

不同林分密度华北落叶松林枯落物 及土壤特征分析^①

冯燕辉, 梁文俊, 魏 曦, 赵伟文, 卜瑞英, 王凯娜

山西农业大学 林学院, 山西 太谷 030801

摘要: 为了探究华北落叶松不同林分密度对林下枯落物及土壤特征的影响, 以柴禄沟华北落叶松天然林林下枯落物及 3 层土壤为研究对象, 通过野外调查及室内分析测定不同林分密度下的枯落物蓄积量及土壤养分质量分数, 采用双因素方差分析、相关性分析和 LSD 多重比较来分析不同林分密度对土壤理化性质及枯落物蓄积量的影响。柴禄沟华北落叶松林林分密度为 725 株/hm² 时, 枯落物蓄积量显著大于其他林分密度; 柴禄沟华北落叶松林林分密度为 725 株/hm² 时, 土壤含水率、土壤孔隙度大于其他林分密度, 土壤容重显著低于其他林分密度; 柴禄沟华北落叶松林 0~20 cm 土层土壤有机碳、氨态氮、速效钾质量分数大于下层土壤, 土壤全磷、有效磷质量分数基本小于下层土壤, 而土壤全氮质量分数随土层变化无规律性变化; 0~20 cm, 20~40 cm 土层土壤有机碳、氨态氮、速效钾质量分数随林分密度增加基本呈先增后减趋势, 在林分密度为 725~975 株/hm² 时质量分数达到最大。林分密度为 725 株/hm² 时 0~20 cm 土层土壤全氮质量分数显著低于林分密度为 425 株/hm² 和 975 株/hm², 其他土层各林分密度对全氮质量分数无显著影响; 林分密度为 425 株/hm²、725 株/hm² 时 3 个土层土壤全磷质量分数显著大于林分密度为 1 550 株/hm²; 0~20 cm, 20~40 cm 土层土壤有效磷随林分密度增加无明显变化规律。林分密度过密或过疏都不利于土壤养分循环和积累, 该地区林分密度为 725 株/hm² 时有利于改善土壤结构和促进土壤养分的积累。

关键词: 华北落叶松; 林分密度; 土壤养分; 枯落物

中图分类号: S714.2; S791.259

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2021)03-0179-09

枯落物主要由林分落下的茎、叶、枝条、花、果实、树皮等凋落物及动物残体组成^[1], 作为森林水文的第二活动层, 是森林生态系统的重要组成部分^[2]。枯落物不仅可以抑制土壤水分蒸发、减缓地表径流、防止土壤溅蚀等水土保持作用, 而且还可以通过微生物分解改善土壤结构, 增加土壤养分, 起到调节土壤肥力的作用^[3]。土壤养分含量的多少对植物生长起到至关重要的作用。关帝山位于山西省吕梁山中段, 是山西省森林面积和蓄积量最大的林区之一, 华北落叶松是该林区内的主要组成树种。华北落叶松为松科落叶松属的落叶乔木, 属于寒温带及中温带的树种, 它生长快、抗性强、耐贫瘠、木材品质好, 树势高大挺拔, 具有良好的涵养水源和水土保持作用, 是华北地区重要的用材林和防护林树种之一。通过对华北落叶松天然林全面实际踏查和观测发现, 华北落叶松更新幼苗很少, 更新和存活下来的幼苗在林地上也是呈斑块状的异质性分布^[4], 且更新的主要方式是间伐后补植造林, 这样容易造成其他物种入侵, 不利于华北落叶松林的健康生长。目前, 已有学者对华北落叶松自然更新困难的问题进行研究, 主要集中在林隙^[5]、种子

① 收稿日期: 2020-08-05

基金项目: 国家自然科学基金(31971644, 31901365, 31500523)。

作者简介: 冯燕辉, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与生态重建方面的研究。

通信作者: 梁文俊, 博士, 副教授。

库和种子雨^[6]、土壤-枯落物^[4,7-8]、化感作用^[9-10]、气候条件^[11]、林分类型^[12]等因素对华北落叶松种子萌发、幼苗及幼树生长的影响,但对华北落叶松林分密度、林下枯落物和土壤养分之间的关系及其对幼苗更新的影响研究相对较少。

因此,为了探究华北落叶松不同林分密度对林下枯落物、土壤特征的影响及其相互关系,通过样地调查及室内分析对庞泉沟国家级自然保护区柴禄沟华北落叶松林下枯落物及土壤进行采样处理,采用双因素方差分析、相关性分析和 LSD 多重比较来分析不同林分密度对土壤理化性质及枯落物蓄积量的影响,旨在为该地区以及我国类似区域华北落叶松天然林经营管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

山西庞泉沟国家级自然保护区(111°22′~111°33′E, 37°45′~37°59′N)地处吕梁山脉中段的关帝山腹地,位于交城县、方山县、娄烦县交界处。全区主要是破碎陡峭的山地地貌,坡度 15°~31°,受不同程度变质作用的影响,岩石主要以花岩石和片麻岩为主。气候属于暖温带大陆性山地气候,四季分明;保护区年平均气温为 4.3℃,无霜期变动幅度大,为 100~130 d;光资源丰富,年日照数 1 900~2 100 h。该区降水由高山区向低山区递减,年平均降水量 820 mm 左右,多集中在 6—8 月,年平均蒸发量 1 100~1 500 mm,年降水量分布极不均匀,夏季降水量约占 75%以上。全区土壤分布由高海拔到低海拔大致有亚高山草甸土、山地棕壤土、山地淋溶褐土、山地褐土等 4 类。区内分布着寒温性针叶林、山地落叶阔叶林、温带针叶林,以及亚高山山地灌丛、山地灌丛、亚高山草甸、山地草甸等植被,植物资源十分丰富。试验地设在保护区的柴禄沟,试验区内主要优势乔木为华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*),伴生乔木有云杉(*Picea asperata*)、白桦(*Betula platyphylla*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等;林下灌木主要有蔷薇(*Rosa*)、黄刺玫(*Rosa xanthina* Lindl)、忍冬(*Lonicera japonica* Thunb)、茶条槭(*Acer ginnala* Maxim)、绣线菊(*Spiraea salicifolia* L.)、铁线莲(*Clematis florida* Thunb)、枸杞(*Lycium*)等;林下草本植物主要有黎芦(*Veratrum nigrum*)、半夏(*Pinellia ternata*)、毛茛(*Ranunculus japonicus*)、堇菜(*Viola verecunda*)、唐松草(*Thalictrum aquilegifolium*)、野草莓(*Fragaria vesca*)、舞鹤草(*Maianthemum bifolium*)、车前(*Plantago asiatica* L.)、老鹳草(*Geranium wilfordii* Maxim)、糙苏(*Phlomis umbrosa*)、玉竹(*Polygonatum odoratum*)、类叶升麻(*Actaea asiatica* H. Hara)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与样品处理

通过全面勘查,于 2019 年 8 月依据典型性和代表性原则,在庞泉沟国家级自然保护区柴禄沟西北坡上、中、下坡同一水平线每隔 10 m 设置标准样地,标准样地面积为 20 m×20 m,详细调查并记录各样地的海拔、经纬度、坡度、坡向、草本及灌木种类,测量乔木的胸径、树高、冠幅等因子,记录各样地内华北落叶松幼苗数量(苗高<1.3 m)。在样地内按“S”形采集土样,每个样方设 7 个采样点,采样深度为 0~20 cm,20~40 cm,40~60 cm,把采集后的土样装入自封袋,并做好标签。在样方内按对角线法收集枯落物,每个样方设 5 个采样点,采样面积为 20 cm×20 cm,记录枯落物厚度,把收集的枯落物装入自封袋,做好标签,用精度为 0.1 g 的电子天平称其鲜重并记录下来。在样方内按对角线法用环刀采集表层土壤,每个样方采集 3 个样,做好标记,用于测定土壤含水量、土壤容重、土壤孔隙度。此次共调查 45 块标准样地;通过后期数据处理,分别选取以林分密度为 425,550,725,975,1 175,1 550 株/hm² 的林分各 3 块标准样地作为研究样地,共选取 18 块标准样地,各样地土壤类型基本一致,各样地的林分林龄为 50~60 年(表 1)。

将采集的土壤和收集的枯落物带回实验室,把土壤样品放在通风处风干,剔除枝叶和石块等杂质。取风干土壤置于研钵中,用木棒碾压磨碎,过 0.25 mm 土筛。将所筛土样装入信封袋并做好标签,放在阴凉处保存备用,供分析测试用。把枯落物置于 80℃烘箱烘干到恒重后称量干重,用于计算枯落物蓄积量和自

然含水率.

1.2.2 测定方法

土壤含水率、土壤容重、土壤孔隙度: 采用环刀法测定. 土壤有机质: 重铬酸钾容量法—稀释热法; 土壤全氮: 采用不包含硝态氮和亚硝态氮的半微量凯氏法消煮, 再用全自动凯氏定氮仪(JK9890)进行测定; 土壤全磷: HClO₄-H₂SO₄ 消煮-钼锇抗比色法; 氨态氮: KCL 浸提-靛酚蓝比色法; 有效磷: NaHCO₃ 法; 速效钾: NH₄OAc 浸提-火焰光度法. 海拔、经纬度: 使用手持 GPS(G120)测定.

表 1 华北落叶松样地基本概况

样地	海拔/m	坡向	坡度/°	土壤类型	林分密度/株	幼树株数	平均胸径/cm	树高/m	冠幅/m
I ₁	1 971	西北	20	山地棕壤	975	25	34.59	18.4	5.83
I ₂	1 987	西北	17	山地棕壤	975	625	31.44	18.66	5.94
I ₃	2 001	西北	19	山地棕壤	975	225	29.12	20.85	6.58
II ₁	2 015	西北	21	山地棕壤	550	200	9.52	6.25	3.74
II ₂	2 022	西北	20	山地棕壤	550	375	10.02	8.94	4.15
II ₃	2 000	西北	23	山地棕壤	550	325	9.76	8.34	4.04
III ₁	2 062	西北	31	山地棕壤	725	0	34.65	17.9	7.54
III ₂	2 074	西北	29	山地棕壤	725	25	30.82	21.04	7.21
III ₃	2 062	西北	27	山地棕壤	725	0	30.56	18.4	6.85
IV ₁	2 103	西北	15	山地棕壤	425	975	32.35	21.98	6.88
IV ₂	2 097	西北	18	山地棕壤	425	1 025	34.87	20.87	6.74
IV ₃	2 101	西北	17	山地棕壤	425	1 000	32.52	19.08	7.41
V ₁	2 066	西北	23	山地棕壤	1 175	2 300	11.14	6.94	3.65
V ₂	2 063	西北	19	山地棕壤	1 175	2 375	15.3	11.9	4.22
V ₃	2 060	西北	23	山地棕壤	1 175	2 525	16.9	18.7	4.52
VI ₁	2 014	西北	24	山地棕壤	1 550	2 900	3.75	10.34	10.34
VI ₂	2 025	西北	21	山地棕壤	1 550	3 100	5.23	9.4	7.72
VI ₃	2 018	西北	22	山地棕壤	1 550	3 175	6.22	11.2	9.34

注: 林分密度和幼树株数均以每公顷计, 下同.

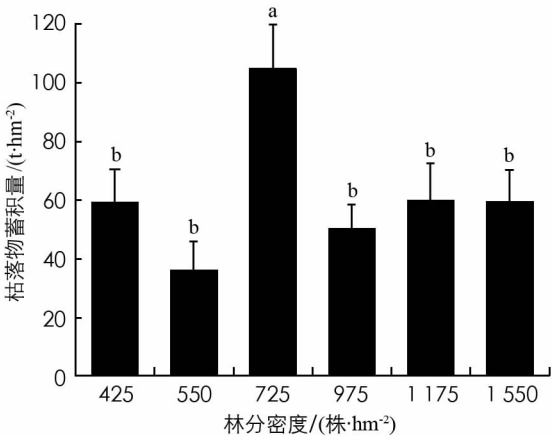
1.2.3 数据处理

应用 Excel 2019 进行数据初处理, 使用 SPSS 24.0 对所获数据进行单因素方差分析、双因素方差分析, 利用 Canoco 5 做 PCA 排序图, 采用 Origin 2017 软件制图, 土壤养分含量单位均为质量分数.

2 结果与分析

2.1 华北落叶松不同林分密度枯落物蓄积量特征

试验对关帝山柴禄沟华北落叶松天然林不同林分密度枯落物蓄积量情况进行统计. 结果看出, 华北落叶松不同林分密度对枯落物蓄积量有显著影响($p<0.05$). 当林分密度为 725 株/hm² 时, 枯落物蓄积量大于其他林分密度, 且差异有统计学意义, 枯落物蓄积量为 104.89 t/hm². 其他林分密度之间枯落物蓄积量无明显差异(图 1).



不同小写字母表示处理之间差异有统计学意义($p<0.05$).

图 1 华北落叶松不同林分密度枯落物蓄积量

2.2 华北落叶松不同林分密度土壤理化性状特征

2.2.1 土壤物理性质特征

试验结果看出,关帝山柴禄沟华北落叶松天然林不同林分密度之间土壤含水率差异没有统计学意义,土壤容重与土壤孔隙度差异有统计学意义.不同林分密度土壤含水率、土壤容重、土壤孔隙度的变化范围为 33.57%~55.07%,0.73~1.26 g/cm³,52.57%~72.39%.当林分密度为 725 株/hm² 时,土壤含水率、土壤孔隙度最大,土壤容重最小(表 2).

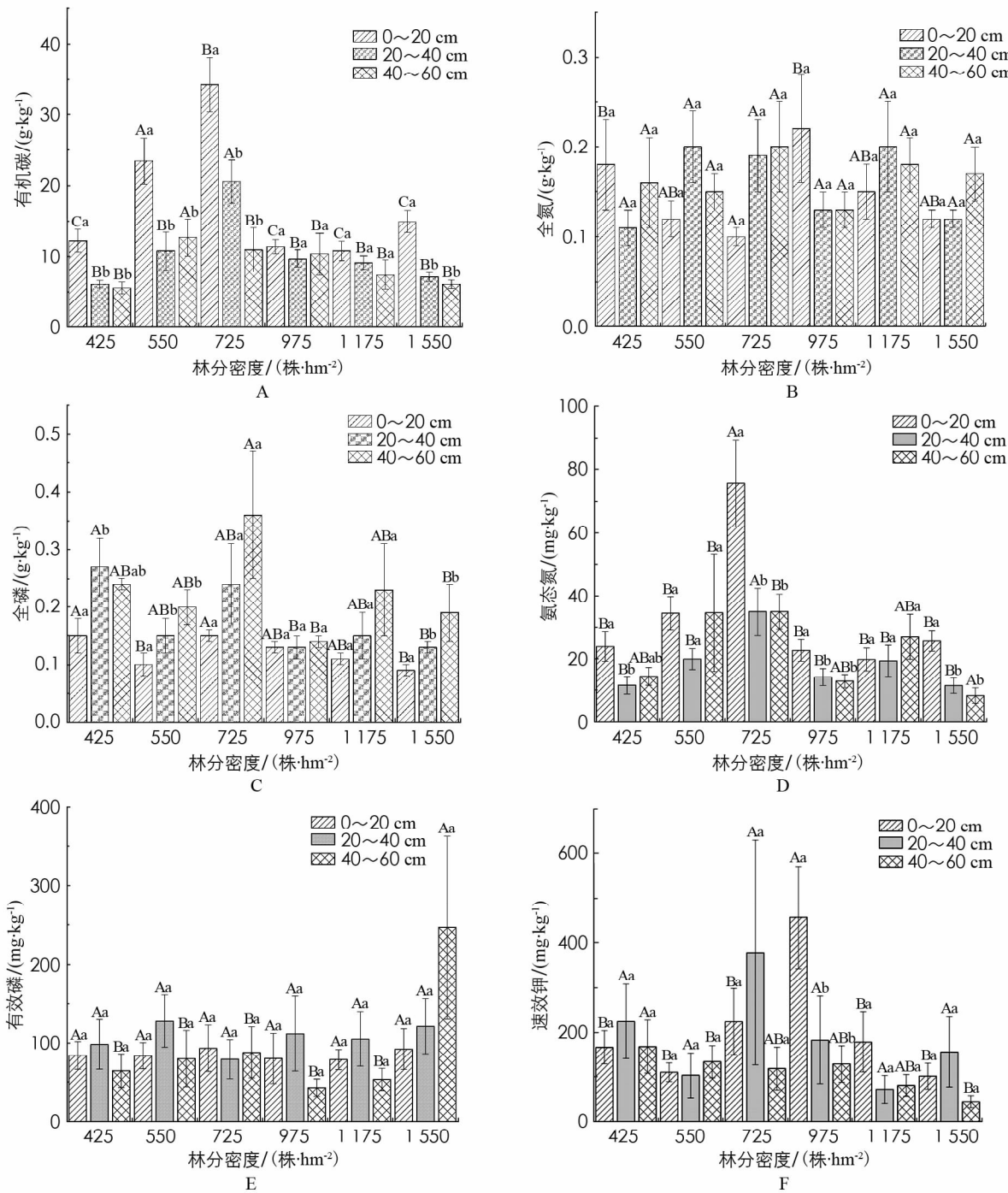
表 2 华北落叶松不同林分密度土壤物理性质

林分密度/株	土壤含水率/%	土壤容重/(g·cm ⁻³)	土壤孔隙度/%
425	38.96±19.25a	1.16±0.37b	56.14±14.06b
550	36.59±9.25a	1.15±0.16b	56.57±6.16b
725	55.07±26.09a	0.73±0.22a	72.39±8.36a
975	33.57±9.71a	1.26±0.18b	52.57±6.73b
1 175	35.38±7.60a	1.14±0.18b	56.88±6.83b
1 550	35.92±8.69a	1.02±0.21ab	61.63±8.04ab

注:同列数据后不同小写字母表示处理之间差异有统计学意义($p<0.05$).

2.2.2 土壤养分特征

试验结果看出,不同林分密度及土层对土壤养分质量分数影响显著.由图 2A 可知,6 种林分密度在 0~20 cm 土层土壤有机碳质量分数均大于 20~40 cm 及 40~60 cm 土层,说明土壤有机碳具有明显“表聚现象”.3 个土层土壤有机碳质量分数均随林分密度的增加整体呈现先增加后减少的变化规律,呈正态分布,当林分密度为 725 株/hm² 时,表层土壤有机碳质量分数达到最大.6 种林分密度不同土层对全氮质量分数差异无统计学意义.0~20 cm 土层林分密度为 725 株/hm² 时的全氮质量分数显著低于 425 株/hm² 和 975 株/hm² 时,其他土层各林分密度对全氮质量分数无显著影响(图 2B).林分密度为 425 株/hm²、550 株/hm²、1 550 株/hm² 时,0~20 cm 土层全磷质量分数显著低于 20~40 cm 和 40~60 cm,其他林分密度各土层之间土壤全磷质量分数差异无统计学意义;0~20 cm 土层林分密度为 425 株/hm² 和 725 株/hm² 时土壤全磷质量分数显著大于 550 株/hm² 和 1 550 株/hm² 时;20~40 cm 土层林分密度为 425 株/hm² 时土壤全磷质量分数显著大于 975 株/hm² 和 1 550 株/hm² 时;40~60 cm 土层林分密度为 725 株/hm² 时土壤全磷显著大于 975 株/hm² 和 1 550 株/hm² 时(图 2C).林分密度为 425 株/hm²、725 株/hm²、975 株/hm²、1 550 株/hm² 时,0~20 cm 土层土壤氨态氮质量分数显著大于下层土壤,林分密度为 550 株/hm²、1 175 株/hm²,各土层土壤氨态氮质量分数差异无统计学意义.0~20 cm,20~40 cm 土层林分密度为 725 株/hm² 时土壤氨态氮质量分数明显大于其他林分密度.40~60 cm 土层林分密度为 550 株/hm² 和 725 株/hm² 时土壤氨态氮质量分数显著大于 1 550 株/hm² 时(图 2D).6 种林分密度不同土层对土壤有效磷无显著影响,0~20 cm 土层土壤有效磷质量分数整体小于 20~40 cm 土层;0~20 cm,20~40 cm 土层土壤有效磷随林分密度增加无明显变化规律,而 40~60 cm 土层土壤有效磷质量分数林分密度为 1 550 株/hm² 时明显大于其他林分密度(图 2E).林分密度为 975 株/hm²,0~20 cm 土层土壤速效钾质量分数显著大于下层土层,而其他林分密度各土层之间无明显差异;0~20 cm,20~40 cm 土层土壤速效钾质量分数随林分密度增加整体呈先增后减趋势,当林分密度分别为 975 株/hm²、725 株/hm² 时其质量分数最大;40~60 cm 土层土壤速效钾质量分数随林分密度增加整体呈减少趋势,其质量分数在林分密度 425 株/hm² 时明显大于 1 550 株/hm² 时(图 2F).林分密度与土层的互交作用对有机碳质量分数($p<0.05$)影响显著,对土壤全氮($p=0.123$)、速效钾($p=0.318$)、全磷($p=0.320$)、氨态氮($p=0.069$)、有效磷质量分数($p=0.688$)无显著影响(图 2).



注: 不同大写字母表示同一土层不同林分密度间差异有统计学意义($p < 0.01$);
不同小写字母表示同一林分密度不同土层间差异有统计学意义($p < 0.05$).

图 2 华北落叶松不同林分密度土壤养分质量分数

2.3 华北落叶松林枯落物及土壤理化性质相关性分析

试验统计分析了天帝山柴禄沟华北落叶松天然林不同林分密度枯落物及土壤养分间相关性。结果看出, 枯落物蓄积量与土壤含水量、土壤孔隙度、有机碳、全磷、氨态氮呈显著正相关, 与土壤容重呈显著负相关, 而与全氮、速效磷无显著相关性。土壤含水率、土壤孔隙度与有机碳、全磷、氨态氮呈显著正相关, 土壤容重则与有机碳、全磷、氨态氮呈显著负相关。通过对土壤养分质量分数的相关性分析, 有机碳、全磷、氨态氮之间呈显著正相关(图 3)。

3 讨 论

3.1 林分密度对枯落物蓄积量的影响

枯落物作为土壤养分的基本载体，在养分循环中是连接植物与土壤的纽带^[13]，其积累与分解为土壤提供丰富的有机质，促进植物根系发育，改良土壤结构，对土壤理化性质和生物过程产生重要影响^[14]。本研究中林分密度为 725 株/hm² 时，枯落物蓄积量显著大于其他林分密度，但几乎没有华北落叶松幼苗更新，与杨霞^[15]的研究结果基本一致。其主要原因一方面是该样地混交有少数阔叶树种白桦，由于阔叶树种的生物学特性决定了该林分密度的枯落物蓄积量显著大于其他林分密度；另一方面由于该林分林龄相对较大而造成枯落物蓄积量增大，因此枯落物蓄积量的增加及白桦叶片的特性导致华北落叶松种子难以扎根土壤，导致华北落叶松自然更新困难。

3.2 林分密度对土壤理化性状的影响

3.2.1 对土壤物理性质的影响

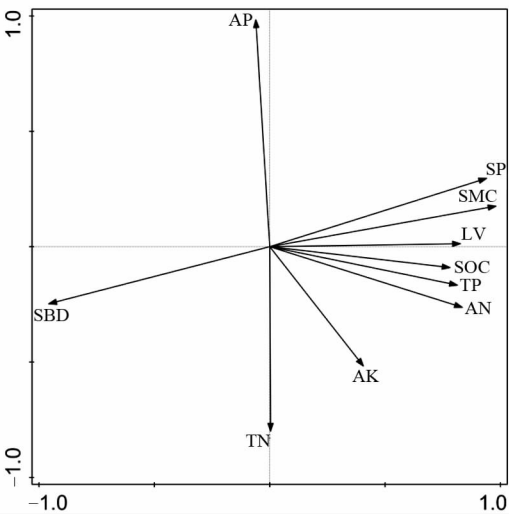
林分密度的变化会使林地生境发生改变^[16]，势必对土壤理化性质产生影响^[17-18]。关帝山柴禄沟华北落叶松天然林在 425~1 550 株/hm² 林分密度范围内，土壤物理性质随林分密度的差异呈现出不同的变化规律。本研究中该地区华北落叶松林分密度为 725 株/hm² 时，土壤含水率、土壤孔隙度最大，土壤容重最小，与董威等^[18]研究结果相似。土壤含水率、土壤孔隙度随林分密度的增加与枯落物的变化趋势一致，土壤容重则呈相反趋势，说明枯落物蓄积量是影响土壤物理性质改变的主要因素。枯落物蓄积量的增加，减少了土壤水分的蒸发及削弱了淋溶作用对土壤的影响，为土壤生物提供了良好的环境场所，改善了土壤性质，所以在林分密度为 725 株/hm² 时，能够很好地改善土壤结构和提高土壤的蓄水能力。

3.2.2 对土壤养分质量分数的影响

森林土壤与其他类型土壤相比，具有 3 种成土因素，包括森林死地被物、森林根系及依靠森林生存的特有生物，森林土壤生物通过对表层枯落物的粉碎、分解、转化影响土壤理化性质，进而影响土壤植物的生长和森林群落的演替^[19]。因此枯落物归还土壤养分和矿物质共同作为林木生长的营养来源。

本研究中 6 种林分密度在 0~20 cm 土层土壤有机碳质量分数均大于下层土壤，具有明显的表聚现象，与相关研究一致^[20-22]，这主要与枯落物和林下植被关系密切。由于表层土壤覆盖有大量枯落物，其分解过程对表层土壤有机碳起到累积作用，同时枯落物淋洗水所携带有机碳是土壤有机碳输入的主要来源之一^[23]。3 个土层的土壤有机碳质量分数均随林分密度的增加整体呈先增后减趋势，林分密度为 725 株/hm² 时，0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤有机碳质量分数达到最大，分别为 34.21 g/kg，20.53 g/kg，这与孙千惠等^[17]研究结果类似，表明在该林分密度下有利于土壤有机碳的积累；主要原因是在该林分密度下覆盖大量的枯落物，枯落物的分解与转化促进土壤有机碳的积累，同时没有幼苗更新，对土壤养分消耗较少，土壤有机碳的补偿速度大于消耗速度，所以该林分密度下土壤有机碳质量分数最多。

6 种林分密度不同土层对全氮质量分数无显著影响，这与王媚臻等^[24]、孙嘉等^[25]的研究结果不同，可能是由于研究林分类型和土壤分层不一所致。0~20 cm 土层林分密度为 725 株/hm² 时的全氮质量分数显著低于 425 株/hm² 和 975 株/hm² 时，其他土层各林分密度对全氮质量分数无显著影响，这与孙千惠等^[17]对马尾松林土壤全氮质量分数随林分密度的变化趋势结果一致，其原因可能是林分密度为 725 株/hm² 时的林分林龄较大，对氮的需求相应也较大所致，同时该林分所处的坡度较大，也可能会造成氮素的流失。相关分析显示表明，枯落物蓄积量与土壤全氮质量分数无相关性，可能原因是华北落叶松的松针叶不易分



土壤容重(SBD),速效磷(AP),土壤孔隙度(SP),
土壤含水率(SMC),枯落物蓄积量(LV),有机碳(SOC),
全磷(TP),氨态氮(AN),速效钾(AK),全氮(TN).

图 3 不同林分密度华北落叶松林
土壤理化性质 PCA 排序

解,留存时间长,以枯落物等形式归还给土壤全氮不多,表明土壤全氮的主要来源是土壤矿物质。

林分密度为 425 株/hm²、550 株/hm²、1 550 株/hm² 时,0~20 cm 土层全磷质量分数显著低于 20~40 cm 和 40~60 cm 土层,其他林分密度各土层间土壤全磷质量分数差异无统计学意义,与赵汝东等^[26] 研究结果一致。由于土壤全磷主要来源于土壤母质的矿化,林分密度为 425 株/hm²、550 株/hm² 时,即林分密度较小时,表层土壤受外部环境因素影响较大,土壤全磷流失较快;同时林分密度为 1 550 株/hm² 时,华北落叶松更新幼苗最多,对表层土壤的养分消耗较大,所以这 3 个林分密度的表层土壤全磷质量分数显著低于下层。3 个土层土壤全磷含量在株分密度为 425 株/hm²、725 株/hm² 时显著大于 1 550 株/hm² 时,其主要原因是林分密度为 1 550 株/hm² 时林下有大量华北落叶松更新幼苗,生物量丰富,对土壤养分需求量大,华北落叶松“取多给少”,表明林分密度过大不利于土壤养分的积累。

除林分密度为 550 株/hm²、1 175 株/hm² 外,其他林分密度 0~20 cm 土层土壤氨态氮质量分数显著大于下层,但各林分密度表层土壤氨态氮质量分数都大于下层土壤,与相关研究结果相似^[27-28],可能与枯落物及林下植被的种类和覆盖度有关。0~20 cm,20~40 cm 土层土壤氨态氮含量随林分密度增加基本呈先增后减趋势,当林分密度为 725 株/hm² 时明显大于其他林分密度。40~60 cm 土层土壤氨态氮质量分数在林分密度为 550 株/hm² 和 725 株/hm² 时显著大于 1 550 株/hm² 时,其主要原因与林下植被有关,林分密度为 725 株/hm² 时林下无更新华北落叶松幼苗,而在高密度林区,林下有大量华北落叶松幼苗更新且其他植被丰富,对养分需求量大,所以会导致氨态氮质量分数高密度林区低于低密度的情况。

6 中林分密度不同土层对土壤有效磷无显著影响,但表层土壤基本上都小于下层土壤,与全磷变化趋势一致,这主要与林下生物量有关。0~20 cm,20~40 cm 土层土壤有效磷随林分密度增加无明显变化规律,而 40~60 cm 土层土壤有效磷质量分数在林分密度为 1 550 株/hm² 时明显大于其他林分密度,可能是因为高密度林区华北落叶松更新幼苗多,40~60 cm 土层土壤中根的数量增加,在土壤中穿插、分泌等加快了土壤的分化,所以在该林分密度下最下层土壤有效磷含量最高。

林分密度为 975 株/hm² 时 0~20 cm 土层土壤速效钾质量分数显著大于下层土层,而其他林分密度各土层之间无明显差异,可能该林分密度下幼苗更新少,对速效钾消耗较少,同时光照、通气一般,速效钾流失较慢。0~20 cm,20~40 cm 土层土壤速效钾含量随林分密度的增加整体呈增后减的趋势,当林分密度分别为 975 株/hm²、725 株/hm² 时其质量分数达到最大,与贺志龙等^[27]、曾小梨等^[29] 研究结果基本一致,表明 725~975 株/hm² 的林分密度对改善土壤速效钾的作用明显。40~60 cm 土层土壤速效钾质量分数随林分密度增加整体呈减少趋势,林分密度为 425 株/hm² 时明显大于 1 550 株/hm² 时,该土层受外部环境因素作用较少,主要与植物根系作用有关。

4 结 论

本文以柴禄沟华北落叶松天然林林下枯落物蓄积量及 3 个土层为研究对象,分析不同林分密度枯落物蓄积量及土壤理化性质分布特征,主要结论如下:

(1) 柴禄沟华北落叶松林林分密度为 725 株/hm² 时,枯落物蓄积量显著大于其他林分密度,表明在该林分密度下有利于枯落物的蓄积。但该林分密度下几乎没有华北落叶松幼苗更新,主要原因可能与枯落物机械阻碍作用有关,所以枯落物蓄积量及厚度应该是影响华北落叶松自然更新的主要因素之一。

(2) 柴禄沟华北落叶松林林分密度为 725 株/hm² 时,土壤含水率、土壤孔隙度大于其他林分密度,土壤容重显著低于其他林分密度,表明在该林分密度下有利于改善土壤结构,提高土壤的蓄水能力。

(3) 柴禄沟华北落叶松林 0~20 cm 土层土壤有机碳、氨态氮、速效钾质量分数大于下层土壤,土壤全磷、有效磷质量分数基本都小于下层土壤,而土壤全氮质量分数随土层变化无变化规律。0~20 cm,20~40 cm 土层土壤有机碳、氨态氮、速效钾质量分数随林分密度增加基本呈先增后减趋势,在林分密度为 725~975 株/hm² 时土壤养分质量分数达到最大,而在 40~60 cm 土层土壤速效钾质量分数随林分密度增加整体呈减少趋势。0~20 cm 土层林分密度为 725 株/hm² 时的全氮质量分数显著低于 425 株/hm² 和 975 株/hm² 时,其他土层各林分密度对全氮质量分数无显著影响。3 个土层土壤全磷质量分数在林分密度为 425 株/hm²、725 株/hm² 时显著大于 1 550 株/hm² 时。0~20 cm,20~40 cm 土层土壤有效磷随林分密度

增加无明显变化规律。综上表明,林分密度过密或过疏都不利于土壤养分循环和积累,与相关研究一致^[2,24,30]。本研究中,在林分密度为 725 株/hm² 时有利于改善土壤结构和促进土壤养分积累,但由于枯落物的原因不利于华北落叶松自然更新,因此在保持和改善土壤养分的同时如何能够促进华北落叶松的自然更新有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 杨吉华,张永涛,李红云,等.不同林分枯落物的持水性能及对表层土壤理化性状的影响[J].水土保持学报,2003,17(2):141-144.
- [2] 冯宜明,李毅,曹秀文,等.甘肃亚高山云杉人工林土壤特性及水源涵养功能对林分密度的响应特征[J].自然资源学报,2018,33(9):1529-1541.
- [3] 周福健,戴全厚,聂林红,等.茅台水源功能区不同植被类型的枯落物及土壤特征[J].水土保持研究,2016,23(2):23-27.
- [4] 杨秀清.影响关帝山华北落叶松天然更新与幼苗存活的微生境变量分析[J].山西农业大学学报(自然科学版),2010,30(6):542-547.
- [5] 董伯骞.华北落叶松林更新过程与枯落物蓄水功能对经营措施的响应[D].保定:河北农业大学,2011.
- [6] 高润梅,石晓东,郭跃东,等.文峪河上游华北落叶松林的种子雨、种子库与幼苗更新[J].生态学报,2015,35(11):3588-3597.
- [7] 张树梓,李梅,张树彬,等.塞罕坝华北落叶松人工林天然更新影响因子[J].生态学报,2015,35(16):5403-5411.
- [8] 石晓东,高润梅,韩有志,等.凋落物对 2 针叶树种种子萌发和幼苗生长的影响[J].中国水土保持科学,2014,12(4):112-120.
- [9] 韩 芬.华北落叶松枝叶挥发物的化感作用及其化学成分分析[D].兰州:甘肃农业大学,2008.
- [10] 张 愿.华北落叶松叶凋落物持水特性以及浸提液对其种子萌发和幼苗生长的影响[D].保定:河北农业大学,2015.
- [11] 石晓东,高润梅,陈龙涛.模拟气候变化对 2 针叶树种种子萌发和幼苗生长的影响[J].中国水土保持科学,2016,14(5):66-73.
- [12] 刘 欣,彭道黎,邱新彩.华北落叶松不同林型土壤理化性质差异[J].应用与环境生物学报,2018,24(4):735-743.
- [13] 姚 健.喀斯特人工林凋落物特性及对土壤生态功能影响[D].南京:南京林业大学,2011.
- [14] 王忠禹,王兵,刘国彬,等.黄土丘陵区典型植被枯落物坡面分布及混入土壤对土壤性状的影响[J].自然资源学报,2018,33(11):2020-2031.
- [15] 杨 霞,陈丽华,康影丽,等.辽东低山区 5 种典型水源涵养林枯落物持水特性[J].生态学杂志,2019,38(9):2662-2670.
- [16] RAZAFINDRABE B H N, HE B, INOUE S, et al. The Role of Forest Stand Density in Controlling Soil Erosion: Implications to Sediment-Related Disasters in Japan [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, 160 (1-4): 337-354.
- [17] 孙千惠,吴 霞,王媚臻,等.林分密度对马尾松林林下物种多样性和土壤理化性质的影响[J].应用生态学报,2018,29(3):732-738.
- [18] 董 威,刘泰瑞,覃志杰,等.不同林分密度油松天然林土壤理化性质及微生物量碳氮特征研究[J].生态环境学报,2019,28(1):65-72.
- [19] BOXMAN A W, ROELOFS J G M. Some Effects of Nitrate Versus Ammonium Nutrition on the Nutrient Fluxes in *Pinus sylvestris* Seedlings. Effects of Mycorrhizal Infection [J]. Canadian Journal of Botany, 1988, 66(6): 1091-1097.
- [20] 任丽娜,王海燕,丁国栋,等.密度调控对华北落叶松人工林土壤有机碳及养分特征的影响[J].干旱区资源与环境,2012,26(4):138-143.
- [21] 刘 玲,王海燕,杨晓娟,等.不同密度长白落叶松天然林土壤有机碳及养分特征[J].东北林业大学学报,2013,41(2):51-55.
- [22] 庞圣江,杨保国,刘士玲,等.桂西北喀斯特山区 4 种森林表土土壤有机碳含量及其养分分布特征[J].中南林业科技大学学报,2018,38(4):60-64,71.
- [23] 王淑平,周广胜,吕育财,等.中国东北样带(NECT)土壤碳、氮、磷的梯度分布及其与气候因子的关系[J].植物生态学报,2002,26(5):513-517.
- [24] 王媚臻,毕浩杰,金 锁,等.林分密度对云顶山柏木人工林林下物种多样性和土壤理化性质的影响[J].生态学报,2019,39(3):981-988.

- [25] 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.
- [26] 赵汝东, 樊剑波, 何园球, 等. 林分密度对马尾松林下土壤养分及酶活性的影响 [J]. 土壤, 2012, 44(2): 297-301.
- [27] 贺志龙, 张芸香, 郭跃东, 等. 不同密度华北落叶松林天然林土壤养分特征研究 [J]. 生态环境学报, 2017, 26(1): 43-48.
- [28] 胡小燕, 段爱国, 张建国, 等. 南亚热带杉木人工成熟林密度对土壤养分效应研究 [J]. 林业科学研究, 2018, 31(3): 15-23.
- [29] 曾小梨, 薛 立, 刘 斌, 等. 不同密度红苞木幼林的土壤理化性质研究 [J]. 水土保持通报, 2010, 30(5): 43-45, 95.
- [30] 王 胤, 杨章旗, 张振林, 等. 林分密度对马尾松人工林林地土化性质的影响 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(36): 20934-20935.

On Litter and Soil Characteristics of *Larix Principis-Rupprechtii* Forest with Different Stand Densities

FENG Yan-hui, LIANG Wen-jun, WEI Xi,
ZHAO Wei-wen, BU Rui-ying, WANG Kai-na

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

Abstract: In order to explore the influence of different forest densities of *Larix principis-rupprechtii* on the characteristics of understory litter and soil, the natural forest of *Larix principis-rupprechtii* in Chailugou and the three-layer soil were used as the research objects. Field investigation and indoor analysis were used to determine the litter volume and soil nutrient mass fraction under different forest densities were analyzed. Two-factor analysis of variance, correlation analysis and LSD multiple comparison were used to analyze the influence of different forest densities on soil physical and chemical properties and litter volume. When the forest density of *Larix principis-rupprechtii* forest in Chailugou was 725 plant/hm², the litter accumulation was significantly greater than other forest density;when the forest density of *Larix principis-rupprechtii* forest in Chailugou was 725 plant/hm², the soil water content and soil porosity were higher than the density of other forests, and the soil bulk density was significantly lower than that of other forests;the content of 0~20 cm soil organic carbon, ammonia nitrogen, and available potassium in Chailugou *Larix principis-rupprechtii* forest 0~20 cm was greater than that of the underlying soil, and the content of total soil phosphorus and available phosphorus was basically less than that of the underlying soil, while the content of total soil nitrogen did not change with the change of soil layer law;The content of soil organic carbon, ammoniacal nitrogen, and available potassium of 0~20 cm, 20~40 cm soil layer basically increased first and then decreased with the increase of forest density, and reached the maximum when the forest density was 725~975 plant/hm². When the stand density was 725 plant/hm², the total nitrogen content of 0~20 cm soil layer was significantly lower than 425 plant/hm² and 975 plant/hm². The stand density of other soil layers had no significant effect on total nitrogen content. When the stand density was 425 plant/hm², 725 plant/hm², the soil total phosphorus content of the three soil layers was significantly greater than 1 550 plant/hm². The soil available phosphorus of 0~20 cm and 20~40 cm soil layers showed no obvious change with the increase of forest density. Over-density or over-sparse forest density is not conducive to soil nutrient cycling and accumulation. When the forest density is 725 plant/hm² in this area, it is beneficial to improve soil structure and promote soil nutrient accumulation.

Key words: *larix principis-rupprechtii*; stand densities; soil nutrients; litter