸-高氯酸消煮-凯氏定氮仪法;全磷采用浓硫酸-高氯酸-钼锑抗比色法;全钾采用高氯酸-氢氟酸消煮法;阳离子交换量(CEC)采用乙酸铵淋洗法^[13]。

2.3 数据处理

土壤肥力因子统计性分析、方差分析和多重比较、土壤肥力因子之间相关性研究和土壤肥力综合评价均采用统计软件 SPSS 20.0。

3 结果与分析

3.1 不同间伐强度土壤肥力因子统计性分析

将土壤理化性质测定数据按照不同间伐强度进行分组,对各层混合样不同样地间的数据进行描述性统计、方差分析和多重比较,结果见表 2。

土壤密度的范围是 0.69~1.79 g/cm³,各间伐强度土壤密度在 1.15 g/cm³ 左右,差异不显著,变异系数在 22%左右,属于中度变异。土壤含水量为 15.69%~51.04%,各间伐强度土壤含水量在 27%左右,差异不显著,变异系数在 30%左右,属于中度变异。土壤 pH 值介于 4.78~6.02,该区域森林土壤属于酸性土壤,不同间伐强度的 pH 值差异显著,其中间伐强度 30%的土壤 pH 值显著高于其他间伐强度,其更偏向于中性,而间伐强度 40%的土壤 pH 值显著低于其他,土壤更偏酸性。不同间伐强度的 pH 值变异系数在 5%左右,属于弱度变异。

土壤有机质含量范围是 13.58~262.33 g/kg,其中间伐强度 30%的有机质显著高于其他间伐强度。变异系数最大的是间伐强度 20%,为 83.97%,最小的是对照,为 52.54%,其他 2 种均为 65%左右,都属于中等变异。土壤全氮的范围是 0.14~2.92 g/kg,间伐强度 30%的全氮含量均值为 1.13 g/kg,显著高于其他间伐强度(0.80 g/kg 左右)。变异系数除对照较小外,其他间伐强度均为 70%左

右,都属于中度变异。有机质含量和全氮含量都是随间伐强度的增加而增加,间伐强度达 30%后再减小。

土壤全 P 的范围是 0.27~1.60 g/kg,其中间伐强度 30%的全磷含量均值为 1.01 g/kg,显著高于其他 3 种强度(0.70~0.81 g/kg 之间)。间伐强度 30%的变异系数最高,为 37.62%,间伐强度 40%的变异系数最低,为 25.35%,都属于中度变异。土壤有效磷的范围是 20.21~89.22 mg/kg,各间伐强度的有效磷含量在 45 mg/kg 左右,差异不显著,有效磷含量随着间伐强度的增加而减少,间伐强度达 30%后略微增加。变异系数除间伐强度 30%的略高为 33.90%外,其他 3 种间伐强度的均为 28%左右,都属于中度变异。

土壤全 K 的范围是 10.25~25.00 g/kg,间伐强度 20%的全钾含量显著较高,对照的全钾含量显著较低,其他 2 种的含量在 20 g/kg 左右。变异系数对照和间伐强度 40%的较高,为中度变异,间伐强度 20%和 30%较低,为弱度变异。土壤速效钾的范围是 16.33~97.67 mg/kg,其中间伐强度 40%的速效钾含量均值为 34.98 mg/kg,显著低于其他 3 种强度(46~53 mg/kg 之间)。变异系数除间伐强度 20%的较低外,其他 3 种间伐强度的均为 50%左右,都属于中度变异。

土壤 CEC 的范围是 11.79~32.34 cmol/kg,各间伐处理间差异不显著。变异系数除对照较高为 29.99%,其他 3 种的均在 15%~23%之间,都属于中度变异。

表 2 不同间伐强度土壤肥力因子描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of soil nutrients in different thinning intensity

间伐强度/%		密度 /(g·cm ⁻³)	含水量 /%	pH	有机质 /(g·kg ⁻¹)	有效 P /(mg·kg ⁻¹)	速效 K /(mg·kg ⁻¹)	全 N /(g·kg ⁻¹)	全 P /(g·kg ⁻¹)	全 K /(g·kg ⁻¹)	CEC /(cmol·kg ⁻¹)
对照(0)	范围	0.82~1.64	16.06~51.04	4.87~5.73	24.21~137.74	21.88~71.47	16.33~93.33	0.19~1.67	0.47~1.19	10.25~23.33	11.79~32.34
	均值	1.19a	28.36a	5.31a	65.48a	47.41a	46.33ab	0.72a	0.81a	19.37a	19.47a
	标准差	0.24	8.79	0.26	34.40	12.89	23.79	0.42	0.23	3.51	5.84
	变异系数/%	20.17	30.99	4.90	52.54	27.19	51.35	58.33	28.40	18.12	29.99
20	范围	0.74~1.79	17.00~46.30	4.77~5.61	15.46~262.33	30.07~89.22	28.00~97.67	0.15~2.31	0.27~1.11	17.50~24.67	12.56~21.19
	均值	1.15a	27.49a	5.21ab	82.32a	46.08a	52.10a	0.86ab	0.73a	21.40b	16.93a
	标准差	0.27	8.94	0.24	69.12	14.20	18.30	0.63	0.23	2.14	2.69
	变异系数/%	23.48	32.52	4.61	83.97	30.82	35.12	73.26	31.51	10.00	15.89
30	范围	0.69~1.52	17.46~45.46	4.88~6.02	27.33~239.15	20.21~70.55	19.00~97.33	0.26~2.92	0.43~1.60	17.08~22.58	12.59~26.64
	均值	1.08a	29.65a	5.50c	95.19b	43.57a	52.26a	1.13b	1.01b	20.29ab	18.32a
	标准差	0.24	8.67	0.36	62.29	14.77	26.78	0.74	0.38	1.52	4.21
	变异系数/%	22.22	29.24	6.55	65.44	33.90	51.24	65.49	37.62	7.49	22.98
40	范围	0.83~1.77	15.69~47.02	4.78~5.38	13.58~151.03	28.16~70.90	16.67~78.33	0.14~2.05	0.29~1.02	17.33~25.00	13.42~23.29
	均值	1.22a	26.56a	5.09b	64.00a	44.59a	34.98b	0.74a	0.71a	20.69ab	17.80a
	标准差	0.28	8.02	0.19	42.03	12.33	16.46	0.52	0.18	2.48	2.79
	变异系数/%	22.95	30.20	3.73	65.67	27.65	47.06	70.27	25.35	11.99	15.67

注:均值,同列不同字母表示不同间伐强度之间差异达显著水平($p<0.05$)。

3.2 不同间伐强度土壤肥力因子相关性分析

对各土壤肥力因子进行相关性分析,结果表明

土壤肥力各因子之间关系较为密切(表 3)。土壤密度与全钾呈极显著正相关,而与含水量、有机质、全

氮、全磷、速效钾和 CEC 呈极显著负相关。含水量与有机质、全磷、速效钾和 CEC 呈极显著正相关。pH 值仅与全磷和速效钾呈极显著正相关。有机质、全氮、全磷、有效磷和速效钾各肥力因子之间均呈极显著正相关,即有机质含量越高,全氮、全磷、有效磷和速效钾也越高。全钾与全磷呈极显著正相关,与有机质和全氮呈极显著负相关,与有效磷呈显著负相关。CEC 与有机质和全氮呈极显著正相关。

表 3 土壤肥力因子的相关系数(n=80)

Table 3 Correlation coefficient of soil nutrients

	含水量	pH	有机质	有效 P	速效 K	全 N	全 P	全 K	CEC
密度	−0.737**	−0.079	−0.649**	−0.097	−0.487**	−0.722**	−0.322**	0.228**	−0.221**
含水量		0.103	0.614**	0.123	0.557**	0.667**	0.479**	−0.004	0.201**
pH			0.077	−0.033	0.329**	0.080	0.314**	−0.086	−0.088
有机质				0.284**	0.511**	0.915**	0.303**	−0.306**	0.171**
有效 P					0.207**	0.240**	0.266**	−0.132*	0.033
速效 K						0.516**	0.449**	−0.126	0.110
全 N							0.404**	−0.233**	0.184**
全 P								0.225**	−0.017
全 K									−0.056

注: * 表示显著相关($p<0.05$), ** 表示极显著相关($p<0.01$)。

3.3 不同间伐强度土壤肥力综合评价

主要选择了土壤密度、含水量、pH 值、有机质、全氮、全磷、全钾、有效磷、速效钾和 CEC 共 10 个指标作为评价该区域土壤肥力的指标体系。由于各土壤肥力因子之间的相关性较强,可以采用主成分分析法对东北近天然落叶松云冷杉林不同间伐强度的土壤肥力进行综合评价。

为了筛选出主要因素的因子群,对各土壤肥力因子进行主成分分析,主成分特征根的大小表示对

应主成分能够描述原来所有信息的多少,根据主成分分析原理,当累积方差贡献率>85%时,则可基本反映系统的变异信息^[14]。表 4 中第 1 主成分的方差贡献率最大,为 41.609%,第 2、3、4 主成分的方差贡献率分别为 20.006%、13.706%和10.498%,累计方差贡献率达 85.819%。因此,前 4 个主成分的综合指标基本能反映土壤肥力系统内的变异信息。

表 4 总方差解释

Table 4 Interpretation of total variance

成分	初始特征值			提取平方和载入		
	特征根	贡献率	累计贡献率	特征根	贡献率	累计贡献率
1	4.161	41.609	41.609	4.161	41.609	41.609
2	2.001	20.006	61.614	2.001	20.006	61.614
3	1.371	13.706	75.320	1.371	13.706	75.320
4	1.049	10.498	85.819	1.049	10.498	85.819
5	0.502	5.021	90.840			
6	0.458	4.579	95.419			
7	0.278	2.778	98.197			
8	0.117	1.168	99.365			
9	0.051	0.508	99.873			
10	0.013	0.127	100.00			

表 5 为前 4 个主成分的得分系数矩阵,可以看出第 1 主成分主要包括土壤密度、含水量、有机质、全钾和全氮,第 2 主成分主要包括 pH 值、速效钾和全磷,第 3 主成分主要包括含水量、全磷、全钾和 CEC,第 4 主成分主要包括有机质、有效磷和速效钾,其中第 1 主成分的方差贡献率最大。由此可得反映土壤肥力水平的 4 个主成分表达式:

$$F_1 = -0.380X_1 + 0.236X_2 - 0.065X_3 + 0.304X_4 - 0.085X_5 - 0.188X_6 + 0.361X_7 - 0.044X_8 - 0.005X_9 + 0.059X_{10}$$

$$\begin{aligned} F_2 &= 0.103X_1 - 0.018X_2 + 0.479X_3 - 0.081X_4 - 0.012X_5 + 0.446X_6 - 0.089X_7 + 0.290X_8 - 0.103X_9 + 0.062X_{10} \\ F_3 &= 0.068X_1 + 0.268X_2 - 0.186X_3 - 0.012X_4 - 0.041X_5 - 0.113X_6 + 0.023X_7 + 0.204X_8 + 0.532X_9 - 0.406X_{10} \\ F_4 &= 0.146X_1 - 0.273X_2 - 0.178X_3 + 0.094X_4 + 0.706X_5 + 0.294X_6 - 0.052X_7 - 0.031X_8 - 0.153X_9 - 0.342X_{10} \end{aligned}$$

表 5 成分得分系数矩阵

因子	成分			
	1	2	3	4
土壤密度(X_1)	-0.380	0.103	0.068	0.146
含水量(X_2)	0.263	-0.018	0.268	-0.273
pH 值(X_3)	-0.065	0.479	-0.186	-0.178
有机质(X_4)	0.304	-0.081	-0.012	0.094
有效磷(X_5)	-0.085	-0.012	-0.041	0.706
速效钾(X_6)	-0.188	0.446	-0.113	0.294
全氮(X_7)	0.361	-0.089	0.023	-0.052
全磷(X_8)	-0.044	0.290	0.204	-0.031
全钾(X_9)	-0.005	-0.103	0.532	-0.153
CEC(X_{10})	0.059	0.062	-0.406	-0.342

将各样地土壤肥力因子分别代入上述表达式计

表 6 不同间伐强度土壤肥力综合得分

Table 6 Comprehensive scores of soil fertility quality in different thinning intensity							
间伐强度/%	样地号	F1	F2	F3	F4	综合得分	总得分
对照	302	0.325 3	-0.855 4	0.104 7	-0.033 4	-0.458 9	-2.311 1
	306	-0.947 9	0.950 1	-2.549 5	1.163 8	-1.383 6	
	309	-0.259 7	1.375 0	0.423 4	0.598 4	2.137 1	
	315	-0.042 3	-0.289 8	-1.417 8	-1.948 1	-3.698 1	
	320	-0.530 3	-0.364 9	1.412 0	0.575 7	1.092 5	
20	304	2.412 8	-1.331 3	0.291 6	1.972 0	3.345 1	2.490 9
	307	0.156 0	0.080 6	-0.657 6	-0.867 9	-1.288 9	
	311	-1.808 3	0.120 5	1.041 2	0.256 0	-0.390 7	
	316	-0.330 3	0.838 2	0.171 6	-0.386 3	0.293 2	
	317	-0.748 4	-0.070 1	0.167 0	1.183 8	0.532 3	
30	303	0.495 5	-0.281 4	0.489 2	-0.465 4	0.237 9	3.836 4
	305	-0.380 3	-0.299 1	-1.486 6	0.049 1	-2.116 9	
	310	1.212 7	2.340 9	-0.113 8	0.636 1	4.075 9	
	314	0.698 4	-0.784 7	0.028 9	-1.435 4	-1.492 8	
	319	0.988 4	2.007 9	1.243 5	-1.107 6	3.132 2	
40	301	0.799 7	-0.550 7	-0.359 4	0.775 5	0.665 2	-4.016 2
	308	-0.662 4	-0.876 2	-0.731 5	0.336 6	-1.933 6	
	312	-1.675 3	-0.501 1	1.221 7	-0.255 2	-1.209 9	
	313	0.698 4	-0.784 7	0.028 9	-1.435 4	-1.492 8	
	318	-0.401 9	-0.723 6	0.692 5	0.388 0	-0.045 1	

度无显著变化的结论相一致。土壤密度随间伐强度的增加先降低再升高,土壤含水量则呈波动变化,其中间伐强度 30% 的土壤密度最低、含水量最高,而间伐强度 40% 的土壤密度最高、含水量最低,这主要是在间伐强度为 30% 时林木长势较好、林下植被较为丰富,使得土壤更为疏松,储存了更多的水分;当森林间伐强度达到 40% 时,枯落物层的减少使土壤层受雨水侵蚀及淋溶过程增强^[16],同时采伐过程对林地土壤也产生了一定的压实作用。间伐对土壤 pH 值的影响显著,其中间伐强度 30% 的土壤更偏向于中性,而间伐强度 40% 的土壤更偏向于酸性,pH 值的变异系数较其他肥力因子都小。土壤 pH 值的变化极大影响着土壤养分的有效性和植被的营养状态,森林枯落物分解时的有机酸可以使根际土

算各主成分的得分,再以各主成分的方差贡献率为权数,对所提取的得分进行加权求和,得到各样地的土壤肥力水平的综合得分(表 6)。同时,根据每个间伐强度 5 块样地得分的总和计算出东北近天然落叶松云冷杉林不同间伐强度的土壤肥力综合指数,得出对照、20%、30%、40% 的综合得分分别为 -2.311 1、2.490 9、3.836 4、-4.016 2。土壤肥力由高到低为 30%、20%、对照、40%。

4 结论与讨论

4.1 间伐强度对土壤肥力因子的影响

不同间伐强度下土壤密度和含水量差异均不显著,这与 Laiho^[15]等得出的森林湿地间伐后土壤密

壤的 pH 值下降^[17],适当的间伐强度能够促进林木生长,从而改良土壤 pH 值,同时研究区内较为统一的植被也使得土壤 pH 处于弱度变异。

土壤有机质是土壤和植物间物质交换的重要环节,它与土壤矿质部分共同作为植物营养的来源。不同间伐强度下土壤有机质含量差异显著,它随间伐强度的增加先升高再降低,间伐强度在 30% 时含量最高,这与卢慧翠^[18]等在大兴安岭研究得出的适当采伐能够增加有机质含量的结论一致,同时全氮含量与有机质含量的变化规律一致。由于土壤中的有机质主要来自枯落物,在间伐强度 30% 时林内水热条件较好,有利于提高枯落物及采伐剩余物的分解速率与有机质的矿化作用,同时采伐后林下植物群落的变化也有利于森林土壤有机质含量的增

加^[19]。当间伐强度达到 40%时,土壤有机质含量又显著降低,这与卢慧翠^[19]等所得出的强度采伐显著降低了土壤有机碳含量的结论相一致,这可能是由于较大强度采伐使枯落物明显减少,导致土壤碳的补充速率降低^[20],同时较大强度的采伐进一步提高了土壤温度及降低了水位,加速土壤中有机质的分解消耗^[21]。土壤中的氮素主要来源于土壤有机质的转化、大气干湿沉降和生物固氮等^[22],在研究区域内,大气干湿沉降和生物固氮所占比例较小,氮素主要来源于有机质的转化,因此土壤全氮含量变化规律与有机质的一致。

不同间伐强度下土壤全磷含量差异显著,而有效磷含量差异不显著,全磷呈波动变化,间伐强度 30%的全磷含量显著高于其他,有效磷则随间伐强度的增加先降低再升高。土壤中的磷素大部分是以固定态存在,而有效磷是土壤磷素供应能力的表征,在森林中土壤磷素主要来源于林地枯落物的矿化以及土壤矿质颗粒的风化^[23]。由于有效磷可以被植物直接吸收,因此林木长势较好、林下植被较丰富的间伐强度 30%的土壤有效磷较低。不同间伐强度下土壤全钾和速效钾的含量均具有明显差异性,全钾呈波动变化,速效钾则随间伐强度的增加先升高再降低,同时间伐强度 20%的全钾含量显著高于其他,而间伐强度 40%的速效钾含量显著低于其他。钾元素大部分以原生矿物形态分布在土壤粗粒部分,难以被植物利用^[24],但是钾从枯落物中释放的速度却比较快,因此植被和枯落物都较少的间伐强度 40%的土壤速效钾较低,而全钾呈波动变化。CEC 是衡量土壤肥力的主要指标,能直接反映土壤保肥、供肥性能和缓冲能力^[24]。相关性分析表明,CEC 与土壤密度呈负相关,与有机质含量正相关,这与刘世全^[25]等在西藏地区所得到的 CEC 主要受土壤有机质和土壤机械组成影响的研究结果一致。CEC 是以土壤胶体(有机质和矿质胶体)为载体,由于它受土壤粒径和有机质含量的双重影响,也造成了研究区内不同间伐强度下土壤 CEC 差异性不明显,且随间伐强度增加而呈波动变化。

4.2 间伐强度对土壤肥力质量的影响

近天然落叶松云冷杉林不同间伐强度下土壤肥力质量由高到低依次为:30%、20%、对照、40%。间伐的主要目的在于调整林分结构,改善林分环境,培育保留木使其达到一定的培育目标。林分实施间伐后,降低了林分的郁闭度,林内的光照得到了增加,从而促进了林下灌木和草本植物的生长发育;随着光照的增加,林内的温度也有小范围的升高,林内的水分条件也有了一定变化,林内水、热条件的变化引

起微生物活性发生变化,进而影响到枯落物的分解速率。由于间伐对林地土壤肥力的影响是双向的,因此选择合适的间伐强度成为了研究的重点。在本研究中,土壤肥力质量先随着间伐强度的增加而增加,但是当间伐强度达到 40%时,土壤肥力反而急速下降,这主要是由于当采伐强度过大时地表植物覆盖度会增加,林下植物对土壤养分的消耗增大,而林内枯落物产生量却大大减少,土壤肥力耗损大于归还,土壤肥力质量反而下降。因此中度间伐(间伐强度 30%)最适合研究区内土壤肥力质量的提高和改善。

参考文献:

[1] 曹志洪,周健民. 中国土壤质量[M]. 北京:科学出版社,2008: 32-33.

[2] 候光炯. 土壤学论文选集[M]. 成都:四川科学技术出版社, 1990:9-23.

[3] 熊毅,李庆逵. 中国土壤[M]. 北京:科学出版社,1990:20-26.

[4] 单奇华,张建锋,俞元春,等. 城市森林土壤肥力质量综合评价[J]. 水土保持通报,2009,29(4):186-191.

SHAN Q H, ZHANG J F, YU Y C, *et al.* Comprehensive e-valuation of soil fertility quality of city forest [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009,29(4):186-191. (in Chinese)

[5] KAUFMANN M, TOBIAS S, SCHULIN R. Quality evaluation of restored soils with a fuzzy logic expert system [J]. Geoderma, 2009,151(34):290-302.

[6] 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.

YANG Q Y, YANG J S, YAO R J, *et al.* Comprehensive e-valuation of soil fertility by GIS and improved grey relation model [J]. Transactions of CSAE, 2010,26(4):100-105. (in Chinese)

[7] 章海波,骆永明,赵其国,等. 香港土壤研究 V 基于改进层次分析法的土壤肥力质量综合评价[J]. 土壤学报,2006,43(4): 577-583.

ZHANG H B, LUO Y M, ZHAO Q G, *et al.* Hong Kong soli researches V integrated evaluation of soil fertility quality based on the improved analytic hierarchy process [J]. Acta Pedologica Sinica, 2006,43(4):577-583. (in Chinese)

[8] 杨晓娟,王海燕,刘玲,等. 不同林龄长白落叶松人工林土壤肥力[J]. 东北林业大学学报,2013,41(3):51-56.

YANG X J, WANG H Y, LIU L, *et al.* Soil fertility in Korean larch plantations of different stand age [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013,41(3):51-56. (in Chinese)

[9] 郭艳娜,霍沁建,袁玲. 森林土壤肥力概述[J]. 中国农学通报, 2004,20(3):143-148.

GUO Y N, HUO Q J, YUAN L. Summarization of forest soil fertility[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2004,20 (3):143-148. (in Chinese)

[10] LAHDE E, LAIHO O, NOROKORPI Y, *et al.* Develop-

ment of norway spruce dominated stands after single-tree selection and low thinning[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2002, 32:1577-1584.

[11] CROW T R, BUCKLEY D S, NAUERTZ E A, *et al.* Effects of management on the composition and structure of northern hardwood forests in upper Michigan[J]. Forest Science, 2002, 48:129-145.

[12] 王海燕,雷相东,张会儒,等. 近天然落叶松云冷杉林土壤有机碳研究[J]. 北京林业大学学报,2009,31(3):11-16.

WANG H Y, LEI X D, ZHANG H R, *et al.* Soil organic carbon in semi-natural mixed larch-spruce-fir stands of Northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009,31(3):11-16. (in Chinese)

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2010:14-110.

[14] 何晓群. 多元统计分析[M]. 北京:中国人民大学出版社,2008:153-169.

[15] LAIHO R, SANCHEZ F, TIARKS A, *et al.* Impacts of intensive forestry on early rotation trends in site carbon pools in the southeastern US[J]. Forest Ecology and Management, 2003,174(3):177-189.

[16] GARTEN C T, POST W M, HANSON P J, *et al.* Forest soil carbon inventories and dynamics along an elevation gradient in the Southern Appalachian Mountains[J]. Biogeochemistry,1999,45(2):115-145.

[17] 宋金凤. 凋落物中的有机酸及其对森林土壤的磷释放效应[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2003.

[18] 卢慧翠,牟长城,王彪,等. 采伐对大兴安岭落叶松-苔草沼泽土壤有机碳储量的影响[J]. 林业科学研究,2013,26(4):459-466.

LU H C, MOU C C, WANG B. Effects of harvesting on soil organic carbon storage of boreal *Larix gmelinii*-*Carex schmidtii* wetlands in Daxing'anling[J]. Forest Research, 2013,26(4):459-466. (in Chinese)

[19] TRETTIN C C, JURGENSEN M F, GALE M R, *et al.* Recovery of carbon and nutrient pools in a northern forested wetland 11 years after harvesting and site preparation[J]. Forest Ecology and Management,2011,262(9):1826-1833.

[20] POWERS R F, FRAZER D W, MCCOLL J G. Soil nitrogen mineralization in a clearcutting chronosequence in a Northern California conifer forest[J]. Soil Science Society of America Journal,1990,54(4):1145-1152.

[21] JIANG H, APPS M J, PENG C, *et al.* Modelling the influence of harvesting on Chinese boreal forest carbon dynamics [J]. Forest Ecology and Management,2002,169(1):65-82.

[22] 耿玉清,余新晓,岳永杰,等. 北京山地森林的土壤养分状况[J]. 林业科学,2010,46(5):169-175.

GENG Y Q, YU X X, YUE Y J, *et al.* Variation of forest soil nutrient content in mountainous areas, Beijing [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010,46(5):169-175. (in Chinese)

[23] 王红娟. 我国北方粮食主产区土壤养分分布特征研究[D]. 北京:中国农业科学研究院,2007.

[24] LUDWIG B, KOLBL A. Modelling cation ex-change in columns of disturbed and undisturbed subsoil [J]. European Journal of Soil Science,2002,53((12):645-653.

[25] 刘世全,蒲玉琳,张世熔,等. 西藏土壤阳离子交换量的空间变化和影响因素研究[J]. 水土保持学报,2004,18(5):1-5.

LIU S Q, PU Y L, ZHANG S R, *et al.* Spatial change and affecting factors of soil cation exchange capacity in Tibet [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004,18(5):1-5. (in Chinese)