

不同林分密度华北落叶松人工林土壤养分特征^①

赵伟文, 梁文俊, 魏 曦

山西农业大学 林学院, 山西 太谷 030801

摘要: 为了研究不同林分密度华北落叶松人工林土壤养分的变化,以河北省木兰围场内落叶松人工林为研究对象,系统采集了区域内土壤表层及深层样品,采用方差分析、克拉克插值法等分析方法,研究了林分密度对土壤有机质、全氮、全磷质量分数及空间分布的影响。结果表明:该区域0~20 cm土壤有机质、全氮、全磷质量分数最高,分别为65.23,2.99,0.25 g/kg,40~60 cm土壤有机质、全氮、全磷质量分数最低,分别为25.85,1.79,0.19 g/kg。相同土层深度下,未经人工抚育的样地土壤有机质、全氮、全磷质量分数明显高于其他受到人为干预过的样地,同时,随着林分密度的增加,土壤有机质、全氮、全磷质量分数呈现先增大后减小的趋势。对比3块典型样地空间格局得出,该区域土壤有机质、全氮、全磷的空间相关性较大,表现为在东北方向上占优势。林分密度与土壤养分表现出显著的相关性,华北落叶松表现出一定的异质性空间分布特征。

关键词: 落叶松人工林;林分密度;土壤养分;空间格局

中图分类号: S714.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2019)04-0084-09

土壤是林木生长和发挥生态功能的保障,土壤的健康直接影响森林系统的稳定。林木的生长发育、凋零物及其降解物等都会使土壤理化性质发生变化,最终对土壤健康产生影响^[1]。这些影响中,林分密度是制约林木群体生长发育过程的关键因素,是人工林群落的重要结构特征,林分密度管理是提高人工林生产力和水源涵养功能的重要途径^[2],是评价林木系统好坏的重要指标。在土壤理化性质中,养分直接影响植物生长的程度,影响着植物根系生长,具有高度的空间异质性。土壤有机质是土壤养分的重要组成部分,是植物营养元素的主要来源,可以促进植物和微生物的生理活性,在土壤肥力、环境保护等方面具有很重要的意义^[3]。氮元素在生态系统物质循环过程中对其生产力起着关键的作用^[4],同时,在植物体内的分配格局可以反映出植物对土壤的利用能力。磷元素在植物生长过程中参与光照、呼吸等能量转换,具有难溶性和难移性等特点,成为限制植物生长的主要因子^[5-7]。目前国内许多学者就人工林林分密度与土壤养分的关系和林分生长的关系^[8-10]进行了研究,如盛炜彤^[11]研究表明,适当降低杉木人工林林分密度,对维护土壤肥力有较大作用,有利于林地保持长期的生产力,对维护整个人工林生态系统稳定性有很大的作用;康冰等^[12]研究表明,不同密度马尾松人工林土壤理化性质差异明显。而对不同林分密度落叶松人工林和土壤养分关系的研究鲜见报道。对土壤垂直深度和林分密度的研究可以深入了解土壤发育、积累、形成及人工林生长、形成变化过程,不仅有助于了解森林土壤的变化规律,还对评价森林体系及森林土壤健康程度有积极意义。

① 收稿日期:2018-06-11

基金项目:国家自然科学基金项目(31500523);山西农业大学引进人才科研启动项目(2014YJ19)。

作者简介:赵伟文(1993-),男,硕士研究生,主要从事水土保持的研究。

通信作者:梁文俊,副教授,博士。

本研究以河北省木兰围场的不同林分密度的华北落叶松人工林为对象, 通过分析目前林地内不同林分密度落叶松人工林的生长状况, 同时分析土壤养分的差异变化, 了解不同林分密度条件下林木的群体结构变化特征, 探究林木个体间相互影响、制约和联系的作用规律, 研究林场内土壤有机质、全氮和全磷质量分数的变化特点, 从而确定何种密度条件林分内部个体间相互抑制作用达到最小. 通过对比典型样地不同密度的土壤养分质量分数, 同时研究土壤养分垂直方向的空间异质性分布特征, 旨在阐明在何种林分密度条件下, 土壤养分利用率最有效, 为华北落叶松人工林可持续经营和维持该地区土壤肥力提供科学依据, 以期实现更大的效益和价值.

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于河北省围场县境内的木兰国营林场, 地理坐标为 $116^{\circ}32'-118^{\circ}14'E$, $41^{\circ}35'-42^{\circ}40'N$, 南临京津地区, 北接内蒙古浑善达克沙地, 属于中温带向寒温带过渡、半干旱向半湿润过渡的山地气候, 具有水热同季、冬长夏短、四季分明、昼夜温差大的特征, 年均气温 $-1.4^{\circ}C\sim 4.7^{\circ}C$, 最高气温 $38.9^{\circ}C$, 最低气温 $-42.9^{\circ}C$, 年均降水量 $380\sim 560\text{ mm}$, 主要集中在 7—9 月, 平均日照为 $2\,832\text{ h}$. 灾害天气主要有暴雨、冰雹、沙暴等. 林场内土壤有棕壤、褐土、风砂土、草甸土、沼泽土、灰色森林土和黑土 7 类, 分为 7 个植被类型 53 个群系, 有维管植物科 382 属 693 种. 主要乔木有落叶松、油松、云杉、白桦等; 主要灌木有山杏、绣线菊、照山白等; 主要草本植物有羊胡子草、披碱草等.

1.2 研究方法

1.2.1 样地调查与土样采集

选取林场内 6 块华北落叶松人工林样地, 每块调查样地大小为 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$, 对样地进行调查, 测量胸径、树高、枝下高和冠幅. 采用“X”型和“S”型相结合的采样法取土, 每块样地设置 8~10 个样点, 用土钻取样, 按 $0\sim 20\text{ cm}$, $20\sim 40\text{ cm}$ 和 $40\sim 60\text{ cm}$ 间 3 个层次采集各土层的土样, 共采集 180 个土样. 放入铝盒内保存带回实验室, 将土样中的杂质去除, 自然风干、研磨、过筛后, 放入封口袋保存, 用于后期土壤理化性质的分析测定. I, II, III 号样地林分为落叶松; IV, V 号样地林分为落叶松, 伴有少量白桦; VI 号样地林分为落叶松, 伴有少量油松. V 号样地未经过人工抚育, 其他 5 块样地经过人工抚育(表 1).

表 1 样地基本情况

样地号	密度/(株 $\cdot\text{hm}^{-2}$)	平均胸径/cm	平均树高/m	平均枝下高/m	平均冠幅/m
I	1 407	15.2	11.9	5.6	5.6
II	600	17.6	13.0	7.2	4.6
III	1 675	17.4	13.0	4.5	3.3
IV	1 860	14.9	11.4	5.0	2.4
V	1 104	17.8	13.3	6.2	3.0
VI	788	17.1	10.9	4.3	3.9

1.2.2 土样测定

土壤理化性质测定方法: 土壤有机质质量分数采用重铬酸钾容量法—稀释热法测定, 利用浓 H_2SO_4 和 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 混合产生的稀释热促使有机质氧化; 土壤全磷质量分数采用硫酸—高氯酸消煮—钼锑抗比色法测定; 土壤全氮质量分数采用凯式定氮法测定.

1.2.3 数据处理与分析方法

采用 Excel 2013 和 SPSS 22.0 进行数据的统计分析和检验, 采用单因素方差分析(one-way ANOVA)的方法分析不同土壤深度对土壤养分的异质性变化规律, 采用双因素方差分析方法分析林分密度和土层深度对土壤养分的影响, 并用 LSD 法进行差异显著性检验, 显著性水平设定为 $\alpha=0.05$. 研究土壤理化性质的空间变异性主要通过统计学变异函数分析, 在变异函数基础上, 取用克拉克空间插值法进行二维空间绘

制, 探索土壤有机质、全氮和全磷的空间分布特点和变化模式, 运用 GS+ 软件进行绘制.

2 结果与分析

2.1 不同林分土壤理化性质分析

由表 2 可知, 不同林分的 6 块样地中, 有机质质量分数最高的为 V 号样地 (80.09 g/kg), 全氮质量分数最高的为 V 号样地 (3.86 g/kg), 全磷质量分数最高的为 II 号样地 (0.34 g/kg). 方差分析表明, 林分密度显著影响 0~20 cm 土层深度有机质的质量分数 ($p<0.05$), 对 20~60 cm 土层深度有机质的质量分数影响差异无统计学意义 ($p>0.05$), 随着土层深度的增大, 土壤有机质呈递减的趋势, 说明土壤有机质具有表聚性.

表 2 不同林分土壤各层次主要养分描述统计 /(g · kg⁻¹)

样地	测定指标	土 层		
		0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm
I	有机质	59.95±29.49ab	32.78±18.76ab	25.99±13.61a
	全氮	2.69±1.14abc	2.15±1.05a	1.81±1.12a
	全磷	0.22±0.06ab	0.16±0.06a	0.21±0.07a
II	有机质	61.56±17.04bc	43.18±8.04ab	28.79±9.46a
	全氮	2.32±0.59b	2.46±0.93ab	1.95±0.53a
	全磷	0.34±0.06a	0.33±0.08a	0.27±0.05a
III	有机质	58.69±15.62b	45.38±18.02a	35.67±14.41a
	全氮	3.65±0.78b	2.38±0.72a	3.09±0.75ab
	全磷	0.30±0.08a	0.26±0.08a	0.24±0.05a
IV	有机质	63.12±6.17ab	30.26±9.01a	24.54±6.26a
	全氮	2.91±0.20a	1.23±0.42a	1.41±0.66a
	全磷	0.19±0.02abc	0.21±0.13a	0.13±0.02a
V	有机质	80.09±20.28ab	34.25±7.80a	20.11±4.55a
	全氮	3.86±1.03a	1.78±0.33a	1.62±0.20a
	全磷	0.26±0.06b	0.19±0.01a	0.15±0.02a
VI	有机质	67.97±15.06b	33.28±9.45a	20.02±3.32a
	全氮	2.55±1.20ab	1.63±0.67ab	0.85±0.65a
	全磷	0.18±0.04b	0.15±0.02ab	0.12±0.03a
平均值	有机质	65.23±17.28ab	36.52±11.85a	25.85±8.60a
	全氮	2.99±0.82ab	1.94±0.69a	1.79±0.65a
	全磷	0.25±0.05a	0.22±0.06a	0.19±0.04a

注: 小写字母表示差异有统计学意义, $p<0.05$.

由表 3 可知, 不同林分密度对不同土层深度的土壤有机质、全氮、全磷质量分数差异有统计学意义 ($p<0.05$). 0~20 cm 土层是地表土层, 地上植物凋落物的分解、地下根系残体和根系分泌物的产生和积累提供了大量的有机质. 40~60 cm 土层接近母质层, 土壤有机质转化程度较低. 在 0~20 cm 土层, 当株数密度从 788 株/hm² 增加到 1 104 株/hm² 时, 土壤有机质的质量分数呈现增大的趋势. 当株数密度增大到 1 675 株/hm² 时, 土壤有机质的质量分数却明显减小. 其中未经人工抚育的落叶松林 (V 号样地), 土壤有机质质量分数最高, 并且 V 号样地与 III 号样地土壤有机质的质量分数存在明显的差异; 在 20~60 cm 土层, 土壤有机质的质量分数最高的是株数密度相对较高的 III 号样地, 这可能是由于高林分密度条件下, 相对密集根系效应所导致的.

从表 2 看出, 随着土层深度的增加, 各样地全氮质量分数呈现明显减少的趋势, 与土壤有机质的变化规律相一致, 有机质的分解可提供大量的氮素. 方差分析表明, 不同林分密度与土壤全氮质量分数差异有

统计学意义($p<0.05$). 在 0~20 cm 土层, 林分密度最小的Ⅱ号样地土壤含氮量最小, 并且与株数密度相对较高的Ⅳ号样地和Ⅴ号样地差异有统计学意义, 当株数密度从 600 株/hm²增加到 1 104 株/hm²时, 土壤含氮量呈现增大的趋势, 而当株数密度增大到 1 407 株/hm²时, 土壤含氮量却呈现下降的趋势; 在 20~60 cm 土层, 株数密度相对较高的Ⅲ号样地土壤含氮量最高, 当株数密度从 788 株/hm²增加到 1 675 株/hm²时, 土壤全氮质量分数呈现增加的趋势. 可能的原因是株数密度大的林分有机质残留的数量较多, 根系有机质利用率较高, 使土壤全氮质量分数增大.

表 3 林分密度与土层深度对土壤养分的分析结果

土壤养分	来源	第三类平方和	<i>df</i>	平均值平方	<i>F</i>	<i>p</i>
有机质/(g·kg ⁻¹)	模型	191 097.64	8	23 887.21	110.44	0.00
	密度	717.24	5	143.44	10.66	0.01
	土层深度	25 501.44	2	12 750.72	58.95	0.00
全氮/(g·kg ⁻¹)	模型	538.24	8	67.28	105.34	0.00
	密度	20.14	5	4.03	6.31	0.00
	土层深度	34.48	2	17.22	26.98	0.00
全磷/(g·kg ⁻¹)	模型	4.52	8	0.56	161.82	0.00
	密度	0.25	5	0.05	14.41	0.00
	土层深度	0.05	2	0.03	7.91	0.01

随着土层深度的增加, 土壤全磷质量分数下降的趋势较平缓, 下降幅度较小. 方差分析表明: 林分密度对 0~20 cm 和 40~60 cm 土层土壤的全磷质量分数存在显著影响($p<0.05$), 在 0~20 cm 土层, 株数密度从 788 株/hm²增加到 1 407 株/hm²时, 土壤全磷质量分数呈现增大的趋势; 当株数密度增加到 1 675 株/hm²时, 土壤全磷质量分数呈现下降趋势. 在 40~60 cm 土层, 土壤全磷质量分数呈现增加的趋势. 可能的原因是凋落物在矿化过程中提供大量的磷酸根, 但移动能力较差, 在一定深度的土层中会出现沉淀. 同时随着时间的推移, 受元素迁移、淋溶及幼苗、杂草等的消耗, 土壤全磷在不同林分及土层中的变化特点会不相同.

2.2 土壤理化性质的变异函数分析

为了更好地研究土壤空间的变异性, 选取 3 个梯度的样地, 林分密度最小的Ⅱ号、林分密度最大的Ⅳ号和林分密度中值的未经人工抚育的Ⅴ号样地, 通过对这 3 块样地进行分析, 基本上可以知道其他 3 块样地的土壤空间变异性, 前后相邻的样地林分密度相差不大, 因此得出的数据可靠(表 4).

表 4 土壤主要养分变异函数参数

样地	主要养分	模型	块金值 (<i>C</i> ₀)	基台值 (<i>C</i> ₀ + <i>C</i>)	变程 (<i>a</i>)	结构比 (<i>C</i> / <i>C</i> ₀ + <i>C</i>)	<i>R</i> ²	残差
Ⅱ	有机质	高斯模型	38.00	686.90	31.90	0.95	0.97	4 205
Ⅳ		高斯模型	5.50	312.89	22.59	0.98	0.96	2 791
Ⅴ(CK)		球形模型	20.00	773.78	10.37	0.97	0.97	4 843
Ⅱ	全氮	球形模型	0.08	0.79	14.20	0.89	0.17	1.53
Ⅳ		球形模型	0.17	1.57	29.58	0.88	0.64	2.51
Ⅴ(CK)		球形模型	0.18	1.89	14.00	0.90	0.78	1.03
Ⅱ	全磷	指数模型	0.02	0.25	99.57	0.92	0.83	0.06
Ⅳ		球形模型	0.00	0.01	19.44	0.95	0.73	0.00
Ⅴ(CK)		球形模型	0.00	0.01	15.80	0.93	0.97	0.00

从表 4 中可以看出, 通过拟合不同林分密度的样地, 土壤有机质、全氮、全磷质量分数有不同的最佳理论模型, Ⅱ号、Ⅳ号、Ⅴ号样地土壤有机质的最优模型分别为高斯模型、高斯模型、球形模型, Ⅱ号、Ⅳ号、Ⅴ号样地土壤全氮的最优模型都为球形模型, Ⅱ号、Ⅳ号、Ⅴ号样地土壤全磷的最优模型分别为指数模型、球形模型、球形模型. 随着林分密度的增大, 变程呈递减的趋势, 说明林分密度与土壤理化性质在较

大空间范围内表现出相关性,反映出该区域土壤凋落物、温度等环境因素对其影响较大.本次采集土壤间距不大,完全覆盖在土壤有机质、全氮、全磷的变化范围之内,说明采样数据符合变异性评价要求.3种不同林分典型样地的土壤有机质、全氮、全磷的结构比基本保持一致,都保持在0.97,0.88,0.93左右,均大于75%,说明该区域土壤有机质、全氮、全磷有较强的空间相关性.

绘制3块不同林分密度的样地土壤养分的空间格局图(图1).Ⅱ号样地土壤有机质的质量分数集中在42.9~64.6 g/kg,其他部分分布较均匀,较高的斑块较少.Ⅳ号样地有机质分布较均匀,大都集中在32.7~52.6 g/kg.Ⅴ号样地土壤有机质分布最为均匀,不受人为因素的影响,整个斑块大都集中在33.1~71.9 g/kg上.Ⅱ号样地的土壤全氮质量分数集中在2.46 g/kg,Ⅳ号样地全氮质量分数集中在1.32~2.35 g/kg,Ⅴ号样地土壤全氮分布在2.10~4.02 g/kg.Ⅱ号样地土壤全磷质量分数集中在0.28~0.38 g/kg,Ⅳ号样地土壤全磷质量分数集中在0.13~0.20 g/kg,Ⅴ号样地土壤全磷质量分数集中在0.21~0.29 g/kg,分布较均匀.

由图1可知,Ⅱ号样地土壤有机质的质量分数在西南—东南方位上空间异质性最大,土壤含氮量和土壤全磷质量分数在东北方向上空间异质性最大.图2中Ⅳ号样地土壤有机质的质量分数、全氮质量分数和全磷质量分数在东北方向上空间异质性最大.图3中Ⅴ号样地土壤有机质的质量分数在东北方向上空间异质性最大,说明南—东北方向上土壤有机质质量分数在格局上占绝对优势.土壤全氮质量分数在东南方向上空间异质性最大,说明东北方向上土壤全氮质量分数在格局上占绝对优势,土壤全磷质量分数在西南方向上空间异质性最大,说明东北方向上土壤全磷质量分数在格局上占绝对优势.从各样地来看,总体上东北方向土壤有机质、全氮、全磷质量分数在格局上占绝对优势,因为该方位处于样地右下坡位,该处凋落物累积肥沃,样地土壤有机质、全氮、全磷质量分数相对较高.可以推断出在东北方向上6块样地的土壤有机质、全氮、全磷质量分数在格局上占绝对优势.

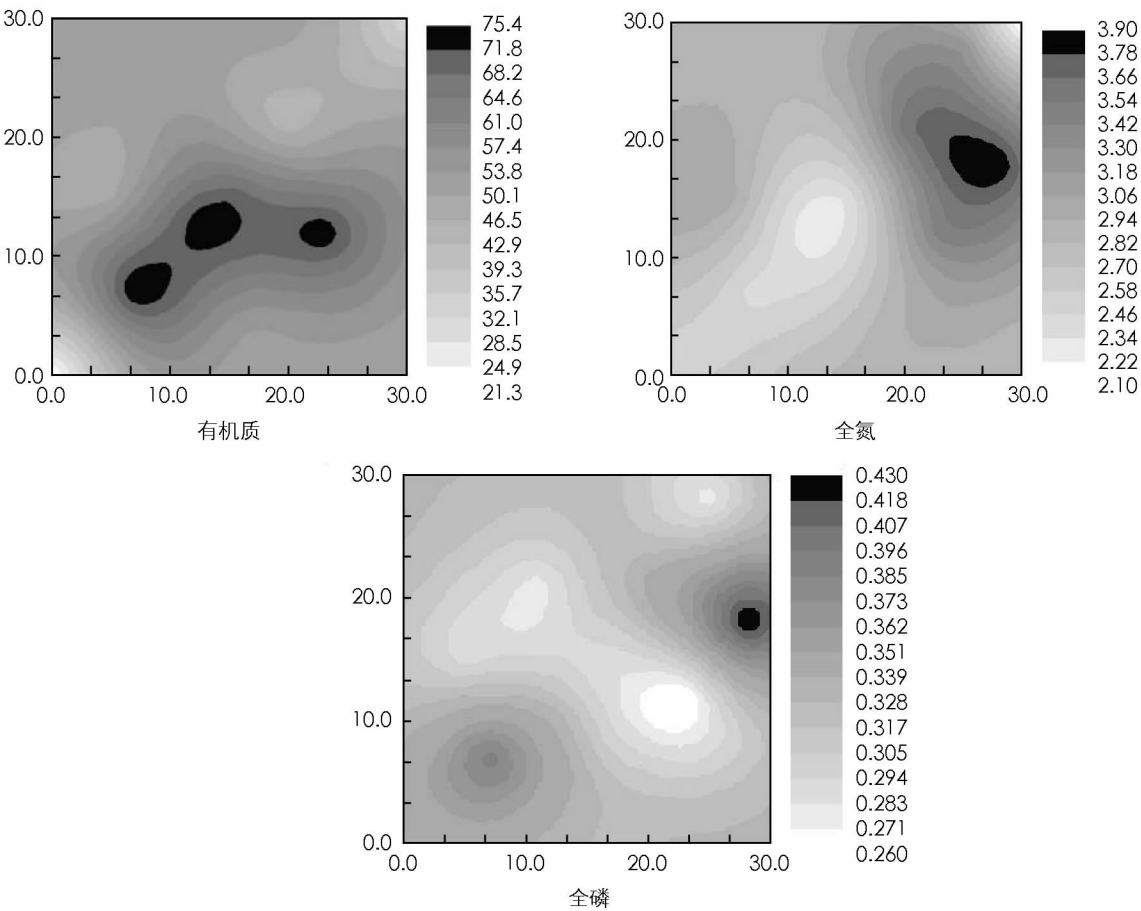


图 1 Ⅱ号样地土壤养分空间格局

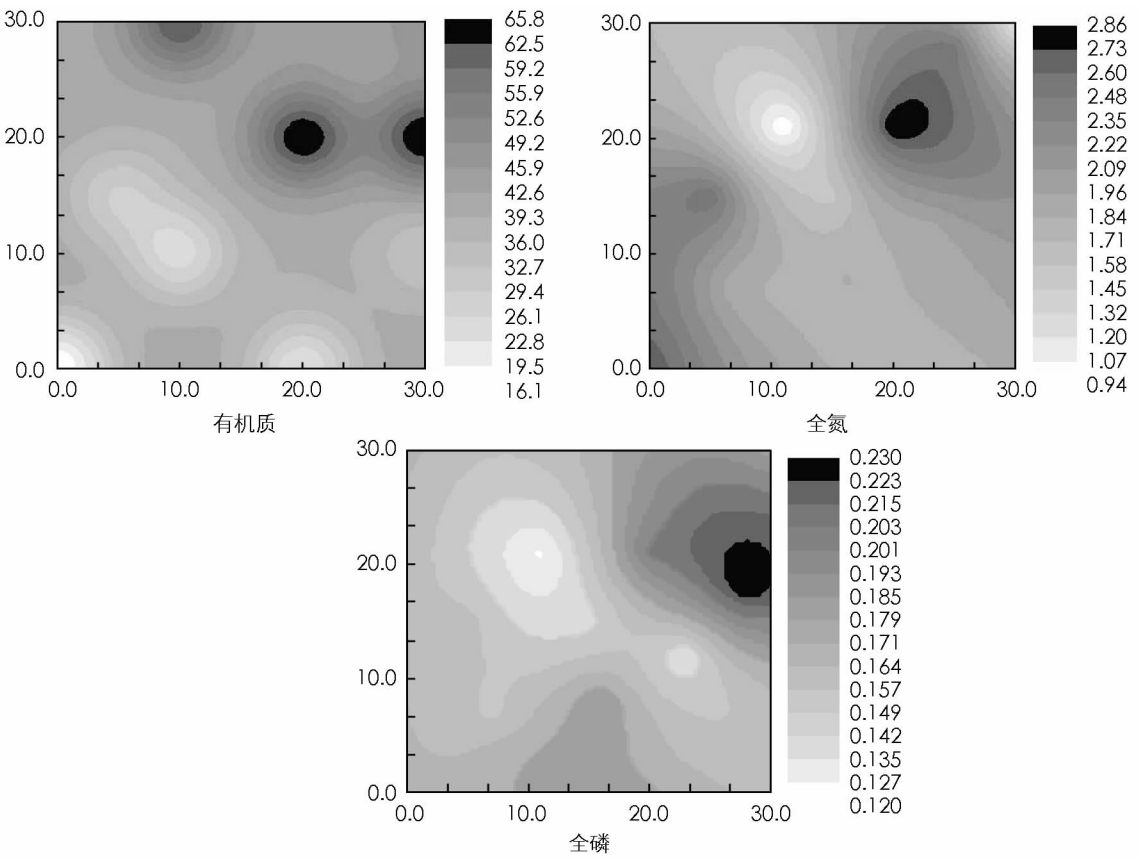


图 2 IV号样地土壤养分空间格局

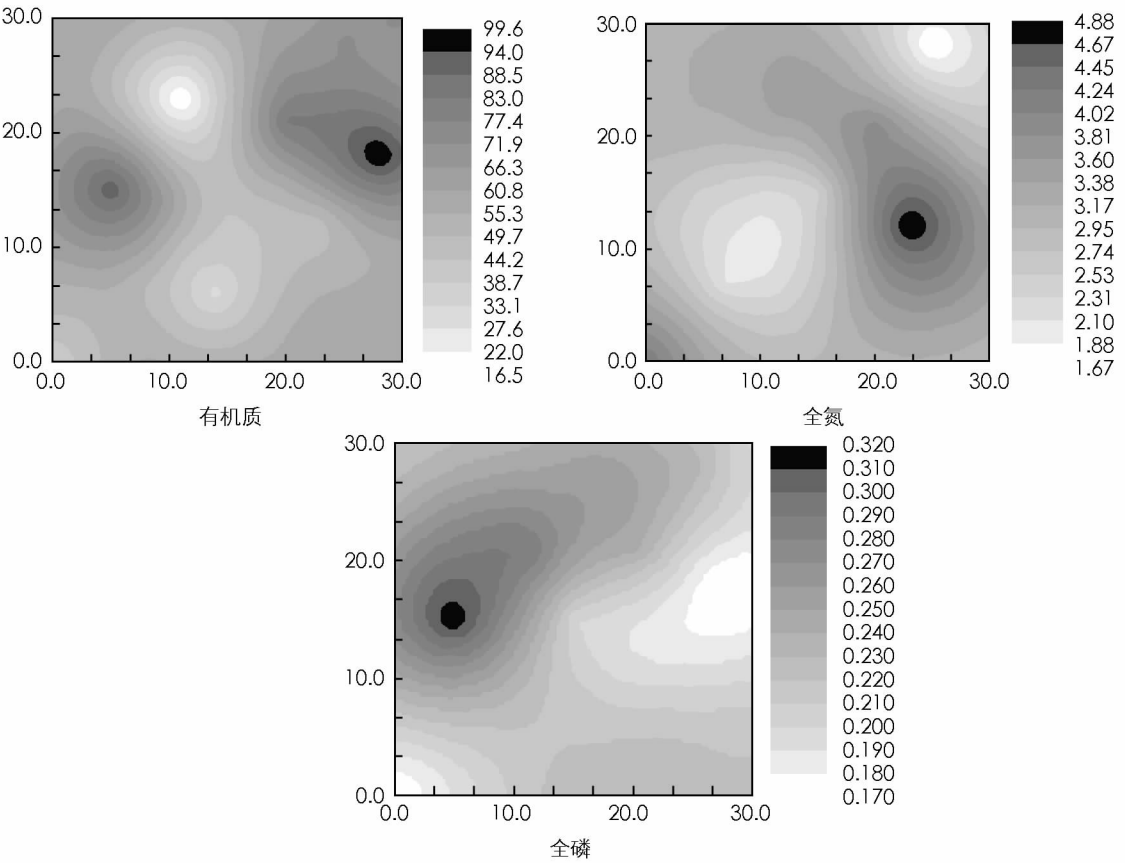


图 3 V号样地土壤养分空间格局

3 讨 论

研究表明,不同林分密度的人工林土壤垂直方向上有机质的质量分数最高的是 0~20 cm 层,为 65.23 g/kg. 因为 0~20 cm 土层是地表土层,地上植物凋落物的分解、地下根系残体和根系分泌物的产生和积累提供了大量的有机质. 40~60 cm 土层接近母质层,土壤有机质转化能力较低,这与邵方丽等^[13]对北京森林土壤养分分析的结果一致. 陈庆强等^[14]指出随着土层深度的增加,有机质来源减少,不断降低,最后趋于稳定. 同时,马云波等^[15]研究表明土壤养分具有表聚性,表层土壤是植物吸收养分器官细根的主要分布区域,参与有机质分解活动的微生物集中在表层土壤^[16],且表层水热和通气条件较好,有利于微生物活动^[17].

土壤全氮可以在一定程度上衡量土壤氮素的供应能力^[18],土壤全氮质量分数最高的是 0~20 cm 层,为 2.99 g/kg. 6 种不同林分类型的含氮量随着土层深度的增加而减少,而且土壤全氮质量分数与有机质质量分数变化一致,与纪文婧等^[19]的研究结果相似. 本研究表明,间伐后的林地与未经过间伐的林地全氮质量分数有差异,未经过间伐的林地土壤全氮质量分数相对较高,与马芳芳等^[20]对人工林土壤理化性质的研究结果相一致. Bai 等^[21]在澳大利亚的研究表明,间伐对土壤全氮质量分数无显著影响,但有研究表明,适度人工间伐会影响土壤全氮质量分数^[22],可能的原因是试供土壤性质的差异不同造成的,根系对不同土壤的适应性不同,对养分的转化能力不同.

土壤全磷质量分数作为衡量各形态磷素综合的指标^[19],主要来源于凋落物的矿化作用. 研究区内的土壤全磷质量分数最高的是 0~20 cm 层,为 0.25 g/kg,随着土层深度的增加,土壤全磷质量分数减小,下降趋势较平缓,与李晓莎等^[23]的研究结果一致,但有研究表明,土壤全磷质量分数与土层深度无直接关系^[24],可能的原因是研究的林分类型不同,根系对磷素的转化能力不同. 凋落物在矿化过程中提供大量的磷酸根,但移动能力较差^[25]. 同时随着时间的推移,受元素迁移、淋溶及幼苗、杂草等的消耗,土壤全磷在不同林分及土层中的变化特点会不相同.

从研究区 3 种典型样地理化性质空间分布看,随着林分密度的增加,变程呈现递减的趋势,土壤有机质、全氮、全磷质量分数空间连续性较好,与张瑞等^[26]的研究结果相似,该区域属于右下坡位,凋落物累积较多,有研究证明土壤空间连续性较强^[27],基于 GIS 的统计学方法,所得的空间变异图能够很好地反映研究区林地土壤养分的空间变异特征和丰缺状况.

通过研究对比 6 种林分密度条件下华北落叶松人工林的土壤理化性质表明:过大的林分密度导致单株树木生长空间减小,会增加林木对有机质, N, P 元素的消耗,同时林内光照强度减少,林下灌木稀少,微生物活动减少. 密度过小会导致林内光照强度增大,水分蒸发剧烈,根系转化养分程度降低,不能很好地改善土壤性质. 林分密度过大或过小都会出现林地土壤退化、酸化等现象,严重影响林木的正常发育^[28]. 适当强度的间伐能够给予动植物残体、凋落物等很好的保护,能够缓解生态过程失调,因此适当地增加人工干预使林地林分达到合适的密度,为落叶松人工林提供良好的生长空间,同时为人工林后期经营抚育和管理提供科学依据和方法,以获得更大的生态效益和价值. 本研究只对林下土壤进行了研究,今后有必要对该研究区样地根系和凋落物等的动态变化进行研究,还应对不同林龄的林地进行调查,进一步阐明土壤有机质、全氮、全磷的变化规律,为准确指导经营人工林及改善土壤肥力提供进一步的科学依据.

4 结 论

1) 该区域表层土壤有机质、全氮、全磷质量分数最高,随土层深度的增加呈减小的趋势. 0~20 cm 是表层土壤,地表凋落物不断分解提供大量的有机质、全氮、全磷. 40~60 cm 层是华北落叶松根系获取营养物质的重要部位,对有机质、全氮、全磷消耗量大,质量分数最小. 土壤 0~60 cm 养分质量分数变异系数随着土层深度的增加呈现增大趋势,3 层均属于中度变异(0.1~1.0).

2) 同一土层深度,未抚育的落叶松样地土壤有机质、全氮、全磷质量分数明显高于人为干预的样地.

同时,随着林分密度的增加,土壤有机质、全氮、全磷质量分数呈现先增大后减小的趋势,在林分密度较大林地内,植被养分消耗较大,可能出现土壤退化现象.因此建议将华北落叶松人工林的林分密度控制在1 000株/hm²左右而不超过1 200株/hm².

3)通过对3块典型样养分数数据进行拟合,结果显示,土壤有机质最佳模型分别为高斯模型、高斯模型、球形模型;全氮最佳模型均为球形模型,说明全氮空间分布较为稳定;全磷最佳模型分别为指数模型、球形模型、球形模型.3块华北落叶松样地土壤养分空间结构图能够较好地反应该区域土壤空间的分布规律,对该地区土壤后期管理提供一定的理论依据.

参考文献:

- [1] 孙嘉,王海燕,丁国栋,等.不同密度华北落叶松人工林土壤理化性质研究[J].林业资源管理,2011(1):62-66.
- [2] 乌云.大青山油松人工林土壤物理特征及水分动态研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2008.
- [3] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [4] REICH P B, HOBIE S E, LEE T, et al. Nitrogen Limitation Constrains Sustainability of Ecosystem Response to CO₂[J]. Nature, 2006, 440(7086): 922-925.
- [5] 赵琼,曾德慧.陆地生态系统磷素循环及其影响因素[J].植物生态学报,2005,29(1):153-163.
- [6] 詹书侠,陈伏生,胡小飞,等.中亚热带丘陵红壤区森林演替典型阶段土壤氮磷有效性[J].生态学报,2009,29(9):4673-4680.
- [7] 林开森,郭剑芬,杨智杰,等.不同林龄人促天然更新林土壤磷素形态及有效性分析[J].中南林业科技大学学报(自然科学版),2014,34(9):6-11.
- [8] SAYER E J, TANNER E V J, YAVITT J B, et al. Variable Responses of Lowland Tropical Forest Nutrient Status to Fertilization and Litter Manipulation[J]. Ecosystems, 2012, 15(3): 387-400.
- [9] MARTINSON G O, CORRE M D, VELDKAMP E. Responses of Nitrous Oxide Fluxes and Soil Nitrogen Cycling to Nutrient Additions in Montane Forests along an Elevation Gradient in Southern Ecuador[J]. Biogeochemistry, 2013, 112(1-3): 625-636.
- [10] LAUBER C L, STRICKLAND M S, BRADFORD M A, et al. The Influence of Soil Properties on the Structure of Bacterial and Fungal Communities Across Land-use Types[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(9): 2407-2415.
- [11] 盛炜彤.杉木林的密度管理与长期生产力研究[J].林业科学,2001,37(5):2-9.
- [12] 康冰,刘世荣,蔡道雄,等.马尾松人工林林分密度对林下植被及土壤性质的影响[J].应用生态学报,2009,20(10):2323-2331.
- [13] 邵方丽,余新晓,杨志坚,等.北京山区典型森林土壤的养分空间变异与环境因子的关系[J].应用基础与工程科学学报,2012,20(4),581-591.
- [14] 陈庆强,沈承德,孙彦敏,等.鼎湖山土壤有机质深度分布的剖面演化机制[J].土壤学报,2005,42(1):1-8.
- [15] 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.
- [16] 薛立,邝立刚,陈红跃,等.不同林分土壤养分、微生物与酶活性的研究[J].土壤学报,2003,40(2):280-285.
- [17] 漆良华,张旭东,周金星,等.湘西北小流域不同植被恢复区土壤微生物数量、生物量碳氮及其分形特征[J].林业科学,2009,45(8):14-20.
- [18] 詹媛媛,薛梓瑜,任伟,等.干旱荒漠区不同灌木根际与非根际土壤氮素的含量特征[J].生态学报,2009,29(1):59-66.
- [19] 纪文婧,程小琴,韩海荣,等.山西太岳山好地方典型植被类型土壤理化特征[J].生态学杂志,2016,35(1):141-148.
- [20] 马芳芳,贾翔,赵卫,等.间伐强度对辽东落叶松人工林土壤理化性质的影响[J].生态学杂志,2017,36(4):971-977.
- [21] BAI S H, DEMPSEY R, REVERCHON F, et al. Effects of Forest Thinning on Soil-plant Carbon and Nitrogen Dynam-

ics [J]. Plant & Soil, 2016, 411(1-2): 1-13.

[22] 叶钰倩, 赵家豪, 刘 畅, 等. 间伐对马尾松人工林根际土壤氮含量及酶活性的影响 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(3): 193-198.

[23] 李晓莎, 李倩茹, 许中旗, 等. 冀北山地华北落叶松人工林与杨桦次生林的土壤养分差异 [J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(9): 20-26.

[24] 耿增超, 张社奇, 王国栋, 等. 黄土高原油松人工林地土壤养分及化学性质的时空效应 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(8): 98-104.

[25] 张红霞, 魏方方, 王家顺, 等. 安顺山药根茎与土壤中矿质元素相关性分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 38(5): 31-36.

[26] 张 瑞, 戴 伟, 庞 欢, 等. 北京市北运河流域耕地土壤性质空间变异性 [J]. 生态学杂志, 2014, 33(12): 3368-3373.

[27] 张 娜, 王希华, 郑泽梅, 等. 浙江天童常绿阔叶林土壤的空间异质性及其与地形的关系 [J]. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2361-2369.

[28] 冉 烈, 游玉明, 李会合. 重庆垫江牡丹主生产区土壤养分含量现状及评价 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2015, 40(1): 73-78.

Soil Nutrient Characteristics of *Larix Principis Rupprechtii*
Plantations with Different Stand Densities

ZHAO Wei-wen, LIANG Wen-jun, WEI Xi

College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Taigu, shanxi 030801, China

Abstract: The research object has been conducted in forest farm of Mulan Forestry Authority in Hebei Province in order to study the changes of soil nutrients in *Larix principis rupprechtii* plantation with different stand density. The effects of stand density on soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus content and spatial distribution have been studied by means of variance analysis and Clark interpolation. The results show that the content of soil organic matter, total nitrogen and total phosphorus are the highest in the 0—20 cm layer, which were 65.23 g/kg, 2.99 g/kg and 0.25 g/kg respectively. The content of soil organic matter, total nitrogen and total phosphorus are the lowest in the 40—60 cm layer, which are 25.85 g/kg, 1.79 g/kg and 0.19 g/kg respectively. Under the same soil depth, the content of soil organic matter, total nitrogen and total phosphorus in the soil without artificial rearing is significantly higher than other man-made plots. Meanwhile, with the increasing of stand density, the content of soil organic matter, total nitrogen and total phosphorus increased first and then decreased. Compared with the three typical plots, the spatial correlation of soil organic matter, total nitrogen and total phosphorus have greater relevance, showing the superiority in Northeast China. Stand density is closely related to soil nutrients, *Larix principis rupprechtii* shows heterogeneous spatial distribution characteristics.

Key words: *Larix principis rupprechtii* plantation; stand density; soil nutrients; spatial pattern